

# 2011—2021年黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用耦合关系

岳立柱<sup>1,2</sup>, 张家伟<sup>1</sup>, 韩荣腾<sup>1</sup>

(1.辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2.黄山学院 经济管理学院, 安徽 黄山 245000)

**摘要:** [目的] 探讨黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用的时空协调关系, 为该区域水资源的可持续利用与水生态有效保护提供决策支持和科学依据。[方法] 基于黄河中游19个城市2011—2021年高质量发展与水资源保护利用两系统的面板数据, 运用组合赋权、耦合协调度模型、地理探测器模型等方法, 分析该区域高质量发展与水资源保护利用的耦合协调度及其时空特征。[结果] 黄河中游城市群的高质量发展和水资源保护利用水平不断提高, 区域间差距逐渐缩小。两个系统的耦合协调度呈现上升趋势, 一些地区已从濒临失调转变为初级协调阶段。此外, 区域间的耦合协调度呈现正的空间自相关, 由西安和郑州市两个中心城市向外呈放射状递减。对外贸易依存度、第三产业产值所占比例对两系统协调度影响较大, 且交互因子之间呈非线性加强或双加强关系。[结论] 为提升黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用的空间依赖度, 应加强区域间合作, 优化水资源利用结构, 提高水资源管理能力, 增加科技投入, 提高区域创新能力, 积极推动区域协同发展。

**关键词:** 黄河中游; 水资源保护利用; 耦合协调度; 驱动因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0421-13

中图分类号: F062.2, F127

**文献参数:** 岳立柱, 张家伟, 韩荣腾. 2011—2021年黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用耦合关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 421-433. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.047; Yue Lizhu, Zhang Jiawei, Han Rongteng. Coupling coordination relationship between high-quality development and water resource protection and utilization in urban agglomerations of middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 421-433.

## Coupling Coordination Relationship Between High-quality Development and Water Resource Protection and Utilization in Urban Agglomerations of Middle Reaches of Yellow River from 2011 to 2021

Yue Lizhu<sup>1,2</sup>, Zhang Jiawei<sup>1</sup>, Han Rongteng<sup>1</sup>

(1. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China;

2. Institute of Management Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal coupling coordination relationship between high-quality development and water resource conservation and utilization in the urban agglomerations of the middle reaches of the Yellow River in order to provide decision support and a scientific basis for the sustainable use of water resources and effective protection of water ecology in the region. [Methods] Based on the panel data of high-quality development and water resources protection and utilization in 19 cities in the middle reaches of the Yellow River from 2011 to 2021, the coupling coordination degree of high-quality development and water resources protection and utilization and its spatio-temporal characteristics were analyzed by means of combination weighting, coupling coordination degree model and a geographic detector model. [Results] The level of high-quality development and water resource conservation and utilization in the urban agglomeration

收稿日期: 2023-08-03

修回日期: 2023-09-17

资助项目: 辽宁省教育厅基金项目“偏序集评价方法研究”(LJ2020JCL028); 黄山学院 2023 年度校企合作项目(2023XQZYK25); 黑龙江省第十三次党代会精神专题项目“区域数字经济创新驱动黑龙江省向北开放的机制与路径研究”(22GJH063)

第一作者: 岳立柱(1976—), 男(汉族), 黑龙江省大庆市人, 博士, 副教授, 主要从事区域经济与可持续发展方面的研究。Email: lngcjs5609@163.com.

通信作者: 张家伟(1997—), 男(汉族), 安徽省蚌埠市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源经济。Email: 18242980536@163.com.

of the middle reaches of the Yellow River had improved continuously, and regional disparity has gradually narrowed. The coupling coordination degree of the two systems increased over time, with some areas transitioning from the brink of imbalance to the initial stage of coordination. Furthermore, the coupling coordination degree exhibited positive spatial autocorrelation, radiating outward from the two central cities of Xi'an and Zhengzhou City. The degree of dependence on foreign trade and the proportion of tertiary industry output had significant impacts on the coordination of the two systems, with nonlinear enhancement or mutual strengthening relationships among interactive factors. [Conclusion] To enhance the spatial dependence of high-quality development and water resource conservation and utilization in urban agglomerations of the middle reaches of the Yellow River, it will be necessary to strengthen regional cooperation, optimize water resource utilization structures, improve water resource management capabilities, increase investment in science and technology, enhance regional innovation capacity, and actively promote coordinated regional development.

**Keywords: middle reaches of the Yellow River; water resource protection and utilization; coupling coordination degree; driving factors**

近年来,黄河流域水资源保护利用与高质量发展的研究已成为学术界研究的热点,包括理论研究、实证研究、文献研究等多个领域<sup>[1]</sup>。从研究范围来看,主要集中在流域<sup>[2-3]</sup>、省域<sup>[4]</sup>、经济带<sup>[5]</sup>、城市群等<sup>[6]</sup>层面。研究方法主要有灰色预测模型<sup>[7]</sup>、演化博弈模型<sup>[8]</sup>、SBM 模型<sup>[9]</sup>、DEA 模型<sup>[10]</sup>、耦合协调模型等<sup>[11]</sup>。研究内容则主要涉及 3 个方面:①单从高质量发展水平角度进行评价和测度研究。学界对高质量发展的定义尚无统一,但普遍认同它的核心目标就是实现从高速增长到高效、公平、可持续的发展转变<sup>[12-13]</sup>。评价指标体系的构建方面,多数倾向于直接运用 5 大发展理念(创新、协调、绿色、开放、共享)<sup>[14-15]</sup>。也有学者在该理论基础上建立指标体系,如闫丽洁等<sup>[16]</sup>从经济发展、人民生活、创新驱动、资源开发、环境改善、生态保护 6 个维度构建了黄河流域高质量发展评价指标体系。Chen 等<sup>[17]</sup>基于保障、公平、效率等维度构建了质量城市化发展评价指标体系。张国兴等<sup>[18]</sup>结合中心城市概念从经济结构、创新驱动、生态宜居、资源配置、服务共享等角度对黄河流域 9 个中心城市高质量发展评价。马海涛<sup>[19]</sup>对 2016 年黄河流域 7 个城市群进行评估,结果显示城市群的高质量发展存在地理差异,呈现出“核心—外围”模式,同时中下游城市群的高质量发展明显优于中上游城市群。②从水资源保护和利用角度进行评价研究,主要从水资源、水环境承载力<sup>[20]</sup>、水资源利用效率<sup>[21-22]</sup>、水生态安全等<sup>[23]</sup>角度探究水资源对经济及社会发展的影响。主要采用了障碍度模型<sup>[24]</sup>、DEA 模型等<sup>[25]</sup>模型、水足迹理论<sup>[26]</sup>对水资源环境进行研究分析;③高质量发展与水资源保护利用的关系研究。王淑贺<sup>[27]</sup>运用耦合协调度模型与灰色关联度等技术,对 2010—2019 年黄河流域 9 省(区)的面板数据进行解读,探析黄河流域水贫困与经济高质量发

展的耦合协调性。王格芳等<sup>[28]</sup>使用耦合协调度模型和时空地理加权回归模型,发现黄河流域水资源与高质量发展在 2010—2021 年呈现相互作用增强的趋势,并呈现出“东部优于西部,南部优于北部”的地域格局。

黄河流域的水资源生态保护与高质量发展的研究得到广泛关注。然而,当前大部分研究主要关注黄河流域整体或省级的水资源保护利用现状,而对黄河流域城市群水资源的研究相对较少。城市群研究侧重于城市间的产业互补性、资源共享以及规模经济效益如何影响高质量发展和水资源保护利用。而流域整体或省级研究更关注区域间的协同发展和统一管理,包括流域水资源整体调配、生态环保政策的实施等。在研究方法上,大多数学者倾向于采用耦合协调度模型,较少有研究引入地理空间分异方法。基于此,本研究选取黄河中游城市群(郑洛西)作为研究区域,结合对流域内城市相关指标的考察,运用耦合协调度模型与地理探测器等方法。深入探析 2011—2021 年黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用间的耦合协调关系,以期为该区域水资源的可持续利用与水生态有效保护提供决策支持和科学依据。

## 1 研究区域指标构建

### 1.1 研究区域与数据来源

1.1.1 研究区概况 本研究中“黄河中游城市群”指黄河中游流域沿线且属于郑洛西高质量发展合作带的 19 个地级市,包括长治、晋城、运城、临汾、郑州、开封、洛阳、安阳、新乡、鹤壁、焦作、濮阳、三门峡、西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南和商洛市(由于数据缺失,河南省济源市并未纳入)。研究区域坐落于河南、陕西、山西三省交汇之处,融汇了郑州、洛阳、西安三大都市圈核心领域,横跨中原城市群和关中平原城市群两大重要地域。黄河中游城市群 2021 年的地区生产总值达

到 5.2 万亿元,约占全国 GDP 的 4.52%,年末常住人口为 7 479.5 万人,约占全国人口的 4.38%,是中西部经济最具活力的区域之一。该地区资源丰富,是重要的能源生产基地和农牧业生产区。作为黄河流域生态保护和高质量发展国家重大区域战略下的发展重地,承担着绿色发展和经济繁荣的双重使命。

