

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 黄河流域城市环境效率的空间特征及影响因素研究

研究生姓名: 李孟丹

指导教师姓名、职称: 邓光耀、教授

学科、专业名称: 应用经济学、统计学

研究方向: 经济与社会统计

提交日期: 2024年5月25日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 李孟丹 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2024.6.3

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

- 1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 李孟丹 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 邓光耀 签字日期： 2024.6.3

Spatial characteristics and influencing factors of urban environmental efficiency in the Yellow River Basin

Candidate: Li Mengdan

Supervisor: Deng Guangyao

摘要

目前,黄河流域的生态环境污染问题仍然非常严重,生态危机仍然高危,为遏制黄河流域整体情况环境的恶化和促进黄河流域各城市的可持续发展,本文对黄河流域主要城市环境效率及其空间关联网进行影响因素研究,以期对黄河流域主要城市生态环境保护及现代化发展提出相应的建议。

本文首先利用 EBM-GML 模型来测算黄河流域主要城市环境效率的变化;其次通过修正后的引力模型分析黄河流域主要城市环境效率空间关联网;然后通过社会网络分析研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网的网络特征;最后利用 QAP 回归模型研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网的影响因素作用,结果表明:

第一,黄河流域主要城市中位于生产前沿的城市主要位于黄河上游和黄河中游,并且这些城市大部分为各省份的省会城市,经济发展水平程度相对较好,资源相对充足,分配均匀。

第二,黄河流域主要城市环境效率空间相关性显示为典型的网络形态及结构,黄河下、中、上游各个地区的环境效率差异非常显著。环境效率整体呈现出明显的“发达省份—中部省份—偏远西部省份”规律,黄河流域主要城市环境效率之间的联系非常紧密,空间相关性和溢出效应同样非常明显,且非平衡性特征明显,并且会随时间发展逐渐增加。

第三,黄河流域主要城市可划分为四个板块,板块二作为“发动机”角色将黄河流域主要城市环境效率增长动能传递至具有中介和桥梁作用的“经纪人”板块(第一板块),第二板块又将黄河流域主要城市环境效率的增长动能传递给具有“双向溢出”的第四板块,作为“主受益”角色的第三板块主要接收第一板块的溢出效应。

第四,经济发展水平差异矩阵和利用外资水平差异矩阵的回归系数为负,城镇化水平差异矩阵的回归系数显著为负,产业结构差异矩阵、环境规制差异矩阵、进出口水平差异矩阵、能源消费水平差异矩阵、专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响为正,特别是环境规制差异矩阵、能源消费水平差异矩阵和专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响显著为正。

根据黄河流域主要城市环境效率相关的空间网络结构的特点,通过其经济发

展水平，制定因地制宜的环境效率发展战略，使黄河流域主要城市间环境效率实现协同增效。

关键词：环境效率 空间关联网络 EBM-GML 模型 社会网络分析 QAP 回归分析

Abstract

The current ecological environment of the Yellow River Basin is still very serious, and the ecological crisis is still serious, with natural characteristics such as more sand, easy to resolve, and easy to silt. China has raised the ecological protection of the Yellow River Basin as a major state development scheme, and the need to improve the environmental efficiency is becoming more and more urgent. Exploring the impact mechanism of the environmental efficiency of the Yellow River Basin to improve its efficiency is not only related to the green and sustainable development of economic society and the ecological security of the Yellow River Basin, but also related to the construction of a modern social power with Chinese characteristics.

In the first step, EBM-GML model is used to estimate the change of environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin. The second step is to construct the spatial correlation network of environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin using gravity model. The third step is to study the network characteristics of spatial correlation of environmental efficiency of major cities by using social network analysis method. In the fourth step, QAP regression analysis was used to study the factors affecting the environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin. The consequences exhibited that:

First, the major cities in the Yellow River basin at the forefront of production are mainly located in the upper and middle reaches, and most of these cities are provincial capitals, with relatively good economic development level, relatively sufficient resources and uniform distribution.

Second, the spatial correlation of environmental efficiency of major cities shows a typical network structure and form, the environmental efficiency of each region in the lower, middle and upper stretches of the Yellow River is significantly different. As a whole, the environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin presents an obvious law of "developed provinces, central provinces and remote western provinces". The environmental efficiency of the most major cities is closely related, and the non-equilibrium characteristics are obvious, and will gradually increase with the development of time.

Third, the major cities in the Yellow River Basin can be separated into four plates. Plate II, as the "engine", transfers the growth momentum of environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin to the "broker" plate (the first plate), which acts as an intermediary and bridge. Plate II transfers the growth momentum of environmental efficiency of major cities to the fourth plate, which has "two-way spillover". As the "main benefit" role, the third plate mainly receives the spillover effect of the first plate.

Fourth, the regression coefficient of the difference matrix of economic development level and foreign investment utilization level is negative, the regression coefficient of the difference matrix of urbanization level is significantly negative, and the influence of the difference matrix of industrial structure, environmental regulation, import and export level, energy consumption level and patent level on the spatial correlation of environmental efficiency is positive. In particular, the environmental regulation difference matrix, energy consumption level difference matrix and patent level difference matrix have significantly positive effects on the spatial correlation of environmental efficiency.

According to the identities of the spatial network structure related to environmental efficiency of major cities, the development strategy of environmental efficiency based on local conditions is formulated according to the economic development level of cities in the Yellow River Basin, so as to continuously optimize the spatial network structure related to environmental efficiency of major cities in the Yellow River Basin, and realize the synergistic effect of environmental efficiency among cities..

Key words: Environmental efficiency; Spatial association network; EBM-GML model; Social network analysis; QAP regression analysis

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 环境效率的测算研究.....	3
1.2.2 环境效率空间关联特征研究.....	4
1.2.3 环境效率的影响因素研究.....	5
1.3 研究内容及框架.....	7
1.3.1 研究对象.....	7
1.3.2 研究主要内容.....	8
1.3.3 框架思路.....	9
1.4 可能的创新点.....	12
2 理论基础与研究方法	13
2.1 效率测度基础理论.....	13
2.1.1 环境效率概念.....	13
2.1.2 生产函数、技术集.....	13
2.1.3 距离函数.....	14
2.2 研究方法.....	14
2.2.1 EBM-GML 模型.....	14
2.2.2 引力模型.....	15
2.2.3 社会网络分析.....	16
2.2.4 QAP 回归模型.....	18
2.3 数据来源.....	19
3 环境效率指数测算结果分析	20
3.1 数据和变量说明.....	20
3.1.1 投入指标.....	20

3.1.2 产出指标.....	20
3.2 各城市环境效率指数的实证和分析.....	21
3.2.1 较高环境效率的城市分析.....	22
3.2.2 较低环境效率的城市分析.....	23
3.2.3 环境效率的变动趋势.....	23
3.3 本章小结.....	24
4 环境效率空间关联特征及影响因素	25
4.1 环境效率空间的关联关系确定.....	25
4.2 整体网络结构特征及演变趋势.....	27
4.2.1 网络密度.....	27
4.2.2 网络关联度.....	29
4.2.3 网络等级度.....	29
4.2.4 网络效率.....	30
4.3 局部网络结构特征及演变趋势.....	31
4.3.1 块模型分析.....	31
4.3.2 核心-边缘结构分析	33
4.4 个体网络结构特征及演变趋势.....	35
4.4.1 点度中心度.....	35
4.4.2 中介中心度.....	37
4.4.3 接近中心度.....	39
4.5 环境效率空间关联网络的影响因素分析.....	41
4.5.1 变量选取依据.....	41
4.5.2 回归结果分析.....	43
4.6 本章小结.....	44
5 结论与展望	46
5.1 主要结论.....	46
5.2 政策建议.....	47
5.3 展望与不足.....	48
参考文献	49

附 录	55
攻读硕士学位期间承担的科研任务及主要成果	58
致 谢	59

1 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

中国已将黄河流域生态保护上升至重大国家发展战略，提高黄河流域环境效率的需求越来越迫切，探究黄河流域环境效率影响机制从而提高其效率不仅关系到经济社会绿色可持续发展和黄河流域生态安全，更决定着中国特色社会主义现代化强国的建设。黄河流域横跨我国东部、中部和西部地区，既是我国经济社会繁荣发展、打造“一带一路”经济带的关键区域，也是绿色发展理念在我国的重要实践和重大部署。目前，该区域存在生态环境污染严重，废气、废水、固体废弃物排放量大等突出的环境问题，这是由于该区域内各省份经济发展水平差距较大导致区域内生态环境建设投入不均衡、指导思想不统一，整体环境治理效果较差造成的。近年来，习总书记考察了黄河流域九大省份多个城市，多次对黄河流域生态环境保护指出明确要求，作出重要指示。2019年习近平总书记对黄河流域生态保护和高质量发展提出了新的要求，2021年发布《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》，“1+N+X”要求的专项规划准确表明，要优化黄河流域水资源配置。2021年以来，生态环境部连续2年共排查黄河流域各省市环境问题，发布文件《关于深入开展2023-2024年黄河流域固体废物倾倒排查整治工作的通知》，全面治理固体废物工作。2023年4月1日《中华人民共和国黄河保护法》正式实施，2023年5月16日习总书记指出黄河流域生态保护是推动高质量发展的基准线。黄河流域主要城市的环境污染问题存在空间关联性，需要各地区协同治理，要重视黄河流域管理城市内部的联动效应。环境效率通常用于分析不同城市或地区的经济发展对环境的友好程度，也是度量不同城市经济是否满足高质量发展的重要指标。

目前，黄河流域的生态环境污染问题仍然非常严重，生态危机仍然高危，存在着沙多、易决、易淤等自然特点，据统计，黄河流域的水资源总量仅占全国水资源总量的2.75%，但开发利用率远远高于全国开发利用率，超越了水资源利用率警戒线，水资源非常稀缺且开发率较高，2017年工业固体废物、二氧化硫排

放总量和废水排放总量产生量分别占比全国的 44.87%、38.52% 和 25.86%，污染防治任务仍然艰巨，流域内生态污染度和稳定性岌岌可危；2018 年地表水开发率远超其他流域生态警戒线，黄河流域总水源虽只占中国水资源 2%，却肩负着全国 8% 的入河污染物、15% 的耕地、12% 的人口；2021 年，黄河流域劣 V 类断面比例高与全国总流域 2.6 个百分点，环境污染问题异常严重。党中央根据黄河流域的复杂污染问题，因时、因地制宜的制定正确的环境规制政策，不断地调整发展战略，运筹帷幄、立足长远，将黄河流域生态环境安全问题与绿色可持续发展相结合，为黄河流域建设开辟了新的蓝图和道路。为遏制黄河流域整体情况环境的恶化和促进黄河流域各城市的可持续发展，本文将在测度黄河流域主要城市环境效率的方向上，构建黄河流域主要城市环境效率的空间关联网络，揭示其空间关联网络特征，并对黄河流域主要城市环境效率及其空间关联网络进行影响因素研究，以期对黄河流域主要城市生态环境保护及现代化发展提出相应的建议。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

黄河是我们的母亲河，她的发展与中华民族的繁荣息息相关，党中央和学者们意识到了这一问题的重要性，通过分析时空演化特征和影响机制，希冀提出针对性建议及对策。

首先，对黄河流域主要城市环境效率值分析及测度，能够优化黄河流域内生态环境与地理资源利用理论，从而为环境地理知识提供可参考文献。

其次，从“时间+空间”的角度出发，利用修正后的引力模型构建空间关联网络、利用社会网络分析方法研究黄河流域主要城市环境效率的网络特征，利用 QAP 回归模型研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响因素，从而优化黄河流域环境效率及影响因素的理论研究，可以对今后黄河流域发展提供理论借鉴。

(2) 现实意义

黄河流域各城市间存在严重的生态环境问题，存在着废气、废水、固体废弃物排放量大等突出的环境问题，实施对黄河流域保护措施和加大力度，提高黄河流域环境效率至关重要，为实现黄河流域全方位的可持续发展添砖加瓦。

通过本文的分析，首先有利于对黄河流域主要城市环境状况的精准掌握，明

确各省份、各城市在发展中存在的问题和瓶颈，促进地区经济和环境的发展。

其次，通过理论和实证分析，本文能够研究黄河流域主要城市间环境效率的空间特征及作用机制，根据空间关联性程度，精准提供有效的路径和准确的政策道路，实现强有力的技术支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 环境效率的测算研究

关于环境效率的测度研究，国内外学者的研究层出不穷，目前已有较多的文献利用随机前沿分析、数据包络分析等方法进行测算。周楷等（2020）采用随机前沿分析方法直接计算污水处理厂的效率，从而探讨影响运行效率的有关指标。王善高等（2019）运用 SFA（Stochastic Frontier Analysis）方法测算了 2004-2016 年中国各省不同规模生猪养殖的环境效率，指出研究期限内大规模、中规模、小规模生猪养殖的环境效率均值依次为 0.926、0.953、0.924。Song 等（2017）运用 DEA 方法测算了中国发电部门的环境效率，指出中国发电行业的环境效率较低，并且地区差异较大。刘宁宁等（2021）运用 DEA（Data Envelopment Analysis）方法测算了 2005-2015 年中国制造业细分行业的环境效率，指出研究期间内中国制造业环境效率有显著提高，但仍有较大的改进空间。周竹梅和单文梅（2017）运用 DEA 模型探讨了企业价值的环境效率，指出环境效率对企业价值有明显的正向影响。熊鹰和许钰莎（2019）对环境友好型农业生产效率进行测度，发现环境友好型农业生产效率存在先降后升的趋势。王宇溪（2020）采用超效率 EBM 模型测算环境效率，丰富了环境效率研究的理论体系与方法体系，指出科学测度环境效率可以深入分析效率的空间差异，讨论其变化趋势和成因。颜华等（2022）运用非径向、非角度的 SBM-Undesirable 方法测度农业环境效率，发现农业生产集聚与环境效率之间存在典型的“倒 U”型关系，且大多数的省份仍然有提高环境效率的空间。张然等（2022）首先利用超效率 SBM 方法测算海洋各地区的环境效率水平，指出海洋环境效率各地区间有明显的差异性。王群勇和李海燕（2022）构建一种基于机会约束规划的不确定数据包络分析（DEA）方法，实证结果表明 CO₂ 排放的不确定性对各区域能源利用效率有显著影响。Tomoaki 等（2023）提出了一个基于前沿方法的跨学科框架，量化提高发电厂环境效率的健康益处，指

出电厂环境效率的提高在减轻空气污染物造成的健康危害方面可以发挥重要作用。Mahnaz 等（2023）旨在通过将数据包络分析（DEA）与生态足迹指数相结合，增强当前对动态环境效率的理解，指出政策制定者在做出经济决策以提高经合组织国家的环境效率时，需要优先考虑可持续经济增长并考虑生态足迹。Huang（2023）创造了一个新的 DEA 综合模型，即三阶段 SHAN 模型。指出政府应认识到环境效率的提升空间还很大，并将环境治理置于经济追求的首位。Jawahir 等（2023）使用的贝叶斯 DEA 方法产生的有效估计优于其他现有的偏差校正 DEA 技术，确定了控制腐败与发展中国家环境效率之间的反比关系，同时指出环境效率滞后对当前环境绩效的影响很大，而且具有统计意义。韩沅刚等（2023）采用 Undesirable-SBM 模型研究海洋经济圈海洋环境效率时间和空间变化特征，得到海洋环境效率呈“M”形波动、即由南向北逐渐升高的增长趋势的结论。

述评：已有文献虽然对中国不同行业或者不同省份环境效率的测算进行了较多的研究，但是很少有文献单独对黄河流域主要城市的环境效率进行测算，并且研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络特征的文献更是缺乏。

1.2.2 环境效率空间关联特征研究

目前对环境效率空间关联特征研究的文献还比较少，大都采用空间计量模型（臧正等 2017；秦腾等 2020；Xu 等 2020；郭晓佳等 2021；Liu 等 2021）、社会网络分析（黄杰 2018）、聚类分析（孙才志和赵良仕 2013）等方法，屈小娥（2018）通过构建区域生态效率评价模型，实证测算并分析了我国区域生态效率的时空关联及集聚特征，指出区域生态效率呈现显著的正的空间相关与集聚特征。秦腾等（2020）在向量自回归模型框架下运用社会网络分析方法对省际水资源效率的动态交互影响效应和空间关联关系进行有效识别，指出水资源效率表现出复杂的、明显的关联网络特征，一个地区的水资源效率水平不仅与其自身相关，而且还会吸收其他地区以及它们构成的空间关联网络的影响。梁佐英和姚德利（2020）基于非期望产出模型，考察了长江经济带 11 个省市工业环境效率的区域差异与空间分布，指出高效率集中在下游和上游地区，低效率集中在中游地区，呈现由“外围”向“中心”延伸趋势。Xu 等（2020）利用动态空间杜宾模型（DSDM）分析了重要因素对环境效率（EE）收敛性影响的区域差异，指出区域间 EE 存在空间正

自相关, 省级 EE 的差异随着时间的推移逐渐缩小, 并趋于收敛到自己的稳态水平。Liu 等 (2021) 利用莫兰指数来探索其空间分布特征, 指出中国公共建筑行业空间特征为东部高西部低, 南部高而北部低。Lv 等 (2022) 利用泰尔指数分析分化程度, 分析不同地区环境效率的随机收敛性, 指出环境效率呈现由东向西、从沿海向内陆逐渐收敛的格局。

述评: 已有文献主要体现在工业环境效率、碳排放时空特征、长江经济带环境效率、环境规制空间关联特征等, 大部分学者的研究出发点均为中国省域、京津冀地区和长江经济带, 鲜有关于黄河流域地区, 特别是黄河流域主要城市环境效率空间关联特征研究的文章更是缺乏。

