

分类号: TV213.9

学校代码: 10112

密 级:

太原理工大学

硕士学位论文

(学术学位)

基于改进粒子群算法与 Mike Hydro Basin
软件的阳泉市水资源优化配置研究

姓 名: 李牧翰

学 号: 2020510536

培养单位: 水利科学与工程学院

学 科: 水利工程

研究方向: 智慧水利

指导教师: 赵喜萍 教授

论文提交日期: 2023 年 6 月

A Dissertation Submitted to
Taiyuan University of Technology
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of Master

**Research on optimal allocation of water
resources in Yangquan City based on improved
particle swarm algorithm and Mike Hydro Basin
software**

By
Muhan Li

College of Hydraulic Science and Engineering

June 2023

学位论文答辩信息表

论文题目	基于改进粒子群算法与 Mike Hydro Basin 软件的阳泉市水资源优化配置研究		
答辩日期	2023.05.25	答辩秘书	段智霞
学位论文答辩委员会成员			
姓名	职称	工作单位	备注
晋华	教授	太原理工大学	主席
苏冬阳	正高级工程师	太原理工大学	委员
赵志怀	副教授	太原理工大学	委员

摘要

随着我国社会经济的高速发展,各地区的用水量也逐年攀升,由于我国水资源具有总量有限且时空分布不均等特点,导致我国的北部地区的水资源短缺问题较为严重,且这种现象已经逐渐成为制约我国社会经济可持续发展与高质量发展的重要因素,因此需要对有限的水资源进行科学合理的优化配置来缓解水资源短缺问题所带来的影响。

本研究以山西省阳泉市为研究对象,根据阳泉市的供水特点与需水要求,对水资源的供需进行合理预测。由于用水户取水的随机性,水源供水的不确定性与复杂性,导致估算用水户的用水量与水源供水量时会产生较大误差;同时利用传统经验法对水资源优化配置方案进行求解时会带有较强的主观性,使求解结果与实际情况偏差较大,因此本研究针对水资源优化配置问题中的难点,基于 2011~2020 年各用水户的用水习惯与不同的来水频率,合理预测各用水户的用水量与供水水源的可供水量。基于供需水量预测结果与高质量发展的理念、内涵、需求与指导思想,提出了面向高质量发展的阳泉市水资源优化配置模型框架。根据各行政区的水资源利用模式与管理制度等实际情况,从目标函数、约束条件、算法设计三方面入手,系统性的构建基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置模型,通过模型求解不同规划水平年、不同来水频率、不同节水方案下的最优水资源配置方案。同时利用 Mike Hydro Basin 软件对优化配置方案中的配水量进行合理的月均分配,使供需水量保持稳定,保证社会效益与生态效益最大化。本研究的主要内容与成果如下:

(1) 根据阳泉市的规划,对行政区与水源地进行划分,以 2020 年为现状年,通过分析阳泉市过去 10 年的人口、经济与生态环境变化规律,制定相应的发展指标,并采用定额法与趋势分析法预测各行政区 2025 与 2030 规划水平年的人口、经济、生态环境等指标的发展情况,并求解出相应的需水量;通过典型年调节计算得到各供水水源在不同来水频率下的最大可供水量,在确定供需水量的基础上,基于高质量发展的理念与内涵,构建阳泉市水资源优化配置模型框架,在该框架下对两种节水方案进行水量供需平衡分析,分析结果表明在 2025 与 2030 规划水平年,普通节水方案中在来水频率 $P=95\%$ 与 $P=75\%$ 的情况下,阳泉市可供水总量难以满足阳泉市的用水需求,建议采用推荐节水方案,同时加大节水设备与节水技术的普及率,以实现水资源供需平衡。

(2) 基于阳泉市供用水特点与水资源供需平衡计算结果,遵循节水优先、人水和谐、生态文明、可持续发展等理念,根据各行政区的水资源的利用模式与管理制度,构建以社会稳定、经济增长、生态健康为目标的综合评价函数与相应的约束条件,并以此为基础构建阳泉市水资源优化配置模型,通过分析用水户与水源现状,确定模型中的参数的取值,并采用改进粒子群算法对阳泉市各行政区在不同条件下的水资源优化配置方

案进行求解。并从各用水户的配水量、缺水率、经济效益、生态效益等几个方面对求解结果进行分析，分析结果表明，利用改进粒子群算法求解出的水资源配置方案是科学合理的，同时表明基于改进粒子群算法的水资源优化配置模型具有较强的适用性。

(3) 由于粒子群算法在求解复杂问题时存在易陷入局部最优、局部寻优能力差、对离散问题处理不佳等缺点，为克服以上缺点，提高算法的精度、收敛性与适用性，提出了四种针对惯性权重与学习因子的改进方案，同时通过引入 ZDT4 测试函数对使用不同改进方案的粒子群算法的性能进行对比分析，分析结果表明：使用第四种改进方案（对惯性权重与学习因子进行线性改进）的粒子群算法全局寻优能较强、收敛精度高且最为稳定。确定改进方案后，对改进粒子群算法中的相应参数的敏感性进行了分析，并找到了在求解阳泉市水资源优化配置时，模型中不同参数的最优取值，分析结果表明改进后的粒子群算法可应用于求解阳泉市水资源优化配置模型，为水资源优化配置方案的研究提供了一种新的解决方案。

(4) 由于利用改进粒子群算法求解出的水资源优化配置方案为年均水资源优化配置方案，为使阳泉市各行政区每月缺水量最低，满足各用水户平稳的需水要求，需要在求解出的水资源优化配置方案的基础上，根据不同用水户的用水特点制定不同的月均水资源优化配置方案，以保障经济的发展与社会的稳定。

使用 Mike Hydro Basin 软件求解阳泉市月均水资源优化配置方案，并基于阳泉市的气候地理现状与粒子群算法所求解的水资源优化配置方案进行建模，把供水与用水数据输入模型中，针对不同用水户的特征，求解出不同用水户的最优月均水资源配置方案，保障阳泉市的社会经济发展。

关键词：水资源；优化配置；改进粒子群算法；高质量发展；多目标模型；Mike Hydro Basin 软件

ABSTRACT

With the rapid development of China's social economy, the water consumption of various regions is also rising year by year, because China's water resources have the characteristics of limited total amount and uneven distribution in time and space, resulting in a more serious water shortage problem in northern China, and this phenomenon has gradually become an important factor restricting China's sustainable social and economic development and high-quality development, so it is necessary to carry out scientific and reasonable optimization of limited water resources to alleviate the impact of water shortage.

In this study, Yangquan City, Shanxi Province was taken as the research object, and the supply and demand of water resources were reasonably predicted according to the water supply characteristics and water demand requirements of Yangquan City. Due to the randomness of water withdrawals by water users, the uncertainty and complexity of water supply will lead to large errors in estimating the water consumption of water users and the amount of water supply supplied by water sources; At the same time, the traditional empirical method will have strong subjectivity when solving the optimal allocation of water resources, so that the solution results deviate greatly from the actual situation, so this study aims at the difficulties in the problem of optimal allocation of water resources, based on the water habits of each water user and the different frequency of water supply in 2011 and 2020, reasonably predict the water consumption of each water user and reasonably predict the water supply of water sources. Based on the forecasting results of supply and demand and the concept, connotation, demand and guiding ideology of high-quality development, the model framework of optimal allocation of water resources in Yangquan City for high-quality development is proposed. According to the actual situation of water resources utilization mode and management system of each administrative region, starting from the three aspects of objective function, constraint condition and algorithm design, the optimal allocation model of water resources in Yangquan City based on the improved particle swarm algorithm is systematically constructed, and the optimal water resource allocation scheme under different planning levels, different water frequency and different water-saving schemes is solved through the model. At the same time, Mike Hydro Basin software is used to make a reasonable monthly average allocation of water distribution in the optimal allocation plan, so that the water supply and demand are stable and the social and ecological benefits are maximized. The main contents and results of this study are as follows:

(1) According to the planning of Yangquan City, the administrative districts and water sources are divided, taking 2020 as the current year, through the analysis of the changes in population, economy and ecological environment in Yangquan City in the past 10 years, corresponding development indicators are formulated, and the quota method and trend analysis method are used to predict the development of population, economy, ecological environment and other indicators in the planning level of each administrative district in 2025 and 2030, and solve the corresponding water demand; The maximum water supply of each water supply source under different water frequency is obtained through the calculation of typical annual adjustment, and on the basis of determining the supply and demand of water supply, based on the concept and connotation of high-quality development, the optimal allocation model framework of water resources in Yangquan City is constructed, and the balance of water supply and demand of the two water-saving schemes is analyzed under this framework. The analysis results show that in the 2025 and 2030 planning levels, under the condition that the frequency of water supply $P=95\%$ and $P=75\%$ is in the ordinary water-saving scheme, the total amount of water available in Yangquan City is difficult to meet the water demand of Yangquan City, and it is recommended to adopt recommended water-saving solutions, and increase the penetration rate of water-saving equipment and water-saving technologies to achieve a balance between water supply and demand.

(2) Based on the characteristics of water supply and the calculation results of water supply and demand balance in Yangquan City, following the concepts of water conservation priority, human-water harmony, ecological civilization and sustainable development, according to the utilization mode and management system of water resources in each administrative region, a comprehensive evaluation function and corresponding constraints aimed at social stability, economic growth and ecological health were constructed, and the optimal allocation model of water resources in Yangquan City was constructed on this basis. By analyzing the current situation of water users and water sources, the values of the parameters in the model were determined, and the improved particle swarm algorithm was used to solve the optimal allocation scheme of water resources in various administrative districts of Yangquan City under different conditions. In this study, the results of this study are analyzed from the aspects of water allocation, water shortage rate, economic benefits and ecological benefits of each water user, and the analysis results show that the water resource allocation scheme solved by the improved particle swarm algorithm is scientific and reasonable, and the water resources optimization allocation model based on the improved particle swarm algorithm has strong applicability.

(3) Due to the shortcomings of particle swarm optimization in solving complex problems, such as easy to fall into local optimization, poor local optimization ability, and poor handling of discrete problems. In order to overcome the above shortcomings and improve the accuracy, convergence and applicability of the algorithm, four improvement schemes for inertia weights and learning factors are proposed, and the performance of particle swarm algorithms using different improved schemes is compared and analyzed by introducing ZDT4 test functions. The analysis results show that the particle swarm algorithm using the fourth improvement scheme (linear improvement of inertia weights and learning factors) has strong global optimization energy, high convergence accuracy and the most stable. After determining the improvement scheme, the sensitivity of the corresponding parameters in the improved particle swarm algorithm is analyzed, and the optimal values of different parameters in the model are found when solving the optimal allocation of water resources in Yangquan City, and the analysis results show that the improved particle swarm algorithm can be applied to solve the optimal allocation model of water resources in Yangquan City, which provides a new solution for the research of the optimal allocation scheme of water resources.

(4) Since the optimal allocation scheme of water resources solved by the improved particle swarm algorithm is the optimal allocation scheme of annual water resources, in order to make the monthly water shortage of each administrative district of Yangquan City the lowest and meet the stable water demand requirements of each water user, it is necessary to formulate different monthly average water resources optimal allocation schemes according to the water characteristics of different water users on the basis of the solved water resources optimization allocation scheme, so as to ensure economic development and social stability.

Mike Hydro Basin software is used to solve the optimal allocation scheme of monthly water resources in Yangquan City, and based on the climate and geography of Yangquan City and the optimal allocation scheme of water resources solved by particle swarm algorithm, the water supply and water data are input into the model, and the optimal monthly average water resource allocation scheme of different water users is solved according to the characteristics of different water users, so as to ensure the social and economic development of Yangquan City.

Keywords: Water resource; optimal allocation; improved particle swarm optimization; high-quality development; multi-objective model; Mike Hydro Basin software

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 水资源优化配置研究现状.....	2
1.2.2 粒子群算法研究进展.....	3
1.2.3 Mike Hydro Basin 软件研究进展.....	4
1.3 研究目标、研究内容、研究方法与研究方案	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	6
1.3.3 研究方案.....	7
1.4 技术路线与创新点.....	8
1.4.1 技术路线.....	8
1.4.2 创新点.....	10
第二章 阳泉市基本概况	11
2.1 研究区概况.....	11
2.1.1 自然地理情况.....	11
2.1.2 地质地貌.....	12
2.1.3 土壤植被.....	13
2.1.4 气候条件.....	13
2.2 社会经济状况.....	14
2.2.1 行政区规划.....	14
2.2.2 经济发展.....	15
2.3 水资源状况.....	16
2.3.1 降雨资源.....	16
2.3.2 地表水资源.....	17
2.3.3 地下水资源.....	20
2.3.4 水资源总量.....	20
2.3.5 阳泉市水资源在开发利用中的问题.....	20
2.4 本章小结.....	22
第三章 阳泉市供需水量预测分析	23
3.1 水源、用水户组成.....	23
3.2 需水量预测.....	24
3.2.1 经济社会指标预测.....	25
3.2.2 生活需水预测.....	30

3.2.3 工业需水预测.....	32
3.2.4 第三产业需水预测.....	33
3.2.5 农业需水预测.....	35
3.2.6 生态需水预测.....	37
3.2.7 总需水量预测汇总.....	40
3.2.8 需水预测精度分析.....	40
3.2.9 阳泉市需水量时空变化分析.....	42
3.3 供水量预测.....	44
3.3.1 地表水可供水量预测.....	44
3.3.2 地下水可供水量预测.....	52
3.3.3 非常规水源可供水量预测.....	53
3.3.4 可供水总量预测.....	53
3.4 水资源供需平衡分析.....	55
3.4.1 一次供需平衡分析.....	55
3.4.2 二次供需平衡分析.....	58
3.5 本章小结.....	60
第四章 阳泉市水资源优化配置模型的建立与求解	61
4.1 阳泉市水资源优化特点及优化配置模型框架	61
4.1.1 阳泉市水资源特点与优化配置需求.....	61
4.1.2 模型框架构建.....	62
4.2 阳泉市水资源优化配置模型的建立	63
4.2.1 目标函数.....	63
4.2.2 约束条件.....	64
4.2.3 整体模型.....	66
4.2.4 确定模型参数.....	67
4.3 阳泉市水资源优化配置模型求解方法	70
4.3.1 粒子群算法.....	70
4.3.2 传统粒子群算法改进.....	70
4.3.3 基于改进粒子群算法模型的求解方案	72
4.3.4 算法有效性检验.....	73
4.3.5 参数敏感性分析与最优参数求解.....	76
4.4 阳泉市水资源优化配置结果	78
4.5 阳泉市水资源优化配置模型结果分析	85
4.5.1 各用水户配水量分析.....	85
4.5.2 缺水量分析.....	88
4.5.3 经济效益分析.....	93
4.5.4 生态环境效益分析.....	96
4.6 对阳泉市不同方面的发展建议	99

4.7 本章小结.....	100
第五章 Mike Hydro Basin 软件在水资源优化配置中的应用	101
5.1 Mike Hydro Basin 软件	101
5.1.1 模型介绍	101
5.1.2 模型构建	101
5.2 模拟过程	107
5.3 模拟结果分析	111
5.4 本章小结	111
第六章 结论与展望	113
6.1 结论	113
6.2 展望	114
参考文献	115

第一章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

在全球水资源短缺现象愈发突出的背景下,水资源优化配置受到各国政府的高度重视。联合国于2015年发布了17项可持续发展目标SDGs(Sustainable Development Goals),以解决经济、社会、生态环境等维度的可持续发展问题。其中,SDG6.4明确指出要通过各种手段减少缺水地区的数量与缺水地区的人数,并提高水资源利用效率,实现水资源的可持续管理与利用^[1]。要实现该目标就需要帮助缺水地区在水资源优化配置方面做出合理的规划与科学的指导。21世纪以来,中国将水资源优化配置作为水利事业的重心之一。2021年我国发布了《“十四五”节水型社会建设规划》,规划中明确指出水资源严重短缺是我国的基本国情,也是制约我国经济社会发展的重要因素,因此通过科学合理的规划水资源优化配置方案、大力推进节水型社会的建设等措施来提升水资源的利用率、提高水资源利用效益是缓解我国水资源供需矛盾的重要举措,也是保障我国供水安全与用水安全的必然选择,对我国的居民生活质量的提高、社会经济与生态环境实现高质量发展具有重要意义。同时,我国水资源的时空分布特征也决定了我国北方缺水地区将长期面临着难以突破的水资源短缺困境^[2]。2017年,我国经济进入了新的高质量发展阶段,对北方地区的水资源保障能力与利用模式提出了更高要求。2019年,黄河流域生态保护和高质量发展正式上升为国家重大战略,科学的水资源优化配置成为战略顺利实施的有力抓手^[3]。

目前,全球的用水需求随着经济增长而快速增长,2021年美国地质调查局USGS(United States Geological Survey)发布了《水资源研究行动计划(2020~2030)》,该计划将缓解水资源竞争性使用压力作为未来的优先研究事项之一^[4]。山西省作为我国北方缺水地区的典型代表,存在可用水资源总量有限、部分地区水资源开发利用过度、水资源承载能力与生产力布局不匹配等问题,因此如何科学有效的解决以上问题是现阶段山西省高质量发展所面临的重大战略问题。水资源优化配置作为提高用水效益、缓解用水压力的有效措施,使国内外诸多学者均对其相关理念、方法与实践开展了大量研究,相关研究尺度涉及了国家^{[5],[6]}、流域^{[7]~[9]}、地区^{[10],[11]}、灌区^{[12],[13]}、城市^{[14],[15]}以及不同产业的用水分配^{[16],[17]}。

相关研究方法有多目标规划、智能群算法、遗传算法、MATLAB编程、运筹学等方法,同时也有许多相关的研究软件如Mike Hydro Basin、WEAP等来辅助研究水资源优化配置问题。国内外学者在研究水资源优化配置问题时所选定的地区大多为重要城市、重要水源地,对水源较小且较为分散的地区关注度较低,同时我国很多经济不发达的地区大多存在水源地较小、产业结构不合理、缺水情况严重、水资源配置方案不合理等

问题,因此在水资源天然禀赋条件无法改变的前提下,水资源短缺地区的工作重点就转变为,研究如何通过调整水资源利用结构与当地的产业结构,来实现对水资源的科学配置,并提升水资源利用效益、提高居民生活水平、缩小地区间发展差异。因此,构建面向我国高质量发展的缺水地区水资源优化配置框架并开展应用研究,对缓解我国缺水地区的水资源供需压力与推动区域高质量发展具有重要意义。

在此背景下,研究如何在高质量发展的前提下,把小且分散的水源进行科学有效的调度、配置,显得尤为重要。因此本文以山西省阳泉市为研究对象,根据当地特点提出优化人口结构、优化产业结构、构建节水型社会、改善供水结构与用水效率的建议,对提高水资源的利用率、优化阳泉市水资源配置方案、提高用水效益与水资源利用率、改善地区间竞争性用水、解决水资源禀赋条件与生产力不相匹配等问题有具有重要意义,使阳泉市的经济社会与生态环境达到高质量发展与可持续发展的总要求。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水资源优化配置研究现状

国外关于水资源优化配置的研究始于 1940 年左右, Masse 等人提出了水资源调度问题,并进行了探索^[18]; N.伯拉斯等人运用了运筹学的方法利用计算机软件对水资源开发问题进行了分析,并对其进行了优化^[19]; Linderbroy 等人利用线性规划模型处理了地表水与地下水水量关系难题,并且随着计算机性能的提升和模拟技术的发展与更新,水资源配置领域的研究成果也大量出现^[20]; Pearson 等人在对英国水库进行调查分析后,以水库的供水量与当地的需水量为约束,通过二次规划法求解了英国典型地区的水量供需平衡问题^[21]; 在 1990 年左右,由于工业快速发展,水污染问题成较为突出,此时传统的水量供需平衡与经济效益目标函数相结合的方法已不能满足研究与应用要求,因此一些学者提出水环境生态效益指标,并进行应用与优化。Wong 等人建立了一个地表水的多目标多阶段优化配置方案,并提出了针对地下水污染日益严重等问题的应对方法与处理措施,促进了水资源配置研究的发展^[22]; Kuamr 等人提出了一种污水排放模糊优化模型,基于不同的调查结果设置相对的约束条件,求解流域水质的管理方案^[23]; Y.L 等人以流域为研究对象建立了水资源管理模型,并使用模型求解了相关区间值的模糊性问题^[24]; Wang 等人建立了两阶段随机规划模型,该模型考虑了风险理论,并可对不同类型的水资源配置问题进行求解,为提高水资源利用率提供了理论支撑^[25];

与国外相比,国内关于水资源优化配置的研究虽然起步较迟,但可借鉴国外的研究成果快速的形成自己的研究体系,目前在该领域的研究已经取得了一些先进成果:施熙灿等人以流域为对象,以流域中的水循环为前提,提出了基于市场经济条件下的水资源配置方案,并在学术界引起了广泛的讨论^[26]; 于海等人建立了区域水资源分质供水模型,

根据水的不同品质与不同用水户的用水要求,有针对性的进行分质供水,提高了水资源的利用率^[27];屈国栋等人通过分析不同区域水资源配置情况,使用特定的方法评价不同区域的水资源承载力,通过评价提出合理的水资源利用建议,并对水资源配置方案进行优选及综合评价^[28];莫淑红等人在研究水资源配置模型时引入了区间数与概率密度函数,通过工程实践可知该模型具有一定的参考价值^[29];付殿峥等人构建了多重不确定优化模型,并提出相应的水资源配置方法,来解决水资源配置系统中所存在的问题^[30]。

基于以上的研究可以看出目前关于水资源优化配置的研究已经趋于完善,从宏观上看,该领域的研究一直基于现实问题,学科从无到有、发展日渐成熟。由于自然界中的水资源系统较为复杂,随着了解的深入,整体的研究趋势也逐渐从单一目标的优化配置问题转向多维目标的优化配置问题。随着水资源配置模型越来越多元化,其所要表现的内核也更加精准,所得出的结论更加系统,即从之前个人决策的“策略导向”模式转向为现代多维目标群体决策的“综合效益”模式^{[31]~[34]},且这种策略的转变对于现实问题的研究更具有指导意义^[35]。

1.2.2 粒子群算法研究进展

粒子群算法又称为 PSO(Particle Swarm Optimization)算法,是由 Eberhart 与 Kennedy 等人于 1995 年基于鸟类觅食行为所提出的^[36]。相比于其他遗传算法,粒子群算法具有参数少、收敛快等特点,可用于求解多目标优化问题^[37]。目前粒子群算法已经广泛的应用到了水资源优化调度^[38]、电力调度^[39]、农作物灌溉^[40]、农业水文^[41]等领域。

马建琴等人针对濮阳市灌区的水资源短缺问题,利用基于免疫进化的粒子群算法进行了求解,该算法计算较为简单,克服了易陷入局部最优的不足,为灌区水资源优化配置提供了理论依据^[42];郭毅等人把基尼系数与纳什系数作为度量水资源公平程度与效率高低的指标引入到水资源优化配置的研究中,并以经济效益与社会效益为目标,运用 NSGA-II 算法对模型进行求解,求解的方案降低了缺水率,为流域各区域协调发展提供依据^[43];王文君等人利用改进后的粒子群算法建立了平原坡水资源的优化调度模型,测试结果验证了改进粒子群算法的可行性与优越性,并以宿迁市黄河故道以南的地区为研究对象,结果显示改进后的粒子群算法为解决多目标问题的有效方案^[44];方国华等人基于研究区水量与水质两个因素建立了多目标水资源配置模型,并使用改进粒子群算法进行求解,求解出的水资源配置结果在缓解了当地水资源短缺状况的同时降低了污染物的排放量,保护了当地的水生态环境,为解决其他地区的水质型缺水问题提供解决方案^[45];由于忻州-阳泉地区水资源短缺问题较为严重,李承龙等人以该地区为研究对象,建立了以供水-发电-生态为目标的水资源配置模型,利用改进后的粒子群算法求解了丰水年、平水年、枯水年三种不同来水条件下的最优水资源配置方案,结果表明求解的水资源配置方案可以真实有效的反映研究区的供水需求,可平衡各区域间水资源的调度关系,使

研究区的经济社会与生态环境可持续发展^[46]；赵燕等人以孟县的经济-社会-生态综合效益最大化为目标，构建了孟县的多目标水资源配置模型，使用线性加权法将多目标模型转换为单目标模型，降低了求解难度，并利用改进的萤火虫算法对模型进行求解，求解出的水资源配置方案科学合理，可保证孟县水资源的供需平衡^[47]；杜柏林等人将模拟退火的思想引入到了粒子群算法中，解决了粒子容易陷入极小值的问题，并使用优化后的算法求解了陕西省渭南市大荔县三种不同来水量情况下的水资源优化配置问题，结果表明：与优化前的水资源配置方案相比，节水量有了较大的提高，并提高了水资源利用率，缓解了水资源供需矛盾^[35]；

本次针对阳泉市的水资源优化配置模型在求解的过程中需要避免出现局部最小值解，并提高模型的全局寻优能力。基于上述研究可知，可通过对传统的粒子群算法进行改进来克服易陷入局部最优与全局寻优能力差的缺陷，并把改进后的粒子群算法应用于求解阳泉市综合效益最优的水资源优化配置方案中，以实现科学合理利用阳泉市水资源的目的。

1.2.3 Mike Hydro Basin 软件研究进展

Mike Hydro Basin 是由丹麦水利研究所 DHI (Danish Hydraulic Institute) 开发的一款水资源综合管理模拟软件，该软件可应用于任意流域尺度，对受时间、空间等因素影响的水资源供需平衡进行分析、管理与规划^[48]；该软件在水资源优化配置^[49]、水库调度^[50]，水资源供需平衡研究^[51]、水资源方案决策支持^[52]领域已经得到了广泛了应用。

Lesnik J.R 等一众研究人员对美国北卡罗来纳州的恐怖角河流域建立了 Mike basin 水资源配置模型，并通过模拟不同水量分配情况的结果来为决策者提供可靠的参考^[53]；Jha MK 建立了泰国东北部城门河流域的模型并为当地的决策者提供了有效的决策依据^[54]；Vaitiekunienė J 通过 Mike basin 的降雨径流模型对立陶宛的水量平衡进行了分析^[55]；Korsgaard L 分析了水资源综合管理中的重要挑战，并用各种方法连接到 Mike basin 中进行计算^[56]；Shehata M 用 Mike basin 模型对埃及西奈半岛的旺地阿里什地表水供水状况进行了分析，基于灌溉与供水的可靠性的计算分析其结果总结出来可靠的水资源优化配置模型^[57]；Ireson A 利用 Mike basin 模型与 ASM 地下水模型进行耦合，解决了计算数据与信息不全地区建模困难的问题，该方法可以指导数据收集工作，并可告知战略决策相关的水框架指令进行应用的相关过程^[58]；Hassaballah ah K 通过多目标遗传算法与 Mike basin 软件进行结合，对多水库联合调度进行了模拟，并找到了最佳水库调度方案^[59]；Wong 等研究人员在多水源联合调度的研究中引入了地下水保护的措施^[60]；Abraham M 等研究人员建立了多水源与多水质的水资源联合调度模拟方案，有效解决了当地水资源调配的问题^[61]。

张旭昇等人基于 Mike basin 软件对白龙江引水工程的受水区的供水源与用水对象进行了建模,通过模拟在复杂用水条件下研究区内不同供水水源间联合调度状况,成功预测了规划水平年 2040 年的地表水、地下水、外调水的用水量与缺水量,对当地的水资源配置提供了借鉴^[62];王蕾、肖长来等人利用 Mike basin 软件对吉林市第二松花江流域的水资源配置方案进行了建模,找到了该流域的缺水区域,并预测了不同缺水区域的缺水量。然后通过对地表水与地下水进行联合调度的方式进行模拟,找到了合适的水资源配置方案^[63];王晓妮、王晓欣等人根据松花江流域的情况与水资源管理的需求建立了松花江流域水资源配置模型框架,进行了参数率定以及水资源配置方案的确定,为流域水资源的管理与调度提供了科学依据与决策支持^[64];刘昊宗学者指出了我国水资源配置方面现存的问题,并指出了我国未来水资源配置的发展方向^[65];王浩等人依据我国水资源配置方面现存的问题,提出了 5 个水资源配置发展的阶段,并讲述了水资源配置发展的过程^[66];刘金铎利用 Mike basin 软件在调查清楚双柏县水资源情况的基础上进行水资源配置方案的优化,对该县水资源的供需平衡进行了分析并确定了该县的缺水程度,为该县的水资源配置提供了依据^[67];杨芬、王萍等人以北京为研究对象,基于 Mike basin 在 GIS 平台上对北京市的水资源配置模型进行了建模,通过对比不同条件下的水资源配置模型发现该软件的模拟结果较为精确,可为水资源管理提供技术支撑^[68];吴俊秀与郭清利用 Mike basin 软件对大凌河流域的水资源进行了建模,并与实测资料相对比发现误差均小于 5%,证明了该软件在流域水资源管理上的优势^[69];陈凯、李就好等人员基于 Mike basin 软件对汕尾市的水资源配置方案进行了建模,采用四级流域套县为基本单元进行水资源供需平衡分析,使该研究区的生产生活生态用水的保证率得到了提高^[70];顾世祥、李远华当研究人员基于三次供需平衡理论,利用 Mike basin 软件对云南的元江-红河流域进行了模拟,求解出了可以使当地水资源供需达到平衡的模型结果^[71];王旭、袁亚男等人以滨江海域的人工开挖河的河道为研究对象建立了 Mike basin 模型,在数据资源有一定缺失的条件下通过耦合 NAM 降雨径流模型,并用分割法与相似流域评价法对模型进行验证,结果误差较小且具有较强的适应性^[72];王瑶瑶利用 Mike basin 对莱州市的水资源调配模型进行建模,并使用定额法、灰色关联分析法等方法对 2025 年以及 2030 年的莱州市用水量进行了预测并采用多目标优化求解的方法来对模型的构建进行规划,由此得出了当前莱州市最佳的水资源配置方案^[48];卢书超利用 Mike basin 软件对石羊河流域的蔡旗断面进行了建模,在研究中它针对蔡旗断面的下泄水量为目标,使节水模式最优与生态目标最优这两目标相协调,为实现当地的湿地治理目标提供了理论支撑,并且该研究者对 Mike basin 进行了二次开发,增强了模型的运行效率^[73];赵志平用定额法对阳泉盆地的 2020 年与 2030 年的水资源供需情况做出了预测,并做出了相应的水资源配置分析,设置了合理的配置方案^[74];杜丽霞等人结合阳泉市的水资源的开发利用、节约保护等方面的现状对阳泉市的水资源开发利用的问题进行了深入的分析并提出了相应

的解决方案^[75]；王卫平在阳泉市水资源量及分布特征的基础上分析了不同行政区的用水现状并提出了相应的水资源保护措施^[76]；王文君调查了阳泉市的水污染现状与中水再利用的情况，探索中水再利用的方案，对解决阳泉市水资源短缺现状有指导意义^[77]；魏燕华研究了阳泉市农村引水工程的现状，针对由于工程导致的采煤漏水、地下水污染、地下水水位下降等问题从多方面进行了深入的探讨^[78]。

整体而言，水资源优化配置的相关研究已逐步发展出了相对完善的理论体系和研究方法体系，为地区水资源可持续利用提供了重要的理论依据和技术支撑。但就中国北方缺水地区而言，如何面向高质量发展构建水资源优化配置模型仍未得到系统探讨。因此，本研究立足于北方缺水地区高质量发展需求和水资源实际，构建水资源优化配置模型并改进求解算法，并在山西省阳泉市开展实例应用。

1.3 研究目标、研究内容、研究方法与研究方案

1.3.1 研究目标

本研究的目标是高效使用阳泉市的地表水与地下水水源，在合理调用龙华口调水与娘子关泉水，并充分利用非常规水源的基础上，以满足各行政区的需水量为目标，对各行政区的生活用水、农业用水、工业用水、第三产业用水与生态环境用水的需水量进行合理分析预测，并综合考虑各水源供水量、地形地势、水利工程现状、供水管道现状、各行业的发展情况、生态环境现状等因素，进行多区域、多水源、多用水户的水资源优化配置分析，求解出最优水资源配置方案，为其他缺水地区求解水资源优化配置问题提供理论基础与技术支持。

1.3.2 研究内容

本研究基于高质量发展理论，以阳泉市水资源优化配置方案为研究对象，通过对阳泉市的供需水量进行预测，在当地水资源承载能力的基础上，构建基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置模型，求解在不同来水条件情况下的水资源优化配置方案，并使用 Mike Hydro Basin 软件对优化配置方案进行建模，求解年内水资源最优配置方案，使社会效益与生态环境效益均最大化。具体研究内容如下：

1. 需水量预测

本论文根据行政区划分结果，以 2020 年为现状年，对近期规划年 2025 年与远期规划年 2030 年的生活用水、农业用水、生产用水、第三产业用水、生态环境用水进行需水量的预测，分析各行政区不同用水户的需水特征与用水分布特点。

2. 供水量预测

根据对阳泉市的供水水源进行调查可知,当地的供水水源包括:地表水源、地下水源、娘子关提水水源与非常规水源,地表水源中的龙华口调水工程将于 2025 年建成,建成后可进行供水。对所有供水水源在不同来水频率下的最大可供水量进行了预测。

3.水量供需平衡分析

针对各行政区的用水量与可供水量进行两次供需平衡分析,得到各行政区在不同节水方案、不同规划水平年、不同来水频率情况下的余水量与缺水量,并对各行政区的缺水原因进行合理分析,同时针对缺水原因对水资源优化配置方案进行科学求解。

4.构建面向高质量发展水资源优化配置框架

针对山西省阳泉市水资源短缺较为严重地区的现象进行详细的分析,基于当地的水资源禀赋条件与不同行政区间的城市化进程与发展特点进行分析,找到区域水资源短缺特点与优化配置需求,针对性的提出面向高质量发展的水资源优化配置模型框架。

5.阳泉市水资源配置模型的建立与求解

根据阳泉市水资源现状与用水特点,结合《“十四五”节水型社会建设规划》的相关要求,构建社会效益、经济效益、生态环境效益的目标函数,并建立阳泉市的水资源优化配置模型。模型以水源供水量、用水户需水量、生态环境纳污总量以及所有变量非负为约束构建约束条件依据相关规范确定目标函数中经济效益系数、供水顺序系数、用水公平系数、污水排放系数、污水处理率、污水回用率等相关系数,并采用改进的粒子群算法求解阳泉市各行政区在不同供用水条件下的水资源优化配置方案,求解结果与实际供用水量进行对比分析,以验证配置方案的合理性。

6.水资源合理配置

在充分考虑各行政区不同用水户的需水特点、用水特征、水源分布特点、水源在不同来水条件下的最大可供水量等因素的基础上,充分结合阳泉市的地形地貌、气候等特征,在尽可能不改变原有供水线路的基础上,科学合理的划定不同水源的供水区域,构建立合理的多目标优化配置函数,给定相应的约束条件,并进行初步的水资源供需平衡计算,得到阳泉市各行政区的缺水量与余水量,总结阳泉市水资源供用问题,并用改进粒子群算法求解水资源优化配置方案。为求解阳泉市各行政区最优月均水资源优化配置方案,把所求解水资源配置方案输入 Mike Hydro Basin 模型中,对优化配置方案中的供水量进行合理的月均分配,使各行政区的月均缺水量与余水量均最小,使用有限的水资源获取最大的经济效益与生态效益,并对求解结果进行分析总结。

1.3.3 研究方案

研究选择 2020 年为现状年,2025 年为近期规划水平年、2030 年为远期规划水平年,研究基于高质量发展理论,在不同用来水保证率情况下,以阳泉市为研究区,开展多目标水资源优化配置研究。研究方案如下:

1.需水量预测：通过广泛收集阅读阳泉市的相关资料与文献，掌握阳泉市的地形地貌、气候条件、社会经济、流域水资源概况等相关信息，着重分析不同用水户在水资源使用过程中存在的问题与原因，预测阳泉市的节水潜力。利用定额法、趋势法、人均用水量预测法、水利用系数法等基本预测法进行需水量预测，同时利用灰色关联系数法对所预测的需水量进行验证。

2.供水量预测：可利用典型年调节计算的方法进行预测分析，其中地表水水源主要包括供水水库与龙华口调水工程，供水水库是由 6 座具备供水功能的水库组成，龙华口调水工程主要调取滹沱河的水资源供给阳泉市使用，地表水水源可供水量可通过典型年的兴利调节计算得到不同来水保证率情况下（ $P=50\%$ 、 75% 、 95% ）的最大可供水量。同时规定地下水水源与娘子关泉水的取水量不超过 2020 年水平，非常规水源供水量根据当地的污水处理厂建设情况与污水处理厂的处理能力确定。

3.阳泉市供需水量的水量平衡分析：依据阳泉市行政区的划分可知共可分为 5 个行政区，分别为：城区、矿区、郊区、平定县、盂县。利用趋势法、定额法与典型年兴利调节计算等方法来预测供需水量，以 2020 年为现状年，以 2025、2030 年为近、远期规划水平年，在考虑三种不同（ $P=50\%$ 、 75% 、 90% ）来水保证率与两种节水方案（“普通节水方案”、“推荐节水方案”）的情况下，进行水量的供需平衡分析，得出阳泉市水量供需特点，为水资源优化配置方案的制定提供参考与技术指导。

4.模型建立：阳泉市发展的要遵循高质量发展的理念、需求与内涵，并基于易量化、有代表性、符合水资源合理配置要求等原则，建立阳泉市基于高质量发展的水资源优化配置模型框架。基于该框架对粒子群算法进行改进，并通过 ZDT4 测试函数进行测试，验证改进方案的合理性，并运用于算法中，通过对比分析求解结果的适应度值，对求解结果的准确性进行判断。

5.方案求解：针对阳泉市水源情况与用水户情况确定 Mike Hydro Basin 模型参数。通过 2011~2020 年的水资源供用量来测试模型精度，在误差小于 5%的条件下，根据阳泉市水源在一年中供水的特点将供水量换算为供水时间序列，根据阳泉市用水户特点将用水量换算为用水时间序列，通过调整时间序列求解在水资源短缺的情况下，对社会稳定、经济运行、生态环境影响最小的，可行性最高水资源配置方案。

1.4 技术路线与创新点

1.4.1 技术路线

技术路线图如 1-1 所示。

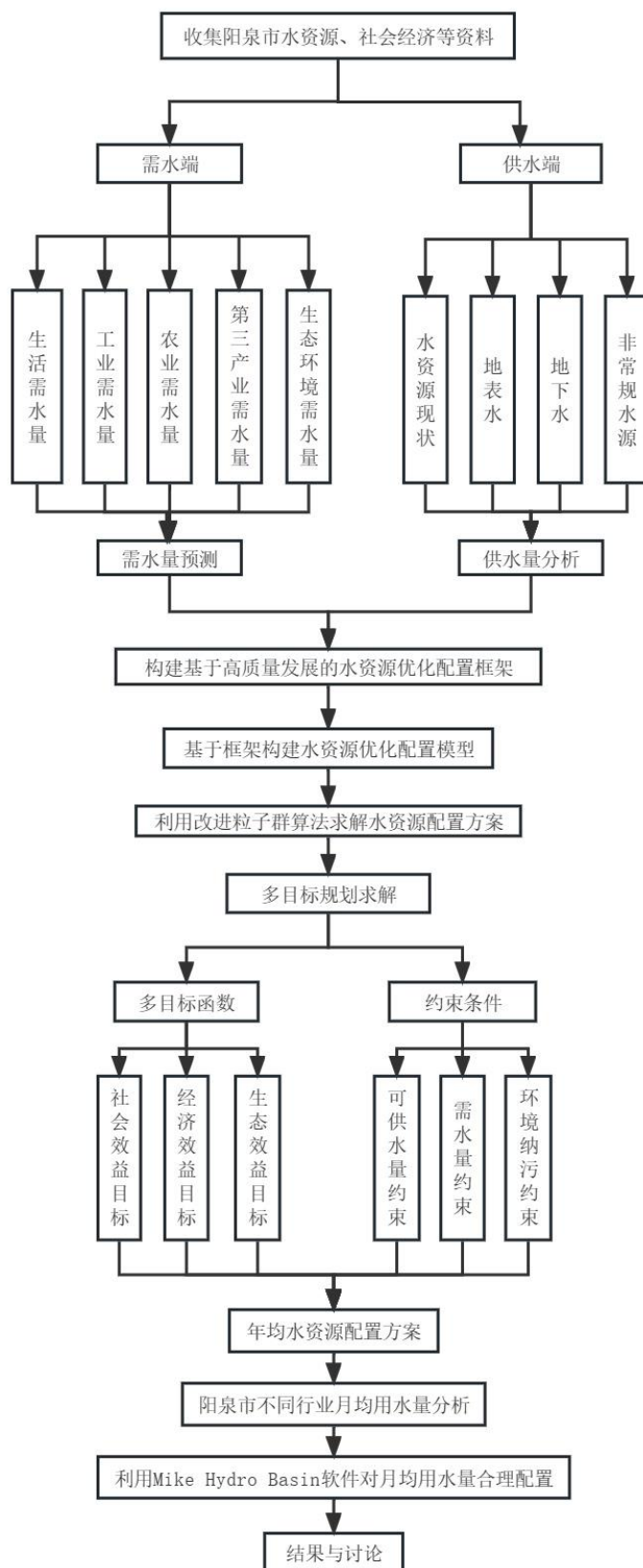


图 1-1 技术路线图

Fig. 1-1 Technical roadmap

1.4.2 创新点

1.提出了多水源向多用水户联合供水的水资源优化配置模型。针对阳泉市水源地较为分散、水资源利用率低、水资源污染严重等特点,综合考虑当地的地形条件、地貌条件、气候条件、水源供水条件、各行业需水条件等因素构建了基于供水量约束、需水量约束、污染物排放量约束的多目标水资源优化配置模型。

2.根据阳泉市不同行政区的缺水特点,有针对性的提出了不同的优化配置需求,依据高质量发展的理念、内涵与需求构建面向高质量发展的阳泉市水资源优化配置框架;并基于面向高质量发展的水资源优化配置框架构建多水源向多用水户供水的水资源调配模型。利用改进粒子群算法对水资源优化配置模型进行求解,得到不同来水条件下的水资源优化配置方案。

3.构建了不同水资源优化配置方案下的月均水资源分配模型。利用 Mike Hydro Basin 软件对不同水资源配置方案进行建模,并根据不同地区不同用水户在不同月份用水的规律对有限的水资源进行合理配置,保障用水户的用水安全,使有限的水资源产生最大的经济效益,为其他缺水地区的水资源优化配置方案的制定提供理论依据与技术支持。

第二章 阳泉市基本概况

本章主要根据研究区的自然地理情况、社会经济状况，水资源状况等角度对阳泉市的发展现状做了详尽的分析，得到了阳泉市水源的供水能力与水资源在开发利用过程中所存在的问题。

2.1 研究区概况

2.1.1 自然地理情况

阳泉市为山西省第三大的城市，位于山西省的中东部，东边与石家庄隔太行山相望，西边与太原市相邻，南边与晋中市相接，北边为忻州市为邻，整体面积为 4559km²，东西宽约 42km，南北长约 106km。阳泉市处于黄土高原的东部，属于山西东部高地，境内地形以山地为主，其余为丘陵与平原，这里的气候属于温带半湿润大陆性季风气候区。同时阳泉也是一座工业城市，矿产资源丰富，地理位置优越，与太原与石家庄这两个省会城市的距离仅为 100 多 km，交通发达，运输条件便利。同时阳泉又处于东部发达地区与中西部相结合的地带，并处于环渤海与长江三角洲的两大经济区的运输扇的范围内，资源运输便利，社会经济发展潜力较大。阳泉市地理位置如图 2-1 所示。