黄河中游地区水资源总量有限,水资源人均占有量仅为中国平均水平的 27%。此外,黄河流域的水资源利用相对粗放,农业用水效率较低,水资源的开发利用率高达 80%,远超 40% 的生态警戒线<sup>[29]</sup>。近年来,中原城市群和关中平原人口、工业和城市化的快速发展,水资源需求大幅增加,但受供应能力限制,水资源短缺问题日益突出。同时,工业废水、农业和生活污染排放也给黄河流域带来了水污染和生态破坏等问题。

1.1.2 数据来源 高质量发展数据来源于 2012—2022 年的《陕西省统计年鉴》《山西省统计年鉴》《河南省统计年鉴》以及 19 个城市的国民经济和社会发展统计公报,水资源保护利用数据则来源于《环境统计年鉴》《黄河水资源公报》以及各省市的水资源公报、水土保持公报。

## 1.2 研究方法

1.2.1 组合赋权 组合赋权是一种将多个单指标的权重进行组合得到综合权重的方法。相比于传统的单一指标赋权法,组合赋权充分利用各指标间的相互关系,提高权重的准确性和可信度。为获取专业且真实的主观权重,邀请了 10 位领域专家和实践者参与

打分并建立判断矩阵,从而得出主观权重。

熵值法是一种客观赋权方法,通过计算指标的信息熵,确定指标权重。在计算权重前需保证各项指标计量单位统一,先进行标准化处理。按照以上步骤计算得到主观权重、客观权重和博弈论组合权重后,便可进行各系统综合得分的计算,计算公式为:

$$U_i = \sum_{i=1}^m w_{ir} r_{ir} \quad (1)$$

式中: $U_i$  表示高质量发展或水资源保护利用综合评价指数; $W_{ir}$  表示指标权重; $r_{ij}$  表示标准化后指标值。

1.2.2 耦合协调度模型 耦合协调度模型是一种用来评估两个或多个系统之间整体性和协同发展状态的有效工具。耦合度用于度量两个系统之间的相互依赖性。耦合度越高,两个系统之间的依赖性越强。耦合协调度则用于度量两个系统间协调发展的状态。因此本文采用耦合协调度模型衡量高质量发展与水资源保护利用间耦合关系及协调发展程度。

$$T = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 \quad (2)$$

$$C = \frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \quad (3)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (4)$$

式中: $U_1, U_2$  分别代表两个系统综合评价指数; $\alpha_1, \alpha_2$  为两个子系统的权重值,且  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ,本文认为两个系统具有同等研究地位,因此取  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。 $C$  为两系统的耦合度; $D$  为两系统的耦合协调度。参考杨胜苏等<sup>[30-31]</sup>的研究方法,对系统的耦合协调程度进行划分(表 1)。

表 1 耦合度及耦合协调度等级划分标准

Table 1 Standards for coupling degree and coupling coordination degree classification

| 耦合度       | 等级 | 等级划分  | 耦合协调度     | 等级 | 等级划分 | 耦合协调度     | 等级 | 等级划分 |
|-----------|----|-------|-----------|----|------|-----------|----|------|
| 0         | 1  | 无耦合关系 | [0~0.1]   | 1  | 极度失调 | (0.5~0.6] | 6  | 勉强失调 |
| [0.0~0.3] | 2  | 低水平耦合 | (0.1~0.2] | 2  | 严重失调 | (0.6~0.7] | 7  | 初级协调 |
| (0.3~0.6] | 3  | 拮抗阶段  | (0.2~0.3] | 3  | 重度失调 | (0.7~0.8] | 8  | 中级协调 |
| (0.6~0.9] | 4  | 磨合阶段  | (0.3~0.4] | 4  | 轻度失调 | (0.8~0.9] | 9  | 良好协调 |
| (0.9~1.0] | 5  | 高度耦合  | (0.4~0.5] | 5  | 濒临失调 | (0.9~1.0] | 10 | 优质协调 |

1.2.3 空间莫兰指数 莫兰指数(Moran's  $I$ )是一种空间自相关性的度量方法,常被用于分析地理空间数据的空间分布特性。而莫兰指数分为全局莫兰指数(global Moran's  $I$ )和局部莫兰指数(local Moran's  $I$ )两种。

全局自相关用于探测整个研究区域内的聚集程度和空间分布规律,计算式为:

$$\text{global Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_i - D)(D_j - D)}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (5)$$

局部自相关主要衡量样本区域与邻近区域的空间关联和差异程度,计算公式为:

$$\text{local Moran's } I = \frac{(D_i - D) \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_j - D)}{S^2} \quad (6)$$

式中: $D$  为观测值; $i, j$  分别为相邻地区的序号; $n$  代表研究城市数量; $W_{ij}$  为邻近城市的空间权重; $S^2$  为样本方差。莫兰指数的取值范围为 $[-1, 1]$ ,接近 1 表示正的强烈空间相关性,接近 -1 表示负的强烈空间相关性,接近 0 则表示没有空间相关性。



1.2.4 地理探测器 地理探测器是一种基于地理空间数据的分析工具<sup>[32]</sup>。主要用于解决变量对空间分布模式的影响程度、变量间的相互关系以及多因素的综合影响等问题。本文利用地理探测器的因子探测与交互探测功能,对影响水资源保护利用与高质量发展的耦合协调的主要因素进行分析。

### 1.3 指标体系构建

本文对所用指标标准化处理以消除各指标之间的量纲影响,并结合层次分析法、熵权法权重,计算获取主客观权重的组合权重。据此,得到了水资源保护利用和高质量发展两个系统中各指标的权重,并最终构建了相应的指标体系及其权重,具体结果详见表 2—3。

表 2 黄河中游城市群水资源保护利用评价指标体系

Table 2 Evaluation index system for water resources protection, and utilization in midstream of Yellow River

| 系统层     | 准则层 | 指标层  | 指标属性 | 主观权重   | 客观权重   | 组合权重   |
|---------|-----|--|------|--------|--------|--------|
| 水资源保护利用 | 压力层 | 万元 GDP 用水量/(t/万元)  | 负向   | 2.852  | 1.340  | 4.490  |
|         |     | 人均生活用水量/[L/(人·d)]  | 正向   | 4.745  | 4.862  | 4.615  |
|         |     | 单位工业产值废水排放量/(t/万元)                                       | 负向   | 3.719  | 1.758  | 5.844  |
|         |     | 单位面积灌溉用水量/m <sup>3</sup>                                 | 负向   | 2.345  | 0.828  | 3.990  |
|         |     | 用水总量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>                      | 负向   | 6.540  | 4.608  | 8.630  |
|         | 状态层 | 人均水资源量/m <sup>3</sup>                                    | 正向   | 16.048 | 19.073 | 12.801 |
|         |     | 产水模数/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> ) | 正向   | 8.440  | 11.009 | 5.656  |
|         |     | 产水系数   | 正向   | 5.895  | 6.049  | 5.714  |
|         |     | 地下水资源量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>                    | 正向   | 4.531  | 5.676  | 3.287  |
|         |     | 年平均降水量/mm  | 正向   | 5.986  | 6.897  | 4.996  |
|         | 响应层 | 水资源开发利用/%  | 正向   | 10.803 | 10.009 | 11.662 |
|         |     | 生态用水率/%  | 正向   | 14.180 | 12.941 | 15.522 |
|         |     | 污水处理厂集中处理率/%   | 正向   | 4.829  | 1.125  | 5.844  |
|         |     | 水土流失治理面积/km <sup>2</sup>                                 | 正向   | 9.087  | 13.827 | 6.950  |

1.3.1 水资源保护利用指标体系 黄河中游城市群地区长期受困于水资源短缺等问题,在这种环境下,实现水资源保护与合理利用便成为该区域必须坚持的基本战略选择。PSR 模型揭示了人类活动或自然因素对环境施加压力,影响环境和资源状态,以及人类为改善环境状态和减缓压力而做出的响应的过程<sup>[34]</sup>。其理论框架已被广泛应用于水资源和水生态等研究领域<sup>[35-36]</sup>。

理解和管理水资源的复杂关系需要采用一个全面视角的模型。PSR 模型理论,作为一种广泛应用的环境管理工具,可以提供这样的视角。该模型结合了可持续性、环境、社会和经济等多个因素,不仅关注水资源的开发利用,还考虑其对环境、社会和经济的影响。本文基于 PSR 模型理论,构建水资源保护利用 PSR 模型示意图(图 1),并以此结构为依据,参考曾恩钰等<sup>[37]</sup>建立的水资源利用评价指标体系,从状态层、压力层、响应层 3 个维度构建黄河中游城市群水资源保护利用指标体系(表 2)。压力层通过万元 GDP 用水量、人均生活用水量、单位工业产值废水排放量、灌溉单位平均用水量、用水总量等指标,反映区域水资源规模和用水结构对人类生产生活、自然环境所带来的压力。状态层通过人均水资源量、产水模数、产水系数、地下水资源量、年平均降水量等关键指标,表现研究区域

