

# 黄河流域资源型城市绿色转型效率的水平测度、差异来源与时空演进

杨怡康, 蒋毓琪

(山西大同大学 商学院, 山西 大同 037009)

**摘要:** [目的] 分析探究黄河流域资源型城市绿色转型效率的时空分异、差异来源与演进特征, 为促进黄河流域资源型城市绿色转型与经济高质量发展一体化协同推进提供参考。[方法] 基于黄河流域37个资源型城市2013—2022年的统计数据, 选用超效率SBM模型与Dagum基尼系数, 评价绿色转型效率并分析其差异来源, 进一步引入核密度估计法揭示时空演进特征。[结果] ①黄河流域资源型城市的绿色转型效率稳步提升, 呈现“小幅上涨—快速提升”的特征。②不同地区资源型城市绿色转型效率的空间异质性明显, 下游资源型城市绿色转型效率高于上、中游, 地区间差异是影响整体差异的主要因素。③不同地区资源型城市绿色转型效率差距明显缩小, 但下游绿色转型效率的差异变化小于上、中游。[结论] 黄河流域不同地区资源型城市需增强区域合作, 发挥绿色转型效率较高核心城市的辐射带动效应, 制定差异路径, 实现全流域资源型城市绿色转型与高质量发展协同推进。

**关键词:** 绿色转型效率; 时空演进; 资源型城市; 黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0337-10

中图分类号: X24

**文献参数:** 杨怡康, 蒋毓琪. 黄河流域资源型城市绿色转型效率的水平测度、差异来源与时空演进[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 337-346. Yang Yikang, Jiang Yuqi. Measurement, difference source and spatial-temporal evolution of green transformation efficiency in resource-based cities of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 337-346. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.014; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.014.

## Measurement, difference source and spatial-temporal evolution of green transformation efficiency in resource-based cities of Yellow River basin

Yang Yikang, Jiang Yuqi

(School of Business, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal differences, sources and evolution characteristics of the green transformation efficiency of resource-based cities in the Yellow River basin were analyzed, in order to provide references for promoting the integrated and coordinated advancement of the green transformation and high-quality economic developments in the region. [Methods] Based on statistical data from 37 resource-based cities during 2013 to 2022, a super-efficiency slack-based measure (SBM) model was selected to evaluate the level of green transformation efficiency, and the Dagum Gini coefficient was also used to analyze the different sources. The evolution characteristics of green transformation efficiency were revealed using the kernel density estimation method. [Results] ① The green transformation efficiency of resource-based cities in the Yellow River basin was steadily improved, showing the characteristics of ‘slight increase then rapid improvement’. ② The spatial heterogeneity of the green transformation efficiency of resource-based cities in different regions was obvious. The green transformation efficiency of downstream resource-based cities was higher than that of upstream and midstream

收稿日期: 2024-12-28

修回日期: 2025-04-03

采用日期: 2025-04-03

**资助项目:** 教育部人文社会科学研究规划青年基金项目“山西矿区生态占用赤字的负外部效应测度与补偿机制研究”(20YJC630052); 山西省哲学社会科学规划课题“黄河流域山西段生态保护与经济高质量发展的耦合协调研究”(2023YY251); 山西省高校哲学社会科学课题(2022W121); 山西省社科院规划课题(SXGZL202414); 大同市软科学课题(2023077); 山西大同大学云冈学专项课题(2023YGYB16)

**第一作者:** 杨怡康(1990—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士, 讲师, 研究方向为资源与环境经济。Email: yangyikang@sxdtu.edu.cn.

**通信作者:** 蒋毓琪(1983—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 副教授, 主要从事资源与环境经济等方面的研究。Email: jiangyuqi@sxdtu.edu.cn.

cities. The regional differences were the main factor affecting the overall differences. ③ The gap in the efficiency of green transformation among resource-based cities in different regions was narrowed significantly; however, the difference in the efficiency of green transformation in the downstream cities was smaller than that of middle and upstream cities. [Conclusion] Resource-based cities in different regions of the Yellow River basin need to enhance regional cooperation, focusing on the radiation and driving effect of core cities with higher green transformation efficiency, formulating differentiated paths, to achieve the coordinated advancement of green transformation and high-quality development of resource-based cities and high-quality development in the Yellow River basin.