1.2.3 环境效率的影响因素研究

现有对环境效率影响因素的文献中, 大多采用多层统计模型、Tobit 回归、地理探测器方法、空间计量模型等方法研究能源结构、能源效率、经济发展、人口规模、城镇化率、产业结构、技术水平、外商直接投资等对环境效率的影响 (Feng 等 2019; 覃小华等 2022; 潘建均 2021, 等), 且绝大多数都是对中国各省或其他经济带的省域环境效率进行影响因素研究, 单独研究黄河流域各省、各城市环境效率影响因素的文献凤毛麟角。刘殿国和郭静如 (2016) 运用多层统计模型解决了中国省域环境效率影响因素的作用路径问题, 实证分析了嵌入性视角下中国省域环境效率的影响因素, 发现各省环境效率的社会嵌入性不同造成了 90% 份额不同。Feng 等 (2019) 通过 Tobit 回归实证考察城市蔓延和产业群对环境效率的影响。结果表明: 研究期内城市环境效率存在较大差距, 指出城市扩张对环境效率具有显著的负向影响, 但随着产业集聚的不断完善, 城市扩张的负面影响将被部分抵消。马骏等 (2019) 对江苏省环境效率的影响因素展开研究, 指出人均 GDP、人口密度等因素可以促进环境效率的提升。景晓栋等 (2020) 研究中国区域生态环境效率时空特征及影响因素, 指出不同的环境变量对于生态环境效率的影响作用不同, 人口密度、城市化水平有利于提升各地区的环境效率值, 外贸依存度和人均地区生产总值也会对环境效率产生负面影响。叶文显 (2020) 研究了中部地区各城市环境效率的影响因素, 指出产业结构升级和人均 GDP 的增长有助于提升环境效率, 但是外商直接投资的增长不利于环境效率的提升。Benedetti 等 (2020) 研究创新活动对区域层面环境效率的作用, 指出科技水平, 特别是专

利水平的快速发展会对 GDP 排放效率产生正向作用。Qian (2021) 利用地探测器分析了影响农业环境效率(AEE)的因素,指出农业环境效率主要受财政支出、化肥强度、农药强度和经济增长因素影响。Guo 等(2021)研究了“一带一路”沿线各省物流业环境效率的影响因素,指出经济增长因素对环境效率的影响作用并不显著,而外商直接投资和创新对环境效率的影响较大。林江彪等(2021)研究了黄河流域城市资源环境效率的影响指标,指出政府干预力度和产业结构对资源环境效率有正向影响,但是城镇化水平等因素对资源环境效率有负向影响。潘建均等(2021)研究分析了中国各省份电力行业环境效率及其影响因素,研究发现中国各省份电力行业环境效率的影响因素间有明显差异。郭晓佳和周荣(2021)研究了黄河各省农业资源环境效率的影响因素,指出农业生产技术水平等因素对黄河流域各省农业资源环境效率的影响显著为正,而农业受灾率等因素则阻碍了环境效率的提升。覃小华等(2022)基于多种方法阐释西部地区旅游环境效率的时空分异特征,并结合地理探测器方法揭示旅游环境效率时空分异的影响因素,指出西部地区旅游环境效率时空分异受到多重因素的综合影响,环境自净能力等因素是旅游环境效率的重要影响因子,不同的交互因子驱动力均高于单独因子的力度。Xu 等(2022)通过中国各省面板数据,研究了战略性新兴产业环境效率(SEI)的影响因素,发现产业结构的合理化、第三产业的比重、政府干预经济的能力以及环境执法的公平性和完整性提高了 SEI 的环境效率,生态建设强度和 环境调节等因素阻碍了 SEI 的环境效率。Du 等(2022)研究环境规制与效率的影响作用机制,指出环境法规对污染密集型企业 and 私营企业的影响更大,不同的环境监管政策工具对企业能源环境效率的影响是异质的。Zhang 等(2023)以倾向得分双重差分法(PSM-DID),评估绿色发展机制创新对区域全要素环境效率的作用,指出这一创新对全要素环境效率的提高具有显著影响,机制创新在高污染、高资源消耗地区更为有效。

述评:由以上文献可以发现,虽然目前部分文献仅仅只研究了中国各省或者黄河流域各省(城市)环境效率的影响因素,但是选取的影响因素以及得到的实证结果存在较大的差异。另外,已有文献仅仅只研究了环境效率的影响因素,缺乏对黄河流域各省和城市间环境效率空间关联网络影响因素的研究。

1.3 研究内容及框架

1.3.1 研究对象

黄河流域仅次于长江，是中国的第二大河，流经省份包括陕西省、河南省、山西省、四川省、青海省、甘肃省、内蒙古自治区、宁夏回族自治区和山东省共 9 个省（自治区），本文参考国内外学者对黄河流域主要城市环境变量的研究，基于考虑数据可得性方面和参考郝姝然等（2022）、陈闻君等（2021）、封思洁和张斯琴（2020）等学者对黄河流域各城市的研究，以黄河流域 9 个省（自治区）共 50 个主要城市作为主要研究对象，时间跨度选取 2003-2021 年，根据我国行政区的划分，将山东省和河南省划分为黄河下游，山西省和陕西省划分为黄河中游，甘肃省、四川省、青海省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区划分为黄河上游，具体分组及城市见表 1.1。

表 1.1 研究涉及的黄河流域省（自治区）和 50 个城市

黄河流域	省/自治区	主要城市
黄河下游	山东省	1-济南市、2-淄博市、3-东营市、4-济宁市、5-泰安市、6-德州市、7-聊城市、8-滨州市、9-菏泽市
	河南省	10-郑州市、11-开封市、12-洛阳市、13-新乡市、14-焦作市、15-濮阳市、16-三门峡市
黄河中游	山西省	17-太原市、18-晋城市、19-朔州市、20-晋中市、21-运城市、22-忻州市、23-临汾市、24-吕梁市
	陕西省	25-西安市、26-铜川市、27-宝鸡市、28-咸阳市、29-渭南市、30-延安市、31-榆林市、32-商洛市
黄河上游	甘肃省	33-兰州市、34-白银市、35-天水市、36-平凉市、37-庆阳市、38-定西市
	青海省	39-西宁市、40-海东市
	宁夏回族自治区	41-银川市、42-石嘴山市、43-吴忠市、44-固原市、45-中卫市
	内蒙古自治区	46-呼和浩特市、47-包头市、48-乌海市、49-鄂尔多斯市、50-巴彦淖尔市

1.3.2 研究主要内容

(1) 黄河流域主要城市环境效率的测算

根据国内外研究现状发现,大部分学者主要利用 DEA 模型测算环境效率,但环境效率的测度涉及到非期望产出,因此在传统 DEA 的基础上,本文采用 EBM-DEA (Efficiency-based Model- Data Envelopment Analysis) 模型进行黄河流域主要城市环境效率的测算。此外,本文也将利用考虑非期望产出的 GML (Global Malmquist Luenberger) 指数来考察黄河流域主要城市环境效率的动态变化,主要指标参考郭海良 (2023),选取资本存量、劳动力数量和能源消费总量作为投入要素。其中,资本存量通过永续盘存法计算得到,劳动力数量采用年末从业人数来计算,而能源消费总量则通过加总一次能源消费量得到。同时,选取各城市 GDP 作为期望产出,而非期望产出则通过二氧化碳排放量、工业二氧化硫排放量、工业烟尘排放量和工业废水排放量进行度量,从较高环境效率的城市、较低环境效率的城市以及环境效率的变动趋势(时间维度/空间维度)进行分析。

(2) 黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的构建

引力模型指标参考刘华军等 (2016),城市之间的距离以各城市之间的地理距离占人均 GDP 的比重来计算,质量以人口数量、环境效率和地区生产总值三者的几何平均值来表示,万有引力系数以城市 i 的环境效率除以城市 i 和 j 环境效率之和来表示,借鉴牛顿的万有引力定律的公式,构造黄河流域城市环境效率空间关联网络引力模型。另外,对网络数据采用标准化处理,也即将大于平均值的数据处理为 1,小于平均值的数据处理为 0。

(3) 黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的特征分析

社会网络模型主要参考刘军 (2009),对于黄河流域主要城市环境效率的空间网络结构特征,本文拟从整体网络特征,主要包括网络关联度、网络密度、网络等级度和网络效率四个角度来研究,网络密度通常用于衡量网络中各城市之间联系是否紧密,网络密度越小,网络中各城市间的联系就越疏松;网络关联度是用来衡量网络对中介城市的依赖性的要素,这一指标可以反应黄河流域主要城市间环境效率空间关联网络的稳定性;网络等级度是反应网络中黄河流域主要城市之间等级结构是否明显,网络等级度越高,证明该网络间的等级结构越明显;网络效率是指网络中各城市间的连接效率,网络效率越高,则各城市之间有更多的

联结，即城市间联系的更紧密，越稳定。进一步，本文拟用块模型和核心-边缘结构分析研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的局部网络特征，块模型可用于刻画黄河流域主要城市间的环境效率空间关联网络中的内部结构状态，以及各局部结构之间的溢出关系和路径；核心-边缘结构可以量化分析各城市间网络“位置”，计算各节点间具体紧密程度值，将网络中的城市分为“边缘”和“核心”两大区域。最后，本文拟利用中心性分析来刻画黄河流域各省环境效率空间关联网络的个体网络特征，将利用测量接近中心度、中介中心度和点度中心度来进行网络中心性的分析，从而细化研究样本中每个城市在环境效率空间网络中的作用。其中，点度中心度可以直接链接到该城市与其他城市的数量，中心度较高的城市在所有城市中处于中心地位；接近中心度用于描绘某一城市与其他城市的距离，接近中心度越高，该城市受到其他城市控制的作用越小；中介中心度是指网络中某一城市控制相连的两个城市相互作用的能力，中介中心度较高的黄河流域城市在网络中能够发挥出中介和桥梁的功能。

(4) 黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响因素分析

本文通过利用 QAP (Quadratic Assignment Procedure) 回归模型来研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响因素。参考已有环境效率影响因素方面的文献，从经济增长、技术进步、对外开放、城镇化率、产业结构、外资规模、环境规制、环境治理、能源消费等影响因素进行分析，选取以上各变量主要城市两两之间的差值作为影响因素。另外，被解释变量是各城市环境效率的空间关联网络（对应的数据为矩阵）。

(5) 优化建议研究

根据前文对黄河流域主要城市环境效率及空间网络影响因素的研究结果，基本掌握了黄河流域发展过程中遇到的问题及瓶颈，针对性的研究黄河流域主要城市资源环境的优化建议。

1.3.3 框架思路

本文旨在探究黄河流域环境效率影响机制，从而提高黄河流域效率值，保护经济社会绿色可持续发展和黄河流域生态安全，根据目前国内外学者对黄河流域效率值的研究，本文认为一方面黄河流域环境效率的测度可以从 EBM-GML 方向进行测算，之后与引力模型、社会网络分析进行结合，另一方面需要结合影响

因素作用机制来考虑黄河流域主要城市环境效率问题,找出影响其效率值的主要作用因素,从源头因素出发,从而更加高效、更加精准的提高黄河流域环境效率水平,具体研究思路如下:

首先,根据国内外目前研究现状,环境效率概念、生产函数、技术集及距离函数等相关理论基础,发现大多数效率问题都是复杂多样的,通过距离函数值的测度,可以使多投入位于生产可能性曲线上,值越大,环境效率值越低,呈反向变动关系。我们只需调整距离函数值最小,就能够得到最大的环境效率值,因此确定本文环境效率测算的工具和方法。

其次,对黄河流域主要城市环境效率空间关联网进行构建,通过引力模型对空间关联网进行构建,接着利用整体网络特征,即网络关联度、网络密度、网络等级度和网络效率来研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网,利用块模型和核心-边缘结构分析研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网的局部网络特征,利用点度中心度、中介中心度和接近中心度研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网的个体网络特征,为进一步研究黄河流域主要城市环境效率影响因素打下基础。

最后,在黄河流域主要城市环境效率测度和空间网络分析的基础上,基于环境效率基本内涵,环境效率与经济发展、社会、环境、技术水平均休戚相关,利用 QAP 回归模型,重点从经济系统、开放水平、环境系统、科技水平、社会系统五个方面作为黄河流域主要城市环境效率的影响因素,同时基于上述分析,为制定合理的提高黄河流域主要城市环境效率值等政策措施提供理论依据。

具体框架思路图见图 1.1。

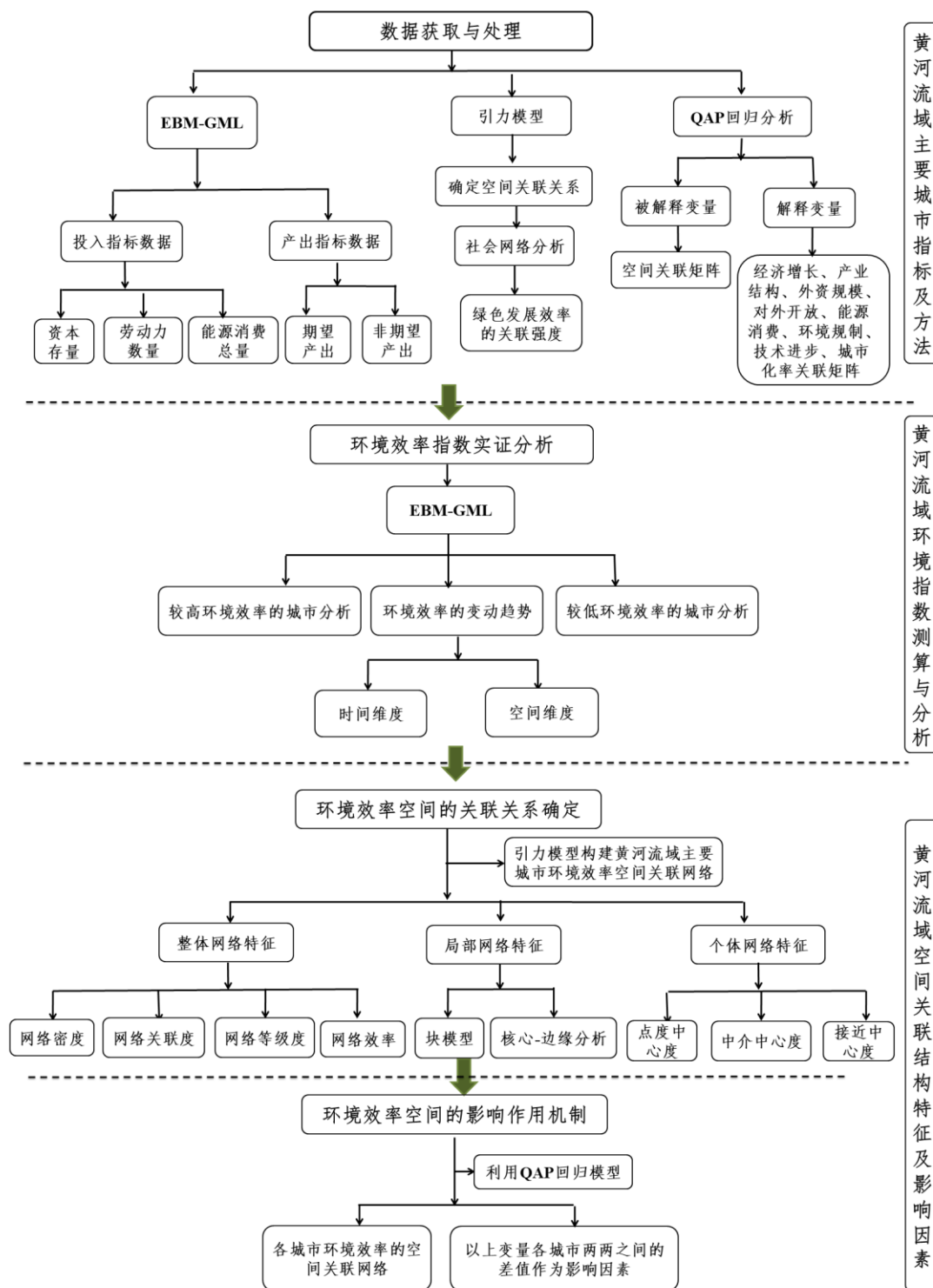


图 1.1 框架思路图

1.4 可能的创新点

(1) 选题方面，目前关于黄河流域环境效率的研究多集中于黄河流域流经九省份或者直辖市的研究，本文选取了黄河流域 50 个主要城市进行分析和测度，贴合我国当下经济和发展的需要。

(2) 黄河流域主要城市环境效率的空间关联网络方面，创造性的利用社会网络分析方法研究黄河流域主要城市环境效率的空间关联网络。

(3) 影响因素分析方面，利用 QAP 回归分析研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响因素。

2 理论基础与研究方法

2.1 效率测度基础理论

2.1.1 环境效率概念

环境效率问题自效率问题发展而来，效率问题早已被社会各界学者所重视，环境效率其简单概念自 20 世纪 90 年代初第一次被提出，但关于环境效率概念的具体理论还没有得到明确的含义，本文通过分析黄河流域主要城市环境效率的空间关联网特征和影响因素研究是从效率到环境效率的演变。

Farrell (1957) 首次对效率问题进行界定，将效率分为配置效率和技术效率，配置效率指的是将投入和产出进行配置，以期达到最佳性价比，技术效率是基于生产单元规模不变，通过一定数量的投入产出最大的可能性。1994 年，Färe et al. (1994) 扩展 Farrell (1957) 的理论，将效率理论的研究更加深入和完善。环境效率最早由 Schaltegger 和 Sturm 在 1990 年首次提出，经济发展合作组织(OECD) 创造性的将环境效率进行更广泛的界定，即生态资源满足人类需求的效率，联合国贸易与发展会议之后将环境效率进行再次定义，即增加或者不减少股东价值的同时减少对环境的破坏的战略。在此之后，环境效率的概念广泛传播。

2.1.2 生产函数、技术集

生产函数可以用一个数理模型、图表或图形来表示。经济学意义上的“生产”不仅包含了经济活动，而且也涉及为某个人或经济实体提供产品或服务。生产函数一般可描述生产技术中输入元素的输入量与最大生产量之间的关系。当使用 N 种投入元素（资本，劳动力，能源，土地，技术等）来生产产品。

$$y = f(x) \quad (1)$$

其中， y 是输入元素组合可生成的最大产出量， x 是投入向量，生产函数特征有：

$$f(\lambda x_1, \lambda x_2, \dots, \lambda x_n) = \lambda^\alpha (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$\lambda > 1$ 时，说明投入元素增长了 λ 倍，则产出也会逐渐增加 λ^α 倍。