水资源涵养、水生态环境特征。响应层反映国家和社会在面对水资源污染、水生态破坏、水土流失等方面为改善现状所采取决策措施和解决问题效率。本文选取水资源开发利用率、生态用水率、污水处理厂集中处理率、水土流失治理 4 个指标作为代表。

1.3.2 经济高质量指标体系 在对高质量发展指标体系的研究中,参照王伟等<sup>[38-42]</sup>学者的研究,从创新、协调、绿色、开放、共享 5 方面构建高质量发展的指标体系(表 3)。在创新发展的考量中,选取了反映科研力度与经济活力,如 R&D 经费投入强度、人均 GDP、教育投入强度和固定资产投资增速等评估指标<sup>[43-44]</sup>。在协调发展维度方面,选用居民消费价格指数、城镇化率、政府财政负担、人均粮食产量和城乡居民人均收入比等指标,反映研究区域居民生活水平、城乡差异、产业结构表现。绿色发展角度评估标准包括一般工业固体废物综合利用率、生活垃圾无害化处理率、城市绿化率、人均公园绿地面积以及万元 GDP 能耗等指标来量化分析环境污染程度、资源消耗状况以及生态治理能力。开放发展由外商投资、对外贸易以及旅游业对 GDP 的贡献等多角度指标展现,力图揭示经济开放程度与活力。共享发展维度,着重从教育、医疗、就业以及居民消费等关键面向进行考虑,以期捕捉社会福祉的改善和社会财富的均衡分配情况。

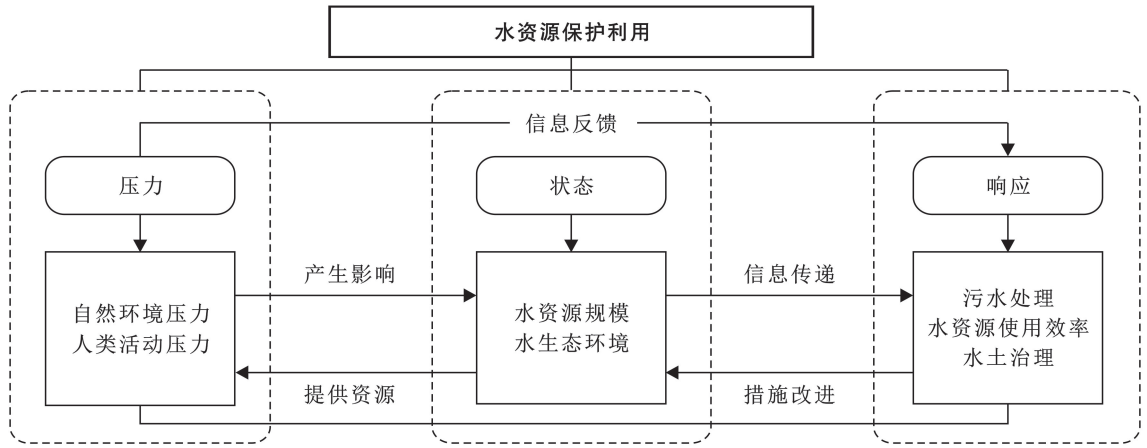


图 1 水资源保护利用 PSR 模型示意图

Fig.1 A schematic diagram of PSR model on water resource protection and utilization

表 3 黄河中游城市群高质量发展评价指标体系

Table 3 Evaluation index system for high-quality development of urban agglomerations in midstream of Yellow River

| 系统层     | 准则层                    | 指标层                     | 指标属性  | 主观权重   | 客观权重   | 组合权重  |
|---------|------------------------|-------------------------|-------|--------|--------|-------|
| 经济高质量发展 | 创新指标                   | R&D 经费投入强度/%            | 正向    | 9.301  | 5.546  | 6.505 |
|         |                        | 人均 GDP/元                | 正向    | 4.556  | 3.035  | 3.424 |
|         |                        | 教育投入强度/%                | 正向    | 6.943  | 3.044  | 4.040 |
|         |                        | 固定资产投资增速/%              | 正向    | 5.397  | 0.612  | 1.835 |
|         | 协调指标                   | 城镇化率/%                  | 正向    | 4.253  | 1.792  | 2.421 |
|         |                        | 居民消费价格指数/%              | 负向    | 4.789  | 3.087  | 3.522 |
|         |                        | 政府财政负担/%                | 负向    | 1.958  | 3.724  | 3.273 |
|         |                        | 人均粮食产量/kg               | 正向    | 2.525  | 2.937  | 2.832 |
|         | 绿色指标                   | 城乡居民人均收入比/%             | 负向    | 1.774  | 0.505  | 0.829 |
|         |                        | 生活垃圾无害化处理率/%            | 正向    | 3.135  | 0.474  | 1.154 |
|         |                        | 一般工业固体废物综合利用率/%         | 正向    | 3.819  | 1.464  | 2.066 |
|         |                        | 城市绿化率/%                 | 正向    | 3.838  | 0.575  | 1.409 |
|         | 开放指标                   | 人均公园绿地面积/m <sup>2</sup> | 正向    | 2.66   | 1.49   | 1.789 |
|         |                        | 万元 GDP 能耗/(t/万元,以标准煤计)  | 负向    | 5.548  | 5.301  | 5.364 |
|         |                        | 第三产业比重/%                | 正向    | 4.55   | 2.306  | 2.879 |
|         |                        | 外资依存度/%                 | 正向    | 3.465  | 6.948  | 6.058 |
| 共享指标    | 对外贸易依存度/%              | 负向                      | 2.713 | 14.294 | 11.335 |       |
|         | 市政公用设施建设投资占固定资产投资的比重/% | 正向                      | 3.325 | 9.84   | 8.175  |       |
|         | 旅游外汇收入贡献率%             | 正向                      | 3.43  | 11.653 | 9.552  |       |
|         | 万人卫生机构数/个              | 正向                      | 3.96  | 4.037  | 4.024  |       |
|         | 共享指标                   | 人均社会消费品零售额/万元           | 正向    | 6.942  | 4.789  | 5.339 |
|         |                        | 每万人在校大学生数量/人            | 正向    | 4.730  | 10.641 | 9.131 |
|         |                        | 城镇登记失业率/%               | 负向    | 6.242  | 1.908  | 3.015 |

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用水平分析

2.1.1 高质量发展和水资源保护利用综合评价指数  
依公式(1)综合评价模型,计算得到黄河中游城市群 19 个城市在 2011—2021 年的高质量发展和水资源保护利用的综合评价指数,结果详见表 4 受篇幅所限,本文仅列出 2011,2016 和 2021 年等年份为分析

节点进行结果对比。同时结合 Hasse 图工具得到 2011—2021 年整体表现(图 2)。并利用 ArcGIS 分析两个系统时空演变特征。如表 4 所示,多数城市两个方面的评价指数在 2011—2021 年均不同程度提高,然而各城市之间也存在着显著的差距。在高质量发展方面,各城市的综合评价指数普遍提高。其中,郑州市、西安市等省会城市整体表现优于其他城市。特别是西安从 2011 年的 0.541 增至 2021 年的 0.691,增长幅度达 0.150,提升了 27.7%。郑州市的增长也

值得关注,该城市在 10 a 间的综合评价指数从 0.414 提升至 0.587,增幅为 0.173,增长了 41.8%。长治、晋城、洛阳、焦作、鹤壁市等城市也展示出逐年上升的态势,晋城尤为显著,反映其经济、社会等方面正在积极发展。相反,商洛、铜川和晋城市等城市的高质量发展评价指数相对较低。特别是商洛和铜川市的 10 a 间增幅仅为 0.035,增长率分别为 15.9% 和 13.1%,显示出这两个城市在推动高质量发展进程中进展缓慢。在水资源保护利用方面,多数城市表现出稳健的增长态势,但城市之间发展差异较大。安阳市在此方面的提升最为突出,其综合评价指数从 2011 年的 0.263 增长至 2021 年的 0.394,增幅高达 0.131,增长了 49.81%,是各城市中增幅最大的。这一结果凸显了安阳在保护和利用水资源方面的重视和成效。郑州、洛阳、西安市等城市指数也较高且持续增长,水资源保护利用成效显著。亦应注意到,临汾和铜川、咸阳市等城市提升缓慢,需要加强水资源管理和保护等方面的工作。

2.1.2 高质量发展和水资源保护利用偏序集评价结果 进一步根据各年高质量发展和水资源保护利用综合评价指数,利用 Hasse 图工具图示化展示 2011—2021 年综合评价指数整体表现。由图 2 可知,Hasse 图越靠上的样本发展质量表现越好。例如高质量发展图中西安市位于郑州市的上级,反映西安市的表现优于郑州市。同时,各样本间的整体表现具有传递性,例如西安市表现优于郑州市,郑州市优于