**Keywords: green transformation efficiency; spatial-temporal evolution; resource-based cities; Yellow River basin**

黄河流域作为中国重要的经济带,其资源型城市具有要素丰裕、工业分布较广、产业结构偏重的特点,高污染、高耗能与高排放的经济增长模式难以平衡碳排放需求与有限碳汇供给,需要资源型城市通过经济绿色转型实现全流域高质量发展。因此,科学探究黄河流域经济绿色转型及其动态变化,对建设“高质量多元发展、生态韧性强”的资源型城市至关重要。

目前,中国城镇化进入以提质为主的转型发展新阶段,黄河流域资源型城市转型已成为学者探究的前沿热点,主要集中于概念界定、效果评估、影响因素分析、路径设计等。城市转型包括经济转型、绿色转型和综合转型等不同层面,主要指城市发展进程与方向在多领域优化、调整,维持社会经济可持续的过程<sup>[1]</sup>。城市转型受政府职能、技术创新与人力资源等多重因素影响。Kim D H<sup>[2]</sup>认为,城市转型发展需要政府参与,应充分发挥政府配置资源的作用。城市转型成功的关键在于技术创新,技术创新作为城市转型的内在驱动力,有利于降低成本、提高生产效率,促进产业转型升级<sup>[3]</sup>。人才资本是技术创新的主体,能够为技术创新提供有效的智力支撑,是其提质增效的核心要素,其间接作用于城市转型<sup>[4]</sup>。城市效率评价是验证城市转型的必要条件。城市转型效果评估需构建合理的评价体系,包括要素禀赋、经济增长和社会进步等多个维度。在此基础上,有些学者借助生态足迹法、数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型、基于松弛变量的度量(slack-based measure, SBM)模型与耦合协调模型等定量评估城市转型效果<sup>[5]</sup>。董锋等<sup>[6]</sup>运用DEA模型分析21个资源型城市的转型效率,结果表明我国资源型城市转型效率普遍提升,东部高于中、西部地区。李江苏等<sup>[7]</sup>基于空间范围、发展阶段与资源类型探究我国资源型城市转型效率,发现技术效率与综合效率差距较大,规模效率消减了综合效率。宋成镇等<sup>[8]</sup>提出黄河流域城市转型效率具有周期性波动演变的特征。王晓楠等<sup>[9]</sup>认为,自2015年起,城市间转型效率

的差距略有扩大且规模报酬递减明显,其中,人均GDP、政府财政收入占GDP的比重与其呈正相关关系。曹卫芳等<sup>[10]</sup>采用全局自相关空间模型得到黄河流域资源型城市转型的空间格局差异变化较大,且具有集聚分布演变特征。张国兴等<sup>[11]</sup>依据黄河流域不同地理区位绿色转型效率的特点,提出从增强绿色发展意识、推动产业结构转型与大力推动科技创新等方面制定转型发展的实现路径。

综上所述,关于城市转型效率的内在理论日臻完善,但仅以少数指标衡量城市转型效率尚有偏颇,亟需补充完善,且有关资源型城市绿色转型效率水平空间分布差异来源与动态演化趋势的专项研究尚显不足。基于此,本文的边际贡献在于:在指标方法上,聚焦于城市绿色转型与投入产出平衡视角,从投入与产出两个子系统构建黄河流域资源型城市绿色转型评价指标体系;在研究内容与方法上,选用超效率SBM模型评估绿色转型效率,运用Dagum基尼系数及分解法分析其空间差异并解释差异来源,进一步引入核密度估计模型探析其动态演进特征,旨在为促进黄河流域资源型城市绿色转型与经济高质量发展一体化协同推进提供参考。