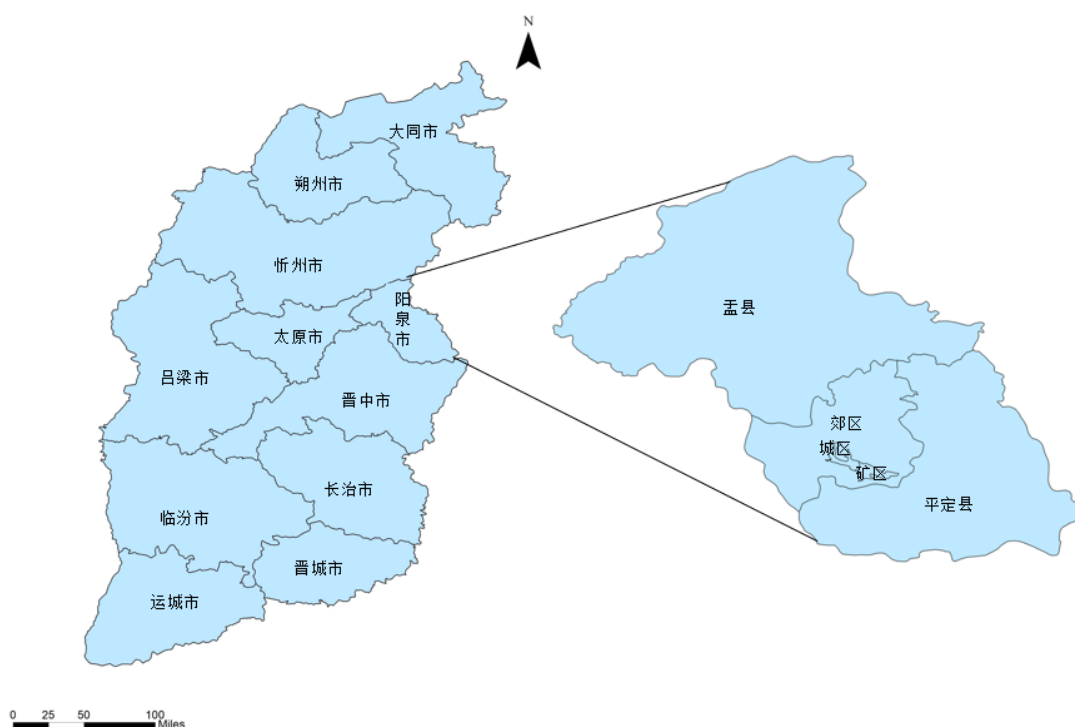


图 2-1 阳泉市地理位置示意图

Fig. 2-1 Geographical location diagram of Yangquan City

2.1.2 地质地貌

从地质上看,阳泉市在区域地质构造上属于山西断隆区,山西断隆区指的是秦岭以北、燕山以南,东西两侧分别被东北向的太行山山前断裂带、离石构造带所围限的区域,其特殊的地理构造一直都是我国地震地质学界研究的重点。同时阳泉市位于新华夏系沁水凹陷的东北边缘,其东部为新华夏太行山隆起地带,西部及西北部为新华夏系多字型,构造太原盆地,北部是 38° 东西行构造亚带。

从地貌上看,阳泉市地处黄土高原东缘,属于山西东部山地。基本属于底衫丘陵区的河谷侵蚀地貌单元,境内地貌以山地为主,其面积为 3362.1km^2 ,其余为丘陵与平原,丘陵面积为 627.9km^2 ,平原面积为 462km^2 。山地包括九条山脉。北部市界上有牛道岭山脉,它处于系舟山和太行山的接合部。西北市界上有两岭山脉,它是系舟山的支脉。其余山脉排列成东西两列。东列包括四条山脉,自北向南依次为白马山脉、秋林山脉、绵山山脉和艾山山脉,它们属于太行山的中段,山顶海拔 $700\text{m}\sim 1700\text{m}$ 不等。太行山是冀晋两省的界山,其东坡陡峻,山麓与海拔不足 100m 的华北平原相接;西坡缓斜,山地和丘陵绵延起伏。西列包括三条山脉,即北方山山脉、南方山山脉和七岭山脉。它们已深入山西高原内部,海拔虽较高,地面起伏却较东列和缓。在山脉之间,分布着一些山间盆地,主要有西部的西烟盆地、中部的孟城盆地和南部的平定盆地。整体构造西高东低,最高海拔为 1803.6m ,最低海拔仅为 350m ^[79]。阳泉市 DEM 地形图如图 2-2 所示。

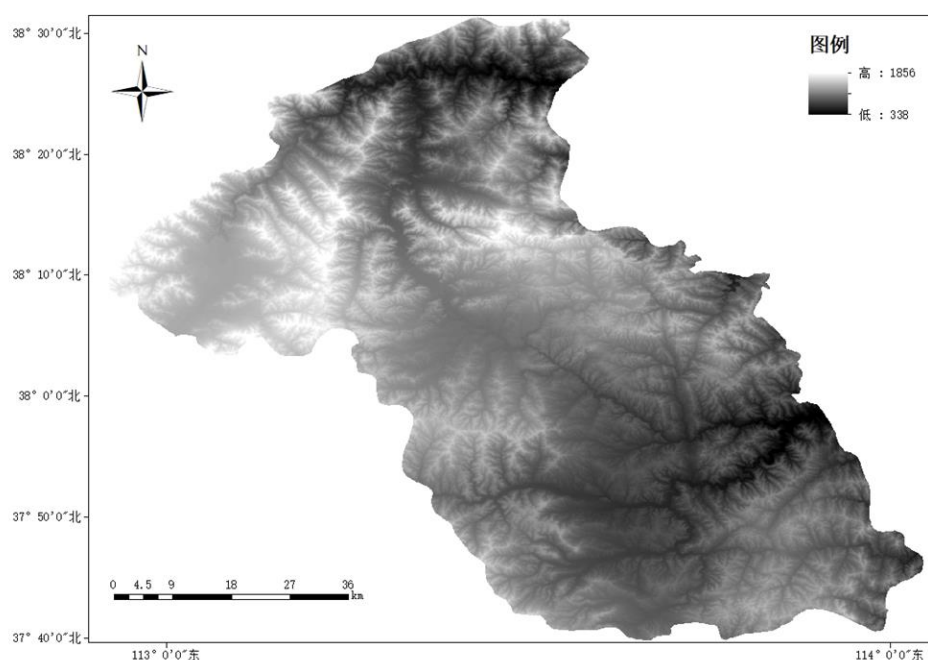


图 2-2 阳泉市 DEM 地形图

Fig. 2-2 DEM to photographic map of Yangquan City

2.1.3 土壤植被

阳泉市土壤的主要类型为褐土，褐土多发育于黄土覆盖的山地丘陵与河谷地带。广泛分布于山地、河谷、丘陵、垣地、河流的二级阶地等，分布海拔高于 720m。在自然条件与地形条件的影响下褐土的分布呈垂直分布，在下与潮土向连，在山地地区则与石质土或粗骨土呈复域状存在，其中潮土主要分布于桃河、荫营河等河岸的一级阶地上，分布海拔为 700m~1300m，粗骨土则主要分布于石质山地、侵蚀严重的丘陵等地区，分布海拔为 700m~1100m。阳泉市褐土的亚类主要有：淋溶褐土、褐土性土、石灰性褐土等，淋溶褐土主要分布在海拔高于 1300m 的中山区，褐土性土主要分布于丘陵坡地、沟壑等地区，石灰性褐土主要发育于较为平坦的黄土母质上。

阳泉市的生态环境较为复杂，植物种类繁多。其植被具体的分布界限与自然带稍有差异，植被的分布呈现出明显的垂直分布规律，其中丘陵地区多以阔叶林为主，但多被开垦为农田进行农作物的种植，低山地区的植被遭到人为破坏后由旱生草灌植物主导且恢复较为缓慢，特别是从娘子关到药林寺一带主要以酸角、荆条、山皂角、虎榛子等植被为主；在海拔 630m~1300m 的地区为裸岩分布的地段，主要分布的植被种类有油松、花椒、柿子、侧柏、小叶杨、鹅耳枥、榆树、槐树、刺槐、南蛇藤、莢莲、白羊草、黄背草、铁杆蒿等；海拔 900m~1300m 处为灌丛草原地带，主要分布的植被以黄刺玫、三裂绣线菊、柳树、狼牙刺为主，其次为荆条、酸枣、狭叶胡颓子、对节木、小叶白杨树、黄连木、油松等；海拔 200m~1700m 以上为针阔叶林混交地带，主要分布的植被有油松，辽东栎，其次以榛子、野山楂、胡颓子、白桦、山杨、高山紫茛、早熟禾、草黄芪、黄芩、零陵香等。

2.1.4 气候条件

阳泉市地理坐标介于东经 112°54′~114°04′、北纬 37°40′~38°31′之间，处于中纬度地带，属于暖温带大陆季风气候区。阳泉市的冬季西南风盛行，其气候特征表现为漫长、寒冷且干燥；秋季在众多气候条件的影响下具体表现为昼夜温差大、降温速度快、极易出现寒潮等天气等特征；夏季西东南风盛行，具体表现为夏季持续时间短、但是气温较高且降水较为集中；春季气温逐渐升高，但时冷时暖，易出现风霜现象，阳泉市全年季节分明、气候干燥且多风、降水集中且降水量少，导致经常发生干旱现象，由此传出十年九旱的说法。以上为阳泉市的主要气候特征，根据阳泉市气象局从 1990~2020 年所统计的气象资料可知当地的光照、气温、降水、蒸发等气候详细情况，具体数据如下所示：

光照：山西省的日照时间地域分布趋势较为明显，但在阳泉市内的变化不明显，当地全年的日照时间约为 2696.3 小时，全年在 5 月的日照时数最长，在 12 月的日照时数最短，由于当地在 7~8 月时处于雨季，空中乌云遮挡的时长较多，同时由于雨后气温较高且四周多山造成雾气较为严重，因此日照的百分率最低；由于阳泉市在 4~5 月处于旱季，天气较为干爽且晴朗，因此日照的百分率最高；3~10 月为农作物生长的季节，月均

日照时数均高于 220 小时，地理条件较好，可让农作物充分的沐浴阳光；阳泉市全年气温高于 0℃ 的日照时数约为 2339.6 小时，占全年日照时数的 83.7%；高于 10℃ 的日照时数约为 1672 小时，占全年日照时数的 58.2%，由此可知当地光照较为充足。

气温：根据阳泉市气象局当的相关气象资料可知，阳泉市平均气温为 10.8℃，最高气温为 40.2℃，最低气温为 -19.1℃；区域内四季平均温度分别为：春季 1℃、夏季 35.9℃、秋季 13℃、冬季 -10℃。

降水：阳泉市多年平均降水深度约为 471.29mm，其中最大降水量发生在 1963 年，降水深度为 1134.8mm，为平均降水深度的 2.2 倍，最小降水发生于 1972 年，降水深度仅为 227.8mm，仅为平均降水深度的 48.3%。阳泉市的降水季节性较为明显，其中春季平均降水深度约为 65mm，占全年平均降水深度的 13.8%；夏季降水主要集中在 7、8 两月，降水深度可达 340mm，占全年平均降水深度的 72.3%；秋季降水一般集中在 8 月中旬到 10 月中旬，此时降水量逐渐减少，降水深度仅占平均降水深度的 11.2%；冬季由于西南风盛行，气候寒冷干燥，降水主要以降雪的形式出现，且降水深度仅有 12.725mm，为全年的最低值，仅占平均降水深度的 2.7%。

蒸发：阳泉市的全年平均的蒸发量约为 1362.5mm，为平均降水量的 2.89 倍，其中最高蒸发量为 1513.4mm 为平均降水量的 3.21 倍，最低蒸发量为 1108.8mm，为平均蒸发量的 2.35 倍，无论哪种情况蒸发量均在降水量两倍以上，这也是导致阳泉市气候干旱的原因之一。阳泉市全年在 5~6 月时的蒸发量最大，为 386.1mm，占全年总蒸发量的 28.3%，在上半年 1~6 月蒸发总量为 861.4mm，占全年总蒸发量的 68.5%，因此在 3~5 月经常会有春旱的情况发生；在 7~8 月份时由于降水量较大且通常大于等于当月的蒸发量，因此在此期间气候较为湿润，在 8~9 月由于降水量又会减少，此时蒸发量大于降水量，由此导致秋旱现象的发生。

2.2 社会经济状况

2.2.1 行政区规划

阳泉市下辖三区两县，分别为城区、郊区、矿区、平定县与盂县，截止 2020 年底，阳泉市总人口为 131.793 万人，城镇化率为 71.225%。阳泉市行政辖区示意图如图 2-3 所示。

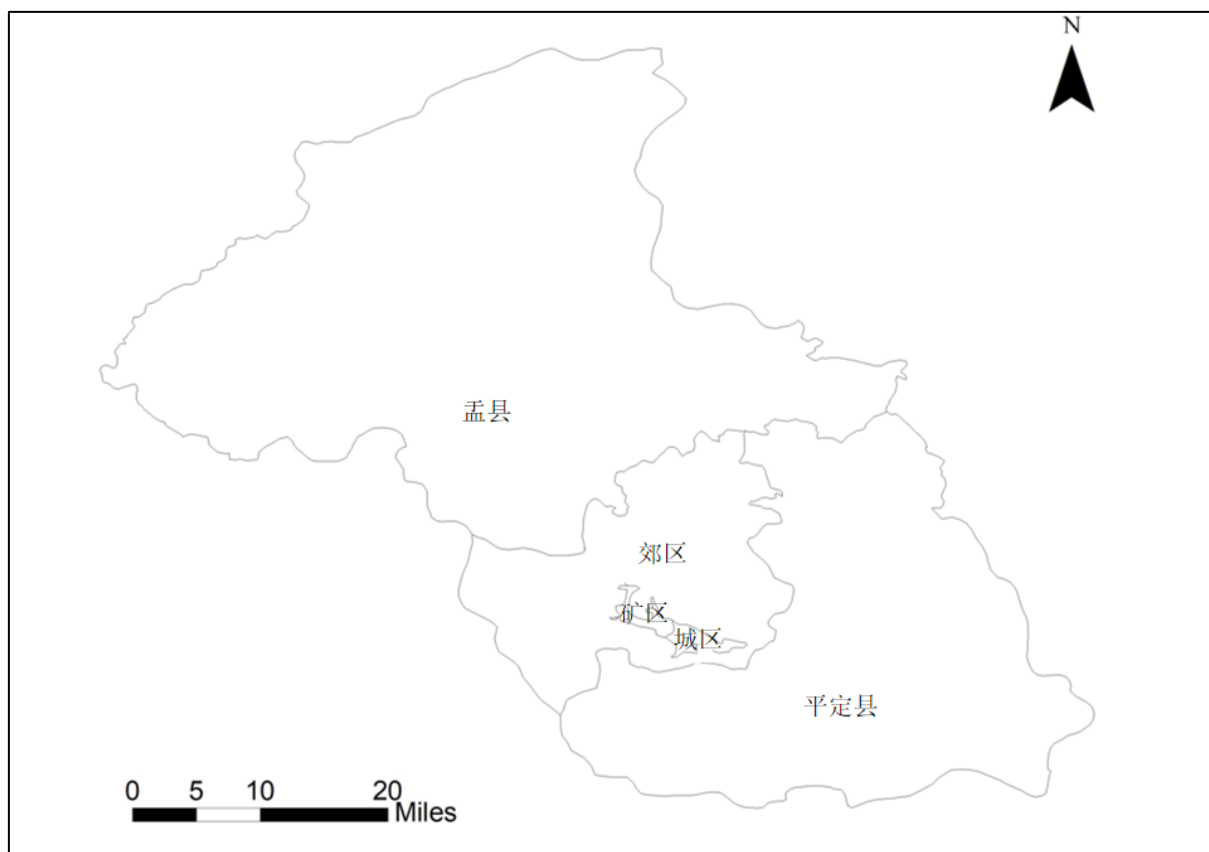


图 2-3 阳泉市行政辖区示意图

Fig. 2-3 Diagram map of Yangquan City Administrative Jurisdiction

2.2.2 经济发展

阳泉市为我国主要的矿产集中区，这里的矿产资源种类丰富、开采便利、产量高、质量好、开发历史悠久，有“煤铁之乡”的美誉。截止 2021 年底，阳泉市的公路线路总里程为 5716.9km，公路交通四通八达，布局合理，干支交错联通东西南北，以阳泉市市区为中心向矿区、郊区、平定县与孟县辐射。太旧高速与京深高速、京津塘高速均相互贯通，货物运输条件便利，且投资环境较为宽松，因此当地具有巨大的社会经济发展潜力等待科学合理的开发。阳泉市 2011~2020 年 GDP 增长趋势图与各产业增长趋势图如图 2-4 与 2-5 所示。

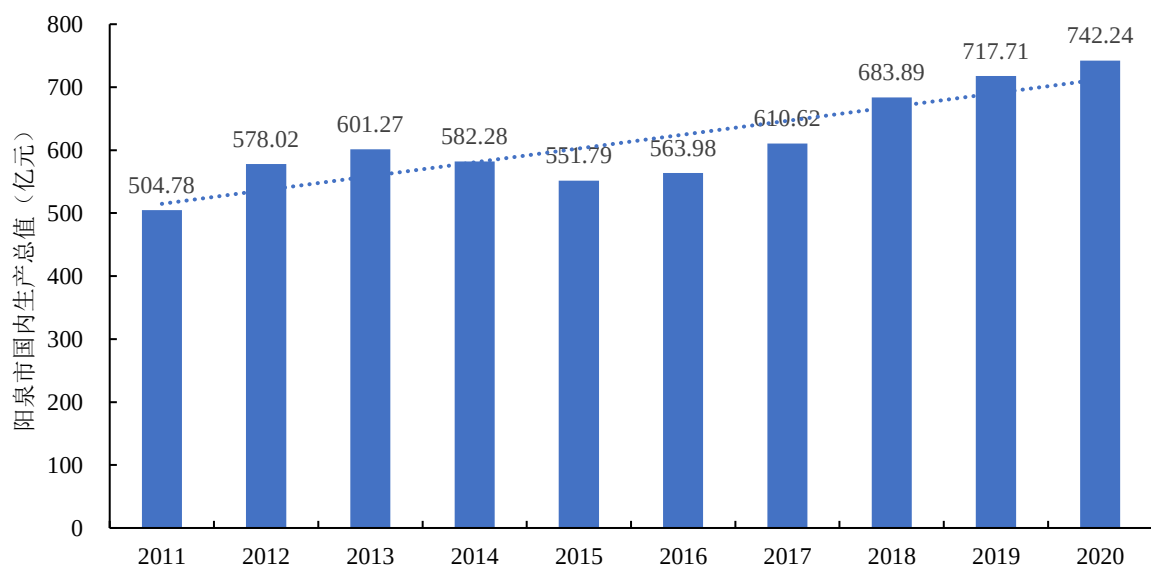


图 2-4 阳泉市 2011~2020 年 GDP 发展趋势图

Fig. 2-4 Yangquan GDP development trend chart from 2011 to 2020

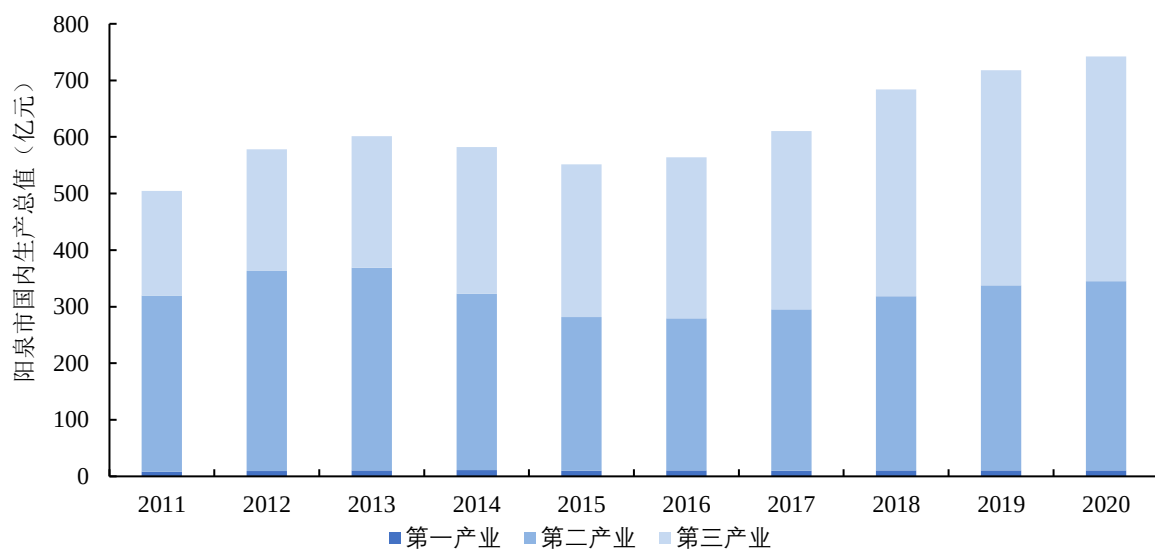


图 2-5 阳泉市第一、二、三产业增长趋势图

Fig. 2-5 Growth trend of primary, secondary and tertiary industries in Yangquan City

2.3 水资源状况

2.3.1 降雨资源

根据阳泉市及其周边的会里水文站、旧街水文站、阳泉市水文站、地都水文站、前石窑水文站、口上水文站等站点的降水统计资料（1961~2021 年），可得到阳泉市降水量年际变化规律，如图 2-6 所示：

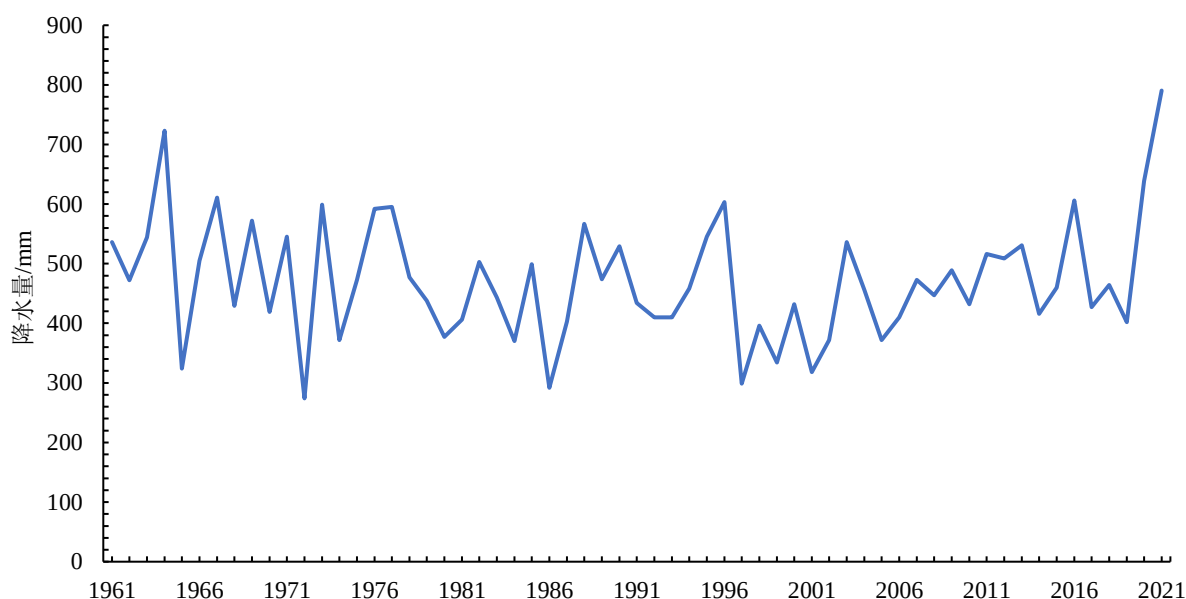


图 2-6 阳泉市多年平均降雨量

Fig. 2-6 Average annual rainfall in Yangquan City

由图 2-6 可以得知，在 1961~2021 年期间阳泉市的降水规律较为统一，丰水年与枯水年交替出现，在 1961~1986 年，阳泉市的平均降水量有下降的趋势，但是在 1996~2021 年阳泉市的降水量有上升趋势，总体的降水量均值较为稳定，平均降水量为 471.292mm；阳泉市于 1972 年得到最小降水量，为 274mm，于 2021 年得到最大降水量，为 790.4mm，由于受到暖温带大陆季风气候气候影响，降雨量常年维持在 350mm~550mm 之间，通过进一步的分析计算可知阳泉市的丰、平、枯、特枯年份下的降水量分别为 554mm、502mm、475.6mm、434.8mm。

2.3.2 地表水资源

地表水资源通常指的是在地表水系统中每年通过降水、径流、融雪等形式更新代替原先水资源后的淡水总量，如江河、湖泊沼泽、冰山融雪、降水等形式的水资源。在阳泉市由于地形地貌等因素，导致水源小且分散，水资源调度难度较大，同时由于节水意识较为淡薄、节水技术于设备普及程度不高等原因导致当地的水资源利用率较低；由于阳泉市煤矿老窑水问题得不到解决，严重污染了地表水与地下水资源污，导致阳泉市同时面临资源型缺水与水质型缺水问题，严重限制了阳泉市的社会经济发展与生态环境的改善。阳泉市河流水系图如图 2-7 所示。

阳泉市的地表水资源系统主要为以地表水为主的滹沱河水资源系统与湖泊水库为主的供水系统。滹沱河在阳泉市段的可用水资源总量约为 0.95 亿 m^3 ，但开发利用量仅为 0.07 亿 m^3 ，利用率极低，因此阳泉市政府计划修建龙华口调水工程，用以缓解阳泉市的缺水问题，建成后每年最多供水 5000 万 m^3 。这样不仅可以有效缓解娘子关泉域与

地下水水源的供水压力，为娘子关泉域的保护工作与泉域生态的恢复提供有利条件，同时也可以减少地下水的提取量，为地下水的水环境生态恢复提供了宝贵的机会。

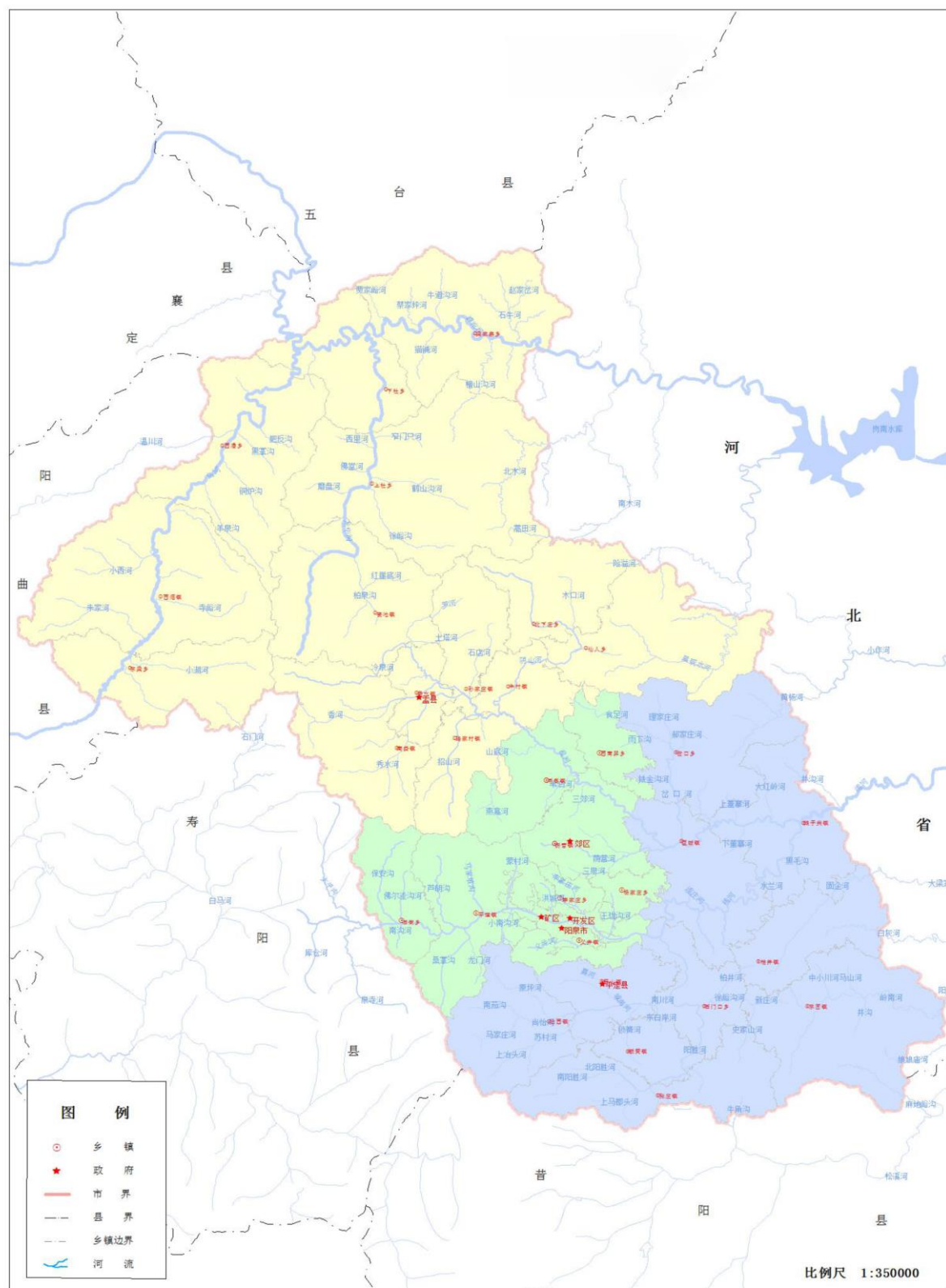


图 2-7 阳泉市河流水系图

Fig. 2-7 Map of the river system of Yangquan City

2.3.3 地下水资源

阳泉市的地下水资源系统主要由两类组成,分别为:以岩溶地下水为主的阳泉市边缘区的威州泉域水资源系统与娘子关泉域水资源系统。威州泉域水资源主要作为分散农村用水,而娘子关泉域水资源系统为阳泉市工业用水与生活用水的主要水源。由于地表水污染严重、水资源供需矛盾紧张等问题导致地下水一直处于超采状态。截止 2000 年底,全市的地下水可开发总量为 2.58 亿 m^3 ,实际开发总量为 2.26 亿 m^3 。其中对浅层河谷空隙的地下水的开发已经接近极限,而石炭系层间熔岩裂隙地下水也被开发枯竭,碎屑岩与变质岩的保水性差,可供开发的水资源量有限,同时岩溶地下水的年径流量也呈现出逐年下降的趋势^[80],娘子关泉水年径流量如图 2-8 所示。

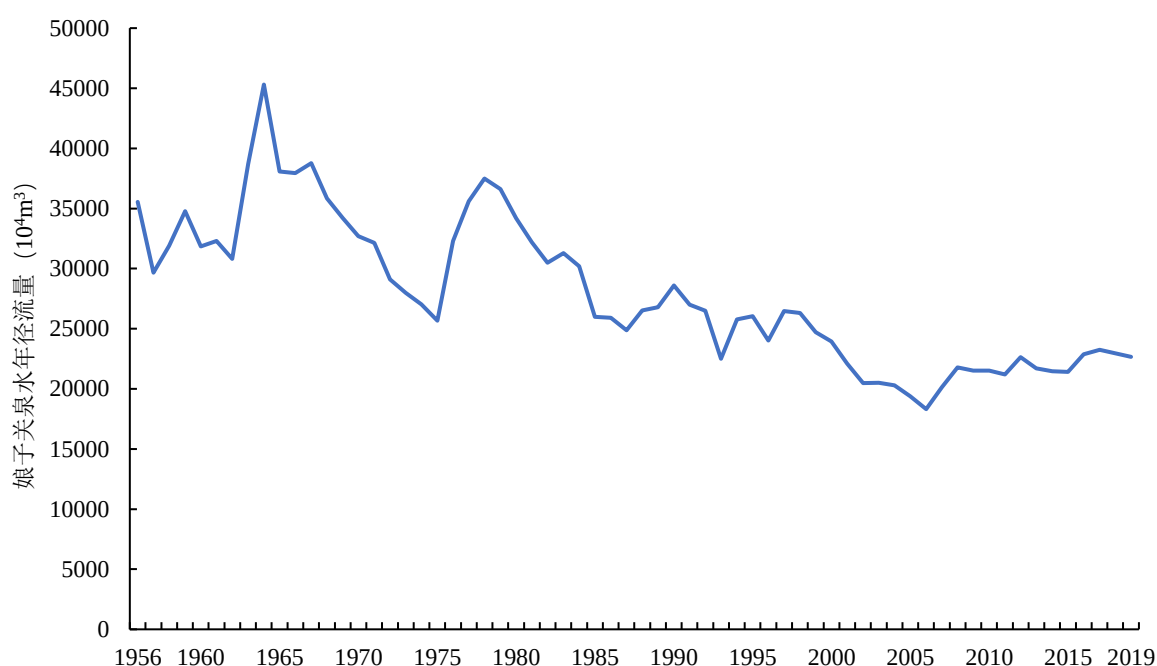


图 2-8 娘子关泉水年径流量

Fig. 2-8 Annual runoff of NiangZiGuan spring

2.3.4 水资源总量

水资源总量指的是由降雨径流或者是融雪等所形成的地表水与地下水的产水总量,再排除掉两者的重复计算量所得到的可利用水资源量。重复计算的地表水与地下水总量主要包括河道流量、库区渗漏量、渠道渗漏量、灌溉渗漏量等,由此计算可知阳泉市现状条件下的水资源总量约为 2.8 亿 m^3 。

2.3.5 阳泉市水资源在开发利用中的问题

日益严重的水资源供需矛盾问题,成为了阳泉市社会经济高速发展的重要阻碍,总体问题如下:

（1）水资源时空分布不均，地表水、地下水开发比例失衡

阳泉市年内降水量分布极不均衡，降雨主要集中在7~8月份，可占全年降水量的70%以上，且年际变化也较大，丰水年与枯水年有规律的交替出现。降水为阳泉市内河道径流中水资源的主要补给方式，因此受降水影响明显，且径流量季节变化性明显，在汛期河水涨势与退势较快，在短时间内易形成即时性的洪涝灾害，在枯水期的径流量较小，一些河流水位较低甚至断流。

由于缺乏大型控制型水利工程等原因导致地表水利用率极低，而地下水由于开采便利成为了阳泉市的主要供水水源，现状年地下水的供水总量占总供水量的60%以上，部分农村地区采用自备井进行供水，这一举措加剧了地下水超采现象。同时阳泉市的水资源配置方案不合理是导致地表水、地下水开发比例失衡的主要原因，导致阳泉市水资源供需矛盾突出，生态环境恶化。

（2）地下水超采、水资源污染问题严重

由于阳泉市供水工程与储水工程的建设相对落后，因此在汛期来水时不能及时对水资源进行有效的储存，同时阳泉市的水库库容量较小，导致储存的水资源总量有限，使阳泉市的用水户更加依赖供水量稳定的地下水资源，造成地下水超采现象更加严重。

阳泉市矿产资源较为丰富，在矿产资源开发利用过程中会产生大量的工业废水，由于废水处理工艺较差，导致大量老窑水渗入地下，使娘子关泉域岩溶水中的硫酸根离子浓度严重超标，严重影响了地下水的水生态环境。

在污染的河流中，流经阳泉市市内的桃河水质污染较为严重，导致桃河水质长期处于劣五类标准，同时桃河水量充足，但由于水质不达标不能当做供水水源，不能满足当地用水户的用水需求，使研究区不得不面临水质型缺水与资源型缺水的复合型水资源短缺难题，如不加以控制，无疑会加剧当地的水资源供需矛盾。

（3）水资源利用率低，供水结构不合理

阳泉市的供水结构不合理的问题较为突出，地表水资源开发利用比例小于地下水资源，导致阳泉市地下水水生态环境恶化。同时当地污水处理厂的建设数量与日均污水处理量有限，污水处理厂的建设速度与当今经济社会发展速度不相匹配，导致工业污水与生活污水处理比例偏低，非常规水源的回用率低，使阳泉市水资源短缺问题更加严重。

（4）水资源短缺与水资源浪费现象严重

阳泉市的水资源总量约为2.8亿 m^3 ，而人均水资源占有量仅为562 m^3 ，略高于山西省人均水资源占有量546 m^3 、低于全国人均水资源占有量的1/4、不足世界人均水资源占有量的1/8，由于水资源总量短缺造成了阳泉市严重缺水的现象，阻碍社会经济高速发展。

对阳泉市而言，水资源短缺与水资源浪费的问题并存。农业是阳泉市的用水大户，总用水量约为总供水量的 20%，但是由于灌区设备老化、灌溉渠道渗漏等原因，使得灌溉用水有效利用系数低于 0.5，水资源浪费严重。

（5）水资源管理模式较为粗犷

粗犷的水资源管理模式是导致浪费现象产生的原因之一。阳泉市水资源在开发利用过程中没有科学的管理模式与理论指导，导致阳泉市水资源过度开采使生态环境快速恶化、生态用水保障率下降、非常规水源不能得到有效利用。同时阳泉市居民的节水意识相对薄弱，政府机构宣传效果有限，相关的法律法规也并未完善，无形中加剧了当地各供水水源的供水压力。

因此，对阳泉市开展水资源合理优化配置的研究很有必要，通过科学调整当地的供水结构，使当地的工业生产技术进行产业升级，提高居民节水意识，鼓励节水设备的研发与利用，以缓解水源的供水压力、解决水资源供需矛盾、改善当地生态环境。

2.4 本章小结

本章对阳泉市的自然地理、社会经济、水资源现状做了详细的概述，着重分析了当地水资源在利用过程中所存在的问题与原因，得出阳泉市水资源时空分配不均、地表水与地下水开发比例失衡、水资源污染严重、供水与用水结构不合理、水资源利用率低、水资源管理方式较为粗犷等问题亟待解决。本研究以此为研究对象，深挖阳泉市的节水潜力，寻求最优水资源配置方案，降低缺失率，使经济社会与生态环境达到可持续发展目标。

第三章 阳泉市供需水量预测分析

分析预测阳泉市供需水量时需要参考当地历年水源的供水量数据、用水户的用水量数据、社会经济发展状况、水利工程建设规模、节水政策制定方向等因素，并结合节水技术的发展与创新、社会环境的发展、居民需求的变化等因素，采用科学的方法对规划水平年的供需水量进行预测。

本研究选取 2020 年为现状年,2025 年为近期规划水平年，2030 年为远期规划水平年。参考 2011~2020 年阳泉市用水指标与经济指标的发展变化，对阳泉市的供需水量进行预测分析。在预测时主要的用水指标会按照“普通节水方案”与“推荐节水方案”进行研究。普通节水方案具体表现为对历年的各项用水定额进行总结分析，用趋势法预测近期与远期规划水平年的用水定额指标，节水水平为在现有节水水平的基础上，加大对节水技术的开发与利用，并充分考虑用水定额的变化的基础上制定相应的需水方案；推荐方案为在普通方案的基础上，按照《“十四五”节水型社会建设规划》中的节水规划制定用水定额，并加大节水设备的使用力度，对不同的用水情景采用相应的节水措施，同时综合考虑规划水平年的供水量而制定的需水方案。

对阳泉市供需水量预测的精准度是实现水资源优化配置的前提条件，对水资源进行科学管理与规划意义重大。

3.1 水源、用水户组成

供水区的划分是水资源配置过程中重要的一环，通过合理划分供水区，为用水户与水源的管理提供基本依据。在本研究中把阳泉市的五个行政区划分为五个供水分区，分别为城区、矿区、郊区、平定县、盂县。

通过对阳泉市进行实地考察，收集与整理当地经济、社会、水文、地质等相关资料，并按照《全国水资源综合规划技术细则》，把阳泉市供水预测的供水水源共分为五类，分别为：水库供水、地下水、娘子关泉水、龙华口调水、非常规水源；把需要进行需水预测的用水户分为五类，分别为：生活用水、农业用水、工业用水、第三产业用水、生态环境用水。由于第三产业中所包含的业务有：餐饮、运输、住宿、批发、零售、金融等，业务过于繁杂，且相关资料不易获取，因此在研究过程中划分为同一类综合考虑。供水关系如表 3-1 所示。具体用水户分类表如表 3-2 所示。

表 3-1 阳泉市水资源供给系统

Table 3-1 Water resource supply system of Yangquan City

受水区	供水水源				
	水库供水	地下水供水	娘子关泉水	龙华口调水	非常规水源
城区		✓	✓	✓	✓
矿区	✓	✓	✓	✓	✓
郊区	✓	✓	✓	✓	✓
平定县	✓	✓		✓	✓
盂县	✓	✓	✓	✓	✓

表 3-2 阳泉市用水户分类表

Table 3-2 Classification table of water users in Yangquan City

一级	二级	三级	备注
生活	城镇生活	城镇居民生活	不包含生态环境用水
	农村生活	农村居民生活	不包含牲畜用水
农业	农田灌溉	水浇地	玉米、谷子、薯类等
	林牧渔畜	林地灌溉 畜牧用水	果树、经济林、中药 大型家畜、小型家禽
工业	规模以上	煤炭工业 制造业 电力及燃气工业	煤炭的开采、加工、储存与销售 机械电子设备制造及生产加工 火力发电、热电联产等
	规模以下	纺织、食品、化工	棉纺、医药化工、食品加工
第三产业	服务业	服务业	教育、医疗、咨询等
	金融业	金融业	银行、保险、信托、证券等
	个体户	个体商人	个体餐饮、批发零售、个体文印等
	其他服务业	其他服务业	旅游、交通运输、通讯、房地产等
生态环境	河道内需水	河道生态用水	河道生态保护
	河道外需水	城市绿化用水	城镇生态环境保护

3.2 需水量预测

目前学界有多种方法可对供水量与需水量进行预测,例如判断预测法、趋势预测法、因果预测法等方法。其中定额法、灰色系统模型法、趋势法、线性回归分析法等方法较为经典。本研究结合阳泉市水资源实际状况,主要采用定额法与趋势分析法对阳泉市各用水户的需水量进行分析预测。

(1) 定额法

定额法为单个用水户在单位时间内所被允许使用水资源的总量与所需计算时长相关联后对未来需水总量进行预测的方法。该方法优点是计算简单,缺点为需要大量的有效数据样本进行分析预测,其精度是由各地区不同用水户的发展规划与规划水平年中各行业的用水定额所共同决定,表达式为:

$$Q_t = q \cdot T \tag{3-1}$$

式中： Q_t 表示规划水平年用水户总需水量（万 m^3 ）； q 表示标准规定的该用水户的用水定额指标（不同用水户用水定额单位不同，详见下文分析）； T 表示时间长度（年）。

（2）趋势分析法

趋势法是根据阳泉市不同用水户的历史用水量变化趋势来对未来的需水量进行预测的方法，表达式为：

$$T_n = T_0 \cdot (1+r)^n \tag{3-2}$$

式中： T_n 表示所预测的第 n 年的需水量（万 m^3 ）； T_0 表示现状水平年的用水量（万 m^3 ）； r 表示用水量的自然增长率（%）； n 表示所需预测的时长（年）。

3.2.1 经济社会指标预测

3.2.1.1 人口与城镇化预测

（1）人口现状与分布

根据《山西统计年鉴》上关于阳泉市现状年（2020 年）的人口数据可得当地的人口分布情况，如表 3-3 所示。阳泉市在 2020 年底的人口总人数为 131.793 万人，其中城镇人口为 93.87 万人，农村人口为 37.923 万人；城镇化率为 71.225%；全年的人口出生率为 8.33‰，死亡率为 10.96‰，人口自然增长率为-2.63‰。

表 3-3 2020 年阳泉市人口分布情况

Table 3-3 Population distribution of Yangquan City in 2020

行政区	总人口 (万人)	人口分布情况 (%)
城区	22.531	17.096
矿区	23.055	17.494
郊区	27.512	20.875
平定县	30.606	23.223
盂县	28.089	21.313

（2）人口变化趋势

阳泉市人口的主要指标为总人口数、城镇人口数与农村人口数。本研究依据《山西统计年鉴》（2011 年~2020 年）中总人口数与人口出生情况，得到 2011 年~2020 年的人口变化趋势表，如表 3-4 所示，人口数量变化如图 3-1 所示。

表 3-4 阳泉市人口变化趋势表（2011~2020）

Table 3-4 Table of population trends in Yangquan City (from 2011 to 2020)

年份	总人口 (万人)	增长率 (‰)	城镇人口 (万人)	农村人口 (万人)	城镇化率 (%)
2020	1317925	-2.634	938693	379232	71.225
2019	1321405	-0.947	927626	393779	70.200
2018	1322657	-2.342	914352	408305	69.130
2017	1325762	-4.149	903241	422521	68.130
2016	1331285	-3.610	893647	437638	67.127
2015	1336109	-4.749	882398	453711	66.042
2014	1342485	-2.096	869716	472769	64.784
2013	1345305	-5.767	855868	489437	63.619
2012	1353109	-6.386	845944	507165	62.519
2011	1361806	-5.840	834992	526814	61.315

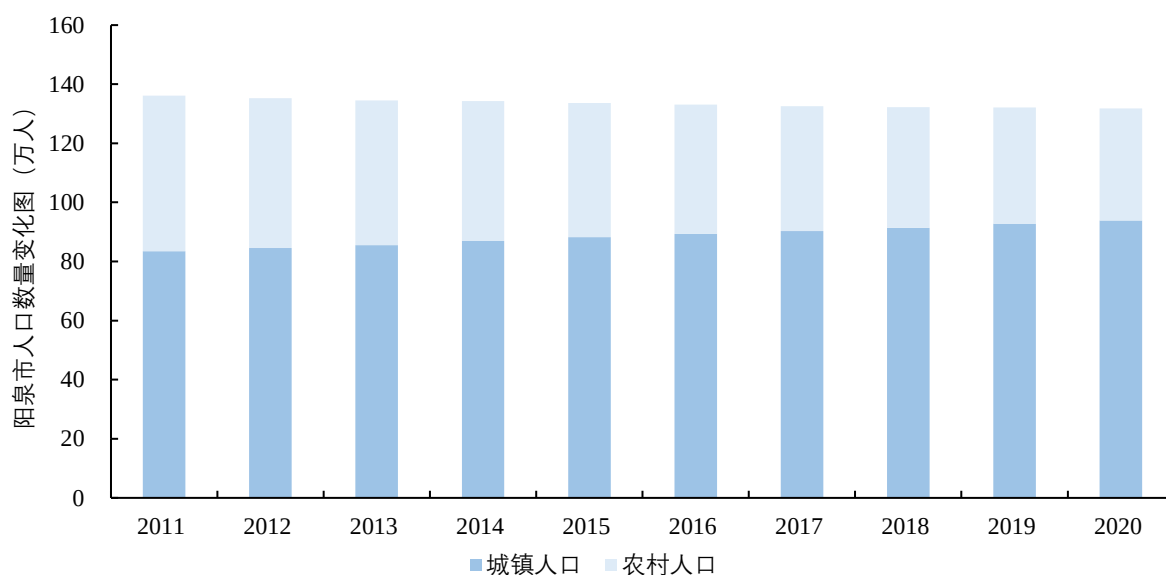


图 3-1 阳泉市 2011~2020 年人口数量变化图

Fig. 3-1 Population change map of Yangquan City from 2011 to 2020

由图 3-1 与表 3-4 可知，在 2011~2020 年间阳泉市的总人口数量呈现逐年下降的趋势，并在 2012 年时人口下降的最快，年均增长率为-3.852‰。但阳泉市的城镇化进程一直稳步向前推进，由 2011 年的 61.315%增长到了 2020 年的 71.225%，平均每年的增长率近乎 1%，这与当地政府制定的相关政策、社会经济发展水平、人民生活水平的提高有着密切的关系。