生产函数通常用来描述最佳生产情况，说明此时的投入位于生产可能性曲线

上及生产前沿面，通过生产函数，我们通过调节生产要素，使产量达到最大值，绘制光滑的生产可能性曲线，从而使生产函数达到最大，效率最优。

2.1.3 距离函数

Shepard 和 Malmquist 首次提出距离函数，并将其实践在效率研究中，生产函数和技术集主要描述单输入和单产出的关系，但我们日常实践中发现，大多数效率问题都是复杂多样的，距离函数的提出解决了这一难题，通过反应实际情况中多投入对最佳生产情况的影响，通过距离函数值的测度，使多投入位于生产可能性曲线上，值越大，环境效率值越低，呈反向变动关系。我们只需调整距离函数值最小，就能够得到最大的环境效率值。将距离函数划为投入距离函数和产出距离函数：

$$d_0(x, y) = \min\{\delta: (y/\delta) \in P(x)\} \quad (3)$$

$P(x)$ 为产出集， $d_0(x, y)$ 表示距离函数，如果生产处于生产可能性曲线上，集 $d_0(x, y) = 1$ 。

$$d_i(x, y) = \max\{\delta: (x/\delta) \in L(y)\} \quad (4)$$

$L(y)$ 为投入集，即所有投入和产出的集合，目前的研究通过规模报酬可变的 DEA 方法直接度量距离函数，从而量化生产单元和边界间的“相对效率”。

2.2 研究方法

2.2.1 EBM-GML 模型

DEA 模型自 20 世纪 90 年代提出之后被用于研究效率问题，已得到学者的广泛认可，其理论基础简单，适用范围较广，但随着研究问题的深入，普通的 DEA 模型无法满足现实问题的研究，后衍生出规模报酬不变的 BCC 模型、规模报酬可变的 CCR 模型、非径向测算的 SBM (Tone, 2001) 模型、超效率模型等，Tone (2010) 构建了一个综合径向和非径向特点的 EBM 模型，公式为：

$$r^* = \min\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^M \frac{W_i S_i^-}{x_{ik}} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^N x_{ij} \lambda_j - \theta x_{ik} + S_i^- = 0, \quad i = 1, \dots, M$$

$$\sum_{j=1}^N y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \quad r = 1, \dots, s, \quad \lambda_j \geq 0, \quad S_i^- \geq 0$$

式中， r^* 是不考虑非期望产出的效率值， $0 \leq r^* \leq 1$ ； θ 是径向模型测出的效率值； S_i^- 是各投入指标的松弛变量； W_i 是各投入指标的权重； λ 是决策单元的线性组合系数； ε_x 是结合径向 θ 和非径向松弛的关键参数，取值范围是 $[0,1]$ ，取 0 时相当于径向模型，取 1 时相当于 SBM 模型。

EBM 模型只能测算决策单元某一时点的效率值（技术效率），未能反映技术进步和生产率的变化，因此借鉴 Pastor 和 Lovell（2005），构建 GML 指数跨期比较环境效率的变化，主要参考李金克等（2021）和马杰等（2023），模型如下：

$$\begin{cases} GML_t^{t+1} = \frac{1 + \overline{D}_0^G(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \overline{D}_0^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} \\ GML_t^{t+1} = EC_t^{t+1} * TC_t^{t+1} \\ EC_t^{t+1} = \frac{1 + \overline{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \overline{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} \\ TC_t^{t+1} = \frac{1 + \overline{D}_0^G(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \overline{D}_0^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} * \frac{1 + \overline{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \overline{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^t)} \end{cases} \quad (6)$$

其中， $1 + \overline{D}_0^G(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)$ 为当期全局方向性距离函数， GML_t^{t+1} 指数的基础是方向性距离函数，可分解为技术效率变化和技术进步变化，分别为 EC_t^{t+1} 和 TC_t^{t+1} ， TC_t^{t+1} 表示当期与全局技术前沿的“最佳实践者距离”。测算环境效率指数选取的具体指标如表 3.1 所示（投入、期望产出和非期望产出分别对应公式中的 x 、 y 和 b ）。

2.2.2 引力模型

引力模型自 VAR 格兰杰因果检验方法发展而来，其优势在于不仅仅单一考虑地理问题，而且将城市间相互影响相互作用的关系进行综合考量，本文在地理因素的基础上加入经济因素，人口因素，质量因素，从而构建修正后的引力模型，基于此可以更加科学准确的分析黄河流域主要城市环境效率的空间关联关系，得出城市*i*与城市*j*之间环境效率的引力矩阵如下：

$$\begin{cases} F_{ij} = k_{ij} \times \frac{M_i \times M_j}{\left(\frac{D_{ij}}{g_i - g_j}\right)^2} \\ M_i = \sqrt[3]{P_i \times E_i \times G_i} \\ M_j = \sqrt[3]{P_j \times E_j \times G_j} \\ k_{ij} = \frac{E_i}{E_i \times E_j} \end{cases} \quad (7)$$

式中： F_{ij} 代表城市*i*和城市*j*之间的引力。 M_i 和 M_j 代表城市*i*和城市*j*的“环境效率发展质量”，质量因素通过黄河流域主要城市间的经济联系构建计算公式 $P_{ij} = \frac{\sqrt{P_i \times V_i} \times \sqrt{P_j \times V_j}}{D_{ij}}$ ，其中， P_i 和 P_j 为两城市的人口指标，考虑到黄河流域主要城市中部分城市数据获取较难，本文将 P_i 和 P_j 设定为城市*i*和城市*j*的年末从业人口数； V_i 和 V_j 为两城市的经济指标，主要参考刘华军（2019）等的研究，将 V_i 和 V_j 定义为黄河流域主要城市经济生产总值与环境效率值的乘积，即 G_i 和 G_j 为城市*i*和城市*j*的经济生产总值， E_i 和 E_j 为城市*i*和城市*j*的环境效率值， k_{ij} 表示城市*i*和城市*j*间环境效率关联中的贡献率，除了经济因素的分析，引力模型基于地理距离因素进行测度，城市*i*和城市*j*的 D_{ij} 表示黄河流域主要城市的地理距离，该距离通过城市间的经纬度进行计算得到。最后，将经济因素和地理因素进行合并分析，用 g 表示黄河流域主要城市间的人均生产总值，故本文以 $\frac{D_{ij}}{g_i - g_j}$ 表示黄河流域主要城市之间的“距离”。因为在考察期内黄河流域上、中、下游的经济发展差距较大，因此本文将引力矩阵的各年份平均值作为临界值，主要城市中引力值若高于黄河流域各年份均值则标记为1，意味着城市间环境效率存在关联关系；反之若引力值低于黄河流域主要城市各年份均值则标记为0，标志着黄河流域主要城市间环境效率不具有关联关系。

2.2.3 社会网络分析

社会网络分析方法属于一种跨学科分析方法，主要用于分析两个单位间的关系，该方法基于引力模型，用于探究关系网络中各单位之间以及单位与整体之间的关系。这一方法不仅能够分析空间关联网络的整体特征及演变趋势，而且能够测度各城市在空间关联网络中的作用和所处地位，因此本文研究的黄河流域主要

城市环境效率空间关联网络的结构特征可以运用社会网络分析方法进行探索和研究, 本文从整体、局部、个体三个维度来分析黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的结构特征。

通常分析整体网络结构运用网络关联度、网络密度、网络效率和网络等级度四个角度开展研究, 网络密度用D表示, 度量网络中不同城市之间的联系是否密切, 网络密度值越高, 表示黄河流域主要城市之间的联系就越紧密。网络关联度用C表示, 指的是黄河流域主要城市环境效率网络自身的稳健性, 若黄河流域中两个城市之间的关系足以连接整个黄河流域或者这两个城市之间存在间接或直接关系, 则说明黄河流域整体网络间存在较好的稳健性和稳定性。网络等级度用H来表示, 表示有向网络中黄河流域各城市之间等级结构以及各城市的主导优势, H值越高, 等级结构越明显。网络效率用E表示, 用来度量网络中多余节点, 即网络溢出渠道和稳定性。E值越高, 则空间溢出越少, 黄河流域主要城市内部之间连接越多, 内部各城市之间联系更加密切, 网络稳定度越高。

$$\begin{cases} D = \frac{x}{[Y \times (Y-1)]} \\ C = 1 - V/[Y \times (Y-1)/2] \\ H = 1 - S/\max(S) \\ E = 1 - V'/\max(V') \end{cases} \quad (8)$$

X表示城市间连接数量, Y表示城市数, V表示不可达城市对数, S表示空间关联网络中对称的节点对数, V'表示可达城市对数值, D、C、H、E的取值范围均为[0, 1]。

通常运用块模型和核心-边缘分析两种方法从不同角度开展局部网络特征的研究。块模型近几年被学者大量运用和研究, 通过该方法可以揭露和确定黄河流域主要城市环境效率空间关联网络中每个城市在网络中的位置, 可以将局部板块间的路径、溢出关系、内部结构同时进行刻画和分析。核心-边缘结构可以量化分析黄河流域各城市间网络“位置”, 计算各节点间具体紧密程度值, 将网络中的城市分为“边缘”和“核心”两大区域, 从而科学合理的规划局部城市间的关系。

个体网络特征可以用来分析黄河流域主要城市中每一个节点自身的关系和特点, 学者对此的研究较为成熟, 通常从点度、接近、中介中心度三个角度开展研究。点度中心度用DC表示, 通过DC的值可以分析出黄河流域各城市间连接数

量,从而测算黄河流域每个城市的中心程度,从而将点度中心值较高的城市列为中心城市,接近中心度用 CC 表示,指的是黄河流域某一城市不受其他所有城市控制的程度, CC 的值越大,说明这一城市越与其他城市存在关联关系,处于核心地位。中介中心度用 BC 表示,指的是黄河流域某一城市管理其他城市的能力, BC 的值越大,说明这一城市对黄河流域其他城市的环境效率控制作用越大,这一城市在网络中处于更加核心的地位。

$$\begin{cases} DC = \frac{d}{n-1} \\ CC = \sum_j^n l_{ij} \\ BC = (2n-3) \times \left[\sum_{i=1}^n \frac{(CC_{max}-CC_i)}{(n-2) \times (n-1)} \right] \end{cases} \quad (9)$$

d 表示黄河流域环境效率网络中的某一城市与其他直接相关的城市数目即相对点度中心数, n 表示黄河流域主要城市环境效率网络中的城市数量。 l_{ij} 表示两城市间的捷径距离。

2.2.4 QAP 回归模型

QAP 回归方法是基于矩阵数据置换和方阵中格值存在相似性进行比较分析的模型,通过标准统计程序和矩阵间的相似性进行非参数检验,从而进行重新抽样计算。QAP 回归的自变量和因变量均是矩阵型数据,该方法可以用来分析和度量不同“关系”即黄河流域不同城市间是否存在某种可能的空间相互作用。该模型通过二次指派程序进行估计(刘军,2007),本文拟利用 QAP 回归模型来研究黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响因素,主要以变量之间的“关系”为研究基础,以矩阵网络作为解释变量和被解释变量。综合文献研究,学者们对黄河流域主要城市环境效率空间关联的常见解释变量有对外开放水平、城市化水平、产业结构、能源消耗等。本文重点从经济系统、开放水平、环境系统、科技水平、社会系统五个方面(具体指标见下表)作为黄河流域主要城市环境效率的影响因素,纳入 QAP 回归模型,其基本的 QAP 模型设定如下:

$$GML = f(PG, IS, FDI, OL, EC, ER, TL, UR) \quad (10)$$

QAP 加权网络回归方程为:

$$GML_{ij} = \beta_0 + \beta_1 PG + \beta_2 IS + \beta_3 FDI + \beta_4 OL + \beta_5 EC + \beta_6 ER + \beta_7 TL + \beta_8 UR + \mu \quad (11)$$

其中, GML 为黄河流域主要城市环境效率的空间关联矩阵, 即本文的被解释变量, PG 为经济增长, IS 为产业结构, FDI 为外资规模, OL 为对外开放, EC 为能源消费, ER 为环境规制, TL 为技术进步, UR 为城市化率, 均为本文的解释变量空间矩阵。

表 2.1 黄河流域主要城市环境效率空间关联影响因素及变量说明

影响因素	符号	含义	指标定义
经济系统	PG	经济增长	GDP 总量
	IS	产业结构	第三产业占地区生产总值比例
开放水平	FDI	外资规模	利用外资总额占 GDP 比重
	OL	对外开放	进出口总额占 GDP 比重
环境系统	EC	能源消费	人均能源消费总量
	ER	环境规制	由熵权法确定
科技水平	TL	技术进步	专利申请数量
社会系统	UR	城市化率	城镇人口占总人口的比重

2.3 数据来源

本文所有数据均来自于《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、黄河流域各省市统计年鉴、CEADs 数据库和中经网统计数据库等, 覆盖了 2003-2021 年黄河流域 50 个主要城市环境效率相关数据。对于部分缺失数据本文利用线性插值法进行补充, 引力模型中各城市间的地理距离利用经纬度计算得出。

3 环境效率指数测算结果分析

3.1 数据和变量说明

3.1.1 投入指标

根据经典的柯布道格拉斯生产函数，总产出受技术水平、劳动、资本三方面的影响，可以看出各城市生产的关键因素是劳动投入和资本投入。故本文投入指标的选取也从资本、劳动力和资源量入手，投入指标包括资本存量、劳动力数量和能源消费总量。产出指标包括非期望和期望产出。

资本要素投入：各城市资本存量。资本存量参照张军（2004）等以及钦晓双和孙成浩（2014）的文章利用永续盘存法（PIM）进行计算，共有以下四方面的关键问题需要解决，具体公式如下：

$$K_{it} = K_{it-1}(1 - \delta_{it}) + I_{it} \quad (12)$$

基期资本存量的确定为 2002 年，已存在有建筑安装工程投资、机器设备购置投资和其他费用投资这三类投资品的数据，无需进行假设和对数据进行换算处理。参照张军等将三类固定资产投资的价格指数设为相同选取价格指数，通过测算隐性价格指数的方法得到总的固定资产投资价格指数。投资流量的选择固定资产投资数据作为历年的投资序列。折旧率的设定参照钦晓双和孙成浩，将建筑安装工程投资的有效寿命设为 40 年，机器设备购置投资为 16 年，而其他投资设定为 20 年。残值率则采用目前统一的做法选取法定残值率的中间值 4%。这样本文得到三类资本品的折旧率依次为 8%、18.22% 和 14.87%。

劳动要素投入：各城市年末从业人口，劳动要素是重要的投入指标，本文参考陈诗一（2010）的文章，选取年末从业人口为劳动投入要素。

自然资源要素投入：能源消费总量，天然气、液化石油气、电按标准煤折算并加总计算黄河流域主要城市的环境效率，考虑环境效率测度问题，在投入要素中加入自然资源投入要素，能源消费总量。

3.1.2 产出指标

期望产出指标：参考大多数研究资源环境的学者（田伟等 2014，覃小华等 2022），以 2002 年为基期，选取各城市 GDP 指标来衡量期望产出。

非期望产出指标：参考郭海良（2023），选取二氧化碳排放量、工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟尘排放量度量非期望产出指标。

表 3.1 投入产出指标与变量说明

一级指标	二级指标	具体指标定义
投入指标	资本存量	按照永续盘存法计算
	劳动力数量	各城年末从业人员数据
	能源消费总量	天然气、液化石油气、电按标准煤折算后进行加总计算
产出指标	期望产出	二氧化碳排放量
		工业废水排放量
		工业二氧化硫排放量
	非期望产出	工业烟尘排放量 各城市 GDP 值

3.2 各城市环境效率指数的实证和分析

首先利用 MATLAB 软件对 2003 年-2021 年黄河流域主要城环境效率值进行 EBM-DEA 计算，结果如下表 3.2 及图 3.1-图 3.4，具体结果见附录 1。