洛阳市,这时可认为西安市优于洛阳市。根据各个城市在图中的高质量发展、水资源保护利用的表现可以将 19 个城市分为 3 个层级,层级水平分别对应较强、中等、较弱。

表 4 不同年份高质量发展和水资源保护利用综合评价指数  
Table 4 Comprehensive evaluation index of high-quality development, and water resources protection and utilization in different years

| 城市    | 高质量发展指数 |        |        | 水资源保护利用指数 |        |        |
|-------|---------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|       | 2011 年  | 2016 年 | 2021 年 | 2011 年    | 2016 年 | 2021 年 |
| 长 治   | 0.233   | 0.275  | 0.309  | 0.196     | 0.200  | 0.241  |
| 晋 城   | 0.277   | 0.284  | 0.352  | 0.208     | 0.247  | 0.295  |
| 临 汾   | 0.184   | 0.241  | 0.286  | 0.241     | 0.236  | 0.255  |
| 运 城   | 0.206   | 0.239  | 0.356  | 0.268     | 0.254  | 0.294  |
| 郑 州   | 0.414   | 0.537  | 0.587  | 0.297     | 0.277  | 0.396  |
| 开 封   | 0.269   | 0.321  | 0.353  | 0.267     | 0.270  | 0.324  |
| 洛 阳   | 0.277   | 0.346  | 0.433  | 0.290     | 0.254  | 0.389  |
| 安 阳   | 0.268   | 0.310  | 0.337  | 0.263     | 0.277  | 0.394  |
| 濮 阳   | 0.265   | 0.339  | 0.364  | 0.246     | 0.268  | 0.272  |
| 新 乡   | 0.289   | 0.326  | 0.363  | 0.295     | 0.297  | 0.369  |
| 焦 作   | 0.296   | 0.324  | 0.365  | 0.263     | 0.270  | 0.359  |
| 鹤 壁   | 0.281   | 0.351  | 0.389  | 0.185     | 0.198  | 0.325  |
| 三 门 峡 | 0.247   | 0.311  | 0.400  | 0.226     | 0.183  | 0.250  |
| 西 安   | 0.541   | 0.613  | 0.691  | 0.356     | 0.332  | 0.405  |
| 铜 川   | 0.267   | 0.276  | 0.302  | 0.130     | 0.135  | 0.183  |
| 宝 鸡   | 0.236   | 0.292  | 0.321  | 0.296     | 0.239  | 0.338  |
| 咸 阳   | 0.254   | 0.285  | 0.333  | 0.247     | 0.302  | 0.282  |
| 渭 南   | 0.197   | 0.257  | 0.281  | 0.292     | 0.329  | 0.319  |
| 商 洛   | 0.220   | 0.223  | 0.255  | 0.532     | 0.300  | 0.486  |

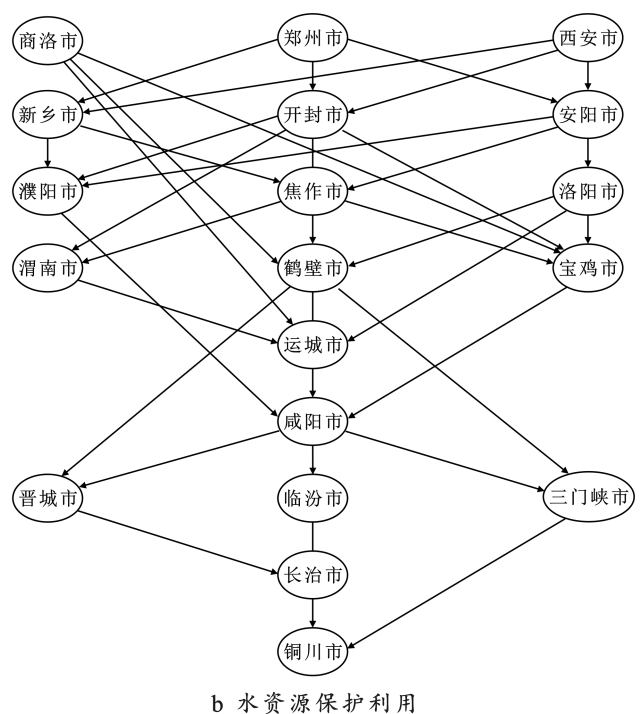
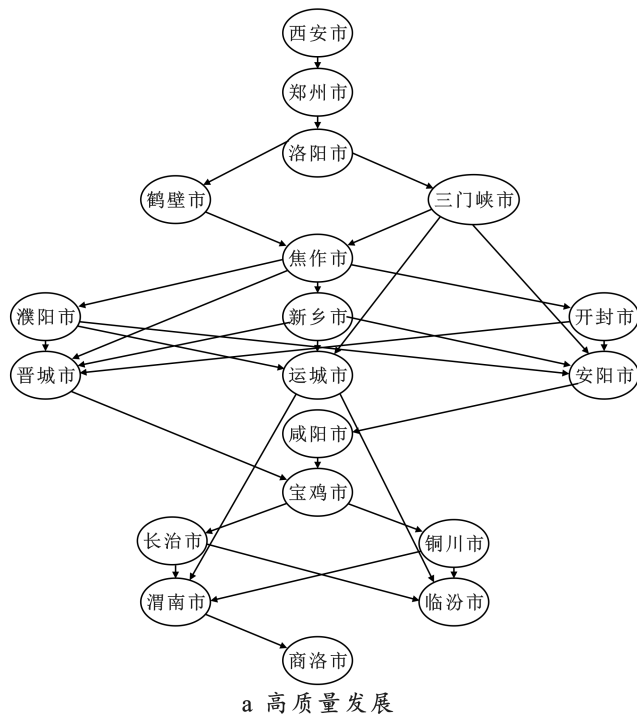


图 2 黄河中游城市群 2011—2021 年综合评价指数 Hasse 图

Fig.2 Hasse diagram of comprehensive evaluation index of cities in middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021

根据表5可以看出,在2011—2021年,19个城市在高质量发展和水资源保护利用方面的整体评级情况主要表现为:①从高质量发展的角度来看,西安、郑州、洛阳、鹤壁和三门峡市等5个城市在评级上表现较强,显示出这些城市在高质量发展方面具有极高的实力和优势。而大多数城市(排名6—14位)处于中等水平,但仍具有较大的发展潜力。相比之下,长治、铜川、渭

南、临汾和商洛等5个城市的发展质量远远落后于其他城市。②在水资源保护利用方面,商洛、西安、郑州、新乡、开封和安阳市等6个城市评级较强,保护利用水平较高。濮阳、焦作、洛阳、渭南、鹤壁、宝鸡、运城和咸阳市这8个城市评级为中等,属于一般水平。晋城、三门峡、临汾、长治和铜川市这5个城市的评级较弱,与其他城市有较大差距,水资源保护利用亟待加强。

表5 黄河中游城市群2011—2021综合评价指数整体表现

Table 5 Overall performance of comprehensive evaluation index of cities in middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021

| 高质量发展 |                            | 水资源保护利用 |                         |
|-------|----------------------------|---------|-------------------------|
| 评级    | 城市                         | 评级      | 城市                      |
| 较强    | 西安、郑州、洛阳、鹤壁、三门峡            | 较强      | 商洛、西安、郑州、新乡、开封、安阳       |
| 中等    | 晋城、运城、开封、安阳、新乡、焦作、濮阳、宝鸡、咸阳 | 中等      | 濮阳、焦作、洛阳、渭南、鹤壁、宝鸡、运城、咸阳 |
| 较弱    | 长治、铜川、渭南、临汾、商洛             | 较弱      | 晋城、三门峡、临汾、长治、铜川         |

2.1.3 高质量发展和水资源保护利用时空演变 从图3可以清晰地看出,2011—2021年黄河中游城市群高质量发展水平整体得到提升。具体而言,2011年整个区域的发展指数整体较低,多数城市处于一般水平。同时,以西安市和郑州市为双核心的高质量发展模式逐渐形成,并向周边地区辐射扩展。到了2021年,黄河中游城市群的高质量发展水平有了明显提升。特别是三门峡、洛阳市等城市,得益于第三产业增加值、人均GDP的提升,高质量发展水平增长较为显著。郑州、洛阳、西安市三大增长区连成一片,逐渐形成以郑洛西为发展轴心的沿黄流域高质量发展“金带”。与此同时,区域内其他城市之间的经济联系仍然较弱。因此,如何克服空间距离和行政区划的限制,与

周边城市展开经济合作,将是以郑洛西为核心的黄河中游城市群推动区域协调发展的关键。

由图4可以看出,2011—2021年期间,黄河中游城市群水资源保护利用水平均有不同程度的提升。2011年,区域内的水资源保护利用状况普遍较差或一般,并呈现出北低、南高的形势。这与南部地区拥有众多河流和相对丰富的水资源有着密切的关系。到2021年,大多数城市在水资源保护利用方面取得了一定进展,但整体空间格局变化不大。通过比较区域的高质量发展状况,可以发现在水资源开发利用水平增速较快的城市,其高质量发展表现也较好。这可以归因于经济水平的提高,科技进步以及生态观念的树立,推动了水资源的开发利用和生态保护。

