

单位代码	10475
学号	104753191252
分类号	

河南大學

硕士学位论文

水资源约束下河南省沿黄城市产业结构优化调整研究

培 养 单 位：黄河文明省部共建协同创新中心

学 科 专 业：人文地理学

研 究 方 向：区域发展与规划

申请学位类别：理学硕士

申 请 人：张晗

指 导 教 师：苗长虹教授

二〇二二年六月

Optimization and adjustment of industrial
structure of Cities along the Yellow River in
Henan Province based on water resource
constraint

A Dissertation Submitted to
the Graduate School of Henan University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science

By

ZhangHan

Supervisor: Prof.Miao Changhong

June, 2022

摘要

水资源是一种至关重要的自然资源，是国民经济各产业发展的基础。黄河流域水资源严重短缺，存在水资源过度开发利用、低效用水、水资源供需不平衡等问题，制约经济社会可持续发展。城市作为社会经济发展的主要载体，在目前水资源约束下，如何优化产业结构，实现水资源合理高效利用，是实现经济高质量发展亟需解决的一个重要现实问题。

河南省黄河流域具有区位和资源优势，是我国重要的粮食生产核心区和主要的社会经济活动中心、工业能源基地，但水资源严重短缺。本文以河南省沿黄城市为例，将 2017 年河南省投入产出表转化为非竞争投入产出表，利用区位商模型、引力模型，计算贸易系数、投入系数，编制出 2017 年河南省沿黄城市间投入产出表。利用城市间投入产出模型，计算沿黄城市农业、采矿业、制造业等 8 个产业用水特性及产业关联度，确定产业转型方向。通过构建多目标线性规划模型，以经济总量最大、用水量最小为主要目标，以沿黄区域用水量条件设立节水型或均衡型情景，锚定 2030、2035 年发展目标，求解沿黄区域 8 个城市 8 个产业的产值调整程度，进而通过定性定量相结合的方法对优化结构进行评价分析，提出产业结构优化调整对策。

主要结论如下：

(1) 在产业结构偏水度方面，2015-2019 年河南省沿黄大部分城市的产业结构逐渐偏向用水量大、用水效率低的行业；用水结构粗放度方面，沿黄城市差异性比较大，其中新乡、焦作、濮阳、开封等四个城市用水结构偏向用水效率低的产业；协调度方面，除开封市外，其他城市协调性都呈下降趋势，濮阳市下降速度十分迅速，说明河南省沿黄城市产业结构和用水结构不合理，用水量较低产业发展缓慢，对经济增长的带动作用不明显，沿黄城市产业结构和用水结构需要进一步调整。

(2) 从城市细分产业用水效率、产业关联度来看，开封、新乡、焦作、濮阳、三门峡的其他服务业以及郑州、洛阳、济源制造业用水效率高、产业关联度强，可优先鼓励发展；沿黄大部分城市中交通业、建筑业对其他产业有较强拉动作用，但一旦鼓励发展可能会导致产能过剩，需要根据社会需求进行宏观把控；郑州、洛阳、三门峡、济源

的其他服务业是低用水产业,对其他产业发展拉动作用较小,但其他产业对其有依赖性,需要加快发展;沿黄区域中大部分城市的农业以及郑州、开封、洛阳、濮阳的批零住餐业是高用水产业,在一定规模上要限制发展。

(3) 沿黄区域多目标线性规划结果表明,节水型情景和均衡型情景的总产值均有所提高,但节水型情景下总产值提高程度小于均衡型情景。在节水型情景中,沿黄城市目前需要将农业、电热气水生产及供应业规模分别下调约 6%和 8%,同时保证建筑业、交通业、制造业、其他服务业等产业规模扩大。到 2035 年,制造业、其他服务业的占比有所提高,其他 6 个行业均有所降低,大致降低 5%左右。在均衡型情景中,目前制造业占比幅度需提高约 0.5%,其他产业占比都有下降,其中批零住餐业下降幅度约达 3%。到 2035 年,农业、电热气水生产及供应业占比幅度分别降低 9%和 11%。从分城市分行业看,在节水型情景中郑州、洛阳市产业变化幅度较大,在以水定产政策的导向下,河南省可以根据城市规模以及产业差别做出科学节水安排。

关键词: 河南省, 水资源, 城市间投入产出表, 用水效率, 产业结构调整, 多目标优化

Abstract

Water resource is a kind of vital natural resource, which is the foundation of the development of various industries of national economy. There is a serious shortage of water resources in the Yellow River basin, which restricts the sustainable development of economy and society. As the main carrier of social and economic development, under the current constraints of water resources, how to optimize the industrial structure and realize the rational and efficient use of water resources is an important practical problem that needs to be solved to achieve high-quality economic development.

The Yellow River basin in Henan Province is an important core area of grain production, the main center of social and economic activities and the industrial and energy base, but the water resources are in serious shortage. This paper takes the region along the Yellow River in Henan Province as an example, converts the 2017 input-output table of Henan province into a non-competitive input-output table, calculates the trade coefficient and input coefficient by using the location quotient model and gravity model, and builds the 2017 input-output model among cities along the Yellow River in Henan Province. Based on the established input-output model, the water use coordination degree of Henan Province was calculated, and the water use characteristics and industrial correlation degree of eight industries including agriculture, mining and manufacturing in Huangcheng city were determined to determine the direction of industrial transformation. Finally, a multi-objective linear programming model was constructed. With the maximum economic aggregate and minimum water consumption as the main objectives, water-saving and balanced scenarios were set with the minimum objective function of water consumption in the Yellow River region without edge. The year 2030 and 2035 were anchored to solve the adjustment degree of output value of 8 cities and 8 industries in the Yellow River region. Then the optimization structure is evaluated and analyzed by the method of orientation and quantitative combination, and feasible optimization countermeasures of industrial structure are put forward.

The main conclusions are as follows:

(1) From 2015 to 2019, the industrial structure of Cities along the Yellow River in Henan Province, except Kaifeng, gradually shifted to industries with high water consumption and low water efficiency. In terms of the degree of extensive water use structure, there is a large difference in the water use structure of the cities along the Yellow River, among which xinxiang, Jiaozuo, Puyang and Kaifeng are also inclined to the industries with low water efficiency. Coordination degree, in addition to the other city kaifeng coordination are declining, and the decline of puyang city speed very quickly, visible in henan province along the yellow after development of urban industrial structure and water structure, lower water consumption of industry development is slow, not significantly enhance drives the output, so water along the yellow city industrial structure and structure need further adjustment.

(2) From the perspective of water efficiency and industrial correlation of urban subdivision industries, other service industries in Kaifeng, Xinxiang, Jiaozuo, Puyang and Sanmenxia, as well as manufacturing industries in Zhengzhou, Luoyang and Jiyuan can be preferentially encouraged to develop. In most cities along the Yellow River, transportation industry and construction industry have a strong driving effect on other industries, but encouraging development may lead to overcapacity, which needs macro control according to social demand. Other service industries in Zhengzhou, Luoyang, Sanmenxia and Jiyuan are low-water industries, which have little driving effect on the development of other industries, but other industries are dependent on them, so there is no need to restrain their development. In most cities along the

Yellow River, Zhengzhou, Kaifeng, Luoyang and Puyang are high water consumption industries, which restrict development to a certain scale. Therefore, the degree of constraint should be emphasized in multi-objective linear programming.

(3) The results of multi-objective linear programming along the yellow region show that the total output value of both water-saving scenario and equilibrium scenario increases, but the total output value of water-saving scenario increases less than that of equilibrium scenario. In the water-saving scenario, the scale of agriculture, electricity, heat and water production and supply should be reduced by 6% and 8% respectively, while the scale of construction, transportation, manufacturing and other service industries should be expanded. In 2035, the proportion of manufacturing and other services will increase, while the proportion of other six industries will also decrease, by about 5 percent. In the equilibrium scenario, the proportion of manufacturing increased by about 0.5% in 2017, while the proportion of other industries declined, including wholesale and catering, which decreased by about 3%. In 2035, the share of agriculture and electricity, heat and water production and supply will be reduced by 9 percent and 11 percent respectively. City divisions from the points of analysis of balanced picture each type industry also has change to 2035, but in some cities in the water-saving situation to have no change in 2035, the variations in Zhengzhou, Luoyang is larger, so in the future under the guidance of water DingChan in Henan Province can be successively, the points of primary and secondary according to the scale of urban water saving.

KEY WORDS: Henan Province, water resources, inter city input-output table, water consumption efficiency, industrial structure adjustment, multi-objective optimization

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究框架及内容	3
1.3 国内外研究现状	4
1.3.1 水资源与社会经济	4
1.3.2 水资源与产业结构	6
1.3.3 投入产出分析	8
1.3.4 水资源优化配置	10
1.3.5 文献评述与启示	11
2 河南省沿黄城市水资源与产业发展概况	13
2.1 河南省水资源概况	13
2.1.1 河南省水资源量	13
2.1.2 河南省用水情况	14
2.2 河南省社会经济与产业发展概况	16
2.2.1 社会经济发展概况	16
2.2.2 产业发展情况	16
3 河南省沿黄城市投入产出表	20
3.1 MRIO 模型介绍	20
3.1.1 引力模型	20
3.1.2 区位商模型	21
3.1.3 城市投入系数	21
3.1.4 城市间贸易系数	22
3.2 数据来源	22
3.3 MRIO 表的编制	22
3.3.1 河南省非竞争型表格	24

3.3.2 中间矩阵及最终使用	24
3.3.3 MRIO 基础数据	25
4 河南省沿黄城市产业用水结构分析	29
4.1 产业结构和用水结构协调度分析	29
4.1.1 水-产结构协调度相关参数构建	29
4.1.2 水-产结构协调度时间分析	30
4.1.3 水-产结构协调度空间分析	31
4.2 2017 年城市产业用水效率分析	33
4.2.1 城市细分行业用水量	33
4.2.2 城市用水相关参数构建	35
4.2.3 城市用水系数分析	36
4.2.4 城市用水情况空间分析	40
4.3 城市产业关联度分析	42
4.3.1 产业关联度相关参数构建	42
4.3.2 产业关联度结果分析	42
5 河南省沿黄城市产业结构调整	47
5.1 多目标线性规划	47
5.2 参数设定	49
5.3 结果分析	52
6 结论及政策建议	63
6.1 主要结论	63
6.2 建议对策	64
6.3 创新点、不足与展望	65
6.3.1 创新点	65
6.3.2 不足与展望	65
参考文献	67
附录	73
参加科研情况说明	77
致谢	79

1 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

协调产业结构与水资源利用已成为我国社会经济高质量发展面临的重要挑战。水资源是十分重要的自然资源和战略性经济资源，支持着地球上的生命，支撑着稳定和富有生产力的社会和生态系统，是各产业和国民经济建设的基础资源。全球气候变化导致干旱频发，目前有 17 个国家面临极度缺水的状况，约有 32 亿人的口面临水资源短缺问题^[1]。中国也是一个干旱缺水的国家，虽然水资源量约为 28000 亿立方米，位居世界第四位，但人均水资源量只有 2300 立方米，仅为全球平均水平的四分之一。此外我国水资源空间、时程分布不均衡，南多北少、夏多东少，不利于我国水资源开发利用。由于人口激增，经济快速提高、产业加速集聚，水生态环境恶化和水资源短缺成为我国当前水资源利用的两大主要问题，同时全国各地都有不同程度的低效用水现象，也成为了制约中国经济社会可持续发展的瓶颈^[2]。产业结构决定了不同产业间劳动力、资本、技术、能源等生产资源的配置^[3]，对资源转换和污染物的数量和质量有决定性影响，是人类影响自然环境的主要环节^[4]。通过调整资源在不同产业之间的分配结构，使资源向更有效率的产业移动，有利于促进经济高质量增长。实现中国可持续发展和生态经济，必须处理好经济社会发展与水资源利用的关系，着力解决水资源供需矛盾。因此，探讨水资源利用与产业结构转型的关系问题，具有重要的理论意义和紧迫的现实需求。

黄河流域经济社会高质量发展是中国北方经济的重要支撑，具有平衡南北，协调东中西的作用，只有黄河流域崛起才能挺起北方经济的脊梁^[5]。目前流域水资源量约占全国水资源量的 3%，人均水资源量为 905 立方米，占全国平均水平的 1/3，却承担全国 12%人口供水和 15%耕地用水任务。目前黄河流域水资源开发利用率达到 80%，远超 40%的生态警戒线^[6]，这使得本就短缺的水资源更加捉襟见肘。同时黄河流域拥有我国重要的能源和化工基地，对促进黄河流域经济发展有重要作用^[7]。2019 年习总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上发表重要讲话，将黄河流域生态保护和高质量发展确

定为国家战略，并在会上提出将水资源作为最大的刚性约束，以水而定、量水而行，合理规划黄河流域人口、城市和产业发展，推动水资源的可持续利用，提高良好的水生态环境条件，支撑经济社会的高质量发展^[8]。

河南省位于黄河流域中下游地区，取水量和耗水量均位居沿黄省份第三位。河南省沿黄两岸产业布局具有传统的资源优势，是我国重要的粮食生产核心区和主要的社会经济活动中心、工业能源基地。2019 年河南省沿黄区域人均用水量为 285 立方米，是河南省全省人均用水量的 1.2 倍，但沿黄区域的人均水资源量远低于区域人均用水量，不到全国平均水平的百分之十，造成水资源供需不平衡。在河南省沿黄区域用水结构中，农业用水占据 48%，农业灌溉用水量非常大，日后为了保障国家粮食安全，筑牢国家粮食安全防线，农业灌溉用水也会一直保持高需求。另外河南省沿黄区域有郑州国家中心城市、洛阳副中心城市，人口规模、经济规模、资源消耗规模均较大，随着城市经济快速发展，对水资源供给会造成巨大压力，制约城市发展。作为社会经济活动的主要载体，城市在产业结构调整方面发挥重要作用。因此，本文选取河南省沿黄城市作为研究对象。

在黄河流域以水定产背景下，水资源管理要从过去的“以需定供”转变为“以供定需”，如何通过水资源倒逼产业结构、规模调整，同时保证农业生产底线，推进河南省沿黄区域经济发展是本文需要解决的重要问题。

1.1.2 研究意义

产业活动是水资源消耗的主要过程，本文通过建立城市间投入产出表分析不同城市产业的用水效率，然后结合多目标线性规划的方法对沿黄地区产业结构进行调整，以实现以水定产，提高水资源利用效率，促进区域经济高质量发展。本文建立了河南省城市间投入产出表并对城市级产业结构调整进行研究，丰富了城市尺度投入产出相关理论。通过分析不同产业的用水特性，可以揭示产业的用水效率以及关联程度，为各城市了解产业直接、潜在用水情况提供实践指导，探寻不同城市鼓励发展及限制发展行业，为定量确定产业调整程度和方向提供依据，有助于协调产业结构与用水结构的相互协调，促进河南省沿黄区域转变经济发展模式。

1.2 研究框架及内容

本文根据以上研究思路，设计技术路线（图 1-2），将研究内容分为四个部分。现状分析主要为第二章河南省沿黄城市水资源与产业发展概况，准备工作主要为第三章河南省沿黄城市投入产出表、第四章沿黄城市产业用水结构分析，优化升级主要为第五章河南省沿黄城市产业结构调整，发展对策包括第六章结论及政策建议。主要流程如下：

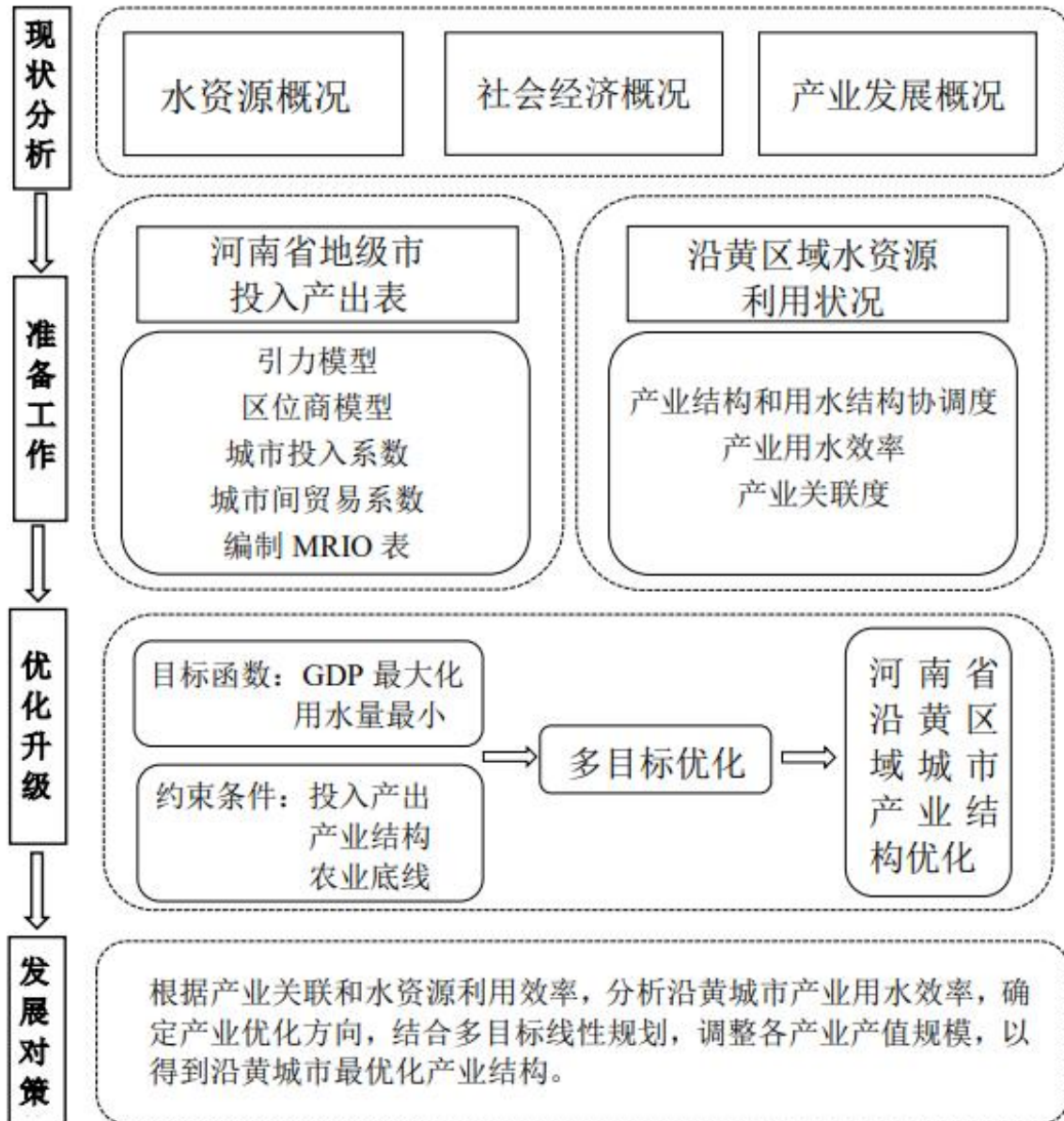


图 1-2 技术路线

第一章：绪论。此部分内容包括论文研究背景、研究意义及相关研究综述，明确研究区和研究问题，并提出文章的研究思路、研究框架等。相关研究综述主要包括国内外

水资源与社会经济关系研究、水资源与产业结构关系研究、以及相关的投入产出分析、水资源优化配置等文献综述。

第二章：河南省沿黄城市水资源与产业发展概述。此部分对河南省、特别是河南省沿黄区域水资源、产业结构进行简要说明。水资源方面主要聚焦于供水状况、用水结构方面。产业结构方面主要研究河南省及沿黄区域三次产业结构、产业结构合理化及产业结构高级化等内容。

第三章：河南省沿黄城市投入产出表。将 2017 年河南省投入产出表转化为非竞争投入产出表，利用区位商模型、引力模型，计算贸易系数和投入系数，构建中间矩阵和最终使用矩阵，编制出 2017 年河南省沿黄 8 城市间 8 部门投入产出表。

第四章：河南省沿黄城市产业用水结构分析。该部分为产业结构优化调整的前提。首先通过测算河南省三次产业的用水结构粗放度、产业结构偏水度、以及二者之间的协调度，了解河南省产业结构与用水结构变化情况。其次收集城乡环境综合用水，规模以上工业水资源等相关数据，获得河南省分产业用水情况。最后利用投入产出模型分析产业部门用水特性，主要涉及直接用水系数、完全用水系数、用水乘数等指标，给出河南省沿黄区域各地级市需要调整的产业。

第五章：河南省沿黄城市产业结构调整。在投入产出模型的约束、产业结构约束、农业底线、河南省用水量约束等条件约束下，基于 2017 年河南省沿黄城市间投入产出表，建立一个包含沿黄区域水量和经济目标的多目标优化模型，设置节水型情景和均衡型情景，分析沿黄区域城市各产业调整规模。

第六章：结论及政策建议。总结本文研究内容，结合河南省水资源状况和产业状况，提出在水资源约束下黄河流域产业结构调整的对策建议。对研究中存在的不足之处进行整理，并对下一步的研究方向进行展望。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 水资源与社会经济

20 世纪 60 年代开始，随着社会发展带来的生物多样性锐减、土地荒漠化、土地退化和酸雨等环境问题加剧，大家开始意识到经济、人口、资源、环境不能割裂开来研究，否则将对社会经济发展和环境都造成严重伤害，这种意识也逐渐促使可持续发展理念的形成。关于资源环境对经济增长的影响早在古典经济学研究中就有所涉及，

Malthus^[9](1789)在《人口论》中提出随着社会人口的增加,土地会越来越稀缺,人与资源环境的矛盾会越来越突出,进而导致社会经济状况的恶化,为保持人类和自然界的平衡,需要对人口数量进行控制。20世纪70年代,石油危机的出现,几乎全球所有工业化国家经济增长都显著变缓,这让人们意识到我们对资源索取是存在一定的限制。例如Meadows为首的罗马俱乐部成员^[10](1972)发表的《增长的极限》,从农业生产、自然资源、人口、环境污染以及工业生产五个方面论述人类发展过程,指出自然资源对经济增长有制约作用,认为随着自然资源的消耗殆尽,经济增长也最终会趋于停止。1987年,世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》报告中^[11],明确提出“可持续发展”理念,此观念的出现提高了人们对生态环境、自然资源的保护意识,明白人类繁衍、社会经济发展、技术推广都不能以自然资源、生态环境的过度消耗为代价。自此,关于经济发展质量的研究将资源消耗纳入考虑范畴内,追求经济发展和资源的优化平衡。

近年来,世界银行的研究报告^[12]显示“水资源匮乏”已经影响到了地区的安全,这种影响在未来将会更广泛更深刻,甚至会成为地区争端的导火索。目前关于可持续水资源管理的研究,涉及到水资源供需、水资源承载力、水资源配置及水资源可持续利用等方面。关于水资源可持续利用与社会经济发展之间的研究主要有两个方向:

(1)早期研究主要从水资源可持续利用的角度出发,根据社会经济发展状况,对地区水资源利用情况进行分析。Pearce^[13](1990)等认为随着城市的发展,城市水生态环境逐步恶化。柳辉,孙华^[14](2009)利用多元线性回归的方法分析1987-2003年无锡市社会经济指标与太湖水环境质量演变的关系,发现太湖水环境质量与人口增长、产业结构变化变动有紧密关系。Bao chao^[15](2017)基于中国31个省市1997-2013年水资源量、人口收入、城镇化率等面板数据,利用空间杜宾模型分析影响中国省区用水效率的相关因素,发现GDP及城镇化水平对水消费效率程度影响最为显著。李九一,李丽娟^[16](2012)分析我国县域水资源支撑能力空间格局及其与人口、GDP之间的分布规律,发现水资源支撑能力差并非全部由人口多、经济规模大造成的,并提出我国东中部县域水资源不足主要原因是人口集中,而我国西部县域是由于降水量偏少,但灌溉农业发达导致的。