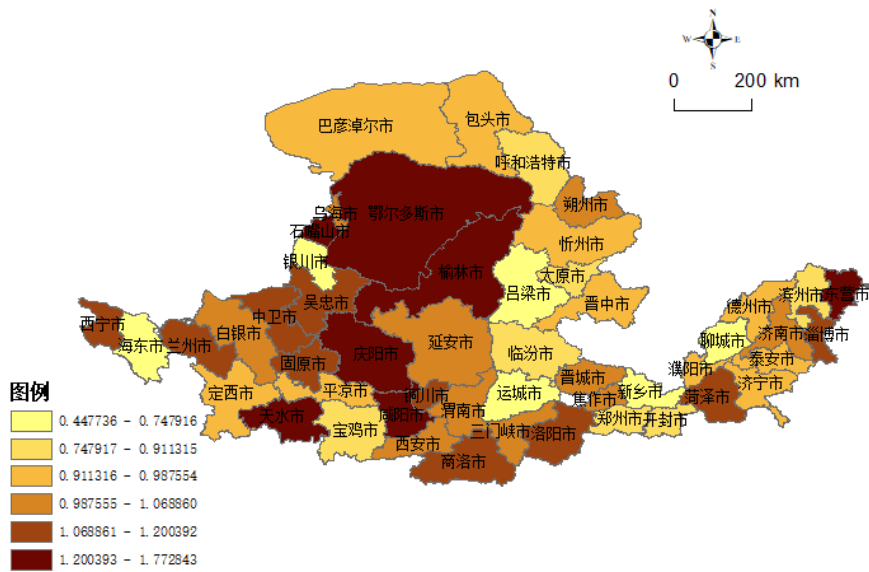


图 3.1 2003 年各城市环境效率值 Arcgis 图

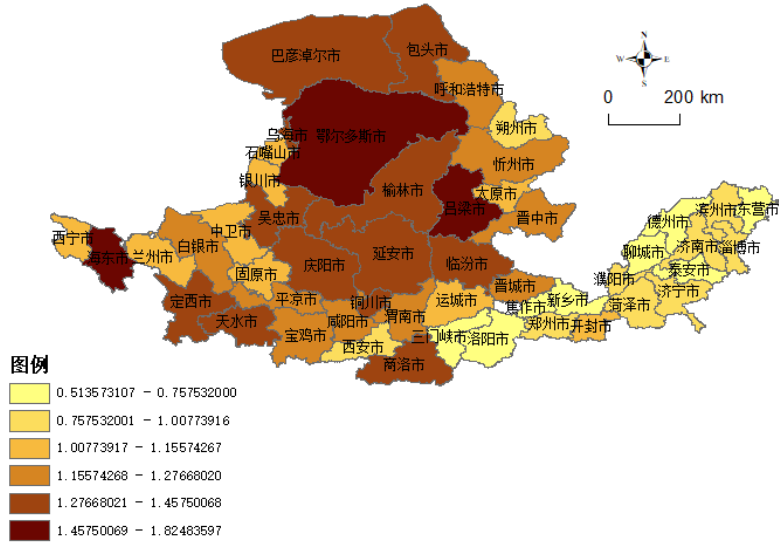


图 3.2 2021 年各城市环境效率值 Arcgis 图

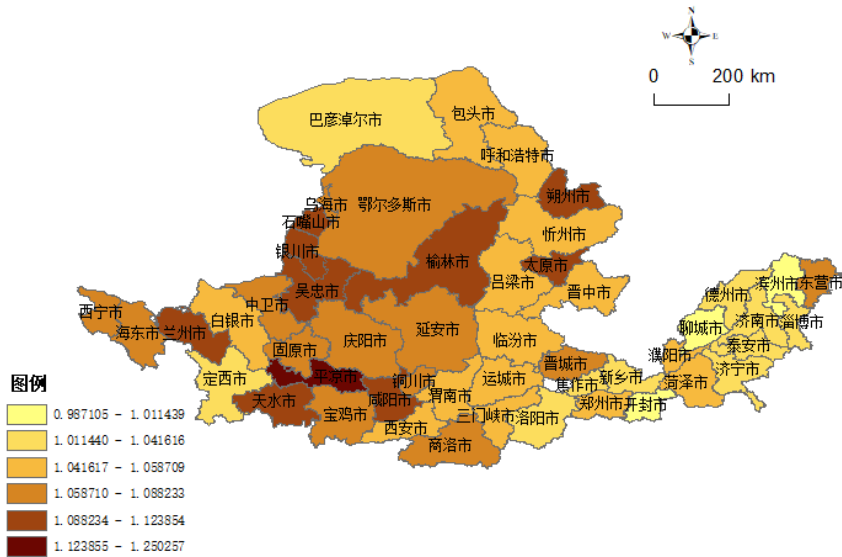


图 3.3 各城市各年度环境效率平均值 Arcgis 图

3.2.1 较高环境效率的城市分析

由图 3.1-图 3.3 中结果，黄河流域主要城市中位于生产前沿的城市主要包括平凉市、榆林市、兰州市、石嘴山市、吴忠市、天水市、咸阳市、朔州市、太原市、银川市。在 2003-2021 年，这些城市环境效率指数位于前列，这些城市位于黄河上游和黄河中游，并且这些城市大多数为各省份省会城市，经济发展水平程度相对较好，资源相对充足，分配均匀，即使没有较多的能源和环境投入，但是

由于这些城市生产企业较优秀，不良生产较少，因此环境效率值并未减小，从而使这些城市仍然处于生产前沿。

3.2.2 较低环境效率的城市分析

由图 3.1-图 3.3 中结果，黄河流域主要城市中定西市、济宁市、淄博市、泰安市、新乡市、济南市、焦作市、开封市、滨州市、聊城市这些城市处于较低环境效率水平，在 2003-2021 年，这些城市环境效率指数位于最后，这些城市大多位于黄河下游，并且这些城市大多数集中在山东省和河南省，这些地区可能是因为环境效率成本较高，经济发展水平对环境的依赖大于其他省份和城市，其城市中劳动密集型产业较多，劳动密集型产业通常规模较大，能源消耗水平较小，有着先进的管理水平和精细的生产工艺，伴随国家 GDP 水平的不断增加，各城市自身水平提高后，资源的消耗相对更少，从而使这些城市的环境效率得以提高。但资源密集型产业在此过程中无法降低自身的能源消耗，需要消耗和浪费更多资源，从而使环境效率降低。

3.2.3 环境效率的变动趋势

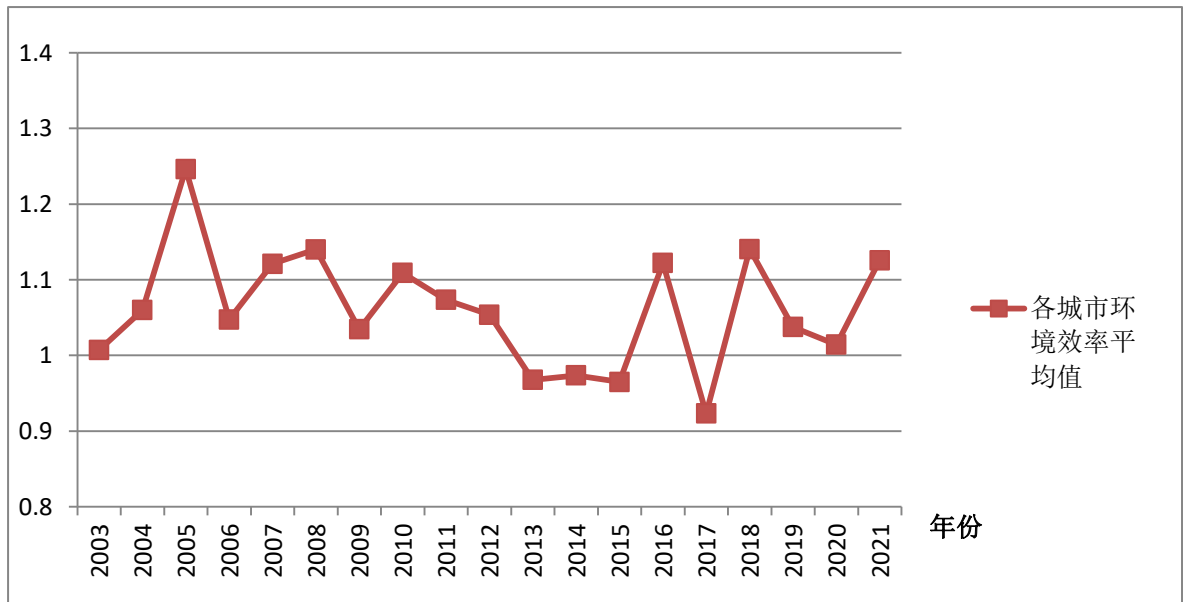


图 3.4 各城市环境效率平均值

由图 3.4 可知，环境效率平均值整体处于 0.9-1.3 这个趋势之间，且整体趋势

呈先上升后下降，之后又大幅度上升后下降，最后两年又上升的趋势，其中 2003-2005 年，环境效率不断在增加，并在 2005 年达到了最大值，可能是由于工业化城市还不成熟，对环境的破坏和资源的浪费都比较少，因此环境效率不断得以提高，2008-2015 年，基本上一直处于环境效率下降的趋势，这可能是由于随着经济的高速增长，黄河流域环境效率的利用率越来越低，我们在追求高速度发展的同时忽略了环境的发展，黄河流域各城市没有合理高效的利用环境资源，造成了黄河流域资源的浪费和环境的恶化，2016-2018 年，环境效率非常不平稳，表现出大起大落的态势，2019-2021 年环境效率渐渐提高，可能是因为新冠疫情的突袭使经济发展速度放缓，黄河流域环境问题得到了一定程度的缓解，但黄河流域主要城市环境效率总平均值仍然没有达到较高的水平，我们应该思考，经济高速发展和绿水青山真的不能双赢吗？我们应该采取什么样的措施使经济社会达到“高质量”发展，而不仅仅是以牺牲生态环境达到的高速发展？习近平总书记一直在强调“绿水青山就是金山银山、建设美丽中国、实现高质量发展”，我们应该抓住现在环境效率增长的大趋势，更加积极主动的建设美丽中国，保护好我们的母亲河，提高黄河流域环境效率。

3.3 本章小结

黄河流域主要城市中位于生产前沿的城市主要包括平凉市、榆林市、兰州市、石嘴山市、吴忠市、天水市、咸阳市、朔州市、太原市、银川市，这些城市环境效率指数位于前列，这些城市位于黄河上游和黄河中游，并且这些城市大多数为各省份省会城市，经济发展水平程度相对较好，资源相对充足，分配均匀。黄河流域主要城市中定西市、济宁市、淄博市、泰安市、新乡市、济南市、焦作市、开封市、滨州市、聊城市这些城市处于较低环境效率水平，这些城市环境效率指数位于最后，这些城市大多位于黄河下游，环境效率平均值整体处于 0.9-1.3 这个趋势之间，且整体趋势呈先上升后下降，之后又大幅度上升后下降，最后两年又上升的趋势。

4 环境效率空间关联特征及影响因素

4.1 环境效率空间的关联关系确定

本文基于上一章对黄河流域主要城市动态环境效率值的分析结果,本章引入引力模型的原因在于引力模型不局限于单一考虑地理问题,而且将城市间相互影响相互作用的关系进行综合考量,本文在地理因素的基础上加入经济因素,人口因素,质量因素,从而构建修正后的引力模型,基于此可以更加科学准确的分析黄河流域主要城市环境效率的空间关联关系,首先通过 EBM-GML 模型对黄河流域主要城市环境效率值进行动态测算,筛选出环境效率较高和较低的城市,分析城市与地理位置的关联,同时分析环境效率近 20 年的规律。之后通过修正的引力模型构建黄河流域主要城市环境效率空间关联矩阵,从而分析各城市间的环境效率空间关联情况。首先利用 UCINET 软件中可视化工具 Netdraw,代入 0-1 矩阵得出空间关联网络形态结构图。以 2003 年-2021 年中四个年份(2003、2009、2015、2021)来演绎黄河流域主要城市环境效率网络的空间结构。

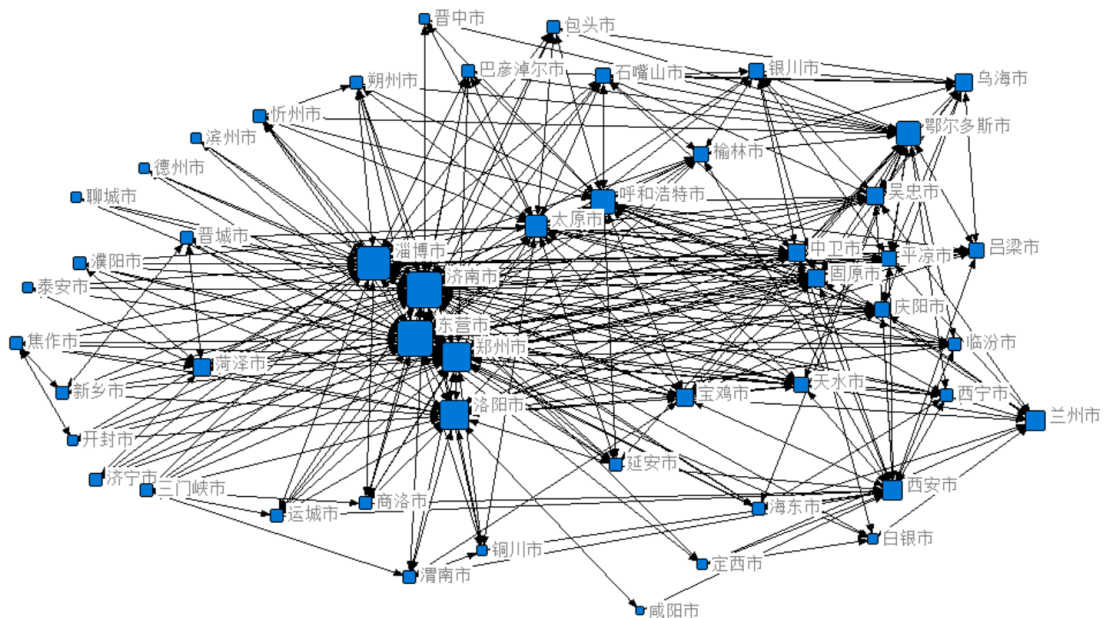


图 4.1 2003 年黄河流域主要城市环境效率空间结构

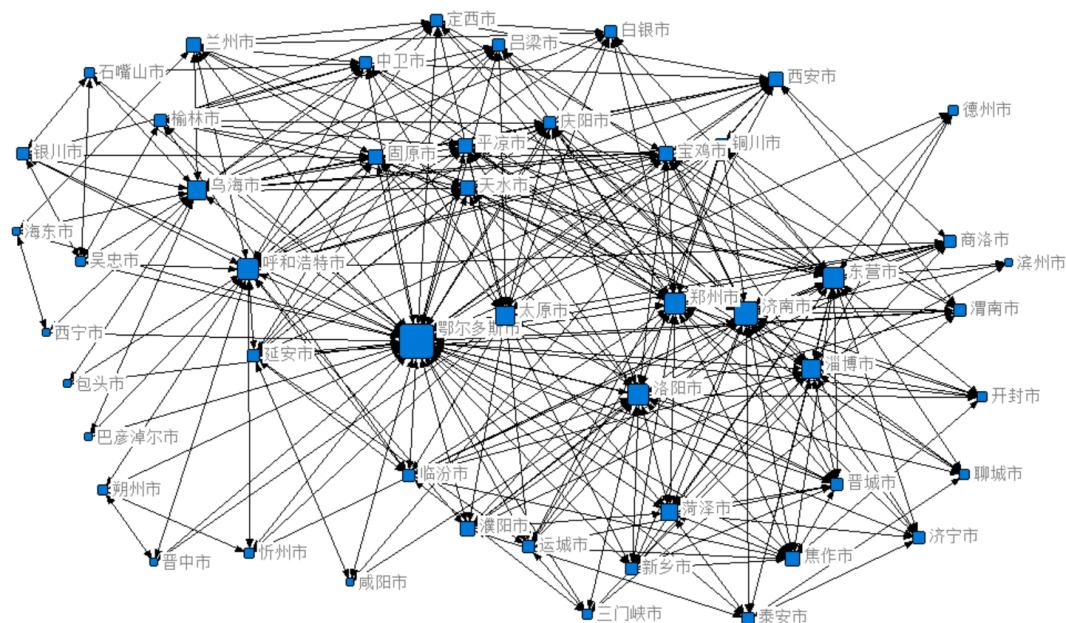


图 4.2 2009 年黄河流域主要城市环境效率空间结构

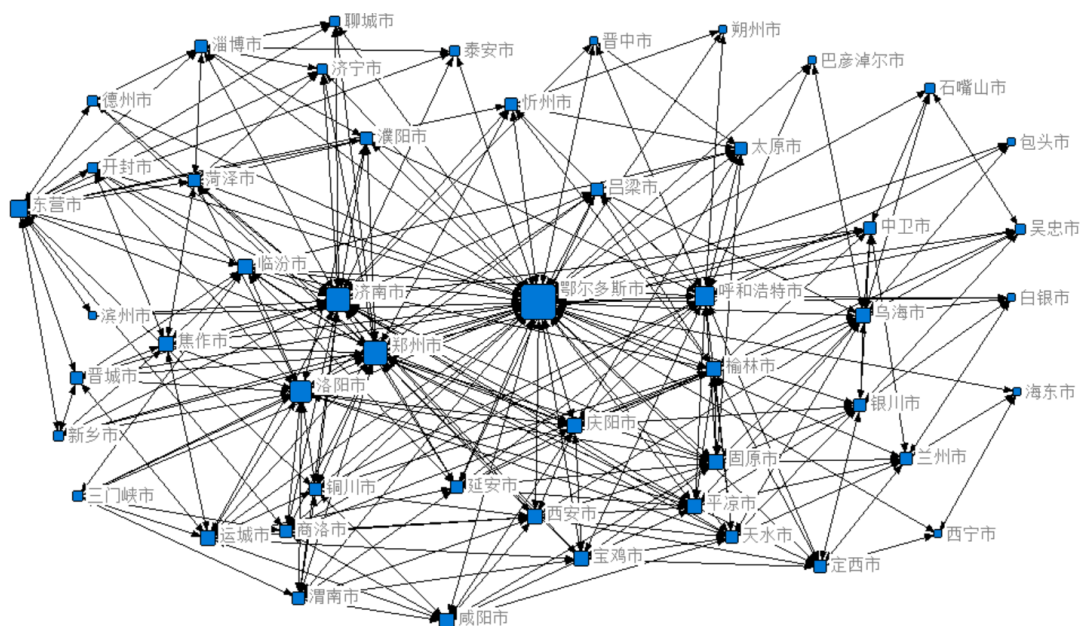


图 4.3 2015 年黄河流域主要城市环境效率空间结构

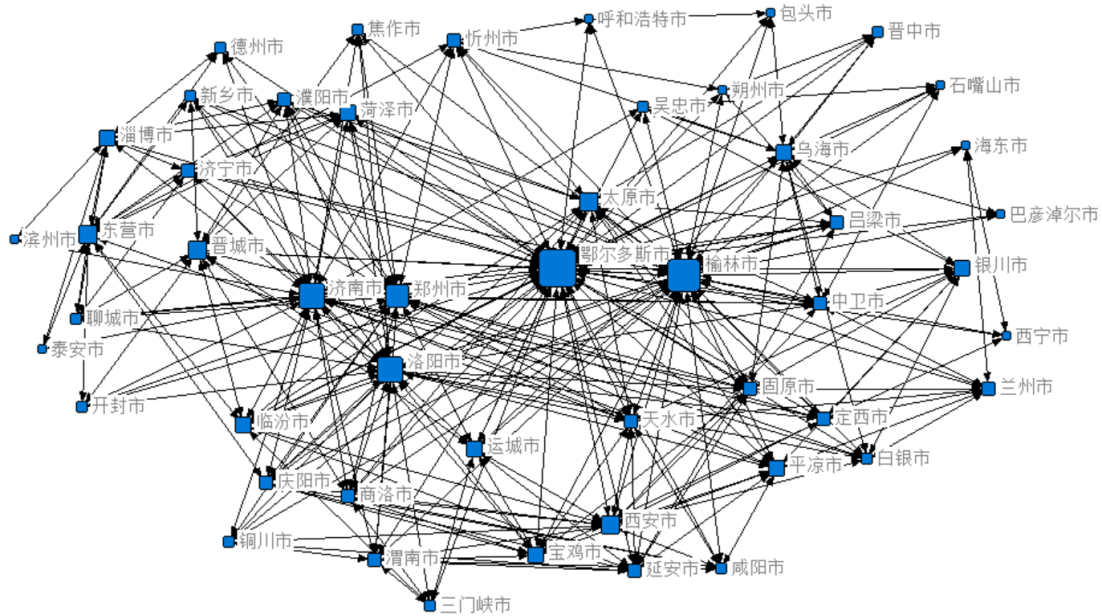


图 4.4 2021 年黄河流域主要城市环境效率空间结构

从图 4.1-图 4.4 中可以看出，黄河流域主要城市环境效率存在显著的空间网络关系，黄河下、中、上游各个地区的环境效率差异显著。从图中清楚的看到黄河流域主要城市间 2003 年-2009 年的空间网络值大于 2009-2015 年，2009-2015 年的空间网络效应又小于 2015-2021 年，这说明黄河流域主要城市环境效率空间网络近二十年整体呈现出先下降再上升的形态，整体空间结构情况复杂；但也存在局部规律，2003 年-2021 年鄂尔多斯市、呼和浩特市、济南市、太原市、郑州市、洛阳市等城市一直处于该网络形态的中心位置，这说明这些中心城市一直以来占据着核心地位，对其他各城市的控制能力较强，同时可以发现，一直以来中西部城市较为分散，位于网络边缘的位置，表明对网络存在集聚效应，这些中心城市在环境效率方面与其他城市密切相关，且发达城市的空间网络结构整体大于中部地区和偏远西部地区城市。