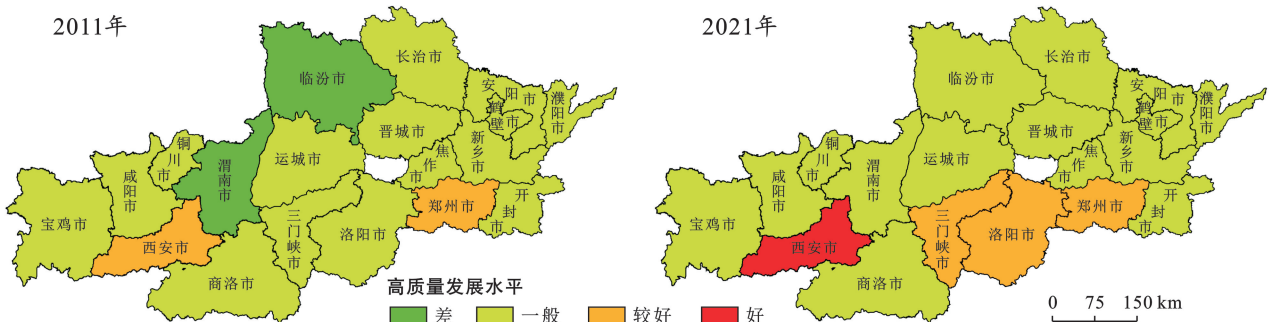


图3 黄河中游城市群2011—2021年高质量发展时空演变

Fig.3 Spatiotemporal evolution of high-quality development of cities in middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021

综合来看,黄河中游城市群的高质量发展和水资源保护利用水平在过去10a间整体上呈现出积极向好的趋势。核心城市的发展水平较高,而边缘城市的发展水平相对较低。同时,各城市之间仍存在差异,需因地制宜加强和协调水资源保护与利用水平,以实现可持续发展。

## 2.2 黄河中游城市群耦合协调度分析

2.2.1 耦合协调度时空演变特征 依公式(2)—(4)对黄河中游城市群2011—2021年高质量发展与水资源保护利用进行测算,最终得出的耦合协调度结果(如表6所示)。经过对2011—2021年黄河中游城市群高质量发展和水资源保护利用耦合协调度的分析,可



以发现大部分城市的耦合协调度整体上呈现出上升的趋势,其中耦合度提升尤其明显。高度耦合城市数量在 10 a 间里从 9 个增加到 17 个。与此同时,磨合阶段城市的数量从 2011 年的 7 个下降到只剩下 3 个,拮抗阶段城市的数量则降为零。在此期间,各城市协调等级普遍提升。2011 年时多数城市处于濒临失调和勉强失调阶段,临汾、渭南市两个城市耦合度和协调度均表现较差,反映出两系统均协调发展程度较低,且系统间发展差距较大。只有郑州市和西安市达

到了中级协调和良好协调的水平。而到了 2021 年,各城市的协调等级普遍提升,多数城市均达到初级协调及以上的水平。郑州市和西安市耦合度和耦合协调度均有较好表现,率先达到优质协调,成为区域协调发展的领跑者。而仅有为数不多的 4 个城市仍处在勉强失调及以下水平。尽管如此,铜川市的耦合协调度分别为 0.432 和 0.485,10 a 来提升步伐较慢,至今仍处于濒临失调状态,与其他城市相比存在较大的差距。

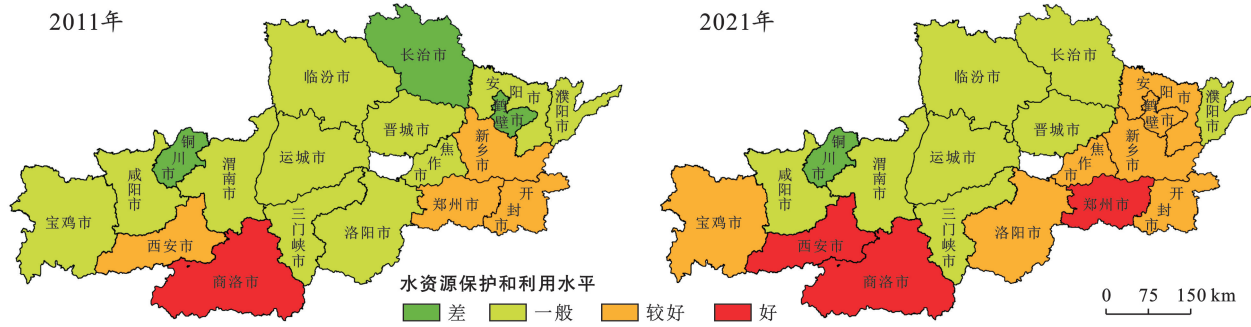


图 4 黄河中游城市群 2011—2021 年水资源保护利用时空演变

Fig.4 Spatiotemporal evolution of water resources protection and utilization of cities in middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021

表 6 不同年份高质量发展和水资源保护利用耦合协调度

Table 6 Coupling coordination degree of high-quality development, and water resources protection and utilization in different years

| 城市    | 2011 年 |      |      | 2016 年 |      |      | 2021 年 |      |      |
|-------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
|       | 耦合协调度  | 耦合等级 | 协调等级 | 耦合协调度  | 耦合等级 | 协调等级 | 耦合协调度  | 耦合等级 | 协调等级 |
| 长 治   | 0.462  | 5    | 5    | 0.484  | 5    | 5    | 0.522  | 5    | 6    |
| 晋 城   | 0.490  | 5    | 5    | 0.515  | 5    | 6    | 0.568  | 5    | 7    |
| 临 汾   | 0.459  | 3    | 3    | 0.489  | 4    | 5    | 0.520  | 5    | 6    |
| 运 城   | 0.485  | 4    | 4    | 0.496  | 4    | 5    | 0.569  | 5    | 7    |
| 郑 州   | 0.592  | 5    | 8    | 0.621  | 5    | 8    | 0.694  | 5    | 10   |
| 开 封   | 0.517  | 4    | 6    | 0.543  | 5    | 7    | 0.582  | 5    | 7    |
| 洛 阳   | 0.532  | 5    | 6    | 0.544  | 5    | 7    | 0.641  | 5    | 8    |
| 安 阳   | 0.515  | 4    | 6    | 0.541  | 5    | 6    | 0.603  | 4    | 8    |
| 鹤 壁   | 0.506  | 4    | 6    | 0.549  | 5    | 7    | 0.561  | 5    | 7    |
| 新 乡   | 0.540  | 4    | 6    | 0.558  | 5    | 7    | 0.605  | 5    | 8    |
| 焦 作   | 0.528  | 5    | 6    | 0.544  | 5    | 7    | 0.601  | 5    | 8    |
| 濮 阳   | 0.477  | 5    | 5    | 0.514  | 5    | 6    | 0.597  | 5    | 8    |
| 三 门 峡 | 0.486  | 5    | 5    | 0.488  | 5    | 5    | 0.562  | 5    | 7    |
| 西 安   | 0.663  | 5    | 9    | 0.672  | 5    | 9    | 0.727  | 5    | 10   |
| 铜 川   | 0.432  | 4    | 4    | 0.439  | 4    | 4    | 0.485  | 5    | 5    |
| 宝 鸡   | 0.514  | 4    | 5    | 0.514  | 5    | 6    | 0.574  | 5    | 7    |
| 咸 阳   | 0.500  | 5    | 5    | 0.542  | 5    | 6    | 0.554  | 5    | 7    |
| 渭 南   | 0.490  | 3    | 4    | 0.539  | 4    | 6    | 0.547  | 4    | 6    |
| 商 洛   | 0.585  | 3    | 6    | 0.508  | 4    | 5    | 0.594  | 4    | 7    |

由图 5 可以看出,2011—2021 年黄河中游城市群的耦合协调水平有明显提升,区域内耦合协调度由南向北递减,呈现出放射状分布趋势。2011 年时,大部分地区的城市处于濒临失调和轻度失调阶段,主要集中在东部和北部地区的城市。然而,到了 2021 年,所有城市都达到了轻度失调以上水平,区域内基本实现初级协调。这说明黄河中游地区在高质量发展

和水资源保护利用方面取得了显著的进步。围绕西安和郑州两个城市,协调水平呈现出显著的多核组团状空间分布规律。这说明核心城市的发展对周边城市的影响非常明显,有效带动了周边城市的协调发展,也反映出黄河中游地区城市之间互动关联和平衡发展的增强。但不可否认,不同地区之间仍存在较大差距,特别是西部和北部地区的城市协调水平



相对较低。缩小西部和北部地区城市与南部地区城市差距,实现流域内协调发展是目前亟待解决的问题。

2.2.2 耦合协调度空间相关性分析 依公式(5)使用全局莫兰指数对黄河中游地区 2011—2021 年耦合协调度进行空间自相关分析。由表 7 可知,2011—2021 年,全局 Moran's  $I$  指数在 0.01~0.20 之间变动,并始终保持正值,这说明邻近区域之间存在正向联系,且具有一定的空间集聚特征。整体来看,2011—2021 年 Moran's  $I$  指数呈现出上升趋势。这表明黄河中游地区的城市在高质量发展与水资源保护利用的耦合协调度上的空间自相关性强度在逐步增强。然而,从局部年份看,2011—2016 年, Moran's  $I$