（3）规划水平年人口预测

根据上述阳泉市人口与城镇化发展的结果，采用趋势分析法对阳泉市近期规划年 2025 年与远期规划年 2030 年的人口进行预测分析。从 2011~2020 年各行政区人口变化

规律如下：城区人口 99%为城镇人口，数量每年以-0.11%的速率在降低，农村人口每年以-20%的速率在降低；矿区人口全部为城镇居民，每年人口以 1%的速率在降低；郊区城镇人口以每年 1%的速率在增加，农村人口每年以 1%的速率在下降；平定县城镇人口每年增加速率最高，可达 2%，农村人口减少的速率也最高为 1.8%；孟县城镇人口每年增长的速率为 1.5%，农村人口减少的速率也为 1.5%。由此可进行近期规划水平年 2025 年与远期规划水平年 2030 年的不同行政区人口预测，预测情况如表 3-5 所示。

表 3-5 不同水平年阳泉市人口发展指标预测成果

Table 3-5 Prediction results of population development indicators of Yangquan City at different levels

行政区	水平年	总人口 (万人)	城镇人口 (万人)	农村人口 (万人)	城镇化率 (%)
城区	2020	22.531	22.403	0.128	99.434
	2025	22.322	22.280	0.042	99.813
	2030	22.183	22.169	0.014	99.938
矿区	2020	23.055	23.055	0.000	100.000
	2025	21.925	21.925	0.000	100.000
	2030	20.851	20.851	0.000	100.000
郊区	2020	27.512	19.240	8.272	69.934
	2025	28.088	20.222	7.866	71.994
	2030	28.734	21.253	7.481	73.966
平定县	2020	30.606	15.583	15.023	50.914
	2025	30.784	17.205	13.580	55.888
	2030	31.270	18.995	12.275	60.746
孟县	2020	28.089	13.588	14.501	48.374
	2025	28.083	14.638	13.446	52.123
	2030	28.236	15.769	12.467	55.848
阳泉市	2020	131.793	93.869	37.923	71.225
	2025	131.203	96.270	34.933	73.375
	2030	131.274	99.038	32.236	75.444

根据表 3-5 的预测成果可知，阳泉市总体人口增长趋势基本符合我国的基本国情。在五个行政区中，矿区的城镇化率最高，达到 100%，其次为城区，在 99%以上；孟县与平定县的城镇化率最低，在 2030 年只能达到 55.848%与 60.746%，低于全国平均发展水平。到近期规划水平年 2025 年阳泉市总人口将会下降至 131.203 万人，城镇化水平将提高到 73.375%，城镇人口数量将增至 96.27 万人；；到远期规划水平年 2030 年，阳泉市人口总数会有小幅度的回升，为 131.274 万人，此时城镇居民数量将达到 99.038 万人，城镇化将达到 75.444%，高于全国平均水平。

3.2.1.2 国民经济发展预测

阳泉市从上世纪 90 年代发现丰富的矿产资源以来,煤炭产业一直都是阳泉市 GDP 的主要组成部分,随着经济实力的不断增强,当地居民的生活水平也在逐渐提高,第三产业也得到了高速发展的机会,社会各项事业均取得了长足的进步。

在国民经济发展的预测中所用的方法同人口与城镇化的预测方法一样,在详细分析阳泉市国民经济发展指标的基础上,基于阳泉市 2011~2020 年的经济发展统计资料总结出发展趋势,并结合阳泉市各区县的《国民经济和社会发展规划第十四个五年规划纲要和 2035 年远景规划纲要》、《山西省土地利用总体规划》等政府规划文件,同样采用趋势法对阳泉市不同水平年的各产业发展指标进行预测分析,具体分析结果如表 3-6 所示。

基于阳泉市各行政区 2011~2020 年的各产业发展趋势,可对各行政区从 2020~2025 年与 2025~2030 年各产业的发展趋势与定额指标做如下预测:

城区:从 2020~2025 年,由于农业不是主要产业且所占比例较低,因此产值每年增长率较高,可达到 4%,工业产值随着每年增长率为 3%,由于第三产业产值所占比例较高,因此每年增长率可达 6%;从 2025~2030 年进行产业调整,农业产值每年增长率下调为 3.5%,工业产值每年增长率下调为 2.5%,同时大力发展第三产业,产值每年增长率为 5%。

矿区:从 2020~2025 年,农业不作为主要发展对象,产值每年增长率为 2%,工业作为主要的发展对象,产值增长率可达到每年 5%,同时对第三产业的发展进行扶持,产值增长率每年可达 6%;从 2025~2030 年,农业产值每年增长率下调为 1.5%,由于要考虑阳泉市的地下水生态环境保护,工业产值每年增长率下调为 4%,同时继续扶持第三产业的发展,产值每年增长率可达 5%。

郊区:从 2020~2025 年,按历年的增长规律,农业产值每年增长率定为 1.5%,工业产值每年增长率为 3%,第三产业产值每年增长 5%;从 2025~2030 年,农业产值每年增长率下调为 1%,工业产值每年增长率为 2.5%,第三产业产值每年增长 4%。

平定县:从 2020~2025 年,按照历年平定县各产业经济增长规律,农业产值每年增长率为 2%,工业产值每年增长率为 2%,第三产业产值每年增长 4%;从 2025~2030 年,农业产值每年增长率调为 1.5%,工业产值每年增长率为 1.5%,第三产业产值每年增长 3.5%。

盂县:从 2020~2025 年,农业产值每年增长率为 1%,工业产值每年增长率为 2%,第三产业产值每年增长 4%;从 2025~2030 年农业产值每年增长率调为 1%,工业产值每年增长率为 1.5%,第三产业产值每年增长 4.5%。

表 3-6 阳泉市不同水平年各产业发展指标预测结果

Table 3-6 Forecast results of various industry development indicators at different level years in Yangquan City

行政区	水平年	农业 (亿元)	所占 比例 (%)	工业 (亿元)	所占 比例 (%)	第三产业 (亿元)	所占 比例 (%)	总产值 (亿元)
城区	2020	0.23	0.111	31.04	14.894	177.138	84.996	208.408
	2025	0.28	0.103	35.983	13.166	237.051	86.732	273.314
	2030	0.333	0.097	40.712	11.849	302.543	88.054	343.588
矿区	2020	0.094	0.058	116.902	71.685	46.081	28.257	163.078
	2025	0.104	0.049	149.2	70.721	61.667	29.23	210.971
	2030	0.112	0.043	181.525	69.726	78.704	30.231	260.341
郊区	2020	1.655	1.326	58.912	47.18	64.299	51.494	124.866
	2025	1.783	1.172	68.296	44.889	82.063	53.939	152.142
	2030	1.874	1.047	77.27	43.171	99.842	55.782	178.986
平定县	2020	4.645	4.05	58.733	51.206	51.321	44.744	114.7
	2025	5.928	4.45	64.846	48.678	62.44	46.872	133.215
	2030	6.386	4.246	69.858	46.447	74.159	49.307	150.404
盂县	2020	3.842	2.929	68.851	52.48	58.501	44.591	131.193
	2025	4.038	2.67	76.017	50.266	71.175	47.064	151.23
	2030	4.244	2.428	81.891	46.84	88.697	50.732	174.833
阳泉市	2020	10.467	1.41	334.438	45.058	397.34	53.532	742.245
	2025	12.134	1.318	394.342	42.823	514.396	55.86	920.872
	2030	12.95	1.169	451.256	40.721	643.946	58.11	1108.152

从表 3-6 中可以看出,在农业发展预测方面:由于城区、矿区与郊区属于市区范围,因此农业发展较为缓慢,所占的产值份额也较少,且均不超过 2%;盂县与平定县农作物种植范围稍广,但在总产值中占比不超过 10%,不能作为当地主要发展的产业;在工业发展预测方面:矿区的煤炭产量较为丰富,从表中可知当地煤炭产业所贡献的产值占总产值的 70%左右,为当地非常典型的支柱型产业,其次为平定县、盂县与郊区,所占 GDP 的比重在 45%左右,最次为城区,仅占总产值的 12%左右;在第三产业的发展预测方面:城区的第三产业较为发达,所贡献的产值占总产值的 85%以上,郊区、平定县、盂县的第三产业的产值占总产值的比例均在 50%左右,矿区的第三产业发展速度较慢,仅占总产值的 30%。

从时间上来看阳泉市总体上发展规律如下:农业总产值所占的比例较为稳定,一直处于 12%左右,每年的增长率约为 1%;工业产值总体也呈正增长,但是增长率小于第三产业的增长率,因此在总产值中所占的比例有逐年下降的趋势;第三产业增长的速率较快,所占比例由 2020 年的 53.532%增长至 2030 年的 58.11%,逐渐取代煤炭产业成为新的产业支柱。

3.2.2 生活需水预测

阳泉市生活需水预测包含了城镇居民生活需水预测与农村居民生活需水预测两部分内容。依据前文对人口增长预测的结果，并结合阳泉市经济社会特点，采用定额法对当地近期规划水平年 2025 年与远期规划水平年 2030 年的需水量进行预测。计算表达式如 (3-3) 式所示：

$$Q_i = q_i \cdot n \cdot 365 / 1000 \quad (3-3)$$

式中： Q_i 表示阳泉市城镇或农村人口在规划水平年的生活需水量（万 m^3 ）； q_i 表示阳泉市规划水平年城镇或者农村居民的生活用水定额（ $\text{L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ）； n 表示阳泉市规划水平年城镇或者农村人口数量（万人）。

Q_i 在预测的过程中将按照“普通节水方案”与“推荐节水方案”两个方案进行，根据《山西省用水定额》中第四部分：居民生活用水定额（DB 14/T 1049-2021）中的相关规定可得阳泉市居民生活用水定额表，如表 3-7 所示。阳泉市在不同规划水平年中的人口均超过 100 万人，属于大城市级别，故按定额阳泉市居民生活用水定额不超过 $200 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民在集中供水情况下的定额不应超过 $90 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，分散供水情况下的定额不应超过 $70 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ 。

表 3-7 山西省阳泉市居民生活用水定额表

Table 3-7 Domestic water quota in Yangquan City of Shanxi Province

类别名称	城市规模	单位	用水定额
城镇居民生活	100 万人以上大城市	$L/(p \cdot d)$	200
	100-50 万人口中等城市		160
	50 万人口以下为小城市		140
农村居民生活	供水方式		
	农村集中式供水	$L/(p \cdot d)$	90
	农村分散式供水		70

根据《阳泉市水资源公报》可知，阳泉市 2020 年城镇居民用水定额为 $133 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 $81 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，按照阳泉市历年用水定额变化规律，用水定额会有增长，同时阳泉市也在积极响应国家节水的宣传，并在一些部门率先开始节水设备与节水技术的使用，因此在普通节水情况下，2025 年城镇居民用水定额为 $136 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 $85 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ；2030 年城镇居民用水定额为 $140 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 $89 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ 。在普通节水方案下由于开始使用节水技术与节水设备，用水定额为按照现状用水增长率发展，并在不发展节水技术情况下 2025 规划水平年年用水定额的 90%，2025 年城镇居民用水定额为 $122.4 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 $76.5 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，2030 年城镇居民用水定额为 $126 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 $80.1 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ 。在推荐节水情况下，开始大量使用节水设备，节水潜力进一步提升，用水定额为普通节水方案的 90%，2025 年城镇居民用水定额为 $110.16 \text{ L}/(\text{p} \cdot \text{d})$ ，农村居民用水定额为 68.85

$L/(p \cdot d)$ ，2030 年城镇居民用水定额为 $113.4 L/(p \cdot d)$ ，农村居民用水定额为 $72.09 L/(p \cdot d)$ 。以上用水定额均符合《山西省用水定额》中的指标。

根据本文之前得到的阳泉市不同规划水平年的人口数量，与当地居民在普通节水与推荐节水两种节水方案的需水定额，采用定额法计算出阳泉市 2025 与 2030 规划水平年的生活需水量。在普通节水方案下，2025 与 2030 规划水平年阳泉市的生活需水量分别为 5276.373 万 m^3 、5497.211 万 m^3 ；在推荐节水方案下，2025 与 2030 规划水平年阳泉市生活需水量分别为 4748.736 万 m^3 、4947.490 万 m^3 。预测详情如表 3-8 所示。

表 3-8 阳泉市生活需水量预测成果

Table 3-8 Prediction result of domestic water demand in Yangquan City

用水方案	行政区	水平年	城镇人口			农村人口			总计 (万 m^3)
			人口 (万人)	定额 ($L/(p \cdot d)$)	需水量 (万 m^3)	人口 (万人)	定额 ($L/(p \cdot d)$)	需水量 (万 m^3)	
普通节水方案	城区	2025	22.280	122.4	995.393	0.042	76.50	1.167	996.560
		2030	22.169	126	1019.556	0.014	80.10	0.401	1019.956
	矿区	2025	21.925	122.4	979.542	0.000	76.50	0.000	979.542
		2030	20.851	126	958.932	0.000	80.10	0.000	958.932
	郊区	2025	20.222	122.4	903.422	7.866	76.50	219.644	1123.066
		2030	21.253	126	977.432	7.481	80.10	218.709	1196.141
	平定县	2025	17.205	122.4	768.631	13.580	76.50	379.176	1147.807
		2030	18.995	126	873.590	12.275	80.10	358.875	1232.465
	孟县	2025	14.638	122.4	653.964	13.446	76.50	375.434	1029.398
		2030	15.769	126	725.225	12.467	80.10	364.490	1089.715
	阳泉市	2025	96.270	122.4	4300.951	34.933	76.50	975.422	5276.373
		2030	99.038	126	4554.736	32.236	80.10	942.474	5497.211
推荐节水方案	城区	2025	22.280	110.16	895.853	0.042	68.85	1.051	896.904
		2030	22.169	113.4	917.600	0.014	72.09	0.361	917.961
	矿区	2025	21.925	110.16	881.588	0.000	68.85	0.000	881.588
		2030	20.851	113.4	863.039	0.000	72.09	0.000	863.039
	郊区	2025	20.222	110.16	813.080	7.866	68.85	197.680	1010.760
		2030	21.253	113.4	879.689	7.481	72.09	196.838	1076.527
	平定县	2025	17.205	110.16	691.768	13.580	68.85	341.259	1033.027
		2030	18.995	113.4	786.231	12.275	72.09	322.987	1109.219
	孟县	2025	14.638	110.16	588.567	13.446	68.85	337.890	926.458
		2030	15.769	113.4	652.703	12.467	72.09	328.041	980.744
	阳泉市	2025	96.270	110.16	3870.856	34.933	68.85	877.880	4748.736
		2030	99.038	113.4	4099.263	32.236	72.09	848.227	4947.490

3.2.3 工业需水预测

根据 2011~2020 年的《阳泉市水资源公报》与《山西统计年鉴》可知 2011~2020 年的阳泉市工业用水量与工业地区生产总值，由上述资料可得万元工业生产总值的用水量。结果如表 3-9 所示，从表中可知万元工业生产总价值用水量从 2011 年的 $27.442\text{m}^3/\text{万元}$ ，下降到了 2020 年的 $22.863\text{m}^3/\text{万元}$ ，由此可见随着工业技术的发展，节水技术也有了一定的进步，根据万元生产总值的变化规律与节水技术的发展，预计在普通节水方案下，2025 年万元工业生产总值的用水量为 $20.577\text{m}^3/\text{万元}$ ，2030 年万元工业生产总值的用水量为 $18.519\text{m}^3/\text{万元}$ ；在推荐节水方案下，2025 年万元工业生产总价值用水量为 $19.434\text{m}^3/\text{万元}$ ，2030 年万元工业生产总价值用水量为 $16.519\text{m}^3/\text{万元}$ 。

本研究通过趋势法得到了阳泉市规划水平年 2025 年与 2030 年的工业生产总价值，结合两种节水方案的用水指标可得阳泉市在不同规划水平年的工业需水量。结果显示，在普通节水方案下 2025 与 2030 年的工业需水量为 7302.819万 m^3 与 9276.470万 m^3 ；在推荐节水方案下阳泉市工业需水量分别为 6514.135万 m^3 与 8769.709万 m^3 。详细预测结果如表 3-10 所示。

表 3-9 阳泉市万元工业产值用水量变化表

Table 3-9 Yangquan City 10000 yuan industrial output value water consumption change table

年份	工业用水量 (万吨)	工业地区总产值 (万元)	万元工业生产总价值用水量 ($\text{m}^3/\text{万元}$)
2020	6600.730	2887120	22.863
2019	6589.926	2840975	23.196
2018	6879.358	2884064	23.853
2017	6535.688	2704609	24.165
2016	6310.000	2561432	24.635
2015	6339.291	2537442	24.983
2014	7415.000	2942122	25.203
2013	8345.566	3163356	26.382
2012	8564.404	3184622	26.893
2011	7753.770	2825561	27.442

表 3-10 阳泉市工业需水预测成果

Table 3-10 Prediction result of industrial water demand in Yangquan City

用水方案	行政区	水平年	工业产值 (万元)	用水定额 (m ³ /万元)	工业用水量 (万吨)
普通节水方案	城区	2025	359830	18.519	666.369
		2030	407120	20.557	836.917
	矿区	2025	1492000	18.519	2763.035
		2030	1815250	20.557	3731.609
	郊区	2025	682960	18.519	1264.774
		2030	772700	20.557	1588.439
	平定县	2025	648460	18.519	1200.883
		2030	698580	20.557	1436.071
	盂县	2025	760170	18.519	1407.759
		2030	818910	20.557	1683.433
	阳泉市	2025	3943420	18.519	7302.819
		2030	4512560	20.557	9276.470
推荐节水方案	城区	2025	359830	16.519	594.403
		2030	407120	19.434	791.197
	矿区	2025	1492000	16.519	2464.635
		2030	1815250	19.434	3527.757
	郊区	2025	682960	16.519	1128.182
		2030	772700	19.434	1501.665
	平定县	2025	648460	16.519	1071.191
		2030	698580	19.434	1357.620
	盂县	2025	760170	16.519	1255.725
		2030	818910	19.434	1591.470
	阳泉市	2025	3943420	16.519	6514.135
		2030	4512560	19.434	8769.709

3.2.4 第三产业需水预测

阳泉市第三产业主要包括的产业有房地产业、运输业、餐饮业、服务业等产业。根据 2011~2020 年的《阳泉市水资源公报》与《山西统计年鉴》可得第三产业万元生产总值用水量的变化趋势,结果见表 3-11 所示,从表中可知第三产业万元生产总值用水量从 2011 年的 4.846m³/万元,下降到了 2020 年的 2.976m³/万元,根据第三产业万元生产总值用水量的变化规律,预计在普通节水方案下,2025 年第三产业万元生产总值用水量为 2.14m³/万元,2030 年第三产业万元生产总值用水量为 1.864m³/万元;在推荐节水方案下,2025 年第三产业万元生产总值用水量为 1.945m³/万元,2030 年第三产业万元生产总值用水量为 1.71m³/万元。

本研究通过趋势法得到了阳泉市规划水平年 2025 年与 2030 年的第三产业生产总值, 结合两种节水方案的用水指标可得阳泉市在不同水平年的第三产业需水量。结果显示, 在普通节水方案下, 2025 与 2030 规划水平年的第三产业需水量为 1100 万 m^3 与 1200 万 m^3 ; 在推荐节水方案下阳泉市第三产业需水量分别为 1000 万 m^3 与 1101 万 m^3 。详细预测结果如表 3-12 所示。

表 3-11 阳泉市万元第三产业万元产值用水量变化表

Table 3-11 Table of changes in water consumption of 10000 yuan output value of tertiary industry in Yangquan City

年份	第三产业用水量 (万吨)	第三产业生产总值 (万元)	万元第三产业万元产值用水量 (m^3 /万元)
2020	1318.75	4430656	2.976
2019	1417.946125	4232675	3.350
2018	1512.63594	4346655	3.480
2017	1435.995765	3912795	3.670
2016	1279.880519	3564134	3.591
2015	1278.743047	3319686	3.852
2014	1307.232852	3113942	4.198
2013	1213.535411	2851352	4.256
2012	1213.798298	2743047	4.425
2011	1149.026822	2371083	4.846

表 3-12 阳泉市第三产业需水量预测成果

Table 3-12 Forecast results of water demand in the tertiary industry in Yangquan City

用水方案	行政区	水平年	第三产业生产总值 (万元)	用水定额 (m ³ /万元)	第三产业用水量 (万吨)
普通节水方案	城区	2025	2370510	2.1	507.289
		2030	3025430	1.9	563.940
	矿区	2025	616670	2.1	131.967
		2030	787040	1.9	146.704
	郊区	2025	820630	2.1	175.615
		2030	998420	1.9	186.105
	平定县	2025	624400	2.1	133.622
		2030	741590	1.9	138.232
	盂县	2025	711750	2.1	152.315
		2030	886970	1.9	165.331
	阳泉市	2025	5143960	2.1	1100.807
		2030	6439460	1.9	1200.315
推荐节水方案	城区	2025	2370510	1.9	461.064
		2030	3025430	1.7	517.349
	矿区	2025	616670	1.9	119.942
		2030	787040	1.7	134.584
	郊区	2025	820630	1.9	159.613
		2030	998420	1.7	170.730
	平定县	2025	624400	1.9	121.446
		2030	741590	1.7	126.812
	盂县	2025	711750	1.9	138.435
		2030	886970	1.7	151.672
	阳泉市	2025	5143960	1.9	1000.500
		2030	6439460	1.7	1101.148

3.2.5 农业需水预测

阳泉市的农业需水主要包括两部分，分别为农田灌溉需水与林牧渔畜需水，在计算时统一归为农业需水。通过历年的《阳泉市水资源公报》与《山西统计年鉴》，可知阳泉市农业万元产值用水量变化情况，详细数据如表 3-13 所示，由表中数据可知，阳泉市 2011 年的万元生产总值用水量为 478.969m³/万元，在 2020 年降低为 379.268m³/万元，呈现逐年递减的趋势，证明农业灌溉节水设备与节水技术的使用量越来越普及。根据万元农业生产总值用水量的变化趋势，对近期规划水平年 2025 年与远期规划水平年 2030 年的用水量进行预测分析，预计在普通节水方案下 2025 年与 2030 年的农业万元生产总值用水量分别为 342m³/万元与 307.8m³/万元；在推荐节水方案下 2025 年与 2030 年的万元生产总值用水量分别为 323m³/万元与 274.55m³/万元。

本文通过趋势法得到了阳泉市规划水平年 2025 年与 2030 年的农业生产总值，结合两种节水方案的用水指标可得阳泉市在不同规划水平年的农业需水量。结果显示，在普通节水方案下 2025 与 2030 年的农业需水量为 3986.01 万 m^3 与 4149.828 万 m^3 ；在推荐节水方案下阳泉市工业需水量分别为 3919.282 万 m^3 与 3555.423 万 m^3 。详细预测结果如表 3-14 所示。

表 3-13 阳泉市农业万元产值用水量变化表

Table 3-13 Yangquan City agricultural output value 10000 yuan water consumption change table

年份	农业用水量 (万吨)	农业生产总值 (万元)	万元农业生产总值用水量 (m^3 /万元)
2020	3969.800	104670	379.268
2019	3752.081	103452	362.688
2018	4237.753	106225	398.941
2017	4316.953	102818	419.864
2016	4389.613	103059	425.932
2015	4377.444	99880	438.270
2014	4902.332	110090	445.302
2013	4676.438	103386	452.328
2012	4244.000	91850	462.058
2011	4047.340	84501	478.969

表 3-14 阳泉市农业需水预测成果

Table 3-14 Forecast results of agricultural water demand in Yangquan City

用水方案	行政区	水平年	农业产值 (万元)	用水定额 (m ³ /万元)	农业用水量 (万吨)
普通节水方案	城区	2025	2800	342	95.760
		2030	3330	307.8	102.497
	矿区	2025	1040	342	35.568
		2030	1120	307.8	34.474
	郊区	2025	17830	342	609.786
		2030	18740	307.8	576.817
	平定县	2025	59280	342	2027.376
		2030	63860	307.8	1965.611
	盂县	2025	40380	342	1380.996
		2030	42440	307.8	1306.303
	阳泉市	2025	121340	342	4149.828
		2030	129500	307.8	3986.010
推荐节水方案	城区	2025	2800	323	90.440
		2030	3330	274.55	91.425
	矿区	2025	1040	323	33.592
		2030	1120	274.55	30.750
	郊区	2025	17830	323	575.909
		2030	18740	274.55	514.507
	平定县	2025	59280	323	1914.744
		2030	63860	274.55	1753.276
	盂县	2025	40380	323	1304.274
		2030	42440	274.55	1165.190
	阳泉市	2025	121340	323	3919.282
		2030	129500	274.55	3555.423

3.2.6 生态需水预测

生态需水指的是要使当地生态系统达到或者维持一定水平时的需水量，通常包含维持河道生态流量与养护城市中的绿化面积的环境需水量两部分。河道生态流量是指用于维护河道内基本生态环境不恶化的最小需水量，根据阳泉市的水文资料显示，河道内的生态流量是由降雨径流与水库所下放的生态基流共同承担，因此不纳入水资源优化配置研究与水资源供需平衡的计算中，在本研究中主要考虑的为用于养护城市绿化面积的生态环境需水量。

用于养护城市绿化面积的生态环境需水量主要包含城市绿地浇灌需水量与城镇居民生态环境用水量两部分内容。根据阳泉市生态环境用水的变化趋势，并参考《阳泉市生态文明总体建设规划》，可知阳泉市在 2025 与 2030 规划水平年的人均绿地占有面积

分别为 $15\text{m}^2/\text{人}$ 与 $18\text{m}^2/\text{人}$ ，在普通节水方案下 2025 与 2030 规划水平年的绿地浇灌需水定额分别为 $120\text{m}^3/\text{亩}$ 与 $100\text{m}^3/\text{亩}$ ，人均环境用水定额分别为 $9\text{m}^3/\text{人}$ 与 $7.5\text{m}^3/\text{人}$ ；在推荐节水方案下 2025 与 2030 规划水平年绿地浇灌需水定额分别为 $100\text{m}^3/\text{亩}$ 与 $80\text{m}^3/\text{亩}$ ，人均环境用水定额分别为 $8\text{m}^3/\text{人}$ 与 $6\text{m}^3/\text{人}$ 。

根据前文分析预测得到的阳泉市人口数量与城镇人口数量，基于城镇居民人均环境用水定额与绿地面积需水定额，计算可得阳泉市 2025 年与 2030 规划水平年不同节水方案下的环境需水量，结果如表 3-15 所示。计算结果显示：在基本节水方案下，阳泉市 2025 与 2030 规划水平年的环境需水量分别为 1126.36 万 m^3 与 1010.18 万 m^3 ；在基本节水方案下，阳泉市 2025 与 2030 规划水平年的环境需水量分别为 986.77 万 m^3 与 808.15 万 m^3 。

表 3-15 阳泉市生态需水量预测结果
Table 3-15 Prediction result of water demand in Yangquan City

用水方案	行政区	水平年	城镇人口 (万人)	人均绿地面积 (m ²)	绿地面积 (亩)	需水定额 (m ³ /亩)	需水量 (万 m ³)	人均环境用水定额 (m ³ /人)	需水量 (万 m ³)	总计 (万 m ³)
推荐节水方案	城区	2025	22.28	15	5013.06	100	50.13	8	178.24	228.37
		2030	22.17	18	5985.65	80	47.89	6	133.01	180.90
	矿区	2025	21.93	15	4933.23	100	49.33	8	175.40	224.74
		2030	20.85	18	5629.74	80	45.04	6	125.11	170.14
	郊区	2025	20.22	15	4549.87	100	45.50	8	161.77	207.27
		2030	21.25	18	5738.35	80	45.91	6	127.52	173.43
	平定县	2025	17.20	15	3871.03	100	38.71	8	137.64	176.35
		2030	19.00	18	5128.71	80	41.03	6	113.97	155.00
	盂县	2025	14.64	15	3293.53	100	32.94	8	117.10	150.04
		2030	15.77	18	4257.68	80	34.06	6	94.62	128.68
	阳泉市	2025	96.27	15	21660.71	100	216.61	8	770.16	986.77
		2030	99.04	18	26740.13	80	213.92	6	594.23	808.15
普通节水方案	城区	2025	22.28	15	5013.06	120	60.16	9	200.52	260.68
		2030	22.17	18	5985.65	100	59.86	7.5	166.27	226.12
	矿区	2025	21.93	15	4933.23	120	59.20	9	197.33	256.53
		2030	20.85	18	5629.74	100	56.30	7.5	156.38	212.68
	郊区	2025	20.22	15	4549.87	120	54.60	9	181.99	236.59
		2030	21.25	18	5738.35	100	57.38	7.5	159.40	216.78
	平定县	2025	17.20	15	3871.03	120	46.45	9	154.84	201.29
		2030	19.00	18	5128.71	100	51.29	7.5	142.46	193.75
	盂县	2025	14.64	15	3293.53	120	39.52	9	131.74	171.26
		2030	15.77	18	4257.68	100	42.58	7.5	118.27	160.85
	阳泉市	2025	96.27	15	21660.71	120	259.93	9	866.43	1126.36
		2030	99.04	18	26740.13	100	267.40	7.5	742.78	1010.18

3.2.7 总需水量预测汇总

综合生活、农业、工业、第三产业、生态环境五类用水户在不同规划水平年与不同节水方案下的需水量，并进行汇总，汇总结果如表 3-16 所示。由表中数据可知在普通节水方案下阳泉市 2025 与 2030 规划水平年需水量分别为 19343.03 万 m^3 与 19590.70 万 m^3 ；在推荐节水方案下阳泉市 2025 与 2030 规划水平年的需水量分别为 18147.78 万 m^3 与 17632.30 万 m^3 。

表 3-16 阳泉市用水量汇总表 (单位: 万 m^3)Table 3-16 Summary of water consumption in Yangquan County (unit: 10^4m^3)

用水方案	行政区	水平年	生活用水	农业用水	工业用水	三产用水	生态用水	总计
普通节水方案	城区	2025	996.56	95.76	701.67	507.29	260.68	2561.96
		2030	1019.96	102.50	712.46	563.94	226.12	2624.98
	矿区	2025	979.54	35.57	2909.40	131.97	256.53	4313.00
		2030	958.93	34.47	3176.69	146.70	212.68	4529.48
	郊区	2025	1123.07	609.79	1331.77	175.61	236.59	3476.83
		2030	1196.14	576.82	1352.23	186.11	216.78	3528.07
	平定县	2025	1147.81	2027.38	1264.50	133.62	201.29	4774.60
		2030	1232.47	1965.61	1222.52	138.23	193.75	4752.57
	盂县	2025	1029.40	1381.00	1482.33	152.31	171.26	4216.30
		2030	1089.72	1306.30	1433.09	165.33	160.85	4155.29
	阳泉市	2025	5276.37	4149.83	7689.67	1100.81	1126.36	19343.03
		2030	5497.21	3986.01	7896.98	1200.32	1010.18	19590.70
推荐节水方案	城区	2025	896.90	90.44	683.68	461.06	228.37	2360.46
		2030	917.96	91.43	651.39	517.35	180.90	2359.03
	矿区	2025	881.59	33.59	2834.80	119.94	224.74	4094.66
		2030	863.04	30.75	2904.40	134.58	170.14	4102.92
	郊区	2025	1010.76	575.91	1297.62	159.61	207.27	3251.18
		2030	1076.53	514.51	1236.32	170.73	173.43	3171.51
	平定县	2025	1033.03	1914.74	1232.07	121.45	176.35	4477.64
		2030	1109.22	1753.28	1117.73	126.81	155.00	4262.04
	盂县	2025	926.46	1304.27	1444.32	138.44	150.04	3963.53
		2030	980.74	1165.19	1310.26	151.67	128.68	3736.54
	阳泉市	2025	4748.74	3919.28	7492.50	1000.50	986.77	18147.78
		2030	4947.49	3555.42	7220.10	1101.15	808.15	17632.30

3.2.8 需水预测精度分析

本研究将采用灰色关联法^[81]对阳泉市历年各行业的用水量与总用水量进行关联度分析，并挑选出关联度大于 0.7 的行业，利用 SPSS 统计分析软件建立这些用水户用水

量与总用水量间的多元线性回归方程，利用回归方程对 2025 与 2030 规划水平年的需水量进行精度分析。

灰色关联分析法为关联分析法的一种^[82]，可根据各序列曲线的几何形状来判断不同序列间关系的紧密程度^{[83]、[84]}，在计算时要先求得各序列间的关联系数，再由关联系数求得关联度，最后对关联系数进行排序与分析^[48]，该方法的优点为：使用简单、便捷，并且对所要求的数据质量不高，但是该方法的主观性较强，部分指标的最优值难以确定。

在进行灰色关联分析时，将对 2011~2020 年《阳泉市水资源公报》中生活用水、农业用水、工业用水、第三产业用水与生态环境用水的用水量进行分析。分析可得生活、农业、工业、第三产业、生态环境用水量与总用水量间的关联系数分别为 0.822、0.813、0.839、0.653、0.600，从中挑选出关联系数大于 0.7 的因素，包括生活用水、农业用水、工业用水，并基于这三种用水量建立关于总用水量的多元线性回归模型，并以此回归模型对 2025 及 2030 规划水平年的需水量进行预测，并与用定额法所分析预测得到的 2025 及 2030 规划水平年的需水量进行对比分析。

利用 SPSS 统计分析软件建立生活用水量 x_1 、农业用水量 x_2 、工业用水量 x_3 ，与总用水量 y 之间的多元线性表达式，表达式为 (3-4)：

$$y = 0.244x_1 + 0.783x_2 + 0.811x_3 + 8294.856 \tag{3-4}$$

由 (3-4) 式对 2011~2020 年的需水量进行验证，表 3-17 为利用多目标线性回归方程进行计算的结果与利用趋势法所计算出的结果的误差分析。

表 3-17 误差分析 (2011~2020)
Table 3-17 Error analyze (2011 to 2020)

水平年	生活用水量 (万 m ³)	农业用水量 (万 m ³)	工业用水量 (万 m ³)	总用水量 (万 m ³)	预测用水量 (万 m ³)	误差 (%)
2020	4678.770	3969.800	6600.730	18543.640	17898.021	-3.482
2019	5266.800	3752.081	6589.926	18156.387	17862.264	-1.620
2018	5720.230	4237.753	6879.358	19087.100	18587.912	-2.615
2017	5592.000	4316.953	6535.688	17406.641	18339.921	5.362
2016	5633.000	4389.613	6310.000	17305.613	18223.785	5.306
2015	5500.000	4377.444	6339.291	17130.735	18205.560	6.274
2014	5395.000	4902.332	7415.000	20740.332	19463.327	-6.157
2013	5327.000	735.192	8345.566	16878.758	16938.553	0.354
2012	4640.000	4244.000	8564.404	19391.404	19695.800	1.570
2011	3998.770	4047.340	7753.770	18187.280	18727.931	2.973

由表 3-17 可知利用公式 (3-2) 进行需水量预测验证时误差不超过 10%，证明结果较为准确，可以对 2025 与 2030 规划水平年中两种节水方案下的用水量进行验证，验证结果如表 3-18 所示。

表 3-18 利用多目标线性回归方程进行预测的误差分析 (2025、2030)

Table 3-18 Error analyze of predicting using multiple linear regression equation (2025 and 2030)

用水方案	水平年	生活用水 (万 m ³)	农业用水 (万 m ³)	工业用水 (万 m ³)	定额法预测 用水量 (万 m ³)	回归公式 预测用水量 (万 m ³)	误差 (%)
普通节水方案	2025	5276.373	4149.828	7689.669	19343.034	19067.928	-1.422
	2030	5497.211	3986.01	7896.98	19590.699	19161.672	-2.190
推荐节水方案	2025	4748.736	3919.282	7492.498	18147.782	18598.761	2.485
	2030	4947.49	3555.423	7220.096	17632.302	18141.437	2.888

由表 3-18 可知, 由定额法所预测的 2025 与 2030 规划水平年不同节水方案下的用水量与多元线性回归方程所预测的用水量的误差不超过 $\pm 3\%$, 证明利用定额法对阳泉市总需水量的预测结果较为准确, 预测结果符合阳泉市的经济发展规律。故以定额法所预测的需水量作为水资源优化配置中的依据。

3.2.9 阳泉市需水量时空变化分析

1. 阳泉市用水量时间变化情况:

由《阳泉市水资源公报》可知 2011~2020 年各项产业的用水量变化情况, 具体变化趋势如图 3-2 所示。由图 3-2 可知, 在 2011~2020 年间阳泉市农业用水量年际变化不大, 在 2011~2014 年有小幅度的上涨, 原因可能是由于当年的气候较为干旱, 降雨量较小, 需要更多的水资源进行灌溉, 在 2015~2020 年间用水量总体呈现出递减的趋势, 从中可以看出节水设备与技术在农业领域实施后的成果; 生活用水量在 2011~2018 年间呈现递增趋势, 但涨势逐年减缓, 用水量在 2018 年达到最大, 第一个原因可能城镇化的原因使城镇居民数量上升, 导致总用水量上涨, 第二个原因为当地居民在生活中逐渐意识到节水的重要性, 并开始逐渐使用节水设备, 逐渐上涨的节水设备的普及率抑制了生活用水量的上涨; 生活用水量在 2019~2020 年间开始呈现出递减趋势, 且降幅较大, 说明城镇居民家中的节水设备的普及率与节水意识有了进一步提高; 在工业用水方面, 工业用水量在 2011~2012 年间有过小幅度的提高, 在 2012~2016 年间降幅较大, 原因可能是工业节水设备在各部门中逐渐普及, 使工业生产中的用水量逐年降低, 在 2017~2020 年工业用水量先是有小幅度的上涨, 之后又开始回落, 总体来说用水量没有发生较大的变化, 说明当前工业生产中的节水技术与节水设备的使用率已经可以使工业用水量达到一个较为平稳的阶段, 在近期与远期规划水平年中要继续加大对节水技术、节水设备、污水处理再利用技术的研发与使用, 让阳泉市的工业健康可持续发展。

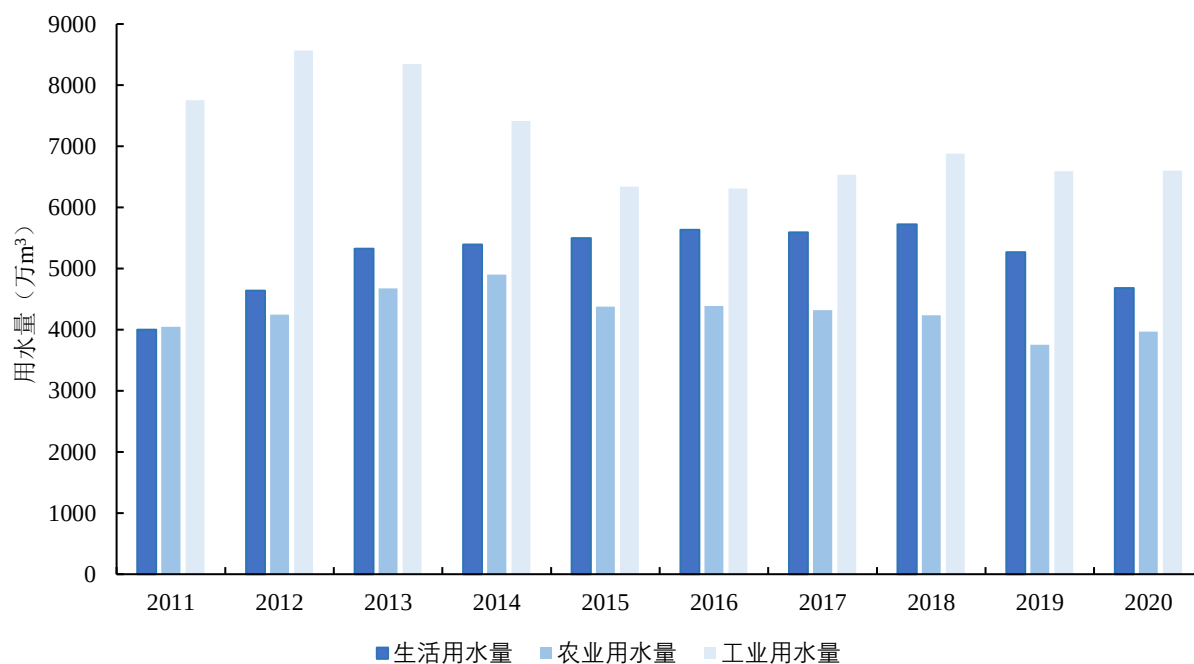


图 3-2 阳泉市 2011~2020 年用水量时间变化图

Fig. 3-2 Time change of water consumption in 2011 to 2020 of Yangquan County

2. 阳泉市用水量空间变化情况：

根据阳泉市 2011~2020 年各行政区的用水情况，可知用水量最大的行政区为平定县与盂县，平定县与盂县的年均水资源使用量在 5000 万 m^3 左右。在平定县中，用水量最大的产业为工业，用水量约占总用水量的 40%，其次为生活用水与农业用水，用水量所占比例均约为 20%，其中用水量最小的为建筑业与第三产业，用水量不足总用水量的 5%，说明在平定县中第三产业的发展潜力较高；在盂县中，由于盂县为主要的粮食产区，因此用水量最大的产业为农业，用水量约占总用水量的 33%，其次为工业，用水量约占总用水量的 27%，之后为生活用水，约占总水量的 21%，第三产业用水约占总水量的 11%；矿区的总用水量排名第三，年均用水量约为 3500 万 m^3 ，其中工业用水量最高，占比约为 46%，其次为生活用水，占比约为 35%，由于矿区为工业区，因此这两部分用水所占的比例较高，农业、第三产业与生态环境用水总量较低，并且由于矿区老窑水处理效率较低，导致当地所面临的生态环境问题较为严峻；郊区的年均用水量约为 3000 万 m^3 ，其中工业用水所占比例最高，约为 30%，生活用水与农业用水所占比例分别为 28% 与 26%，由于郊区靠近矿区，因此承担接了一部分矿区的产业转移与大部分的服务业，因此与矿区类似，生产与生活用水量较高，第三产业与；城区的用水量最小，年均用水量约为 2500 万 m^3 ，其中生活用水所占比例最高，约为 47%，其次为工业，占比约为 22%，之后为第三产业，占比约为 19%，在五个行政区中只有城区的第三产业用水量占比最高，说明城区的第三产业最为发达。

3.3 供水量预测

3.3.1 地表水可供水量预测

在计算地表水源工程的可供水量时主要考虑的供水工程有：蓄水工程、引水工程、提水工程与跨流域调水工程等工程的可供水量。根据阳泉市水文资料显示，阳泉市内的地表水源工程不包含跨流域调工程，因此在本次地表水可供水量的计算中以蓄水工程、调水工程与提水工程为主。

3.3.1.1 蓄水工程可供水量预测

在蓄水工程方面，阳泉市主要的供水对象为当地的生活用水、工业用水与农业用水、少部分用于第三产业用水与生态环境用水。阳泉市现有水库二十二座，其中两座中型水库、九座小I型水库、十一座小II型水库。其中具备供水功能的水库有六座分别为：龙华口水库、山南水库、油瓮水库、尚怡水库、上冶头水库、原坪水库，其余十六座水库的主要功能为防洪，其中龙华口水库为中型水库，其余的供水水库小（1）型水库。下面为供水水库的详细介绍：

龙华口水库：龙华口水库为中型水库，位于阳泉市盂县龙华河流域下游的下社乡、下庄村与会里村的交界处，该工程于 2017 年建成，控制流域面积 475km^2 ，水域面积三平方公里，总库容 3000 万 m^3 ，兴利库容 2018 万 m^3 。龙华口水库负担着下游的公路与村庄的防汛任务，同时承担着龙华口调水工程中的龙华口水库补水与向盂县、阳泉市区调水任务，集防洪、供水、发电等功能为一体，是山西省“兴水战略”的应急工程之一。

山南水库：山南水库为小I型水库，位于寿阳县的尹灵芝镇高崖村，距离阳泉市区 26 公里。该水库于 1974 年建成，控制流域面积 89km^2 ，总库容 601 万 m^3 ，兴利库容 115 万 m^3 。山南水库主要负担着下游 307 国道、石太铁路、太旧高速以及阳泉市市区的防汛工作，该水库以防汛为主，兼顾向城市供水功能，日送水量可达 1.5 万 m^3 。