(2)随着研究逐步深入,学者注重研究两者之间耦合及制约关系。大部分专家认为经济社会与水资源利用协调发展是水资源可持续发展理论研究的核心。Nordhaus^[17](1992)用水资源量是否受限制造成的经济增长率的差来衡量水资源给经济增长带来的制约效应,其研究结果表明,无论科技发展如何成熟,水资源对经济增长的约束总是客观

存在的。方创琳, 鲍超^[18] (2004) 通过构建以系统动力学模型为基础的黑河流域水-生态-经济协调发展耦合模型, 并对协调发展趋势进行分析, 发现未来 30 年黑河流域需水量总体呈现缓慢增加趋势, 用水结构演变方向呈现合理化, 其中中游地区用水经济效益最高。潘安娥^[19] (2014) 为定量评价湖北省水资源利用与经济增长的协调关系, 计算 1995 年-2010 年湖北省水足迹与经济变化程度, 并利用协调发展脱钩模型进行测算, 发现湖北省水足迹中用水量较大的为农业用水及工业用水, 且经济发展与水资源消耗由强脱钩逐渐向弱脱钩转变, 呈现脱钩协调的初级状态。Dan Cui, Xin Chen, Yinglan Xue^[20] (2019) 为了更好应对未来社会经济发展和水环境变化, 将系统动力学模型和耦合协调度模型结合起来, 探讨昆明市在不同情境下社会经济与水环境耦合协调关系, 发现昆明市在商业发展情景下, 由于水资源消耗和污染, 昆明市会保持勉强平衡发展状态。如果日后按照高强度水保护和社会经济中速发展情景下发展, 那么昆明市将在 2025 年高度耦合协调平衡发展。喻玲、杨胜苏等^[21] (2020) 分析湖南省 2000-2017 年社会经济和水资源利用的耦合协调关系, 发现湖南省社会经济与水资源利用的协调关系在时间上从轻度失调转变为中度协调, 在空间上协调程度呈现“东部>中部>西部”的格局。Yi Liu, Liyuan Yang, Wei Jiang^[22] (2020) 构建山东省南四湖流域社会经济子系统与水环境质量子系统耦合协调综合评价指标体系, 基于耦合系统模型、剪刀差分等模型, 研究社会经济和水环境系统耦合协调的动态演化。结果发现南四湖流域水环境质量随着社会经济的发展逐渐改善, 经济系统与水环境系统的耦合协调状态由中度不平衡转向良好均衡发展。

1.3.2 水资源与产业结构

关于水资源对产业结构的制约作用, 部分学者宏观聚焦在水资源对产业的约束程度及变化趋势。例如王海英^[23] (2003) 发现随着黄河省区产业结构转变, 加剧了农业水资源供需矛盾, 降低农业水资源利用效率, 且产业结构不利用水资源合理配置, 针对上述问题, 提出退耕还林生态工程、优化调整耗水型的产业结构、大力发展生态产业等建议。柴彦威、马静^[24] (2010) 深入剖析了水资源约束下泰达汉沽现代产业园产业发展现状, 为改善该产业园区高耗水、高污染的水环境, 利用“开源、节流、循环”理念构建生态工业园区发展模式, 减少对水资源的过度依赖。万永坤, 董锁成, 王隽妮等^[25] (2012) 基于柯布一道格拉斯生产函数, 用劳动效率指示要素替代弹性, 建立土地资源、水资源阻尼模型, 量化资源约束对北京经济增长影响程度, 发现技术进步虽然在短时间内会

减缓资源对经济发展的约束,但长期发展后水土资源对经济约束程度会增大,此时只能依赖产业结构调整 and 要素替换来解决。章恒全,张陈俊,张万力^[26](2016)为了解水资源对经济增长的影响程度,采用改进的 C-D 函数和 Romer 的经济增长阻力分析模型,分产业测算 1998 年-2013 年水资源对我国 31 个省份经济增长的阻力,发现我国各省市水资源对经济增长的阻力有较大差异,水资源对第三产业经济增长阻力最大,因此为降低水资源对经济增长的限制,可以通过控制人口增长、提高水资源利用率和资本利用率等方法降低水资源对经济增长的限制。沈晓梅,夏语欣,姜明栋等^[27](2019)基于美国经济学家 Romer 提出的资源约束下的经济增长模型,研究长江经济带水资源消耗对经济增长的约束作用,发现水资源对长江经济带经济增长的约束作用减弱并逐渐稳定,且区域差异显著。顾朝林,曹祺文,鲍超^[28](2019)在中国城镇化 SD 模型中,将水资源系统解构为水资源供给、水资源需求、水环境等不同层面,构建出基于水资源约束的中国城镇化系统动力模型。通过设置不同情景的参数进行解算,发现产业结构通过农业、工业需水影响水资源供需平衡,且当产业部门用水效率一定时,产业发展对水资源供需平衡影响更加突出。王文彬^[29](2020)构建以产业结构合理化和高级化为被解释变量,水量、水质和水效为核心解释变量的计量模型,分析黄河流域产业结构变迁规律与影响因素,发现水效对产业合理化和高级化均有积极影响,而水质对产业结构高级化有负向影响。

现阶段也有学者开始基于水资源的约束分析产业结构调整方向及程度。Herman E. Daly^[30]从水资源稀缺方面进行考虑,认为产业发展应该限制水资源量消耗高的产业发展规模,提高水资源利用率,将有限的水资源投放到污染少的产业,实现产业结构优化升级。Hong Yang, Na Li^[31](2016)基于山东省淮河流域水环境承载力,利用不精确随机多目标规划方法对淮河流域产业结构进行优化。研究发现传统的支柱产业、煤炭、造纸、食品加工业应逐步减少,同时应严格限制饮料和纺织行业;另外,冶金、建材等新兴产业应保持快速发展。Zhou 等^[32](2017)通过建立投入产出表、信息熵法和水环境承载力仿真平台(WECC)相结合的分析框架,分析了常州市在水环境承载力约束下的产业结构升级和产业空间布局优化问题。研究发现当产业结构和空间布局优化后,常州市机电产业生产总值可提高 7 倍,地方工业经济提高 1.6 倍。张信信、刘俊国^[33](2018)在“以水定产”的原则背景下,基于环境投入产出模型,分析黑河流域产业部门间虚拟水转移及其经济关联效应,结果发现第一产业消耗大量虚拟水,同时是转出虚拟水最大的部门,

部分工业和服务业是对第一产业虚拟水转出拉动效应最大的部门，应利用这些部门的拉动效应控制第一产业规模。Minjun Shi, Yuanjie Li^[34]等（2019）通过编制京津冀城际间投入产出表，利用多城市、多目标优化模型解决在水资源约束下京津冀城市间产业结构优化问题，发现可以通过限制水密集型产业规模，扶持技术密集型产业产业结构调整，带来经济增长和节水效益。丁超^[35]（2020）建包头市水资源约束条件下产业结构优化的多目标规划模型，利用 NSGA-II 对模型进行求解给出包头市未来产业结构调整以及用水结构调整的方向，预计在 2025 年包头市三次产业结构为 2.43%：36.31%：61.26%，用水结构为 57.21%：30.25%：12.54%。

从上述水资源与社会经济的回顾中，发现早期研究相对简单，多考虑社会经济或生态环境对水资源的需求，以及水资源对其他系统的供给能力。等到关注系统间相互关系研究逐渐增加，学者开始研究水资源与区域可持续发展之间的相互关系，丰富了水资源研究进展。我国水资源与社会经济发展关系的研究是随着水资源问题、国家方针政策提出逐步发展起来的，尤其是在近年“以水定产”的提出，关于水资源优化配置、水资源对产业结构调整的相关研究有大量增长，为处理好水资源、社会经济两大系统间的协调关系提供科学支撑。

1.3.3 投入产出分析

投入产出模型是研究经济系统各部分相互依存关系的经典模型，用于对区域经济结构和联系的实证研究，例如产业关联^[36-37]、全球生产网络^[38-39]、创新系统^[40]等方面。在 20 世纪 70 年代，投入产出分析法被广泛地应用于定量估计经济活动当中的隐含资源消费及隐含资源流动问题^[41-42]，研究对象包括水资源^[43-44]，能源^[44-46]以及其他自然资源等。关于投入产出模型与资源环境的研究主要分两个方面，一方面研究经济结构与环境污染之间的关系，Isabela Buynar^[47]等（2011）运用环境投入产出模型，结合结构分析法，分析西班牙 2000-2005 年服务业碳排放，发现服务业二氧化碳排放量增加是因为非服务业排放量为满足服务业的最终需求从而增加排放量，且在此期间技术变化导致的二氧化碳排放减少均会被最终需求的增加所补偿。马国霞、於方、齐霁^[48]等（2014）以我国 2007 年投入产出表为基础，建立实物价值型中国绿色投入产出表，分析大气污染物、废水、固体废物的直接和完全产生系数，并分析出对三大类污染进行治理所需成本。结果发现废水单位治理成本为 6.4 元/t，废气单位治理成本为 2136 元/t，固体废物单位治理成本为

101 元/t。严春晓、宋辉、张润清^[49]（2018）利用河北省 2012 年投入产出表基础上设计区域能源-环境治理表，计算出各部门污染排放系数，结合实证总结出我国编制能源-环境治理投入产出表的步骤及基于该表能够实现的研究方向，为我国以后编制投入产出扩展包提供参考。侯伟凤^[50]（2021）利用中国投入产出表以及中国污染排放数据编制中国环境投入产出表，并通过结构分析法研究污染排放增长影响因素，研究结果发现我国污染排放量整体增加，其中排放系数变动会减少污染物排放，最终需求变动和生产技术变动均会增加污染物排放。

另外一方面研究资源约束及消耗情况，例如唐志鹏^[51]等（2012）利用北京市 1987-2007 年五个时期的投入产出表，分析在能源消耗总量约束条件下北京市优化的产业结构，并采用灰色关联度分析方法，对比各时期优化后的产业结构相似程度。结果发现北京市 1997 年产业结构优化程度最高，2002 年最低。同时北京产业结构调整的重点在于第三产业，工业方面主要调整批发零售业、金融保险业和社会服务行业。张玲玲、陈妍彦^[52]（2014）在分析江苏省用水现状的基础上，基于 2010 年江苏省投入产出表构建多目标优化模型，以 GDP 最大和用水量最少为目标函数，以投入产出、GDP 平均增速、用水量增速等为约束条件，求解各部门用水量，优化江苏省产业结构。经研究发现农业用水在整个用水行业中占比最大，在增加农业产值的要减少灌溉用水。同时大力发展低耗水的加工业、制造业和高新技术产业。宋涛^[53]等（2017）基于京津冀地区投入产出表，构建能源-环境-就业三重约束下的线性规划模型，以产业生产总值最大化为目标函数，通过设计四种约束情景，分析京津冀地区产业结构调整优化情况。发现北京应该重点发展高端服务业、高新技术产业，同时转移不适宜发展的第一、第二产业；天津应坚持第二、第三产业并重；河北应该改善传统工业，完善生产性服务业。王志强、孙艳芝^[54]（2019）考虑能源与水资源约束及其相互作用，设立节能、节水和节能节水双重约束的三种情景，利用投入产出和线性规划模型研究晋陕蒙三个地区产业可持续发展和资源高效利用的优化结果。研究发现基于能源消耗，提高采矿业比重，微降制造业和商业服务业比重，可以降低能源和水资源的消耗总量；基于水资源消耗约束，降低农业发展规模可以节约水资源。基于水-能资源约束，对采矿业结构调整，会导致单位能源资源产出利用效果的明显差异。李元杰、张卓颖、石敏俊^[55]（2020）利用京津冀城市间投入产出优化模型,结合多目标线性规划,以京津冀整体地区经济效益最大化为目标函数,以投入产出约束、部门产出约束、水资源约束为约束条件,探讨雄安新区建设对京津冀地

区的经济影响。研究发现雄安新区建设会带来一部分用水缺口,这部分缺口将对京津冀地区造成 GDP 下降。但同时由于新区建设所拉动的需求扩大又会让京津冀地区部分产业 GDP 得以增长。孙秀秀^[56]等(2021)基于山东省 1997、2002、2007、2012 年可比价投入产出表估算三大产业的用水效率、用水效益及虚拟水净输出量变化情况,采用灰色关联分析法分析用水效率与产业结构合理化程度,社会技术之间的关系。发现山东省第一产业虚拟水由净输出变成净输入,第二产业虚拟水净输出量先增加后减少,第三产业虚拟水净输出量不断增加;且产业合理化和技术进步均有利于水资源的提高。孙才志、郑靖伟^[57](2021)基于国家 2017 年投入产出表分析中国 42 个部门水资源消耗的总量,以及水资源在生产链中消耗的路径,发现我国目前水资源短缺形式严峻,部门之间存在单向依赖特征,且随着消费需求多样化的增加导致上游部门水资源压力增大。

1.3.4 水资源优化配置

水资源优化配置包含两方面含义:一方面是在水资源短缺的区域,对各行业、各部门之间进行合理的用水分配,使用水达到区域效益最高;另一方面是在水资源丰富区域,是指对本区域行业的产业结构进行调控,提高各行业对水资源的利用率。对于水资源优化配置较为常见的方法是线性规划,模型的目标函数适用性以及约束条件的准确性确定了测算结果的合理性,例如刘年磊、蒋洪强、吴文俊^[58](2014)将可信性模糊机会约束规划模型与区间规划相结合,提出了可信性模糊-区间线性规划(FILP)模型,以经济效益最大化、缺水量之和最小、主要污染物排放量最小为目标函数,以水源可供水量、用户需水能力约束和非负约束为约束条件构建 FILP 模型。根据模型求解结果,发现在不同规划水平年,农业和工业部门一直为主要缺水部门。在 2015 年和 2025 年工业期望缺水量分别为 2130.90 万 m³、2001.47 万 m³,农业期望缺水量分别为 16666.98 万 m³、13090.46 万 m³。赵岩、黄鑫鑫、王宏瑞^[59]等(2016)建立河北省经济与环境协调发展的多目标优化模型,以产业增加值最大、总用水量最少和 COD 排放总量最小为目标函数,约束条件涉及到地区生产总值约束、产值规模约束、供水量约束、污水排放量约束及 COD 排放量约束。根据计算结果发现经过优化后产业增加最高可达 55181.708 亿元,最低为 51191.163 亿元。用水总量可控制在 151.67×10⁸~176.02×10⁸t 范围之内,COD 排放量则可控制在 117.31×10⁴~136.80×10⁴t 之间。付正辉、陆文涛、赵颢瑾^[60]等(2018)为研究水资源约束下青海省西宁市适度人口数,以西宁市 GDP 总量最大为目标函数,以

人均 GDP 量、人均水资源总量和人均污水排放总量为约束条件构造区域适度人口规划模型，发现人均水资源量是西宁市人口发展最主要的限制性指标，人均排污量有很大富余，因此增加西宁市可利用水资源总量是西宁市高速发展的前提。陈浩、彭桥^[61]（2021）基于 2007 年、2012 年、2017 年京津冀投入产出表的线性规划模型，以水资源投入产生的 GDP 最大为目标函数，以农业、工业、服务业耗水量为约束条件，测算结果发现京津冀农业用水效率远低于工业和服务业，但整体用水效率不断提升；从地区上看，河北服务业与工业用水效率较高，而北京和天津的服务业用水效率相对较低。

1.3.5 文献评述与启示

在研究内容方面，从水资源入手研究产业结构多集中于从宏观角度出发研究水资源对产业结构约束程度。而基于水资源约束调整产业结构方面，外文文献偏多，国内主要是近些年由于“以水定产”的提出，部分学者开始基于投入产出表分析水资源状况对三次产业调整的影响。在研究方法上，水资源优化配置多利用投入产出模型与多目标线性规划相结合的研究方法，但目前已有研究中投入产出模型多利用已编制完善的投入产出表，研究区多为省级，而地级市多为京津冀区域，较少涉及到其他省份的地级市。多目标线性规划目前研究较成熟，基于水资源优化配置研究目标提出的目标函数与约束条件也多集中于水资源量和社会经济效益方面，很少根据研究区特有性质提出约束条件。本文针对上述问题，将研究区设为河南省沿黄区域地级市，通过编制河南省地级市间投入产出表，利用多目标线性规划模型，考虑到河南省沿黄城市的产业用水特征、河南省粮食大省定位，求解出河南省沿黄 8 个城市 8 个产业的优化调整情况。

2 河南省沿黄城市水资源与产业发展概况

2.1 河南省水资源概况

河南省位于黄河中下游，东接鲁皖，西接陕晋，南临鄂，北临冀，呈东启西、望北向南，在黄河流域中具有战略枢纽的位置。在地势上，河南省西高东低，中西部为黄淮海冲击平原，西南部为南阳盆地。气候上河南省自东向西由平原向丘陵山地气候过渡，四季分明，雨热同期，是中国粮食生产核心区，粮食总产量占全国十分之一^[62]。黄河干流自三门峡流入，由濮阳市流出，途经洛阳、郑州、开封、济源、焦作、新乡，是黄河从山区向平原过渡的复杂河段(图 2-1)。由此形成河南省沿黄区域行政辖区面积为 57877 平方公里，占河南省总土地面积 34.8%，分布河、库、湖等水系，拥有黄土丘陵区 and 黄泛平原沙土区。

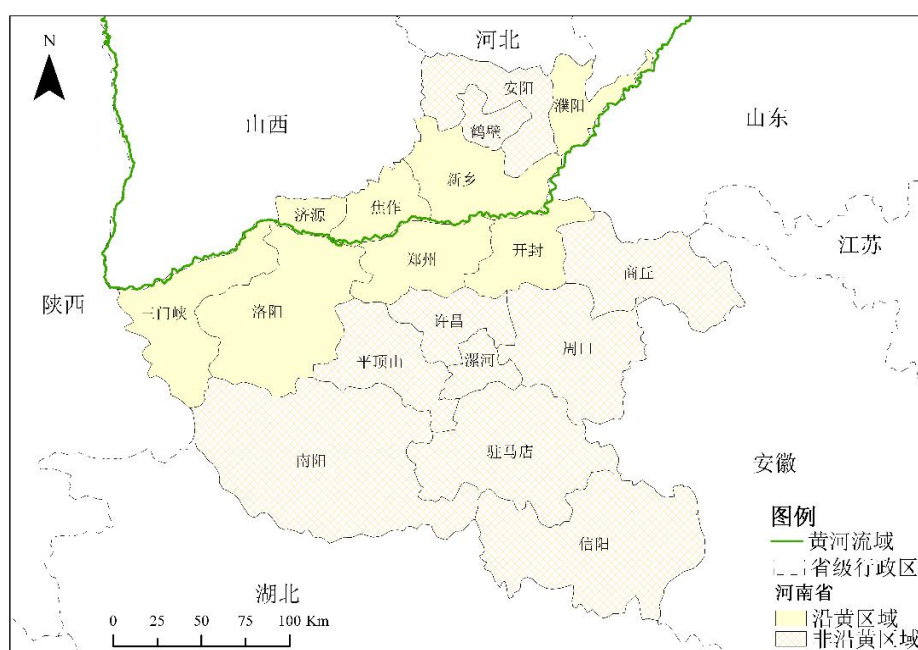


图 2-1 河南省沿黄区域分布图

2.1.1 河南省水资源量

河南省水资源量主要指河南省地下水、地上水以及集水总量，主要涉及到海河流域、黄河流域、淮河流域及长江流域。由图 2-2 可知，河南省水资源总量基本高于 200 亿立

方米，2010 年高达 534 亿立方米，2019 年降低到 168.9 亿立方米。水资源增长率 2010 年达到 6%，2019 年则降低到-6%，可见河南省整体水资源变动趋势较大。河南省沿黄区域水资源量一般低于 100 亿立方米以下，占河南省水资源量维持在 20%~35%之间，沿黄区域整体水资源量不高。

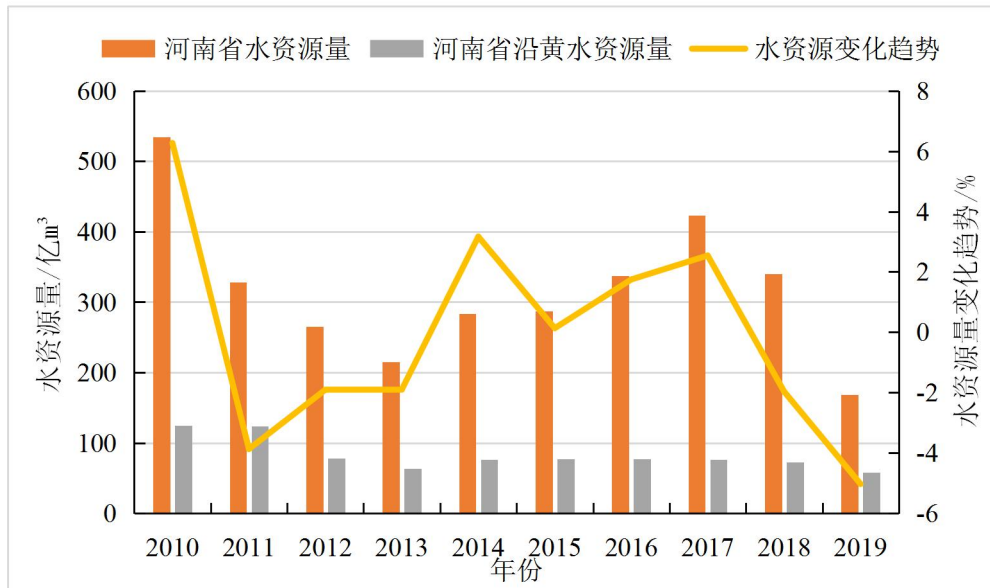


图 2-2 河南省水资源变化趋势

2.1.2 河南省用水情况

用水量方面，河南省近十年用水量总额保持在 200-250 亿立方米，变化趋势于 10%~-10%区间波动，其中 2014 年用水量下降趋势显著，主要原因是河南省在 2014 年入夏后，中部和南部地区发生严重干旱，部分城市供水短缺，急需从丹江口水库临时调水。沿黄区域用水量方面，历年用水量在 100 亿立方米左右，变化趋势基本与河南省变化一致，说明沿黄区域供水量并不稳定，一直都有较大波动。

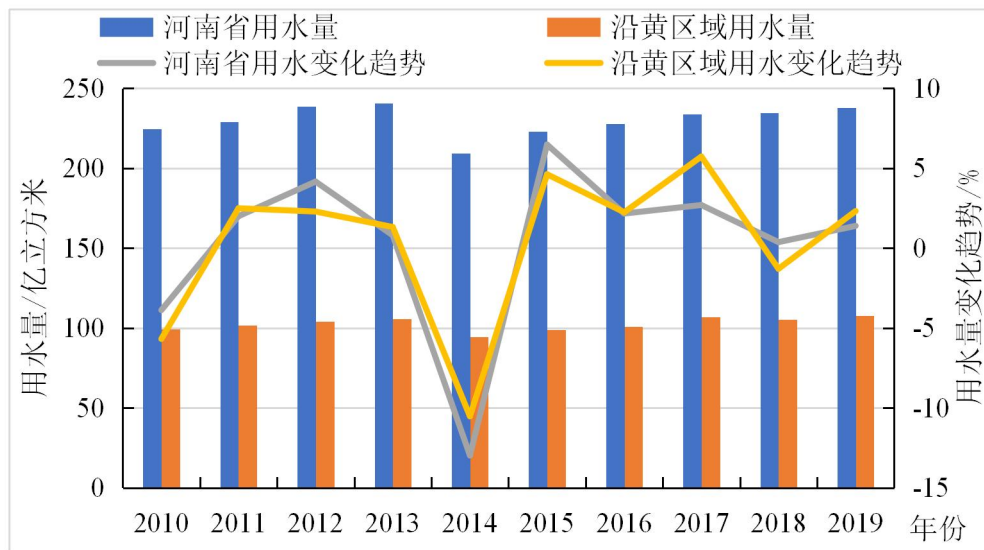


图 2-3 河南省沿黄区域用水状况

从 2019 年河南省地级市用水结构来看，除郑州、洛阳及三门峡市，其他地级市农业均为最高用水部门，尤其新乡市农业用水量最高，达到 14.016 亿立方米。工业方面，南阳、洛阳、郑州市工业用水量最大，分别为 5.453 亿立方米、5.417 亿立方米、4.986 亿立方米。生活及生态用水中，郑州市是河南省生活、生态用水最高城市，分别达到 7.297 亿立方米、5.126 亿立方米。由此可见，在河南省城市中普遍农业用水量最大，且生态用水也成为不容忽视的一方面。