指数略有下降,从 0.089 降至 2015 年最低值的 0.011。这显示出空间自相关性在减弱,空间分布趋向分散,区域间差异在缩小。随着经济结构调整、创新领域的投入,区域内部分城市率先引入新兴产业,发展节水技术推动城市协调发展,加剧了地区间发展模式和需求差异化,从而减弱了城市间的空间相关性。2016 年后, Moran's  $I$  指数开始逐年攀升,从 0.049 增加至 2021 年的峰值 0.180,显示出空间自相关性增强,同时区域间差异逐步扩大。到 2021 年,受疫情的影响,黄河中游城市经济发展严重受阻, Moran's  $I$  指数又降至 0.109,显示两系统的耦合协调度空间相关性在减弱。总之,尽管部分年份耦合协调度相近的区域呈现出分散的趋势,但总体仍保持聚集态势。

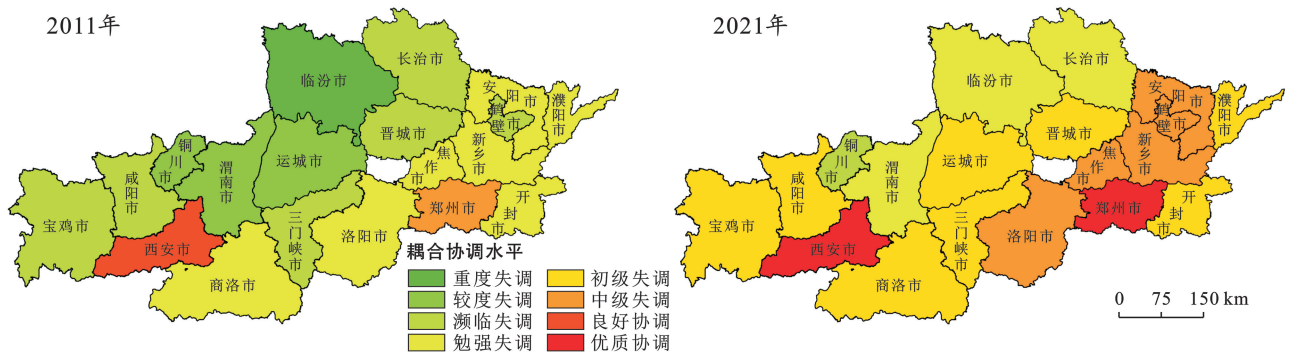


图 5 黄河中游城市群 2011—2021 年高质量发展与水资源保护利用耦合协调空间分布

Fig.5 Spatial distribution of coupling coordination of high-quality development and water resources protection and utilization of cities in middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021

表 7 高质量发展与水资源保护利用耦合协调度的 Global Moran's  $I$  指数及统计检验

Table 7 Global Moran's  $I$  index and statistical test for coupling coordination degree of high-quality development, and water resources protection and utilization

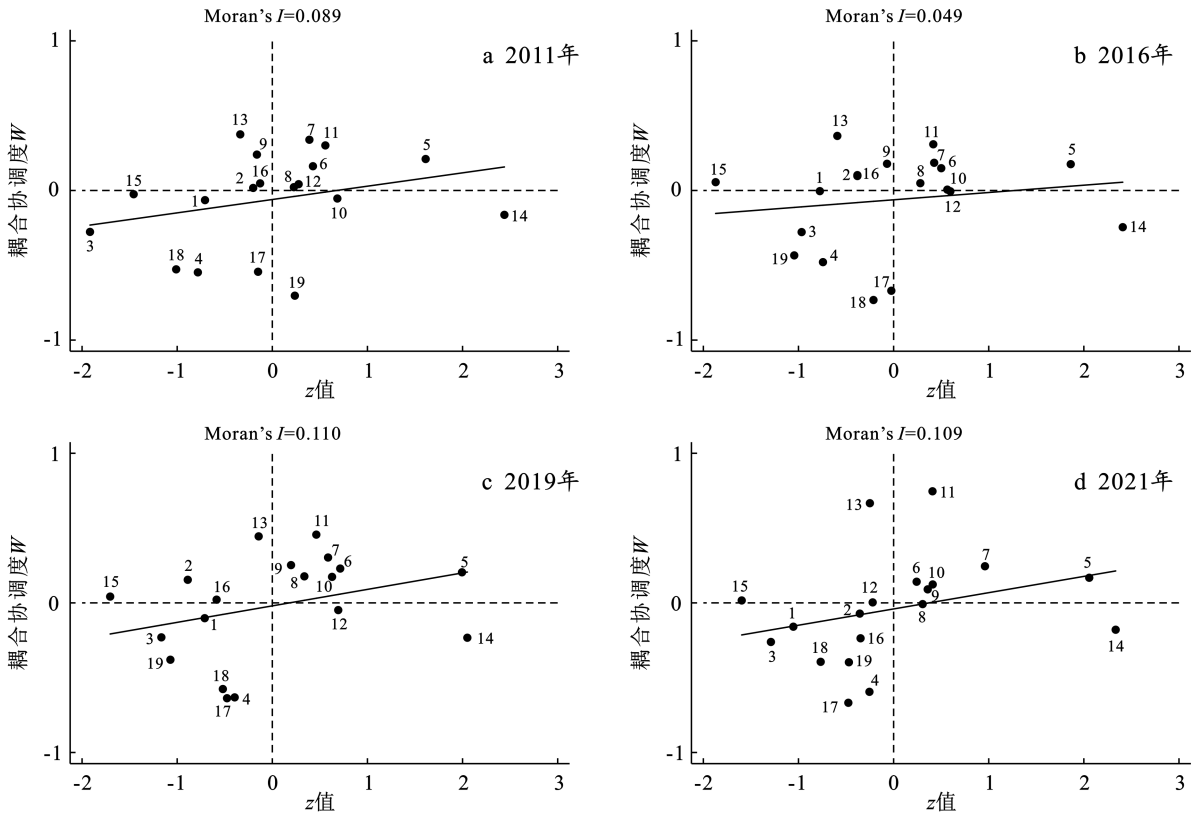
| 年份   | Moran's $I$ 指数 | $z$ 值 | $p$ 值 |
|------|----------------|-------|-------|
| 2011 | 0.089          | 1.105 | 0.135 |
| 2012 | 0.045          | 0.765 | 0.222 |
| 2013 | 0.027          | 0.629 | 0.265 |
| 2014 | 0.038          | 0.716 | 0.237 |
| 2015 | 0.011          | 0.504 | 0.307 |
| 2016 | 0.049          | 0.797 | 0.213 |
| 2017 | 0.090          | 1.112 | 0.133 |
| 2018 | 0.103          | 1.212 | 0.113 |
| 2019 | 0.110          | 1.266 | 0.103 |
| 2020 | 0.180          | 1.800 | 0.036 |
| 2021 | 0.109          | 1.255 | 0.105 |

为进一步分析区域内高质量发展与水资源保护利用的空间相关性,分别计算得到 2011,2016,2019 和 2021 年黄河中游城市群局部莫兰指数,并绘制出局部莫兰散点图。从图 6 可以看出,2011 年,大部分城市,集聚在第 I 象限(高高聚集区)和第 III 象限(低低聚集区)。包括郑州、开封、洛阳、安阳、焦作市等,

而晋城、濮阳、三门峡、宝鸡市等位于第 II 象限(低高聚集区),只有新乡和西安位于第 IV 象限(高低聚集区)。这反映出研究区域城市在高质量发展与水资源保护利用的耦合协调水平存在一定的差异。5 a 后,大部分城市的象限分布没有发生显著变化,但有一些例外。例如新乡市跃升至第 I 象限(高高聚集区),铜川市从第 III 象限(低低聚集区)移动到了第 II 象限(低高聚集区)。显示出两城市在高质量发展和水资源保护利用方面取得了一定进步。同时,鹤壁市则下滑至第 IV 象限(高低聚集区)。到了 2019 年,大部分城市继续保持稳定,仍以第 I 象限(高高聚集区)和第 III 象限(低低聚集区)为主导。然而,到了 2021 年,晋城和宝鸡市滑落至第 III 象限(低低聚集区),而安阳从第 I 象限(高高聚集区)滑落至第 IV 象限(高低聚集区),区域耦合协调度水平下滑,空间集聚呈现动态波动的趋势。值得注意的是,2011—2021 年西安市始终处于第 IV 象限(高低聚集区),其对周边城市的辐射带动作用并未显现。邻近城市多处于第 III 象限(低低聚集区),在高质量发展和水资源保护利用方面的协调有待进一步提升。而郑州市对周边城市的正向辐射作

用明显,周围城市多稳步发展并处于第一象限。同时,从区域特征来看,南部、东部地区耦合协调发展水平领先于西部、北部地区。南部、东部地区以第一象限(高高聚集区)为主,西部、北部城市多位于Ⅱ象限(低高聚集区)、Ⅲ象限(低低聚集区)。这主要受限

于资源禀赋较差、经济基础薄弱和水污染与水环境恶化、水资源过度开发等因素的困扰,区域发展长期不平衡。总的来说,黄河中游城市在高质量发展与水资源保护利用的耦合协调度的空间自相关性强度正逐步增强,且区域间差异在逐渐缩小。