油瓮水库：油瓮水库为小I型水库，位于阳泉市温河干流上的武家庄以上 500m 处，该水库于 1976 年建成，控制流域面积 600km^2 ，总库容 186 万 m^3 ，兴利库容 22 万 m^3 ，主要负担着下游 207 国道以及周边村庄的防汛工作，兼具供水功能。

尚怡水库：尚怡水库为小I型水库，位于平定县，冶西镇的尚怡村，该水库于 1979 年建成，控制流域面积 50.6km^2 ，总库容 590.4 万 m^3 ，兴利库容 165 万 m^3 ，主要负担着下游阳煤五矿与太旧高速的防汛任务，该水库以防汛工作为主，兼具向平定县供水的任务。

上冶头水库：上冶头水库为小I型水库，位于阳泉市平定县冶西镇上冶头村、南川河上游支流的苏村河上，距平定县县城 19km，该水库于 1979 年建成，控制流域面积 10km^2 ，

总库容 123 万 m^3 ，设计防洪库容 33 万 m^3 ，兴利库容，72 万 m^3 。该水库主要承担着阳煤五矿与太旧高速的防汛任务，兼具向平定县供水的任务。

原坪水库：原坪水库为小 I 型水库，位于阳泉市平定县冶西镇原坪村，该水库于 1982 年建成，控制流域面积 27.8km^2 ，总库容 382 万 m^3 ，兴利库容 172 万 m^3 ，该水库主要负担着下游国道以及村庄的防汛工作，兼具为平定县供水的任务。

对水库的最大可供水量，本研究拟采取典型年调节计算的方法进行计算，并对得出结论进行分析，下面以龙华口水库的调节计算为例进行介绍。

1. 龙华口水库不同频率年的径流深

龙华口水库的控制流域面积为 475km^2 ，总库容为 3000 万 m^3 ，兴利库容为 2018 万 m^3 ，死库容为 284 万 m^3 。根据《阳泉市水资源公报》中阳泉市的降水量与会里水文站 1961~2021 年的降水量数据可知，龙华口水库流域的多年平均降水量为 525.81mm。由阳泉市多年平均径流深等值线图插值可知，龙华口水库流域多年平均径流深为 117.78mm。

根据平均降雨量数据与多年平均径流深数据可知，龙华口水库流域的降雨径流系数为 0.224。

利用 1961~2021 年的降雨量数据拟合 P-III 型曲线，其中变差系数 $C_v=0.26$ ，偏差系数 $C_s=2C_v$ ，计算可得流域内不同频率年的降水量，将其与降雨径流系数相乘可得不同频率年的径流深，计算结果如表 3-19 所示。

表 3-19 龙华口流域不同频率年径流深统计分析表 (单位: mm)

Table 3-19 Statistics analysis result of annual runoff depth at different frequencies in Longhuakou basin (Unit:mm)

频率	P=95%	P=95%	P=95%
年径流深	106.091	122.488	135.518

2. 龙华口水库入库流量及月分配

龙华口水库所控制的流域面积为 475km^2 ，将不同频率年的径流深乘以流域面积可得不同频率年的入库流量，结果如表 3-20 所示。

表 3-20 龙华口水库不同频率年入库径流量 (单位: 万 m^3)

Table 3-20 Annual inflow of Longhuakou Reservoir at different frequencies (Unit: 10^4m^3)

频率	P=95%	P=95%	P=95%
入库流量	1202.2	1501	2218.3

根据会里水文站所提供的历年每月降水量数据与不同频率年份的月的径流量，可得出流域内的径流月分配系数，由此可对龙华口流域的年入库径流量进行月份配，分配结果如表 3-21 所示。

3. 龙华口库区蒸发损失量

龙华口水库水面蒸发的损失量为水库的月均水面面积乘以月均蒸发深度，水库的月均蒸发深度为当月的蒸发深度减去当月的降雨深。

通过阳泉市会里水文站水库历年水量蒸发深度数据可知, 龙华口水库控制流域的范围内的平均水面蒸发深度为 1300mm。基于历年各月均蒸发量可知各月份的水量蒸发系数, 用系数乘以龙华口水库的平均蒸发深度可得不同月份的月均蒸发深, 结果如表 3-22 所示。

用平均蒸发深度减去不同频率年的降雨量可得不同频率年的净蒸发深度, 结果如表 3-23 所示。

4. 龙华口水库渗漏损失

水库的渗漏损失指的是水库水体从坝肩、坝基、库底等各种建筑物的渗漏损失量, 根据当地地质条件与水库管理的相关资料可知, 由于龙华口水库为新建水库, 因此月渗漏的水量可取水库月均蓄水量的 1%进行估算。

5. 水库典型年调节计算表

经过水库典型年调节计算可知, 在 95%、75%、50%的降水频率下, 龙华口水库的最大可供水量分别为 765.6 万 m^3 、1072.8 万 m^3 、1816.2 万 m^3 。水库典型年调节计算结果详如表 3-24、3-25、3-26 所示。

其余五座小型水库同样按照典型年调节计算的方法计算在不同降水频率条件下的最大可供水量, 最终得到阳泉市蓄水工程在来水频率 P 分别为 95%、75%、50%情况下的最大可供水量分别为: 1927.700 万 m^3 、2525.576 万 m^3 、3632.858 万 m^3 。具体最大可供水量表如表 3-27 所示。

第三章 阳泉市供需水量预测分析

表 3-21 龙华口水库不同频率水平年入库径流量分配成果表

(单位: 万 m³)

Table 3-21 Distribution table of annual inflow runoff results at different frequency years in Longhuakou Reservoir

(Unit:10⁴m³)

月份 保证率	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
P=95%	12.022	24.044	24.044	48.088	72.132	108.198	312.572	276.506	180.330	120.220	12.022	12.022	1202.200
P=75%	15.010	30.020	30.020	60.040	90.060	135.090	390.260	345.230	225.150	150.100	15.010	15.010	1501.000
P=50%	22.183	44.366	44.366	88.732	133.098	199.647	576.758	510.209	332.745	221.830	22.183	22.183	2218.300

表 3-22 龙华口水库各月水体蒸发深度月分配成果表

(单位: mm)

Table 3-22 Calculation result of evaporation depth of Longhuakou Reservoir in each month

(Unit:mm)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
蒸发系数	0.03	0.037	0.062	0.071	0.11	0.113	0.163	0.149	0.099	0.084	0.05	0.032	1
蒸发深	39	48.1	80.6	92.3	143	146.9	211.9	193.7	128.7	109.2	65	41.6	1300

表 3-23 龙华口水库各月水体净蒸发损失深计算成果表

(单位: mm)

Table 3-23 Calculation result of net evaporation depth of Longhuakou Reservoir in each month

(Unit:mm)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
水面蒸发深度	39	48.1	80.6	92.3	143	146.9	211.9	193.7	128.7	109.2	65	41.6	1300
P=95% 降雨量	4.348	8.696	8.696	17.392	26.088	39.132	113.048	100.004	65.22	43.48	4.348	4.348	434.8
P=95% 净蒸发损失深	34.652	39.404	71.904	74.908	116.912	107.768	98.852	93.696	63.48	65.72	60.652	37.252	865.2
P=75% 降雨量	5.02	10.04	10.04	20.08	30.12	45.18	130.52	115.46	75.3	50.2	5.02	5.02	502
P=75% 净蒸发损失深	33.98	38.06	70.56	72.22	112.88	101.72	81.38	78.24	53.4	59	59.98	36.58	798
P=50% 降雨量	5.554	11.108	11.108	22.216	33.324	49.986	144.404	127.742	83.31	55.54	5.554	5.554	555.4
P=50% 净蒸发损失深	33.446	36.992	69.492	70.084	109.676	96.914	67.496	65.958	45.39	53.66	59.446	36.046	744.6

表 3-24 龙华口水库 95%频率年水库调节计算成果表

Table 3-24 Calculation results of Longhuakou Reservoir adjustment at 95% prediction frequency year

月份	月初库容 (万 m ³)	来水量 (万 m ³)	引水量 (万 m ³)	蒸发损失深 (mm)	蒸发损失量 (万 m ³)	渗漏损失量 (万 m ³)	需水量 (万 m ³)	供水量 (万 m ³)	缺水量 (万 m ³)	弃水量 (万 m ³)	月末库容 (万 m ³)	平均库容 (万 m ³)
6	2400.000	108.198	0	107.768	15	24.027	63.8	63.8	0	0	2405.398	2402.699
7	2405.398	312.572	0	98.852	13.86	25.104	63.8	63.8	0	0	2615.310	2510.354
8	2615.310	276.506	0	93.696	13.12	27.016	63.8	63.8	0	0	2787.896	2701.603
9	2787.896	180.330	0	63.480	8.89	28.277	63.8	63.8	0	0	2867.536	2827.716
10	2867.536	120.220	0	65.720	9.2	28.766	63.8	63.8	0	0	2885.756	2876.646
11	2885.756	12.022	0	60.652	8.48	28.414	63.8	63.8	0	0	2796.998	2841.377
12	2796.998	12.022	0	37.252	5.222	27.547	63.8	63.8	0	0	2712.398	2754.698
1	2712.398	12.022	0	34.652	4.85	26.707	63.8	63.8	0	0	2629.070	2670.734
2	2629.070	24.044	0	39.404	5.51	25.934	63.8	63.8	0	0	2557.804	2593.437
3	2557.804	24.044	0	71.904	10.06	25.204	63.8	63.8	0	0	2482.988	2520.396
4	2482.988	48.088	0	74.908	10.49	24.576	63.8	63.8	0	0	2432.226	2457.607
5	2432.226	72.132	0	116.912	16.37	24.162	63.8	63.8	0	0	2400.188	2416.207
合计		1202.2		865.2	121.052	315.735	765.6	765.6	0	0		

表 3-25 龙华口水库 75%频率年水库调节计算成果表

Table 3-25 Calculation results of Longhuakou Reservoir adjustment at 75% prediction frequency year

月份	月初库容 (万 m ³)	来水量 (万 m ³)	引水量 (万 m ³)	蒸发损失深 (mm)	蒸发损失量 (万 m ³)	渗漏损失量 (万 m ³)	需水量 (万 m ³)	供水量 (万 m ³)	缺水量 (万 m ³)	弃水量 (万 m ³)	月末库容 (万 m ³)	平均库容 (万 m ³)
6	2350	135.090	0	101.72	14.25	23.540	89.4	89.4	0	0	2357.94	2353.97
7	2357.94	390.260	0	81.38	11.4	24.897	89.4	89.4	0	0	2621.4	2489.67
8	2621.4	345.230	0	78.24	10.96	27.301	89.4	89.4	0	0	2838.87	2730.135
9	2838.87	225.150	0	53.4	7.48	28.885	89.4	89.4	0	0	2938.14	2888.505
10	2938.14	150.100	0	59	8.2	29.499	89.4	89.4	0	0	2961.64	2949.89
11	2961.64	15.010	0	59.98	8.4	29.057	89.4	89.4	0	0	2849.85	2905.745
12	2849.85	15.010	0	36.58	5.12	27.961	89.4	89.4	0	0	2742.34	2796.095
1	2742.34	15.010	0	33.98	4.76	26.893	89.4	89.4	0	0	2636.19	2689.265
2	2636.19	30.020	0	38.06	5.33	25.908	89.4	89.4	0	0	2545.48	2590.835
3	2545.48	30.020	0	70.56	9.89	24.981	89.4	89.4	0	0	2450.81	2498.145
4	2450.81	60.040	0	72.22	10.12	24.188	89.4	89.4	0	0	2386.69	2418.75
5	2386.69	90.060	0	112.88	15.81	23.671	89.4	89.4	0	0	2347.54	2367.115
合计		1501	0	798	111.72	316.781	1072.8	1072.8	0	0		

表 3-26 龙华口水库 50%频率年水库调节计算成果表

Table 3-26 Calculation results of Longhuakou Reservoir adjustment at 50% prediction frequency year

月份	月初库容 (万 m ³)	来水量 (万 m ³)	引水量 (万 m ³)	蒸发损失深 (mm)	蒸发损失量 (万 m ³)	渗漏损失量 (万 m ³)	需水量 (万 m ³)	供水量 (万 m ³)	缺水量 (万 m ³)	弃水量 (万 m ³)	月末库容 (万 m ³)	平均库容 (万 m ³)
6	2050.000	199.647	0	96.914	13.578	20.571	151.35	151.35	0	0	2064.219	2057.110
7	2064.219	576.758	0	67.496	9.456	22.609	151.35	151.35	0	0	2457.561	2260.890
8	2457.561	510.209	0	65.958	9.241	26.193	151.35	151.35	0	0	2780.939	2619.250
9	2780.939	332.745	0	45.39	6.359	28.542	151.35	151.35	0	0	2927.375	2854.157
10	2927.375	221.83	0	53.66	7.518	29.441	151.35	151.35	0	0	2960.767	2944.071
11	2960.767	22.183	0	59.446	8.328	28.777	151.35	151.35	0	0	2794.572	2877.670
12	2794.572	22.183	0	36.046	5.050	27.138	151.35	151.35	0	0	2632.995	2713.784
1	2632.995	22.183	0	33.446	4.686	25.532	151.35	151.35	0	0	2473.332	2553.164
2	2473.332	44.366	0	36.992	5.183	24.051	151.35	151.35	0	0	2336.786	2405.059
3	2336.786	44.366	0	69.492	9.736	22.669	151.35	151.35	0	0	2197.016	2266.901
4	2197.016	88.732	0	70.084	9.819	21.498	151.35	151.35	0	0	2102.579	2149.797
5	2102.579	133.098	0	109.676	15.366	20.752	151.35	151.35	0	0	2047.721	2075.150
合计		2218.3	0	744.6	104.318612	297.7700305	1816.2	1816.2	0	0		

表 3-27 当地水库可供水量汇总

(单位: 万 m^3)

Table 3-27 Summary of available water supply of local reservoir

(Unit: 10^4m^3)

水库名称	不同来水保证率可供水量		
	P=95%	P=75%	P=50%
龙华口水库	765.600	1072.800	1816.200
山南水库	277.700	415.595	542.950
油瓮水库	268.231	334.951	494.932
尚怡水库	272.180	310.217	343.938
上冶头水库	75.647	86.260	95.587
原坪水库	268.342	305.753	339.251
求和	1927.700	2525.576	3632.858

由表 3-27 可知阳泉市在降水频率为 95%、75%、50%保证率下的最大可供水量分别为 1927.700 万 m^3 、2525.576 万 m^3 、3632.858 万 m^3 。

3.3.1.2 提水工程可供水量预测

在提水工程方面,阳泉市的提水工程主要为娘子关提水工程,提取娘子关泉域水资源,向全市供水。随着阳泉市经济的高速发展,对水资源的消耗量也与日俱增,为了满足阳泉市的用水需求,娘子关泉水的提取量也逐年提高,并且一直处于过度开采状态,由此导致娘子关泉流量逐年降低,详情如图 2-8 所示。为保护娘子关水源地,计划规定在 2025 与 2030 规划水平年的提水量不超过 2019 年水平,即提水量不超过 8200 万 m^3 ,使水源得到有效的涵养。

根据娘子关调水工程的运行现状,并考虑娘子关泉域保护政策的实施,预测在来水频率 P=95%的情况下,娘子关的可开采水量为 4680 万 m^3 ;在来水频率 P=75%的情况下,娘子关的可开采水量为 5400 万 m^3 ;在 P=50%的情况下,娘子关的可开采水量为 6000 万 m^3 。

3.3.1.3 调水工程可供水量预测

龙华口调水工程是山西省“两纵十横”大水网建设的重点工程,是第二横相关项目中首个开工建设的项目,工程主要由滹沱河取水、龙华口水库补水、龙华口水库向孟县与阳泉市区调水三部分组成。该工程由 2021 年 7 月正式动工,预计 2025 年可以完工并实现通水。

滹沱河在阳泉市的水资源可用量为 0.95 亿 m^3 ,但是开发利用量仅为 0.07 亿 m^3 ,开采潜力巨大,在龙华口调水工程建成后,每年最多可向阳泉市输送 5000 万 m^3 的水资源,可与娘子关泉水形成互补与置换,减缓娘子关水源的供水压力,辅助解决阳泉市煤矿采

空区长期集聚“老窑水”，导致娘子关泉域岩溶水矿化度与硫酸根离子浓度严重超标的问题，缓解阳泉市市区生产、生活用水紧张的问题，使阳泉市水资源供给系统多样化，提高抗风险能力。

龙华口调水工程的调水量与不同频率年的降水量紧密相关，根据调水工程建设资料，进行典型年调节计算分析：在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下，调水工程可供水量为 3900 万 m^3 ；在来水保证率 $P=75\%$ 的情况下调水工程可供水量为 4200 万 m^3 ；在来水保证率 $P=50\%$ 的情况下调水工程可供水量为 5000 万 m^3 。

3.3.2 地下水可供水量预测

在本研究中，地下水供水水源主要指的是利用打井的方式所开采出的水源。根据阳泉市的水文资料可知，阳泉市地下水开采工程主要开采的水源为浅层河谷空隙地下水、石炭系层间熔岩裂隙地下水与碎屑岩与变质裂隙地下水，其中对浅层河谷空隙地下水的开发已经接近极限，而石炭系层间熔岩裂隙地下水也被开发枯竭，碎屑岩与变质岩裂隙的保水性差，因此可供开发的水资源量有限。

由于地下水水源不能得到及时有效的补给，各种地下水提取工程经常对地下水进行过度开采，导致地下水可开采量与地下水水位在逐年下降。阳泉市地下水开采量变化趋势如图 3-3 所示。

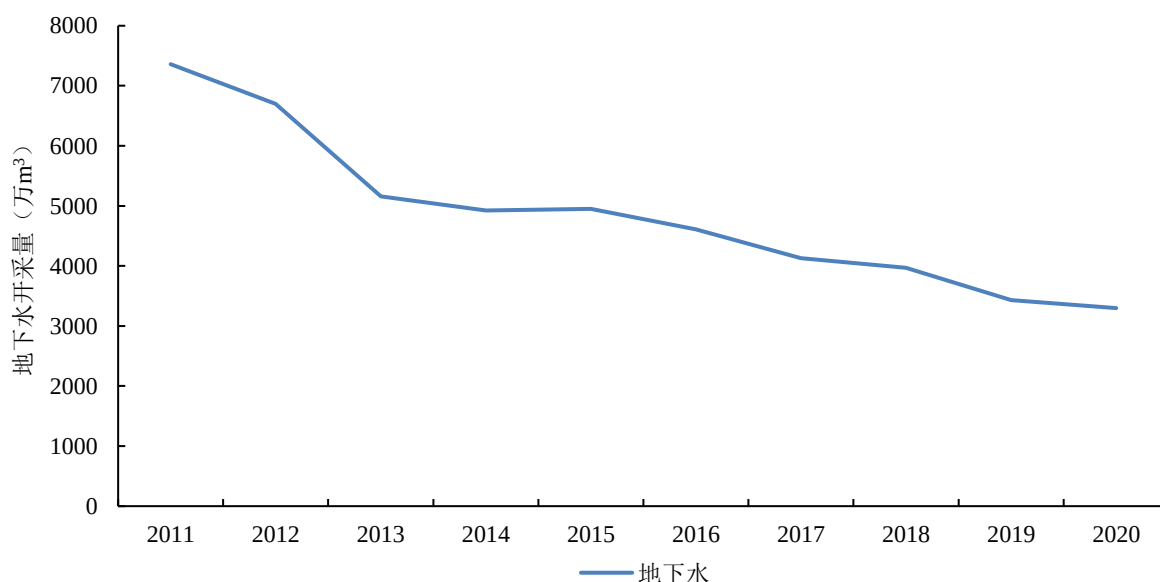


图 3-3 阳泉市地下水开采量变化趋势

Fig. 3-3 Trends of groundwater extraction in Yangquan City

为保护地下水水源，计划规定在规划水平年中，逐年降低地下水水资源的开采量，为地下水水生态环境的改善提供条件。规定地下水水源的开采总量不超过 2020 年开采水平，即 3298 万 m^3 。根据阳泉市发展规划与地下水保护相关法律法规的实施，本研究

中规定在近期规划水平年 2025 年，地下水水源的最大开采量为 2700 万 m³，在远期规划水平年 2030 年，地下水水源的最大开采量为 2300 万 m³。

3.3.3 非常规水源可供水量预测

阳泉市的非常规水源供水工程主要包括：矿井水利用工程、雨集蓄利用工程、污水处理再利用工程。

在雨水集蓄利用方面，参考《山西省“十四五”节水型社会建设规划》以及当地相关规划资料，可知阳泉市在规划水平年的雨水集蓄利用工程较少，在近期规划水平年 2025 年，将在现有条件下使雨水集蓄量达到 30 万 m³，在远期规划水平年 2030 年雨水集蓄量将达到 70 万 m³。

在污水处理再利用方面，根据阳泉市现有污水处理厂的处理能力可知，现阶段的最大处理能力可达 15 万 m³/d。同时阳泉市也将建设新的污水处理厂，并建设新的再生水配套管网，在近期规划水平年 2025 年预计相应污水处理率可达 80%，在远期规划水平年 2030 年预计相应的污水处理率可达 90%。同时大部分工厂污水经过处理后由于没有达到使用标准，因此只能大部分都直接排入河道，这是对水资源的一种浪费，通过对污水处理技术的研发，预计在近期规划水平年 2025 年污水回用率会达到 60%，在远期规划水平年 2030 年，污水回用率将达到 70%，由此可知阳泉市 2025 年污水处理回用量为 3500 万 m³，2030 年非常规水源供水量按现状污水处理回用量为 4000 万 m³，按照新建污水处理站与提升污水处理工艺后最大污水处理回用量每年可达 4700 万 m³。

3.3.4 可供水总量预测

依据前文所得到的阳泉市地表水供水工程、地下水供水工程与非常规水源供水工程的可供水总量，并结合阳泉市不同行政区的水资源特征，得到阳泉市不同行政区、不同规划水平年、不同来保证率下的可供水总量。如表 3-28 所示，阳泉市的各行政区在不同来水保证率与不同规划水平年的可供水总量如表 3-29 所示。

表 3-28 阳泉市可供水量汇总 单位：万 m³)

Table 3-28 Summary of water supply available in Yangquan City (Unit:10⁴m³)

水平年	保证率	蓄水	调水	提水	地下水	非常规水源	合计
2025	P=95%	1927.700	3900	4680	2700	3500	16707.700
	P=75%	2525.576	4200	5400	2700	3500	18325.576
	P=50%	3632.858	5000	6000	2700	3500	20832.858
2030	P=95%	1927.700	3900	4680	2300	4000	16807.700
	P=75%	2525.576	4200	5400	2300	4000	18425.576
	P=50%	3632.858	5000	6000	2300	4000	20932.858

表 3-29 阳泉市不同水平年与不同保证率下的可供水量表 (单位: 万 m³)Table 3-29 Available water supply results under different level years and different guarantee rates in Yangquan City (Unit: 10⁴m³)

行政区	水平年	保证率	蓄水	调水	提水	地下水	非常规水源	合计
城区	2025	P=95%	111.080	1100	731.474	94.213	196.740	2233.506
		P=75%	166.238	1200	844.007	94.213	196.740	2501.198
		P=50%	217.180	1200	937.948	94.213	196.740	2646.081
	2030	P=95%	111.080	1100	731.474	80.255	196.740	2219.548
		P=75%	166.238	1200	844.007	80.255	196.740	2487.240
		P=50%	217.180	1200	937.948	80.255	196.740	2632.123
矿区	2025	P=95%	166.620	500	1120.064	53.268	1337.140	3177.092
		P=75%	249.357	550	1292.381	53.268	1337.140	3482.146
		P=50%	325.770	1100	1435.812	53.268	1337.140	4251.990
	2030	P=95%	166.620	500	1120.064	45.377	1437.200	3269.260
		P=75%	249.357	550	1292.381	45.377	1437.200	3574.315
		P=50%	325.770	1100	1435.812	45.377	1437.200	4344.159
郊区	2025	P=95%	268.231	900	292.931	541.739	425.600	2428.501
		P=75%	334.951	950	337.998	541.739	425.600	2590.288
		P=50%	494.932	1100	375.553	541.739	425.600	2937.824
	2030	P=95%	268.231	900	292.931	461.481	425.600	2348.244
		P=75%	334.951	950	337.998	461.481	425.600	2510.031
		P=50%	494.932	1100	375.553	461.481	425.600	2857.567
平定县	2025	P=95%	616.170	0	2496.532	1048.916	381.702	4543.319
		P=75%	702.230	0	2880.613	1048.916	381.702	5013.461
		P=50%	778.776	0	3200.687	1048.916	381.702	5410.080
	2030	P=95%	616.170	0	2496.532	893.521	581.702	4587.924
		P=75%	702.230	0	2880.613	893.521	581.702	5058.066
		P=50%	778.776	0	3200.687	893.521	581.702	5454.685
盂县	2025	P=95%	765.600	1400	39.000	961.864	1158.818	4325.282
		P=75%	1072.800	1500	45.000	961.864	1158.818	4738.482
		P=50%	1816.200	1600	50.000	961.864	1158.818	5586.882
	2030	P=95%	765.600	1400	39.000	819.366	1358.758	4382.724
		P=75%	1072.800	1500	45.000	819.366	1358.758	4795.924
		P=50%	1816.200	1600	50.000	819.366	1358.758	5644.324
阳泉市	2025	P=95%	1927.700	3900	4680	2700	3500	16707.701
		P=75%	2525.576	4200	5400	2700	3500	18325.576
		P=50%	3632.858	5000	6000	2700	3500	20832.858
	2030	P=95%	1927.700	3900	4680	2300	4000	16807.701
		P=75%	2525.576	4200	5400	2300	4000	18425.576
		P=50%	3632.858	5000	6000	2300	4000	20932.858

3.4 水资源供需平衡分析

水资源供需平衡分析指的是在一定区域范围内,对水资源供需关系与水资源余缺量进行分析研究与讨论,确定当地阳泉市在当前供水系统、用水习惯方面与水资源配置方案的不足,以在后续在水资源优化配置过程中,确定水资源配置方案的优化方向。

本研究在对阳泉市规划水平年的水资源供需平衡进行分析时会进行两次,一次水资源供需平衡分析是基于阳泉市当前社会发展水平、居民生活条件、城市化进程、节水技术发展情况、节水设备使用率等因素,并根据阳泉市需水预测中的普通节水方案下的需水量与在不同水平年与不同来水频率条件下的最大可供水量,进行水资源供需平衡分析;由于在进行一次供需平衡时部分行政区会出现较大的缺水量与较大的余水量,因此二次供需平衡分析在第一次供需平衡分析的基础上,基于阳泉市需水预测方案中的推荐节水方案,并结合当地的节水规划,针对各行政区缺水的特点,对产业结构进行科学合理的调整、对用水户用水需求进行合理压缩,同时采取保护水资源生态环境、推进节水技术的发展等措施,进行水资源供需平衡分析。

3.4.1 一次供需平衡分析

在进行一次水资源供需平衡分析时所用的需水方案为普通节水方案,数据来源于表 3-16,所用的供水量数据来自于表 3-29 中的最大可供水量的预测结果,分析目的为确定在此方案下阳泉市水资源的短缺情况,分析结果可反映阳泉市在普通节水方案下的缺水量、缺水原因与缺水性质。供需平衡分析结果详如表 3-30 所示。

由表 3-30 可知,按照阳泉市所有水源的供给能力与现行的节水技术与设备的使用率,当地的水资源供需难以达到平衡。从整体缺水率来看,在近期规划水平年 2025 年,水资源短缺的问题开始显现,在来水保证率 $P=95\%$ 与 $P=75\%$ 的情况下,缺水量高达 2634.992 万 m^3 与 1017.116 万 m^3 ,缺水率分别为 13.623% 与 5.258%;在远期规划水平年 2030 年的缺水量稍高于 2025 年,在来水保证率 $P=95\%$ 与 $P=75\%$ 的情况下的缺水量为 2782.688 万 m^3 与 1164.813 万 m^3 ,缺水率分别为 14.204% 与 5.946%。

从各行政区的缺水情况来看,各行政在 2030 规划水平年的缺水量与缺水率均高于 2025 规划水平年,其中缺水最严重的行政区为郊区,其次为矿区。在 2030 规划水平年,矿区与郊区在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下缺水量分别为: 1260.217 万 m^3 、1179.827 万 m^3 ,缺水率分别为 27.823% 与 33.441%;在来水保证率 $P=75\%$ 的情况下的缺水量分别为: 955.162 万 m^3 、1018.041 万 m^3 ,缺水率分别为 21.088% 与 28.855%,缺水情况最为严重,同时平定县只有在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下会有缺水现象发生,在 2025 与 2030 规划水平年的缺水量分别为 231.276 万 m^3 、164.650 万 m^3 ,缺水率分别为: 4.884%、3.464%,并且平定县与盂县在来水保证率 $P=75\%$ 与 $P=50\%$ 的情况下没有缺水现象的发生,且还拥有大量的余水可供利用,尤其是盂县,在 2025 与 2030 规划水平年,来水保证率 $P=50\%$

的情况下余水量高达 1370.579 万 m^3 与 1489.036 万 m^3 ，但是此余水量却不能调度到其他缺水量较大的行政区进行补充，造成了一定程度上的水资源浪费。由表 3-30 可知，阳泉市整体的水资源短缺问题较为严重，但是平定县与盂县的水资源较为充足，但是不能调度到其他行政区进行补充，会严重影响阳泉市正常的社会经济发展。

为保障阳泉市在未来的规划期内社会经济的可持续发展，应在加大节水力度的基础上，稳定或增加各产业用水的投入产出比，让用水量较大的产业加大对节水技术的研发与对节水设备的使用，增加水资源的利用率与非常规水源的使用率；同时各行政区应重视地表生态环境的保护与水生态环境的改善，达到在可持续开发利用水资源的前提下，使阳泉市的社会经济与生态环境达到可持续发展的目的。在科技创新浪潮的带动下，关于雨水收集、污水处理回收再利用等技术也会逐渐成熟，并且商业化的前景较好，可使阳泉市水资源的利用率逐渐提高，并缓解阳泉市的水资源供需矛盾，这已成为阳泉市社会经济与生态环境健康可持续发展的必要举措。

表 3-30 阳泉市不同水平年一次水资源供需平衡分析

Table 3-30 Analyse of the first supply and demand balance of water resource in Yangquan City of different level years

行政区	水平年	保证率	基本节水方案				
			总需水量 (万 m ³)	可供水量 (万 m ³)	余水量 (万 m ³)	缺水量 (万 m ³)	缺水率 (%)
城区	2025	P=95%	2561.957	2233.506	0	-328.451	12.820
		P=75%	2561.957	2501.198	0	-60.759	2.372
		P=50%	2561.957	2646.081	84.124	0	0
	2030	P=95%	2624.978	2219.548	0	-405.430	15.445
		P=75%	2624.978	2487.240	0	-137.738	5.247
		P=50%	2624.978	2632.123	7.145	0	0
矿区	2025	P=95%	4313.005	3177.092	0	-1135.913	26.337
		P=75%	4313.005	3482.146	0	-830.858	19.264
		P=50%	4313.005	4251.990	0	-61.014	1.415
	2030	P=95%	4529.477	3269.260	0	-1260.217	27.823
		P=75%	4529.477	3574.315	0	-955.162	21.088
		P=50%	4529.477	4344.159	0	-185.318	4.091
郊区	2025	P=95%	3476.832	2428.501	0	-1048.331	30.152
		P=75%	3476.832	2590.288	0	-886.544	25.499
		P=50%	3476.832	2937.824	0	-539.008	15.503
	2030	P=95%	3528.071	2348.244	0	-1179.827	33.441
		P=75%	3528.071	2510.031	0	-1018.041	28.855
		P=50%	3528.071	2857.567	0	-670.505	19.005
平定县	2025	P=95%	4774.595	4543.319	0	-231.276	4.844
		P=75%	4774.595	5013.461	238.866	0	0
		P=50%	4774.595	5410.080	635.485	0	0
	2030	P=95%	4752.575	4587.924	0	-164.650	3.464
		P=75%	4752.575	5058.066	305.492	0	0
		P=50%	4752.575	5454.685	702.111	0	0
孟县	2025	P=95%	4216.303	4325.282	108.979	0	0
		P=75%	4216.303	4738.482	522.179	0	0
		P=50%	4216.303	5586.882	1370.579	0	0
	2030	P=95%	4155.288	4382.724	227.436	0	0
		P=75%	4155.288	4795.924	640.636	0	0
		P=50%	4155.288	5644.324	1489.036	0	0
阳泉市	2025	P=95%	19342.692	16707.701	0	-2634.992	13.623
		P=75%	19342.692	18325.576	0	-1017.116	5.258
		P=50%	19342.692	20832.858	1490.165	0	0
	2030	P=95%	19590.389	16807.701	0	-2782.688	14.204
		P=75%	19590.389	18425.576	0	-1164.813	5.946
		P=50%	19590.389	20932.858	1342.469	0	0

3.4.2 二次供需平衡分析

二次水资源供需平衡分析主要是对需水条件为推荐节水方案,供水条件为不同规划年与不同来水条件下的最大可供水量的情况进行分析,该分析结果可反映阳泉市在节水设备使用较为广泛的情况下的缺水量、缺水原因与缺水特点,为多目标函数的选择与水资源优化配置方案的制定提供可靠依据。

阳泉市二次水资源供需平衡分析中的需水数据来源于表 3-16 中的推荐节水方案中的需水量预测成果,供水数据来源于表 3-29 中对阳泉市水资源在不同规划水平年与不同频率年情况下的最大可供水量。具体分析结果如表 3-31 所示。

由表 3-31 可知,按照阳泉市近期规划水平年 2025 年与远期规划水平年 2030 年的水资源供给方案与推荐节水方案进行二次水资源供需平衡计算后,可知阳泉市的水资源短缺现象得到了一定程度上的缓解。

阳泉市近期规划水平年 2025 年在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下,整体缺水量为 1439.758 万 m^3 ,整体缺水率为 7.934%,其中矿区与郊区的缺水率分别下降到了 22.409%与 25.304%,虽然缺水现象依然较为严重,但是缺水量与缺水率有了显著的下降,在来水保证率 $P=75\%$ 情况下,矿区与郊区依然有水资源短缺现象的发生,缺水率分别为 14.959%与 20.328%,但由于平定县与盂县有余水,因此阳泉市整体上缺水量为 0。

阳泉市远期规划水平年 2030 年的缺水量与缺水率有下降趋势,在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下,整体缺水量 824.325 万 m^3 ,整体缺水率为 4.675%,在来水保证率 $P=75\%$ 的情况下城区、矿区与郊区的缺水量为 528.601 万 m^3 、661.479 万 m^3 ,缺水率分别为 12.884%与 20.857%,且由于平定县与盂县余水量较多,整体缺水量依然为 0。

二次水资源供需平衡分析中总缺水量与缺水率相比较比一次水资源供需平衡有了明显的降低,但是矿区与郊区的水资源短缺问题依然严重,可通过采取在水资源分配过程中对平定县与盂县的水资源进行再分配、建设行政区间的水资源调度系统、进一步提高各用水产业的节水力度、提出科学合理的水资源配置方案等措施来降低郊区与矿区的缺水率,保证阳泉市社会经济与生态环境的可持续发展。

表 3-31 阳泉市不同水平年二次水资源供需平衡分析

Table 3-31 Analyse of the secondary supply and demand balance of water resource in Yangquan City of different level years

行政区	水平年	保证率	推荐节水方案				
			总需水量 (万 m ³)	可供水量 (万 m ³)	余水量 (万 m ³)	缺水量 (万 m ³)	缺水率 (%)
城区	2025	P=95%	2360.458	2233.506	0	-126.952	5.378
		P=75%	2360.458	2501.198	140.740	0	0
		P=50%	2360.458	2646.081	285.623	0	0
	2030	P=95%	2359.026	2219.548	0	-139.478	5.913
		P=75%	2359.026	2487.240	128.214	0	0
		P=50%	2359.026	2632.123	273.097	0	0
矿区	2025	P=95%	4094.658	3177.092	0	-917.573	22.409
		P=75%	4094.658	3482.146	0	-612.510	14.959
		P=50%	4094.658	4251.990	157.333	0	0
	2030	P=95%	4102.916	3269.260	0	-833.656	20.319
		P=75%	4102.916	3574.315	0	-528.601	12.884
		P=50%	4102.916	4344.159	241.243	0	0
郊区	2025	P=95%	3251.177	2428.501	0	-822.676	25.304
		P=75%	3251.177	2590.288	0	-660.889	20.328
		P=50%	3251.177	2937.824	0	-313.353	9.638
	2030	P=95%	3171.510	2348.244	0	-823.266	25.958
		P=75%	3171.510	2510.031	0	-661.479	20.857
		P=50%	3171.510	2857.567	0	-313.943	9.899
平定县	2025	P=95%	4477.637	4543.319	65.682	0	0
		P=75%	4477.637	5013.461	535.824	0	0
		P=50%	4477.637	5410.080	932.443	0	0
	2030	P=95%	4262.036	4587.924	325.889	0	0
		P=75%	4262.036	5058.066	796.031	0	0
		P=50%	4262.036	5454.685	1192.649	0	0
盂县	2025	P=95%	3963.529	4325.282	361.754	0	0
		P=75%	3963.529	4738.482	774.954	0	0
		P=50%	3963.529	5586.882	1623.354	0	0
	2030	P=95%	3736.539	4382.724	646.185	0	0
		P=75%	3736.539	4795.924	1059.385	0	0
		P=50%	3736.539	5644.324	1907.785	0	0
阳泉市	2025	P=95%	18147.459	16707.701	0	-1439.758	7.934
		P=75%	18147.459	18325.576	178.117	0	0
		P=50%	18147.459	20832.858	2685.399	0	0
	2030	P=95%	17632.026	16807.701	0	-824.325	4.675
		P=75%	17632.026	18425.576	793.551	0	0
		P=50%	17632.026	20932.858	3300.832	0	0

3.5 本章小结

本章对阳泉市近期规划水平年 2025 年与远期规划水平年 2030 年进行了供需水量预测与水资源供需平衡分析。主要的预测分析内容包括：（1）根据阳泉市不同部门的特点对用水单元进行了划分，以及对供水水源的合理划分；（2）利用趋势法与定额法对阳泉市在普通节水方案与推荐节水方案下的需水量进行了预测分析；（3）通过对阳泉市不同供水水源现状进行分析，并结合当地的水利工程与社会经济的发展规划，对来水保证率 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 情况下的最大可供水量进行了分析预测；（4）根据阳泉市需水量与供水量的预测结果，对阳泉市进行了普通节水方案与推荐节水方案下的水资源供需平衡进行分析；（5）根据普通节水方案与推荐节水方案下的阳泉市各行政区水资源短缺与余水情况，针对有余水的行政区的水资源提出科学合理的调配方案，保证阳泉市各行政区的缺水量均最小。

第四章 阳泉市水资源优化配置模型的建立与求解

本章将从阳泉市水资源的特点入手,在保证不同情况下供水水源可供水总量恒定的基础上,根据阳泉市供水水源特点与用水户的用水的需求对水资源配置方案进行优化,并构建面向高质量发展的水资源优化配置模型框架,提出以:缺水量最少、经济效益最高、污染物排放量最少为目标,建立基于高质量发展水资源优化配置框架下的阳泉市水资源优化配置模型,在该模型中使用改进粒子群算法进行求解,得到在不同需水方案(普通节水方案、推荐节水方案)、不同规划水平年(2025年、2030年)、不同来水保证率($P=95\%$ 、 75% 、 50%)情况下的水资源优化配置方案,同时对优化配置结果进行科学合理的分析,针对各行政区的不同情况提出科学的发展建议与产业调整建议。本章以两次供需平衡结果为基础、以高质量发展理论与水资源优化配置理论为指导,基于阳泉市水资源供需现状,对粒子群算法进行改进,并利用改进后的粒子群算法对水资源优化配置模型进行求解。

4.1 阳泉市水资源优化特点及优化配置模型框架

4.1.1 阳泉市水资源特点与优化配置需求

山西省的水资源禀赋条件较为薄弱,近几十年来,阳泉市经历了快速的城市化进程,在经济水平显著提升的背后,高耗水、高耗能、高排放的传统发展模式也对水资源环境与生态环境带来了严重的压力与隐患,脆弱的水资源保障能力已成为制约阳泉市高质量发展的瓶颈。根据前文对阳泉市的水资源的分析与可供水量的预测可知当地水资源条件主要有以下特点:

(1) 水资源总量匮乏,水资源供需矛盾突出:根据《阳泉市水资源公报》数据,2021年阳泉市所在的海河区水资源总量还不到南方长江区水资源总量的 $1/3$ 。有限水资源禀赋难以承载阳泉市的人口、耕地与经济发展体量。

(2) 水资源保障能力与区域产业布局不相匹配,未能最大程度发挥对经济社会的支撑作用:阳泉市在过去几十年中形成的产业体系是以经济发展为首要目标,“以水定产”的水资源刚性约束未得到有效体现,目前各行政区的产业布局与水资源禀赋并未能很好适应。

(3) 水资源管理理念仍较落后,水资源利用水平和模式难以满足新时代发展需求:与国外发达地区相比,阳泉市的水资源管理水平还较为落后,水资源利用和配置模式滞后于现阶段发展需求,不同行政区、不同产业间的水资源配置的科学性与合理性仍有提升空间。

水资源优化配置是缓解阳泉市缺水问题的有效手段，但传统的水资源配置理念和方法难以满足高质量发展要求：未来阳泉市水资源优化配置需要面向高质量发展需求，具体的表现为：①通过优化水资源配置方案加强对人民生活与生产活动用水的基本保障能力，提升社会稳定性与人民群众幸福感；②在水资源刚性约束下，充分发挥水资源对地区经济发展的促进作用，有效提升用水经济效益；③结合缺水地区生态环境保护需求，通过对水资源进行优化配置，最大程度降低污水排放对环境质量的负面影响。

因此，结合阳泉市的水资源的供水特点，构建面向高质量发展的水资源优化配置模型，不仅是支撑全面实现高质量发展战略目标的切实需求，也是缓解缺水地区水资源供需压力的迫切需要。

4.1.2 模型框架构建

高质量发展涉及资源、社会、经济、生态等多维系统，左其亭等将高质量发展定义为：一种追求社会和谐稳定、经济增长有序、资源安全供给、生态健康宜居、文化先进引领的高水平发展模式^[84]。本研究在模型构建过程中，综合考虑高质量发展的理念、内涵和需求，遵循节水优先、人水和谐、生态文明、可持续发展等指导思想^[85]，结合阳泉市水资源天然禀赋、供需结构、利用模式、管理制度等实际情况，从目标函数、约束条件、算法设计三方面入手，系统构建水资源优化配置模型，模型框架如图 4-1 所示

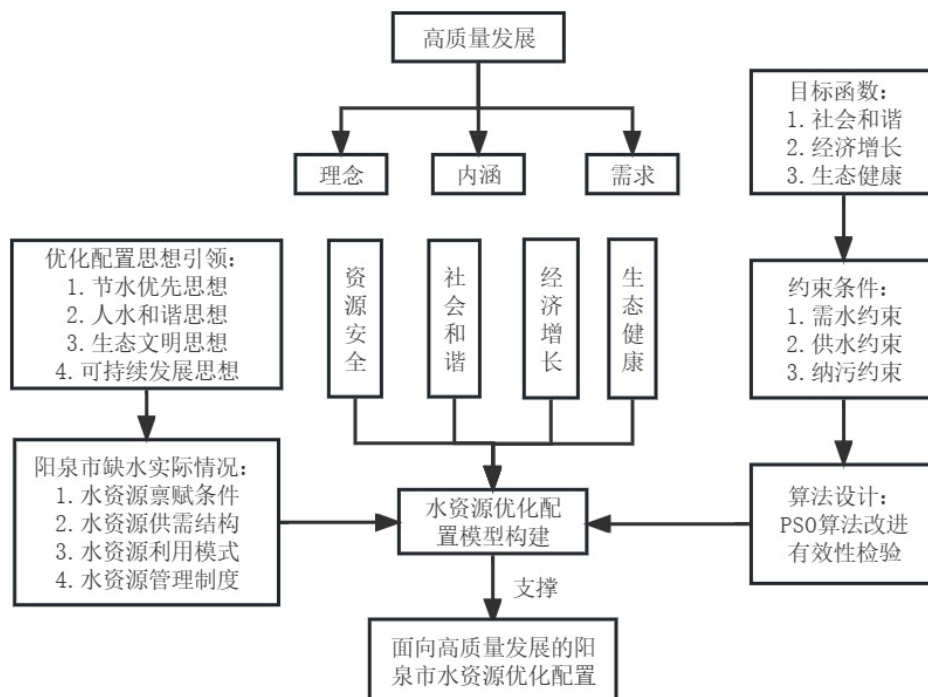


图 4-1 面向高质量发展的阳泉市水资源优化配置模型框架

Fig. 4-1 Model framework of optimal allocation of water resources in Yangquan City for High-quality development