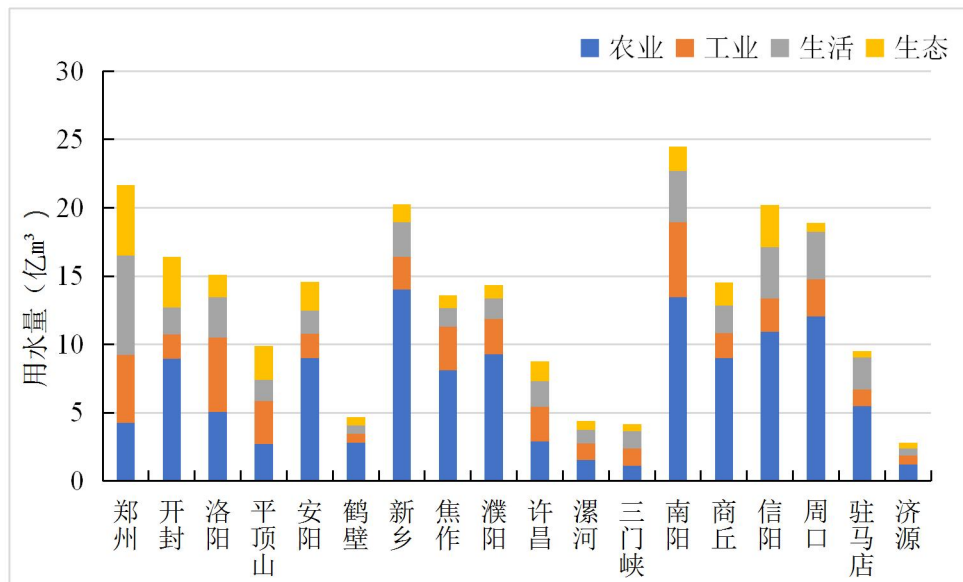


图 2-4 河南省用水结构

2.2 河南省社会经济与产业发展概况

2.2.1 社会经济发展概况

截止 2019 年研究区域生产总值 28380.27 亿元，占河南省地区生产总值 52.2%。2010-2019 年河南省沿黄区域与非沿黄区域人均生产总值逐年上升，且沿黄区域近十年均高于非沿黄区，沿黄区域和非沿黄区域增长速率波动较大，沿黄区域整体经济变化形势向好。经分析可知沿黄区域是河南省经济振兴过程中，最优活力、最具希望的区域增长中心。

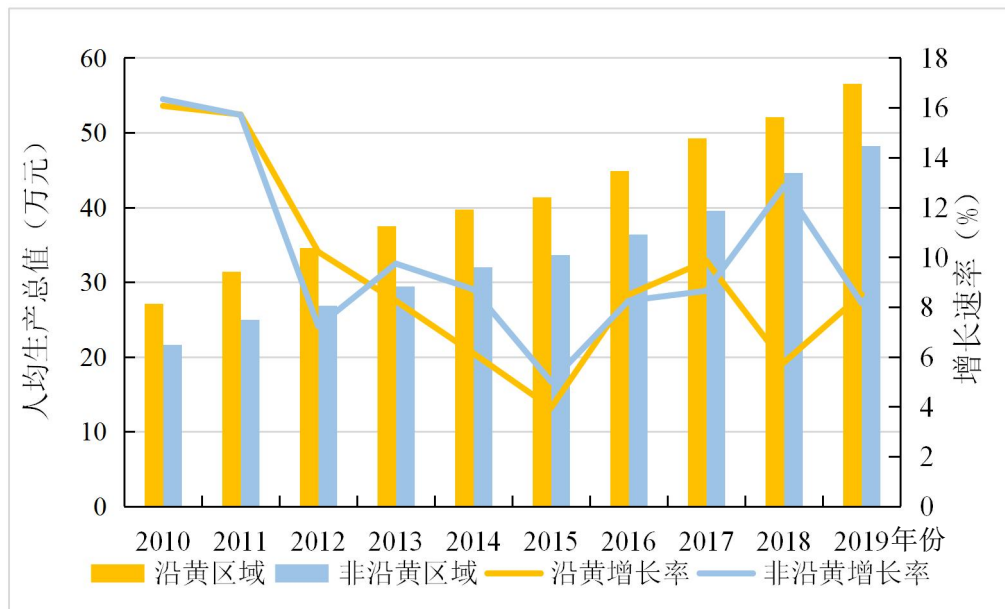


图 2-5 河南省人均生产总值及增速趋势

2.2.2 产业发展情况

在错综复杂的环境下，河南省沿黄区域能保持经济稳定增长，是各种因素共同作用的结果，但快速的经济增长会带来资源需求的增长，加剧环境污染物排放，这些都会增加河南省沿黄区域用水压力。产业结构能通过自身的调整实现资源有效配置，并且从有限资源中能获取最大的经济效益，因此通过调整河南省产业结构，可以实现资源有效利用。河南省在产业结构方面，一产占比维持在 10% 左右，二产占比逐年降低，第三产业占比逐年增长，却始终低于 50%，与全国平均水平相距较大。反观河南省沿黄区域三次产业占比，农业占比一直低于 10%，第三产业占比逐年上升，到 2018 年已经超过 50%，说明随着河南省产业集聚区建设，且这些产业集聚区大多数在郑州、洛阳、新乡、焦作

等地，使得第三产业对沿黄区域的经济拉动作用越来越大。

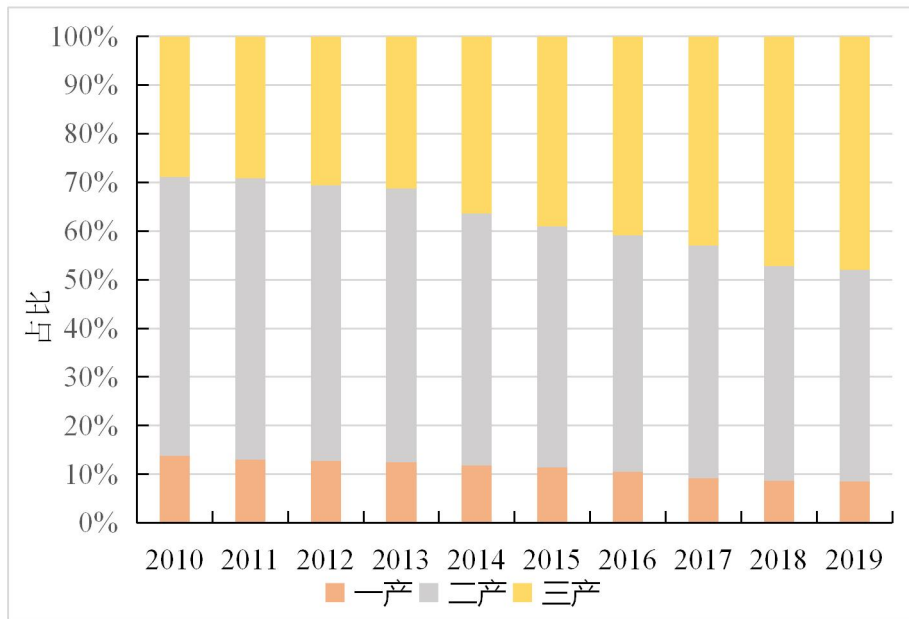


图 2-6 河南省三次产业结构

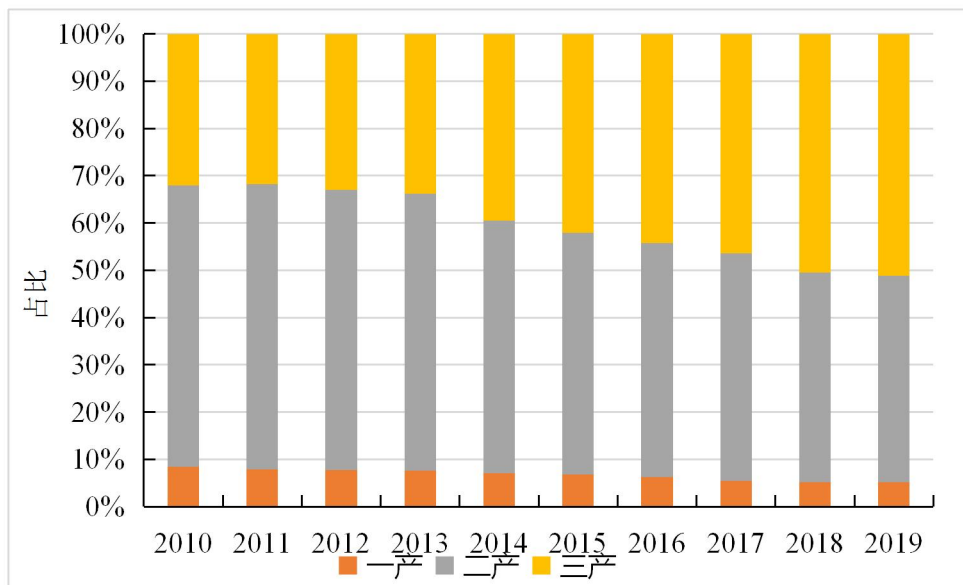


图 2-7 河南省沿黄区域三次产业结构

产业结构升级可以分为产业结构合理化和产业结构高级化两方面^[63]。产业结构合理化是指产业结构由不合理向合理发展的过程，要求在一定的经济发展阶段上，根据当地的资源条件与消费需求，调整本地的产业结构，让资源在产业间得到合理配置和有效利用^[64]。2019年河南省中商丘、驻马店、周口、郑州的产业结构更为合理，而三门峡产业结构合理性最低，从各城市合理化从高到低排序来看，沿黄区域各城市的合理化程度在河南省排序中处于中等位置。产业结构高级化是指产业结构从低级化向高级化转变的

过程，表示产业结构的改变和劳动生产率的提高^[65]。河南省中郑州市一枝独秀，产业结构最为高级，而驻马店、周口、鹤壁、信阳、商丘、济源产业结构高级化水平低于均值。在城市高级化由高到低排序中，沿黄城市呈现两极分化，郑州、洛阳和濮阳处于前三，新乡市处于中间位置，其他 4 个城市都位于后面位置。

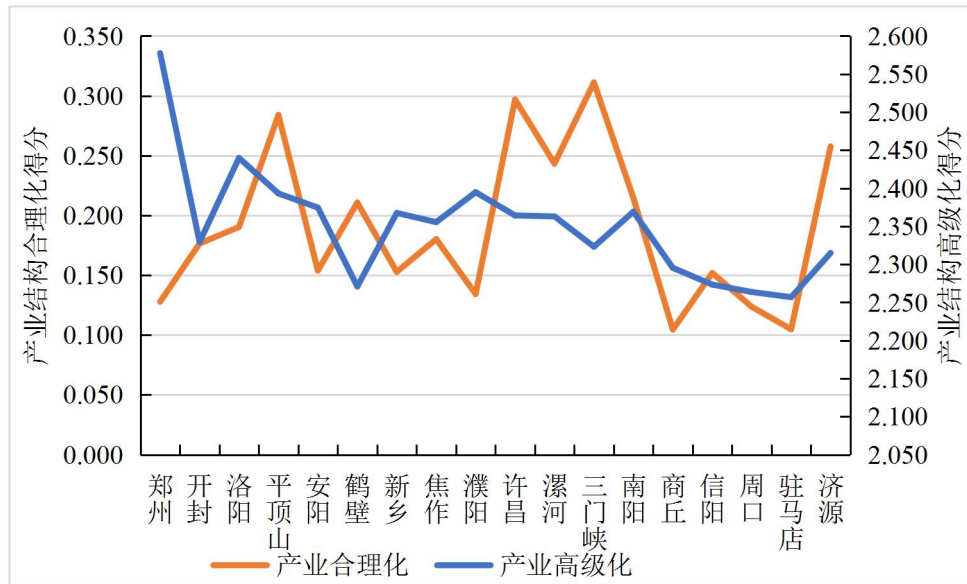


图 2-8 河南省产业结构合理化和高级化

如图 2-9，从 2019 年河南省人均 GDP、人均水资源存量及人均水资源用水量情况来看，河南省人均 GDP 较高区域主要集中在河南省沿黄区域，而人均水资源量较高区域相对集中于非沿黄区域，其中三门峡市和信阳市人均水资源量最高。人均用水量方面，大部分地级市用水量均超过水资源存量，但三门峡市、信阳市、驻马店市均是用水量少于供水量。由此可见河南省经济发展与水资源存在时空分布不平衡现象，且部分地级市用水量超标。

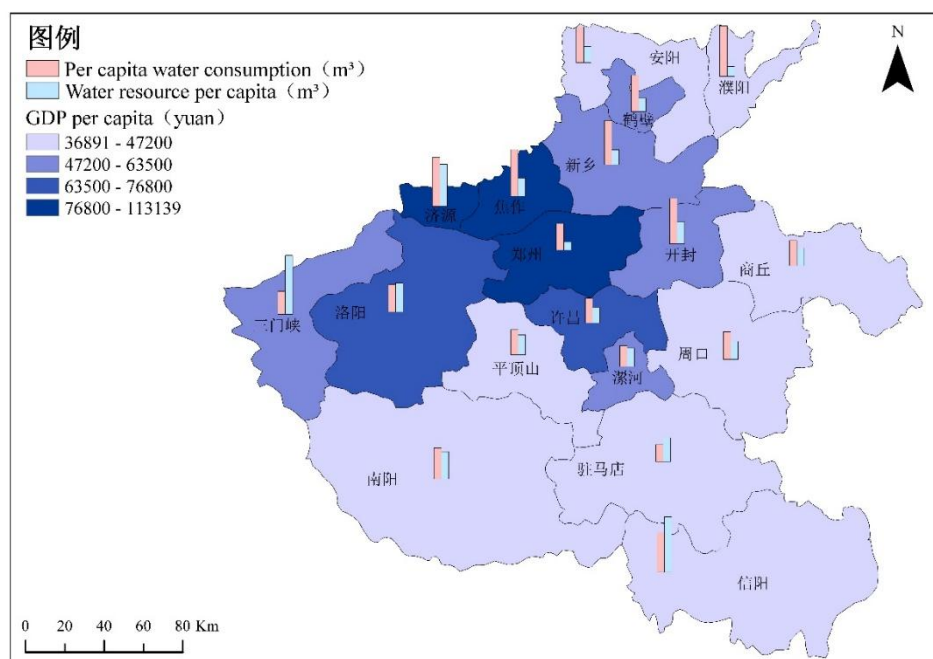


图 2-9 河南省人均 GDP 与人均水资源量空间分布状况

3 河南省沿黄城市投入产出表

经济学家列昂惕夫于 1936 年提出投入产出分析,用来衡量各产业间投入与产出的相互依存关系的经济分析方法^[66]。投入是指产品生产消耗的原材料、燃料、固定资产折旧和劳动力;产出是指产品生产出来后用以分配的数量和方向。而地区间投入产出表是利用地区间商品和劳务流动,将各地区投入产出表链接而成的模型^[67]。相比单区域投入产出表,区域间投入产出表可以更加系统、全面地反映区域间的产品贸易情况^[68]。根据表格编制方法不同,地区间投入产出表模型可以分为 IRIO 模型(interregional input-output model)与 MRIO 模型(multiregional input-output model)两类。MRIO 模型要求对应的数据资料少,编制办法也逐渐成熟。

3.1 MRIO 模型介绍

3.1.1 引力模型

引力模型(Gravity model, GM)是分析区域间贸易最常见的模型之一^[69],目前使用的引力模型是依据牛顿的万有引力模型提出的,一般形式为

$$F_{ij} = K \frac{Q_i Q_j}{d_{ij}^r} \quad (3-1)$$

F_{ij} 是城市*i*对城市*j*的引力大小; Q 是城市的质量; K 为引力常数; d_{ij} 为两个城市间的距离; r 为距离摩擦系数。

可以利用 GM 模型估算区域间部门经济流量以编制区域间投入产出表。

$$T_{rs} = b_{rs} Q_r Q_s / d_{rs}^2 \quad (3-2)$$

T_{rs} 为城市*r*与城市*s*之间的引力; b_{rs} 为城市间流量分配系数; Q 为城市质量; d_{rs} 为城市间距离。

在引力模型中,质量参数和距离参数是影响模型适宜性的关键因素。城市质量指标能够反映出一个城市的综合实力^[70]。对质量参数的选取目前有两种形式,一种为单指标,一般考虑地区生产总值^[71];另一种将城市质量视为综合指标,本文选择地区生产总值、社会消费零售总额、进出口总额、人口数等四个指标^[72],因此城市质量可表示为:

$$v = G \times C \times E \quad (3-3)$$

$$Q = \sqrt[4]{v \times p} \quad (3-4)$$

v 为城市经济质量； G 为城市 GDP； C 为社会消费品零售总额； E 为进出口总额； p 为人口。

流量分配系数 b_{rs} 表示该城市的综合经济体量的相对大小，具体公式如下：

$$b_{rs} = v_r / (v_r + v_s) \quad (3-5)$$

d_{rs} 为城市间距离，现在随着交通工具的快速发展，地区间距离不仅仅意味两个地级市之间的直线距离，还包括时间距离、金钱距离。鉴于此，本文基于 OSM 工具获取河南省不同等级路网，在下载路网数据后发现由于数据问题存在有数万个路段都存在断头情况，因此需要将道路连接畅通，再对不同等级路网赋不同速度值，利用 ArcGIS 的 OD 成本矩阵求解最短通行时间^[73]。

表 3-1. 道路网平均行车速度（单位：km/h）

道路等级	平均速度
铁路	200
高速路	120
主干道	100
次干道	80
三级道路	40
支路	60

3.1.2 区位商模型

区位商模型，可以用于推导初始的区域投入系数^[74]。

$$LQ_{i,r} = \frac{x_{i,r}/x_r}{x_{i,n}/x_n} \quad (3-6)$$

$x_{i,r}$ 为 r 市 i 部门的发展信息指标，常用指标为从业人员和GDP，本研究采用社会从业人员； x_r 为 r 市所有部门， $x_{i,n}$ 和 x_n 代表其对应省份的指标。

3.1.3 城市投入系数

城市内部投入系数及外部投入系数^[75]利用公式将河南省非竞争型投入产出表的直接消费系数 a_{ij}^{n*} 调整为 a_{ij}^n ：

$$a_{ij}^n = a_{ij}^{n*} / \sum a_{ij}^{n*} \quad (3-7)$$

$$a_{ij}^{rr} = \begin{cases} LQ_{i,r} \times a_{ij}^n & \text{if } LQ_{i,r} < 1 \\ a_{ij}^n & \text{if } LQ_{i,r} \geq 1 \end{cases} \quad (3-8)$$

$$a_{ij}^{\bar{r}} = a_{ij}^n - a_{ij}^{rr} \quad (3-9)$$

a_{ij}^{rr} 为 r 市 i 部分到 j 部门的内部投入系数； $a_{ij}^{\bar{r}}$ 为 r 市 i 部分到 j 部门的外部投入系数； a_{ij}^{n*} 为省级非竞争型 IO 表的直接消费系数； a_{ij}^n 为调整后直接消费系数。

3.1.4 城市间贸易系数

在 MRIO 模型编制过程中，提出一定假设，即对各地区间各种产品的贸易进行同质化假设。

$$t_j^{rs} = \begin{cases} \sum_i a_{ij}^{\bar{s}} \times \frac{T_{sr}}{T_{ss}} & \text{if } LQ_{i,r} < 1 \\ \sum_i a_{ij}^{rs} & \text{if } LQ_{i,r} \geq 1 \end{cases} \quad (3-10)$$

t_j^{rs} 为城市 r 与城市 s 之间的贸易系数，为方便理解贸易系数流入与流出绘制表格如下：

3.2 数据来源

国民经济投入产出表每五年编制一次，河南省目前已经公布 2002,2007,2012,2017 年投入产出模型数据。本文利用 2017 年河南省投入产出表，基于引力模型和区位商模型编制河南省城市间投入产出表，具体所需数据如下：

- (1) 2017 年河南省投入产出数据；
- (2) 城市距离数据：河南省路网数据、交通行驶速度；
- (3) 城市经济数据：城市各行业从业人员、城市 GDP、社会消费品零售额、进出口总额。

3.3 MRIO 表的编制

根据本次投入产出表编制过程，中间流量绘制主要流程如下：

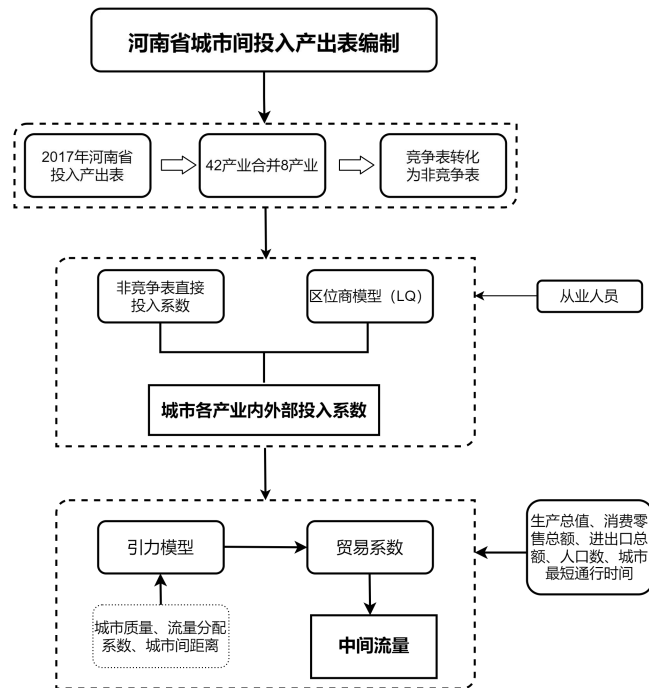


图 3-1 河南省城市间中间流量绘制流程

根据社会从业人员部门划分，将河南省投入产出表中产业划分为 8 个部门，分别为农业（B1），采矿业（B2），制造业（B3），电燃气水生产及供应业（B4），建筑业（B5），交通业（B6），批零住餐（B7），其他服务业（B8），具体分类如下：

表 3-2 河南省部门合并

编号	合并部门	简称	42 部门
B1	农业	A	农林牧渔产品及服务业
B2	采矿业	M	煤炭采选产品、石油和天然气开采、金属矿采选产品、非金属矿和其他矿采选产业
B3	制造业	Ma	食品和烟草、纺织业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品、木材加工品和家具、造纸印刷和文教体育用品、石油及炼焦产品和核燃料加工品、化学产品、非金属矿物制品、金属冶炼和压延加工品、金属制品、通用设备、专用设备、交通运输设备、电气机械和器材、通信设备、计算机和其他电子设备、仪器仪表、其他制造产品、废品废料、金属制品及机械和设备修理服务
B4	电燃气水生产及供应业	D	电力、热力的生产和供应、燃气生产和供应、水的生产和供应业
B5	建筑业	C	建筑
B6	交通业	T	交通运输及仓储和邮政
B7	批零住餐	WH	批发和零售、住宿和餐饮
B8	其他服务业	O	信息传输软件和信息技术服务、金融、房地产、租赁和商务服务、科学研究和技术服务、水利环境和公共设施管理、居民服务、修理和其他服务、教育、卫生和社会工作、文化体育和娱乐、公共管理社会保障和社会组织

3.3.1 河南省非竞争型表格

MRIO 以非竞争型投入产出表为基础数据,但目前我国所编制的省级投入产出表为竞争型,所以需将竞争型投入产出表转换为非竞争型投入产出表^[76]。目前关于编制中国省份的非竞争型投入表有两种思路:

思路一:将进口和国内省外流入合并看成进口,利用公式计算进口中间投入比例, I_{ij}^M 为 j 部门使用的 i 部门的中间投入中进口, I_{ij}^D 为中间投入的国内生产,具体公式如下:

$$\frac{I_{ij}^M}{I_{ij}^D + I_{ij}^M} = \frac{M_i^l + RM_i^l}{X_i^l + U_i^T} = \frac{M_i^l + RM_i^l}{M_i^l + RM_i^l + X_i^T} \quad (3-11)$$

$$I_{ij}^M = \frac{M_i^l + RM_i^l}{X_i^l + U_i^T} X_{ij} \quad (3-12)$$

$$I_{ij}^D = \left(1 - \frac{M_i^l + RM_i^l}{X_i^l + U_i^T}\right) X_{ij} \quad (3-13)$$

思路二:将进口与国内省外流入分开,只以进口计算,具体公式如下:

$$\frac{I_{ij}^M}{I_{ij}^D + I_{ij}^M} = \frac{M_i^l}{X_i^l + U_i^T} = \frac{M_i^l}{M_i^l + X_i^T} \quad (3-14)$$

$$I_{ij}^M = \frac{M_i^l}{X_i^l + U_i^T} X_{ij} \quad (3-15)$$

$$I_{ij}^D = \left(1 - \frac{M_i^l}{X_i^l + U_i^T}\right) X_{ij} \quad (3-16)$$

3.3.2 中间矩阵及最终使用

(1) 中间矩阵

根据投入系数、贸易系数模型,可以计算 r 市 i 部门流向 s 市 j 部门的中间流量:

$$z_{ij}^{rs} = \begin{cases} a_{ij}^{\bar{s}s} \cdot t_i^{rs} \cdot \bar{X}_j^s & \text{if } r \neq s \\ a_{ij}^{rr} \cdot t_i^{rr} \cdot \bar{X}_j^r & \text{if } r = s \end{cases} \quad (3-17)$$

当计算不同城市间中间流量时,即 $r \neq s$, $a_{ij}^{\bar{s}s}$ 表示 s 市 i 部门至 j 部门的外部投入, t_i^{rs} 表示 r 市的 i 部门流向 s 市, $\bar{X}_j^s$ 表示 s 市 j 部门的总投入;当计算一个城市内部不同行业中间流量时,即 $r=s$, a_{ij}^{rr} 表示 r 市 i 部门至 j 部门的内部投入, t_i^{rr} 表示 r 市的 i 部分流到本市, $\bar{X}_j^r$ 表示 r 市 j 部门的总投入。

(2) 最终使用

本文使用的是非竞争型投入产出模型,对最终使用处理时可以利用上述所提及的思路一或思路二,本文采用的是思路一,对进口和省外流入进行排除,并将其作为进口产

品。在这里我们要假设每一个地区对进口产品的使用结构与本地区该产品的使用结构是相同的，因此可以明确同一地级市中的中间使用和最终使用与该市的进口品的分配矩阵相同，由此可以推算调整出区域间的投入产出表，具体表格的形式如下。

表 3-3 竞争型投入产出表

	中间使用						合计	最终使用		出口	其他	总产出
	市 1			市 s				市 1	市 s			
	1 部	2 部	j 部	1 部	2 部	j 部						
市 1	1 部											
	2 部											
	j 部											
市 s	1 部											
	2 部											
	j 部											
进口							M					
合计							X^I	U^T		U^E		X^T
增加值							V^T					
总投入							$(X^T)'$					

3.3.3 MRIO 基础数据

首先，基于区位商模型，根据各市各部门社会从业人员计算河南省不同城市区位商，结果如下：

表 3-4 河南省地级市区位商矩阵

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
郑州	0.397	0.933	1.222	1.438	0.972	1.272	1.475	1.794
开封	1.089	0.000	1.044	0.877	0.974	0.940	0.901	0.902
洛阳	0.894	0.438	1.102	1.122	0.841	0.998	1.162	1.131
平顶山	1.206	3.789	0.807	2.514	0.590	0.976	0.899	0.928
安阳	0.909	0.193	0.881	0.868	1.790	1.112	0.945	0.877
鹤壁	0.665	3.005	1.242	0.826	1.051	1.249	1.125	1.243
新乡	0.881	0.004	1.096	1.036	1.465	1.001	0.924	0.975
焦作	0.789	1.315	1.722	1.683	0.538	1.439	0.920	0.913
濮阳	1.069	1.619	0.942	1.792	1.030	0.905	0.925	0.913
许昌	1.061	0.446	1.280	0.843	0.542	0.888	0.995	0.877
漯河	1.108	0.000	1.260	0.661	0.832	0.990	0.756	0.824
三门峡	1.217	16.450	0.192	2.036	0.540	1.257	0.837	1.016
南阳	1.218	0.274	0.924	0.401	0.721	0.897	0.927	0.885
商丘	1.007	0.806	1.055	0.525	0.932	0.922	1.127	0.854
信阳	1.167	0.635	0.500	1.568	1.332	1.879	0.928	0.841

周口	1.207	0.001	0.944	0.269	1.085	0.204	0.806	0.921
驻马店	1.035	0.295	0.928	0.582	1.216	0.827	1.000	0.922
济源	0.850	1.511	1.535	1.155	0.655	1.384	0.822	1.038

其次,根据引力模型计算河南省各地级市之间引力大小,结果如下表,部分续表放在附录 A。

表 3-5 河南省地级市引力矩阵

	郑州	开封	洛阳	平顶山	安阳	鹤壁	新乡	焦作	濮阳
郑州	0.000	1818.623	2197.595	426.480	429.130	144.026	1491.086	1029.566	212103
开封	0.810	0.000	5.828	17.163	13.449	9.926	29.508	11.660	14.241
洛阳	16.961	0.818	0.000	201.922	46.044	16.325	97.503	147.073	26.969
平顶山	0.187	0.015	11.500	0.000	6.597	4.975	10.484	5.579	6.497
安阳	0.314	0.026	4.369	10.992	0.000	82.976	57.904	18.984	96.995
鹤壁	0.003	0.000	0.043	0.228	2.284	0.000	0.928	0.244	2.062
新乡	1.574	0.105	13.335	25.176	83.455	48.576	0.000	65.401	46.444
焦作	1.827	0.103	33.818	22.523	46.003	21.500	109.961	0.000	27.221
濮阳	0.053	0.006	0.878	3.713	33.269	25.692	11.053	3.853	0.000
许昌	3.388	0.207	25.581	153.824	30.009	12.198	67.799	35.388	20.288
漯河	0.102	0.008	1.668	48.781	3.675	4.217	6.001	2.741	4.201
三门峡	0.068	0.005	6.933	9.101	2.957	2.620	4.005	3.619	3.090
南阳	0.181	0.017	10.164	89.038	7.108	3.834	10.038	7.166	6.213
商丘	0.504	0.129	7.133	14.343	13.891	6.586	23.379	12.691	14.575
信阳	0.061	0.006	1.383	14.278	3.382	2.819	4.490	2.436	3.636
周口	1.775	0.176	21.547	101.362	23.759	8.904	43.299	26.379	16.138
驻马店	0.191	0.016	3.574	47.085	7.098	4.945	10.926	5.700	6.813
济源	0.020	0.001	2.691	3.172	1.702	4.009	2.783	5.330	2.059

再基于上述结果,利用内外部投入系数,计算各个城市内部、外部投入系数。基于内外部系数,根据城市间贸易系数公式,计算城市间贸易系数,具体结果如下表,部分数据放于附录 B。

表 3-6 河南省地级市贸易系数矩阵

	部门	郑州	开封	洛阳	新乡	焦作	濮阳	三门峡	济源
郑州	B1	0.796	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B2	0.986	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	B3	0.940	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
	B4	0.979	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	B5	0.991	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
	B6	0.998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B7	0.966	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B8	0.994	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
开封	B1	0.030	0.983	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B2	0.002	0.799	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B3	0.009	0.924	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B4	0.003	0.659	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B5	0.001	0.960	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B6	0.000	0.942	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B7	0.005	0.942	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B8	0.001	0.9372	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
洛阳	B1	0.036	0.000	0.963	0.001	0.005	0.000	0.042	0.005
	B2	0.003	0.005	0.905	0.005	0.001	0.000	0.042	0.001
	B3	0.011	0.002	0.956	0.002	0.002	0.000	0.058	0.002
	B4	0.004	0.008	0.838	0.008	0.001	0.000	0.019	0.001
	B5	0.002	0.001	0.987	0.001	0.002	0.001	0.058	0.002
	B6	0.000	0.001	0.998	0.000	0.002	0.001	0.028	0.001
	B7	0.006	0.001	0.993	0.001	0.004	0.001	0.031	0.003
	B8	0.001	0.002	0.995	0.001	0.004	0.001	0.030	0.002
新乡	B1	0.025	0.002	0.003	0.952	0.018	0.004	0.024	0.005
	B2	0.002	0.025	0.007	0.823	0.005	0.005	0.024	0.001
	B3	0.007	0.010	0.003	0.923	0.006	0.005	0.034	0.002
	B4	0.003	0.043	0.012	0.708	0.003	0.003	0.011	0.001
	B5	0.001	0.005	0.001	0.978	0.008	0.006	0.033	0.002
	B6	0.000	0.007	0.000	0.989	0.006	0.007	0.016	0.001
	B7	0.004	0.007	0.001	0.975	0.012	0.007	0.018	0.003
	B8	0.001	0.008	0.000	0.980	0.012	0.007	0.017	0.002

根据上述计算的数据得到中间流量，而最终使用方面要利用相同的办法计算出结果后，对城市各产业最终使用进行合并，最终制作出城市间投入产出表。核算方面，将中间流量、总投入加和与河南省投入产出表进行对比，误差在 8%，同时将各城市的相同产业总产出加和，与河南省投入产出表中各产业总产出对比大部分产业误差均在 10%以内，以此确立本次编制的城市间投入产出表为基础表格。由于后续研究区为河南省沿黄

城市，所以将河南省城市间投入产出表合并为沿黄城市与非沿黄区域 9 个区域间投入产出表，将成表部分数据已附于附录 C。

4 河南省沿黄城市产业用水结构分析

区域的水资源利用情况与经济发展有紧密关系，产业结构决定水资源利用状况，水资源也会制约产业发展。产业结构的调整要考虑到对资源的压力，通过优化水资源利用结构倒逼产业结构调整，有利于提高水资源利用效率^[77]。为了了解沿黄城市用水量、用水效率，以及用水量与产业结构相关关系，需通过多种指标从时空维度对城市产业用水情况进行分析，为后文产业结构优化奠定基础。

4.1 产业结构和用水结构协调度分析

4.1.1 水-产结构协调度相关参数构建

为了解沿黄城市产业结构和用水结构的协调程度，出于数据考虑，需从宏观角度对近年来河南省沿黄区域三次产业协调度变化形式进行分析。通过引进产业结构偏水度（P）、用水结构粗放度（C）、用水结构和产业结构协调度（H）定量描述产业结构和用水结构两者间的协调程度^[78]。产业结构偏水度（P）是指城市中产业结构偏向单位产出用水量多的产业程度^[79]，水结构粗放度（C）是指用水结构偏向于用水量高产业的程度^[80]，而H则是结合两项指标描述城市产业结构和用水结构的协调度。具体公式如下：

$$P = \frac{N \times E - \sum_{i=1}^N E_i \times i}{(N-1) \times E} \quad (4-1)$$

$$C = \frac{N \times W - \sum_{i=1}^N W_i \times i}{(N-1) \times W} \quad (4-2)$$

$$H = 1 - \sqrt{PC} \quad (4-3)$$

考虑到数据可得性，将产业合并为三次产业。i表示单位产出用水量从高到低的产业排序，沿黄城市中第一产业均排位第一，第三产业排位第二，第二产业排位第三；N表示产业数量，在本文中N=3；E为城市生产总值， E_i 为城市第i产业的生产总值；W为城市用水总量， W_i 表示城市第i产业的用水量。P、C两个指标越靠近1表明城市产业结构或用水结构偏向于用水量大、用水效率低的产业；P、C越靠近零，则表明城市产业结构、用水结构偏向于用水量小、用水效率高的产业，H越大表示产业结构和用水结构越协调。

4.1.2 水-产结构协调度时间分析

通过计算 2015-2019 年河南省沿黄城市产业结构偏水度、水结构粗放度及两者协调度可知，沿黄城市产业结构偏水度较小，数值差异不大，说明沿黄城市普遍产业结构偏向用水效率高的产业。近五年除开封市其他城市产业结构偏水度均呈上升趋势，说明城市产业结构逐渐偏向用水量较大、用水效率低的行业。用水结构粗放度方面，沿黄城市差异性比较大，其中新乡、焦作、濮阳、开封用水结构粗放度均高于 0.65，说明这四个城市用水结构偏向用水效率低的产业。协调度方面，除开封市其他城市协调性都呈下降趋势，且濮阳市下降速度十分迅速，可见河南省沿黄城市产业结构和用水结构经过发展后，用水量较低的产业发展缓慢，没有带动产值大幅度提升，因此沿黄城市产业结构和用水结构需要进一步调整。

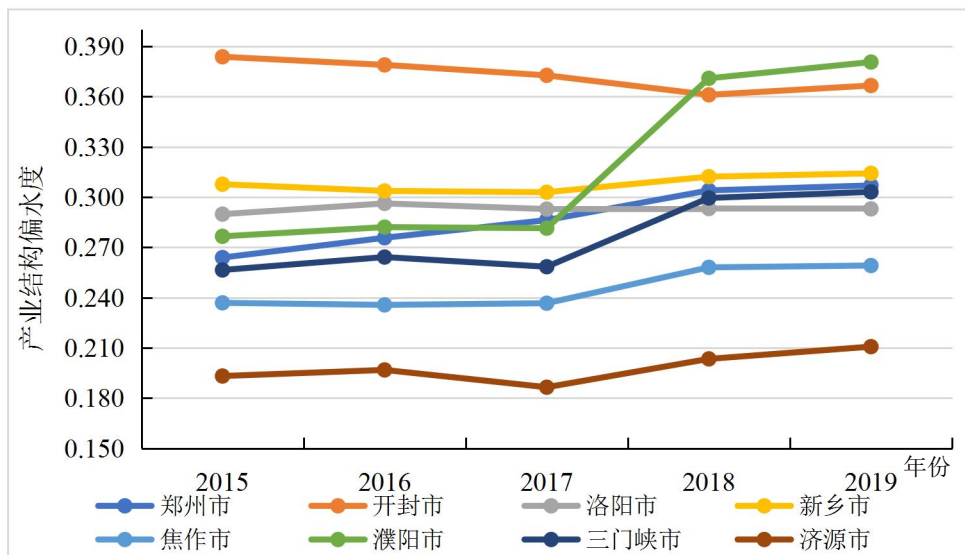


图 4-1 沿黄城市产业结构偏水度

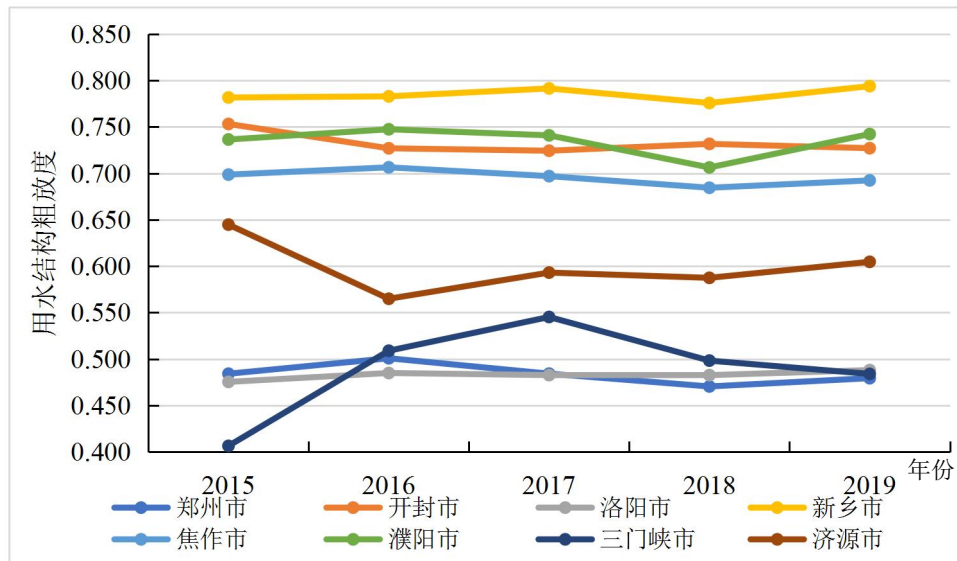


图 4-2 沿黄城市用水结构粗放度

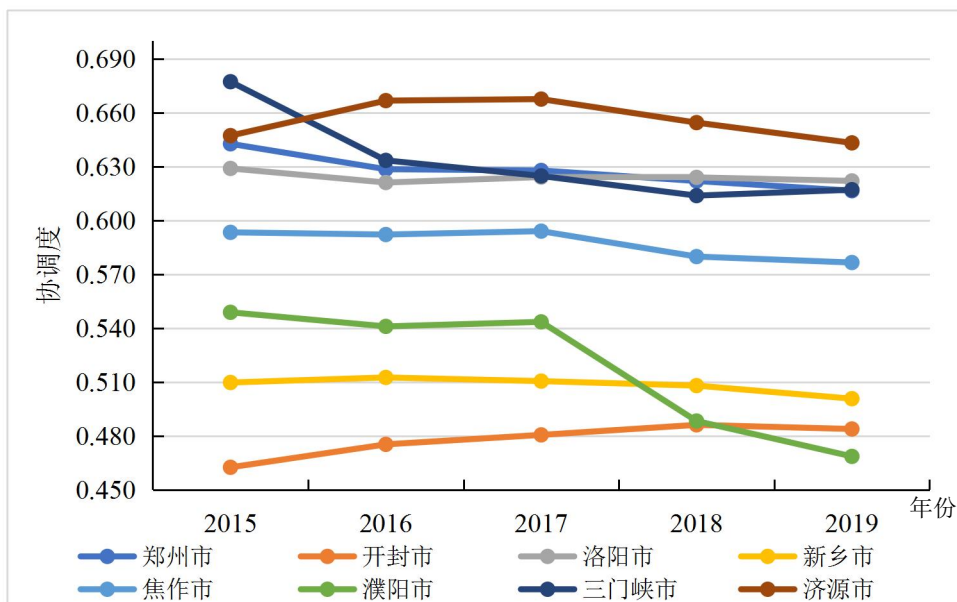


图 4-3 沿黄城市用水结构和产业结构协调度

4.1.3 水-产结构协调度空间分析

选取 2017 年河南省产业结构偏水度、用水结构粗放度及二者协调度数据进行空间分析，根据地级市所处位置，将河南省划分为豫东、豫中、豫西、豫北、豫南，其中河南省沿黄区域主要涉及到豫北、豫西，非沿黄区域则主要为豫东、豫中、豫南等地，具体划分情况如下表：

表 4-1 河南省地级市区域划分

分类	所属城市
豫东地区	开封、商丘、周口
豫西地区	洛阳、三门峡、平顶山
豫南地区	南阳、驻马店、信阳
豫北地区	安阳、新乡、焦作、濮阳、鹤壁、济源
豫中地区	郑州、许昌、漯河

经过分析发现河南省地级市产业结构偏水度、用水结构粗放度空间差异显著。（1）从河南省产业结构偏水度来看，从沿黄八个地级市来看，三门峡市产业结构偏向用水效率低的产业，而郑州市、洛阳市、济源市、濮阳市指数较低，产业结构用水效率较高。非沿黄区域中主要是豫东地区、豫南地区更偏向用水量大的产业，主要是因为豫东平原有机农业生产区，相对用水量较大。（2）从用水结构粗放度来看，沿黄城市中豫中、豫西用水结构偏向用水效率高的产业，主要是因为三门峡、郑州、洛阳、济源用水量小，焦作、新乡用水量偏高。非沿黄区域主要是豫北、豫东、豫南指数偏高，偏向用水效率低的产业。（3）从用水结构和产业结构协调度来看，豫中地区及沿黄区域产业结构和用水结构较为协调，但协调度数值都并不高，例如沿黄区域整体协调度指数为 0.56，说明沿黄城市产业结构和用水结构虽然在河南省发展形势较好，但仍有较大的调整空间。从沿黄城市来看，济源、郑州、洛阳协调度较好，三门峡、焦作、濮阳、新乡适中，开封协调度最低。其中开封市协调度最低的主要原因是开封市总用水量的 60%-70%都用在了农业上，因此造成了开封市产业结构偏向用了用水高的产业。

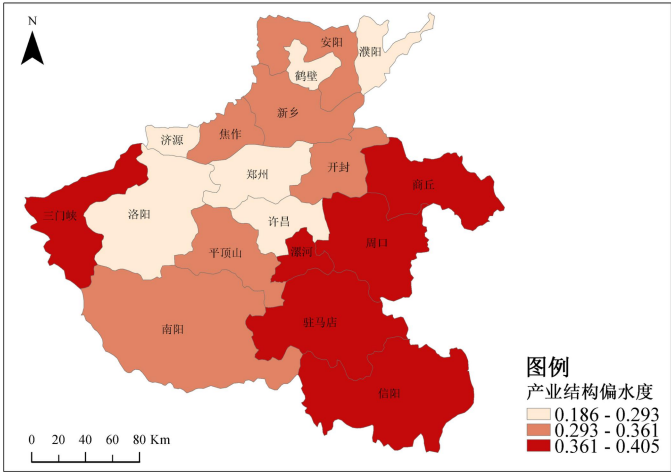


图 4-4 2017 年河南省产业结构偏水度

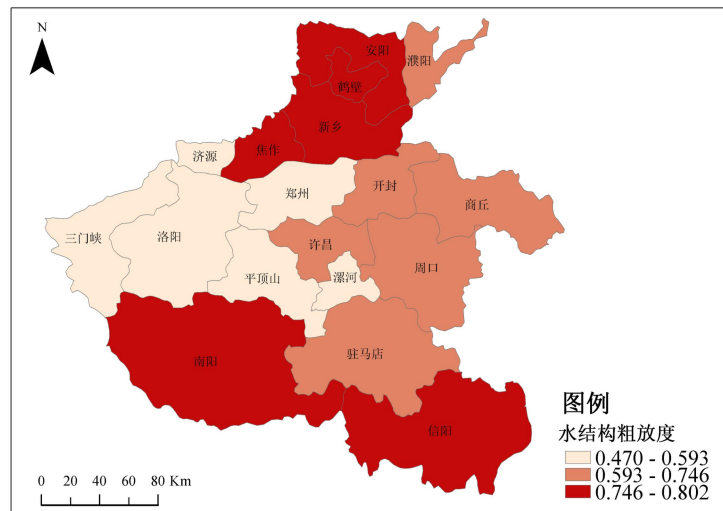


图 4-5 2017 年河南省用水结构粗放度

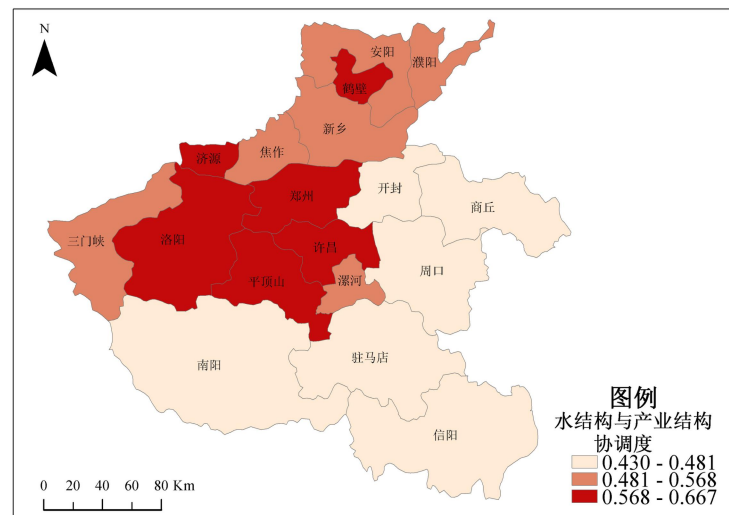


图 4-6 2017 年河南省水结构与产业结构协调度

4.2 2017 年城市产业用水效率分析

根据上述研究可知，河南省虽然沿黄区域产业结构和用水结构较为协调，但整体协调程度并不高，同时沿黄区域南岸涉及郑州、洛阳、开封等三大城市，是河南省经济发展的重点，因此立足黄河流域，针对沿黄城市以水定产的研究具有重要意义。