4.2 整体网络结构特征及演变趋势

4.2.1 网络密度

分析黄河流域主要城市环境效率 2003-2021 年网络密度和网络关系系数可以得到：网络密度表现出先上升后下降最后再上升的变化。2003、2006、2016、2021

年黄河流域主要城市环境效率空间关系数量分别为 588、638、488、548，这几个年份均处于网络关系数的临界值。并且整体网络密度由 2012 年的 0.2402 上升至 2016 年的 0.2425。这一数值的增加说明黄河流域各城市环境效率的空间关联情况随着年份的变迁也更加紧密。2006 年后空间相关网络的密度基本上在缓慢下降。主要原因是自 2005 年“十五”计划实施以来，减慢了城市之间的环境流动。因此我国要持续关注并进一步促进环境效率的流动和共享，着力构建黄河流域主要城市环境效率上下联动、密切协作的高质量空间发展格局。

可以看出，黄河流域主要城市环境效率的网络密度整体均值为 0.231，并不是很高，并且 2003-2021 这 19 年间也没有上升，说明黄河流域主要城市整体的环境效率空间状况还有很大的提升空间。黄河流域主要城市环境效率空间最大关系总数为 1002 个，但是从 2003 年-2021 年，单个年份的关系数都超过 650，这也说明现阶段的网络状态仍然可以不断提升，网络密度值较低同时表示环境效率各城市间的空间相关性较低，网络密度的不断下降，必要的连接并没有完全建立，从而使环境效率不能达到最优的水平，降低了环境效率各要素的合理分配，未来，我们要优化黄河流域主要城市环境效率的空间连接。

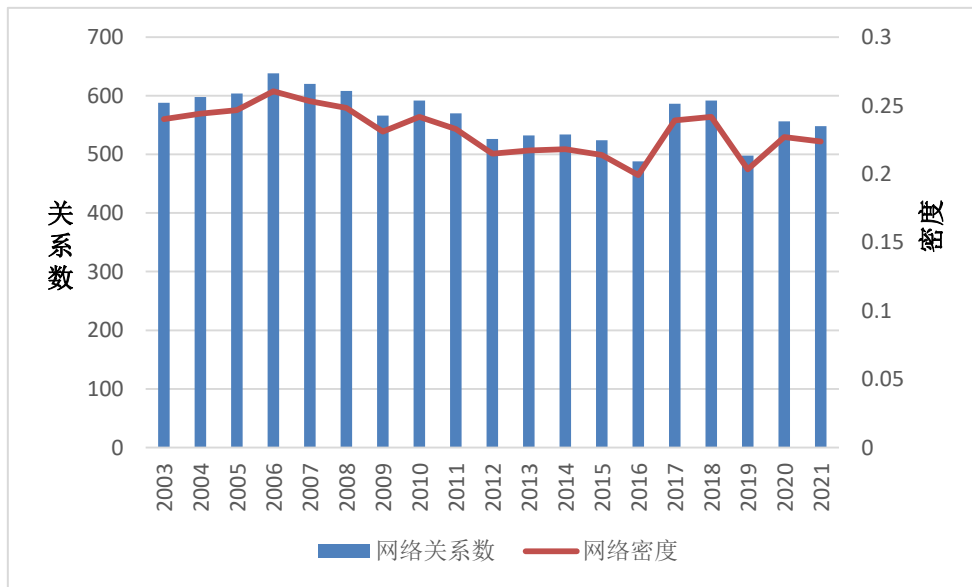


图 4.5 2003-2021 年环境效率的网络密度和网络关系数

4.2.2 网络关联度

网络关联度是黄河流域主要城市环境效率空间网络对中介城市的依赖度,反应黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的稳健性。根据表 4.1 可以看出,网络关联度在 2003 年至 2021 年测算结果均为 1,这说明黄河流域主要城市环境效率该网络中各节点紧密相连,对中介节点的依赖性较强,空间溢出和空间相关性同样显著。

表 4.1 网络关联度

年份	网络关联度
2003	1
2004	1
2005	1
2006	1
2007	1
2008	1
2009	1
2010	1
2011	1
2012	1
2013	1
2014	1
2015	1
2016	1
2017	1
2018	1
2019	1
2020	1
2021	1

4.2.3 网络等级度

网络等级度用来表示有向网络中黄河流域各城市之间等级结构以及各城市的主导优势,值越高,等级结构越明显。根据网络等级度结果(图 4.6),2003 年到 2021 年黄河流域主要城市环境效率空间相关网络等级度中仅有 4 年保持 0.4 的稳定水平,其他年份均稳定在 0 的水平,这说明相对刚性的黄河流域主要城市环境效率空间结构在相应年份被破坏,黄河流域各城市间环境效率的空间相互影

响作用强烈。

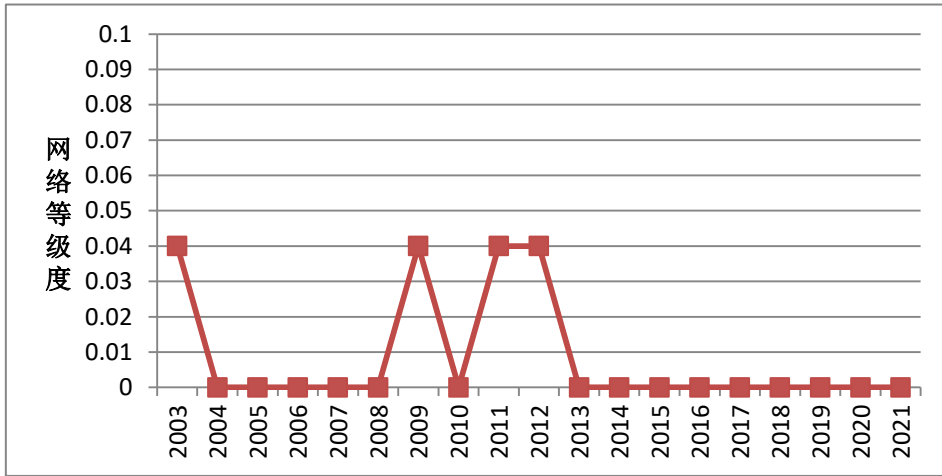


图 4.6 网络等级度

4.2.4 网络效率

网络效率用来度量网络中多余节点，即网络溢出渠道和稳定性。值越高，则空间溢出越少，黄河流域主要城市内部之间连接越多，内部各城市之间联系更加密切，网络稳定度越高。根据网络效率的结果（图 4.7），2003 年到 2021 年黄河流域主要城市环境效率网络效率整体缓慢上升，网络效率从 2003 年的 0.7917 逐步上升到 2016 年的 0.8342，说明黄河流域主要城市环境效率的网络稳定性在逐渐提高，由弱趋强。

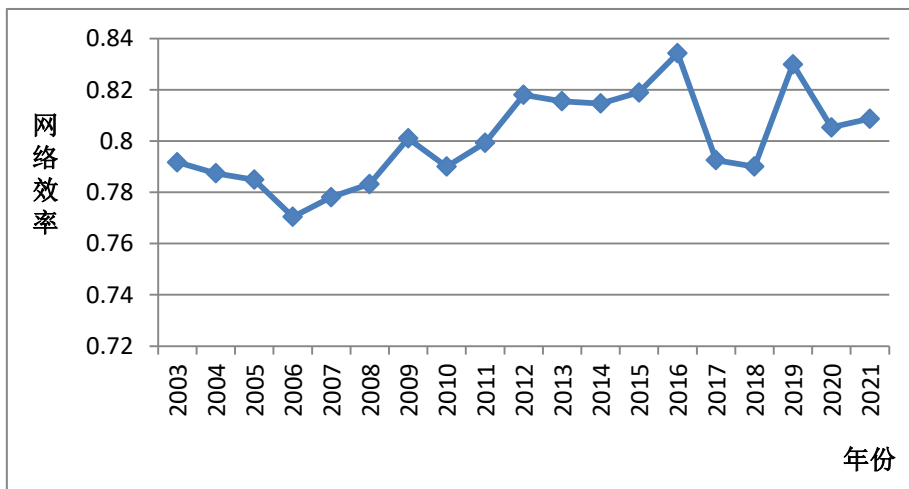


图 4.7 网络效率

总体来说,黄河流域主要城市环境效率空间关联网结构水平比较稳定,内部连接较多,空间相连渠道较为合理,但是密度水平较低,还有可提升的空间,未来应发挥市场和政府的双重作用,通过环境规制和看不见的手的作用,加强黄河流域主要城市环境效率网络的提高,促进各城市间空间相连渠道,提升网络的稳健性。

4.3 局部网络结构特征及演变趋势

4.3.1 块模型分析

根据 Ucinet 的 CONCOR 程序,以 2 为最大分割深度、0.2 为集中度,通过每个节点发送和接收的关系总数与其预期和实际比率,对黄河流域主要城市的环境效率网络结构进行块模型划分,将黄河流域主要城市共分割为四个板块,以便于更好地划分黄河流域主要城市环境效率空间关联网的板块内和板块间关系。板块一共 8 个城市,包括兰州市、石嘴山市、呼和浩特市、乌海市、榆林市、银川市、咸阳市和延安市,板块二有 7 个城市,包括太原市、郑州市、西安市、济南市、东营市、洛阳市和鄂尔多斯市,板块三共 19 个城市,包括天水市、巴彦淖尔市、定西市、平凉市、庆阳市、白银市、固原市、中卫市、商洛市、包头市、海东市、忻州市、临汾市、吕梁市、朔州市、晋中市、宝鸡市、吴忠市和西宁市,板块四有 16 个城市,分别为晋城市、铜川市、三门峡市、淄博市、渭南市、焦作市、菏泽市、济宁市、新乡市、泰安市、德州市、聊城市、滨州市、濮阳市、开封市和运城市。

根据黄河流域主要城市环境效率 2003-2021 年度平均值板块间的关联关系,结果显示在表 4.2 中,黄河流域主要城市环境效率空间关联网共计 378 条关联关系。在第一板块中,板块内部关联关系数总计 5 条,而向其它各板块溢出关系总数共有 67 条,接收其它板块溢出关系数共 45 条,并且期望内部比例 14.29% 远大于实际内部关系比例 6.94%,但其净溢出关系不如第二板块,故划分其为“经纪人”板块。第二板块内部关联关系数总计 4 条,向其它板块溢出关系数高达 165 条,接收其它板块溢出关系数为 52 条,并且期望内部比例 12.24% 远大于实际内部关系比例 2.37%,因此属于“净溢出”板块。第三板块的内部关联关系

数为 17，板块外接收关系数为 151 大于板块外的溢出关系数 46，并且实际内部关系比例 36.73% 大于期望内部关系比例 26.98%，因此，该板块属于“主受益”板块。第四板块的期望内部关系比例 30.61% 小于实际内部关系比例 40.54%，板块外的溢出关系数大于板块外的接收关系数，并且该板块内部也存在较强的溢出关系（关系数为 30），说明该板块在内部和外部均存在溢出效应，属于“双向溢出”板块。

表 4.2 黄河流域主要城市环境效率板块间的关联关系

	板块一	板块二	板块三	板块四	溢出关 系数	接收关 系数	期望内部 关系比例	实际内部 关系比例	各板块中 城市数量
板块一	5	3	62	2	67	45	14.29%	6.94%	8
板块二	11	4	84	70	165	52	12.24%	2.37%	7
板块三	30	14	17	2	46	151	36.73%	26.98%	19
板块四	4	35	5	30	44	74	30.61%	40.54%	16

为更直观度量四大板块功能，将黄河流域主要城市环境效率板块关系转化为密度矩阵与像矩阵，并且整体网络密度为 0.196，根据板块密度大于整体网络密度赋值为 1，否则赋值为 0 的原则，得到黄河流域主要城市环境效率空间板块矩阵（表 4.3）。

表 4.3 黄河流域主要城市环境效率板块间密度矩阵与像矩阵

	密度矩阵				像矩阵			
	板块一	板块二	板块三	板块四	板块一	板块二	板块三	板块四
板块一	0.089	0.054	0.408	0.016	0	0	1	0
板块二	0.196	0.095	0.632	0.625	1	0	1	1
板块三	0.197	0.105	0.05	0.007	1	0	0	0
板块四	0.031	0.313	0.016	0.125	0	1	0	0

由密度矩阵得出，各板块内部密度均较小，表明各板块内部之间关联关系较小。由像矩阵可以得出，第二板块与其余板块的关联关系都较强，第一板块除和第三板块存在较强关联关系，第四板块和第二板块关系紧密，和其余板块并无较强联系。由像矩阵来绘制出板块间关联关系图（图 4.8），图中板块间箭头方向与像矩阵相对应，可进一步探究板块间环境效率动能增长的传递规律。

第二板块对第二、三、四板块同时具有溢出效应，对板块四即“主受益”的溢出效应最为明显。作为“发动机”角色的板块二将黄河流域主要城市环境效率增长动能传递至具有中介和桥梁作用的“经纪人”板块即第一板块后，第二板块又将黄河流域主要城市环境效率的增长动能传递给具有“双向溢出”的第四板块，结合板块间的关联系数可以看出，“主受益”第三板块的主要动能传递方向为第一板块，且第一板块对第三板块也具有双向溢出效应，第四板块和第三板块均会对第二板块产生溢出作用，结合表 4.3 可以看出，对板块内部也存在紧密的溢出效应，总体来说，各板块的内部溢出效应要低于外部溢出效应。作为“主受益”角色的第三板块主要接收第一板块的溢出效应，与其它板块的关联程度并不强。

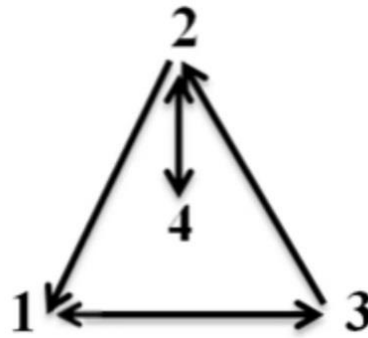


图 4.8 各板块关联关系图

4.3.2 核心-边缘结构分析

根据 Ucinet 软件的 Core/Periphery 程序，对黄河流域主要城市各年份平均值的环境效率网络结构进行核心-边缘结构分析，将黄河流域主要城市核心关联度前十的定为核心结构，其余为边缘结构，结果如下表 4.4。

表 4.4 核心边缘结构

城市	核心关联度	核心边缘结构
鄂尔多斯市	0.641	核心
济南市	0.266	核心
东营市	0.245	核心
太原市	0.209	核心
郑州市	0.203	核心
呼和浩特市	0.191	核心

续表 4.4

城市	核心关联度	核心边缘结构
菏泽市	0.175	核心
晋中市	0.173	核心
忻州市	0.173	核心
临汾市	0.167	核心
榆林市	0.166	边缘
吕梁市	0.16	边缘
淄博市	0.157	边缘
洛阳市	0.139	边缘
朔州市	0.128	边缘
包头市	0.107	边缘
济宁市	0.107	边缘
聊城市	0.102	边缘
运城市	0.1	边缘
焦作市	0.095	边缘
泰安市	0.084	边缘
德州市	0.084	边缘
滨州市	0.084	边缘
巴彦淖尔市	0.083	边缘
濮阳市	0.077	边缘
晋城市	0.064	边缘
新乡市	0.063	边缘
三门峡市	0.059	边缘
开封市	0.055	边缘
西安市	0.045	边缘
渭南市	0.036	边缘
商洛市	0.023	边缘
延安市	0.022	边缘
咸阳市	0.014	边缘
乌海市	0.013	边缘
铜川市	0.006	边缘
平凉市	0.003	边缘
庆阳市	0.003	边缘
银川市	0.003	边缘
石嘴山市	0.002	边缘
吴忠市	0.002	边缘
中卫市	0.002	边缘
兰州市	0.001	边缘
定西市	0.001	边缘
固原市	0.001	边缘
宝鸡市	0.001	边缘
白银市	0	边缘