4.2 阳泉市水资源优化配置模型的建立

4.2.1 目标函数

在建立水资源优化配置模型时需要遵循以下原则：1.坚持节水优先、开源节流相结合原则；2.坚持人水和谐，可持续发展利用原则；3.坚持生态文明思想，减少对生态环境的破坏；4.坚持可持续发展原则。在水资源优化配置的过程中要尊重社会经济发展规律与自然规律，根据阳泉市不同规划水平年与不同需水方案的需水要求，依据高质量发展的理念、内涵与需求，平衡水资源开发利用与水生态环境保护间的关系，实现水资源科学合理的优化配置，将有限的水资源进行科学合理的分配，使当地的社会和谐、经济增长与生态健康最大化，保证社会经济与生态环境的可持续发展。

在本研究中根据阳泉市各行政区的特点构造了以社会和谐、经济增长、生态健康为目标的综合评价函数，综合函数表达式如（4-1）所示：

$$F = \text{opt} \{ f_1(X), f_2(X), f_3(X) \} \quad (4-1)$$

式中： X 为不同形式的决策变量； $f_1(X)$ 为模型中的社会和谐目标函数； $f_2(X)$ 为模型中的经济增长目标函数； $f_3(X)$ 为模型中的生态健康目标函数。

（1）社会和谐目标函数：

阳泉市人民的生活、工业、农业、第三产业与生态环境用水的综合水资源短缺程度可在一定程度上反映社会稳定性与居民生活质量，因此降低缺水量有利于社会和谐目标的实现。该目标函数可以具体量化阳泉市的生活、生产、生态的缺水量总和，相应的表达式如（4-2）所示：

$$\min f_1(X) = \min \sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (A_j^l - x_{ij}^l) \right] \quad (4-2)$$

式中： l 代表阳泉市行政区的类别； j 代表阳泉市用水户的类别； i 代表阳泉市供水水源的类别； A_j^l 代表阳泉市行政区 l 中用水户 j 的总需水量（万 m^3 ）； x_{ij}^l 代表行政区 l 中水源 i 向用水户 j 的总供水量（万 m^3 ），其中 $i=j=l=5$ 。

（2）经济增长目标函数：

经济增长为水资源优化配置中重要的目标之一，用有限的水资源使各产业的效益最大化，提高阳泉市的经济增速。该目标函数可具体量化各行政区的经济效益，即各行政区中生活、农业、工业、第三产业与生态环境用水户所创造经济效益的最大值，相应的表达式如（4-3）所示：

$$\max f_2(X) = \max \left[x_{ij}^l \cdot (b_{ij}^l - c_{ij}^l) \cdot (1 - v^l) \cdot d_i^l \cdot e_j^l \right] \quad (4-3)$$

$$d_i^l = (1 + m_{\max} - m_i) / \sum_{i=1}^I (1 + m_{\max} - m_i) \quad (4-4)$$

$$e_j^l = (1 + n_{\max} - n_i) / \sum_{i=1}^l (1 + n_{\max} - n_i) \quad (4-5)$$

式中： b_{ij}^l 代表行政区 1 中水源 i 向用水户 j 的供水效益系数（元/ m^3 ）； c_{ij}^l 代表行政区 1 中水源 i 向用水户 j 的用水费用系数（元/ m^3 ）； v^l 代表行政区 1 中由于供水管道破损导致的单位供水损失百分率； d_i^l 代表行政区 1 中水源 i 的供水次序系数； e_j^l 代表行政区 1 中用水户 j 的用水公平系数（ $e_j^l \in (0,1)$ ）； $m_{\max}$ 代表水源 i 向用水户 j 供水顺序的最大值（ $m_{\max} = 5$ ）； m_i 代表水源 i 的供水顺序系数（ $m_i \in [1,5]$ ）； $n_{\max}$ 代表用水户 j 用水顺序的最大值（ $n_{\max} = 5$ ）； n_i 代表第 i 个用水户的用水顺序系数（ $n_i \in [1,5]$ ）。

（3）生态健康目标函数：

不同的水资源优化配置方案可能会对各供水区生态环境的改善起到促进或抑制的作用，且废水中的污染物是造成阳泉市生态环境破坏的主要原因之一^[86]，同时也是造成当地水质型缺水的重要原因，因此结合相关研究，把生态健康目标量化为各行政区所排放的重要污染因子 COD（Chemical Oxygen Demand）总量的多少，相应目标函数表达式如（4-6）所示：

$$\min f_3(X) = \min \sum_{i=1}^{I(L)} \sum_{j=1}^{J(L)} \sum_{l=1}^L 0.01 \cdot x_{ij}^l \cdot h_j^l \cdot [k_{0j}^l \cdot (1 - r_1^l) + k_{1j}^l \cdot r_1^l - k_{1j}^l \cdot r_2^l] \quad (4-6)$$

式中： h_j^l 代表行政区 1 中用水户 j 的污染物排放系数（根据行政区情况确定）； k_{0j}^l 代表行政区 1 中用水户 j 代表行政区 1 中用水户 j 在进行污水处理前污水中 COD 的浓度（mg/L）； k_{1j}^l 代表行政区 1 中用水户 j 在进行污水处理后排放的废水中 COD 的浓度（mg/L）； r_1^l 代表行政区 1 中的污水处理率（%）； r_2^l 代表行政区 1 中的污水回用率（%）。

4.2.2 约束条件

在水资源优化配置的过程中，由于供水水源不仅要面临用水情况较为复杂、供水方式不确定性较大等因素，同时优化配置目标函数为多目标函数，因此一般的线性约束不能满足多目标函数的要求，因此本研究在充分考虑阳泉市水资源供需现状与生态环境的基础上采用水源供水能力约束、用户需水量约束、生态环境纳污能力约束与变量非负约束等约束条件，保证模型输出结果的可靠性。各约束条件如下所示。

（1）水源供水能力约束：各水源的供水能力根据前文推算情况确定，供水量不能超过水源的最大可供水量，表达式如（4-7）所示：

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}^l \leq W_{i\max}^l \quad (4-7)$$

$$0 \leq x_{ij}^l \quad (4-8)$$

式中： $W_{i\max}^l$ 代表行政区 1 中水源 i 的最大可供水量（万 m^3 ），且供水 x_{ij}^l 量大于等于 0。

（2）用水户需水量约束：各行政区内的各用水户的最大用水量不得超过在需水规划中的用水量，各用水户的最小用水量根据各用水户的特点确定，表达式如（4-8）所示：

$$K_{j\min}^l \leq \sum_{i=1}^I x_{ij}^l \leq K_{j\max}^l \quad (4-9)$$

$$K_{j\min}^l = r_j^{k-} \cdot x_{ij}^l \quad (4-10)$$

$$K_{j\max}^l = A_j^l \quad (4-11)$$

式中： $K_{j\min}^l$ 代表行政区 1 中最小用水量（万 m^3 ）； r_j^{k-} 代表行政区 1 中各用水户的需水下限系数； $K_{j\max}^l$ 代表行政区 1 中的最大需水量（万 m^3 ）。

（3）生态环境纳污约束：各用水户所排放的污水中，单位水体中所含污染因子的浓度应该在国家规定排放浓度以下；同时总体污染物的排放量应该小于阳泉市最大允许排放量，表达式如（4-11）所示

$$\sum_{i=1}^{I(L)} \sum_{j=1}^{J(L)} \sum_{l=1}^L 0.01 \cdot x_{ij}^l \cdot h_j^l \cdot [k_{0j}^l \cdot (1 - r_1^l) + k_{1j}^l \cdot r_1^l - k_{1j}^l \cdot r_2^l] \leq \sum_{l=1}^L Z_{\max}^l \quad (4-12)$$

$$k_{1j}^l \leq z_j \quad (4-13)$$

$$\sum_{l=1}^L Z_{\max}^l = \sum_{i=1}^{I(L)} \sum_{j=1}^{J(L)} \sum_{l=1}^L 0.01 \cdot x_{ij}^l \cdot h_j^l \cdot z_j \quad (4-14)$$

式中： z_j 表示国家允许不同类型用水户所排放污染物的最高浓度（ mg/L ）； $Z_{\max}^l$ 为行政区 1 中最大污染物排放量（t），经计算 $\sum_{l=1}^L Z_{\max}^l = 35000t$ 。

（4）变量非负约束：文中所出现的变量取值均大于 0。

4.2.3 整体模型

综合公式 (4-1) - (4-14) 即可得到阳泉市水资源优化配置模型, 并将模型中的所有表达式作如下汇总, 汇总结果如公式 (4-15) 所示

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1(X) = \min \sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (A_j^l - x_{ij}^l) \right] \\ \max f_2(X) = \max \left[x_{ij}^l \cdot (b_{ij}^l - c_{ij}^l) \cdot (1 - v^l) \cdot d_i^l \cdot e_j^l \right] \\ \min f_3(X) = \min \sum_{i=1}^{I(L)} \sum_{j=1}^{J(L)} \sum_{l=1}^L 0.01 \cdot x_{ij}^l \cdot h_j^l \cdot \left[k_{0j}^l \cdot (1 - r_1^l) + k_{1j}^l \cdot r_1^l - k_{1j}^l \cdot r_2^l \right] \\ \sum_{j=1}^J x_{ij}^l \leq W_{i\max}^l \\ 0 \leq x_{ij}^l \\ K_{j\min}^l \leq \sum_{i=1}^I x_{ij}^l \leq K_{j\max}^l; K_{j\min}^l = r_j^{k-} \cdot x_{ij}^l; K_{j\max}^l = A_j^l \\ \sum_{i=1}^{I(L)} \sum_{j=1}^{J(L)} \sum_{l=1}^L 0.01 \cdot x_{ij}^l \cdot h_j^l \cdot \left[k_{0j}^l \cdot (1 - r_1^l) + k_{1j}^l \cdot r_1^l - k_{1j}^l \cdot r_2^l \right] \leq Z_{\max}^l; k_{1j}^l \leq z_j^0; \sum_{l=1}^L Z_{\max}^l = 25000 \\ i = j = l = 1, 2, 3, 4, 5 \end{array} \right. \quad (4-15)$$

在上述模型中, 结合第三章中对用水户与水源的划分, 供水水源 i 的取值为 5, 分别为: 蓄水工程、地下水工程、龙华口调水工程、娘子关提水工程、非常规水源; 用水户 j 的取值为 5, 分别为: 生活用水、农业用水、工业用水、第三产业用水、生态环境用水; 行政区 l 的取值为 5, 分别为: 城区、矿区、郊区、平定县、盂县。

模型内以行政区 l 中供水水源 i 向用水户 j 的供水量 x_{ij}^l 为决策变量, 由上文可知共涉及了 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 个决策变量与 52 个约束条件, 是一个规模较为庞大、考虑因素较为全面、符合水资源配置中用水复杂性与供水不确定性的水资源优化配置模型, 该模型的特点如下:

(1) 针对性较强: 本研究中针对阳泉市的水资源配置问题, 搭建了合适的水资源优化配置模型, 该模型把联系不是特别紧密, 甚至有些矛盾的社会和谐、经济增长、生态环境三个方面结合到了一起, 并设计了对结果综合效益进行评价的函数, 把居民生活水平、经济发展与生态环境等难以进行量化的指标进行量化, 并赋予其相应的物理意义, 为实现阳泉市水资源优化配置方案的选取提供了新的解决方案。

(2) 模型复杂性与不确定性突出: 在建模过程中通过对供水、用水的决策变量与约束条件进行设置, 尽可能的还原了水资源配置过程中供水水源的复杂性与用水户用水的不确定性等特点, 同时通过函数与各参数将社会、经济、生态间的复杂关系做了量化, 使之表达的更精确。

(3) 模型非线性特点明显：传统的水资源配置模型大多为线性相关模型，线性模型不能很好的把研究区中供水与用水过程中所存在的问题很好地展示出来，且常规线性规划的求解结果难以满足现实中对水资源配置的要求。本模型基于阳泉市供用水现状，通过引入供水次序系数、用水公平系数等多个变量参数与多个非线性的约束条件，使水资源配置结果更加符合阳泉市供用水现状，对解决现实问题具有指导意义。

4.2.4 确定模型参数

根据阳泉市水资源优化配置模型，并结合模型中各参数的意义，对模型中的参数进行确定。

(1) 用水效益系数 b_{ij}^I 与用水费用系数 c_{ij}^I ：

用水效益系数 b_{ij}^I 主要反映了行政区 1 中各用水户使用单位水量所产生的经济效益。基于阳泉市 2011~2020 年间各用水户的用水量与产值计算得到，农业、工业与第三产业中的效益系数是由各行业的取水量除以各行业的总产值所得到的分摊系数（元/ m^3 ）；由于生活与生态用水效益较难以量化，为了保证用水系数的公平性，取农业、工业、第三产业效益系数 b_{ij}^I 中的较大的对生活与生态进行赋值。

用水费用系数 c_{ij}^I 参考阳泉市水费征收标准进行制定，主要反映了行政区 1 中各用水户单位用水量的成本。用水效益系数 b_{ij}^I 用水费用系数 c_{ij}^I 如表 4-1 所示

表 4-1 阳泉市各用水户单位用水量效益系数、费用系数表

Table 4-1 Water benefit coefficient and cost coefficient of each water user unit in Yangquan City

行政区	效益系数 b_{ij}^I 、费用系数 c_{ij}^I （元/ m^3 ）									
	生活	农业	工业	第三产业	生态环境					
城区	145	2.9	37.59	0.45	418.318	4.5	3785.658	8.7	80	2.9
郊区	145	2.9	37.59	0.45	418.318	4.5	3785.658	8.7	80	2.9
矿区	145	2.9	37.59	0.45	418.318	4.5	3785.658	8.7	80	2.9
平定县	145	2.9	37.59	0.45	418.318	4.5	3785.658	8.7	80	2.9
盂县	145	2.9	37.59	0.45	418.318	4.5	3785.658	8.7	80	2.9

(2) 供水管道损漏率 v^I ：

由于各行政区的经济发展水平不同，对供水设备的维护水平也不同，因此会各有差异。现在各行政区供水管道的损漏率基本都在 10% 以上，已经严重影响到了各产业的正常生产，因此在各行政区政府的规划与支持下，预计在近期规划水平年 2025 年，供水管道损漏率将低于 7%，在远期规划水平年 2030 年，供水管道损漏率将低于 4%。

(3) 供水次序系数 d_i^l :

供水次序系数 d_i^l 主要表示在行政区 l 中, 供水水源 i 相较于其他供水水源, 对区域内各用水户供水的优先程度。根据阳泉市各行政区的供水与用水特点, 确定水资源优化配置模型中, 各行政区中各供水水源的供水顺序, 并参考公式 (4-4) 将供水次序系数 d_i^l 转化为 $[0\sim 1]$ 间的系数, 阳泉市供水次序系数如表 4-1 所示:

表 4-2 供水次序系数

Table 4-2 Water supply sequence factor

行政区	供水次序系数 d_i^l				
	蓄水工程 ($i=1$)	调水工程 ($i=2$)	娘子关 ($i=3$)	地下水 ($i=4$)	非常规水源 ($i=5$)
城区 ($l=1$)	0.133	0.267	0.333	0.200	0.067
郊区 ($l=2$)	0.133	0.267	0.333	0.200	0.067
矿区 ($l=3$)	0.200	0.267	0.267	0.133	0.067
平定县 ($l=4$)	0.300	0.000	0.400	0.200	0.100
盂县 ($l=5$)	0.267	0.333	0.200	0.133	0.067

(4) 用水公平系数 e_j^l :

用水公平系数 e_j^l 主要表示行政区 l 中, 某个用水户相较于其他用水户水资源优先使用权的一种具体体现, 在参照了各行政区中各用水户对水资源的需求量与用水户的重要程度后, 基于水资源优化配置的基本原则, 得到本模型中不同行政区中不同用水户的用水顺序, 并参照公式 (4-5) 将用水公平系数同样转化为 $[0\sim 1]$ 间的系数, 阳泉市用水户用水公平系数如表 4-3 所示:

表 4-3 用水公平系数

Table 4-3 Water equity factor

行政区	用水公平系数 e_j^l				
	生活用水 ($j=1$)	农业用水 ($j=2$)	工业用水 ($j=3$)	第三产业用水 ($j=4$)	生态环境用水 ($j=5$)
城区 ($l=1$)	0.333	0.133	0.267	0.200	0.067
郊区 ($l=2$)	0.333	0.200	0.267	0.133	0.067
矿区 ($l=3$)	0.333	0.133	0.267	0.200	0.067
平定县 ($l=4$)	0.333	0.200	0.267	0.133	0.067
盂县 ($l=5$)	0.333	0.200	0.267	0.133	0.067

(5) 污染物排放系数 h_j^l :

由于各行政区对于不同用水户所产生的污染物的排放系数不同, 根据各行政区污水排放的调查与研究, 确定阳泉市各行政区污染物排放系数如下: 生活、农业、工业、第

三产业、生态环境的污染物排放系数分别为：0.85、0.45、0.85、0.9、1；由于农业灌溉后的水资源一部分直接回流到当地河道，另一部分直接下渗，形成地下水，取灌溉后水体与下渗一定深度的水体进行取样分析可确定，经过土壤的过滤，农业灌溉水的排放系数为 0.45；城市中的绿化面积胶水灌溉后，水资源直接入河，会把土壤中的一些有害物质直接带入河道中，因此确定污染物排放系数为 1。

(6) 污水处理前后水中污染因子浓度 k_{0j}^l 、 k_{1j}^l ：

水中污染物粒子的浓度可用化学需氧量 (COD) 的浓度来表示， k_{0j}^l 、 k_{1j}^l 表示污水在处理前与处理后，单位水体中所含有的污染物因子的量 (mg/L)。本研究遵循阳泉市发展规划，根据实地采样与测量可得现状年污水处理前的污染因子浓度 k_{0j}^l 与 k_{1j}^l ，规划水平年中各用水户的 k_{0j}^l 与 k_{1j}^l 在节水技术与污水处理技术的发展下要小于现状年的值，在规划水平年中生活、农业、工业、第三产业、生态环境中排放污水中的污染因子浓度 k_{0j}^l 如表 4-4 所示：

表 4-4 处理前污染因子浓度

Table 4-4 Contaminant concentration before treatment

用水户	污水处理前污染物粒子浓度 k_{0j}^l (mg/L)				
	城区	郊区	矿区	平定县	孟县
生活	450	460	465	445	440
农业	430	440	410	460	480
工业	6000	8000	10000	5000	5500
第三产业	500	490	495	440	445
生态环境	180	180	180	180	180

根据现有的污水处理工艺与各行政区污水处理能力，得到污水处理后的污染因子浓度，其中生活、农业、工业、第三产业、生态环境的 k_{1j}^l 分别为：120mg/L、180mg/L、120mg/L、120mg/L、180mg/L。

(7) 污水处理率 r_1^l 与污水回用率 r_2^l ：

根据阳泉市污水处理现状，可知在各行政区中生活、农业、工业、第三产业、生态环境的污水处理率 r_1^l 分别为：0.95、0、0.98、0.9、0；污水回用率 r_2^l 分别为：0.7、0、0.75、0.65、0。

(8) 需水下限系数 $r_j^{k^-}$ ：

由于各用水户在社会经济发展过程中的重要性不同，因此系数也不同，根据阳泉市各用水户用水需求与对缺水率的敏感程度，确定生活、农业、工业、第三产业、生态环境的需水下限系数分别为：0.9、0.85、0.9、0.85、0.75。

4.3 阳泉市水资源优化配置模型求解方法

4.3.1 粒子群算法

粒子群算法（PSO, Particle Swarm Optimization）是一种较为成熟的神经网络训练算法，群内粒子可进行合作与信息的共享，并根据已知的最优解的位置推进已知粒子的位置来寻求最优解^[87]。相较于普通的遗传算法，粒子群算法在大多数情况下都可以更快的收敛到最优解，在能源调度、水资源优化配置、物流、水文与灌溉等领域都得到了广泛的应用。本研究所建立的阳泉市水资源优化配置模型中所涉及的变量与参数较为复杂，因此选用对最优解求解速度较快，同时有较好适应性的粒子群算法。因此，本研究根据多目标水资源优化配置模型与粒子群算法的迭代特点，从惯性权重与学习因子两个方面对传统的粒子群算法进行改进，以便求解最优水资源配置方案。

4.3.2 传统粒子群算法改进

粒子群算法的基本思想就是通过每个粒子的不断更新迭代来追踪粒子的“个体极值”与所有粒子的“群体极值”，从而找到初始随机粒子的最优解^[88]。粒子群算法的思想为：假定 m 个粒子组成一个包含 N 维搜索空间的群落，粒子群算法中每个粒子的速度与位置更新公式如（4-16）与（4-17）所示：

$$v_{i,n}^{k+1} = v_{i,n}^k \cdot \omega + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{i,n}^k - x_{i,n}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{g,n}^k - x_{i,n}^k) \quad (4-16)$$

$$x_{i,n}^{k+1} = x_{i,n}^k + v_{i,n}^{k+1} \quad (4-17)$$

式中： $x_{i,n}^k$ 与 $v_{i,n}^k$ ($i=1,2,\dots,m; n=1,2,\dots,N$) 分别为处于第 k 次迭代的粒子 i 在第 n 维搜索空间中的位置与速度。 $p_{i,n}^k$ 与 $p_{g,n}^k$ 分别为粒子 i 在第 k 次迭代时所搜寻到的最优个体位置，与整个粒子群所搜索到的群体最优位置； ω 为粒子群算法中的惯性权重； c_1 和 c_2 为个体学习因子与群体学习因子； r_1 和 r_2 为介于[0~1]间的随机数。

结合本研究中所构建的水资源优化配置模型的特点，提出以下改进策略对传统的粒子群算法进行改进：

（1）第一种改进方案：

在此方案的惯性权重中引入余弦函数，根据余弦函数变化特点可使惯性权重可随着迭代次数的增加而减小，这种改进方法可在前期增强全局搜索能力，在后期增强局部搜索能力。由于粒子在寻优过程可通过学习个体以往的寻优经验与群体的寻优经验来改变自己的寻优策略，根据此特性，将惯性学习因子 ω_1 与 ω_2 引入算法中， ω_1 可根据该粒子以前的求解经验优化求解方向， ω_2 可根据群体的求解经验优化求解方向，以此来优化最终的求解结果。改进方法如下所示：

$$v_{i,n}^{k+1} = v_{i,n}^k \cdot \omega + c_1 \cdot r_1 \cdot \omega_1 \cdot (p_{i,n}^k - x_{i,n}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot \omega_2 \cdot (p_{g,n}^k - x_{i,n}^k) \quad (4-18)$$

$$x_{i,n}^{k+1} = x_{i,n}^k + v_{i,n}^{k+1} \quad (4-19)$$

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \cos[(k / k_{\max}) \cdot (\pi / 2)] \quad (4-20)$$

$$\omega_1 = 2(1 - \omega), \omega_2 = 2\omega \quad (4-21)$$

式中： ω_1 与 ω_2 为惯性学习因子，在刚开始时 ω 与 ω_2 较大 ω_1 较小，在前期可以增强全局搜索能力，在后期 ω_2 较小 ω_1 较大，可增强局部搜索能力，这样就可以在迭代的过程中充分的利用上一代粒子的速度、位置与求解经验这三种有效信息，从而优化寻优结果。

(2) 第二种改进方案：

在此种改进方案中，目的为对粒子的速度进行限制，设置粒子在寻优过程中的最大的速度为 $v_{\max}$ ，最小速度为 $v_{\min}$ ，最大速度 $v_{\max}$ 是决定 $p_{i,n}^k$ 与 $p_{g,n}^k$ 的重要参数，如果粒子速度过大，则会超出搜索区域，如果粒子速度过小则有可能陷入局部最优，因此取 $v_{\max}$ 为决策变量的30%，这样就可以兼顾全局与局部，改进方法如下所示：

$$v_{i,n}^{k+1} = v_{i,n}^k \cdot \omega + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{i,n}^k - x_{i,n}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{g,n}^k - x_{i,n}^k) \quad (4-22)$$

$$v_{\max} = (x_{in\max}^k - x_{in\min}^k) \cdot Z \quad (4-23)$$

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot k / k_{\max} \quad (4-24)$$

式中： $x_{in\max}^k$ 为控制变量的取值上限， $x_{in\min}^k$ 为控制变量的取值下限， Z 为决策变量的取值范围， $Z = 30\%$

(3) 第三种改进方案：

在此改进方案中对惯性学习因子 ω 进行线性优化，对个体学习因子 c_1 、群体学习因子 c_2 与全局最优值进行混沌优化。由于 c_1 与 c_2 为粒子群算法中的重要影响参数，因此利用混沌技术对其优化可提高其收敛性。下面为对 c_1 与 c_2 进行混沌优化的过程：

$$c_i^{k+1} = 4 \cdot c_i^k \cdot (1 - c_i^k) \quad (4-26)$$

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot k / k_{\max} \quad (4-27)$$

式中： $c_i^k \in (0,1), i=1,2$ 。

下面为对全局最优值进行混沌优化：

$$h_{in}^k = (x_{in}^k - \min x_{in}) / (\min x_{in} - \max x_{in}) \quad (4-28)$$

$$h_{in}^{k+1} = 4 \cdot h_{in}^k \cdot (1 - h_{in}^k) \quad (4-29)$$

$$x_{in}^{k+1} = \min x_{in} + h_{in}^{k+1} (\max x_{in} - \min x_{in}) \quad (4-30)$$

在迭代的过程中, 根据 x_{in}^{k+1} 计算得到粒子群的适应度, 如果此值优于全局最优或达到最大迭代次数则算法结束, 此时的最优解即为全局最优解。

(4) 第四种改进方案:

在此方案中对惯性权重 ω 与学习因子 c_1 、 c_2 做线性改进:

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot k / k_{\max} \quad (4-31)$$

$$c_1 = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min}) \cdot k / k_{\max} \quad (4-32)$$

$$c_2 = c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min}) \cdot k / k_{\max} \quad (4-33)$$

式中: k 为当前迭代次数, $k_{\max}$ 为最大迭代次数, 在迭代的过程中 ω 与 c_1 会随着迭代次数的增加而减少, c_2 会随着迭代次数的增加而线性增大。因此改进后的粒子群算法在前期可以增强全局搜索能力, 后期可以增强局部搜索能力, 在一定程度上可以避免陷入局部最优解, 提高求解结果的精确度。

以上四种改进方法中的 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 分别取: 0.9、0.4、2.5、0.5。

4.3.3 基于改进粒子群算法模型的求解方案

在满足多维约束的基础上, 利用改进粒子群算法求解所构建的阳泉市水资源优化配置模型, 寻求最优水资源配置方案, 以实现资源-社会-经济-生态环境综合效益最大化。由于模型中各目标函数的量纲与优化标准不同, 因此需要把目标函数统一映射到[0~1]范围内进行标准化处理, 并通过线性加权法构造出适应度函数来寻求最优解。适应度函数的构造如公式(4-34)、(4-35)与(4-36)所示:

$$OB_{\max} = 1 - (y_n - y_{n\min}) / (y_{n\max} - y_{n\min}) \quad (4-34)$$

$$OB_{\min} = (y_n - y_{n\min}) / (y_{n\max} - y_{n\min}) \quad (4-35)$$

$$F(\text{pareicle}) = \sum_{n=1}^{ob} w_n \cdot OB_n(\text{partical}) \quad (4-36)$$

对于经济增长目标函数, 适应度函数的构造如公式(4-34)所示; 对于社会和谐与生态健康目标函数, 适应度函数的构造公式如(4-35)所示; 而(4-36)式表示将社会和谐、经济增长与生态健康的适应度值乘以相应的系数后叠加所得的适应度值。式中所求解出的适应度越小则代表所求解出的综合效益越高。

式中: $y_{n\max}$ 与 $y_{n\min}$ 分别为目标 n 可以达到的最优与最劣水平, $OB_{\max}$ 求最大化目标的标准值, $OB_{\min}$ 为求最小化目标的标准值, $F(\text{pareicle})$ 为目标的适应度, pareicle 为计算的粒子, OB 为目标个数, w_n 为目标权重, 用序关系分析法求得^[88], 且满足 $0 < w_n < 1$,

$\sum_{n=1}^{ob} w_n = 1$ 。其中 OB_1 代表社会和谐目标函数的标准值、 OB_2 代表经济增长目标函数的标准值、 OB_3 代表生态健康目标函数的标准值, 分别为: 0.41、0.31、0.28。

在本研究中采用死亡罚函数来处理算法中的约束条件，如果粒子不满足约束条件就使粒子适应度值变大，从而淘汰该粒子。

具体的计算方案为：①选择配置方案，读取所需数据；②确定粒子个数、最大迭代次数等参数；③在变量取值范围内随机生成初始粒子，并计算其适应度，记录初始解中的个体与群体极值；④更新粒子的速度与位置，计算新的适应度并与已知最优位置进行比较，得到迭代后的个体极值与群体极值；⑤若满足收敛条件或者达到最大迭代次数则输出结果，否则重复步骤④。算法流程图如图 4-2 所示。

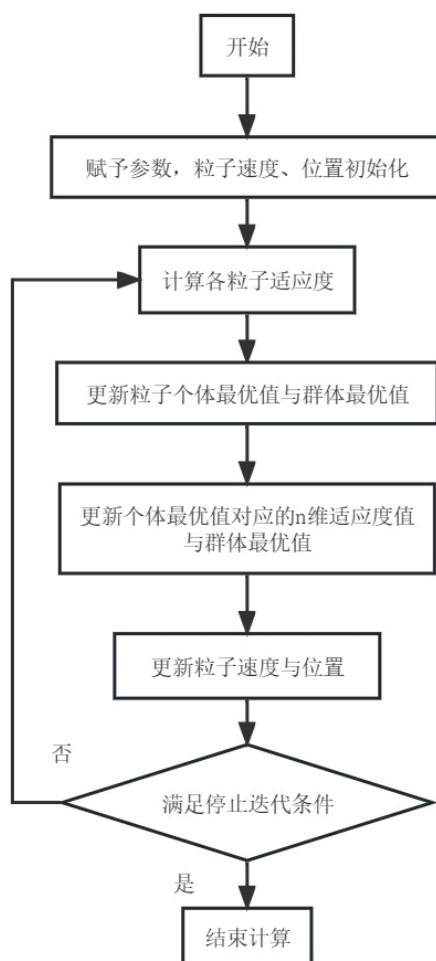


图 4-2 改进粒子群算法计算流程

Fig. 4-2 Calculation flow of Improved Particle Swarm Optimization

4.3.4 算法有效性检验

为验证改进方法的可行性，同时选出最适合阳泉市水资源优化配置模型的改进方法，在研究中引入 ZDT4 多目标测试函数对改进方法进行测试与验证。

在测试时使用 Matlab R2020a 为开发工具, 编写 ZDT4 多目标测试函数, 分别对原方案与四种改进方案展开测试, 在测试过程中设置粒子个数为 100, 最大迭代次数为 1000 次。ZDT4 多目标测试函数如下所示:

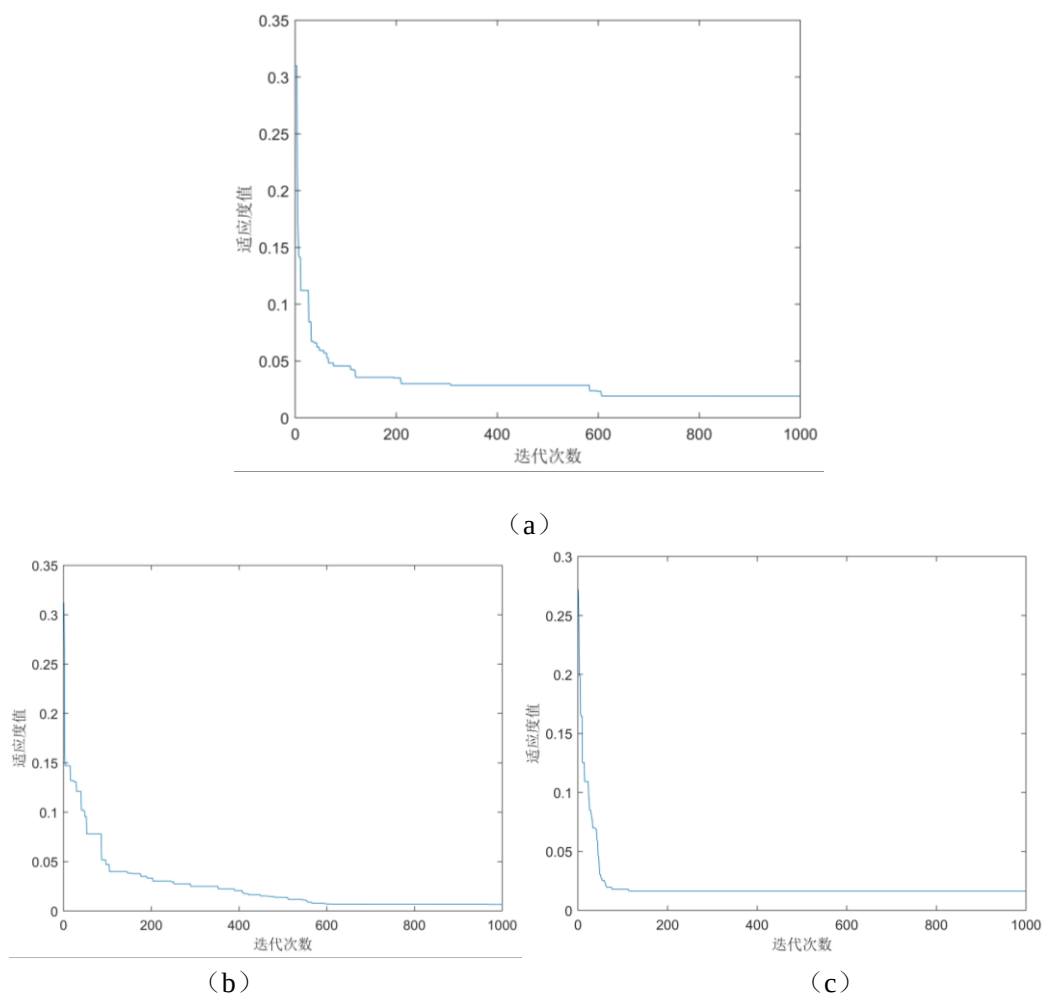
$$f_1(x) = x_1 \quad (4-34)$$

$$g(x) = 1 + 10(n-1) + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(4\pi x_i)] \quad (4-35)$$

$$h(f_1, g) = 1 - \sqrt{f_1 / g} \quad (4-36)$$

$$\text{其中 } x_1 \in (0, 1), x_i \in [1, 10], i \in [2, n] \quad (4-37)$$

五种方案下的迭代情况图如图 7 所示, 进一步整理多次计算结果得到原方案与四种改进方案的性能对比结果, 如表 4-5 所示。



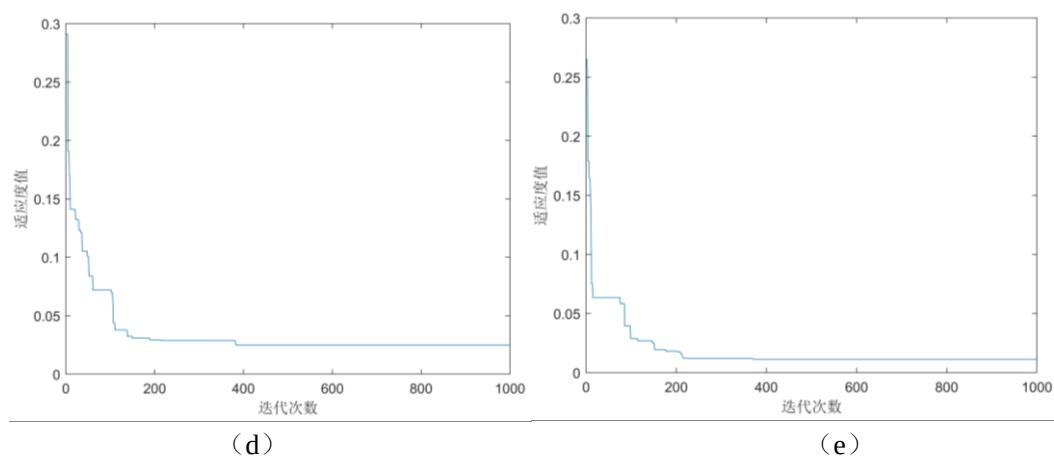


图 4-3 粒子群算法在不同改进方法下的迭代情况

Fig. 4-3 The iteration of particle swarm optimization under different improvement methods

表 4-5 算法性能对比

Table 4-5 Comparison of algorithm performance

测试函数	算法	改进方法	最快迭代次数	最慢迭代次数	平均迭代次数	最优适应度值
ZDT4	PSO	无改进	77	915	340	0.0191
		第一种改进方法	596	898	698	0.0066
		第二种改进方法	47	282	137	0.0443
		第三种改进方法	82	245	138	0.0348
		第四种改进方法	184	219	203	0.0116

图 4-3 中的(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为：不进行改进、第一种改进方法、第二种改进方法、第三种改进方法、第四种改进方法的迭代过程图。由迭代过程图与表 4-5 的算法性能对比结果可知：用不同优化方法进行求解时，找到最优解所需的最快迭代次数与最后所得到的适应度值差异性较大；用不进行改进的方法进行求解时，最快与最慢迭代次数相差较大，说明算法迭代计算不稳定，易陷入局部最优解，且最优适应度值较高，说明未经过改进的粒子群算法不适合本模型；第一种改进方法的最优适应度值较低，说明与该模型较为契合，但是由于平均要 698 次才能收敛，收敛性不好，因此不选用；第二种改进方法中算法的收敛性较好，但是最低迭代次数与最高迭代次数相差过大，表明算法不稳定，最优适应度值较大，说明求解的最优解均不理想，因此不选用；第三种改进方法最快与最慢迭代次数相差较大，算法稳定性较差，且最优适应度值较高，说明第三种改进方法不适用于粒子群算法，因此不选用；第四种改进方法的最快与最慢迭代次数相差不大，说明算法较为稳定，收敛性较好，且最优适应度值较低说明所求解的结果综合效益较高，较为适合本模型。根据上述分析，选用第四种方法改进的粒子群算法对阳泉市水资源优化配置模型进行求解。

4.3.5 参数敏感性分析与最优参数求解

由 4.3.4 中的分析结果可知第四种改进方法最适用于本研究，因此将研究第四种改进方案中各参数对求解结果的影响。在第四种改进方案中，粒子群算法的基本参数有： $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 、 $v_{i,n}^k$ 、 $k_{\max}$ 与粒子种群规模，各参数的最初取值分别取：0.9、0.4、2.5、0.5、1、800、50。为验证参数对模型的影响与求取最适合的参数取值，下面将对以上参数进行研究。

在验证参数敏感性与寻求最优参数的过程中，选取模型中来水频率选取 $P=50\%$ ，用水情况选择 2025 年普通节水情况下的用水方案，并基于此供用水方案，对参数的敏感性进行分析，并选取最优参数。在确定各参数的敏感性与求解最优参数时的求解顺序尤为重要，由经验可知迭代次数与粒子种群规模的敏感性较低，而惯性权重、学习因子、粒子速度等因子的敏感性较高，因此优先选择敏感性较低的因子确定其参数，再逐渐确定敏感性较高因子的参数，参数确定的顺序如下：迭代次数、粒子种群规模、粒子速度、学习因子、惯性权重，下面为各因子参数的确定过程。

(1) 迭代次数

算法的迭代次数为算法终止的条件，算法的迭代次数越大则求解的精度越高，相应的求解的时间越长，因此适合的粒子个数对算法非常重要。在研究迭代次数对求解时间与求解精度的影响时， $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 、 $v_{i,n}^k$ 、粒子种群规模的取值分别为：0.9、0.4、2.5、0.5、1、50，表 4-6 为不同迭代次数对求解时间与求解精度的影响。

表 4-6 算法迭代次数对求解的影响

Table 4-6 The effect of the number of algorithm iterations on the solution

项目	系数						
迭代次数	300	500	800	1000	1300	1500	1800
重复次数	100	100	100	100	100	100	100
平均求解时间(s)	8.1	8.1	8.3	8.5	8.4	8.7	8.9
最优适应度值	0.0218	0.0189	0.0135	0.0118	0.0125	0.0114	0.0115

由表 4-6 可知算法迭代次数对求解时间的影响较小，对求解精度的影响较大，当迭代次数为 1800 时适应度值最低，但求解时间会较长，在迭代次数为 1000 时最优适应度值与平均求解时间较优，最适合本研究。因此算法的重复迭代次数定位 1000 次。

(2) 粒子种群规模

在算法的求解过程中粒子种群规模决定着搜索范围，规模越大则搜索的范围越广泛，越容易找到最优解，但是规模越大则运算耗时越长，粒子群算法中的种群规模在求解简单问题时的取值范围为 20~100，在求解复杂问题时的取值范围为 100~1000。由 (1) 可知最优迭代次数为 1000，在此基础上， $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 、 $v_{i,n}^k$ 的取值分别为：0.9、0.4、2.5、0.5、1，表 4-7 为不同粒子种群规模对求解时间与求解精度的影响。

表 4-7 不同粒子种群规模对算法求解的影响

Table 4-7 The influence of different particle species on the scale of algorithm

项目	系数						
粒子种群规模	50	100	150	200	250	300	350
重复次数	100	100	100	100	100	100	100
平均求解时间(s)	8.7	8.9	9.3	9.5	9.8	10.2	10.6
最优适应度值	0.0358	0.0309	0.0284	0.0221	0.0183	0.0135	0.0147

由表 4-7 可知粒子种群规模对算法求解时间的影响较小,但对求解精度的影响较大,同时可知当粒子种群规模为 300 时,虽然求解时间略有增加,但最优适应度值最低,较为适合本研究,因此粒子种群规模取 300。

(3) 粒子速度

粒子速度过大会直接越过最优解,粒子速度过小搜索的区域有限,会增加迭代次数,增加求解时间,因此寻找合适的粒子速度至关重要,需要根据实际情况进行调整。算法中 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 的取值分别为: 0.9、0.4、2.5、0.5,表 4-8 为粒子速度对算法求解时间与求解精度的影响。

表 4-8 粒子速度对算法求解的影响

Table 4-8 The effect of particle speed on algorithm solution

项目	系数						
粒子速度	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
重复次数	100	100	100	100	100	100	100
平均求解时间(s)	5.3	5.8	6.1	6.4	6.8	6.9	7.2
最优适应度值	0.0213	0.0252	0.0275	0.0293	0.0301	0.0331	0.0354

由表 4-8 可知粒子速度对求解时间与求解精度的影响均较大,在粒子速度为 0.5 时适应度值最低,最适应本研究,在本研究中,粒子速度均取 0.5。

(4) 学习因子

学习因子在算法中也被称为加速因子,在改进算法中个体学习因子 c_1 与群体学习因子 c_2 进行线性变化, $c_{\max}$ 与 $c_{\min}$ 在算法中的取值一般为 2.5 与 0.5,进行计算的公式为(4-32)与(4-33), $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 的取值分别为: 0.9、0.4,图 4-9 为不同 $c_{\max}$ 与 $c_{\min}$ 对算法求解速度与算法求解准确度的影响。

表 4-9 学习因子对算法求解的影响

Table 4-9 The effect of learning factors on the algorithm solution

项目	系数: c_1 、 c_2						
学习因子	2.5、0.5	2.6、0.6	2.7、0.7	2.8、0.8	2.4、0.4	2.3、0.3	2.2、0.2
重复次数	100	100	100	100	100	100	100
平均求解时间(s)	7.4	7.1	7.6	7.5	7.8	7.6	7.5
最优适应度值	0.0168	0.0185	0.0205	0.0221	0.0178	0.0195	0.0213

由表 4-9 学习因子可知 $c_{\max}$ 与 $c_{\min}$ 对算法求解速度的影响较小, 对求解精度的影响较大, 在取值分别为 2.5 与 0.5 时算法的适应度最小, 最适应本研究, 因此本算法中 $c_{\max}$ 与 $c_{\min}$ 的取值分别为 2.5 与 0.5。

(5) 惯性权重

动态的惯性权重可平衡算法的全局收敛性与收敛速度, 在粒子群算法中最大与最小惯性权重的基本取值为 0.9 与 0.4, 进行计算的公式为 (4-31), 图 4-10 为不同惯性权重对算法求解速度与求解精度的影响。

表 4-10 惯性权重对算法求解的影响

Table 4-10 The effect of inertia weights on the algorithm solution

项目	系数: $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$						
惯性权重	0.9、0.4	1.0、0.5	1.1、0.6	1.2、0.7	0.8、0.3	0.7、0.2	0.6、0.1
重复次数	100	100	100	100	100	100	100
平均求解时间(s)	8.5	8.8	8.6	9.1	8.3	7.2	8.1
最优适应度值	0.0125	0.0144	0.0165	0.0178	0.0133	0.0156	0.0184

由表 4-10 可知, 惯性权重对算法求解速度与求解精度的影响均较小, 且在惯性权重取值为 0.9 与 0.4 时, 算法的适应度最小, 最适应本研究, 因此在该算法中, 惯性权重 $\omega_{\max}$ 与 $\omega_{\min}$ 的取值分别为 0.9 与 0.4。