4.2.1 城市细分行业用水量

以 2017 年用水情况为基础，从地级市的产业入手，分析河南省各地级市细分产业的用水效率。目前河南省各地级市工业和服务业用水量没有公布，因此要借助其他相关数据对各地级市第二产业部门、第三产业部门用水量进行估算。目前官方文件中没有公

布第三产业用水情况,本文借鉴李俊^[81]等人将城乡环境综合用水扣除居民生活用水作为近似第三产业用水量,其中城乡环境综合用水数据来自《河南省水资源公报》,居民生活用水利用各地区人均年生活用水量与该地区用水人口相乘求得。服务业各行业的用水量主要采用统计年鉴中服务行业从业人员数推算,得到建筑业、交通业、批零住餐、其他服务业的耗水量。

表 4-2 2017 年河南省地级市服务业用水量(万立方米)

地级市	B5	B6	B7	B8
郑州市	11606.932	4462.687	25510.421	26342.015
开封市	10871.975	3080.452	14557.833	12370.501
洛阳市	6781.775	2364.379	13568.216	11214.096
平顶山市	1872.253	910.493	4133.467	3621.876
安阳市	18477.969	3370.231	14117.291	11123.598
鹤壁市	1885.742	657.858	2920.287	2741.058
新乡市	10549.331	2116.664	9636.768	8629.155
焦作市	2268.481	1782.651	5621.808	4736.708
濮阳市	4580.213	1181.536	5954.931	4988.788
许昌市	4060.430	1954.496	10793.430	8080.047
漯河市	3462.203	1210.051	4553.029	4216.792
三门峡市	2172.573	1486.360	4875.523	5025.798
南阳市	9345.980	3414.646	17395.154	14098.612
商丘市	6455.653	1876.045	11302.406	7269.422
信阳市	15865.916	6573.006	15999.094	12308.014
周口市	10229.740	565.961	10994.956	10672.284
驻马店市	6773.448	1352.614	8060.284	6308.855
济源市	974.828	605.277	1771.580	1899.307

河南省地级市工业各行业用水量没有全部公布,本文利用河南省及其各地级市规模以上工业企业各行业的经济增加值、河南省规模以上工业企业各行业用水量等数据推算出各地市各行业的用水量,同时分别利用地级市规模以上工业企业总用水量和已知的三个地级市各行业用水量减少误差和核对检验。最后,利用各市工业用水及各城市规模以上分行业用水量占比预估计分行业的用水量,且将其合并为采矿业(B2)、制造业(B3)、电热气水生产及供应业(B4)三个部门。另外农业用水量在《河南省水资源公报》可获得,具体数据如下:

表 4-3 2017 年河南省地级市工业及农业用水量（万立方米）

地级市	B2	B3	B4	B1
郑州市	1753.428	12163.899	45602.673	48960.000
开封市	0.000	14575.262	7494.738	91210.000
洛阳市	3403.236	10528.725	39958.039	49140.000
平顶山市	18221.232	14918.483	27000.285	30760.000
安阳市	935.652	6631.800	8177.538	87850.000
鹤壁市	751.942	1563.520	4488.538	28090.000
新乡市	621.420	12239.782	8952.585	145240.00
焦作市	1772.954	12297.114	11706.974	85890.000
濮阳市	202.146	5841.979	4652.091	98400.000
许昌市	921.719	3722.765	6340.088	35640.000
漯河市	0.000	5010.310	4967.750	14880.000
三门峡市	7455.937	270.284	8293.959	14410.000
南阳市	1988.453	7386.495	10671.363	131540.00
商丘市	0.001	3277.950	5753.654	91640.000
信阳市	1044.336	24815.193	7941.314	100480.00
周口市	5.478	3135.362	6185.944	113420.00
驻马店市	180.248	425.782	10604.333	45940.000
济源市	611.141	2271.759	6903.471	11270.000

4.2.2 城市用水相关参数构建

得知沿黄区域各城市用水量后，通过 2017 年投入产出表计算河南省沿黄地级市用水效率，利用直接用水系数（ h_j ）、完全用水系数（ h_j^1 ）、用水乘数（ m_j ）3 个指标^[82]来反映，具体计算公式如下：

（1）直接用水系数。直接耗水系数是指生产一单位产品的过程中消耗的自然形态的水资源量。

$$H = (h_j), h_j = w_j/x_j \quad (4-4)$$

（2）完全用水系数。完全耗水系数是指增产一单位产品所需整个经济体系总用水量的增加量。

$$H^1 = (h_j^1), H^1 = H(I - A)^{-1} \quad (4-5)$$

（3）用水乘数，该指标是指某一部门增加单位产值整个经济系统所增加的效应系数指标，用于反映经济行业发展用水的潜在效应。

$$M = (m_j), m_j = h_j^1/h_j \quad (4-6)$$

式中： w_j 为第 j 部门的取水量，万立方米； x_j 为第 j 部门总产出量，万元； c_j 为第 j 部门的增加值； I 为单位矩阵； A 为直接消耗系数矩阵， $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵，即完全需求系数矩阵。

4.2.3 城市用水系数分析

在河南省直接用水系数方面，沿黄 8 个城市中直接用水系数前三的产业为农业、电热气水生产及供应业、批零住餐，且均为农业用水系数最大。非沿黄城市中，除南阳市、平顶山市，其余城市的直接用水系数前三的产业也为农业、电热气水生产及供应业、批零住餐业，但半数城市用水系数最大的产业为电热气水生产及供应业。河南省作为粮食大省，农业资源丰富，而农业灌溉本身用水量较大，电热气水生产及供应业和批零住餐也均是高用水产业，因此这些行业成为低用水效率行业均可预料。针对上述行业应该通过技术改进提升本部门的水资源利用效率。在河南省直接耗水用数最低的产业基本为制造业和交通业，说明在河南省中这两个产业用水效率高，可以考虑进一步扩大经济规模。

表 4-4 2017 年河南省直接用水系数 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)

地级市	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
郑州市	128.343	3.580	1.086	89.285	9.659	4.987	23.990	7.108
开封市	266.603	0.000	3.882	58.234	24.410	11.046	50.172	14.464
洛阳市	103.105	17.497	1.549	146.002	9.704	4.721	22.347	6.392
新乡市	395.486	15.690	2.990	59.631	13.050	5.548	24.995	7.278
焦作市	364.938	10.228	3.004	76.925	7.961	4.804	20.511	5.846
濮阳市	319.414	2.108	5.056	64.453	10.851	4.810	21.982	6.346
三门峡	76.315	4.156	0.215	44.490	13.195	8.087	34.601	10.233
济源市	232.607	8.750	1.684	152.089	14.369	8.659	35.987	10.729
许昌市	99.326	17.979	1.850	105.128	12.124	6.645	31.383	8.767
漯河市	65.421	0.000	2.594	105.600	13.560	6.380	28.007	8.167
南阳市	140.381	32.081	2.577	169.661	11.336	5.307	24.059	6.967
商丘市	146.737	8.868	0.952	97.541	8.119	3.614	16.462	4.708
信阳市	157.288	3.441	5.146	17.808	16.246	7.372	31.248	9.010
周口市	131.398	0.321	1.254	153.289	9.706	3.131	18.786	5.557
驻马店	69.787	1.566	0.079	75.802	6.588	2.806	12.796	3.724
平顶山	69.443	25.075	4.190	81.085	5.317	2.708	12.181	3.539
安阳市	232.910	12.425	1.762	56.529	19.256	8.101	36.011	10.308
鹤壁市	326.040	4.296	0.338	109.372	10.074	4.724	21.193	6.215

(注：加粗城市为沿黄城市，下同)

完全用水系数与直接用水系数相比，考虑了中间投入产品的水资源，因此在表征水资源利用效率上更加有说服力^[83]。从各城市用水情况来看，郑州、开封、洛阳、三门峡、

济源、安阳、鹤壁、许昌、漯河、驻马店、完全用水量前三产业均有农业、电热气水生产及供应业、批零住餐。新乡、焦作、濮阳、商丘、周口用水前三产业为农业、电热气水供应和制造业。平顶山、南阳的用水前三产业为农业、电热气水生产及供应业及采矿业。从上述情况可知沿黄城市完全用水量高的行业基本为农业、电热气水生产及供应业、批零住餐、制造业。在非沿黄城市中则为电热气水生产及供应业、农业、批零住餐、采矿业。

表 4-5 2017 年河南省完全用水系数 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)

地级市	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
郑州市	137.295	9.779	11.812	104.553	16.239	14.300	30.593	13.643
开封市	316.262	0	50.654	80.605	52.320	30.118	69.841	30.921
洛阳市	120.259	26.159	20.382	175.021	20.717	18.538	31.725	15.154
新乡市	456.669	16.131	59.711	89.312	45.523	24.077	44.597	22.702
焦作市	412.430	27.977	47.921	103.025	26.780	22.453	36.485	18.388
濮阳市	376.339	22.779	54.002	92.152	39.238	23.329	40.975	21.154
三门峡	88.842	12.191	4.540	58.571	17.917	16.507	40.750	16.119
济源市	263.899	24.414	32.165	178.924	27.998	27.301	48.794	22.336
许昌市	118.496	26.611	22.745	125.145	22.692	19.018	41.201	17.552
漯河市	80.397	0	21.023	123.951	25.603	18.251	36.355	16.339
南阳市	170.516	44.839	35.389	196.356	30.833	23.044	37.754	19.227
商丘市	175.079	21.921	30.035	115.931	25.649	16.764	28.241	14.564
信阳市	191.477	15.312	33.694	32.645	36.433	20.227	43.798	19.520
周口市	160.038	0.426	32.439	175.299	29.300	16.181	31.541	17.054
驻马店	84.444	8.037	16.005	91.197	16.802	11.589	19.581	9.837
平顶山	85.767	40.341	23.791	112.593	16.897	15.676	20.609	11.591
安阳市	273.915	21.821	38.713	77.034	43.268	23.588	51.254	22.838
鹤壁市	362.503	20.210	32.946	129.994	27.865	19.941	34.372	17.177

比较直接用水和完全用水可以看出行业间接用水情况,将直接用水系数和间接用水系数分四类情况,即高直接用水系数-高间接用水系数(高-高型),这些行业对水资源依赖比较大,属于水资源密集型行业,考虑到社会实际需求,可限制发展;低直接用水系数-低间接用水系数(低-低型),这类行业在不考虑实际需求及资源情况,应该优先发展该类行业;低直接用水系数-高间接用水系数(低-高型),这类产业用水量不容易察觉,有一定隐蔽性,要利用减少上游中间产品的使用,或者改用低用水的替代产品;高直接用水系数-低间接用水系数(高-低型),这类产业应该提高发展水平和用水效率,可适当发展^[84]。

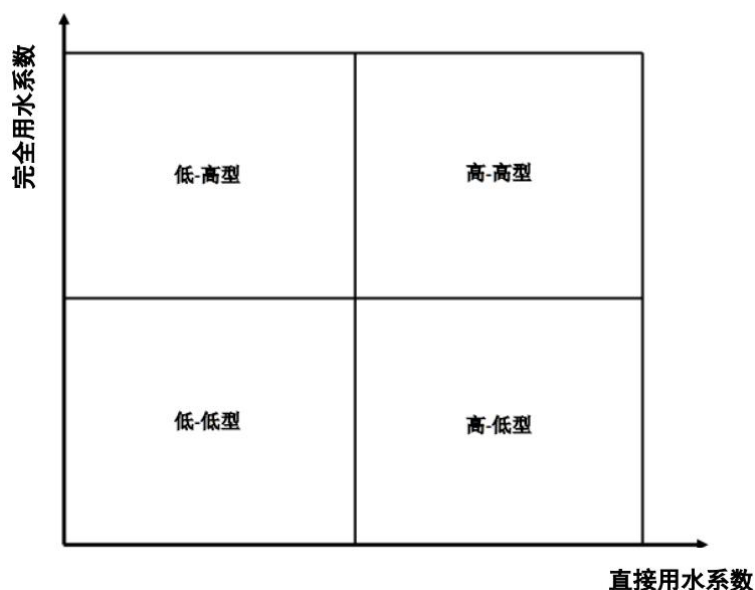


图 4-7 产业耗水类型划分标准

首先从郑州都市圈来看：（1）郑州市的高-高型产业为电热气水生产及供应业、批零住餐；低-低型产业为采矿业、其他服务业；低-高型产业为交通业、制造业；高-低型产业为农业、建筑业。（2）开封市的高-高产业为农业、建筑业、电热气水生产及供应业；低-低产业为交通业；低-高产业为制造业；高-低产业为批零住餐、其他服务业。（3）新乡市的高-高产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低产业为交通业、其他服务业；低-高产业为制造业、建筑业；高-低产业为批零住餐、采矿业；（4）焦作市的高-高产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低产业为交通业、其他服务业；低-高产业为建筑业、制造业；高-低产业为批零住餐、采矿业。

从沿黄其他四个城市来看：（1）洛阳市的高-高产业为电热气水生产及供应业、农业；低-低产业为其他服务业、建筑业；低-高产业为制造业、交通业；高-低产业为批零住餐、采矿业。（2）濮阳市的高-高产业为农业、电热气水生产及供应业、建筑业；低-低产业为其他服务业、交通业、采矿业；低-高产业为制造业；高-低产业为批零住餐。（3）三门峡的高-高产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低产业为其他服务业、制造业；低-高产业为交通业、采矿业；高-低产业为批零住餐、建筑业；（4）济源市的高-高产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低产业为其他服务业、采矿业；低-高产业为交通业、制造业；高-低产业为批零住餐、建筑业。

在郑州都市圈的四个城市中整体上高-高型产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低型为交通业、其他服务业；高-低型为批零住餐、采矿业；低-高型为制造业、建

筑业。其余四个城市中高-高型产业为农业、电热气水生产及供应业；低-低型产业为其他服务业、采矿业；高-低型产业为批零住餐、建筑业；低-高型产业为制造业、交通业。两个区域对比可知，农业、电热气水生产及供应业，归属于水资源密集型产业，对水资源依赖大；在郑州都市圈优先发展产业主要为交通业、其他服务业，其他四个城市优先发展的为采矿业、其他服务业，主要原因是郑州都市圈对内对外交流频繁，交通业产值高，而其他四个城市采矿业优先发展主要是因为濮阳市是油气型城市，三门峡为金属非金属型城市，济源市矿产资源也十分丰富，有完整的矿业产业体系，可以说采矿业对这些城市发展十分重要，采矿流程成熟，能较好循环用水，提高用水效率。高-低型产业主要为批零住餐业，直接用水量大，但对其他产业用水拉动较小，需要借助高新技术，提高用水效率。低-高型产业基本为制造业，它们具有较大隐藏用水，可将上游高用水产业替换成低用水产业。

表 4-6 2017 年河南省用水乘数

地级市	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
郑州市	1.070	2.732	10.875	1.171	1.681	2.868	1.275	1.919
开封市	1.186	0.000	13.048	1.384	2.143	2.727	1.392	2.138
洛阳市	1.166	1.495	13.162	1.199	2.135	3.926	1.420	2.371
新乡市	1.155	1.028	19.971	1.498	3.488	4.340	1.784	3.119
焦作市	1.130	2.735	15.953	1.339	3.364	4.674	1.779	3.145
濮阳市	1.178	10.807	10.681	1.430	3.616	4.850	1.864	3.333
三门峡	1.164	2.933	21.158	1.317	1.358	2.041	1.178	1.575
济源市	1.135	2.790	19.102	1.176	1.948	3.153	1.356	2.082
许昌市	1.193	1.480	12.298	1.190	1.872	2.862	1.313	2.002
漯河市	1.229	0.000	8.104	1.174	1.888	2.861	1.298	2.001
南阳市	1.215	1.398	13.732	1.157	2.720	4.342	1.569	2.760
商丘市	1.193	2.472	31.538	1.189	3.159	4.639	1.716	3.094
信阳市	1.217	4.449	6.547	1.833	2.243	2.744	1.402	2.167
周口市	1.218	1.326	25.878	1.144	3.019	5.168	1.679	3.069
驻马店	1.210	5.133	202.384	1.203	2.550	4.130	1.530	2.642
平顶山	1.235	1.609	5.678	1.389	3.178	5.789	1.692	3.275
安阳市	1.176	1.756	21.976	1.363	2.247	2.912	1.423	2.216
鹤壁市	1.112	4.704	97.397	1.189	2.766	4.221	1.622	2.764

用水乘数可以更加反映整个产业部门的用水经济效益，表示一个产业增加单位产值而整个经济系统所增加的用水量。在沿黄 8 个城市中，郑州市用水系数较高的产业为制造业、交通业、采矿业；开封市用水系数较高的产业为制造业、交通业、建筑业；洛阳市用水系数较高的产业为制造业、交通业、其他服务业；新乡市用水系数较高的产业为

制造业、交通业和建筑业；焦作市用水系数较高产业为制造业、交通业、建筑业；濮阳市用水系数较高的产业为采矿业、制造业、交通业；三门峡用水系数较高的产业为制造业、采矿业、交通业；济源市为制造业、交通业、采矿业。从上可知，沿黄城市用水较高的产业基本聚焦在制造业、交通业、建筑业、采矿业上，说明这些产业部门在生产过程中对水的依赖性比较强^[85]，其中制造业、交通业虽用水乘数大，但直接用水量少，说明这些产业用水较为隐蔽，对水资源消耗主要是其他产业提供，与其他部门之间的经济联系较为紧密。另外在上述城市中农业、电热气水生产及供应业和批零住餐用水乘数较小，但直接用水和完全用水均较大，说明这些产业对整个经济系统总用水量间接带动程度较低^[86]。

4.2.4 城市用水情况空间分析

为了综合衡量地级市用水水平，利用产业直接用水系数、完全用水系数、用水乘数等指标，采用熵值法测算河南省各地级市用水效率，计算结果绘制 GIS 图。河南省地级市直接用水系数较高的区域主要处于黄河流域两边，尤其以新乡市和焦作市为先。相比直接用水系数，完全用水系数较高的城市增加了商丘市、周口市和信阳市等非沿黄城市，说明在产业生产的过程中，河南省沿黄城市直接取水量非常直观，非沿黄城市直观直接取水量不高，却有隐蔽的用水部门，最终会导致其属于高用水城市。例如信阳市的制造业每万元产值直接取水量为 8.983 立方米，但跟该产业有联系的产业会从制造业取水，导致间接用水扩大近十倍。用水乘数大的城市主要在沿黄城市以及豫东地区，说明河南省沿黄城市每增加一个单位产值用水量较大，因此针对沿黄区域的产业结构调整具有现实意义。

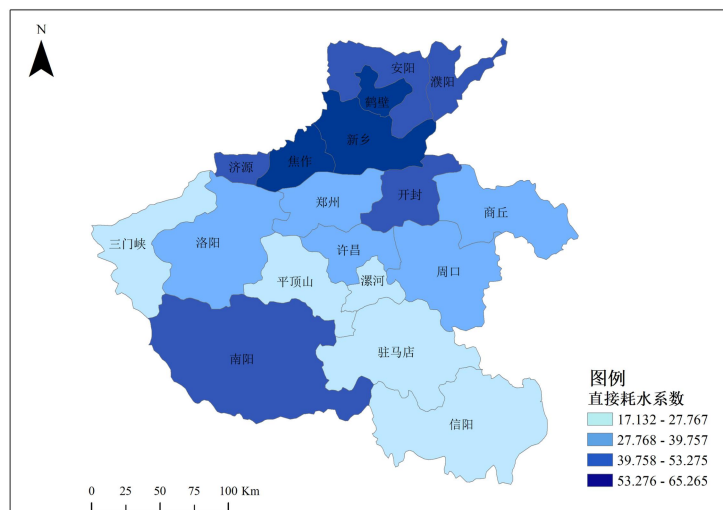


图 4-8 2017 年河南省直接用水系数

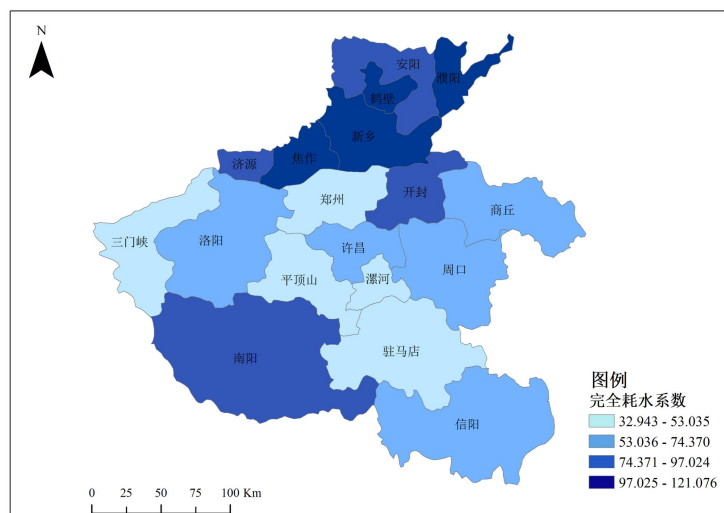


图 4-9 2017 年河南省完全用水系数

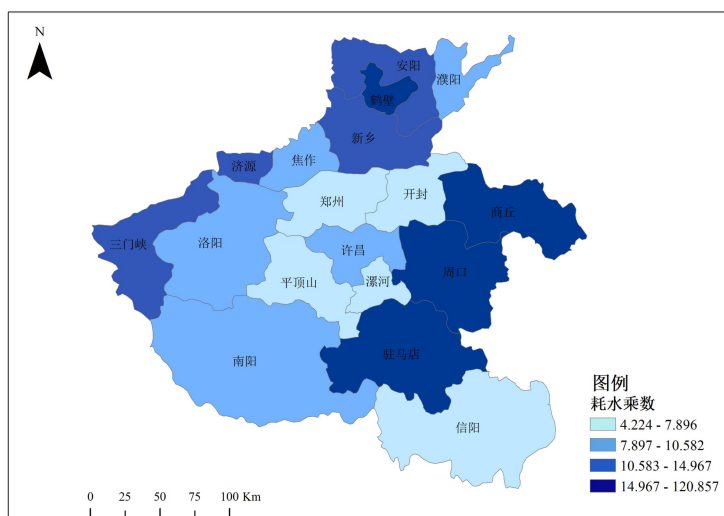


图 4-10 2017 年河南省用水乘数

4.3 城市产业关联度分析

4.3.1 产业关联度相关参数构建

用水系数仅能表示产业的用水效率，但对产业之间的综合关联表征不明显，因此可利用综合影响力系数（ F_j ）、感应度系数（ E_j ）来表示产业之间关联效应^[87]，计算公式如下：

（1）影响力系数，该指标表示某部门增加一单位最终使用而对各部门的生产需求的波及程度，该值越大表示该部门在经济发展中地位越重要，压缩该产业可能对经济带来负面影响^[88]。

$$F_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (4-7)$$

（2）感应度系数，该系数反映了某部门对其他部门的推动作用，系数越大表示推动作用越强，也就是其他部门对该部门的需求感应程度越大^[89]。

$$E_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (4-8)$$

式中： $\sum_{i=1}^n b_{ij}$ 表示完全需求系数矩阵第j列之和； $\sum_{j=1}^n b_{ij}$ 表示完全需求系数矩阵第i列之和； $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}$ 表示完全需求系数矩阵各列之和的平均； $F_j > 1$ 表示该部门对其他部门的影响程度超过了社会平均水平； $E_j > 1$ 表示该部门收到额感应程度高于社会平均感应程度，一定程度上属于基础产业。