续表 4.4

城市	核心关联度	核心边缘结构
天水市	0	边缘
西宁市	0	边缘
海东市	0	边缘

黄河流域主要城市位于核心结构分别为鄂尔多斯市、济南市、东营市、太原市、郑州市、呼和浩特市、菏泽市、晋中市、忻州市、临汾市。这些城市主要为黄河流域中部地区和东部地区的省会城市，表明在黄河流域主要城市环境效率空间相关网络中，这些城市占据“核心”地位，这些城市控制着整个黄河流域所有城市，在整个黄河流域主要城市环境效率网络中有着无可撼动控制地位。黄河流域西部地区城市和其他非省会城市，如西宁市、白银市、银川市、海东等的核心关联度均位于较低的水平，这可能是由于西部地区的经济发展慢，环境政策制定到发挥作用周期较长，存在明显滞后性，导致这些城市处于网络中的边缘结构，在网络中发挥着较小的作用。

4.4 个体网络结构特征及演变趋势

在这一章节，我们研究个体网络特征通过测量点度中心度，中介中心度和接近中心度这三个指标，定位黄河流域主要城市环境效率空间网络中各个城市所处位置。由于文章篇幅有限，因此本文仅给出 2003、2009、2015 和 2021 年具体数据。

4.4.1 点度中心度

点度中心度用来分析黄河流域各城市间连接数量，测算黄河流域每个城市的中心程度，从而将点度中心值较高的城市列为中心城市，如表 4.5，2003-2021 黄河流域主要城市的点度中心度呈现缓慢降低态势，黄河流域主要城市环境效率发展的非平衡性特征明显，非平衡性差异随时间发展逐渐增加。高于度数平均值的地区个数从 2003 年的 17 个地区增长到 2021 年的 20 个地区，并且大部分来自省会城市，省会城市的重要性地位明显优于其他地区，尤其鄂尔多斯市、济南市、呼和浩特市、郑州市、太原市、西安市等地在整个网络中一直处于领先地位。这是因为省会城市虽然相对于其他地区具有较高的空间关联，但是其区域内部的差

异性比较明显。西部地区随着经济和医疗水平的发展以及国家大力度的扶持工作，近几年的发展速度也有明显提高，尤其是西部地区的经济发展水平较高的地区有赶超中部地区的态势。

点出度和点入度分别对应溢出关系数和接收关系数，点出度和点入度排名较高的城市大部分依然是省会城市，表现为净溢出效应，而其他地区在逐渐的吸收省会城市的溢出关系，表现为净收益效应。并且点入度和点出度的均值一直保持在相对稳定的水平，这表明，我们应该制定相应的政策，逐步加强各城市间的环境效率联系，缩小城市间差距，达到各区域间的均衡发展。

表 4.5 点度中心度

	2003			2009			2015			2021		
	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度
兰州市	11	9	11	7	8	10	7	7	8	7	8	8
白银市	3	3	5	2	9	9	1	5	5	2	9	9
天水市	2	11	11	2	14	14	3	12	12	2	13	13
平凉市	2	13	13	1	14	14	3	13	13	4	12	12
庆阳市	2	11	12	1	12	12	3	14	14	2	11	11
定西市	1	5	5	3	11	11	3	8	9	4	10	10
银川市	6	8	10	6	6	7	10	4	10	8	9	9
石嘴山市	3	11	11	4	4	5	3	4	4	2	4	4
吴忠市	5	12	12	3	6	6	3	6	6	3	5	5
固原市	4	13	13	2	14	14	2	14	14	3	12	12
中卫市	4	14	14	2	12	12	3	9	9	1	11	11
呼和浩特市	17	10	20	22	6	23	20	7	22	1	4	4
包头市	3	6	7	3	2	3	3	2	3	4	2	2
鄂尔多斯市	19	8	20	46	10	46	47	11	47	43	11	43
巴彦淖尔市	3	8	8	2	3	3	2	3	3	2	3	3
乌海市	8	10	11	16	8	19	10	9	14	7	11	11
西安市	19	4	19	12	4	13	12	7	14	13	7	7
铜川市	1	7	7	0	11	11	1	11	11	1	8	8
宝鸡市	4	15	15	4	15	15	5	11	11	5	12	12
咸阳市	2	1	2	3	2	4	8	8	10	6	4	4
渭南市	5	4	7	6	6	9	7	8	10	6	8	8
延安市	0	9	9	6	8	12	3	10	12	7	8	8

续表 4.5

	2003			2009			2015			2021		
	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度	点出度	点入度	点度中心度
榆林市	5	10	12	10	2	10	14	2	14	35	11	11
商洛市	3	8	8	3	9	9	3	10	10	2	10	10
济南市	40	7	40	27	7	27	28	8	28	27	8	8
淄博市	33	9	34	16	9	17	8	6	9	9	9	9
东营市	39	7	39	23	8	24	16	7	16	14	7	7
济宁市	4	5	5	4	7	7	3	6	6	4	9	9
泰安市	4	3	4	7	5	8	3	4	4	3	3	3
德州市	3	3	3	3	4	4	3	5	5	3	5	5
聊城市	3	3	3	4	6	6	3	5	5	6	5	5
滨州市	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3
菏泽市	10	8	11	9	11	12	7	8	9	8	10	10
太原市	22	3	22	20	4	20	8	4	8	16	4	4
晋城市	2	8	8	3	11	11	4	9	9	9	12	12
朔州市	2	8	8	3	4	4	3	3	3	2	5	5
晋中市	3	2	4	4	2	4	3	3	4	5	3	3
运城市	2	8	8	6	7	10	10	6	12	10	9	9
忻州市	4	7	8	4	5	5	4	8	8	6	7	7
临汾市	2	9	9	2	12	12	6	11	12	8	11	11
吕梁市	4	9	10	6	7	9	7	7	9	6	6	6
郑州市	29	6	29	22	8	23	26	9	27	23	7	7
开封市	3	5	6	3	7	7	3	6	6	3	6	6
洛阳市	21	15	25	17	13	19	17	12	18	22	11	11
新乡市	4	6	7	4	8	9	4	6	7	4	6	6
焦作市	3	8	8	7	10	11	7	10	10	3	6	6
濮阳市	5	7	7	5	10	10	3	8	8	4	9	9
三门峡市	3	8	8	5	5	6	4	6	7	5	4	4
西宁市	2	9	9	1	3	3	1	3	3	1	4	4
海东市	2	8	8	2	4	4	2	3	3	2	4	4
均值	7.68	7.68	11.76	7.52	7.52	11.32	7.22	7.22	10.48	7.52	7.52	8.16

4.4.2 中介中心度

中介中心度指的是黄河流域某一城市管理其他城市的能力，值越大，说明这一城市对黄河流域其他城市的环境效率控制作用越大，这一城市在网络中处于更加核心的地位。如表 4.6 均值来看，2003-2021 年中介中心度从 2003 年的 20.94

下降到 2009 年的 19.54，之后逐渐增加至 2021 年的 20.52，变化幅度相对较小，中介中心度位于前列的城市为鄂尔多斯市、郑州市、济南市、呼和浩特市、洛阳市、西安市、太原市。这些城市主要为黄河流域中部地区和东部地区的省会城市，这说明这些城市在黄河流域主要城市环境效率空间这一网络中处于核心地位，也说明这些测算具备管理其他城市的能力，是黄河流域整个系统中的重要节点，在今后政策制定和发展过程中，要优先发展这些城市，通过这些核心城市来带动其他城市，从而实现黄河流域环境效率的提高。黄河流域西部地区城市，如西宁市、海东市、银川市等的中介中心度远小于黄河流域主要城市平均水平。这些西部黄河流域城市的经济发展较为缓慢，环境效率较低，难以影响和掌控其他地区。这些城市中介中心度呈现出不均匀的分布特征，通过济南市、郑州市、呼和浩特市、洛阳市、西安市、太原市等经济发达地区完成了相当多的环境联系。

表 4.6 中介中心度

中介中心度	2003	2009	2015	2021
兰州市	9.117	4.275	5.238	3.987
白银市	1.422	3.314	0.654	4.814
天水市	8.449	9.872	6.927	15.731
平凉市	14.539	9.872	8.238	7.990
庆阳市	12.895	7.327	15.344	9.609
定西市	2.645	4.858	5.839	10.583
银川市	3.065	1.174	5.114	4.739
石嘴山市	4.728	0.202	0.182	0.264
吴忠市	13.355	1.107	1.440	2.450
固原市	14.539	11.885	11.105	8.124
中卫市	22.484	13.019	5.865	10.091
呼和浩特市	29.248	62.643	61.039	0.331
包头市	4.013	0.063	0.091	0.405
鄂尔多斯市	31.860	460.08	514.13	335.588
巴彦淖尔市	5.161	0.063	0.091	0.071
乌海市	6.234	42.557	19.884	20.141
西安市	42.404	10.006	8.903	10.676
铜川市	2.620	5.737	7.369	2.191
宝鸡市	14.029	9.160	4.170	4.006
咸阳市	0.135	0.302	3.118	1.138
渭南市	1.597	3.228	3.340	6.500
延安市	4.663	8.426	4.557	4.502
榆林市	10.798	5.194	13.141	193.148
商洛市	3.317	4.542	6.469	6.882

续表 4.6

中介中心度	2003	2009	2015	2021
济南市	224.863	77.354	94.966	119.113
淄博市	120.351	30.533	3.737	21.738
东营市	196.909	50.852	26.624	27.565
济宁市	0.301	0.917	1.298	4.683
泰安市	0.026	1.129	0.920	0.263
德州市	0.026	0.486	1.298	1.717
聊城市	0.026	0.917	1.298	3.836
滨州市	0.026	0.063	0.920	0.263
菏泽市	7.482	4.993	3.564	6.953
太原市	42.377	29.767	2.683	15.733
晋城市	2.814	3.106	2.549	7.412
朔州市	2.32	0.267	0	0.677
晋中市	0.735	0.396	0.485	0.646
运城市	3.317	5.553	6.506	8.757
忻州市	2.320	2.398	6.590	13.75
临汾市	4.663	9.658	10.898	13.872
吕梁市	8.412	3.852	3.175	6.758
郑州市	79.792	36.786	69.987	46.150
开封市	0.376	1.252	1.614	2.740
洛阳市	70.556	27.655	23.493	46.214
新乡市	0.529	1.876	1.614	3.872
焦作市	0.852	2.838	2.334	1.445
濮阳市	1.661	4.244	3.673	6.453
三门峡市	1.485	0.869	0.858	0.869
西宁市	6.345	0	0.333	0.309
海东市	5.118	0.333	0.333	0.250
均值	20.940	19.540	19.680	20.520

4.4.3 接近中心度

接近中心度指的是黄河流域某一城市不受其他所有城市控制的程度。2003-2021年接近中心度均值整体变化缓慢,呈现出先下降之后一直上升的趋势,但区间取值分布相对均衡。接近中心度值排在前列的城市包括鄂尔多斯市、济南市、呼和浩特市、东营市、郑州市、太原市、洛阳市、西安市,这些城市与个体中心度、中介中心度较高的城市高度重合,与黄河流域其他城市环境效率空间距离较近,说明这些城市可以做到连接其他城市更迅速,与其他城市协调和主导作用都更加优秀。黄河流域各城市中西部地区值较小,这说明这些城市处于边缘地

区，只能被动等待其他城市对其连接，主动连接其他城市能力较弱，在网络中处于被动状态，在网络中属于边缘小透明。对比十年间黄河流域主要城市环境效率空间网络的度数中心度和接近中心度，可以发现二者黄河流域城市排名大致相同，说明度数中心度高的区域其接近中心度也有很大的概率比较高。

表 4.7 接近中心度

城市	2003	2009	2015	2021
兰州市	112	89	91	91
白银市	94	89	95	90
天水市	88	84	87	85
平凉市	85	84	86	87
庆阳市	86	86	84	87
定西市	97	87	90	88
银川市	89	92	88	90
石嘴山市	88	94	95	96
吴忠市	86	95	94	95
固原市	85	84	85	87
中卫市	84	86	90	88
呼和浩特市	79	76	76	97
包头市	95	98	97	100
鄂尔多斯市	95	52	51	55
巴彦淖尔市	93	98	97	101
乌海市	113	80	84	86
西安市	95	86	84	85
铜川市	94	87	87	91
宝鸡市	83	83	87	86
咸阳市	115	97	88	92
渭南市	92	89	88	88
延安市	91	87	86	89
榆林市	87	89	84	63
商洛市	93	89	88	88
济南市	58	78	76	75
淄博市	65	81	89	88
东营市	59	82	97	102
济宁市	99	91	92	89
泰安市	100	90	94	115
德州市	102	94	93	94
聊城市	102	92	93	90
滨州市	102	115	95	115
菏泽市	91	86	89	88
太原市	87	79	90	84

续表 4.7

城市	2003	2009	2015	2021
晋城市	94	87	89	87
朔州市	94	96	95	95
晋中市	99	97	95	99
运城市	93	88	86	87
忻州市	94	93	90	90
临汾市	91	86	86	86
吕梁市	89	89	90	90
郑州市	75	76	71	82
开封市	97	91	92	92
洛阳市	73	80	80	85
新乡市	95	89	91	91
焦作市	95	87	88	93
濮阳市	95	88	90	89
三门峡市	93	93	91	94
西宁市	91	98	97	97
海东市	92	97	97	100
均值	90.88	88.08	88.36	90.04

4.5 环境效率空间关联网络的影响因素分析

4.5.1 变量选取依据

在黄河流域主要城市环境效率测度和空间网络分析的基础上,基于环境效率基本内涵,环境效率与经济发展、社会、环境、技术水平均休戚相关,综合郭海良(2023)、林江彪等(2021)、岳立和雷燕燕(2022)等文献研究,学者们对黄河流域主要城市环境效率空间关联的常见解释变量有产业结构水平、对外开放水平、能源消耗水平、城市化水平、环境规制水平、技术进步水平、外资规模水平、经济增长水平等。本文重点从经济系统、开放水平、环境系统、科技水平、社会系统五个方面作为黄河流域主要城市环境效率的影响因素,具体见下表 4.8。

表 4.8 环境效率及影响因素变量的描述性统计

变量	符号	含义	指标定义	mean	p50	sd	min	max
环境效率	GML	环境效率	根据 EBM-GML 进行计算	1.064	1.050	0.250	0.215	5.692
经济系统	PG	经济增长	GDP 总量	1463	953.9	1655	21.51	12538
	IS	产业结构	第三产业占地区生产总值比例	2814	667.5	7281	3	71005

续表 4.8

变量	符号	含义	指标定义	mean	p50	sd	min	max
开放水平	FDI	外资规模	利用外资总额占 GDP 比重	190.9	39.04	522.8	0.001	5892
	OL	对外开放	进出口总额占 GDP 比重	0.431	0.419	0.197	0.096	0.959
科技水平	TL	技术进步	专利申请数量	0.474	0.234	1.008	0	20.36
社会系统	UR	城市化率	城镇人口占总人口的比重	0.616	0.282	0.979	0.003	15.18
环境系统	EC	能源消费	人均能源消费总量	39.19	38.40	10.58	11.99	68.67
	ER	环境规制	由熵权法确定	38168	8852	85722	22	871400

(1) 经济系统：根据孙鹏等（2019）、覃小华等（2022）对环境效率影响因素的研究和经典的引力模型，经济方面选取经济增长和产业结构两个变量作为影响因素指标，经济增长水平选取各城市 GDP 进行分析，产业结构变量选取第三产业占地区生产总值比例进行分析，普遍认为经济增长会造成环境的恶化，经济规模对环境效率的影响一般也是负向影响。

(2) 开放水平：西部大开发战略的大力实行，使得黄河流域中上游地区开放得到大幅度提升，大量外商投资涌入市场，带动了驱动经济“三驾马车”之一的投资和经济发展水平，但同时也造成严重的环境恶化问题，这也在一定程度上影响了环境效率。根据范丹和孙晓婷（2020），开放水平维度方面选取外资规模水平和对外开放水平两个变量作为影响因素指标，外资规模水平利用外资总额占 GDP 比重进行分析，对外开放指标根据进出口总额占 GDP 比重进行分析。

(3) 环境系统：环境系统维度选取能源消费和环境规制两个变量作为影响因素指标，能源消费水平，尤其是传统煤炭能源的大量消耗，是工业污染的主要来源之一，环境规制政策将倒逼企业提升技术水平、优化生产方式，有效降低污染，因此环境系统差异会对黄河流域主要城市的环境效率产生正向影响，且影响不断提高。参考林江彪等（2021）、严翔等（2021），能源消费水平利用人均能源消费总量，环境规制指标通过熵权法进行计算分析。

(4) 科技水平：技术水平的提高是发展经济、实现环境增长的关键，科技水平的提高能够增加企业和个人利用工具的能力，从而对环境的利用效率得以提升，专利申请数很大程度上是技术创新能力的体现，同时参考郭海良（2023）、岳立和雷燕燕（2022），本文也采取专利申请数量指标表示技术进步水平。

(5) 社会系统：社会系统水平选取城市化率水平体现，城市化、人口集聚的推进在推动经济增长的同时，会造成环境恶化、交通拥堵等问题，从而使环境

效率得以降低，本文根据林江彪等（2021），选取城镇人口占总人口的比重体现城镇化率水平。

4.5.2 回归结果分析

由于矩阵的个值间并非相互独立，很多规范的统计步骤不能进行参数估计和统计检验，通常会计算出错误的标准差，针对这个问题，学者们主要通过一种随机化检验方法来检验，基于此，本文选用社会网络分析中常用的非线性二次指派程序 QAP 方法对黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的影响作用进行研究，以变量之间的“关系”为研究基础，以矩阵网络作为解释变量和被解释变量。因此，模型中所涉及的因变量和变量均为“关系数据”，被解释变量是黄河流域主要城市环境效率空间关联网络。