综合以上对迭代次数、种群规模、粒子速度、学习因子与惯性权重对算法计算速度与计算精度的模拟可知: $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 、 $v_{i,n}^k$ 、 $k_{\max}$ 与粒子种群规模的最终取值分别取: 0.9、0.4、2.5、0.5、0.5、1000、300 时, 最适合阳泉市水资源优化配置方案, 可使算法的运行可达到最优。

4.4 阳泉市水资源优化配置结果

根据前文所预测的阳泉市不同来水频率 (95%、75%、50%)、不同规划水平年 (2025 年、2030 年)、不同节水方案 (普通节水方案、推荐节水方案) 下的供需水量预测数据, 采用第四种改进方法的改进粒子群算法对以上水资源优化配置模型进行求解, 每种情况均进行 100 次的模拟计算, 挑选 100 次计算结果中适应度值最低的结果, 结果中阳泉市不同来水频率、不同规划水平年、不同节水方案下的水资源优化配置结果, 如表 4-11 到 4-16 所示。

表 4-11 2025 年不同节水方案下的水资源优化配置结果（P=95%）（单位：万 m³）

Table 4-11 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2025 (P=95%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	74.74	603.6	84.46	16.24	39.69	818.73	27.21	32.65	350.68	313.95	169.22	893.71
	农业供水	1.24	19.56	18.92	3.95	24.04	67.71	6.18	26.86	2.41	17.47	8.69	61.61
	工业供水	7.07	414.46	176.22	24.31	6.43	628.49	13.03	112.77	101.36	106.82	301.37	635.35
	三产供水	26.03	6.76	9.55	34.04	2.24	78.62	8.05	162.59	1.89	2.82	214.63	389.98
	生态供水	1.33	3.92	188.55	7.11	6.62	207.53	0.97	10.43	74.08	2.17	1.81	89.46
矿区	生活供水	70.35	299.92	220.34	105.06	151.56	847.23	11.9	47.6	625.4	61.2	209.5	955.6
	农业供水	2.56	19	25.44	11.71	0.54	59.25	5.5	3.9	3.8	2.1	13.2	28.5
	工业供水	77.56	969.37	600.12	202.47	834.74	2684.26	45.4	1205.9	911.5	21.3	618.5	2802.6
	三产供水	7.33	94.71	1.21	15.55	24.19	142.99	0.2	0.8	4.1	18.3	30.4	53.8
	生态供水	8.11	7.25	3.88	16.9	104.02	140.16	2.9	8.3	48.5	0.3	4	64
郊区	生活供水	56.97	471.93	48.23	292.09	42.16	911.38	374.22	163.38	309.21	73.89	142.01	1062.71
	农业供水	164.72	27.97	60.45	169.5	130.51	553.15	177.28	78.84	2.5	155.49	5.71	419.82
	工业供水	0.52	236.59	320.73	130.21	300.91	988.96	3.69	566.86	181.25	30.1	371.62	1153.52
	三产供水	62.26	78.07	3.5	0.72	25.45	170	1.13	31.8	43.08	11.62	76.96	164.59
	生态供水	0.5	60	3.69	126.73	3.32	194.24	28.78	47.3	2.57	9	1.38	89.03
平定县	生活供水	63.74	0	462.47	228.9	218.66	973.77	504	0	283	182.2	162.9	1132.1
	农业供水	409.1	0	945.17	294.04	134.01	1782.32	94	0	782.1	559.6	272.1	1707.8
	工业供水	20.23	0	799.27	356.31	20.54	1196.35	10.6	0	756.2	333.1	15.1	1115
	三产供水	70.79	0	68.5	15.2	5.01	159.5	4.5	0	7.2	27.3	9.5	48.5
	生态供水	15.83	0	20.64	39.21	1.29	76.97	9.3	0	40.1	6.3	11.4	67.1
盂县	生活供水	278.07	165.26	151.55	140.65	207.97	943.5	518.4	146.4	82.8	142.2	42.5	932.3
	农业供水	204.52	231.19	228.53	37.65	522.3	1224.19	41.3	128.4	0.9	465.3	549.2	1185.1
	工业供水	1.76	135.48	200.62	337.1	484.19	1159.15	4.2	1111.2	2.3	33.7	91.4	1242.8
	三产供水	8.46	29.32	1.98	28.73	88.54	157.03	3.9	2.7	18.5	41.4	42.7	109.2
	生态供水	0.61	18.83	21.67	58.22	47.29	146.62	6.3	5.8	3.1	2.4	7.4	25
合计		1634.4	3893.19	4665.69	2692.6	3426.22	16312.1	1902.94	3894.48	4638.53	2620.03	3373.2	16429.18

表 4-12 2030 年不同节水方案下的水资源优化配置结果 (P=95%) (单位: 万 m³)

Table 4-12 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2030 (P=95%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	39.8	37.6	778.1	0.8	102.2	958.5	1.91	409.5	225.69	15.12	70.34	722.56
	农业供水	29.3	47.1	22.4	42.8	4.5	146.1	9.4	9.07	29.26	3.06	53.13	103.92
	工业供水	6.9	700.1	10.6	1	7	725.6	8.23	425.7	127.57	36.52	34.65	632.67
	三产供水	17.9	0.5	110.2	200.9	156.3	485.8	4.5	19.35	9.72	202.25	2.12	237.94
	生态供水	15.6	0.7	8.5	34.7	85.2	144.7	5.91	46.66	25.13	91.35	13.18	182.23
矿区	生活供水	16.1	118.4	436	6.7	324	901.2	29.5	167.6	703.3	5.5	10.7	916.6
	农业供水	25.1	6.6	0.3	0.6	7.9	40.5	8.3	17.3	1.1	17.3	6.1	50.1
	工业供水	515.8	615.9	1181.1	15.9	261.3	2590	203.2	181.9	825.2	583.5	1252.7	3046.5
	三产供水	9.6	24.3	90.7	2.8	21.9	149.3	79.6	30.7	17.9	5.7	35.1	169
	生态供水	3.8	3.7	0.9	18.3	148.8	175.5	10.8	75.1	1.7	1	31.1	119.7
郊区	生活供水	110.57	100.66	205.59	103.8	476.6	997.22	32.4	96.74	221.86	209.16	362.82	922.98
	农业供水	108.87	344.24	142.41	100.35	0.62	696.49	89.04	45.47	96.83	43.16	14.13	288.63
	工业供水	19.82	379.4	33.11	238.59	1.66	672.58	23.51	117.81	57.01	40.62	1040.37	1279.32
	三产供水	28.3	16.43	2.28	75.58	21.18	143.77	19.78	64.7	32.59	42.81	5.27	165.15
	生态供水	16.92	129.31	6.67	23.41	22.96	199.27	12.91	162.49	2.61	1.38	1.54	180.93
平定县	生活供水	200.5	0	469.1	32.2	314	1015.8	144.3	0	581.3	272.8	196.5	1194.9
	农业供水	84.5	0	34.8	629.1	663.1	1411.5	239.4	0	654.8	142.5	5	1041.7
	工业供水	0.5	0	970.3	123.9	29.9	1124.6	124.9	0	754.1	47	157	1083
	三产供水	13.3	0	2.8	115	49.4	180.5	38.5	0	81.5	67.7	12.2	199.9
	生态供水	16.9	0	101.4	1.5	2	121.8	62.3	0	2.2	48.5	5.5	118.5
盂县	生活供水	500.77	20.58	8.26	51.65	429.45	1010.71	33.6	509.2	200.4	219.3	45.1	1007.6
	农业供水	45.4	707.03	7.05	191.17	271.14	1221.79	9.9	965.6	9.8	79.9	56.1	1121.3
	工业供水	2.05	639.67	1.13	8.32	409.44	1060.61	724.3	170.3	1.8	3.1	546.1	1445.6
	三产供水	95.8	0.46	17.21	57.14	41.73	212.34	2.2	65.3	6.9	110.4	2.4	187.2
	生态供水	0.39	6.67	0.28	69.09	114.97	191.4	0.2	10	6.7	6.3	40.6	63.8
合计		1924.49	3899.35	4641.19	2145.3	3967.25	16577.58	1918.59	3590.49	4676.97	2295.93	3999.75	16481.73

表 4-13 2025 年不同节水方案下的水资源优化配置结果（P=75%）（单位：万 m³）

Table 4-13 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2025 (P=75%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	74.95	260.05	360.77	27.54	183.14	906.45	28.9	44.9	854.2	23.1	3.3	954.4
	农业供水	8.21	9.65	55.42	17.19	0.08	90.55	10.6	12	27.2	25.3	8.8	83.9
	工业供水	38.39	642.12	0.97	4.57	0.07	686.12	0.1	2.6	99	44.5	544.5	690.7
	三产供水	0.07	417.52	5.67	4.45	12.6	440.31	300	20.9	37.1	120	0	478
	生态供水	14.43	12.8	170.86	0.1	0.48	198.67	106.4	7.4	61.5	21.2	0.2	196.7
矿区	生活供水	27.5	44.9	400.6	21.3	387.3	881.6	172.31	383.98	363.6	20.42	1.1	941.41
	农业供水	5.7	3.7	6.3	23.9	8.9	48.5	10.85	1.97	8.69	5.04	14.01	40.56
	工业供水	161.7	141.5	1204.5	237.8	1088.3	2833.8	63.5	36.69	1279.5	246.15	952.92	2578.76
	三产供水	0.2	67.2	16.3	4.9	16.6	105.2	9.77	2.67	31.12	19.61	42.49	105.66
	生态供水	3.7	130.7	30.4	0.1	48.1	213	1.31	102.62	129.11	1.12	0.41	234.57
郊区	生活供水	146.35	226.76	139.43	204.27	287.3	1004.11	302.06	558.26	81.83	27.01	112.86	1082.02
	农业供水	56.09	87.64	15.66	292.96	114.63	566.98	7.83	97.26	8.65	109.97	349.92	573.63
	工业供水	96.69	519.66	627.03	26.9	17.03	1287.31	321.52	330.01	634.22	6.57	5.5	1297.82
	三产供水	6.81	87.61	51.25	12.07	1.34	159.08	0.59	102.64	14.33	0.5	21.66	139.72
	生态供水	166.6	12.93	0.35	3.65	1.86	185.39	2.56	29.19	16.93	146.48	3.51	198.67
平定县	生活供水	206.8	0	301.2	507.5	14.9	1030.4	220.3	0	401.3	130.4	353.7	1105.7
	农业供水	513.7	0	781.6	253.8	373.8	1922.9	375.4	0	922.3	125.3	559.2	1982.2
	工业供水	284.6	0	592.3	178.6	183.4	1238.9	1.2	0	226.4	916.4	0.2	1144.2
	三产供水	25.3	0	49.8	8.1	37.9	121.1	13.9	0	11	85.8	2.2	112.9
	生态供水	0.3	0	28.2	89.7	54.8	173	1	0	76.7	102.9	6.4	187
盂县	生活供水	330.38	28.23	1.02	324.48	202.76	886.87	392.7	516	13.6	49.4	0.6	972.3
	农业供水	219.61	561.39	40.81	114.95	372.46	1309.22	1	809.8	13.2	400.3	154.4	1378.7
	工业供水	9.33	905.26	386.64	103.04	10.72	1414.99	151.6	929	5.1	25.2	257.7	1368.6
	三产供水	106.06	13.08	0.92	0.16	14.1	134.32	10.5	64.9	7.5	0.5	40.6	124
	生态供水	3.5	24.81	0.25	117.62	13.82	160	15.8	44.8	4.3	6.2	26.4	97.5
合计		2506.97	4197.51	5268.25	2579.65	3446.39	17998.77	2521.7	4097.59	5328.38	2659.37	3462.58	18069.62

表 4-14 2030 年不同节水方案下的水资源优化配置结果（P=75%）（单位：万 m³）

Table 4-14 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2030 (P=75%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	11.44	767.52	19.64	1.86	123.76	924.22	128.87	39.65	661.24	56.81	95.99	982.56
	农业供水	0.07	24.05	102.97	11.99	0.81	139.89	6.04	5.69	6.26	11.01	52.19	81.19
	工业供水	3.88	219.59	436.04	0.89	0.17	660.57	151.3	305.24	7.99	2.01	11.86	478.4
	三产供水	0.11	293.62	152.13	72.96	1.91	520.73	26.03	5.08	97.93	4.13	208.92	342.09
	生态供水	150.7	25.53	5	0.1	0.06	181.39	1.12	31.51	7.8	2.7	115.26	158.39
矿区	生活供水	7.38	439.9	1.85	9.3	414.38	872.81	15.64	30.2	867.23	6.36	41.73	961.16
	农业供水	8.38	0.59	6.13	5.95	28.09	49.14	6.19	12.29	5.71	8.38	4.56	37.13
	工业供水	18.54	18.07	1824.99	710.07	341.02	2912.69	10.25	506.6	1711.15	12.67	744.91	2985.58
	三产供水	7.98	20.64	68.3	0.97	36.97	134.86	14.14	13.23	45.94	8.61	57.48	139.4
	生态供水	3.63	6.5	19.25	18.99	125.25	173.62	3.02	19.71	127.26	4.98	6.33	161.3
郊区	生活供水	12.19	822.81	1.27	0.11	242.54	1078.92	54.93	542.94	250.94	138.79	212.86	1200.46
	农业供水	13.16	70.43	0.15	131.82	305.25	520.81	5.06	450.31	45.43	35.96	21.26	558.02
	工业供水	33.83	353.73	238.91	122.17	487.74	1236.38	370.83	472.35	6.25	173.69	50.1	1073.22
	三产供水	133.1	8.88	0.09	32.15	0.02	174.24	37.52	30.13	28.27	63.38	13.87	173.17
	生态供水	3.11	0.58	97.55	74.48	0.03	175.75	85.05	110.25	4.11	1.14	5.61	206.16
平定县	生活供水	215.6	0	881	16.6	4.1	1117.3	8.1	0	623	3.3	533.7	1168.1
	农业供水	6.1	0	774.4	1.4	979.2	1761.1	259.7	0	423.4	951.6	312	1946.7
	工业供水	158.6	0	162.2	447.1	379.8	1147.7	95.7	0	357	524.9	26.5	1004.1
	三产供水	30.4	0	8.4	54	35.1	127.9	23.2	0	12.5	95.8	23.6	155.1
	生态供水	122.3	0	5.2	13	18.6	159.1	92.3	0	57.8	9.8	1	160.9
盂县	生活供水	86.36	252.57	310.11	128.86	205.32	983.22	614.27	212.63	2.35	17.23	248.28	1094.76
	农业供水	433.95	287.36	22.15	318.67	111.44	1173.57	39.84	336.4	8.9	7	748.6	1140.74
	工业供水	802.65	406.56	2.66	40.89	60.44	1313.2	381.09	893.69	4.36	2.26	131.25	1412.65
	三产供水	85.62	63.63	2.24	16.56	1.39	169.44	16	53.07	20.29	19.85	39.55	148.76
	生态供水	34.49	60.53	6.69	0.94	30.51	133.16	17.09	62.31	4.58	49.17	0.19	133.34
合计		2383.57	4143.09	5149.32	2231.83	3933.9	17841.71	2463.28	4133.28	5387.69	2211.53	3707.6	17903.38

表 4-15 2025 年不同节水方案下的水资源优化配置结果（P=50%）（单位：万 m³）

Table 4-15 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2025 (P=50%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	157.68	510.45	178.21	54.61	23.71	924.66	78.35	491.14	171.68	53.6	207.95	1002.72
	农业供水	56.82	9.78	93.32	3.14	55.46	218.52	4.68	9.62	2.25	7.01	78.13	101.69
	工业供水	0.04	177.93	539.02	32.76	7.14	756.89	89.29	549.24	65.23	3.52	1.51	708.79
	三产供水	0.62	178.64	249.99	1.35	48.76	479.36	103.47	60.97	335.81	16.34	0.26	516.85
	生态供水	0.98	159.96	103.52	2.07	48.64	315.17	13.04	178.93	95.36	6.57	4.18	298.08
矿区	生活供水	77.5	245.1	1.3	228.2	343.9	896	39.73	103.35	265.49	0.45	575.36	984.38
	农业供水	4	27.7	7.1	0.2	177.6	216.6	9.26	3.15	5.04	17.46	4.66	39.57
	工业供水	10	488.3	2194.3	13.1	231.1	2936.8	247.27	530.86	1778.87	101.5	254.41	2912.91
	三产供水	67.1	52.2	30.8	4.3	44.6	199	66.15	13.58	23.47	10.3	47.99	161.49
	生态供水	57.1	84.4	2.1	2.7	96.1	242.4	47.42	145.38	43.21	0.21	25.13	261.35
郊区	生活供水	58.15	547.93	72.46	215.47	191.12	1085.13	19.41	737.87	110.79	39.28	220.4	1127.75
	农业供水	414.65	83.47	3.45	2.96	152.42	656.95	142.38	124.42	71.65	93.23	193.17	624.85
	工业供水	300.5	955.45	16.49	12.7	61	1346.14	382.31	26.85	328.6	401.02	201.34	1340.12
	三产供水	20.73	0.82	49.58	136.71	4.22	212.06	32.04	86.83	70.43	5.9	1.78	196.98
	生态供水	0.12	2.03	12.84	13.78	200.59	229.36	25.26	56.98	0.62	150.97	7.25	241.08
平定县	生活供水	1135.6	0	18.8	20.3	31.8	1206.5	10.2	0	30.3	604.5	508.6	1153.6
	农业供水	114.7	0	1101	420.3	311.9	1947.9	336.3	0	528.1	842.3	321.6	2028.3
	工业供水	28.9	0	320.5	562.8	336.1	1248.3	239.2	0	930.2	70.2	44.9	1284.5
	三产供水	17	0	160.1	10.7	0.4	188.2	23.2	0	100.8	14.2	2	140.2
	生态供水	174.6	0	0.2	8.9	1	184.7	50.2	0	146.4	23.3	3.7	223.6
盂县	生活供水	501.4	15.8	5.2	568.5	0.8	1091.7	73	563.1	38.1	16.8	341.7	1032.7
	农业供水	30	857.6	0	278.2	162	1327.8	500.1	210.7	602.8	56.8	38.6	1409
	工业供水	37.7	572.6	515.9	41.1	348.9	1516.2	406.2	1006.1	1.6	80.7	31.1	1525.7
	三产供水	44.2	4.6	9	16.3	128.9	203	102.3	11.2	1.3	0.1	46.1	161
	生态供水	2.8	25	19.9	47.7	126	221.4	87.5	37.3	5.3	56.3	0.6	187
合计		3312.89	4999.76	5705.08	2698.85	3134.16	19850.74	3128.26	4947.57	5753.4	2672.56	3162.42	19664.21

表 4-16 2030 年不同节水方案下的水资源优化配置结果（P=50%）（单位：万 m³）

Table 4-16 Optimal allocation results of water resource under different water saving schemes in Yangquan City of 2030 (P=50%) (Unit: 10⁴m³)

行政区	用水户	推荐节水方案					合计	普通节水方案					合计
		蓄水	调水	提水	地下水	非常规		蓄水	调水	提水	地下水	非常规	
城区	生活供水	12.99	407.8	596.42	3.67	159.85	1180.73	20.44	385.31	574.35	25.52	17.21	1022.83
	农业供水	11.64	165.1	35.87	4.47	6.62	223.7	2.3	23.8	27.19	0.37	50.2	103.86
	工业供水	119.07	161.2	424.94	1.54	19.64	726.39	75.29	573.11	17.19	42.36	4.84	712.79
	三产供水	155.32	398.57	37.7	15.43	6.67	613.69	117.41	286.88	137.5	5.84	22.63	570.26
	生态供水	4.64	154.24	42.65	46.02	0.15	247.7	0.35	220.01	4.47	4.79	0.81	230.43
矿区	生活供水	58.34	414.16	419	29.23	32.71	953.44	60.08	403.26	346.23	2.19	141.36	953.12
	农业供水	24.64	75.69	88.41	2.43	23.18	214.35	1.46	7.61	22.77	6.36	2.54	40.74
	工业供水	167.15	102.02	1546.08	504.03	655.8	2975.08	1153.5	324.08	1206.58	92.73	400.9	3177.79
	三产供水	64.85	72.91	19.37	0.62	36.83	194.58	7.63	46.77	24.95	24.54	45.19	149.08
	生态供水	3.7	101.45	24.63	7.48	133.79	271.05	12.24	28.04	120.37	8.95	50.79	220.39
郊区	生活供水	275.26	469.3	30.46	94.53	229.3	1098.85	2.69	578.76	299.97	48.14	270.49	1200.05
	农业供水	25.66	248.64	47.72	271.17	17.02	610.21	64.17	457.86	30.92	11.46	22.62	587.03
	工业供水	208.42	803.52	276.14	15.82	31.11	1335.01	415.82	53.23	725.77	58.25	100.08	1353.15
	三产供水	115.71	0.7	42.81	53.81	16.27	229.3	64.51	56.64	7.19	56.86	7.82	193.02
	生态供水	19.51	75.77	28.9	14.4	77.62	216.2	5.42	7.74	0.3	198.74	1.14	213.34
平定县	生活供水	125.4	0	582.8	29.4	431.8	1169.4	96.3	0	68.8	610.2	462.8	1238.1
	农业供水	17.2	0	515.5	378.4	840.1	1751.2	7.2	0	654.1	470.3	840.2	1971.8
	工业供水	494.3	0	556.2	54.3	65.8	1170.6	475.6	0	721.8	7.3	23.9	1228.6
	三产供水	38.4	0	74.5	60.4	9.5	182.8	54	0	17.6	51.3	17.4	140.3
	生态供水	61.5	0	3.3	56.9	72.9	194.6	46.5	0	102.6	44.2	3	196.3
盂县	生活供水	950.9	1.8	22	46	18.8	1039.5	46.1	605	6.9	233	203.3	1094.3
	农业供水	1.8	880.5	15.7	384.8	68.3	1351.1	105.2	326.8	11.6	118.5	749.2	1311.3
	工业供水	483.9	373.7	5.6	23.5	439.1	1325.8	729.4	103.4	200.7	8.6	391.3	1433.4
	三产供水	98.9	29.2	1.5	53.4	92.6	275.6	18	28.2	19.1	31.3	71.6	168.2
	生态供水	31.1	4	3.7	49.4	136.7	224.9	12.6	85.6	7.2	8.4	48.5	162.3
合计		3570.3	4940.27	5441.9	2201.15	3622.16	19775.78	3594.21	4602.1	5356.15	2170.2	3949.82	19672.48

4.5 阳泉市水资源优化配置模型结果分析

4.5.1 各用水户配水量分析

基于表 4-11 到 4-16 中的水资源优化配置结果进行分析。阳泉市的五个供水水源中，只有平定县不能使用龙华口调水水源，其他行政区中所有的水源均可使用，并且在算法求解过程中对多余的水资源进行了再分配，力求达到总体缺水率最低与各用水户缺水率最低的目标。模型整体的供水与用水过程都较为符合阳泉市实际用水特点。

在来水保证率较高的频率年（ $P=95\%$ ），即可供水量远小于各行政区总体需水量的情况下，娘子关提水工程的供水量所占总供水量的比值最高、龙华口调水工程供水量次之、其次为非常规水源供水量、在次为地下水可供水量、最后为蓄水工程供水量，这是由于不同供水水源的可供水总量与算法中的供水次序系数共同作用的结果。由于生活用水与工业用水的总体缺水率较低、第三产业与农业的缺水率较高、生态环境的缺水率最高，这是算法中用水公平系数的体现，整体配置结果合理，符合阳泉市的供用水特点。在来水频率较低的频率年（ $P=75\%$ 、 $P=50\%$ ），水源可供水总量大于阳泉市总体需水量，其中生活用水保证率最高，生态环境用水保证率最低，同时工业用水的缺水量最高，但由于算法对其他用水户的余水进行重分配，使各用水户的缺水量进一步降低，使配置结果更科学合理，证明了该水资源优化配置模型的可行性。

在两种节水方案下，阳泉市工业用水的配水量最多，生活、农业、第三产业、生态环境的配水量依次减少，配水量符合阳泉市 2025 与 2030 规划水平年各用水户的需水规律；在推荐节水方案中的水资源配给量明显低于普通节水方案中的水资源配给量，这是由于节水设备、节水技术的使用与人民群众对于节水政策的响应，使各用水户的用水需求得到了很好的抑制，降低了水资源分配量的同时，缺水率没有明显提升；在来水保证率较高的频率年中，可供水量有所降低，但总体的需水量仍保持在较高水平，各用水户的缺水量与缺水率有所增加，但是生活用水的缺水率最低，第三产业与生态环境的缺水率较高。

为进一步分析不同规划水平年、不同来水频率、不同节水方案下的水资源供给量的变化情况，对水资源优化配置结果进行整理，得到不同规划水平年、不同来水频率、不同节水方案下的阳泉市各行政区的水量分配情况，配置情况如表 4-11 到 4-16 所示，各用水户水量分配比例如图 4-4 到 4-9 所示。

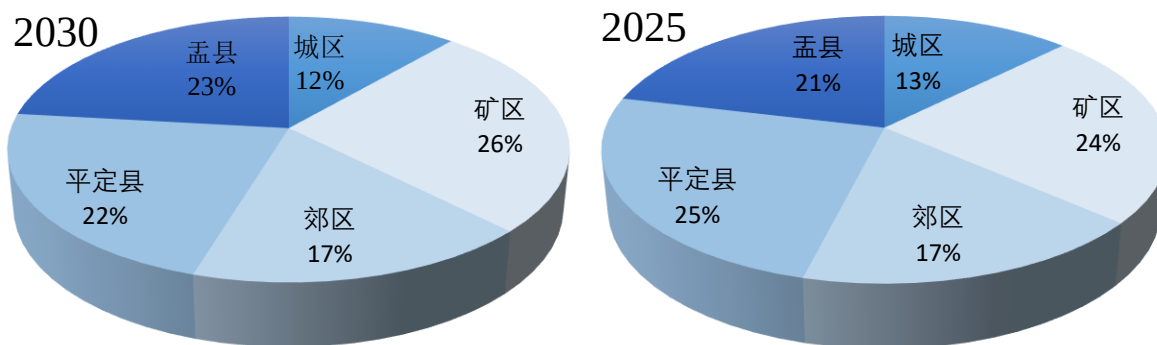


图 4-4 普通节水方案下来水保证率 $P=95\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-4 Guarantee rate of incoming water $P=95\%$ Water distribution of each department of Common water-saving scheme

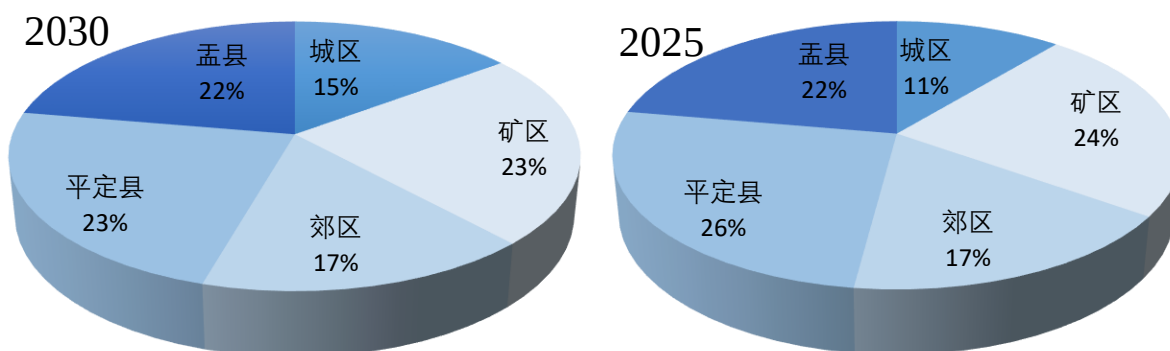


图 4-5 推荐节水方案下来水保证率 $P=95\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-5 Guarantee rate of incoming water $P=95\%$ Water distribution of each department of Recommended water saving scheme

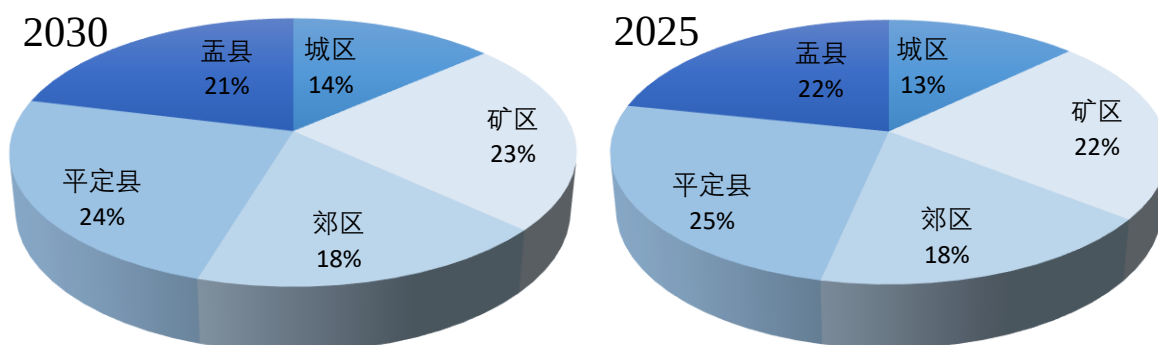


图 4-6 普通节水方案下来水保证率 $P=75\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-6 Guarantee rate of incoming water $P=75\%$ Water distribution of each department of Common water-saving scheme

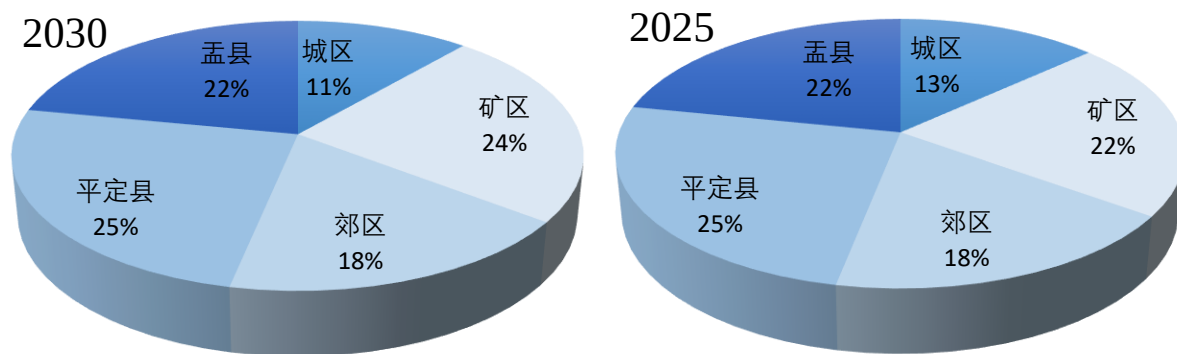
图 4-7 推荐节水方案下来水保证率 $P=75\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-7 Guarantee rate of incoming water $P=75\%$ Water distribution of each department of Recommended water saving scheme

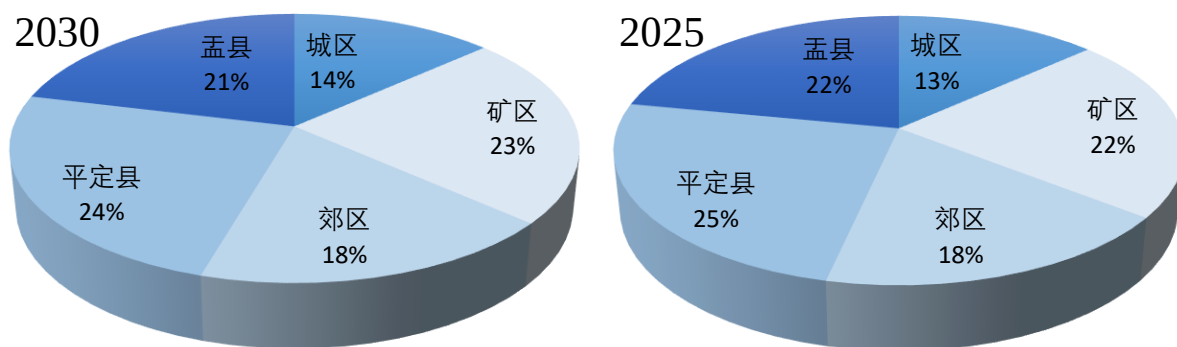
图 4-8 普通节水方案下来水保证率 $P=50\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-8 Guarantee rate of incoming water $P=50\%$ Water distribution of each department of Common water-saving scheme

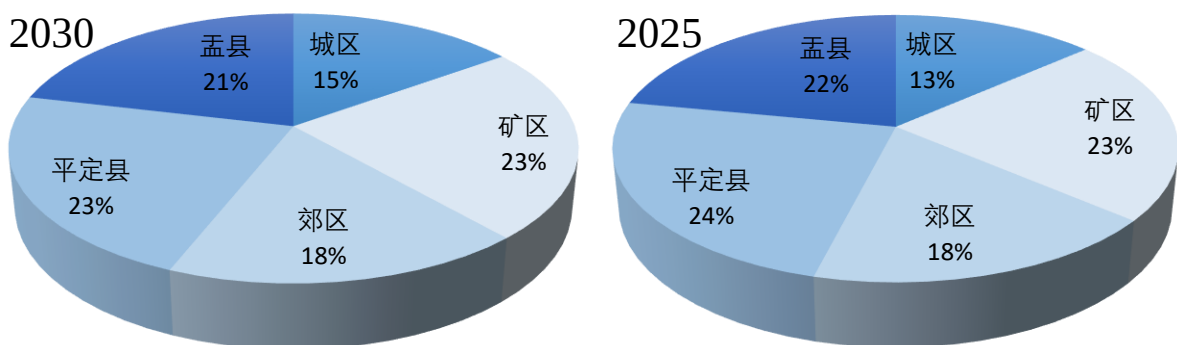
图 4-9 推荐节水方案下来水保证率 $P=50\%$ 各用水户水量分配

Fig. 4-9 Guarantee rate of incoming water $P=50\%$ Water distribution of each department of Recommended water saving scheme

由图 4-4 到 4-9 可知，阳泉市规划水平年 2030 年相比于 2025 年各用水户所占有用水量的比例变化相差不大，符合前文对各行政区用水量变化的预测结果，表明上述优化配置结果是科学合理的。

4.5.2 缺水量分析

根据上述优化配置结果,进一步对阳泉市不同水平年、不同来水频率、不同节水方案下的水资源优化配置缺水程度进行对比分析,分析结果如表 4-17、4-18、4-19 所示。

将阳泉市 2025 与 2030 规划水平年在不同用水方案下得到的各用水户的水资源优化配置情况与前文所提到的不同规划水平年的需水情况进行对比分析,可知:在来水保证率 $P=95\%$ 时,两种节水方案下的缺水量均较为明显,其中生态环境的缺水率最高,其次为第三产业,生活与工业的用水量得到了保障,缺水率不超过 15%,这是在优化配置模型的参数设置过程中对各用水户用水公平系数的体现;在来水保证率 $P=75\%$ 时,两种方案下在 2030 年的缺水率与缺水量较 2025 年有明显的下降,水资源分配更加科学;在来水保证率 $P=50\%$ 时,不同用水户的用水需求均可被满足。

表 4-17 阳泉市水资源优化配置缺水程度分析表 (P=95%)

(单位: 万 m³)Table 4-17 Analysis of water shortage degree of optimize allocation of water resource in Yangquan City (P=95%) (Unit: 10⁴m³)

用水方案	行政区	水平年	生活用水			农业用水			工业用水			三产用水			生态用水		
			需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)
普通节水方案	城区	2025	996.56	893.71	-10.32	95.76	61.61	-35.66	701.67	635.35	-9.45	507.29	389.98	-23.12	260.68	89.46	-65.68
		2030	1019.96	722.56	-29.16	102.50	103.92	0.00	712.46	632.67	-11.20	563.94	237.94	-57.81	226.12	182.23	-19.41
	矿区	2025	979.54	955.6	-2.44	35.57	28.5	-19.87	2909.40	2802.6	-3.67	131.97	53.8	-59.23	256.53	64.00	-75.05
		2030	958.93	916.6	-4.41	34.47	50.1	45.33	3176.69	3046.5	-4.10	146.70	169	0.00	212.68	119.70	-43.72
	郊区	2025	1123.07	1062.71	-5.37	609.79	419.82	-31.15	1331.77	1153.52	-13.38	175.61	164.59	-6.28	236.59	89.03	-62.37
		2030	1196.14	922.98	-22.84	576.82	288.63	-49.96	1352.23	1279.32	-5.39	186.11	165.15	-11.26	216.78	180.93	-16.54
	平定县	2025	1147.81	1132.1	-1.37	2027.38	1707.8	-15.76	1264.50	1115	-11.82	133.62	48.5	-63.70	201.29	67.10	-66.67
		2030	1232.47	1194.9	-3.05	1965.61	1041.7	-47.00	1222.52	1083	-11.41	138.23	199.9	44.61	193.75	118.50	-38.84
	盂县	2025	1029.40	932.3	-9.43	1381.00	1185.1	-14.19	1482.33	1242.8	-16.16	152.31	109.2	-28.31	171.26	25.00	-85.40
		2030	1089.72	1007.6	-7.54	1306.30	1121.3	-14.16	1433.09	1445.6	0.00	165.33	187.2	0.00	160.85	63.80	-60.33
	阳泉市	2025	5276.37	4976.42	-5.68	4149.49	3402.83	-17.99	7689.67	6949.27	-9.63	1100.81	766.07	-30.41	1126.36	334.59	-70.29
		2030	5497.21	4764.64	-13.33	3985.70	2605.65	-34.63	7896.98	7487.09	-5.19	1200.31	959.19	-20.09	1010.18	665.16	-34.15
推荐节水方案	城区	2025	896.90	818.73	-8.72	90.44	67.71	-25.13	683.68	628.49	-8.07	461.06	78.62	-82.95	228.37	207.53	-9.13
		2030	917.96	958.50	0.00	91.43	146.10	0.00	651.39	725.60	11.39	517.35	485.80	-6.10	180.90	144.70	-20.01
	矿区	2025	881.59	847.23	-3.90	33.59	59.25	0.00	2834.80	2684.26	-5.31	119.94	142.99	0.00	224.74	140.16	-37.63
		2030	863.04	901.20	0.00	30.75	40.50	0.00	2904.40	2590.00	-10.82	134.58	149.30	0.00	170.14	175.50	0.00
	郊区	2025	1010.76	911.38	-9.83	575.91	553.15	-3.95	1297.62	988.96	-23.79	159.61	170.00	0.00	207.27	194.24	-6.29
		2030	1076.53	997.22	-7.37	514.51	696.49	0.00	1236.32	672.58	-45.60	170.73	143.77	-15.79	173.43	199.27	0.00
	平定县	2025	1033.03	973.77	-5.74	1914.74	1782.32	-6.92	1232.07	1196.35	-2.90	121.45	159.50	0.00	176.35	76.97	-56.35
		2030	1109.22	1015.80	-8.42	1753.28	1411.50	-19.49	1117.73	1124.60	0.00	126.81	180.50	0.00	155.00	121.80	-21.42
	盂县	2025	926.46	943.50	0.00	1304.27	1224.19	-6.14	1444.32	1159.15	-19.74	138.44	157.03	0.00	150.04	146.62	-2.28
		2030	980.74	1010.71	0.00	1165.19	1221.79	0.00	1310.26	1060.61	-19.05	151.67	212.34	0.00	128.68	191.40	0.00
	阳泉市	2025	4748.74	4494.61	-5.35	3918.96	3686.62	-5.93	7492.50	6657.21	-11.15	1000.50	708.14	-29.22	986.77	765.52	-22.42
		2030	4947.49	4883.43	-1.29	3555.15	3516.38	-1.09	7220.10	6173.39	-14.50	1101.15	1171.71	0.00	808.15	832.67	0.00

表 4-18 阳泉市水资源优化配置缺水程度分析表 (P=75%) (单位: 万 m³)

Table 4-18 Analysis of water shortage degree of optimize allocation of water resource in Yangquan City (P=75%) (Unit: 10⁴m³)

用水方案	行政区	水平年	生活用水			农业用水			工业用水			三产用水			生态用水		
			需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)
普通节水方案	城区	2025	996.56	954.40	-4.23	95.76	83.90	-12.39	701.67	690.70	-1.56	507.29	478.00	-5.77	260.68	196.70	-24.54
		2030	1019.96	982.56	-3.67	102.50	81.19	-20.79	712.46	478.40	-32.85	563.94	342.09	-39.34	226.12	158.39	-29.95
	矿区	2025	979.54	941.41	-3.89	35.57	40.56	14.04	2909.40	2578.76	-11.36	131.97	105.66	-19.93	256.53	234.57	-8.56
		2030	958.93	961.16	0.23	34.47	37.13	7.71	3176.69	2985.58	-6.02	146.70	139.40	-4.98	212.68	161.30	-24.16
	郊区	2025	1123.07	1082.02	-3.65	609.79	573.63	-5.93	1331.77	1297.82	-2.55	175.61	139.72	-20.44	236.59	198.67	-16.03
		2030	1196.14	1200.46	0.36	576.82	558.02	-3.26	1352.23	1073.22	-20.63	186.11	173.17	-6.95	216.78	206.16	-4.90
	平定县	2025	1147.81	1105.70	-3.67	2027.38	1982.20	-2.23	1264.50	1144.20	-9.51	133.62	112.90	-15.51	201.29	187.00	-7.10
		2030	1232.47	1168.10	-5.22	1965.61	1946.70	-0.96	1222.52	1004.10	-17.87	138.23	155.10	12.20	193.75	160.90	-16.96
	孟县	2025	1029.40	972.30	-5.55	1381.00	1378.70	-0.17	1482.33	1368.60	-7.67	152.31	124.00	-18.59	171.26	97.50	-43.07
		2030	1089.72	1094.76	0.46	1306.30	1140.74	-12.67	1433.09	1412.65	-1.43	165.33	148.76	-10.02	160.85	133.34	-17.10
	阳泉市	2025	5276.37	5055.83	-4.18	4149.49	4058.99	-2.18	7689.67	7080.08	-7.93	1100.81	960.28	-12.77	1126.36	914.44	-18.81
		2030	5497.21	5407.04	-1.64	3985.70	3763.78	-5.57	7896.98	6953.95	-11.94	1200.31	958.52	-20.14	1010.18	820.09	-18.82
推荐节水方案	城区	2025	896.90	906.45	1.06	90.44	90.55	0.12	683.68	686.12	0.36	461.06	440.31	-4.50	228.37	198.67	-13.01
		2030	917.96	924.22	0.68	91.43	139.89	53.01	651.39	660.57	1.41	517.35	520.73	0.65	180.90	181.39	0.27
	矿区	2025	881.59	881.60	0.00	33.59	48.50	44.38	2834.80	2833.80	-0.04	119.94	105.20	-12.29	224.74	213.00	-5.22
		2030	863.04	872.81	1.13	30.75	49.14	59.81	2904.40	2912.69	0.29	134.58	134.86	0.21	170.14	173.62	2.04
	郊区	2025	1010.76	1004.11	-0.66	575.91	566.98	-1.55	1297.62	1287.31	-0.79	159.61	159.08	-0.33	207.27	185.39	-10.56
		2030	1076.53	1078.92	0.22	514.51	520.81	1.23	1236.32	1236.38	0.00	170.73	174.24	2.06	173.43	175.75	1.34
	平定县	2025	1033.03	1030.40	-0.25	1914.74	1922.90	0.43	1232.07	1238.90	0.55	121.45	121.10	-0.28	176.35	173.00	-1.90
		2030	1109.22	1117.30	0.73	1753.28	1761.10	0.45	1117.73	1147.70	2.68	126.81	127.90	0.86	155.00	159.10	2.64
	孟县	2025	926.46	886.87	-4.27	1304.27	1309.22	0.38	1444.32	1414.99	-2.03	138.44	134.32	-2.97	150.04	160.00	6.64
		2030	980.74	983.22	0.25	1165.19	1173.57	0.72	1310.26	1313.20	0.22	151.67	169.44	11.71	128.68	133.16	3.48
	阳泉市	2025	4748.74	4709.43	-0.83	3918.96	3938.15	0.49	7492.50	7461.12	-0.42	1000.50	960.01	-4.05	986.77	930.06	-5.75
		2030	4947.49	4976.47	0.59	3555.15	3644.51	2.51	7220.10	7270.54	0.70	1101.15	1127.17	2.36	808.15	823.02	1.84

表 4-19 阳泉市水资源优化配置缺水程度分析表 (P=50%)

(单位: 万 m³)

Table 4-19 Analysis of water shortage degree of optimize allocation of water resource in Yangquan City (P=50%)

(Unit: 10⁴m³)