4.3.2 产业关联度结果分析

综合影响力系数、感应度系数和完全用水系数，对河南省沿黄城市各产业进行分类，结果下表：（1）产业影响力和感应力均高于社会平均水平的产业主要有开封、新乡、焦作、濮阳、三门峡的制造业、其他服务业，且其他服务业完全用水系数较小，因此在这些城市中其他服务业是优先需要鼓励发展的产业。另外郑州、洛阳、济源中仅有制造业两个指标均大于1，因此在上述城市中积极鼓励制造业发展，同时可借助创新能力，提高发展效率和用水效率。（2）仅产业影响力系数高于社会平均水平的产业主要有焦作市、济源市的农业、电热气水生产及供应业、采矿业、交通业、建筑业；开封市、濮阳市、三门峡的农业、电热气水生产及供应业、交通业、建筑业；洛阳市的电热气水生产及供应业、交通业、建筑业；郑州市的交通业、建筑业；新乡市的采矿业、批零住餐

业。整体来说电热气水生产及供应业、交通业、建筑业对其他产业有较强拉动作用，在城市经济发展中有非常重要的地位。同时在上述三个产业中交通业、建筑业完全用水完全用水系数小，有较高的用水效率，属于低用水产业，可它们感应度系数小于 1，表示其他产业对它们依赖程度低，一旦鼓励发展可能会导致产能过剩，需要根据社会需求进行宏观把控。因此交通业和建筑业可在一定程度上鼓励发展，但要避免出现产能过剩的现象。（3）仅产业感应度系数高于社会平均水平的产业主要有郑州、洛阳、三门峡、济源的其他服务业，说明虽然在产业结构中它们对其他产业发展拉动作用较小，但其他产业的确对其有依赖性，同时这些产业用水系数较小，用水效率高，是低用水产业，无需抑制发展。（4）产业影响力系数与感应度系数均小于社会平均水平主要有郑州、开封、洛阳、濮阳中采矿业、批零住餐，说明这四个城市中这两个行业发展水平不高，不是基础性产业，并且其中批零住餐属于高用水产业，需要在一定规模上限制发展，或者采用节水工具，提高它用水效率。另外沿黄大部分城市里农业也是两个指标都低于社会平均值，所以从理论上要严格抑制发展，但出于河南省作为粮食大省的定位，农业具有重要地位，所以不可以一味抑制发展，而是要积极利用高新技术，实现规模种植，降低灌溉用水量，迈入现代化农业行列。

表 4-7 综合影响力系数、感应度系数及水资源利用效率评价

沿黄城市	沿黄城市	影响力>1	影响力<1
郑州市	感应度>1	制造业（11.812）	其他服务业(13.643)
	感应度<1	建筑业(16.239)	农业(137.300)
		交通业(14.301)	电热气水 (104.552)
			批零住餐(30.594)
开封市	感应度>1	制造业(50.654)	采矿业(9.779)
	感应度<1	其他服务业(30.922)	
		农业(316.262)	
		电热气水(80.605)	采矿业
洛阳市	感应度>1	建筑业(52.320)	批零住餐(69.841)
	感应度<1	交通业(30.118)	
		制造业(20.382)	其他服务业(15.154)
		电热气水(175.021)	农业(120.259)
		建筑业(20.716)	批零住餐(31.726)
		交通业(18.538)	采矿业(26.159)

新乡市	感应度>1	制造业(59.711) 其他服务业(22.702)	
	感应度<1	采矿业(16.131) 批零住餐(44.598)	农业(456.669) 电热气水(89.312) 建筑业(45.523) 交通业(24.077)

表 5-8 综合影响力系数、感应度系数及水资源利用效率评价（续表）

沿黄城市	沿黄城市	影响力>1	影响力<1
焦作市	感应度>1	制造业(47.921) 其他服务(18.389)	
	感应度<1	农业(412.430) 电热气水(103.025) 采矿业(27.977) 建筑业(26.780) 交通业(22.453)	批零住餐(36.486)
濮阳市	感应度>1	制造业(54.002) 其他服务(21.154)	
	感应度<1	农业(376.338) 电热气水(92.152) 建筑业(39.238) 交通业(23.330)	采矿业 (22.779) 批零住餐(40.975)
三门峡市	感应度>1		制造业 其他服务业
	感应度<1	电热气水(58.571) 建筑业 (17.917) 交通业 (16.507)	农业(88.842) 采矿业(12.191) 批零住餐(40.750)
济源市	感应度>1	制造业 (32.165) 电热气水 (178.924)	其他服务业 (22.337)
	感应度<1	建筑业 (27.998) 交通业 (27.302) 采矿业 (24.415)	农业 (263.899) 批零住餐 (48.794)

以水定产中针对着重优化的产业要考虑到用水效率低且与其他产业关联度小的产业，也就是产业感应度系数均低于社会平均水平的产业，主要有沿黄各地级市的农业，电热气水生产及供应业，以及郑州、开封、洛阳、濮阳中的批零住餐业。针对上述三个产业要保证利用约束条件限制发展。关于农业的约束既要考虑到农业作为高耗水产业需

要限制发展，但同时应考虑到河南省作为国家粮库，不能过于限制其发展，因此在后续研究中，应将农业限制独立出来。

5 河南省沿黄城市产业结构调整

本章从多目标线性规划中有无沿黄城市用水约束,将规划方案分成节水型与均衡性两种情景,节水型以河南省沿黄城市增加值最大、用水量最小为目标函数,均衡型以河南省沿黄城市增加值最大为目标函数,基于城市间投入产出模型测算 2030 年、2035 年城市产业调整规模,保障城市在以水定产的情况下实现产业结构调整。

5.1 多目标线性规划

基于 2017 年河南省区域间投入产出表,建立优化模型,具体应该包含用水量和经济目标的多目标优化模型,由于两个目标不能同时实现最优,因此可利用多目标线性规划在两个目标中求解一个令人满意的折中。针对不同目标函数要进行无量纲处理,同时将多目标规划转化为单目标规划,即给两个目标赋予 0.5 的权重因子。

(1) 目标函数:

目标函数 1:沿黄区域整体收益最大,即沿黄区域内各城市各产业增加值之和最大,公式如下:

$$\max \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n v_i^r X_i^r \quad (5-1)$$

其中, m 为城市数量, n 为城市产业数量, v_i^r 是 r 城市 i 部门的增加值率, X_i^r 表示 r 城市 i 部门的产出, 本文 $m=8, n=8$ 。

目标函数 2: 沿黄区域整体用水量最小, 即沿黄区域各城市各产业最小的用水量, 公式如下:

$$\min \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n w_i^r X_i^r \quad (5-2)$$

其中 w_i^r 是 r 城市 i 部门的直接用水系数, X_i^r 表示 r 城市 i 部门的产出。

(2) 约束条件:

约束条件 1: 投入产出模型的约束条件。投入产出模型(Leontief, 1936)是一个分析框架,它代表了不同经济部门之间的货币交易及其在经济体系中的相互依

赖性。城市间投入产出模型也为描述不同城市之间的产业内关系提供了一个框架。具体公式如下：

$$X_i^r = \sum_s^m \sum_j^n x_{ij}^{rs} + \sum_s^m y_i^{rs} \quad (5-3)$$

n 为产业部门数量， m 为城市数量， X_i^r 是 r 城市 i 部门的产出， x_{ij}^{rs} 表示 s 城市 i 部门的产出对 r 城市 j 部门的中间投入量， y_i^{rs} 表示 s 城市 i 部门的最终需求。

通过引入直接系数可以改写上述等式，具体结构如下：

$$X_i^r = \sum_s^m \sum_j^n a_{ij}^{rs} x_j^r + \sum_s^m y_i^{rs} \quad (5-4)$$

其中直接系数 a_{ij}^{rs} 表示为增加 r 城市 j 部门的单位产出所需要的 s 城市 i 部门的投入量， X_j^r 是 r 城市 j 部门的产出。

在优化模型中，确保各部门从产品的需求不超过产出，即约束条件如下：

$$\sum_s^m \sum_j^n a_{ij}^{rs} x_j^r + \sum_s^m y_i^{rs} \leq X_i^r \quad (5-5)$$

约束条件 2：最终使用约束。

$$\underline{Y}_i^r \leq Y_i^r \leq \overline{Y}_i^r \quad (5-6)$$

$\underline{Y}_i^r$ 为城市 r 部门产业 i 的最终使用的下限， $\overline{Y}_i^r$ 为城市 r 部门产业 i 的最终使用上限，本文上下限是在 2017 年基础上提高 1.2%和降低 1.2%。

约束条件 3：产业结构约束。为实现目标函数的同时，要确保城市中高用水部门的最优产出值不为 0，以符合城市实际情况，因此根据前文研究，将对电热气水生产供应业、批零住餐业产出设置变化范围。公式如下：

$$X_i^r / \sum_{i=1}^n X_i^r \leq \overline{L}_i^r \quad (5-7)$$

其中 X_i^r 是 r 城市 i 部门的产出， $\overline{L}_i^r$ 是 2017 年 r 城市 i 部门的实际产出比。

约束条件 4：农业生产的基线。从第四部门水资源效率分析可知，农业用水强度高，即水资源越多，经济效益越低，因此模型中农业优化生产有很强的趋向于零的趋势。并且河南是粮食大省，一定要将粮食安全作为硬约束。根据近五年来农业产值的变化，确定各城市农业产出的上下限，表示如下：

$$\underline{X}_i^r \leq X_i^r \leq \overline{X}_i^r \quad (5-8)$$

$\underline{X}_i^r$ 为 r 城市 i 部门的产出的下限， $\overline{X}_i^r$ 为产出的上限

约束条件 5：用水限制。为确保最优生产的用水量不超过实际用水量，将实际用水量总量为基础，具体公式如下：

$$\sum_{i=1}^n w_i^r X_i^r \leq W^r \quad (5-9)$$

w_i^r 是 r 城市 i 部门的直接用水系数, W^r 是目标年城市实际或规划用水量, 此时 n 涉及到 8 个沿黄城市及一个非沿黄区域。

5.2 参数设定

根据河南省政府发布的《河南省人民政府关于印发河南省国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要的通知》, 锚定在 2035 年实现高质量发展、高品质生活、高效能治理。根据“十四五”规划中经济和环境有关发展目标, 确定多目标线性优化模型相关指标。

表 5-1 “十四五”规划相关发展目标

指标	指标描述	2035 年
经济指标	经济增长率	年均增长 6%
环境指标	水资源用水总量	292.47 亿立方米

利用 2035 年用水情况, 根据河南省水利厅发布的 2030 年河南省地级市用水总量控制目标 (共计 297.78 亿立方米), 利用 2035 总用水量推测河南省各地级市 2035 年用水量, 结果如下:

表 5-2 河南省用水总量控制目标 (亿立方米)

地级市	2030 年	2035 年
郑州市	27.534	27.043
开封市	19.407	19.061
洛阳市	18.416	18.088
新乡市	22.408	22.008
焦作市	15.662	15.383
濮阳市	17.109	16.804
三门峡市	5.251	5.158
济源市	3.003	2.949
许昌市	11.646	11.438
漯河市	6.084	5.976
南阳市	31.935	31.366
商丘市	17.566	17.253
信阳市	24.481	24.044
周口市	23.388	22.971
驻马店市	14.036	13.786
平顶山市	15.169	14.899
安阳市	18.576	18.245
鹤壁市	6.108	5.999

由于以上数据为城市预期用水,要利用将生活用水扣除的方法得到城市的产业用水规模。因此可基于 2021 年公布的《工业与城镇生活用水定额 河南省》(DB41-T385-2020)中对生活用水定额,利用 GM(1,1)推算出 2030 以及 2035 年用水人口数,最终算出城市生活用水总量。

表 5-3 城镇居民生活用水定额

类别名称	定额单位	先进值	通用值	备注
城镇居民生活	L/(人·d)	120	130	I 型大城市及以上(城区常住人口≥300 万)
	L/(人·d)	110	120	II 型大城市(100 万≤城区常住人口≤300 万)
	L/(人·d)	100	110	中等城市(50 万≤城区常住人口≤300 万)
	L/(人·d)	90	100	I 型小城市(20 万≤城区常住人口≤50 万)
	L/(人·d)	80	90	II 型大城市(城区常住人口<20 万)

以 2008-2019 年各城市用水人口数据构建模型进行模拟,建立河南省各地市 GM(1,1)模型,并对 2020-2030 年进行预测。该模型可以利用后验差比值(C)和小误差概率(P)来验证模型预测精度。经过建模,各城市的后验差值和小误差概率均符合要求,因此最后计算得到的相关结果如下表。

表 5-4 2030 年及 2035 年预期产业用水

城市	2030 年用水人口 (万人)	2035 年用水人口 (万人)	2030 预期产业 用水(亿立方 米)	2035 预期产业用 水(亿立方米)
郑州市	864.34	1025.01	23.489	22.246
开封市	133.111	149.603	18.832	18.415
洛阳市	222.007	217.101	17.377	17.072
新乡市	85.367	88.633	22.008	21.593
焦作市	85.546	88.294	15.292	15.002
濮阳市	130.417	178.942	16.546	16.031
三门峡市	107.051	144.6	4.789	4.533
济源市	42.454	47.931	2.850	2.776
许昌市	78.231	90.004	11.308	11.049
漯河市	76.907	86.493	5.752	5.602
南阳市	265.509	311.596	30.692	29.908
商丘市	170.7	146.615	16.969	16.567
信阳市	96.121	117.394	24.031	23.495
周口市	88.192	104.34	22.975	22.483
驻马店市	95.756	112.97	13.588	13.257
平顶山市	121.653	134.049	14.643	14.320

安阳市	82.671	86.174	18.219	17.873
鹤壁市	59.453	65.206	5.873	5.741

根据上文编制的投入产出表，计算各市各产业增加值率及直接用水系数，同时整理约束条件中相关参数，结果如下：

表 5-5 约束条件涉及主要参数

城市	产业	增加值率	直接用水系数 (万立方米/元)	农业产值上限 (万元)	农业产值下限 (万元)	产业限制
郑州	B1	0.399	128.343	2851591	2345603	
	B2	0.298	3.580			
	B3	0.162	1.086			
	B4	0.201	89.285			0.026
	B5	0.194	9.659			
	B6	0.370	4.987			
	B7	0.529	23.990			0.055
	B8	0.475	7.108			
开封	B1	0.574	266.603	6942443	5228100	
	B2	0.000	0.000			
	B3	0.194	3.882			
	B4	0.229	58.234			0.021
	B5	0.246	24.410			
	B6	0.413	11.046			
	B7	0.557	50.172			0.047
	B8	0.487	14.464			
洛阳	B1	0.541	103.105	4861763	4117900	
	B2	0.265	17.497			
	B3	0.181	1.549			
	B4	0.221	146.002			0.024
	B5	0.217	9.704			
	B6	0.391	4.721			
	B7	0.550	22.347			0.054
	B8	0.477	6.392			
新乡	B1	0.565	395.486	5018158	3871762	
	B2	0.008	15.690			
	B3	0.198	2.990			
	B4	0.245	59.631			0.022
	B5	0.267	13.050			
	B6	0.420	5.548			
	B7	0.562	24.995			0.046
	B8	0.496	7.278			

表 5-6 约束条件涉及主要参数 (续表)

城市	产业	增加值率	直接用水系数 万立方米/元	农业产值上限 (万元)	农业产值下限 (万元)	产业 限制
焦作	B1	0.535	364.938	2973591	2476752	0.026
	B2	0.383	10.228			
	B3	0.202	3.004			
	B4	0.255	76.925			
	B5	0.188	7.961			0.036
	B6	0.420	4.804			
	B7	0.533	20.511			
	B8	0.461	5.846			
濮阳	B1	0.577	319.414	4331366	2823274	0.035
	B2	0.423	2.108			
	B3	0.194	5.056			
	B4	0.284	64.453			
	B5	0.254	10.851			0.048
	B6	0.417	4.810			
	B7	0.566	21.982			
	B8	0.495	6.346			
三门峡	B1	0.554	76.315	2669563	2054637	0.038
	B2	0.472	4.156			
	B3	0.075	0.215			
	B4	0.256	44.490			
	B5	0.176	13.195			0.042
	B6	0.399	8.087			
	B7	0.508	34.601			
	B8	0.455	10.233			
济源	B1	0.509	232.607	498941	321900	0.022
	B2	0.363	8.750			
	B3	0.182	1.684			
	B4	0.195	152.089			
	B5	0.175	14.369			0.034
	B6	0.391	8.659			
	B7	0.483	35.987			
	B8	0.436	10.729			
非沿黄区	B1	0.588	130.454	57564946	50803127	0.020
	B2	0.380	15.534			
	B3	0.202	1.904			
	B4	0.247	85.888			
	B5	0.263	11.589			0.052
	B6	0.432	5.348			
	B7	0.581	22.221			
	B8	0.509	6.420			

5.3 结果分析

以 2017 年为基期, 分为节水控制型和均衡型两种模型进行求解: (1) 节水型即目标条件考虑了沿黄区域用水和经济发展, 约束条件考虑河南省总用水; (2) 均衡型情景在目标函数中仅考虑沿黄区域用水, 约束条件也同样考虑河南省总用水。根据模型结算结果知道产业产值占比变化情况, 具体求解结果如下表。通过比较均衡性和节水型方案计算出的产值, 可以发现节水型方案产值会明显低于均

衡性产值方案，说明在“以水定产”的背景下一定程度上会对整体经济发展规模有所影响。

表 5-7 河南省沿黄区域结构优化模拟结果

区域	均衡性方案产值总量（亿万）			节水型方案产值总量（亿万）		
	2017	2030	2035	2017	2030	2035
沿黄区域	66264.536	85133.752	83556.117	63434.630	79152.753	77634.508

在节水型情景中，根据沿黄区域整体产业结构变化情况可知，2017 年农业、电热气水生产及供应业占比分别降低约 6%、8%，2030 年、2035 年大部分产业占比均有所降低，2030 年仅制造业占比提高了 2%，但其他产业占比都下降 4% 左右，2035 年制造业、其他服务业的占比有所提高，其他 6 个行业也有所降低，大致降低 5% 左右，降低幅度高于 2030 年。

在均衡型情景中，沿黄区域整体产业结构变化幅度均小于节水型情景，2017 年制造业占比幅度提高约 0.5%，其他产业占比都有下降，其中批零住餐下降幅度最大，约达 3%。2030 年农业、电热气水生产及供应业占比幅度分别降低约 8%、10%，其他产业规模占比都有所提高。2035 年也是农业、电热气水生产及供应业占比幅度降低，分别降低幅度为 9%，11%。

表 5-8 河南省沿黄区域节水型模拟结果

产业	2017 年产值 比重	2017 年优化后 产值比重变化率 (%)	2030 年产值 比重变化率(%)	2035 年产值 比重变化率(%)
B1	0.037	-6.344	-4.394	-5.778
B2	0.040	0.331	-4.238	-5.610
B3	0.584	0.516	2.361	1.800
B4	0.026	-8.320	-4.394	-5.778
B5	0.065	0.516	-4.394	-5.778
B6	0.046	0.516	-4.394	-3.031
B7	0.049	0.007	-4.394	-5.778
B8	0.154	0.516	-1.515	2.145

表 5-9 河南省沿黄区域均衡型模拟结果

产业	2017 年产值 比重	2017 年优化后 产值比重变化率 (%)	2030 年产值 比重变化率(%)	2035 年产值 比重变化率(%)
B1	0.037	-0.214	-7.783	-8.725
B2	0.040	-0.305	0.405	0.455
B3	0.584	0.482	0.633	0.709
B4	0.026	-2.167	-10.206	-11.441
B5	0.065	-0.123	0.633	0.709
B6	0.046	-0.259	0.633	0.709
B7	0.049	-2.913	0.009	0.010
B8	0.154	-0.285	0.633	0.709

均衡型方案考虑到全省的用水情况,但排除针对沿黄区域的用水约束。根据均衡性方案解算结果可知,在 2017 年产业结构优化后,大部分城市的产业规模有所下降,但下降程度远低于节水型模型。郑州市、开封市、洛阳市、新乡市第一产业及第三产业规模有所降低,而第二产业规模提高幅度较大;焦作市、濮阳市第一产业及第二产业规模扩大,第三产业规模缩小;三门峡市仅第一产业规模扩大,其他两个产业规模有所下降;济源市第一产业及第三产业规模扩大,而第二产业规模缩小。

从 2017 年具体产业来看,(1)在郑州市中,仅制造业占比提高,提高变化率达 0.01,其他七个产业规模均略微有所下降,其中批零住餐产业占比下降 0.002,下降变化率达 0.04。(2)开封市、新乡市的采矿业、制造业、建筑业、交通业产业占比有所上升,其他产业占比规模均有所下降。其中开封市采矿业变化最大,产业产值占比提高 0.0002,提高幅度达 0.03,而批零住餐业产值下降幅度最大,达 0.02。(3)新乡市也仍是采矿业提高幅度最大,变化率达 0.03,批零住餐产值占下降最大,达 0.001,变化幅度为 0.03。洛阳市的采矿业、制造业产业规模均有所提高,制造业变化幅度更大,产值占比提高了 0.003,变化幅度为 0.005。

(4)焦作市的农业、采矿业、制造业、建筑业等四个产业的产业规模有所提高,其中制造业产值占比提高 0.002,提高幅度相较其他产业最大,在产值占比下降产业中批零住餐业下降幅度最大,产值占比下降 0.001。(5)濮阳市的农业、采矿业、制造业、建筑业等四个产业的产业产值占比也均有所提高,分别提高 0.0001, 0.0002, 0.0007, 0.0004。(6)三门峡的农业、采矿业、建筑业、交通业等四个

产业的规模有所提高,除却农业变化幅度很小,其他三个产业的产值占比提高了0.0006,上升幅度基本达到0.01。(7)济源市的农业、制造业、建筑业、交通业及其他服务业产值占比均有提高,其中农业、建筑业、交通业占比提高了0.0007左右,制造业及其他服务业提高了0.0006。综上可知,在均衡型方案中,河南省第二产业产值占比提高幅度较大,主要是制造业及采矿业产值占比有所提高,且大部分城市是制造业占比提高幅度最大。在各城市产值占比下降的产业中均为批零住餐产业下降最大,可见该产业对各城市用水效率方面有较大影响力度,需要根据解算结果进行控制。

将2030与2035年产值比重进行比较,大部分城市的产业规模都略有提高,各城市中基本仅有农业、电热气水生产及供应业经济规模有轻微下降。(1)郑州市农业占比下降了0.0003,而电热气水生产及供应业产值占比下降了0.0004,其他产业中采矿业上升幅度最大,占比提高了0.0004。(2)开封市中农业下降幅度最大,占比下降了0.0007,其他产业中仍然是制造业提高幅度最大,占比提高了0.0007。(3)洛阳市中仅电热气水生产及供应业产值规模下降,占比下降了0.0003,其他产业中制造业占比提高幅度最大,占比提高了0.0002。(4)新乡市农业、采矿业、电热气水生产及供应业产值占比下降,农业下降幅度比较大,占比下降了0.0005,在其他占比提高产业里采矿业占比提高了0.0006,提高幅度最大。(5)焦作市中采矿业、电热气水生产及供应业产值占比下降了,分别下降了0.0004,0.0003,其他产业中制造业提高幅度最大,提高了0.0006。(6)濮阳市、济源市中也是农业、电热气水生产及供应业产值占比下降,分别下降了0.0007,0.0005,0.0004,0.0003,其产值占比提高的产业中两个城市也均为制造业,分别提高了0.0007、0.0005。(7)三门峡中较多的产业占比有所下降,仅电热气水生产及供应业产值占比上升,但所有城市变化幅度均很小。综上所述可知,在2035年中,电热气水生产及供应业及农业作为高用水产业基本在各城市都要降低生产规模,而制造业作为经济主体,在中远期发展中规模要进一步提高,提高发展质量。