表 4.9 QAP 回归分析结果

变量	非标准化回归系数	标准化回归系数	显著性概率	概率 A	概率 B
截距项	0.366	0	-	-	-
经济增长	-0.025	-0.025	0.287	0.713	0.287
产业结构	0.014	0.014	0.344	0.344	0.657
外资规模	-0.018	-0.017	0.365	0.635	0.365
对外开放	0.056	0.050	0.189	0.189	0.811
能源消费	0.092**	0.089	0.034	0.034	0.967
环境规制	0.069**	0.070	0.040	0.040	0.960
技术进步	0.090*	0.081	0.084	0.084	0.917
城市化率	-0.076**	-0.076	0.020	0.981	0.020

由表 4.9 QAP 回归分析结果可以看出，2003 年-2021 年黄河流域主要城市中经济发展水平差异矩阵、利用外资水平差异矩阵的回归系数和城市化率差异矩阵回归系数均为负，这表明黄河流域各城市间相近的经济发展水平和利用外资水平会强化黄河流域主要城市环境效率空间关联关系，城镇化发展水平差异越小越能强化黄河流域主要城市环境效率空间关联关系，这是因为先进的环境技术，环境设备等生产资料首先在经济发展水平先进的地区流动，从而进一步强化黄河流域的环境效率的空间关联效应，并且，外资化水平将近的地区和城镇化发展水平相近的地区一般制度相同，对发展环境效率目标有共同追求，这也会在一定程度上推动黄河流域主要城市环境效率空间关联网络的形成，城市化水平越小，则会使

环境效率的空间效应更强。

2003年-2021年黄河流域主要城市中产业结构差异矩阵、环境规制差异矩阵、进出口水平差异矩阵、能源消费水平差异矩阵、专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响均为正，特别是环境规制差异矩阵、能源消费水平差异矩阵和专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响显著为正，这说明环境规制和能源消费水平差异越大，越有利于黄河流域主要城市环境效率空间关系的建立，这是因为环境规制政策越严格的地区，能源消费越大的地区，一般对环境问题更加重视，也能够更加有效的利用资源，倒逼企业提升技术水平、优化生产方式，有效降低污染，一般来说，政府在实施环境政策时，会考虑其自身的适配度，因此能源消费水平、环境规制水平、技术进步水平提高可以优化黄河流域主要城市环境效率空间关联网络。

4.6 本章小结

黄河流域主要城市环境效率空间相关性显示出典型的网络结构及形态，黄河下、中、上游各个地区的环境效率差异显著。环境效率整体呈现出明显的“发达省份—中部省份—偏远西部省份”规律。黄河流域主要城市环境效率网络密度呈现先上升后下降最后再上升的趋势，整体均值为0.231，在整个网络中最大关系总数可能为1002个。网络关联度在2003年至2021年均为1，黄河流域主要城市环境效率之间的联系非常紧密，空间相关性和溢出效应同样非常明显。网络等级度2003年到2021年黄河流域主要城市环境效率空间相关网络等级度中仅有4年保持0.4的稳定水平，其他年份均稳定在0的水平，网络效率从2003年的0.7917逐步上升到2016年的0.8342。

黄河流域主要城市共划分为四个板块，板块一共8个城市，板块二有7个城市，板块三共19个城市，板块四有16个城市，将第一板块划分为“经纪人”板块，第二板块属于“净溢出”板块，第三板块属于“主受益”板块，第四板块属于“双向溢出”板块。根据密度矩阵和像矩阵，各板块内部密度均较小，板块二作为“发动机”角色将黄河流域主要城市环境效率增长动能传递至具有中介和桥梁作用的“经纪人”板块（第一板块），第二板块又将黄河流域主要城市环境效率的增长动能传递给具有“双向溢出”的第四板块，作为“主受益”角色的第三板块主要接收第一板块的溢出效应。

黄河流域主要城市的点度中心度呈现缓慢降低态势,黄河流域主要城市环境效率发展的非平衡性特征明显,非平衡性差异随时间发展逐渐增加。中介中心度变化幅度相对较小,接近中心度均值整体变化缓慢,呈现出先下降之后一直上升的趋势,但区间取值分布相对均衡。对比十年间黄河流域主要城市环境效率空间网络的度数中心度和接近中心度,可以发现二者黄河流域城市排名大致相同,说明度数中心度高的区域其接近中心度也有很大的概率比较高。

由 QAP 回归分析结果,经济发展水平差异矩阵和利用外资水平差异矩阵的回归系数为负,城镇化水平差异矩阵的回归系数显著为负,产业结构差异矩阵、环境规制差异矩阵、进出口水平差异矩阵、能源消费水平差异矩阵、专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响为正,特别是环境规制差异矩阵、能源消费水平差异矩阵和专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响显著为正。

5 结论与展望

5.1 主要结论

基于对黄河流域主要城市环境效率的科学测度,通过引力模型构建空间引力关系矩阵,根据社会网络分析证明环境效率的空间网络特征,使用 QAP 回归模型分析其影响因素,得出以下结论。

(1) 黄河流域主要城市中位于生产前沿的城市主要位于黄河上游和黄河中游,并且这些城市大多数为各省份省会城市,经济发展水平程度相对较好,资源相对充足,分配均匀。黄河流域主要城市处于较低环境效率水平的城市大多位于黄河下游,环境效率平均值整体处于 0.9-1.3 这个趋势之间,且整体趋势呈先上升后下降,之后又大幅度上升后下降,最后两年又上升的趋势。

(2) 黄河流域主要城市环境效率空间相关性表现出典型的网络结构及形态,黄河下、中、上游各个地区的环境效率差异显著。环境效率整体呈现出明显的“发达省份—中部省份—偏远西部省份”规律。黄河流域主要城市环境效率网络密度呈现先上升后下降最后再上升的趋势,整体均值为 0.231,在整个网络中最大关系总数可能为 1002 个。网络关联度在 2003 年至 2021 年均为 1,黄河流域主要城市环境效率之间的联系非常紧密,空间相关性和溢出效应同样非常明显。网络等级度 2003 年到 2021 年黄河流域主要城市环境效率空间相关网络等级度中仅有 4 年保持 0.4 的稳定水平,其他年份均稳定在 0 的水平,网络效率从 2003 年的 0.7917 逐步上升到 2016 年的 0.8342。

(3) 黄河流域主要城市共划分为四个板块,板块一共 11 个城市,板块二有 6 个城市,板块三 16 个城市,板块四有 17 个城市,将第一板块划分为“经纪人”板块,第二板块属于“净溢出”板块,第三板块属于“主受益”板块,第四板块属于“双向溢出”板块。根据密度矩阵和像矩阵,各板块内部密度均较小,板块二作为“发动机”角色将黄河流域主要城市环境效率增长动能传递至具有中介和桥梁作用的“经纪人”板块(第一板块),第二板块又将黄河流域主要城市环境效率的增长动能传递给具有“双向溢出”的第四板块,作为“主受益”角色的第三板块主要接收第一板块的溢出效应。

(4) 黄河流域主要城市的点度中心度呈现缓慢降低态势,说明环境效率发

展的非平衡性特征明显,并且会随时间发展逐渐增加。中介中心度变化幅度相对较小,接近中心度均值整体变化缓慢,呈现出先下降之后一直上升的趋势,但区间取值分布相对均衡。对比十年间黄河流域主要城市环境效率空间网络的度数中心度和接近中心度,可以发现二者黄河流域城市排名大致相同,说明度数中心度高的区域其接近中心度也有很大的概率比较高。

(5) 由 QAP 回归分析结果,经济发展水平差异矩阵和利用外资水平差异矩阵的回归系数为负,城镇化水平差异矩阵的回归系数显著为负,产业结构差异矩阵、环境规制差异矩阵、进出口水平差异矩阵、能源消费水平差异矩阵、专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响为正,特别是环境规制差异矩阵、能源消费水平差异矩阵和专利水平差异矩阵对环境效率空间关联性的影响显著为正。

5.2 政策建议

(1) 提高黄河流域城市间的网络密度和网络效率,优化黄河流域主要城市相关的环境效率网络,升级黄河流域主要城市环境系统与技术。促进环境与生态效率网络的建立,提高区域间环境效率的协同发展作用。一方面,提高黄河流域主要城市的环境效率网络的建立和促进城市间关系,提高提高环境利用效率。另一方面,要注重提高各城市间区域合作意识,改进目前各管各的形式,建立合理有效的健全机制。

(2) 改善区域内部的差异性,破除环境效率整体明显的“发达城市—中部城市—偏远西部城市”现象。一方面,继续坚持西部地区经济和医疗水平的发展以及国家大力度的扶持工作,近几年西部地区的经济发展水平较高的地区已有赶超中部地区的态势。另一方面,坚持中心城市“桥梁”中介,有力控制整个网络,更加快速的连接其他城市,缩小区域差异,追求平衡发展。

(3) 黄河流域主要城市环境效率空间关联网络结构的板块根据特征制定不同环境策略。根据各城市间社会经济及环境发展的特点,制定差异化的城市环境效率改进战略。一方面,对于环境效率高、经济效益高的“双向溢出”板块和“净溢出”板块,应高效的利用其收益,引进其发达技术,改善环境结构,促进环境稳健发展。另一方面,对于“经纪人”板块和“净收益”板块,应完善环境政策与制度,学习管理方法和发达环境技术,实现环境效率的增长。

(4) 多角度、多方法考量黄河流域主要城市环境效率空间相关网络的影响

因素。发挥出政府在宏观层面和市场“看不见的手”的作用机制，推动黄河流域区域间环境效率的发展。一方面政府应大力推进积极措施的落实与执行，提高偏远地区的环境效率，弥补其在经济发展和设备上的不足。另一方面，发挥市场“看不见的手”作用机制，对于重点地区，加强其供应与需求，通过重点地区溢出效应来改善周边地区环境效率，统筹解决各城市间不平衡现象。

5.3 展望与不足

本研究虽然从整体上对黄河流域主要城市环境效率网络进行了系统性分析，但仍然存在一些不足，这些都需要在今后的研究中继续完善。第一，受限于数据的可获得性以及软件的局限性，文章所计算的黄河流域主要城市环境效率仅为黄河流域9省级行政单位、69个地级行政单位中的50个主要城市的环境效率，但在政策的制定中，除了文章分析的50个主要城市，其他城市的环境效率同样值得关注，因此在未来的研究中，要对黄河流域所有城市进行全面考虑，甚至必要时，可以对县级行政单位进行分析，这样才能更精准的为各地区制定符合自身情况的环境效率政策提供参考。

第二，本文对黄河流域主要城市环境效率网络特点分析，但关于环境效率概念的理论还没有得到明确的含义，关于环境效率的测度研究，国内外学者的研究各不相同，本文虽采用了大多数学者的研究方法，但对于影响环境效率因素的变量选取仍然存在不全面的情况，因此在未来的研究中，要对环境效率这一概念进行全面考虑，探讨更加科学的测度方法和更加全面的指标体系，利用现有的指标更心服首肯的指标体系。

参考文献

- [1] Alshehhi J M, Zervopoulos P D. The effect of institutional factors on environmental efficiency: A cross-country analysis using a Bayesian data envelopment analysis approach[J]. *Journal of Cleaner Production*,2023,395:136-401.
- [2] Anderson P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. *Management Science*, 1993, 39(10): 1261-126.
- [3] Du W J, Li M J, Wang Z H. The impact of environmental regulation on firms' energy-environment efficiency: Concurrent discussion of policy tool heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*,2022,143:109-321.
- [4] Fare, R., S. Grosskopf and C.A.K Lovell, 1994, *Production Frontiers*, Cambridge University Press. UK.
- [5] Farrell, M. J., 1957, The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120, pp. 253-290.
- [6] Feng D, Li J, Li X T, Zhang Z S. The Effects of Urban Sprawl and Industrial Agglomeration on Environmental Efficiency: Evidence from the Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration[J]. *Sustainability*,2019,11(11):1111-3042.
- [7] Guo M D, Li H, Lin W. The impact of economic growth, FDI, and innovation on environmental efficiency of the logistics industry in provinces along the belt and road in China: An empirical study based on the panel Tobit model[J]. *Science progress*,2021,104(2):18-54.
- [8] Huang S. The comprehensive environmental efficiency analysis based on a new data envelopment analysis: The super slack based measure network three-stage data envelopment analysis approach[J]. *Journal of Cleaner Production*,2023,400:136-689.
- [9] Liu L Q, Liu K L, Zhang T, Mao K, Lin CQ, Gao Y F, Xie B C. Spatial characteristics and factors that influence the environmental efficiency of public buildings in China[J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,322:128-824.
- [10]Lv M D, Yang W P, Wang M N, Wang Y L. The spatial changes of China's

- environmental efficiency and driving factors from the perspective of circular economy[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2022, 30(9): 23312–23334.
- [11] Li Q Q, Cao Y P, Miao S L, Huang X H. Spatiotemporal Characteristics of Drought and Wet Events and Their Impacts on Agriculture in the Yellow River Basin[J]. *Land*, 2022, 11(4): 556.
- [12] Mamghaderi M, Mamkhezri J, Khezri M. Assessing the environmental efficiency of OECD countries through the lens of ecological footprint indices[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117-796.
- [13] Nakaishi T, Nagashima F, Kagawa S, Nansai K, Chatani S. Quantifying the health benefits of improving environmental efficiency: A case study from coal power plants in China[J]. *Energy Economics*, 2023, 121: 106-672.
- [14] Pastor T J, Lovell K C. A global Malmquist productivity index[J]. *Economics Letters*, 2005, 88(2): 266-271.
- [15] Qian J. Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of China's Agricultural Environmental Efficiency[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 2021: 1-8.
- [16] Roberto B, Daniela P, Paolo P. Modeling the Impact of Technological Innovation on Environmental Efficiency: A Spatial Panel Data Approach[J]. *Geographical Analysis*, 2020, 52(2): 231-253.
- [17] Song C Z, Liu Q F, Song J P, Jiang Z Y, Lu Z L, Chen Y Y. Land Use Efficiency in the Yellow River Basin in the Background of China's Economic Transformation: Spatial-Temporal Characteristics and Influencing Factors[J]. *Land*, 2022, 11(12): 2306.
- [18] Song C Z, Yin G W, Lu Z L, Chen Y B. Industrial ecological efficiency of cities in the Yellow River Basin in the background of China's economic transformation: spatial-temporal characteristics and influencing factors[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2021, 29(3): 4334–4349.
- [19] Song W, Bi G B, Wu J, Yang F. What are the effects of different tax policies on China's coal-fired power generation industry? An empirical research from a

- network slacks-based measure perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*,2017,142(4):2816-2827.
- [20]Tone K, Tsutsui M. An Epsilon-based Measure of Efficiency in DEA—A Third Pole of Technical Efficiency[J].*European Journal of Operational Research*, 2010,207(3):1554-1563.
- [21]Xu S C, Li Y W, Tao Y, Wang Y, Li Y F. Regional Differences in the Spatial Characteristics and Dynamic Convergence of Environmental Efficiency in China[J]. *Sustainability*,2020,12(18):7423.
- [22]Xu S L, Zhu Q Z, Yang Z. Influencing factors of environmental efficiency of strategic emerging industries and their power cooperation mechanism design[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2022,31:10045-10070.
- [23]Xue W X, Liu Y R. Measurement of Synergy Degree between Environmental Protection and Industrial Development in the Yellow River Basin and Analysis of Its Temporal and Spatial Characteristics[J]. *Sustainability*,2023,15(4):3386.
- [24]Yang J, Xie B P, Wang S Y, Zhang D G, Liu C Y, MakMensah E. Temporal and spatial characteristics of grassland ecosystem service value and its topographic gradient effect in the Yellow River Basin[J]. *PloS one*,2022,17(12): e0278211.
- [25]Yang Y, Chen L, Su Z X, Wang W B, Wang Y, Luo X. Study on Spatiotemporal Features and Factors Influencing the Urban Green Total Factor Productivity in the Yellow River Basin under the Constraint of Pollution Reduction and Carbon Reduction[J]. *Processes*,2023,11(3):730.
- [26]Zhang L B, Xiang W J, Shi D S, Liang T, Xiong X, Wu S Y, Zhang W T, Yang D G. Impact of Green Development Mechanism Innovation on Total-Factor Environmental Efficiency: A Quasi-Natural Experiment Based on National Pilot Cities[J]. *Sustainability*,2023,15(2):1543.
- [27]陈诗一. 中国工业分行业统计数据估算:1980—2008[J]. *经济学(季刊)*,2011,10(03):735-776.
- [28]陈闻君,徐阳,张旭东.黄河流域城市经济关联与空间溢出实证研究[J].*人民黄*

- 河,2021,43(06):10-15.
- [29]成刚.数据包络分析方法 MaxDEA 软件.北京:知识产权出版社,2014.
- [30]范丹,孙晓婷.环境规制、绿色技术创新与绿色经济增长[J].中国人口·资源与环境,2020,30(06): 105-115.
- [31]封思洁,张斯琴.黄河流域主要城市绿色发展效率时空分异特征[J].科学与管理,2020,40(06):75-81.
- [32]郭海良.碳约束下中国环境效率时空演化与影响因素分析[J].生态经济,2023,39(01):177-182.
- [33]郝姝然,陈卓,徐傲等.黄河流域主要城市再生水利用状况及潜力分析[J].环境工程,2022,40(10):1-8+79.
- [34]韩沅刚,董会忠,张宏杰等.中国海洋经济圈环境效率时空演变及影响因素[J].世界地理研究,2023,32(03):89-100.
- [35]黄杰.中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素[J].资源科学,2018,40(04):759-772.
- [36]景晓栋,田泽,丁绪辉等.我国区域生态环境效率时空特征及影响因素——基于三阶段 DEA 模型分析[J].科技管理研究,2020,40(14):237-246.
- [37]梁佐英,姚德利.工业环境效率的区域差异、空间分布与影响因素研究——以长江经济带为例[J].安徽理工大学学报(社会科学版),2020,22(01):23-29.
- [38]林江彪,王亚娟,张小红等.黄河流域城市资源环境效率时空特征及影响因素[J].自然资源学报,2021,36(01):208-222.
- [39]刘传明,马青山.黄河流域高质量发展的空间关联网络及驱动因素[J].经济地理,2020,40(10):91-99.
- [40]刘殿国,郭静如.中国省域环境效率影响因素的实证研究——基于社会嵌入视角和多层统计模型的分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(08):79-87.
- [41]刘军.QAP:测量“关系”之间关系的一种方法[J].社会,2007(04):164-174+209.
- [42]刘华军,贾文星.中国区域经济增长的空间网络关联及收敛性检验[J].地理科学,2019,39(5):726-733.
- [43]刘宁宁,孙玉环,李冉冉,丁旺旺.中国制造业环境效率与污染精准减排路径选择[J].统计与信息论坛,2021,36(03):82-94.