用水方案	行政区	水平年	生活用水			农业用水			工业用水			三产用水			生态用水		
			需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)	需水量	配水量	缺水率 (%)
普通节水方案	城区	2025	996.56	1000.7	0.00	95.76	101.69	0.00	701.67	708.79	0.00	507.29	516.85	0.00	260.68	298.08	0.00
		2030	1019.96	1022.8	0.00	102.50	103.86	0.00	712.46	712.79	0.00	563.94	570.26	0.00	226.12	230.43	0.00
	矿区	2025	979.54	980.38	0.00	35.57	39.57	0.00	2909.40	2912.91	0.00	131.97	161.49	0.00	256.53	261.35	0.00
		2030	958.93	959.12	0.00	34.47	40.74	0.00	3176.69	3177.79	0.00	146.70	149.08	0.00	212.68	220.39	0.00
	郊区	2025	1123.07	1127.8	0.00	609.79	624.85	0.00	1331.77	1340.12	0.00	175.61	196.98	0.00	236.59	241.08	0.00
		2030	1196.14	1200.1	0.00	576.82	587.03	0.00	1352.23	1353.15	0.00	186.11	193.02	0.00	216.78	223.34	0.00
	平定县	2025	1147.81	1153.6	0.00	2027.38	2028.30	0.00	1264.50	1284.50	0.00	133.62	140.20	0.00	201.29	213.60	0.00
		2030	1232.47	1238.1	0.00	1965.61	1971.80	0.00	1222.52	1228.60	0.00	138.23	140.30	0.00	193.75	196.30	0.00
	孟县	2025	1029.40	1032.7	0.00	1381.00	1409.00	0.00	1482.33	1525.70	0.00	152.31	161.00	0.00	171.26	187.00	0.00
		2030	1089.72	1094.3	0.00	1306.30	1311.30	0.00	1433.09	1433.40	0.00	165.33	168.20	0.00	160.85	162.30	0.00
	阳泉市	2025	5276.37	5295.2	0.00	4149.49	4203.41	0.00	7689.669	7772.02	0.00	1100.807	1176.52	0.00	1126.4	1201.11	0.00
		2030	5497.21	5514.4	0.00	3985.7	4014.73	0.00	7896.98	7905.73	0.00	1200.313	1220.86	0.00	1010.2	1032.76	0.00
推荐节水方案	城区	2025	896.90	924.66	0.00	90.44	218.52	0.00	683.68	756.89	0.00	461.06	479.36	0.00	228.37	315.17	0.00
		2030	917.96	1180.7	0.00	91.43	223.70	0.00	651.39	726.39	0.00	517.35	613.69	0.00	180.90	247.70	0.00
	矿区	2025	881.59	896	0.00	33.59	216.60	0.00	2834.80	2936.80	0.00	119.94	199.00	0.00	224.74	242.40	0.00
		2030	863.04	953.44	0.00	30.75	214.35	0.00	2904.40	2975.08	0.00	134.58	194.58	0.00	170.14	271.05	0.00
	郊区	2025	1010.76	1085.1	0.00	575.91	656.95	0.00	1297.62	1346.14	0.00	159.61	212.06	0.00	207.27	229.36	0.00
		2030	1076.53	1098.9	0.00	514.51	610.21	0.00	1236.32	1335.01	0.00	170.73	229.30	0.00	173.43	216.20	0.00
	平定县	2025	1033.03	1206.5	0.00	1914.74	1947.90	0.00	1232.07	1248.30	0.00	121.45	188.20	0.00	176.35	184.70	0.00
		2030	1109.22	1169.4	0.00	1753.28	1758.20	0.00	1117.73	1170.60	0.00	126.81	182.80	0.00	155.00	194.60	0.00
	孟县	2025	926.46	1091.7	0.00	1304.27	1320.80	0.00	1444.32	1516.20	0.00	138.44	203.00	0.00	150.04	221.40	0.00
		2030	980.74	1039.5	0.00	1165.19	1351.10	0.00	1310.26	1325.80	0.00	151.67	275.60	0.00	128.68	224.90	0.00
	阳泉市	2025	4748.74	5203.9	0.00	3918.96	4360.77	0.00	7492.50	7804.33	0.00	1000.50	1281.62	0.00	986.77	1193.03	0.00
		2030	4947.49	5441.9	0.00	3555.15	4157.56	0.00	7220.10	7532.88	0.00	1101.15	1495.97	0.00	808.15	1154.45	0.00

根据表 4-17 中对不同水平年、不同用水户的缺水率分析可知,在普通节水方案下,由于居民生活水平的日益提高,导致对水资源的需求程度同步增长,使缺水现象经常发生,且缺水量较大的部门主要为农业、第三产业与生态环境部门,因此在配水过程中应综合考虑经济增长与生态环境效益,尽可能使生活与工业用水的缺水率降低。同时由于农业、第三产业的用水公平系数较低,因此缺水率会较高,但由于生态环境的用水公平系数最低,因此总体缺水情况最严重。在 2025 年,普通节水方案下生活、农业、工业、第三产业、生态环境的缺水率分别为 5.68%、17.99%、9.63%、30.41%、70.29%;在 2030 年的普通节水方案下,生活、农业、工业、第三产业、生态环境的缺水率分别为:13.33%、34.63%、5.19%、20.09%、34.15%,可知生态环境的缺水率始终较高,其次为第三产业与农业,与上文分析结果一致;从农业缺水的角度来看,2025 年城区、矿区、郊区、平定县、盂县的缺水率分别为:35.66%、19.78%、31.15%、15.76%、14.19%,城区、矿区与郊区的缺水率较高,但由于农业并不是主要产业,因此对经济发展影响较小,平定县与盂县的农业缺水率稍低,对当地农业的发展将造成一定的影响;在 2030 年,当地缺水率上升,其中平定县农业的缺水率高达 47%,会对当地农作物影响较大;从第三产业的角度来看,在 2025 年普通节水方案下,城区、矿区、郊区、平定县、盂县的缺水率分别为:23.12%、59.23%、6.28%、63.70%、28.31%,在 2030 年普通节水方案下,各行政区第三产业的缺水率分别为:57.81%、0%、11.26%、0%、0%,由此可见在 2030 年除城区与郊区之外其他行政区的第三产业的需水量基本会被满足;从生态环境需水方面,在 2025 年普通节水方案下,城区、矿区、郊区、平定县、盂县的缺水率分别为:65.68%、75.05%、62.73%、66.67%、85.4%,各行政区的缺水率均大于 50%,尤其是盂县,缺水率高达 85.4%,与此相对的是 2025 年农业的缺水率仅为 14.19%,由此可见算法将生态环境用水调度给农业,保障粮食生产,在 2030 年普通节水方案下,各行政区的生态缺水率分别为:19.41%、43.72%、16.54%、38.84%、60.33%,各行政区生态缺水率明显降低,尤其是城区、郊区与矿区,当地的生态环境也会有所改善,由于平定县与盂县的农业为支柱产业之一,因此算法都会将生态用水尽量调度给农业,优先保证当地的粮食生产,同时在 2030 年普通节水方案中的节水设备的使用还不够广泛、节水技术也较为落后,可通过改善农作物的种植结构,种植耗水量较低的农作物,同时在农业与生态环境配水方面进行精准配水,广泛采用更加有效的浇灌方式,可使阳泉市的水资源供给矛盾得到缓解,随着规划水平年中来水保证率($P=50\%$)的降低,水资源供需矛盾将进一步缓解,水资源供不应求现象出现的频率降低,结合上文中水资源优化配置中各种影响因子的占比情况,可知在来水保证率较高($P=95\%$)的情况下,普通节水方案难以保障阳泉市社会经济与生态环境的可持续发展。

在推荐节水方案下,由于对节水设备与节水技术的使用更为广泛,根据阳泉市的社会经济发展规律与国家发展方向对产业结构进行调整,并根据不同用水户的用水状况适

当调整水费、利用节水设备合理抑制用水户的用水需求、根据阳泉市生态环境现状制定相应的环境保护政策等措施,使阳泉市在来水保证率 $P=95\%$ 的情况下,水资源短缺程度明显降低。在推荐节水方案下,2025 年生活、农业、工业、第三产业、生态环境的缺水率分别为: 5.35%、5.93%、11.15%、29.22%、22.42, 在 2030 年各用水户的缺水率分别为: 1.29%、1.09%、14.5%、0%、0%, 表明 2030 年在推荐节水方案的指导下使生活、农业、第三产业与生态环境整体缺水率有了较大的改善,由于工业的需水量较高,同时 在 2030 年的生态环境的重要程度有所提高,导致工业缺水率有些许提升。

由表 4-18 可知,在来水保证率 $P=75\%$ 的情况下,普通节水方案中 2025 规划水平年阳泉市总体缺水率为 6.58%,生活、农业、工业、第三产业、生态环境的缺水率分别为: 4.18%、2.18%、7.93%、12.77%、18.81%, 2030 规划水平年整体的缺水率为 8.61%, 缺水率略有上升,各行政区的缺水率分别为: 1.64%、5.57%、11.94%、20.14%、18.82%; 在推荐节水方案下,2025 规划水平年整体缺水率为 0.82%,各行政区的缺水率分别为: 0.83%、0%、0.42%、4.05%、5.75%, 在 2030 规划水平年中阳泉市的缺水率均为 0, 有了较为明显的下降,说明在普通节水方案下,阳泉市现有节水水平不能抑制用水户需水量的上涨,而推荐节水方案可以科学合理的抑制用水户的用水需求。

由表 4-19 可知,在来水保证率 $P=50\%$ 的情况下,不同节水方案与不同规划水平年的用水需求均可被满足。

从纵向进行对比分析可知,2030 年由于节水设备与技术的使用,使总体用水量较 2025 年有一定的下降,符合阳泉市需水变化规律特征;从横向分析来看,各行政区的水资源分配情况与上文所预测分析的结果一致,在推荐节水方案中,在来水保证率 $P=75\%$ 与来水保证率 $P=50\%$ 情况下,2025 年与 2030 年的最大可供水量均大于相应规划水平年的总需水量,可满足阳泉市社会经济与生态环境的可持续发展,符合阳泉市的水资源规划需求,进一步表明所求解出的水资源优化配置方案科学合理,验证了使用第四种改进方法优化的粒子群算法对该水资源优化配置模型有较强的适应性,求解出的结果符合当地的用水特征,有较强的可行性。

综上所述,通过对阳泉市的水资源优化配置结果的分析可知:推荐节水方案更能满足阳泉市各行政区的用水需求,可以保证当地社会经济、生态环境的可持续发展。为缓解阳泉市水资源供需矛盾,建议阳泉市的各部门使用推荐节水方案。

4.5.3 经济效益分析

基于对阳泉市缺水率的分析结果,对阳泉市不同来水频率、不同节水方案与不同规划水平年情况下的水资源优化配置过程中结果进行输出,可得到经济效益目标函数的结果,结果如表 4-20 与表 4-21 所示。

表 4-20 阳泉市不同水平年、不同频率年、推荐节水方案下经济效益值 (单位: 亿元)
 Table 4-20 Economic benefit value under different level years, different frequency years and
 Recommended water saving scheme in Yangquan City (Unit: 10⁸Yuan)

行政区	水平年	保证率	推荐节水方案					求和
			生活	农业	工业	第三产业	生态环境	
城区	2025	P=95%	0.310	0.005	0.957	2.326	0.059	3.656
		P=75%	0.273	0.008	1.180	9.780	0.062	11.304
		P=50%	0.368	0.019	0.964	8.250	0.103	9.703
	2030	P=95%	0.248	0.017	1.196	9.612	0.044	11.117
		P=75%	0.319	0.011	0.856	11.172	0.115	12.474
		P=50%	0.334	0.021	1.077	15.978	0.104	17.515
矿区	2025	P=95%	0.285	0.006	3.389	3.095	0.033	6.808
		P=75%	0.195	0.005	3.135	2.050	0.071	5.456
		P=50%	0.300	0.010	3.408	4.648	0.089	8.455
	2030	P=95%	0.209	0.005	3.921	2.531	0.035	6.701
		P=75%	0.229	0.004	3.848	2.108	0.038	6.226
		P=50%	0.317	0.018	3.809	4.689	0.074	8.908
郊区	2025	P=95%	0.379	0.061	1.201	4.386	0.096	6.123
		P=75%	0.352	0.061	1.886	3.390	0.122	5.811
		P=50%	0.395	0.082	2.490	5.716	0.040	8.722
	2030	P=95%	0.272	0.075	1.247	3.922	0.083	5.598
		P=75%	0.350	0.037	1.482	6.197	0.070	8.136
		P=50%	0.435	0.068	2.261	6.778	0.071	9.613
平定县	2025	P=95%	0.300	0.173	1.734	4.201	0.038	6.446
		P=75%	0.464	0.182	1.933	2.238	0.065	4.881
		P=50%	0.734	0.157	1.862	3.381	0.125	6.259
	2030	P=95%	0.300	0.121	1.360	4.398	0.040	6.220
		P=75%	0.366	0.084	1.814	3.174	0.095	5.534
		P=50%	0.295	0.114	2.131	4.471	0.084	7.096
盂县	2025	P=95%	0.373	0.094	1.463	2.555	0.053	4.537
		P=75%	0.408	0.122	2.183	4.424	0.079	7.217
		P=50%	0.610	0.132	1.904	3.379	0.061	6.086
	2030	P=95%	0.405	0.112	1.311	5.930	0.057	7.815
		P=75%	0.319	0.147	3.012	5.218	0.055	8.751
		P=50%	0.630	0.141	2.254	6.735	0.070	9.830
阳泉市	2025	P=95%	1.646	0.337	8.744	16.563	0.279	27.571
		P=75%	1.692	0.378	10.316	21.882	0.399	34.669
		P=50%	2.406	0.399	10.629	25.374	0.418	39.226
	2030	P=95%	1.435	0.329	9.035	26.393	0.259	37.451
		P=75%	1.582	0.282	11.013	27.870	0.374	41.120
		P=50%	2.012	0.364	11.531	38.652	0.403	52.962

表 4-21 阳泉市不同水平年、不同频率年、普通节水方案下经济效益值 (单位: 亿元)

Table 4-21 Economic benefit value under different level years, different frequency years and Common Water-saving scheme in Yangquan City (Unit: 10⁸Yuan)

行政区	水平年	保证率	普通节水方案					
			生活	农业	工业	第三产业	生态环境	求和
城区	2025	P=95%	0.297	0.006	0.737	5.732	0.027	6.799
		P=75%	0.262	0.008	0.514	15.983	0.105	16.871
		P=50%	0.331	0.005	1.236	10.843	0.113	12.528
	2030	P=95%	0.229	0.007	0.968	6.890	0.082	8.175
		P=75%	0.303	0.005	0.942	4.284	0.033	5.568
		P=50%	0.318	0.006	1.271	13.352	0.095	15.042
矿区	2025	P=95%	0.240	0.002	3.515	0.872	0.019	4.648
		P=75%	0.355	0.004	2.717	1.814	0.079	4.969
		P=50%	0.204	0.005	3.884	3.833	0.108	8.033
	2030	P=95%	0.263	0.006	3.754	4.408	0.044	8.473
		P=75%	0.248	0.004	3.191	2.223	0.049	5.714
		P=50%	0.296	0.003	5.471	2.809	0.065	8.645
郊区	2025	P=95%	0.430	0.058	1.421	2.348	0.045	4.302
		P=75%	0.450	0.038	2.148	2.744	0.099	5.478
		P=50%	0.367	0.059	2.458	4.430	0.125	7.438
	2030	P=95%	0.264	0.032	0.989	4.039	0.077	5.401
		P=75%	0.400	0.054	2.222	4.547	0.106	7.329
		P=50%	0.354	0.060	2.217	5.606	0.116	8.354
平定县	2025	P=95%	0.501	0.150	1.606	1.176	0.022	3.455
		P=75%	0.350	0.157	2.278	3.303	0.079	6.167
		P=50%	0.383	0.212	1.863	2.839	0.088	5.385
	2030	P=95%	0.399	0.101	1.365	4.822	0.071	6.758
		P=75%	0.231	0.206	1.831	4.141	0.085	6.494
		P=50%	0.444	0.134	2.135	3.987	0.085	6.785
孟县	2025	P=95%	0.480	0.099	1.979	2.064	0.010	4.631
		P=75%	0.471	0.139	2.160	2.303	0.038	5.110
		P=50%	0.320	0.151	2.982	4.486	0.108	8.048
	2030	P=95%	0.380	0.110	2.590	5.025	0.015	8.120
		P=75%	0.508	0.066	2.612	3.013	0.066	6.265
		P=50%	0.403	0.091	2.638	3.097	0.057	6.286
阳泉市	2025	P=95%	1.948	0.315	9.257	12.192	0.123	23.836
		P=75%	1.888	0.346	9.816	26.146	0.400	38.596
		P=50%	1.606	0.432	12.422	26.432	0.541	41.433
	2030	P=95%	1.536	0.255	9.665	25.183	0.289	36.929
		P=75%	1.689	0.335	10.799	18.208	0.338	31.370
		P=50%	1.816	0.294	13.732	28.850	0.418	45.111

由表 4-20 与表 4-21 可知, 在 2025 规划水平年的普通节水方案情况下, $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率下阳泉市的经济效益分别为: 23.836 亿元、38.596 亿元、41.433 亿元; 在 2030 规划水平年中三种来水频率下的经济效益分别为: 36.929 亿元、31.370 亿元、45.111 亿元, 可知随着用水量的增加, 阳泉市的经济效益也在增加, 同时由于在 2030 规划水平年中对阳泉市的各产业的产业结构进行了微调, 计算结果显示微调后的用水方案可以带来更高的经济效益。

在推荐节水方案中, 阳泉市在 2025 规划水平年与 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率情况下的经济效益分别为: 27.571 亿元、34.669 亿元、39.226 亿元, 在 2030 规划水平年中三种来水频率下的经济效益分别为: 37.451 亿元、41.120 亿元、52.962 亿元, 与普通节水方案相比, 推荐用水方案的需水量要低于普通需水量, 但是在相同情况下的经济效益却高于普通用水方案, 这是由于第三产业的经济效益远高于其他产业, 相比于工业, 第三产业可以用有限的水资源创造出更高的价值, 由此证明推荐用水方案不仅可以为阳泉市带来更高的经济效益, 也可以为阳泉市节省更多的水资源用于发展科技产业与改善生态环境, 可推动阳泉市的经济社会与生态环境可持续发展。

4.5.4 生态环境效益分析

基于对阳泉市缺水率的分析结果, 对阳泉市不同来水水平、不同节水方案与不同规划水平年情况下的水资源优化配置过程中结果进行输出, 可得到污染物排放量目标函数的结果, 结果如表 4-22 与表 4-23 所示。

由表 4-22 与表 4-23 可知, 在普通节水方案中, 阳泉市在 2025 规划水平年与 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率的情况下的污染物排放量分别为: 26558.788 吨、29171.578 吨、31654.010 吨; 在 2030 规划水平年与 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率的情况下的污染物排放量分别为: 26566.093 吨、28535.604 吨、31636.554 吨, 可知随着用水量的增加, 污染物的排放量也在增加, 由于阳泉市在 2030 年更加注重污水处理与回用技术的发展与应用, 同时降低工业发展速度, 有效降低了污染物的排放量。

在推荐节水方案中, 阳泉市在 2025 规划水平年与 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率的情况下的污染物排放量分别为: 26450.444 吨、29323.426 吨、31956.748 吨; 在 2030 规划水平年与 $P=95\%$ 、 $P=75\%$ 、 $P=50\%$ 三种不同来水频率的情况下的污染物排放量分别为: 25962.801 吨、28720.860 吨、31544.645 吨, 与普通节水方案相比, 在相同的来水频率与相同规划水平年的情况下, 污染物的排放量基本一致, 这是由于工业部门中煤炭相关产业污染物排放量过大, 对当地生态环境已经造成了严重影响, 因此建议维持工业用水量在缓慢增长或者不增长的同时大力发展污水处理技术, 做到环保开发, 减少老窑水的排放, 保护当地生态环境与地下水水生态环境, 同时加强监管, 防止污水偷排现象的发生。

表 4-22 阳泉市不同规划水平年、不同来水频率年、推荐节水方案下 COD 排放量 (单位: 吨)
Table 4-22 COD emissions under different level years, different frequency years and Recommended water saving scheme in Yangquan City (Unit: t)

行政 区	水平 年	保证 率	推荐节水方案					求和
			生活	农业	工业	第三产业	生态环境	
城区	2025	P=95%	766.208	111.694	1114.992	93.118	291.372	2377.384
		P=75%	848.301	149.371	1217.232	521.503	278.933	3015.340
		P=50%	865.343	360.471	1342.783	567.754	442.499	3578.850
	2030	P=95%	897.012	241.007	1287.272	575.382	203.159	3203.832
		P=75%	864.931	230.763	1171.904	616.753	254.672	3139.022
		P=50%	1104.986	369.016	1288.674	726.854	347.771	3837.301
矿区	2025	P=95%	832.082	105.711	5676.780	170.784	204.353	6989.711
		P=75%	865.837	86.532	5993.034	125.649	310.554	7381.605
		P=50%	879.980	386.449	6210.862	237.682	353.419	8068.392
	2030	P=95%	885.087	72.258	5477.436	178.321	255.879	6868.981
		P=75%	857.204	87.674	6159.873	161.074	253.138	7518.963
		P=50%	936.392	382.435	6291.818	232.402	395.191	8238.239
郊区	2025	P=95%	888.445	848.244	2457.961	197.921	276.209	4668.781
		P=75%	978.842	869.452	3199.480	185.207	263.625	5496.606
		P=50%	1057.823	1007.420	3345.696	246.889	326.150	5983.977
	2030	P=95%	972.125	1068.053	1671.630	167.383	283.362	4162.554
		P=75%	1051.769	798.652	3072.899	202.857	249.917	5376.093
		P=50%	1071.197	935.745	3318.034	266.960	307.436	5899.373
平定 县	2025	P=95%	961.890	3561.075	1852.907	169.453	110.837	6656.162
		P=75%	1017.829	3841.954	1918.808	128.657	249.120	7156.368
		P=50%	1191.781	3891.904	1933.367	199.944	265.968	7482.964
	2030	P=95%	1003.407	2820.177	1741.780	191.763	175.392	5932.520
		P=75%	1103.669	3518.678	1777.558	135.881	229.104	6764.889
		P=50%	1155.133	3498.898	1813.025	194.207	280.224	6941.487
盂县	2025	P=95%	960.634	2621.921	1790.887	168.553	216.411	5758.406
		P=75%	902.976	2804.035	2186.160	144.176	236.160	6273.507
		P=50%	1111.525	2843.829	2342.529	217.896	326.786	6842.566
	2030	P=95%	1029.064	2616.781	1638.642	227.922	282.506	5794.916
		P=75%	1001.075	2513.505	2028.894	181.874	196.544	5921.892
		P=50%	1058.377	2893.732	2048.361	295.824	331.952	6628.246
阳泉 市	2025	P=95%	4409.259	7248.647	12893.527	799.828	1099.183	26450.444
		P=75%	4613.784	7751.345	14514.714	1105.192	1338.391	29323.426
		P=50%	5106.451	8490.072	15175.238	1470.164	1714.822	31956.748
	2030	P=95%	4786.695	6818.276	11816.761	1340.770	1200.298	25962.801
		P=75%	4878.649	7149.271	14211.128	1298.438	1183.374	28720.860
		P=50%	5326.087	8079.825	14759.912	1716.247	1662.575	31544.645

表 4-23 阳泉市不同规划水平年、不同来水频率年、普通节水方案下 COD 排放量 (单位: 吨)
Table 4-23 COD emissions under different level years, different frequency years and Common water saving scheme in Yangquan City (Unit: t)

行政 区	水平 年	保证 率	普通节水方案					求和
			生活	农业	工业	第三产业	生态环境	
城区	2025	P=95%	836.379	101.632	1127.162	461.892	125.602	2652.666
		P=75%	893.175	138.401	1225.357	566.143	276.167	3099.244
		P=50%	938.396	167.748	1257.450	612.157	418.504	3394.255
	2030	P=95%	676.208	171.426	1122.407	281.816	255.851	2507.708
		P=75%	919.529	133.931	848.720	405.171	222.380	2529.731
		P=50%	957.215	171.327	1264.546	675.416	323.524	3392.029
矿区	2025	P=95%	938.514	50.849	5927.051	64.258	93.312	7073.983
		P=75%	924.578	72.366	5453.665	126.198	342.003	6918.809
		P=50%	966.779	70.599	6160.339	192.880	381.048	7771.646
	2030	P=95%	900.211	89.386	6442.860	201.850	174.523	7808.830
		P=75%	943.974	66.246	6314.024	166.497	235.175	7725.916
		P=50%	936.078	72.687	6720.517	178.058	321.329	8228.669
郊区	2025	P=95%	1035.967	643.786	2866.959	191.622	126.601	4864.934
		P=75%	1054.791	879.650	3225.602	162.668	282.509	5605.219
		P=50%	1099.370	958.195	3330.734	229.332	342.816	5960.447
	2030	P=95%	899.753	442.608	3179.622	192.274	257.282	4971.540
		P=75%	1170.250	855.713	2667.381	201.611	293.160	5188.115
		P=50%	1169.851	900.199	3363.119	224.722	303.369	5961.260
平定 县	2025	P=95%	1118.288	3412.184	1726.912	51.526	96.624	6405.535
		P=75%	1092.210	3960.436	1772.137	119.945	269.280	7214.008
		P=50%	1139.526	4052.543	1989.434	148.948	321.984	7652.436
	2030	P=95%	1180.322	2081.317	1677.350	212.374	170.640	5322.003
		P=75%	1153.849	3889.507	1555.150	164.778	231.696	6994.980
		P=50%	1222.995	3939.656	1902.856	149.055	282.672	7497.234
盂县	2025	P=95%	949.231	2538.200	1920.126	117.213	36.900	5561.669
		P=75%	989.957	2952.845	2114.487	133.099	143.910	6334.298
		P=50%	1051.454	3017.740	2357.207	172.814	276.012	6875.226
	2030	P=95%	1025.898	2401.555	2233.452	200.937	94.169	5956.011
		P=75%	1114.641	2443.191	2182.544	159.676	196.810	6096.862
		P=50%	1114.172	2808.490	2214.603	180.543	239.555	6557.363
阳泉 市	2025	P=95%	4878.378	6746.650	13568.209	886.512	479.039	26558.788
		P=75%	4954.711	8003.697	13791.248	1108.053	1313.869	29171.578
		P=50%	5195.525	8266.825	15095.163	1356.132	1740.364	31654.010
	2030	P=95%	4682.392	5186.293	14655.692	1089.251	952.465	26566.093
		P=75%	5302.244	7388.587	13567.819	1097.734	1179.220	28535.604
		P=50%	5400.312	7892.359	15465.642	1407.793	1470.449	31636.554

从表 4-17 到表 4-23 可知, 阳泉市规划水平年 2025 年与 2030 年在不同来水频率与不同节水方案下的社会效益、经济效益与生态环境效益的总体变化规律与阳泉市各用水户的用水量变化规律相吻合。在 2025 与 2030 规划水平年, 社会效益、经济效益与生态环境效益与可供水量间的变化关系遵循如下规律: 随着来水保证率从 $P=95\%$ 增加到 $P=50\%$, 阳泉市的可供水总量逐渐增加, 同时供水净效益与污染物排放量明显增加, 缺水率明显降低, 这是由于在可用水总量增加的过程中, 各产业均得到了充足的水资源, 因此各产业的经济效益均有较大幅度的所提高; 同时由于可用水总量的上升, 各产业在生产过程中的污染物排放量也会同步上升; 在 2030 规划水平年, 三个目标效益相较于 2025 规划水平年, 缺水率有所降低、污染物排放量基本持平、经济效益有了明显的提高, 这是由于阳泉市社会经济在发展的过程中各用水户的可用水总量同步上升导致的, 同时由于第三产业的经济效益较高, 且缺水率较低, 因此经济效益有了明显的提高, 而且由于 2030 规划水平年所使用的污染物处理技术与工业生产工艺均得到了明显的优化, 因此在一定程度抑制了污染物排放, 使得在可用水总量上升的基础上污染物排放量的变化幅度较小。利用改进粒子群算法所求解的社会效益、经济效益与生态环境效益的变化规律与 2011~2020 年的三大效益的变化规律基本相似, 证明了优化配置结果的合理性。

上述三个效益的变化规律符合阳泉市水资源多目标优化配置模型的设计原则, 即某一项目标函数在一定程度上的优化 (如污染物排放量降低) 必定伴随着另外一个或者两个目标函数效益在一定程度上的牺牲 (缺水率升高、经济效益降低), 证明三个目标函数间为相互竞争与制约的关系, 想要坚持可持续发展与高质量发展就必须确定目前发展的主方向, 并找到三个目标函数中的平衡点, 进行均衡发展。

4.6 对阳泉市不同方面的发展建议

阳泉市的水资源短缺现象较为明显, 一部分原因为当地各供水水源的可供水总量有限, 导致当地面临水资源短缺型缺水问题; 另一部分由于老窑水污染问题较为严重, 已经污染了当地的地表水与地下水水源, 由此导致了水质型缺水问题, 两方面原因共同作用下使阳泉市的水资源供需矛盾非常严重, 若按照阳泉市当前的发展速度与发展进程, 在未来很长一段时期内都将面临严重的水资源短缺问题, 并将严重限制阳泉市的社会经济发展与生态环境的改善, 因此应立即采取有效措施, 针对不同行政区与不同用水户制定相应的用水建议与发展规划, 缓解当地供水水源的供水压力, 改善当地地表植被生态环境与水生态环境, 提升水资源承载力。为解决上述问题, 本研究从以下几个方面提出了不同的发展建议, 使阳泉市的社会经济与生态环境保持可持续发展与高质量发展:

(1) 在社会经济方面: 建议优先发展优势经济体, 比如第三产业与高科技产业, 将有限的水资源相对优先的供给生产效益更高的产业, 由于单位用水量情况下第三产业的

经济效益远高于矿产产业，因此应提高第三产业与高科技产业的供水保证率，并应使之逐渐代替矿产产业成为新的支柱产业，缓解水资源供需矛盾，保障社会经济稳定发展。

(2) 在矿产资源开发方面：在提升矿产产业产值的同时建议发展新的开采技术、处理技术，使单位产值的用水量有效降低；并在发展的过程中加大对老窑水处理技术、中水回用技术的开发与应用，缓解老窑水所带来的污染问题，改善水生态环境，缓解水质型缺水问题，为保护地下水生态环境与娘子关水源地用水安全提供理论依据与技术支持。

(3) 在农业方面：建议改善当地农作物的种植品种，优先选择灌溉需水量较低的农作物，并广泛使用节水灌溉技术，提高灌溉水使用效率；另一方面，林牧渔畜用水方面也要进行精细化管理，对不同行政区提供相应的管理方案。

(4) 在供水水源方面：由于阳泉市娘子关泉水的流量一直呈现逐年递减的趋势，且因为老窑水的处理不当与乱排乱放，导致娘子关泉水中硫酸根离子浓度过高，矿化程度严重；同时地下水由于过度的开采，多处水源已接近枯竭，因此建议优先使用地表水水源、龙华口调水水源与再生水水源进行供水，降低娘子关与地下水水源的使用优先级，同时制定科学合理且详尽的水资源开采规划，在不破坏娘子关泉域与地下水水生态环境的前提下，科学合理的利用地下水与娘子关泉水，为保护阳泉市地下水水生态环境与娘子关泉域生态环境提供保障。

(5) 在节水技术与设备研发方面：面对阳泉市可用水资源严重短缺的问题，科学合理的水资源利用规划与用水部门的节水设备使用率也同样重要。因此建议结合阳泉市的供用水特点，针对各行政区因地制宜的规划相应的节水方案，鼓励节水技术与节水设备的研发与使用，并进一步提高全市的节水设备使用率，推动节水型社会的建设。

(6) 在相关政策执行方面：建议加大节水政策宣传力度，强化各部门与居民的节水意识，加强各行政区的生态文明建设，保障阳泉市社会经济与生态环境可持续发展。

4.7 本章小结

本章节根据阳泉市水资源供需现状建立了科学合理的多目标水资源优化配置模型，通过对不同来水频率与不同规划水平年的情况对供用水方案进行求解，得到了不同条件下的水资源优化配置方案。其中的主要内容包括：(1) 针对阳泉市现状构建了以社会、经济、生态为目标的评价函数，建立了基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置模型；(2) 针对粒子群算法中存在缺点，找到了相应的改进方案，通过对改进方案的比选，找到了能够有效克服粒子群算法易于早熟、容易陷入局部最优等缺点的方案，并进行了适应度分析与参数敏感性验证，确定了参数的最优取值，将其运用于求解阳泉市水资源优化配置的模型中；(3) 利用改进后的粒子群算法对水资源优化配置模型进行求解，得到阳泉市各行政区各用水户的水资源优化配置结果，并通过配水量、缺水率、经济效益、污染物排放量、配置目标与模型精度等方面对配置结果的合理性进行分析。

第五章 Mike Hydro Basin 软件在水资源优化配置中的应用

本章主要从第四章所求得的不同来水条件、不同水平年、不同节水方案下的阳泉市水资源优化配置方案出发,将配置方案中的年用水量根据用水户的用水特点进行逐月还原,并根据阳泉市各水源供水特点,对水资源供应量进行逐月分配,利用 Mike Hydro Basin 软件对水资源供需平衡进行计算,得到使阳泉市水资源短缺量最低的月均水资源优化配置方案,同时对缺水现象进行分析,并提出合适的解决方案。

5.1 Mike Hydro Basin 软件

5.1.1 模型介绍

Mike Hydro Basin 软件是由丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute)研发的一款可应用于任意流域尺度上,对受时间与空间因素影响的水资源供需平衡进行分析、管理与规划的软件,该软件基于 GIS 平台进行开发,可根据不同的需求设定不同的时间步长,以此来对水资源配置方案进行求解,同时软件内含有多种水资源禀赋与调度方式,在水资源综合管理与决策过程中提供精准的分析与决策^[89]。

5.1.2 模型构建

利用 Mike Hydro Basin 软件进行建模时主要分为以下三个部分:(1)使用 GIS 数据或者 DEM 数据生成地形模型;(2)在模型中规划河道,并划分水资源分区与用水户,同时设计水资源分区的供水时间序列与用水户的用水时间序列;(3)设置相应的取水与用水规则。通过对数据进行修改最终可了解不同修改结果对阳泉市各部门用水的影响。

本次所需要模拟的范围为整个阳泉市,总模拟的面积为 4578km^2 。下面将详细介绍阳泉市模型的构建过程。

(1) 所需资料

要构建阳泉市的水资源优化配置模型,主要用到的资料有:改进粒子群算法所求解出的水资源优化配置方案与阳泉市的数字高程模型(DEM),阳泉市的数字高程模型所采用的空间精度为 $30\text{m}\times 30\text{m}$,使用的为 WGS-1984 投影坐标。

(2) 用水户、水源的构建

在 Mike Hydro Basin 平台中利用其“河道追踪”与“流域划分”功能对河道进行描绘,同时根据现实水库对应的位置在模型中添加水库,其中有六座水库为供水水库,主要作用是为指定的用水户进行供水,剩余十五座水库为防洪水库,主要作用为防洪,其下泄流量可作为河道内的生态基流,改善河道生态环境。

根据阳泉市地下水、娘子关提水、龙华口调水与非常规水源的分布,将其根据在现实中的位置展现在模型中,其中根据不同的供水区域构建相应的供水水源,其中构建地下水水源三个、龙华口调水水源一个、娘子关提水水源两个、非常规水源三个。

根据水资源供需平衡计算时的行政区域划分,在模型中也对应的划分出5个行政区,将行政区中的生活用水概化为生活类用水户,将生态环境用水概化为环境类用水户,将农业、工业与第三产业用水概化为成生产类用水户,共三类用水户,五个行政区,每个行政区均构建生活、生产与生态用水户,因此五个行政区共构建用水户15个。

在软件中添加供水水源与用水户后的外观如图5-1所示。模型图例如图5-2所示。

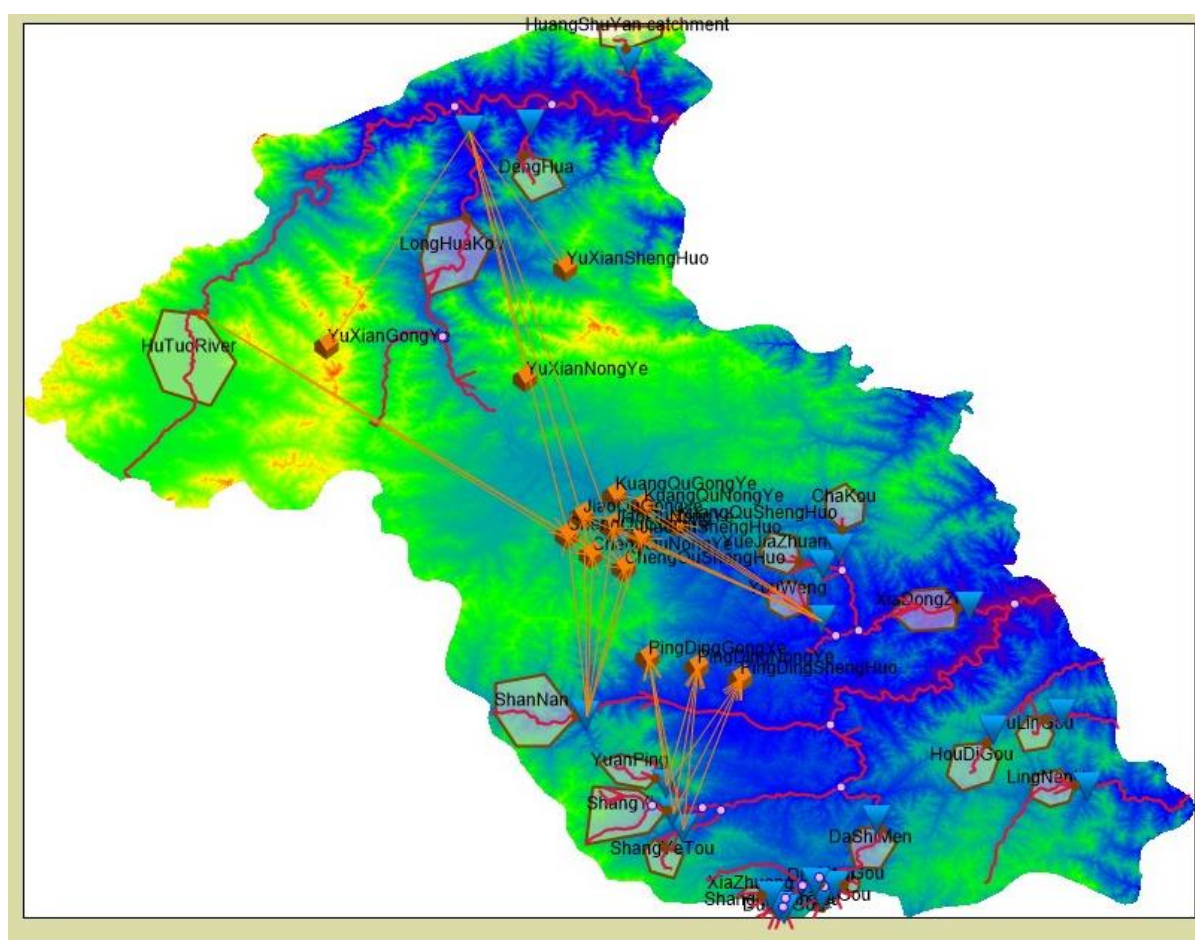


图 5-1 配置模型节点图

Fig. 5-1 Allocation model

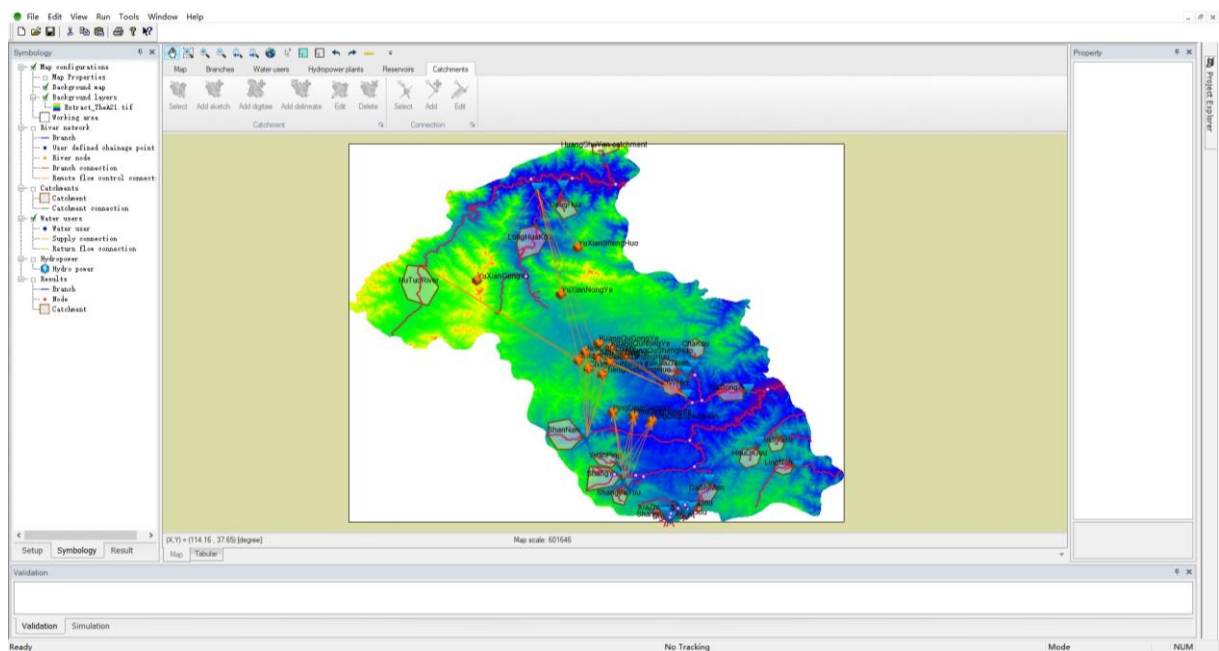


图 5-2 Mike Hydro Basin 模型图例

Fig. 5-2 Legend of Mike Hydro Basin Model

(3) 配水线路设计原则

本研究中水资源配置线路的设计原则为：（1）供水过程中地表水源优先使用，且调水工程水源优先供给居民生活用水，其次为生产用水，并充分优化调度地表水源，使有限的水资源产生最大的效益；（2）非常规水源优先供给生产用水，其次为生态用水；（3）地下水的开采量与泉水提取量均不高于 2020 年水平；（4）供水过程中供水水源应遵循就近供给的规则，降低水资源损耗率；（5）在进行水资源配置时应遵守科学性、合理性与可操作性相结合的原则。

(4) 用水户用水规则设定

水源的供水顺序见表 5-1，其中供水顺序越大的代表供水优先级越高，系数越小的代表供水优先级越低，为 0 代表不进行供水。

表 5-1 用水顺序系数

Table 5-1 Water sequence coefficient

供水次序系数 d_i^l					
行政区	蓄水工程 (i=1)	调水工程 (i=2)	娘子关 (i=3)	地下水 (i=4)	非常规水源 (i=5)
城区 (l=1)	0.133	0.267	0.333	0.200	0.067
郊区 (l=2)	0.133	0.267	0.333	0.200	0.067
矿区 (l=3)	0.200	0.267	0.267	0.133	0.067
平定县 (l=4)	0.300	0.000	0.400	0.200	0.100
孟县 (l=5)	0.267	0.333	0.200	0.133	0.067

(6) 水库设定

选择软件中的水库节点，选择 **Reservoirs** 下的 **Reservoirs definitions** 进行水库相关数据的设置，软件界面见图 5-4，在软件中需要设置水位-库容-面积曲线、坝底高程、坝顶高程、最低水位、汛限水位、正常蓄水位、死水位、最大最小下泄流量、用水户的取水顺序、水库的消落水位与消落系数等系列参数。以龙华口水库为例，其中水位-库容-面积曲线如图 5-5 所示、水库其他特征数据如图 5-6 所示，其中消落水位定为 574m，消落系数为 0.8。