注:1—19 代表各市的名称分别为:长治、晋城、临汾、运城、郑州、开封、洛阳、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、三门峡、西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南和商洛市。

图 6 研究区 2011—2021 年高质量发展与水资源保护利用耦合协调度的莫兰散点图  
Fig.6 Moran's  $I$  scatter plot of coupling coordination degree of high-quality development and water resources protection and utilization of study area from 2011 to 2021

## 2.3 黄河中游城市群耦合协调水平的影响因素分析

### 2.3.1 影响因子选取

上文结果显示,黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用耦合协调度在空间分布上具有一定程度的空间关联性和集聚特征,但其

作用原理目前尚未清楚。为了深入分析不同驱动因子对区域耦合协调的影响,从经济基础、社会文明、水资源基础、水环境改善等 4 个维度选取 10 个指标作为潜在驱动因子进行探测(表 8)。

表 8 高质量发展与水资源保护利用耦合协调的影响因素

Table 8 Influencing factors of coupling coordination of high-quality development, and water resources protection and utilization

| 准则层   | 影响因子         | 代码       | 因子释意          |
|-------|--------------|----------|---------------|
| 经济基础  | 外资依存度        | $X_1$    | 区域经济开放程度      |
|       | 第三产业产值比例     | $X_2$    | 区域第三产业发展水平    |
|       | 人均消费品零售总额    | $X_3$    | 区域居民的潜在消费能力   |
| 社会文明  | 城镇化率         | $X_4$    | 区域城镇化发展水平     |
|       | R & D 经费投入强度 | $X_5$    | 区域科技重视程度      |
|       | 城乡居民人均收入比    | $X_6$    | 区域城乡发展平衡程度    |
| 水资源基础 | 人均水资源量       | $X_7$    | 区域所具备的水资源禀赋条件 |
|       | 万元 GDP 用水量   | $X_8$    | 区域水资源开发利用能力水平 |
| 水环境改善 | 生态用水率        | $X_9$    | 区域生态需水的满足程度   |
|       | 单位工业产值废水排放量  | $X_{10}$ | 区域工业废水对环境污染程度 |

2.3.2 单因子探测结果 在本研究中,利用 ArcGIS 软件的自然间断方法,选取 2011 年和 2021 年作为研究时间节点,对各驱动因子进行离散化处理。继而,借助地理探测器模型对离散化后的驱动因子进行深度分析,以揭示其对目标变量的解释力。本文以探测结果中通过显著性检验,且解释力值超过 0.6 的因子视为主控因子。图 7 显示,2011 年黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用的时空耦合协调演变主要受第三产业产值比例和人均消费品零售总额的主导影响。到 2021 年,主控因子变为外资依存度、第三产业产值比例城镇化率、城乡居民人均收入比、单位工业产值废水排放量,这表明经济基础与水环境的提升已成为推动高质量发展与水资源保护利用协调的关键驱动力。

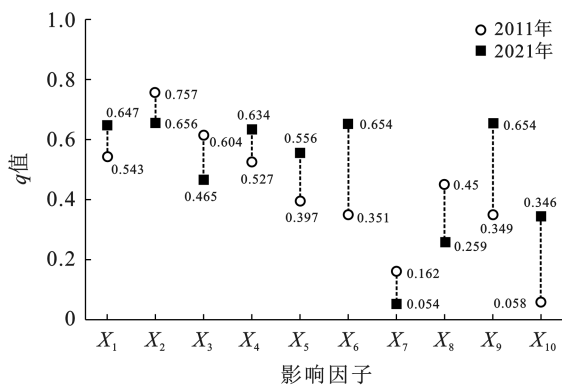


图 7 高质量发展与水资源保护利用耦合协调度单因子探测结果  
Fig.7 Single factor detection results of coupling coordination degree of high-quality development, and water resources protection and utilization

基于 2011 年和 2021 年单因子探测结果的分析,可以发现各个因子对区域耦合协调发展的驱动作用发生了显著变化。以影响区域耦合协调的主导因子为例,外资依存度从 2011 年的 0.543 增至 2021 年的 0.647,反映出对外资依赖程度的提升,外资在推动区域协调发展中的作用日益凸显。外资流入的增加有助于地区与全球化步伐同步,促进区域经济快速发展,对城乡共进做出积极贡献。尽管第三产业产值比例从 0.757 降至 0.656,但其仍处于较高水平,生产与服务业经济对地区协调发展的重要性不言而喻。人均消费品零售总额虽从 2011 年的 0.614 降至 2021 年的 0.465,但其仍然是重要因素。消费能力反映了居民生活水平和经济发展水平,是推动地区经济和社会进步的关键驱动力。城镇化率从 2011 年的 0.527 增至 2021 年的 0.634,显示出乡村向城市过渡的加速趋势。城镇化的提升对城乡人口、产业、环境等各方面的协调发展起到关键作用。城乡居民人均收入比从

0.351 显著上升至 0.654,这不仅衡量了城乡经济发展的平衡,也反映了地区创新能力和人力资源提升对经济的深远影响。生态用水率从 0.349 增至 0.654,该指标的显著增加表明随着对环境的关注度提升,资源利用趋向可持续发展的方式。R&D 经费投入强度和万元 GDP 用水量等因素的  $q$  值均在 0.4~0.6 之间,两项指标在区域耦合协调中起一定推动作用。特别是 R&D 经费投入强度的提升对创新能力的增强在城乡协调发展具有重要意义。另外,人均水资源量和单位工业产值废水排放量的  $q$  值都低于 0.3,说明这两个因素对区域耦合协调发展的影响力相对较弱。然而,这并不意味着可以忽视这些因素。人均水资源量的下降反映研究区域水资源总量不足,水资源分配不均等问题。而单位工业产值废水排放量的低分值则迫使政府积极执行环保政策,提高工业废水处理标准,以建立更为和谐的人水关系。

2.4.3 影响因子交互分析 图 8 的交互探测结果来看,任意两个指标交互作用后出现双因子增强效应,且以双因子增强为主。这说明区域耦合协调发展是多因子共同作用的结果。在经济基础方面,无论是 2011 年还是 2021 年,第三产业产值比例与外资依存度、居民消费能力的交互作用都具有较强的解释力。

具体来说,2011 年该两项指标的交互解释力分别为 0.842,0.816,而 2021 年这个数值更是达到了 0.801,0.841。这意味着第三产业的发展 and 对外贸易、居民的消费能力之间存在着紧密的耦合关系,这种关系正向推动着经济的协调发展。①在科技投入方面,R & D 经费投入强度与其他指标的交互作用在 2011 年和 2021 年都表现出显著的解释力。例如,2011 年 R & D 经费投入强度与城乡居民人均收入比的交互解释力高达 0.716,而在 2021 年这个数值为 0.810。在催化科技投入与居民收入水平推动高质量发展中有着同步增效作用。②在水资源基础方面,人均水资源量与万元 GDP 用水量的交互作用在 2011 年和 2021 年都显著高于单一指标。具体来看,2011 年该两项指标的交互解释力为 0.809,而 2021 年这个数值为 0.905。这表明,水资源的合理分配和高效利用之间存在着正向的互动关系,这种关系共同推动了水资源的协调利用。③在水环境改善方面,单位工业产值废水排放量与其他指标的交互作用在 2011 年和 2021 年都表现出较大的影响力。例如,2011 年单位工业产值废水排放量与生态用水率的交互解释力为 0.807,而在 2021 年这个数值更是达到了 0.952。这些数据反映了经济活动与生态保护的复合效益在塑造区域环境质量方面的持久影响力。



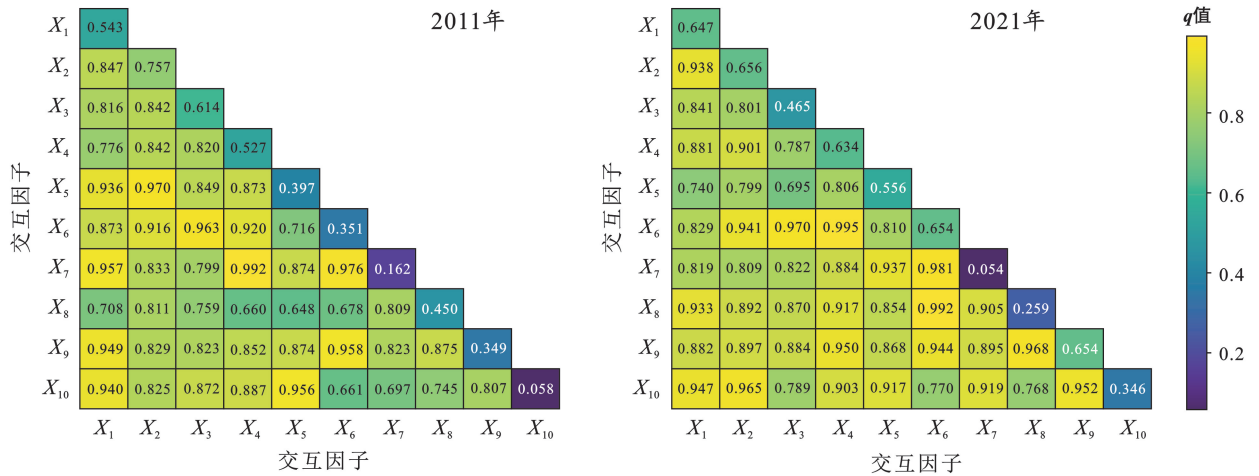


图 8 高质量发展与水资源保护利用耦合协调度交互探测器结果

Fig.8 Interactive detector results of coupling coordination degree of high-quality development and water resources protection and utilization