- [44] 马骏,李夏,张忆君.江苏省环境效率及其影响因素研究——基于超效率 SBM-ML-Tobit 模型[J].南京工业大学学报(社会科学版),2019,18(02):71-80+112.
- [45] 潘建均,侯光明,王俊鹏.中国电力行业环境效率及其影响因素研究——基于 2008—2017 年省级面板数据[J].技术经济,2021,40(06):20-30.
- [46] 戚禹林.长江经济带城市生态效率的空间关联网络与形成机制[D].兰州大学,2022.
- [47] 秦腾,佟金萍,章恒全.环境约束下中国省际水资源效率空间关联网络构建及演化因素[J].中国人口 资源与环境,2020,30(12):84-94.
- [48] 钦晓双,孙成浩.中国工业行业资本存量测算[J].产业经济评论(山东大学),2014,13(02):54-72.
- [49] 屈小娥.中国生态效率的区域差异及影响因素——基于时空差异视角的实证分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2673-2683.
- [50] 孙才志,赵良仕.环境规制下的中国水资源利用环境技术效率测度及空间关联特征分析[J].经济地理,2013,33(02):26-32.
- [51] 孙鹏,宋琳芳.基于非期望超效率-Malmquist 面板模型中国海洋环境效率测算[J].中国人口 资源与环境,2019,29(02):43-51.
- [52] 覃小华,李星明,时朋飞,唐明贵.中国西部地区旅游环境效率时空分异及影响因素[J].资源科学,2022,44(01):143-155.
- [53] 田伟,杨璐嘉,姜静.低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的 SBM 模型[J].中国农村观察,2014(05):59-71+95.
- [54] 王群勇,李海燕.基于不确定环境 DEA 模型下中国各区域能源效率和二氧化碳排放效率评价[J].软科学,2022,36(08):78-83.
- [55] 王善高,田旭,张晓恒.生猪养殖产业集聚对环境效率影响的研究[J].农业现代化研究,2019,40(03):459-469.
- [56] 王宇溪.中国省际环境效率测算及影响因素分析[D].东北财经大学,2020.
- [57] 熊鹰,许钰莎.四川省环境友好型农业生产效率测算及影响因素研究——基于超效率 DEA 模型和空间面板 STIRPAT 模型[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(07):1134-1146.

- [58] 颜华,魏秀宇,齐悦,张梅.农业生产集聚提升了环境效率吗?——基于环境规制调节效应的分析[J].农业经济与管理,2022(06):26-37.
- [59] 叶文显.基于 SBM-Tobit 模型的中部 6 省环境效率分析[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(03):139-146.
- [60] 岳立,雷燕燕.黄河流域绿色水资源效率空间关联网络构建及其演化因素[J].西北师大学报(社会科学版),2022,59(02):62-74.
- [61] 张军,吴桂英,张吉鹏.中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J].经济研究,2004(10):35-44.
- [62] 张然,邹卓,陈东景等.中国沿海省区海洋环境效率测度及空间效应研究——基于 Super-SBM 和空间杜宾模型[J].生态经济,2022,38(09):152-159.
- [63] 周楷,谭雪,蒋姝睿等.基于 SFA 方法的我国城镇污水处理厂运行效率研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(07):150-155.
- [64] 周竹梅,单文梅.基于 DEA-FAHP 模型的企业环境效率测算[J].统计与决策,2017,No.470(02):178-18

附录

附录1 EBM-GML 模型下各城市横截面和时间序列上的环境效率值

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值
兰州市	1.110	2.095	0.597	1.118	1.167	1.218	1.214	1.191	0.967	1.110	1.007	1.088	0.927	1.208	0.993	1.074	1.044	1.006	1.105	1.118
白银市	1.006	1.169	0.912	1.076	1.102	1.128	1.004	1.078	1.136	1.110	1.322	0.774	0.837	1.122	1.027	1.110	0.833	1.122	1.169	1.055
天水市	1.629	0.956	1.342	1.105	1.122	0.969	1.049	0.941	1.064	1.230	1.439	1.000	1.000	1.000	0.597	1.023	0.850	1.117	1.413	1.097
武威市	0.688	0.945	1.089	0.967	0.964	1.057	0.797	1.038	1.304	1.044	0.510	0.979	1.367	1.157	0.742	1.078	1.071	1.013	1.186	1.000
平凉市	0.979	0.968	5.665	0.216	1.052	1.187	0.978	1.095	1.012	0.952	0.966	1.008	0.829	1.385	0.833	1.088	1.251	1.011	1.253	1.249
庆阳市	1.368	1.070	1.101	1.351	1.040	1.075	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.865	1.101	0.593	1.379	1.070	0.884	1.356	1.066
定西市	0.917	0.888	1.380	0.965	0.992	0.979	1.426	0.920	0.968	1.144	0.918	0.860	1.079	1.193	0.456	1.059	1.175	0.985	1.361	1.035
银川市	0.744	1.170	1.782	1.053	1.099	1.125	0.965	1.173	0.974	1.758	0.542	0.798	0.971	1.202	1.270	0.958	1.016	0.993	1.115	1.090
石嘴山市	1.317	1.240	1.159	1.104	1.264	1.251	0.438	2.139	1.136	1.003	0.995	0.950	1.010	1.046	0.855	1.190	0.827	1.097	1.128	1.113
吴忠市	1.144	1.068	1.475	1.274	1.038	1.146	1.075	1.064	1.137	1.075	0.906	0.948	0.967	1.049	0.968	1.099	1.038	1.070	1.317	1.098
固原市	1.091	0.728	1.419	1.140	0.967	1.099	1.016	1.040	0.753	1.000	1.125	1.106	0.899	1.373	0.931	1.159	1.727	0.739	1.128	1.076
中卫市	1.136	1.161	0.939	0.924	1.048	1.262	1.066	1.082	1.059	0.915	0.899	1.748	0.659	1.017	1.069	1.180	1.034	1.017	1.125	1.071
呼和浩特市	0.809	1.086	1.355	1.121	1.475	0.907	1.327	1.019	1.033	1.150	0.964	0.867	1.101	1.003	0.774	1.000	0.873	0.994	1.223	1.057
包头市	0.987	1.155	1.284	1.101	1.128	1.260	1.178	1.009	0.949	1.012	0.944	1.004	0.964	1.085	1.017	0.644	0.898	1.022	1.329	1.051
乌兰察布市	1.028	0.841	1.072	0.931	0.892	1.205	1.171	1.008	1.073	1.090	0.946	0.950	1.065	1.270	0.528	1.046	0.704	1.024	1.224	1.003
鄂尔多斯市	1.305	1.055	1.253	1.085	1.077	1.164	1.000	0.959	1.043	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.634	1.102	0.854	0.977	1.715	1.064

续附录 1

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值
巴彦淖尔市	0.965	1.111	0.669	1.177	1.159	1.135	0.999	1.095	1.023	1.069	0.908	0.948	1.055	1.215	0.627	1.196	1.051	1.068	1.305	1.041
乌海市	1.040	1.118	1.175	1.181	1.161	1.118	1.437	1.004	1.066	1.066	0.969	0.958	0.875	1.047	1.072	0.799	1.058	1.092	1.316	1.082
西安市	1.041	0.955	0.722	1.159	1.360	1.135	1.081	1.040	1.023	1.022	0.976	0.978	0.991	1.378	1.039	1.193	1.000	1.000	1.000	1.058
铜川市	1.109	0.972	1.368	1.072	1.075	1.160	1.024	1.262	1.250	0.962	1.141	0.914	0.858	0.935	0.958	0.834	0.986	1.091	1.294	1.067
宝鸡市	0.831	1.130	1.151	1.054	1.161	1.220	1.041	1.253	1.100	1.171	0.951	0.939	1.021	1.117	0.989	1.127	0.928	1.059	1.216	1.077
咸阳市	1.296	1.026	1.153	0.996	1.140	1.237	1.079	1.267	1.133	1.161	0.998	1.122	0.915	1.398	0.698	1.082	0.919	0.927	1.277	1.096
渭南市	1.054	0.709	2.146	0.678	1.137	0.971	1.122	1.024	1.000	1.118	1.170	0.951	0.956	0.929	0.656	1.079	0.945	1.135	1.259	1.055
延安市	1.012	0.995	2.487	0.954	1.162	1.000	0.889	1.060	1.061	1.000	0.990	0.837	0.715	1.119	0.827	1.199	1.007	0.948	1.416	1.088
榆林市	1.775	0.392	1.980	1.006	1.291	1.200	1.183	1.265	0.954	1.031	0.857	0.755	1.076	1.234	0.906	1.218	0.827	0.943	1.454	1.124
商洛市	1.201	0.997	1.239	0.884	0.897	1.457	1.181	0.938	1.307	1.076	1.000	1.000	1.000	0.937	0.589	1.470	1.080	0.675	1.375	1.069
济南市	1.031	1.120	0.958	1.091	1.066	1.132	1.015	1.062	0.949	1.041	1.018	1.000	0.958	0.986	1.059	1.000	0.975	1.025	1.000	1.026
淄博市	1.084	1.090	1.027	1.051	1.147	1.167	1.024	1.061	1.045	0.654	0.959	0.982	0.990	1.020	1.094	1.061	1.109	1.100	0.902	1.030
东营市	1.343	1.466	0.982	1.140	1.042	1.232	0.908	1.091	0.958	1.047	0.987	0.966	1.196	0.889	0.771	1.864	1.067	0.942	0.735	1.086
济宁市	0.967	0.999	1.052	1.122	1.171	1.211	0.973	1.039	1.032	1.050	0.914	1.057	1.072	1.151	0.851	0.999	1.080	1.007	0.877	1.033
泰安市	0.945	0.983	0.977	1.206	1.252	1.322	1.003	1.121	0.915	0.561	1.013	1.084	1.017	1.197	0.804	1.176	1.157	1.057	0.708	1.026
德州市	0.981	1.095	1.004	1.229	1.069	1.121	1.051	1.078	1.250	1.054	0.967	0.928	0.939	1.169	0.867	1.114	1.092	1.148	0.634	1.042
聊城市	0.447	0.828	0.963	1.125	1.174	1.146	0.991	1.217	0.867	0.981	1.283	0.810	1.002	1.046	0.811	1.019	1.066	1.220	0.758	0.987
滨州市	0.849	0.599	0.912	1.111	1.165	1.100	1.143	1.075	0.996	1.107	0.993	0.866	0.975	0.883	1.071	0.890	1.417	0.963	0.813	0.996
菏泽市	1.116	0.680	0.941	0.989	1.185	1.248	1.100	1.438	0.982	1.136	1.074	0.968	1.028	1.045	0.962	1.079	1.001	0.967	1.001	1.050
太原市	0.911	1.132	1.284	0.980	1.169	1.314	1.094	1.163	1.162	0.916	0.924	0.965	1.077	1.089	1.213	1.190	1.048	1.041	1.037	1.090
大同市	0.696	1.063	1.085	0.962	1.048	1.024	0.878	1.073	1.116	0.990	0.925	1.003	1.005	1.144	1.061	1.148	1.069	1.095	1.210	1.031
阳泉市	0.938	1.077	1.209	1.023	0.944	1.140	1.277	0.737	1.471	1.403	0.842	0.870	0.949	0.983	1.256	1.335	0.925	1.320	1.079	1.094
长治市	1.067	1.090	1.107	1.058	1.079	1.225	1.053	1.059	1.216	1.014	0.859	0.925	0.892	1.251	0.909	1.164	0.986	1.091	1.415	1.077

续附录 1

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值
晋城市	1.011	1.130	1.185	1.050	1.073	1.194	1.052	1.130	1.103	1.055	0.827	0.954	1.180	0.777	0.967	1.487	1.035	1.085	1.216	1.080
朔州市	1.023	1.079	1.119	1.180	1.292	1.095	1.200	1.035	1.109	1.293	0.732	0.847	0.838	1.137	1.150	1.263	1.114	1.222	1.003	1.091
晋中市	0.956	1.084	1.133	0.991	0.981	1.136	1.002	1.164	1.066	1.012	0.923	0.950	0.866	1.051	1.436	1.290	0.962	0.828	1.183	1.053
运城市	0.626	1.091	1.135	0.990	1.912	0.606	1.003	0.954	1.355	0.893	1.086	1.022	0.799	1.375	0.730	1.207	1.022	0.917	1.160	1.046
忻州市	0.945	1.046	1.082	1.029	1.209	1.062	0.868	1.168	1.084	1.002	0.926	0.922	0.895	1.043	1.457	1.124	1.036	0.882	1.176	1.050
临汾市	0.907	1.207	1.216	0.971	0.995	1.076	0.934	1.116	1.149	0.925	0.927	0.905	0.971	1.059	0.824	1.147	1.061	1.222	1.323	1.049
吕梁市	0.748	1.491	1.351	1.103	0.787	1.071	0.850	1.377	1.184	1.163	0.737	0.875	0.853	0.947	0.866	1.037	1.041	1.022	1.610	1.059
郑州市	0.904	1.110	0.858	1.142	1.218	1.187	1.019	1.107	1.020	1.015	1.032	0.919	0.950	1.071	1.111	1.087	1.211	1.000	0.938	1.047
开封市	0.845	0.948	1.129	1.034	1.059	1.184	0.745	1.057	0.980	1.034	0.968	0.912	0.919	1.272	1.000	1.050	1.157	0.886	1.038	1.011
洛阳市	1.141	1.139	1.016	1.075	1.087	1.118	0.932	1.099	1.042	1.052	0.941	1.005	0.958	1.180	1.057	1.147	1.193	1.037	0.522	1.039
安阳市	0.751	1.184	0.910	1.032	0.994	1.148	0.979	1.082	0.938	0.987	0.943	0.955	1.149	1.088	1.102	1.045	0.912	1.188	0.950	1.018
新乡市	0.667	1.001	0.893	0.942	1.064	1.271	1.000	1.082	1.126	1.055	0.902	1.003	1.024	1.729	0.558	1.351	1.161	1.059	0.601	1.026
焦作市	1.068	1.162	0.931	1.055	1.095	1.105	0.921	1.111	1.099	1.016	0.997	1.013	0.895	1.032	1.110	1.470	1.060	0.817	0.513	1.025
濮阳市	0.985	1.276	1.405	1.105	1.041	1.150	0.774	1.055	1.046	0.980	1.003	1.018	0.957	1.312	0.972	1.044	0.849	1.020	0.984	1.051
三门峡市	1.038	1.149	0.992	1.135	1.196	1.199	0.969	1.171	1.046	1.204	0.899	1.060	0.770	1.257	1.107	1.192	1.008	1.052	0.577	1.054
西宁市	1.156	1.194	1.124	1.093	1.156	1.141	1.265	1.132	1.123	0.990	1.054	1.038	0.885	1.108	0.837	0.969	1.033	1.026	1.150	1.078
海东市	0.668	0.844	0.899	0.951	1.136	1.060	1.170	1.088	1.159	1.120	1.089	1.223	1.032	1.026	1.042	1.531	1.194	0.545	1.875	1.087

攻读硕士学位期间承担的科研任务及主要成果

[1] 邓光耀,李孟丹.中国各行业虚拟水资源利用效率研究[J].福建商学院学报,2023,(01):18-27.DOI:10.19473/j.cnki.1008-4940.2023.01.006.

致谢

文末搁笔，思绪繁杂，感激之情，穷千词而不能绘其一。转眼学习生活已经进入尾声，有很多的不舍和感慨，在这三年的学习生活中，我收获了很多，回想起老师们的谆谆教导，同学们的欢声笑语，自己一次次的努力和目标达成后的喜悦心情，都让我充满了不舍和留恋，为此，我向培养我的学校，教导我的导师，帮助我的同学们表示衷心的感谢。

桃李不言，下自成蹊，感谢我的导师邓光耀老师，师长易遇，人师难求，感谢您的耐心指导，让我不断成长，您的深夜加班让我备受感动，本论文从选题、开题、撰写、反复修改、定稿，直到论文最终完成送审，各个环节都离不开老师的悉心指导。在论文选题期间，老师充分尊重我的意见；在论文指导期间，老师都耐心指导，每次有问题，老师都及时对我授业解惑，每次进行论文讨论，老师都一次次指出我的问题，循循善诱，既耐心又细致，与我们一起讨论直至问题得以解决；在论文定稿期间，老师嘱咐我多注意格式，框架等细节问题；除此之外，老师也在生活中给我提供很大的帮助，使我对挫折也有了乐观的态度。正是因为有了老师一次次的帮助，才有了本论文的顺利呈现，一句：“师者，所以传道授业解惑也。”将我的导师的奉献表达的淋漓尽致。在此，对我的导师邓光耀老师表示衷心的感谢！

同窗数载，知己难忘，长风万里，山水一程。感谢我的朋友们，虽然彼此来自天南地北，但你们的陪伴让我的学术道路充满欢乐，一起陪伴，一起熬夜，一起吐槽，一起进步，那些日子我永远记得，他日江湖相逢当把酒言欢。

父母之爱子，则为之计深沉，感谢我的家人，谢谢你们一直默默支持，成为我坚强后盾，感谢你们全心全意的爱，尊重并支持我每一个决定，你们的爱与支持是我前进的动力，在我忙碌的日子里，你们总是给我最温暖的拥抱。

感谢我的学校——兰州财经大学，感谢这四年的时间里学校，学院对我的培养，记得刚入学的自己特别稚嫩，是学校和学院的教导让我遇见更好的自己，而现在我即将离开学校，进入社会，而学校也教会了我然后迎接新的挑战，我相信：长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。