图 5-3 Mike Hydro Basin 软件需水量输入界面

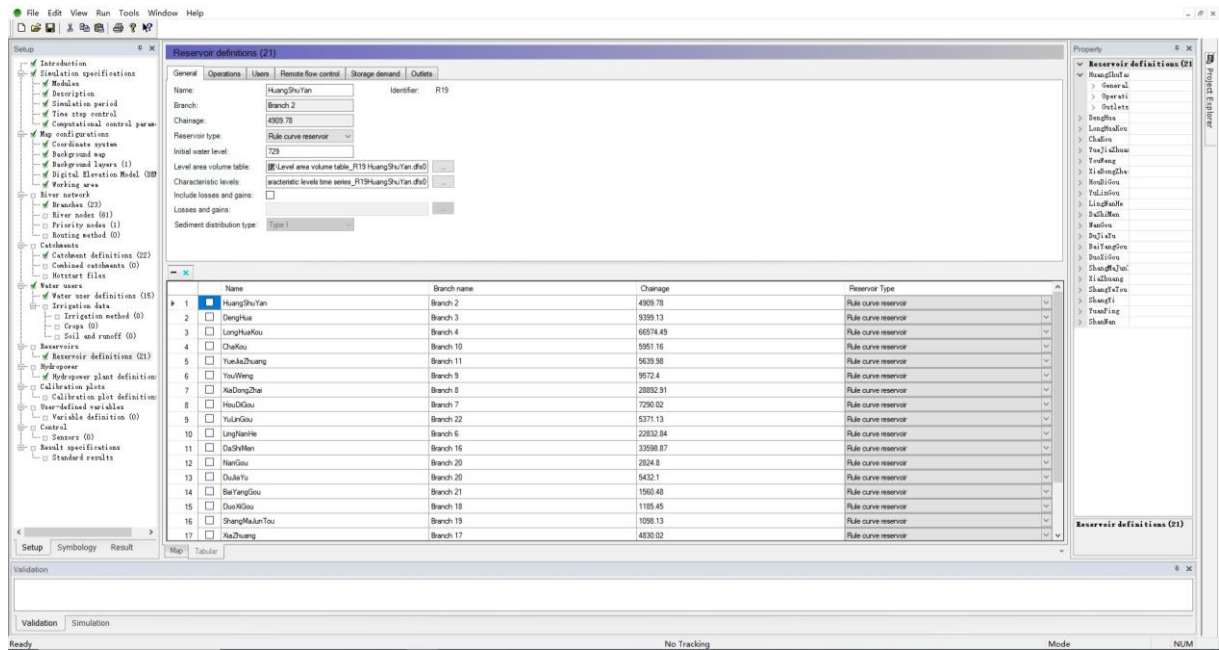


图 5-4 水库数据设置图

Fig. 5-4 Reservoir data setting diagram

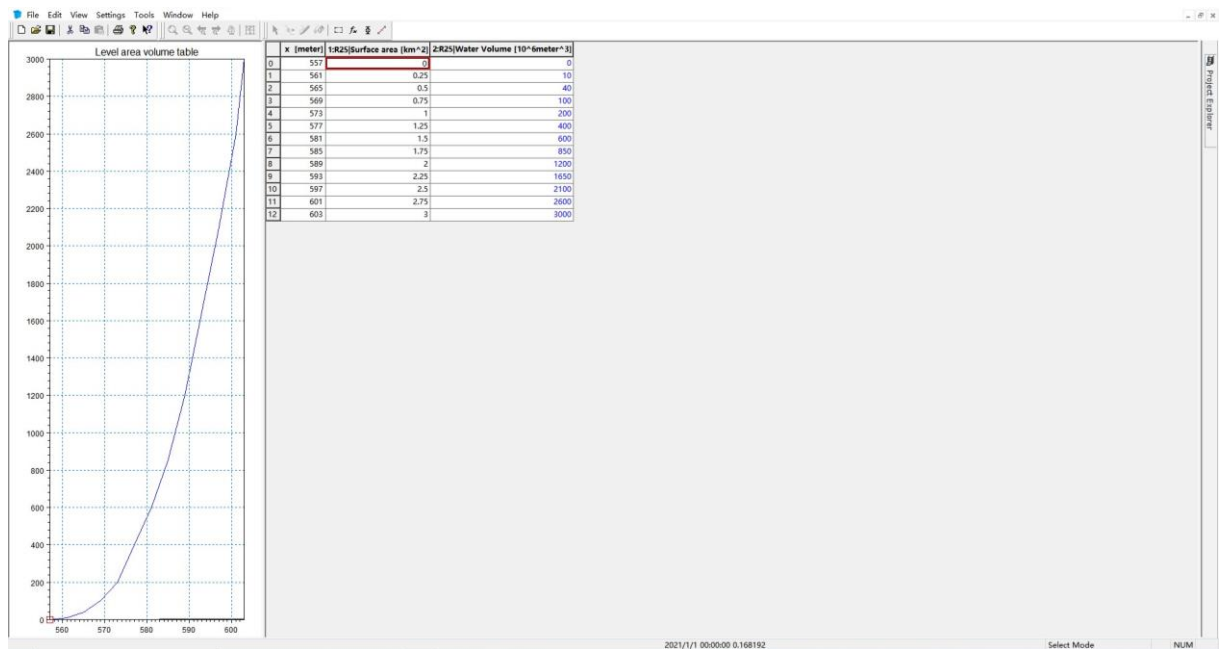


图 5-5 龙华口水库的水位-库容-面积曲线

Fig. 5-5 Water level-capacity-area curve of LongHuaKou Reservoir

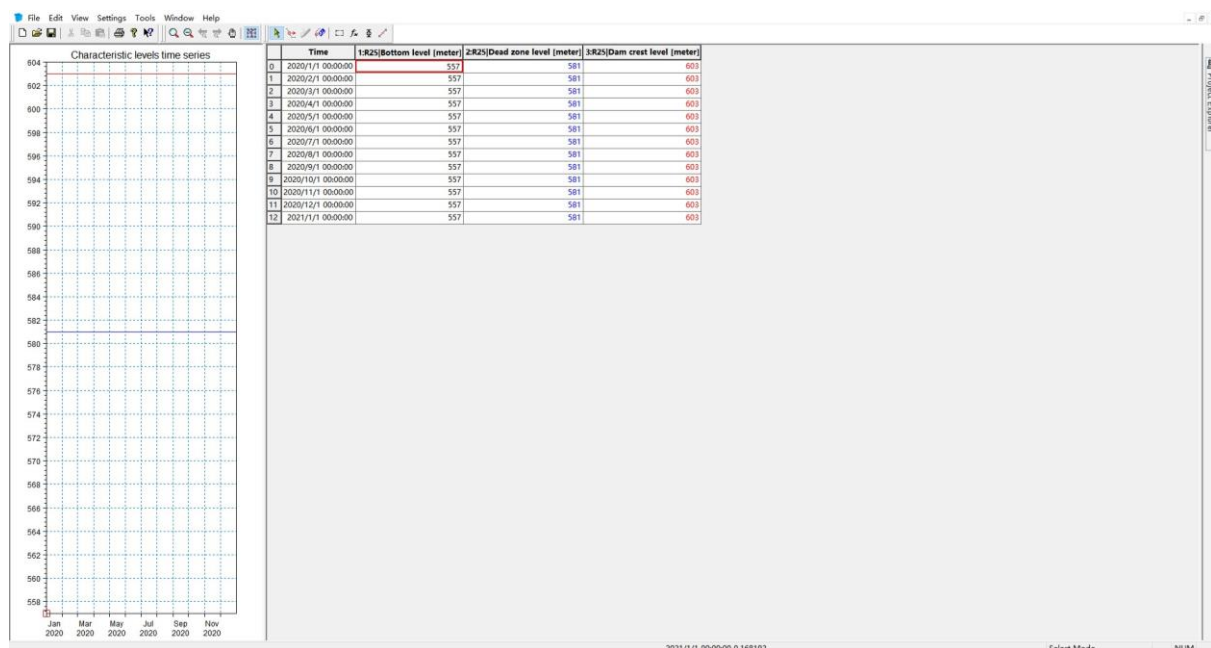


图 5-6 龙华口水库特征水位

Fig. 5-6 Characteristic levels of LongHuaKou Reservoir

(7) 供水时间序列设定

在软件中所设定的各流域中需要加入流域的径流时间序列，以此充当来水条件，下面为所设定的来水时间序列，如图 5-7 所示。

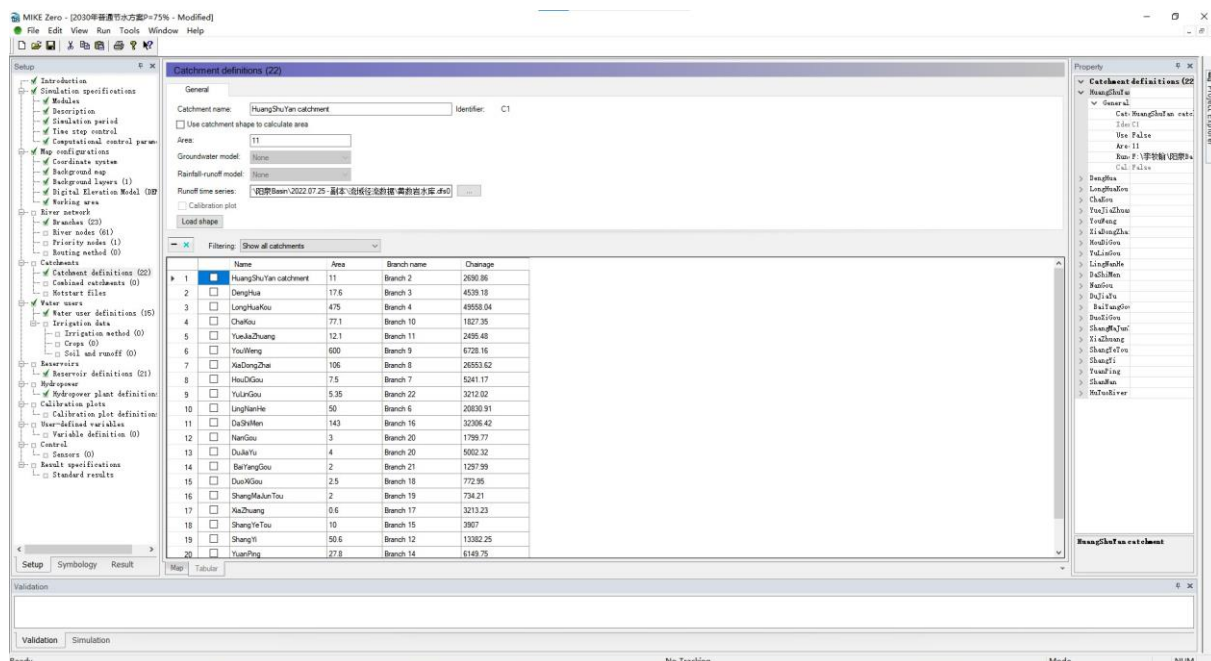


图 5-7 流域径流时间序列

Fig. 5-7 Time Series of Watershed Runoff

5.1.2.1 模型验证

在软件中所采用的模拟期为 2011~2021 年,采用的时间步长为 1 个月,模拟期的用水量结果与实际用水数据对比图如图 5-8 所示,计算误差均小于 5%,模型较为准确,可用于计算 2025~2030 年的水资源供需关系。

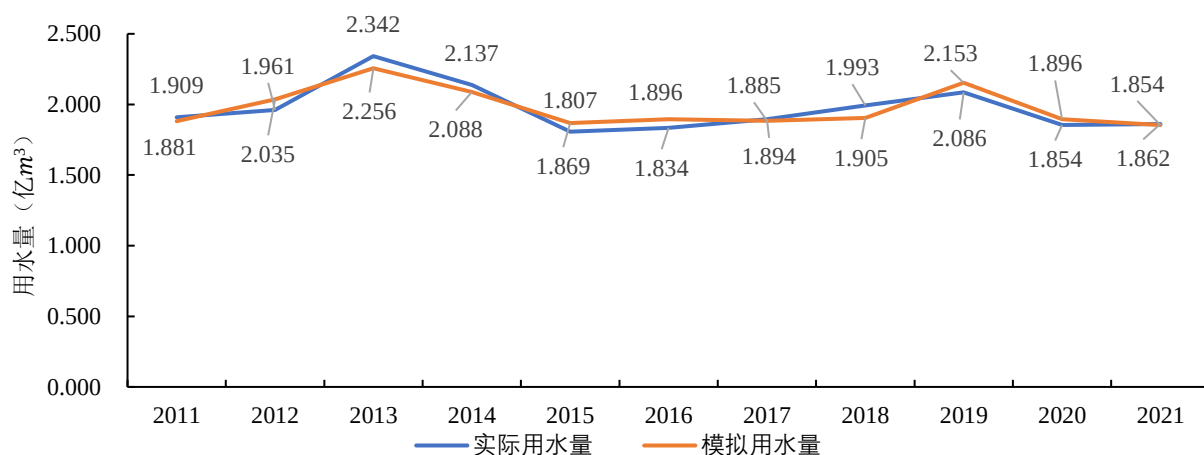


图 5-8 模拟结果对比图

Fig. 5-8 Comparison chart of simulation result

5.1.2.2 模型数据输入与条件设定

根据改进粒子群算法求解出的水资源优化配置方案中的供水数据,可得各行政区不同用水户的需水量,将需水量数据输入到模型中对应的用水户中,根据水源在一年中不同月份的供水特点设置相应的供水时间序列,同时根据不同水库相应的特性曲线在模型中输入水位-面积-库容曲线、水库最小、最大下泄流量以及供水水源的供水次序系数等相关数据,同时把水库的消落系数定为 0.8,并设置用水户的取水比例与水源分配的优先权,取水比例来自于表 4-9,水源分配水的优先权详见表 5-1。

5.2 模拟过程

在所有数据输入完成后点击 run 选项下的 simulation 选项进行缺水性模拟分析,待模型进度条运行至 100%时即可得到运行结果。

在查看运行结果时,右键点击想要得到结果的用水户,选中 result 即可查看该用水户的供水情况与缺水情况。

以 2030 规划水平年普通节水方案中来水保证率 $P=75\%$ 的情况下的供用水方案为例,把数据输入 Mike Hydro Basin 模型中的,点击运行按钮,进行缺水情况分析,图 5-9 为运行时的图片。

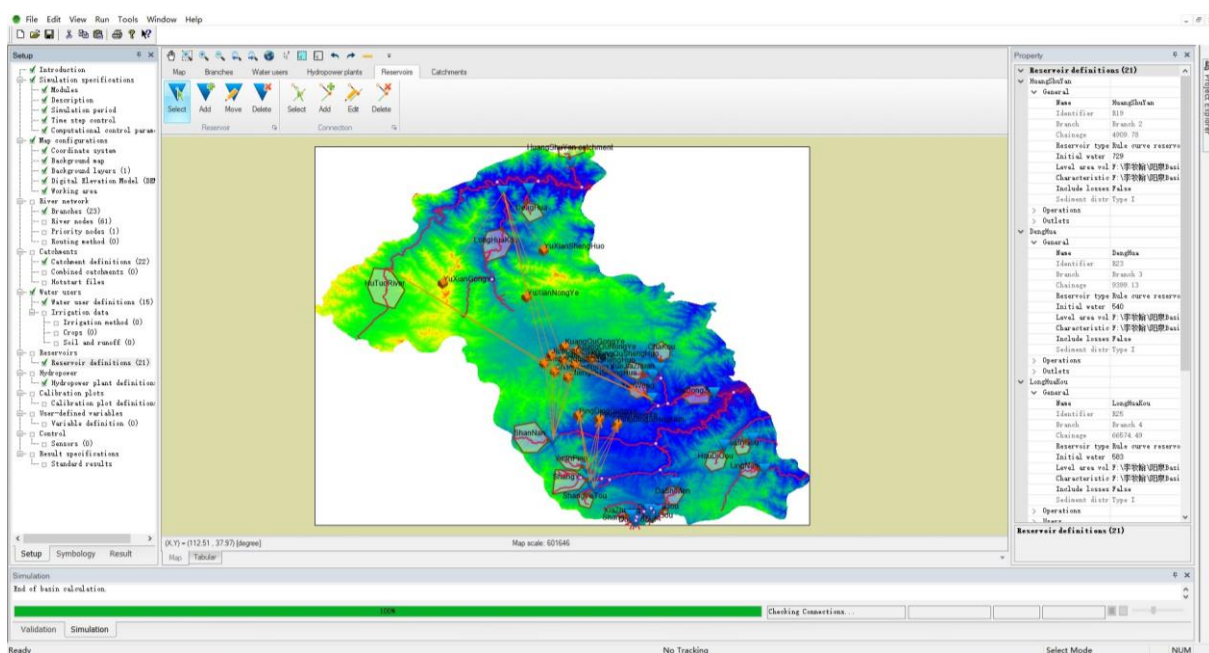


图 5-9 Mike Hydro Basin 模型运行图

Fig. 5-9 Mike Hydro Basin model operation diagram

模型运行结束时，即可得到不同水源的供水情况与不同用水户的缺水情况，在模型结果显示中用曲线表示，供水量结果如图 5-10 所示。

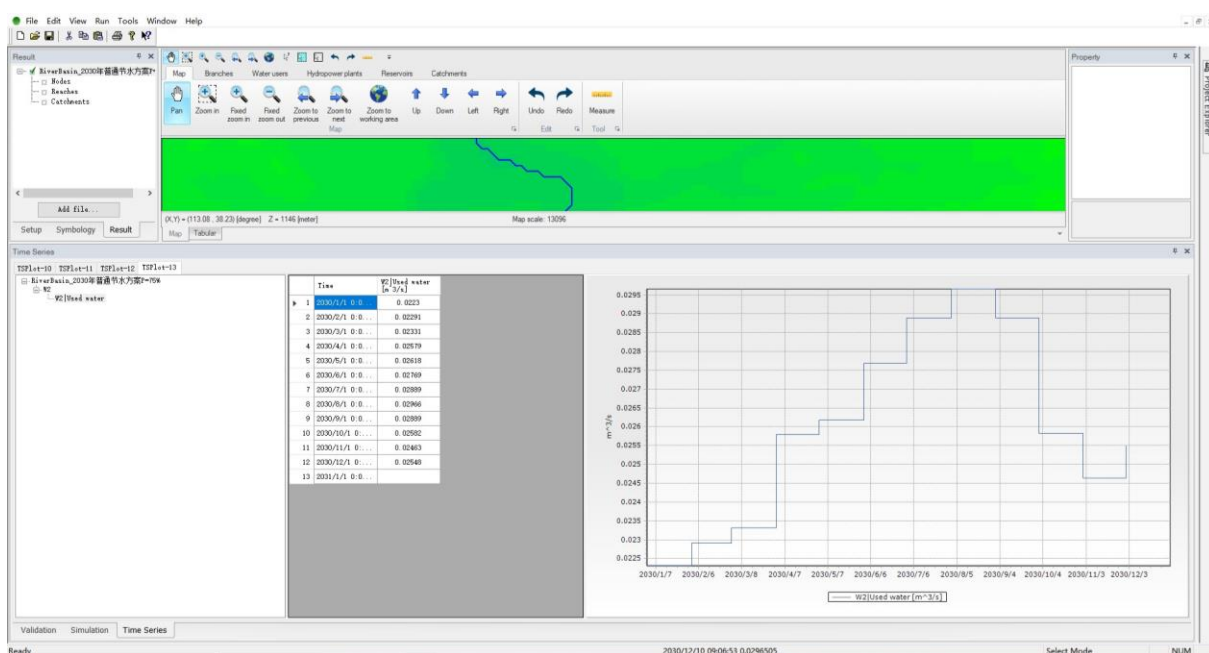


图 5-10 城区实际供水量

Fig. 5-10 Actual water supply in city district

城区生活用水缺水量如图 5-11 所示：

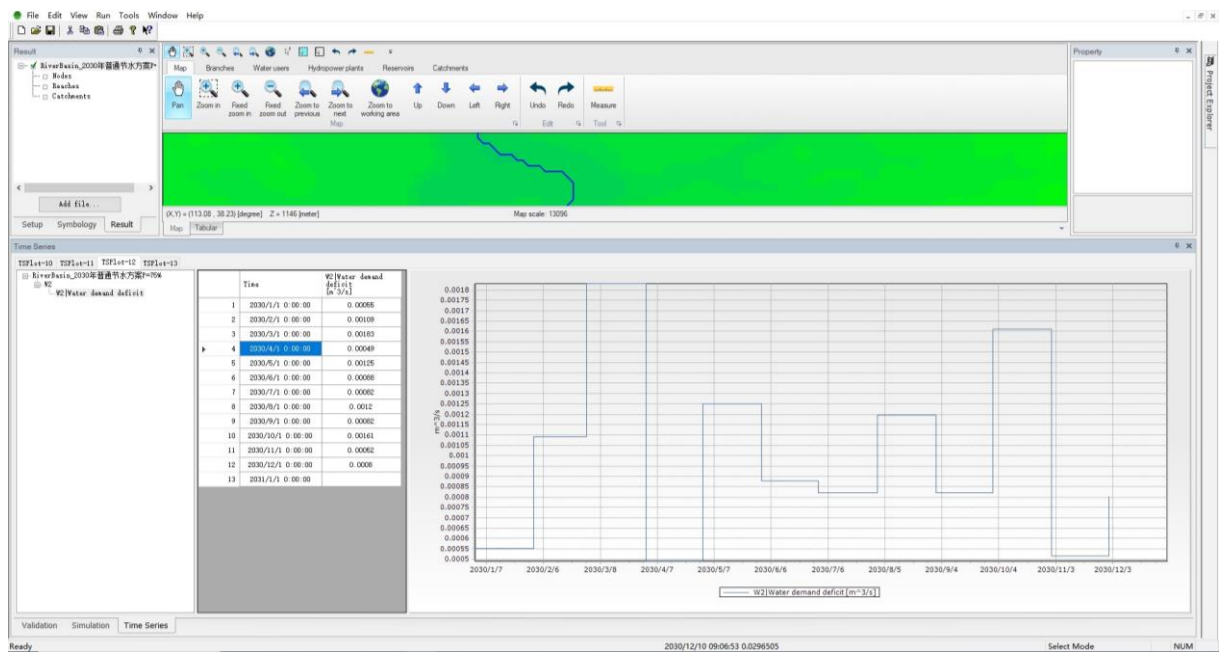


图 5-11 城区生活用水缺水水量

Fig. 5-11 City domestic water shortage

表 5-3 阳泉市生活用水供需情况 (单位: 万吨)

Table 5-3 Domestic water supply and demand in Yangquan City (Unit: 10⁴m³)

月份	城区			矿区			郊区			平定县			盂县		
	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量
1	72.08	70.34	1.74	67.77	67.77	0	84.53	84.53	0	87.10	82.12	4.98	77.01	77.01	0
2	75.69	72.25	3.44	71.16	71.16	0	88.76	88.76	0	91.46	88.37	3.09	80.86	80.86	0
3	79.29	73.52	5.77	74.55	74.55	0	92.99	92.99	0	95.81	89.28	6.53	84.71	84.71	0
4	82.89	81.34	1.55	77.93	77.93	0	97.21	97.21	0	100.17	96.46	3.71	88.56	88.56	0
5	86.50	82.56	3.94	81.32	81.32	0	101.44	101.44	0	104.52	98.34	6.18	92.41	92.41	0
6	90.10	87.33	2.77	84.71	84.71	0	105.67	105.67	0	108.88	103.37	5.51	96.26	96.26	0
7	93.71	91.12	2.59	88.10	88.10	0	109.89	109.89	0	113.23	106.58	6.65	100.12	100.12	0
8	97.31	93.54	3.77	91.49	91.49	0	114.12	114.12	0	117.59	111.28	6.31	103.97	103.97	0
9	93.71	91.12	2.59	88.10	88.10	0	109.89	109.89	0	113.23	105.37	7.86	100.12	100.12	0
10	86.50	81.42	5.08	81.32	81.32	0	101.44	101.44	0	104.52	99.28	5.24	92.41	92.41	0
11	79.29	77.66	1.63	74.55	74.55	0	92.99	92.99	0	95.81	91.28	4.53	84.71	84.71	0
12	82.89	80.36	2.53	77.93	77.93	0	97.21	97.21	0	100.17	96.37	3.80	88.56	88.56	0
求和	1019.96	982.56	37.40	958.93	958.93	0	1196.14	1196.14	0	1232.47	1168.10	64.37	1089.72	1089.72	0

5.3 模拟结果分析

由模拟结果可知在普通节水方案中, 2030 规划水平年来水频率 $P=75\%$ 的情况下, 阳泉市的生活用水水资源的分配明显呈现出了季节性的特征, 这是由于所有行政区的供水水源均蓄水工程与龙华口调水工程的参与, 蓄水工程与龙华口调水工程的供水都具有鲜明的季节性特征, 从 1 月到 6 月供水量随着降水量的增加而增加, 在 6 月、7 月、8 月、9 月的来水量最多, 同时由于夏季居民生活用水增多, 因此供水量也最多; 同时其他供水水源比如地下水、娘子关提水与非常规水源的供水不具备明显的季节性特征, 供水水量可按照平均计算分配给各个月份。

在用水量方面, 由于在春季、秋季与冬季居民的用水习惯相似, 因此并没有出现用水高峰出现, 但是在夏季, 由于气温炎热居民的用水量将大幅上涨此时为供水高峰期, 最考验各行政区的水资源调配能力。

在缺水量方面, 只有矿区、郊区、盂县没有缺水, 城区与平定县均有不同程度上的缺水, 其中城区的缺水量为 37.4 万 m^3 , 平定县的缺水量为 64.37 万 m^3 , 其中从城区的缺水量分布来看全年中 3 月与 10 月的缺水量最大, 分别为 5.77 万 m^3 与 5.08 万 m^3 , 这可能是由于水库在三月份来水量较小, 同时用水量保持不变, 因此会有一定程度上的缺水, 在四月份来水量增加, 会缓解水资源短缺现象的发生; 同样在 10 月份, 由于 9 月为来水量的最后高峰期, 之后来水量就会降低, 库区会因为储水而减少供水量, 同时由于处于夏季末尾, 因此居民生活用水量没有显著的减少, 因此会有一个缺水高峰期出现, 其他月份的缺水量较为平均; 在平定县中 3 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月的缺水量分别为: 6.53 万 m^3 、 6.18 万 m^3 、 5.51 万 m^3 、 6.65 万 m^3 、 6.31 万 m^3 、 7.86 万 m^3 、 5.24 万 m^3 , 可见与市区缺水较为相似, 在三月由于来水量较少, 因此三月缺水量较高, 但是从 5 月到 10 月缺水量均值超过 5 万 m^3 , 虽然平定县内的供水水库有四座, 但是四座水库的容量都较小, 均为小 I 型水库, 在夏季来临前必须要放空水库迎接汛期, 由于库容量较小, 因此会产生大量的弃水, 导致虽然来水量较多, 但是可供水量较少的局面的产生, 同时由于平定县不使用龙华口调水工程, 因此在夏季只能大量依靠地下水与娘子关调水工程, 这会使得娘子关水源与地下水水资源得不到涵养, 生态破坏会加剧。因此建议平定县使用多水源供水的模式, 增加缺水风险抵御能力。

5.4 本章小结

在本章中主要对 Mike Hydro Basin 模型进行了简单的介绍, 并详细说明了水资源配置模型的搭建过程, 并对模型进行了验证, 证明所构建的模型较为准确。

利用在第四章中粒子群算法求解出的 2030 年普通节水方案来水保证率 $P=75\%$ 情况下的来水方案数据，转换为月均水资源配置的供水时间序列，输入到模型中。并把需水数据根据阳泉市各行政区的各用水户的特点进行转换，求得用水户的需水时间序列，输入到模型中。并以模型模拟仿真中的阳泉市生活用水为例，对仿真结果进行分析。

由仿真结果可知只有阳泉市的市区与平定县缺水较为严重，市区缺水主要为 3 月与 10 月，在这期间由于天然降水量减少而导致水资源短缺；平定县缺水的主要时间为 3 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月，缺水量较大的时间较长，这时由于平定县水库库容较少，主要承担防汛任务，兼供水任务，因此供水量有限，同时由于供水水源相较于其他行政区少了一个龙华口调水工程，导致缺水量较大。因此建议平定县在生活用水方面多使用节水设备，提升节水率，同时寻找其他代替水源进行供水，提升缺水风险低于能力。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文以山西省阳泉市为研究对象,根据阳泉市的社会经济发展规律,对其供需水量进行预测,建立了基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置模型,得到了阳泉市在不同规划水平年、不同来水频率、不同节水方案下的水资源优化配置方案。并使用 Mike Hydro Basin 软件对所求解的水资源优化配置方案中的年均供水量进行了合理配置,使全年各月份的缺水量均保持在一个较低的水平,并用实例验证了方法的有效性,为解决阳泉市水资源配置难题提供了新的解决思路。主要研究成果如下:

(1) 阳泉市水资源存在着时空分布不均、水源地小且分散、地下水超采现象严重、老窑水处理效率较为低下、污水未经处理排放情况严重等问题,导致当地面临着严重的水资源短缺、地表水与地下水水源污染严重、地表地下水生态环境较差等问题,该问题主要有两部分组成:一部分为水资源短缺与水质较差所导致的缺水问题,一部分为水源污染严重所导致的生态环境污染问题,因此想要缓解阳泉市的水资源短缺现象的同时改善当地的生态环境与水生态环境,需要各行政区间相互合作与各用水部门间对节水政策的高效执行。同时阳泉市各行政区内产业结构不合理、各行政区间竞争性用水、污水排放量过大等问题,导致了供水结构不科学、用水结构不合理、水资源利用率低等现象,只有解决上述问题,阳泉市的社会经济与生态环境才有可能达到可持续发展的目标。

(2) 基于对阳泉市各用水户的用水量与各水源供水量进行的科学预测,进行了水量供需平衡分析,分析结果表明在普通节水方案下,规划水平年 2025 年与 2030 年在来水频率 $P=95\%$ 与 $P=75\%$ 的情况下,水资源最大可供水量无法满足用水户的用水需求;在 2030 规划水平年,来水保证率 $P=95\%$ 情况下的缺水量最高,为 3108 万 m^3 ,在 $p=75\%$ 时缺水量有所下降,为 1687 万 m^3 ,缺水现象严重影响了阳泉市的社会经济运行,建议阳泉市使用推荐节水方案进行供水,以降低缺水率,实现水资源供需平衡。

(3) 针对粒子群算法容易使结果陷入局部最优、局部寻优能力差、对离散问题处理不佳等问题,提出了四种改进方案,对各改进算法进行测试后发现,第四种改进方案计算稳定,改善了容易陷入局部最优与局部寻优能力差的情况,同时针对算法中的参数进行了敏感性分析,找到了最适合本研究的参数取值,提高了算法的计算精度,通过仿真试验进行模拟验证,并将其应用于阳泉市水资源优化配置问题的求解过程中。

(4) 利用改进粒子群算法对不同规划水平年、不同来水频率、不同节水方案情况下的供用水情况进行了求解,结果表明:阳泉市在来水频率 $P=95\%$ 与 $P=75\%$ 的情况下,水资源供不应求,由于在建模过程中优先保证生活与工业用水,导致缺水率最高的用水户为第三产业与生态环境,工业用水量的占比接近 50%,其次为生活用水与农业用水,且

在五个行政区中平定县、盂县与矿区的配水量较高，整体水资源配置方案符合需水预测结果。通过对普通节水方案与推荐节水方案下的水资源配置结果进行详细的分析可知，配置方案中用水户的缺水率、缺水性质与现实中阳泉市各用水户的缺水率变化规律高度相似，说明阳泉市水资源优化配置结果科学合理，且推荐用水方案更能满足阳泉市各行政区中不同用水户的用水需求，可使阳泉市的社会经济与生态环境更好的可持续发展与高质量发展；优化配置结果进一步表明：建立的阳泉市水资源多目标优化配置模型符合多目标优化模型的变化趋势与特征，且适应性与通用性较强，可应用于相似地区的水资源配置研究中。

（5）由于利用改进粒子群算法求解出的水资源配置方案为年均水资源配置方案，因此需要对水资源优化配置方案进行细化，求解出月均水资源短缺量最小的方案。使水资源供应量稳定，有利于社会经济的平稳发展。因此本研究利用 Mike Hydro Basin 软件对阳泉市水资源优化配置方案进行了细致的建模。针对不同用水户的特征，利用软件求解出不同用水户的最优水资源月均供应量，释放阳泉市的经济发展潜力。

6.2 展望

（1）本研究中虽然在设置模型约束条件的过程中考虑到了用水户用水的随机性与各供水水源供水的不确定性，但由于在预测用水户的需水量的同时考虑到了阳泉市的经济发展指标，而这些指标拥有较强的不确定性，因此求解结果可能仍然存在一定程度上的误差，后续将针对各用水户的发展指标的预测方法进行深入研究，用以提高优化结果的准确性；同时，本研究在对各水源可供水量进行预测的过程中，缺少了对当地水资源承载力的考量，在后续的研究中将建立适当的评价体系，对优化后的水资源配置方案进行科学合理的评价，使配置结果更具有说服力。

（2）本研究基于改进粒子群算法，建立了阳泉市多目标水资源优化配置模型，模型中根据各用水户重要性确定了用水公平系数，根据各供水水源对各行政区中不同用水户的重要性分别制定了供水次序系数，这些系数的确定较为主观；在进行水资源配置的过程中对供水水源的水质与水源配水的距离与成本考虑的不足，后续可将上述问题进行综合考虑，构建更加合理的水资源优化配置模型，使配置结果更加精确；随着水资源优化配置理论的不完善与模型的深入发展，对模型的求解与配置算法的设计都有了更高的要求，因此本研究所提出的改进粒子群算法与水资源优化配置模型均具有较大的改进空间，用以获取更具说服力的决策依据。

（3）本研究中所运用的 MATLAB 软件与 Mike 软件间的数据不能做到互通，因此在下一步的研究中将着重考虑编写 MATLAB 与 Mike 软件间的接口，使计算数据的传输与计算更加智能化。

参考文献

- [1] Sadoff C W, Borgomeo E, Uhlenbrook S. Rethinking water for SDG 6[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 346-347.
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(02): 116-120.
- [3] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. *人民黄河*, 2019, 41(11): 1-6.
- [4] Donohue M J, Greene E A, Lerner D T. Water Resources Research Act Program—Current status, development opportunities, and priorities for 2020–30[R]. US Geological Survey, 2021.
- [5] Bi F, Zhou H, Zhu M, et al. Economic benefit evaluation of water resources allocation in transboundary basins based on particle swarm optimization algorithm and cooperative game model—A case study of Lancang-Mekong River Basin[J]. *Plos one*, 2022, 17(7): e0265350.
- [6] Ding N, Erfani R, Mokhtar H, et al. Agent based modelling for water resource allocation in the transboundary Nile River[J]. *Water*, 2016, 8(4): 139.
- [7] Yu S, Lu H. An integrated model of water resources optimization allocation based on projection pursuit model—Grey wolf optimization method in a transboundary river basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 156-165.
- [8] 田进宽, 郭佳航, 左其亭, 等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. *水资源保护*, 2022, 38(02): 62-67.
- [9] 孙甜, 董增川, 苏明珍. 面向生态的陕西省渭河流域水资源合理配置[J]. *人民黄河*, 2015, 37(02): 59-63.
- [10] 李东林, 左其亭, 马军霞. 基于不确定性双层规划的水资源配置及和谐评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(03): 350-360.
- [11] 陈敏. 长江经济带水资源配置质量演化特征及其驱动因素[J]. *资源科学*, 2022, 44(06): 1280-1291.
- [12] 刘鑫, 韩宇平. 基于训练大数据的水资源动态配置模型研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(08): 52-57.
- [13] Niu G, Li Y P, Huang G H, et al. Crop planning and water resource allocation for sustainable development of an irrigation region in China under multiple uncertainties[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 166: 53-69.
- [14] 单义明, 杨侃, 吴云, 等. 基于 ITS RP 模型的吕梁市水资源优化配置研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(11): 42-47.
- [15] Chen D, Cai Y, Wang X, et al. An inexact modeling approach for supporting water resources allocation under natural and social complexities in a border city of China and Myanmar[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105245.
- [16] Davijani M H, Banihabib M E, Anvar A N, et al. Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 430-438.
- [17] 向龙, 范云柱, 刘蔚, 等. 基于节水优先的水资源配置模式[J]. *水资源保护*, 2016, 32(02): 9-13+25.
- [18] Masse. Scientific Allocation of Water Resources[M]. American Elsevier Publishing Company, Inc New York.
- [19] N. 伯拉斯. 水资源科学分配[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

- [20] Lindebroy. Multiplie-Criteria Decision-Making: A Retrospective Analysis[J]. IEEE Trans, ONSYS, Mn and Cyber, 1977, SMC-15(3)
- [21] D Person. The Derivation and Use of water Resources[J]. Optimal Allocation (Proceedings of The Enter Sys Posium). 1982, 135
- [22] Wong Hugh S, Sun Ne-zheng Optimization of conjunctive use of surface water and groundwater with water quality constraints[A]. Proeedings of the Annual Water Resources Planning and Management Conference [C]. 1997.
- [23] Kumar, Arun. Minocha, VijayK. Fuzzy Optimization model for water quality management of a river system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 25(3): 179-180
- [24] Lv Y, Huang G H, Li Y P, et al. Planning regional water resources system using an interval fuzzy bi-level programming method[J]. J Environ Inform, 2010, 16(2): 43-56.
- [25] Wang Y, Huang G H, Wang S, et al. A stochastic programming with imprecise probabilities model for planning water resources systems under multiple uncertainties[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30(8): 2169-2178.
- [26] 施熙灿, 林翔岳, 梁青福, 等. 考虑保证率约束的马氏决策规划在水电站水库优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 1982(02): 11-21.
- [27] 于海, 赵斌, 樊新建. 互联网+技术的水资源计量综合监控管理系统构架的探讨[J]. 中国计量, 2015, No.241(12): 82-84.
- [28] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [29] 莫淑红, 段海妮, 沈冰, 等. 考虑不确定性的区间多阶段随机规划模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(12): 1427-1434.
- [30] 付殿崢. 不确定性优化技术在区域资源能源配置系统中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [31] 马斌, 解建仓, 汪妮, 等. 多水源引水灌区水资源调配模型及应用[J]. 水利学报, 2001(09): 59-63.
- [32] 付健, 刘继祥, 侯红雨, 等. 东庄水库开发任务和建设时机分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(10): 48-50.
- [33] 张帆, 郭萍, 李莱. 基于双区间两阶段随机规划的黑河中游主要农作物种植结构优化[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(11): 109-116.
- [34] 付银环, 郭萍, 方世奇, 等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(05): 73-81.
- [35] 杜佰林, 张建丰, 高泽海, 等. 基于模拟退火粒子群算法的水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(03): 292-299.
- [36] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]. Icnn95-international Conference on Neural Networks. IEEE, 2002.
- [37] 王荣. 基于粒子群退火神经网络的软件老化趋势预测研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
- [38] 邓志诚, 孙辉, 赵嘉, 等. 基于聚集度自适应反向学习粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2020, 51(04): 166-174.
- [39] 张春韵, 邹德旋, 沈鑫. 改进的粒子群算法在电力经济调度中的应用[J]. 制造业自动化, 2021, 43(01): 53-57+64.
- [40] 邹琳, 蔡欣, 郝矿荣. 基于双目标免疫粒子群算法的水资源优化配置[J]. 计算机仿真, 2018, 35(12): 296-301.
- [41] 邓婵, 李纯, 李梦琪, 等. 粒子群算法在农业水文学中的应用进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(08): 16-20+29.

- [42] 马建琴, 魏蕊, 张鹏. 基于免疫进化的粒子群算法在灌区水资源优化配置中的应用研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(05): 35-38.
- [43] 郭毅, 陈璐, 周建中, 等. 基于均衡发展的郁江流域水资源优化配置[J]. 水电能源科学, 2020, 38(03): 42-45.
- [44] 王文君, 方国华, 李媛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(02): 91-96+127.
- [45] 方国华, 王雪, 方应学, 等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(03): 58-64.
- [46] 李承龙, 杨侃, 蔡玉琴, 等. 基于改进粒子群算法的水资源优化调配模型研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(07): 69-74.
- [47] 赵燕, 武鹏林, 祝雪萍. 基于改进萤火虫算法的水资源优化配置[J]. 人民黄河, 2019, 41(05): 62-66.
- [48] 王瑶瑶. 基于 Mike Basin 模型的莱州市水资源配置研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [49] 吴迪. 基于 MIKE BASIN 的浑河流域水资源管理模型模拟研究[J]. 黑龙江水利技, 2018, 46(05): 25-29.
- [50] 莫铠, 李军, 贾鹏. MIKE BASIN 水资源模型对复杂水库调度程序的开发及应用[J]. 水科学与工程技, 2008(05): 24-27.
- [51] 李鹏. 基于 MIKE BASIN 的松花江流域哈尔滨断面以上区域水资源配置方案研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [52] Kjeldsen TR, Rosbjerg D. Assessment of the sustainability of a water resources system expansion. INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT, 2001, 272: 151-156.
- [53] Lesnik John R, Holdstock Ramona T, Martin Johnny D. The Cape Fear River Basin model: A study in water resource management. World Water and Environmental Resources Congress 2001, 2004, 111.
- [54] Jha MK, Das Gupta A. Application of Mike Basin for water management strategies in a watershed. WATER INTERNATIONAL, 2003, 28: 27: 35.
- [55] Vaitiekuniene J. Application of rainfall-runoff model to set up the water balance for Lithuanian River Basins. Environmental Research, Engineering and Management, 2005, 31: 34-44.
- [56] Korsgaard L, Jonch-Clausen T, Rosbjerg D, et al. Quantification of environmental flows in integrated water resources management. River Basin Management, 2005, 83: 141-150.
- [57] Shehata M. Reliability analysis of the Wadi Al-Arish surface water supply system on the Sinai Peninsula, Egypt. KUWAIT JOURNAL OF SCIENCE & ENGINEERING, 2005, 32: 175: 193.
- [58] Ireson A, Makropoulos C, Maksimovic C. Water resources modelling under data scarcity: Coupling MIKE BASIN and ASM groundwater model. WATER RESOURCES MANAGEMENT, 2006, 20: 567: 590.
- [59] Hassaballah K, Jonoski A, Popescu I, et al. Model-Based Optimization of Downstream Impact during Filling of a New Reservoir: Case Study of Mandaya/Roseires Reservoirs on the Blue Nile River. WATER RESOURCES MANAGEMENT, 2012, 26: 273-293.
- [60] Wong H S, Sun N Z. Optimization of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater With Water Quality Constraints[A]. Proceedings of the Annual Water Resources Planning and Management Conference [C], Sponsored by ASCE, 1997: 408-413.
- [61] Afzal J, Noble D H. Optimization Model for Alternative Use of Different Quality Irrigation Waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992(118): 218-228.

- [62] 张旭昇, 熊伟, 曾发琛. MIKE BASIN 模型在白龙江引水工程受水区水资源配置中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(10): 55-61.
- [63] 王蕾, 肖长来, 梁秀娟, 等. MIKE BASIN 模型在吉林市水资源配置方面的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(01): 128-131.
- [64] 王晓妮, 王晓昕, 侯琳. MIKE BASIN 模型在松花江流域的应用研究[J]. 东北水利水电, 2011, 29(04): 4-5+71.
- [65] 刘昊宗. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 珠江水运, 2017(02): 84-85.
- [66] 王浩. 我国水资源合理配置的现状和未来[J]. 水利水电技术, 2006(02): 7-14.
- [67] 刘金铎. MIKE BASIN 软件平台在双柏县水资源配置的应用[J]. 云南水力发电, 2018, 34(05): 184-186.
- [68] 杨芬, 王萍, 邵惠芳, 等. MIKE BASIN 在缺水型大城市水资源配置中的应用初探[J]. 水利水电技术, 2013, 44(07): 13-16.
- [69] 吴俊秀, 郭清. 大凌河流域 MIKE BASIN 水资源模型[J]. 水文, 2011, 31(01): 70-75.
- [70] 陈凯, 李就好, 刘德峰, 等. 基于 MIKE BASIN 的汕尾市水资源优化配置[J]. 中国农村水利水电, 2012(06): 55-60.
- [71] 顾世祥, 李远华, 何大明, 等. 以 MIKE BASIN 实现流域水资源三次供需平衡[J]. 水资源与水工程学报, 2007(01): 5-10+28.
- [72] 王旭, 袁亚男, 朱金凤, 等. 有限数据条件下基于 MIKE BASIN 的人工开挖河段独流减河水文模拟[J]. 中国农村水利水电, 2019(02): 60-66+70.
- [73] 卢书超. 基于 MIKE BASIN 的石羊河流域水资源管理模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [74] 赵志平. 山西省阳泉盆地水资源优化配置研究[J]. 亚热带水土保持, 2013, 25(02): 27-30.
- [75] 杜莉霞. 阳泉市水资源现状分析及发展对策[J]. 山西水利, 2008(03): 13-14.
- [76] 王卫平. 阳泉市用水现状分析及水资源保护措施[J]. 山西水土保持科技, 2021(01): 20-21+29.
- [77] 王文君. 阳泉市中水回用现状及发展初探[J]. 山西水利, 2006(03): 26-27.
- [78] 魏燕华. 阳泉市农村饮水工程探讨[J]. 山西水利, 2016(08): 19-20.
- [79] 王丽, 史志研究 《阳泉市志》. 孟宏儒 主编, 阳泉年鉴, 阳泉, 方志出版社, 1993-2000, 411, 年鉴.
- [80] 耿爱萍. 阳泉市地下水环境现状及保护对策[J]. 山西水利, 2016, No.234(04): 11-12.
- [81] 王庆杰, 岳春芳, 李艺珍. 基于权重融合的灰色关联分析水资源配置方案评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, No.438(04): 31-34+38.
- [82] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(08): 2041-2046.
- [83] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(07): 1-5.
- [84] 左其亭, 钟涛, 张志卓, 等. 水利高质量发展的判别准则及评价体系[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(05): 109-117+123.
- [85] 左其亭, 姜龙, 马军霞, 等. 黄河流域高质量发展判断准则及评价体系[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(03): 1-8+22.
- [86] 潘剑光, 胡鹏, 杨泽凡, 等. 北方平原区城市水动力与水环境综合调控研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(02): 58-62.
- [87] 王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1552-1561.
- [88] 高瑾瑾, 郑源, 李润鸣. 基于改进序关系分析法的抽水蓄能电站经济效益综合评价[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(04): 137-142.
- [89] MIKEBASIN 用户手册[M]. 丹麦: 丹麦 DHI 公司, 2003.