## 3 结论与建议

### 3.1 结论

(1) 2011—2021年,黄河中游城市群的高质量发展与水资源保护利用水平展现了稳健的上升态势,但各城市间的发展差异仍显著。高质量发展水平的提高主要集中在核心城市,且呈现出以郑州市和西安市为双核心的发展模式。水资源保护利用水平的提高则以南部城市为主。

(2) 2011—2021年,黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用之间的耦合度和协调度均展现出稳定的上升趋势。其中,多数城市的耦合协调度由濒临失调阶段转变为初级协调阶段,但仍有部分城市处于失调状态。空间上,耦合协调度由西安市和郑州市向外递减,呈现放射状分布。核心城市作为龙头有效带动了周边城市的协调发展。

(3) 外资依存度、第三产业产值比例、城镇化率、生态用水率等是影响高质量发展与水资源保护利用耦合协调的主要因素。各影响因子之间存在非线性加强或双加强的交互关系,共同推动区域协调发展。

### 3.2 建议

(1) 加强区域合作,缩小城市发展差距。核心城市应发挥辐射带动作用,与周边城市加强合作,在产业升级、基础设施互联互通和科技创新等方面协同推进,缩小高质量发展和水资源保护利用方面的差距,实现区域协调发展。同时,制定区域发展战略和规划,加强顶层设计,建立跨地区的合作机制,明确城市定位,合理布局,实现资源共享和优势互补。

(2) 优化水资源利用结构,提高水资源管理能力。各城市应根据自身的水资源禀赋和发展基础,制定科学合理的水资源利用计划;建立水资源信息共享

机制,实现黄河流域水资源监测与水环境监测数据的共享,加强水资源保护,改善水生态环境;建立有效的监督和管理机制,严格控制工业污染物排放,提高工业废水处理标准;推进节水技术的研发与应用,并提升水环境管理能力,确保水资源的可持续利用。

(3) 增加科技投入,提高区域创新能力。各城市应加大对科技创新和水资源高效利用领域的投入,重视节水技术和循环利用技术的应用;引进先进科技和知识产权,提升区域创新能力,推动产业转型升级和能源结构改善;加强产学研合作,建立良好的创新生态系统,以共同提高区域的科技创新能力和水治理水平。

### 【参考文献】

- [1] 黄承梁,马军远,魏东,等.中国共产党百年黄河流域保护和发展的历程、经验与启示[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):1-9.
- [2] Jiang Long, Zuo Qiting, Ma Junxia, et al. Evaluation and prediction of the level of high-quality development: a case study of the Yellow River basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107994.
- [3] 高志远,程柳,张小红.黄河流域经济发展—生态环境—水资源耦合协调水平评价[J].统计与决策,2022,38(09):123-127.
- [4] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等.河南省黄河流域水资源—经济—生态系统耦合协调评价及预测[J].湖泊科学,2022,34(3):919-934.
- [5] 张忠杰,许宏宇.黄河经济带高质量发展的空间差异及溢出效应分析[J].软科学,2023,37(4):129-135,144.
- [6] 孙久文,崔雅琪,张皓.黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J].自然资源学报,2022,37(7):1673-1690.
- [7] 康艳青,刘羽晴,朱永明.沿黄城市生态保护与高质量发展的耦合协调性分析与预测[J].生态经济,2022,38(10):190-197.



- [8] 曲国华,李晨成,李春华,等.公众参与下黄河流域生态保护和高质量发展的协同演化机理研究[J].灾害学,2023,38(3):7-16.
- [9] 左其亭,张志卓,马军霞.黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):29-38.
- [10] 邵汉华,罗俊,王瑶.黄河流域城市水资源利用效率的时空分异及动态演进[J].统计与决策,2022,38(14):70-74.
- [11] 王洁方,周云,田晨萌.多维视角下黄河流域水环境与社会经济协调性研究[J].人民黄河,2021,43(7):94-99,113.
- [12] 任保平,付雅梅,杨羽宸.黄河流域九省区经济高质量发展的评价及路径选择[J].统计与信息论坛,2022,37(1):89-99.
- [13] 何立峰.大力推动高质量发展积极建设现代化经济体系[J].宏观经济管理,2018(7):4-6.
- [14] 刘志彪.高质量建设现代化经济体系的着力点与关键环节[J].区域经济评论,2018(4):11-14.
- [15] An Xiaowei, Li Ying, Wang Lunyan, et al. The spatial and temporal distribution of high-quality urbanization development in Yellow River basin provinces [J]. Sustainability, 2022,14(16):10355.
- [16] 闫丽洁,赵永江,邱士可,等.黄河流域高质量发展指标体系构建与评价:以河南段为例[J].地域研究与开发,2022,41(6):37-43.
- [17] Chen Xiangnan, Li Fang, Wu Fengping, et al. Initial water rights allocation of industry in the Yellow River Basin driven by high-quality development [J]. Ecological Modelling, 2023,477:110272.
- [18] 张国兴,苏钊贤.黄河流域中心城市高质量发展评价体系构建与测度[J].生态经济,2020(7):37-43.
- [19] 马海涛,徐植枋.黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J].经济地理,2020,40(4):11-18.
- [20] 杨骞,徐青.长江经济带与黄河流域水资源绿色效率比较研究[J].经济与管理评论,2022,38(5):49-62.
- [21] 李焯,蒋秀华,朱彪,等.未来10年黄河流域水资源承载能力评价[J].人民黄河,2022,44(S1):25-27.
- [22] Guan Xinjin, Liang Shengxing, Meng Yu. Evaluation of water resources comprehensive utilization efficiency in the Yellow River basin [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2016, 16(6): 1561-1570.
- [23] Qiu Meng, Zuo Qiting, Wu Qingsong, et al. Water ecological security assessment and spatial autocorrelation analysis of prefectural regions involved in the Yellow River Basin [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):5105.
- [24] Sun Xinrui, Zhou Zixuan, Wang Yang. Water resource carrying capacity and obstacle factors in the Yellow River basin based on the RBF neural network model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022:1-17.
- [25] Lu Chengpeng, Ji Wei, Hou Muchen, et al. Evaluation of efficiency and resilience of agricultural water resources system in the Yellow River basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2022,266:107605.
- [26] Xie Pengxuan, Zhuo La, Yang Xi, et al. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: a case for the Yellow River basin [J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125222.
- [27] 王淑贺,王利军.黄河流域水贫困与经济高质量发展的耦合协调关系[J].水土保持通报,2022,42(3):199-207.
- [28] 王格芳,李梦程.黄河流域水资源与区域发展时空耦合研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(2):8-15.
- [29] 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):4-11.
- [30] 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.
- [31] 邢霞,修长百,刘玉春.黄河流域水资源利用效率与经济高质量发展的耦合协调关系研究[J].软科学,2020,34(8):44-50.
- [32] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [33] OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Review. Environmental Monograph No. 83 [R]. Paris: Oecd, 1993.
- [34] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等.基于PSR模型的生态移民安置区土地利用系统健康评价:以红寺堡区为例[J].水土保持研究,2018,25(6):270-276.
- [35] 刘黎明,陈军飞,王春宝.长江经济带水—能源—粮食—生态脆弱性时空特征及影响机制[J].长江流域资源与环境,2023,32(8):1628-1640.
- [36] 郑江丽,李兴拼.基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J].水资源保护,2021,37(5):30-35.
- [37] 曾恩钰,陈永泰.空间溢出视角下的城市水环境影响因素研究:以太湖流域城市为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(6):1312-1323.
- [38] 王伟.中国经济高质量发展的测度与评估[J].华东经济管理,2020,34(6):1-9.
- [39] 张震,刘雪梦.新时代我国15个副省级城市经济高质量发展评价体系构建与测度[J].经济问题探索,2019(6):20-31,70.
- [40] 高志刚,克魁.中国沿边省区经济高质量发展水平比较研究[J].经济纵横,2020(2):23-35,2.
- [41] 马茹,罗晖,王宏伟,等.中国区域经济高质量发展评价指标体系及测度研究[J].中国软科学,2019(7):60-67.
- [42] 郭芸,范柏乃,龙剑.我国区域高质量发展的实际测度与时空演变特征研究[J].数量经济技术经济研究,2020,37(10):118-132.
- [43] 王家明,余志林.沿黄地区中心城市及城市群高质量发展的测度及影响因素[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):47-58.
- [44] 徐辉,师诺,武玲玲,等.黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J].资源科学,2020,42(1):115-126.