表 5-10 沿黄城市产值实际值和优化值（均衡型）

城市	产业	2017 年产值比重	2017 年优化后 产值比重	2030 年产值 比重	2035 年产值 比重
郑州	B1	0.0196	0.0194	0.0174	0.0172
	B2	0.0252	0.0249	0.0253	0.0253
	B3	0.5759	0.5811	0.5792	0.5796
	B4	0.0263	0.0254	0.0233	0.0230
	B5	0.0618	0.0612	0.0621	0.0622
	B6	0.0460	0.0455	0.0463	0.0463
	B7	0.0547	0.0525	0.0547	0.0547
	B8	0.1906	0.1899	0.1917	0.1918
开封	B1	0.0558	0.0558	0.0497	0.0490
	B2	0.0063	0.0065	0.0063	0.0064
	B3	0.6121	0.6133	0.6179	0.6186
	B4	0.0210	0.0207	0.0187	0.0184
	B5	0.0726	0.0728	0.0733	0.0734
	B6	0.0455	0.0456	0.0459	0.0460
	B7	0.0473	0.0463	0.0473	0.0473
	B8	0.1394	0.1391	0.1408	0.1409
洛阳	B1	0.0422	0.0420	0.0423	0.0423
	B2	0.0172	0.0172	0.0173	0.0173
	B3	0.6014	0.6046	0.6032	0.6034
	B4	0.0242	0.0237	0.0214	0.0211
	B5	0.0618	0.0617	0.0620	0.0620
	B6	0.0443	0.0442	0.0444	0.0444
	B7	0.0537	0.0520	0.0537	0.0537
	B8	0.1552	0.1546	0.1557	0.1557
新乡	B1	0.0436	0.0435	0.0389	0.0383
	B2	0.0058	0.0060	0.0052	0.0051
	B3	0.6006	0.6025	0.6059	0.6066
	B4	0.0220	0.0217	0.0196	0.0193
	B5	0.0960	0.0962	0.0968	0.0970
	B6	0.0453	0.0453	0.0457	0.0458
	B7	0.0458	0.0446	0.0458	0.0458
	B8	0.1408	0.1403	0.1420	0.1422

表 5-11 沿黄城市产值实际值和优化值（均衡性）（续表）

城市	产业	2017 年产值 比重	2017 年优化后 产值比重	2030 年产值 比重	2035 年产值 比重
焦作	B1	0.0306	0.0307	0.0272	0.0268
	B2	0.0291	0.0292	0.0293	0.0294
	B3	0.6881	0.6900	0.6928	0.6934
	B4	0.0256	0.0251	0.0228	0.0224
	B5	0.0371	0.0371	0.0373	0.0374
	B6	0.0483	0.0482	0.0486	0.0487
	B7	0.0357	0.0349	0.0357	0.0357
	B8	0.1055	0.1049	0.1062	0.1063
濮阳	B1	0.0548	0.0550	0.0489	0.0482
	B2	0.0463	0.0465	0.0468	0.0468
	B3	0.5573	0.5580	0.5635	0.5642
	B4	0.0348	0.0343	0.0311	0.0306
	B5	0.0751	0.0755	0.0759	0.0760
	B6	0.0437	0.0439	0.0442	0.0442
	B7	0.0482	0.0472	0.0482	0.0482
	B8	0.1399	0.1397	0.1414	0.1416
三门峡	B1	0.0559	0.0565	0.0559	0.0559
	B2	0.3620	0.3620	0.3620	0.3620
	B3	0.2542	0.2535	0.2542	0.2542
	B4	0.0376	0.0373	0.0376	0.0376
	B5	0.0487	0.0493	0.0487	0.0487
	B6	0.0544	0.0549	0.0544	0.0544
	B7	0.0417	0.0413	0.0417	0.0417
	B8	0.1454	0.1452	0.1454	0.1454
济源	B1	0.0335	0.0343	0.0298	0.0293
	B2	0.0341	0.0347	0.0343	0.0344
	B3	0.6586	0.6553	0.6631	0.6636
	B4	0.0222	0.0221	0.0197	0.0194
	B5	0.0469	0.0477	0.0472	0.0473
	B6	0.0483	0.0491	0.0487	0.0487
	B7	0.034	0.0339	0.0340	0.0340
	B8	0.1224	0.1230	0.1232	0.1233

通过各地级市节水型优化结果可知，在 2017 年产业结构优化后，郑州市、开封市、新乡市、焦作市、濮阳市、济源市第一产业规模缩小，二产、三产规模扩大，其中郑州市第三产业扩大规模大于第二产业，其余城市均为第二产业扩大规模高于第三产业。洛阳市、三门峡市第一产业、第三产业规模稍微扩大，第二产业有所缩小。

从 2017 年优化后具体产业来看, (1) 郑州市农业、电热气水生产及供应业、批零住餐业产值规模降低, 其中农业、电热气水生产及供应业产值占比降低了 0.002, 批零住餐业变化幅度很小, 在郑州市产值规模上升的产业中制造业提升幅度最大, 占比提高 0.003。(2) 开封市仅农业、电热气水生产及供应业产业规模有所降低, 产值占比分别降低 0.005, 0.002, 其他产业中也仍为制造业上升幅度最大, 占比提高了 0.005。(3) 洛阳市中仅电热气水生产及供应业规模下降, 占比降低 0.002, 其他产值规模上升的产业中制造业占比提高最大, 提高了 0.001。(4) 新乡市主要有农业、采矿业、电热气水生产及供应业产值规模下降, 占比分别降低了 0.004, 0.0005, 0.0019, 其他产业占比提高的产业里也是制造业占比提高最大, 达 0.0043。(5) 焦作市中农业、电热气水生产及供应业产值占比分别下降 0.0028, 0.0023, 其他产业中采矿业产值占比提高了 0.0038, 提高幅度最大。(6) 濮阳市中除却其他服务业剩下的产业均有所变化, 农业及电热气水生产及供应业产值占比下降了 0.0048, 0.003, 制造业产值占比提高了 0.005, 提高幅度最大。(7) 济源市农业、电热气水生产及供应业产值降低 0.003, 0.002, 另外产业中也为制造业提高幅度最大, 占比提高了 0.0036。在节水型情景中, 各城市基本为农业、电热气水生产及供应业产值规模降低, 且下降幅度相较于均衡性情景中产业占比下降程度来说较大, 其他产业产值规模均有不同程度提高, 其中制造业提高幅度最大。

将 2035 年与 2017 年产值占比对比较可知, (1) 郑州市仅制造业产值占比提高 0.0158, 其他产业如农业、采矿业、电热气水生产及供应业、建筑业、交通业分别下降 0.0021, 0.0027, 0.0028, 0.0066, 0.0010。(2) 开封市中仅采矿业产业规模有所上升, 产值占比提高了 0.0007, 制造业、建筑业和其他服务业产值占比分别降低了 0.0004, 0.0001, 0.0001, 而其他产业均没有变化。(3) 洛阳市中仅制造业及其他服务业产值占比有提高, 分别提高了 0.0198, 0.0051, 其他产业占比均下降, 其中建筑业下降幅度最大, 下降了 0.0063。(4) 三门峡中仅制造业产值占比提高了 0.0275, 其他产业占比均下降, 其中采矿业下降幅度最大, 下降了 0.0133。(5) 在济源市制造业产值占比提高了 0.0308, 其他产业占比均有所下降, 其他服务业下降幅度最大, 达 0.011。(6) 在沿黄其他城市中, 如新乡市、焦作市及濮阳市各产业均没有变化。综上所述可以知道在 2035 年中大部分城市的产业规模均有所下降, 制造业产业规模有所提高, 并且要想实现以水定

产，就要考虑到不同城市的经济状况，先调整部分重要城市产业规模，有主次之分，才能更好落实远景目标提出的对水资源的约束。

表 5-12 沿黄城市产值实际值和优化值（节水型）

城市	产业	2017 年产值 比重	2017 年优化后 产值比重	2030 年产值 比重	2035 年产值 比重
郑州	B1	0.0196	0.0178	0.0182	0.0175
	B2	0.0252	0.0253	0.0233	0.0225
	B3	0.5759	0.5786	0.6041	0.5917
	B4	0.0263	0.0239	0.0243	0.0235
	B5	0.0618	0.0621	0.0573	0.0552
	B6	0.0460	0.0462	0.0426	0.045
	B7	0.0547	0.0547	0.0507	0.0488
	B8	0.1906	0.1915	0.1795	0.1958
开封	B1	0.0558	0.0509	0.0557	0.0557
	B2	0.0063	0.0063	0.007	0.007
	B3	0.6121	0.6169	0.6117	0.6117
	B4	0.021	0.0191	0.021	0.021
	B5	0.0726	0.0732	0.0726	0.0726
	B6	0.0455	0.0458	0.0454	0.0454
	B7	0.0473	0.0473	0.0473	0.0473
	B8	0.1394	0.1405	0.1393	0.1393
洛阳	B1	0.0422	0.0423	0.0383	0.0379
	B2	0.0172	0.0172	0.0156	0.0154
	B3	0.6014	0.6029	0.6190	0.6212
	B4	0.0242	0.0220	0.0220	0.0217
	B5	0.0618	0.0620	0.0562	0.0555
	B6	0.0443	0.0444	0.0403	0.0398
	B7	0.0537	0.0537	0.0488	0.0482
	B8	0.1552	0.1556	0.1597	0.1603
新乡	B1	0.0436	0.0397	0.0436	0.0436
	B2	0.0058	0.0053	0.0058	0.0058
	B3	0.6006	0.605	0.6006	0.6006
	B4	0.0220	0.0201	0.0220	0.0220
	B5	0.0960	0.0967	0.0960	0.0960
	B6	0.0453	0.0456	0.0453	0.0453
	B7	0.0458	0.0458	0.0458	0.0458
	B8	0.14080	0.1418	0.1408	0.1408

表 5-13 沿黄城市产值实际值和优化值（节水型）（续表）

城市	产业	2017 年产值 比重	2017 年优化后 产值比重	2030 年产值 比重	2035 年产值 比重
焦作	B1	0.0306	0.0279	0.0305	0.0306
	B2	0.0291	0.0293	0.0291	0.0291
	B3	0.6881	0.6920	0.6881	0.6881
	B4	0.0256	0.0233	0.0256	0.0256
	B5	0.0371	0.0373	0.0371	0.0371
	B6	0.0483	0.0486	0.0483	0.0483
	B7	0.0357	0.0357	0.0357	0.0357
	B8	0.1055	0.1060	0.1055	0.1055
濮阳	B1	0.0548	0.0500	0.0548	0.0548
	B2	0.0463	0.0467	0.0463	0.063
	B3	0.5573	0.5623	0.5573	0.5573
	B4	0.0348	0.0318	0.0348	0.0348
	B5	0.0751	0.0758	0.0751	0.0751
	B6	0.0437	0.0441	0.0437	0.0437
	B7	0.0482	0.0482	0.0482	0.0482
	B8	0.1399	0.1411	0.1399	0.1399
三门峡	B1	0.0559	0.0559	0.0541	0.0538
	B2	0.362	0.362	0.3502	0.3487
	B3	0.2542	0.2542	0.2784	0.2816
	B4	0.0376	0.0376	0.0364	0.0362
	B5	0.0487	0.0487	0.0472	0.0470
	B6	0.0544	0.0544	0.0526	0.0524
	B7	0.0417	0.0417	0.0404	0.0402
	B8	0.1454	0.1454	0.1407	0.1401
济源	B1	0.0335	0.0305	0.0308	0.0305
	B2	0.0341	0.0343	0.0314	0.0310
	B3	0.6586	0.6622	0.6859	0.6894
	B4	0.0222	0.0202	0.0204	0.0202
	B5	0.0469	0.0472	0.0431	0.0427
	B6	0.0483	0.0486	0.0445	0.0440
	B7	0.0340	0.0340	0.0313	0.0310
	B8	0.1224	0.1231	0.1126	0.1114

将节水型和均衡型情景的产业结构优化结果进行产业高级化分析,选择最常用的第三产产值与第二产产值比重来表示,计算出指数变化率,了解产业结构变化程度,产业合理化方面由于数据的不足,此处不再做分析,分析结果如下:节水型情景明显变化幅度大于均衡型情景,且两种情景下产业结构高级化都偏向与高级化降低。(1)在均衡型情景中,经过优化 2017 年大部分城市产业高级化指

数有所降低，郑州、洛阳、新乡、焦作等地级市降低程度最大，而济源市的指数有所提高。2030 年各城市高级化指数都有提高，其中郑州、洛阳、濮阳、新乡、焦作、济源、开封、三门峡提高程度依次降低。2035 年各地级市高级化指数也都有提高，且提高程度高于 2030 年。城市高级化指数提高程度有高到低分别为濮阳、郑州、洛阳、新乡、焦作、济源、开封、三门峡。

（2）节水型情景中，2017 年优化后各地级市产业高级化指数是有所提高，这与均衡型有明显不同，其中洛阳市提高程度最大，其他城市提高水平不相上下。2030、2035 年城市产业结构高级化均有所降低，2030 年济源、郑州、三门峡等城市下降程度最大，2035 年主要济源、三门峡、洛阳等市下降程度最大，主要原因是河南省地级市首先要保证农业发展，其次是在河南中第二产业中制造业用水效率高，且产业产值占比高，在后续优化中会提高制造业发展，同时第三产业中批零住餐是高耗水产业，后续会限制发展，降低其产值。

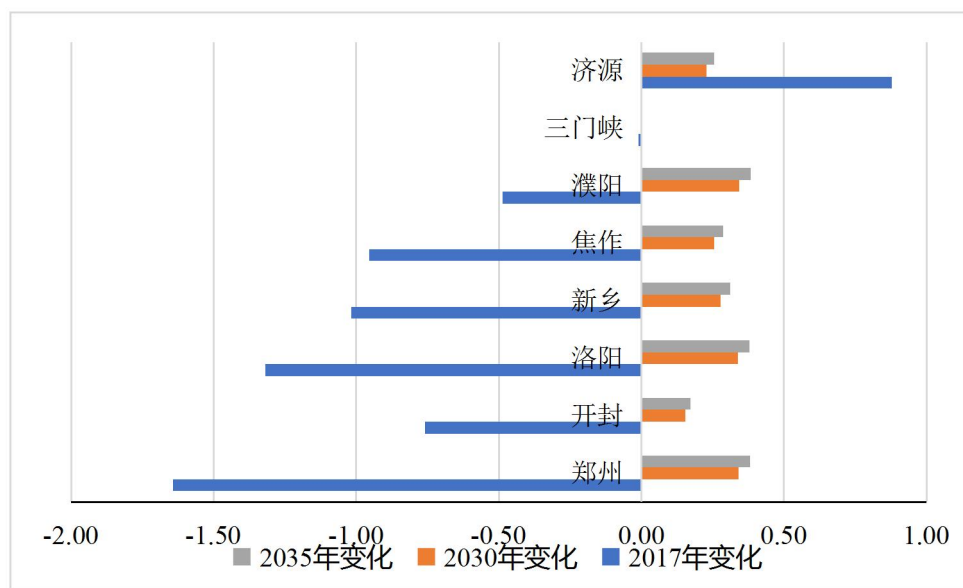


图 5-1 均衡型情景下产业结构高级化调整

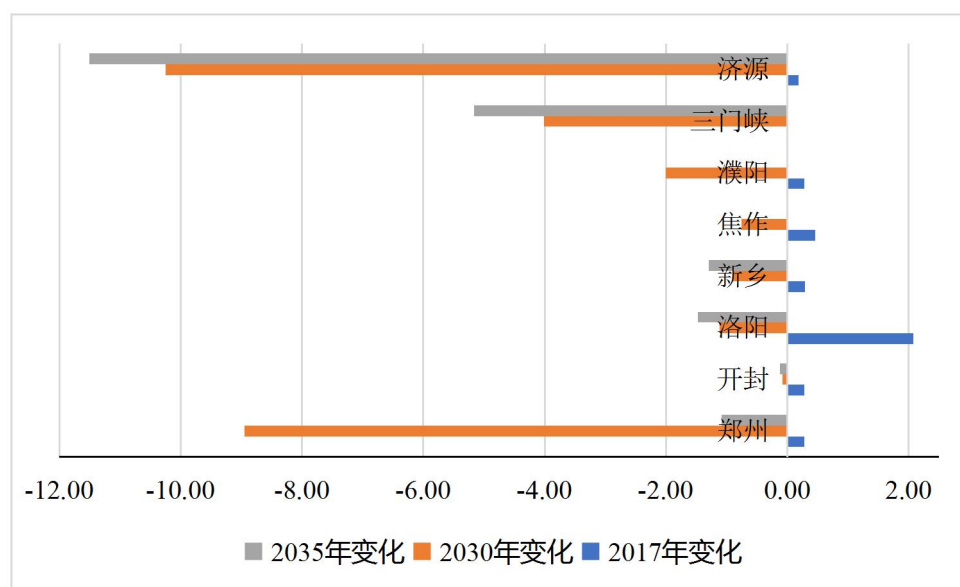


图 5-2 节水型情景下产业结构高级化调整

经过前文分析，河南省沿黄城市的产业结构在以水定产背景下都有所调整。总的来说无论是节水型情景和均衡型情景的总产值都会有所提高。在均衡型方案中，2017年优化后，河南省主要是制造业及采矿业产值占比有所提高，尤其是郑州市的制造业占比提高了1%。在各城市产值占比下降的产业中均为批零住餐产业下降幅度最大。在2035年中，电热气水生产及供应业、农业要降低生产规模，制造业作为经济主体，在中远期发展中可进一步提高，提高发展质量。在计算产业高级化中，到2035年产业高级化指数均有所提高，洛阳、郑州、济源最为明显。

在节水型方案中，沿黄城市基本是农业、电热气水生产及供应业产值规模降低，且下降幅度相较于均衡性情景中产业占比下降程度来说较大。在2035年中大部分城市的产业规模有所下降，但制造业产业规模提高幅度较大，并且新乡市、焦作市及濮阳市产业规模基本没有变化。在计算产业高级化中，到了2035年沿黄城市产业高级化指数均有所降低，主要是因为到2035年水资源总量进一步缩减，而在河南沿黄城市中制造业是有巨大潜力的产业，用水效率相较于第三产业的批发零售、交通业等均较强，在2035年会进一步扩大制造业，缩减第三产业，最终导致高级化指数有所降低。

6 结论及政策建议

6.1 主要结论

本文通过分析河南省各城市产业的用水效率及其与水资源的协调度、关联度基础上,构建以沿黄水资源为主要约束条件下的多目标优化模型,分析在节水型情景和均衡型情景下 2017 年、2030 年、2035 年产业规模变动情况,主要结论如下:

(1)河南省沿黄区域中除开封市其他城市产业结构偏水度近五年逐渐上升,说明这些城市产业结构逐渐偏向用水量高的产业。在用水结构粗放度方面,城市差异较大,半数城市用水结构偏向用水效率低的产业。河南省沿黄区域整体产业结构和用水结构协调度不高,说明了沿黄城市需要针对用水情况对产业结构做出调整及优化。

(2)从河南省沿黄城市细分产业的用水效率来看,大部分城市的农业、电热气水生产及供应业、批零住餐等三个产业的直接用水效率偏低,而制造业和交通业用水效率偏高。完全用水系数方面,完全用水量较大的产业都涉及到各城市的支柱产业,整体上主要为农业、电热气水生产及供应业完全用水系数较大。将直接用水系数和间接用水系数分为四类情况,即高-高型,低-低型,低-高型,高-低型,各城市产业用水情况差异较大。整体上,农业和电热气水生产及供应业属于高-高型,归属水资源密集型产业,需要控制用水规模。交通业、制造业属于低-高型产业,有较大隐藏用水。批零住餐属于高-低型产业,直接用水量大,而对其他产业拉动力小。其他服务业为低-低型产业,要扩大经济规模,可以在河南省优先发展。

(3)通过综合分析可知开封、新乡、焦作、济源、三门峡的制造业、其他服务业,以及郑州、洛阳、济源的制造业需要优先鼓励发展。郑州、开封、洛阳、濮阳的采矿业、批零住餐,及各城市农业的影响力和感应度均小于社会平均值,且属于高用水产业,需要在一定程度上缩小发展规模。郑州、洛阳、三门峡、济

源的其他服务业本身用水效率高,对其他产业发展拉动作用较少,但其他城市对其具有一定的依赖性,可以保持原规模发展。

(4) 在节水型情景中基准年沿黄城市需要将农业、电热气水生产及供应业规模下调,同时保证建筑业、交通业、制造业、其他服务业规模扩大。在 2035 年中,大部分城市的产业规模都应有所降低,郑州和洛阳作为河南省省会城市和副中心城市变化幅度相比其他城市较大,对以水定产的落实起更大作用。均衡型情景中,2035 年部分城市产业规模都有所上升,生产规模稍微下降的主要集中在农业和电热气水生产及供应业。

6.2 建议对策

在农业产业调整方面,若仅考虑沿黄城市水资源约束,需要将各城市的农业产业规模进行缩小。但河南省是我国粮食大省,从 2017 年开始,连续 5 年粮食总产量保持在 1300 亿斤以上,承担着国家粮库的重要地位,要守住国家粮食安全底线,因此农业规模要落实最严格的耕地保护制度。农业直接用水及完全用水系数均较高,处于用水低效率,可见在农业生产过程中存在水资源浪费问题。因此在农业生产中,应该重点在提高用水效率,而不是减少农业规模,可以进行农业规模化、标准化生产,完善农业生产的水利基础设施,建设节水型设施,落实河南省 15 个中型灌区实施续建配套与节水改造,同时在农村地区提高农户节水意识,推广节水农业,提高农业的用水效率。

在第二产业调整方面,主要涉及到采矿业、制造业、电热气水生产及供应业、建筑业。沿黄城市主要缩小电热气水生产及供应业、制造业等产业规模,其中郑州、洛阳、济源反而要扩大制造业规模,提高用水效率,另外沿黄城市要适度扩大建筑业经济规模,谨防产能过剩。非沿黄城市要调整电热气水生产及供应业、采矿业。在工业节水方面要大力推广循环用水,污水再利用,提高工业用水重复利用率。工业发展水平既不能太快挤占过多用水,也不能过慢导致经济发展滞后。郑州、洛阳及济源的制造业要特别提高中间投入产品的用水效率,注重经济效益与水资源利用的平衡,可利用新设备、工艺对传统产业进行改造,提升制造技术,淘汰落后生产设备,强化重点企业用水管理,加大研发投入,提升资源利用效率。

第三产业调整方面,主要涉及到交通业、批零住餐及其他服务业。沿黄城市中交通业要适度提高经济规模,其他服务业保持目前规模发展,但可以提高用水

效率，而批零餐饮业要缩小产业规模，极大程度提高用水效率。针对第三产业尤其是批零住餐产业可以推广节水器具，引导居民、商铺淘汰不符合节水标准的器具，园林可以采用喷灌等灌溉方式，提倡一水多用，循环利用，同时可以出台相关水价管理政策，通过水权转让手段，提高整体用水效率。

6.3 创新点、不足与展望

6.3.1 创新点

在研究视角上，本文聚焦河南省沿黄区域地级市，需要构建沿黄区域投入产出表；对产业结构的调整方面，不仅考虑水资源量及社会经济目标，还考虑农业底线以及产业用水效率。在研究内容上，目前针对资源消耗对经济增长约束方面主要聚焦在土地资源以及化学能源消耗方面，水资源研究较少。且水资源约束背景下研究产业结构多考虑三次产业，对细分产业考虑较少。本文在“以水定产”的背景下，根据数据可得性尽量细分产业，定量分析水资源对河南沿黄区域约束程度，方便后续产业结构调整。

6.3.2 不足与展望

不足方面主要有三个主要方面，一方面是投入产出表编制方面，第一个问题是投入产出表中涉及到的方法能否准确反映现实情况，例如引力模型能否代表城市互动强度。第二个问题是投入产出表只是跟 2017 年河南省投入产出表进行核对，没有单一城市的投入产出表进行误差分析，投入产出表编制的精确性有待商榷。第二方面是多目标线性规划中，产业用水效率以 2017 年为基准，但因为产业用水效率到 2035 年可能因为技术进步而有所变动，所以以此预测 2035 年产业结构变化，是有一定误差的。最后一方面问题是基础数据太差，类似制造业下细分行业数据缺失，不能更加细致的分析产业的变化。

在未来研究中，针对用水效率不仅是细分产业用水效率，还可以再细分不同用水途径，例如蓝水、绿水、灰水，更加全面了解产业用水情况。在多目标线性规划中，水约束不能只关注水量、用水效率，还要考虑到污水排放情况，水资源承载力，而在水目标中要将生态用水考虑在内。

参考文献

- [1] 联合国粮农组织.2020 年粮食及农业状况[R],2020.
- [2] 王海英,董锁成,尤飞.黄河沿岸地带水资源约束下的产业结构优化与调整研究[J]. 中国人口·资源与环境,2003(2): 82~86.
- [3] Chebbi,H.E,2010.Long and short-run linkages between economic growth,energyconsumption and CO₂ emissions in Tunisia[J].Middle East Development Journal,2010,2(1):139-158.
- [4] Chen H.Introduction to the science of industrial sector structure[M].Beijing:China Renmin University Press,1990:1-10.
- [5] 李小建,文玉钊,李元征,等,黄河流域高质量发展: 人地协调与空间协调[J].经济地理,2020,40(04):1-10.
- [6] 中共中央国务院印发,黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[J].中国水利,2021,(21):3-16.
- [7] 金凤君,马丽,许堞.黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J].资源科学,2020,42(01):127-136.
- [8] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].求是,2019(20):1-5.
- [9] 马尔萨斯.人口原理[M].商务印书馆,1992:15-18.
- [10] MEADOWS D H, MEADOWS D L,RANDERS J,et al.The Limits to Growth.New York: Universe Books,1972.
- [11] Bruntland G H . World Commission on Environment and Development[R]. Our Common Future. 1987.
- [12] World Bank.World development report 1992:Development and the environment[R].Oxford University Press,oxford UK,1992.
- [13] PEARCE D W,TURNER R K. Economics of Natural Resources and the Environment[M]. New York: Harvester Wheatsheaf, 1990: 215-289.
- [14] 柳辉,孙华.经济增长与水环境质量关系研究以太湖流域无锡市为例[J].资源与产业,2009(02):146-149
- [15] Bao chao,Chen Xiaojie.Spatial Econometric Analysis on Influencing Factors of Water Consumption Efficiency in Urbanizing China[J].Journal of Geographical Sciences,2017 (12):1450~1462.
- [16] 李九一,李丽娟.中国水资源对区域社会经济发展的支撑能力[J].地理学报,2012,67(03):410-419.

- [17] Nordhaus,W.D,The Limits to Growth Revisited,Bookings[J].Papers on Economic Activity,1992,(02):1-43
- [18] 方创琳,鲍超.黑河流域水-生态-经济发展耦合模型及应用[J].地理学报,2004(05):781-790.
- [19] 潘安娥,陈丽.湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析——基于水足迹视角[J].资源科学,2014,36(02):328-333.
- [20] Dan Cui, Xin Chen, Yinglan Xue, Rui Li, Weihua Zeng. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale - A case study of Kunming[J].Journal of Environmental Management,2019:2-34.
- [21] 杨胜苏,张利国,喻玲,等..湖南省社会经济与水资源利用协调发展演化[J].经济地理,2020,40(11):86-94.
- [22] Yi Liu, Liyuan Yang, Wei Jiang. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality – A case study from Nansi Lake catchment,China[J]. Ecological Indicators,2020:1-19.
- [23] 王海英,董锁成,尤飞.黄河沿岸地带水资源约束下的产业结构优化与调整研究[J].中国人口·资源与环境,2003(02):82-86.
- [24] 马静,柴彦威.水资源约束下的生态工业园区发展模式探析——以天津滨海新区汉沽现代产业园为例[J].人文地理,2010,25(06):68-72.
- [25] 万永坤,董锁成,王隽妮,等.北京市水土资源对经济增长的阻尼效应研究[J].资源科学,2012,34(3):475-480.
- [26] 章恒全,张陈俊,张万力.水资源约束与中国经济增长——基于水资源“阻力”的计量检验[J].产业经济研究,2016(04):87-99.
- [27] 沈晓梅,夏语欣,姜明栋,等.长江经济带经济增长进程中的水资源阻尼效应研究[J].中国环境管理,2019,11(05):67-73.
- [28] 曹祺文,鲍超,顾朝林,等.基于水资源约束的中国城镇化 SD 模型与模拟[J].地理研究,2019,38(01):167-180.
- [29] 王文彬,王延荣,许冉.水资源约束下黄河流域产业结构变迁规律及其影响因素[J].工业技术经济,2020,39(06):138-145.
- [30] Daly H E,Daly H E,Farley J.Ecological Economics: Principles and Applications[M]. Island Press,2004.
- [31] ANL,BHYA,ALW,et al. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China - ScienceDirect[J]. Journal of Cleaner Production, 2016(112):4594-4604.
- [32] Zhou X Y ,Lei K ,Meng W , et al. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity[J].Journal of Cleaner Production,2017(165): 1462-1472.

- [33] 张信信,刘俊国,赵旭,等.黑河流域产业间虚拟水转移及其关联分析[J].干旱区研究,2018,35(01):27-34.
- [34] Li Y, Zhang Z, Shi M . What should be the future industrial structure of the Beijing-Tianjin-Hebei city region under water resource constraint? An inter-city input-output analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2019,239(Dec.1): 117-118.
- [35] 丁超,胡永江,王振华,等.水资源约束条件下包头市产业结构调整与水资源优化配置研究[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(04):674-684.
- [36] 王莉莉,肖雯雯.基于投入产出模型的中国海洋产业关联及海陆产业联动发展分析[J].经济地理,2016,36(01):113-119.
- [37] 李宵,申玉铭,邱灵.京津冀生产性服务业关联特征分析[J].地理科学进展,2018,37(02):299-307.
- [38] 郑智,刘卫东,宋周莺,叶尔肯·吾扎提,梁宜.“一带一路”生产网络及中国参与程度[J].地理科学进展,2019,38(07):951-962.
- [39] 李仙德,张旭亮,李卫江,等,.上海计算机产业转移及其对区域经济影响[J].地理研究,2019,38(08):1919-1931.
- [40] Ina Drejer.Comparing Patterns of Industrial Interdependence in National Systems of Innovation - A Study of Germany, the United Kingdom, Japan and the United States[J].Economic Systems Research,2000,12(3):111-123.
- [41] 谢建国,姜珮珊.中国进出口贸易隐含能源消耗的测算与分解——基于投入产出模型的分析[J].经济学(季刊),2014,13(04):1365-1392.
- [42] 韦韬,彭水军.基于多区域投入产出模型的国际贸易隐含能源及碳排放转移研究[J].资源科学,2017,39(01):94-104.
- [43] 马超,许长新,田贵良,等.虚拟水贸易的可计算非线性动态投入产出分析模型[J].中国人口·资源与环境,2016,26(11):160-169.
- [44] CARTER H O,IRERI D. Linkage of California- Arizona inputoutput models to analyze water transfer pattern[J].Applications of input-output analysis. Amsterdam : North-Holland Publishing,1972:139-168.
- [45] Wang S J,Fang C L,Guan X L,et al. 2014. Urbanisation, energy consumption, and carbon dioxide emissions in China: a panel data analysis of China's provinces[J].Applied Energy,2014,12(31):738-749.
- [46] 李方一,刘卫东,公丕萍.中国产业能用的区域差异与区域联系[J].地理科学,2015,35(01):38-46.
- [47] ISABELA B, MARIA L. Structural decomposition analysis and input-output subsystems: Changes in CO2 emissions of Spanish service sectors (2000-2005) [J] . Ecological Economics, 2011(70):2012-2019.

- [48] 马国霞,於方,齐霁,等.基于绿色投入产出表的环境污染治理成本及影响模拟[J].地理研究,2014,33(12):2335-2344.
- [49] 严春晓,宋辉,张润清.新常态下能源-环境治理投入产出模型的构建与应用探索[J].管理评论,2018,30(05):84-94.
- [50] 侯伟凤.我国污染排放变动趋势及减排路径研究——基于环境投入产出模型结构分解分析[J].环境科学导刊,2021,40(02):35-42.DOI:10.13623/j.cnki.hkdk.2021.02.008.
- [51] 唐志鹏,刘卫东,付承伟,等.能源约束视角下北京市产业结构的优化模拟与演进分析[J].资源科学,2012,34(01):29-34.
- [52] 陈妍彦,张玲玲.水资源约束下的区域产业结构优化研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(06):50-55+60.
- [53] 宋涛,董冠鹏,唐志鹏,等.能源—环境—就业三重约束下的京津冀产业结构优化[J].地理研究,2017,36(11):2184-2196.
- [54] 孙艳芝,张同升,王志强.基于能-水资源约束的晋陕蒙地区产业结构优化研究[J].开发性金融研究,2019(01):79-88.
- [55] 李元杰,张卓颖,石敏俊.水资源约束下雄安新区建设对京津冀地区的经济影响——基于城市间投入产出优化模型的分析[J].城市与环境研究,2020(03):50-68.
- [56] 孙秀秀,王维平,李文良,等.基于投入产出表的山东省水资源利用状况研究[J].济南大学学报(自然科学版),2021,35(03):223-229.
- [57] 孙才志,郑靖伟.基于投入产出表的中国水资源消耗结构路径分析[J].地理科学进展,2021,40(03):370-381.
- [58] 刘年磊,蒋洪强,吴文俊.基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J].中国环境科学,2014,34(06):1607-1613.
- [59] 赵岩,黄鑫鑫,王红瑞,等.基于区间数多目标规划的河北省水资源与产业结构优化[J].自然资源学报,2016,31(07):1241-1250.
- [60] 付正辉,陆文涛,赵颖瑾,等.水环境约束下区域适度人口研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(01):157-161.
- [61] 陈浩,彭桥.京津冀水资源使用效率评估——基于投入产出表的影子价格法[J].技术经济与管理研究,2021(06):114-117.
- [62] 朱媛媛,汪紫薇,罗静,等.中国中部重点农区新型城镇化与粮食安全耦合协调发展研究——以河南省为例[J].地理科学,2021,41(11):1947-1958.
- [63] 陈妍,王士君,梅林.东北地区非资源型城市与资源型城市产业转型的对比研究[J].地理研究,2021,40(03):808-820.
- [64] 徐辉,李宏伟.丝绸之路经济带市域经济增长与产业结构变化[J].经济地理,2016,36(11):31-37.

- [65] 张跃,刘莉.绿色发展背景下长江经济带产业结构优化升级的地区差异及空间收敛性[J].世界地理研究,2021,30(05):991-1004.
- [66] Leontief W W.Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J].The review of economic statistics,1936:105-125.
- [67] 陈锡康, 杨翠红.投入产出技术[M].北京: 科学出版社.2005
- [68] Isard W.Interregional and regional input-output analysis: a model of a space-economy[J].The review of Economics and Statistics,1951:318-328.
- [69] Chaney T. The Gravity Equation in International Trade: An Explanation[J]. Journal of Political Economy. 2018,126(1):150-177.
- [70] 李陈,靳相木.基于引力模型的中心镇空间联系测度研究——以浙江省金华市 25 个中心镇为例[J].地理科学,2016,36(05):724-732.
- [71] 齐梦溪,鲁晗,曹诗颂,等.基于引力模型的经济空间结构时空演变分析——以河南省为例[J].地理研究,2018,37(05):883-897.
- [72] 朱道才,陆林,秀龙,等.基于引力模型的安徽城市空间格局研究[J].地理科学. 2011(05):551-556.
- [73] 王瑞莉,刘玉,王成新,等.黄河流域经济联系及其网络结构演变研究[J]世界地理研究: 2022(01):1-11.
- [74] Li C, Xu M, Wang X, et al. Spatial analysis of dual-scale water stresses based on water footprint accounting in the Haihe River Basin, China[J]. Ecological Indicators.2018,92:254-267.
- [75] Kowalewski J. Regionalization of National Input-Output Tables: Empirical Evidence on the Use of the FLQ Formula[J]. Regional Studies. 2015,49(2):240-250.
- [76] Lin J, Hu Y, Zhao X, et al. Developing a city-centric global multiregional input-output model (CCG-MRIO) to evaluate urban carbon footprints[J]. Energy Policy.2017(108):460-466.
- [77] 付玉娟,金泉,张志斌,等.东北老工业基地产业结构与用水结构关系——以辽宁省本溪市为例[J].生态学报,2021,41(22):9029-9038.
- [78] 刘洋,李丽娟.京津冀地区产业结构和用水结构变动关系[J].南水北调与水利科技,2019,17(02):1-9.
- [79] 袁少军,王如松,胡聃,等.城市产业结构偏水度评价方法研究[J].水利学报,2004(10):43-47.
- [80] 蒋桂芹,于福亮,赵勇.区域产业结构与用水结构协调度评价与调控——以安徽省为例[J].水利水电技术,2012,43(06):8-11.
- [81] 李俊,许家伟.河南省工业用水效率的动态演变与分解效应——基于 LMDI 模型视角[J].经济地理,2018,38(11):183-190.
- [82] 成琨,付强,陈曦,等.基于投入产出模型的黑龙江省水资源利用效率分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(05):141-145.

- [83] 杨成凤,韩会然,宋金平.功能疏解视角下北京市产业关联度研究——基于投入产出模型的分析[J].经济地理,2017,37(06):100-106.
- [84] 吕平毓,毛玉姣,陈虎,等.基于水资源经济投入产出的重庆产业用水研究[J].人民长江,2015,46(09):23-25.
- [85] 洪思扬,王红瑞,程涛,等.北京市第三产业用水特征及其发展策略[J].中国人口·资源与环境,2016,26(05):108-116.
- [86] 张宏伟,和夏冰,王媛.基于投入产出法的中国产业水资源消耗分析[J].资源科学,2011,33(07):1218-1224.
- [87] 喻春娇,郑光凤.湖北省生产性服务业与制造业的互动发展程度分析[J].经济地理,2010,30(11):1859-1864.
- [88] 栾维新,片峰,杜利楠,等.河北钢铁产业调整的波及效应及节能减排研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(12):96-102.
- [89] 张蕾,申玉铭,柳坤.北京生产性服务业发展与城市经济功能提升[J].地理科学进展,2013,32(12):1825-1834.

附录

附录 A.河南省地级市引力矩阵（续 1）

	许昌	漯河	三门峡	南阳	商丘	信阳	周口	驻马店	济源
郑州	1865.787	451.925	180.026	210.316	432.753	162.549	667.995	375.586	209.165
开封	22.533	22.214	7.166	6.698	30.686	8.166	9.522	14.658	10.442
洛阳	108.716	56.943	140.925	91.069	47.232	28.338	62.590	54.367	217.101
平顶山	37.231	94.820	10.536	45.434	5.409	16.661	16.769	40.796	14.573
安阳	12.101	11.903	5.703	6.043	8.728	6.576	6.549	10.246	13.029
鹤壁	0.135	0.376	0.139	0.090	0.114	0.151	0.068	0.197	0.845
新乡	39.405	28.012	11.132	12.300	21.172	12.581	17.201	22.732	30.702
焦作	34.581	21.513	16.915	14.764	19.323	11.477	17.619	19.939	98.872
濮阳	2.806	4.667	2.044	1.812	3.141	2.424	1.526	3.373	5.407
许昌	0.000	373.575	14.332	41.017	28.040	44.947	137.695	146.777	15.341
漯河	46.516	0.000	3.051	7.671	3.228	17.813	25.281	88.467	4.511
三门峡	2.996	5.123	0.000	5.391	2.385	2.889	1.776	4.060	10.043
南阳	19.455	29.220	12.232	0.000	6.425	23.115	13.016	23.031	10.279
商丘	17.996	16.638	7.322	8.694	0.000	9.803	27.555	16.129	7.170
信阳	9.323	29.674	2.866	10.108	3.168	0.000	8.034	83.095	3.188
周口	201.453	297.048	12.428	40.147	62.814	56.669	0.000	180.280	10.913
驻马店	41.002	198.473	5.424	13.564	7.020	111.910	34.422	0.000	5.914
济源	0.808	1.908	2.530	1.142	0.588	0.810	0.393	1.115	0.000

附录 B.河南省地级市贸易系数矩阵（续表）

	部门	郑州	开封	洛阳	新乡	焦作	濮阳	三门峡	济源
焦作	B1	0.017	0.001	0.004	0.006	0.916	0.002	0.022	0.010
	B2	0.001	0.010	0.010	0.024	0.978	0.002	0.022	0.002
	B3	0.005	0.004	0.005	0.011	0.971	0.002	0.030	0.004
	B4	0.002	0.017	0.018	0.040	0.986	0.001	0.010	0.001
	B5	0.001	0.002	0.001	0.003	0.963	0.002	0.030	0.004
	B6	0.000	0.003	0.000	0.001	0.973	0.003	0.015	0.002
	B7	0.003	0.003	0.001	0.003	0.944	0.002	0.016	0.005
	B8	0.001	0.003	0.001	0.003	0.942	0.003	0.016	0.004
濮阳	B1	0.004	0.001	0.001	0.005	0.004	0.958	0.019	0.004
	B2	0.000	0.012	0.002	0.017	0.001	0.948	0.019	0.001
	B3	0.001	0.005	0.001	0.007	0.002	0.949	0.026	0.002
	B4	0.000	0.021	0.003	0.028	0.001	0.971	0.008	0.001
	B5	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.938	0.026	0.001
	B6	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.931	0.013	0.001
	B7	0.001	0.003	0.000	0.002	0.003	0.933	0.014	0.002
	B8	0.000	0.004	0.000	0.002	0.003	0.930	0.013	0.002
三门峡	B1	0.003	0.001	0.004	0.001	0.003	0.001	0.596	0.005
	B2	0.000	0.006	0.010	0.004	0.001	0.001	0.591	0.001
	B3	0.001	0.002	0.005	0.002	0.001	0.001	0.437	0.002
	B4	0.000	0.010	0.017	0.007	0.000	0.001	0.817	0.001
	B5	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.442	0.002
	B6	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.725	0.001
	B7	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.703	0.002
	B8	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.710	0.002
济源	B1	0.003	0.001	0.006	0.003	0.016	0.002	0.061	0.0939
	B2	0.000	0.009	0.015	0.011	0.004	0.003	0.061	0.988
	B3	0.001	0.003	0.007	0.005	0.006	0.003	0.084	0.975
	B4	0.000	0.015	0.026	0.019	0.003	0.001	0.027	0.992
	B5	0.000	0.002	0.002	0.001	0.007	0.003	0.084	0.979
	B6	0.000	0.003	0.000	0.001	0.005	0.004	0.041	0.986
	B7	0.001	0.003	0.001	0.002	0.011	0.003	0.045	0.970
	B8	0.000	0.003	0.001	0.001	0.011	0.004	0.043	0.977

附录 C.河南省沿黄城市投入产出表-郑州为例

	部门	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
郑州	B1	125955.	2764.39	1827190.	1911.69	21686.16	2695.89	59576.39	39855.11
	B2	1546.8	254356.5	3477260.	523490.	57389.97	408.96	1333.43	15164.37
	B3	541044	762033.3	40042090	406990.	3382691.	1057597.	1072940.	4066785.8
	B4	8870.6	102913.7	1742333.	586232.	77325.03	379174.2	147768.5	566782.07
	B5	2356.9	2971.46	58747.12	4463.86	153566.32	19706.16	18708.01	268173.17
	B6	31676.	48758.17	1415110.	80111.23	101354.01	972038.9	221775.72	714193.67
	B7	58991.	91003.02	3666042.	67776.8	258054.13	213304.6	353781.33	1039206.32
	B8	96211.	293873.2	3012390.	218605.	1071890.0	730186.4	1232081.2	5940925.63
开封	B1	7248.50	159.09	105151.31	110.01	1248.00	155.14	3428.51	2293.58
	B2	0.24	39.55	540.72	81.40	8.92	0.06	0.21	2.36
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.09	0.12	2.36	0.18	6.16	0.79	0.75	10.76
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
洛阳	B1	8758.97	192.24	127063.14	132.94	1508.06	187.47	4142.95	2771.53
	B2	0.29	47.80	653.40	98.37	10.78	0.08	0.25	2.85
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
新乡	B1	2.78	456.84	6245.44	940.23	103.08	0.73	2.39	27.24
	B2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.08	0.10	1.93	0.15	5.05	0.65	0.62	8.82
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

附录 C.河南省沿黄城市投入产出表-郑州为例

	部门	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
焦作	B1	4103.55	90.06	59528.68	62.28	706.52	87.83	1940.96	1298.45
	B2	0.14	22.39	306.12	46.09	5.05	0.04	0.12	1.33
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.05	0.07	1.33	0.10	3.49	0.45	0.43	6.09
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
濮阳	B1	845.38	18.55	12263.60	12.83	145.55	18.09	399.86	267.50
	B2	0.03	4.61	63.06	9.49	1.04	0.01	0.02	0.28
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.01	0.01	0.27	0.02	0.72	0.09	0.09	1.26
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
三门峡	B1	717.53	15.75	10408.97	10.89	123.54	15.36	339.39	227.04
	B2	0.02	3.92	53.53	8.06	0.88	0.01	0.02	0.23
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.01	0.01	0.23	0.02	0.61	0.08	0.07	1.07
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
济源	B1	833.67	18.30	12093.77	12.65	143.54	17.84	394.32	263.79
	B2	0.03	4.55	62.19	9.36	1.03	0.01	0.02	0.27
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.01	0.01	0.27	0.02	0.71	0.09	0.09	1.24
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

参加科研情况说明

郑汴一体化背景下开封市经济与生态环境耦合的时空格局演变,开封市哲学社会科学规划调研课题,2020.6-2021.1,主持人。

黄河流域产业转型对生态效率的影响,河南大学研究生英才计划,2020.12-2021.6,主持人。

致谢

春来秋去寒暑流转，行文至此，心生三千往事。一篇研究生毕业论文的完成，意味我研究生三年即将结束，即将与熟悉的老师、同学及和河南大学告别。回忆三年生活，我一个的人的喜怒哀乐跟这所大学，咱们中心都交织在一起，回忆起每一件事都离不开大家的影子，让人倍感珍惜，倍感留恋。三年匆匆，最后我只能对大家道一声感谢：

一谢我的老师，桃李不言，下自成蹊，幸遇良师，传道受业解惑。这里我要着重感谢苗长虹老师，苗老师在三年来对我的帮助很大，是我学习道路上的明灯，带我了解最前沿的知识，告诉我学习的方法，从苗老师身上看到的永远是一个为中心，为学术孜孜不倦的光辉形象，让我深刻明白什么叫学一门专一门，什么叫学术人该有的知识储备和眼界。在北京学习时候，看见在讲台上侃侃而谈的教师，他们的自信与学识让我对地理学充满信心与热爱。后来回到中心，在我迷惘无助的时候，得以遇见杨东阳老师，实属大幸，杨老师给与的鼓励、耐心和学业上的帮助让我顺利融入中心生活和学习之中。后又遇到吴乐英老师，又是一大幸，带我参与到中心项目，又亲自教导我的毕业论文，为了我的毕业论文废寝忘食，实在感动不已。当然我也十分感谢胡志强老师、陈肖飞老师、董冠鹏老师等，他们对我在日常提出的问题都能耐心解答，给予帮助，让我三年学习生活顺利推进，开心结束。在此也由衷的祝各位恩师学生满堂，桃李满天下。

二谢我的室友、我的朋友还有中心的师兄师姐以及各位同学，平生感知己，方寸岂悠悠。我感谢我室友对我的帮助和开导，在我迷惘困难时候给与提醒和建议，让我能缓解情绪，放心前行。也特别感谢我的朋友以及知己刘振涛同学，我们相伴4年，可以在大学、研究生期间一起分享生活、相互鼓励，未来我们将为共同成为更好的我们而努力。同时我也感谢中心同学，在学业和生活中及时的帮助和安慰，为研究生三年旅途增添不一样的光彩。山水一程，三生有幸，希望大家此去前程似锦。

三谢我的父母，焉得援草,言树之背，养育之恩，无以为报。在我研究生期间，我的忧虑和压力，父母都在默默替我承担，他们用温暖的心胸包容我的任性，用温柔的话语化解我的忧虑，让我开心满足的在外求学，支撑我高飞。养育之恩无以言表，唯有继续努力成为他们的骄傲。同时表示对我弟弟的感谢，年级虽小却能如同兄长一样宽慰我，毫不吝啬夸赞我，给我信心和勇气。

书之有尽，致谢难穷，唯勤勉自持，砥砺前行，方不负众托，不负韶华。谨以此文，献给研究生三年岁月。