## 1 研究区概况

黄河流域流经青海、内蒙古和河南等9个省域,分别以河口镇和桃花峪为上、中、下游的分界点<sup>[12]</sup>。本文依据《全国资源城市可持续发展规划(2013—2020年)》《黄河流域综合规划(2012—2030年)》<sup>[13]</sup>,结合可获得数据,共提取37个资源型城市(剔除阿坝藏族羌族自治州和海西蒙古族藏族自治州)作为研究对象(图1)。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文所需数据主要源于2013—2022年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及黄河流域各资源型城市的统计年鉴等。其中,

碳汇量估算源于各资源型城市的森林资源清查、农业情况统计与园林绿化统计等数据。鉴于某些年份的数据缺失,采用线性插值法补齐。为了尽可能降

低实证结果误差,本文对第二产业增加值占GDP比重、人均水耗、人均公园绿地面积等未能直接获取的部分指标取其相对值并进行测算<sup>[14]</sup>。



图1 黄河流域资源型城市地理分区

Fig.1 Geographical regions of resource-based cities in Yellow River basin

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 评价指标体系构建

资源型城市转型是一项涉及自然环境与社会经济等多元复合的综合性变革,学者们基于一般均衡与投入-产出理论构建城市转型效率评价指标体系。但有些投入、产出指标仅选取一个具体指标表征,未能充分解释其涵义。此外,还有部分影响城市转型的重要因素未纳入评价指标体系中,以及所选择指标存在信息重叠情况。本文参照已有成果<sup>[15]</sup>,依据投入-产出理论分析框架,围绕“城市转型需要财政资金投入,人才资源集聚,科学技术创新,能源结构调整与生态环境保护,通过经济组织形态转变,产业结构调整,优化资源配置与资源利用效率提升,实现城市绿色转型、经济高质量增长、生态供求平衡,人与自然和谐共生”的逻辑关系,丰富黄河流域资源型城市绿色转型效率评价指标体系(表1)。

从投入角度看,丰裕的矿产资源是黄河流域资源型城市社会经济逻辑起点和依赖路径,以产业结构单一,资源能耗超额与产能过剩为主的原有经济增长模式与现行高质量发展理念难以匹配,其绿色转型势在必行<sup>[16]</sup>。在资本投入与能源投入方面,根据哈罗德-多马增长模型,资本积累是经济增长的核心驱动力,能源是资本积累的重要支撑,采矿业投资通过增加能源消费的资本存量,推动资源型城市经济快速增长。黄河流域资源型城市的能源消费结构以煤炭为主,原煤消费量意味着当地充分利用煤炭资源禀赋优势,在制造业投资的作用下有助于延伸产业链,提升产品附加值,推动资源型城市从资源开采向深加工转型。因此,本文的资本投入与能源投入分别选择采矿业投资(亿元)、制造业投资(亿

元)、能源消费总量( $10^4$  t 标准煤)和原煤消费量占比(%)进行表征。在资源投入方面,电力消费是衡量经济发展水平和能源消费结构的重要指标,宋成镇等<sup>[8]</sup>仅用全社会用电量表征资源投入,本文考虑到水资源在黄河流域城市发展中发挥着重要作用,因此补充了水资源总量作为其评价指标之一,以此凸显黄河流域的地缘特点。基于此,本文选择全社会用电量( $10^4$  kW·h)和水资源总量( $10^8$  m<sup>3</sup>)解释资源投入。在劳动投入方面,基于人力资本理论强调劳动者的知识和技能对经济增长的贡献,黄河流域采矿业发展易吸引人口向资源型城市迁移。一方面,采矿业从业人员密集,易产生集聚效益,有助于提高生产效率;另一方面,制造业作为采矿业的延伸和升级,其从业人员多元且分布于多个领域和行业,借助技术创新,在某种程度上能够推动资源型城市从单一资源依赖型经济向多元化经济转型。与诸多成果选用年末从业人员数解释劳动投入相比<sup>[17]</sup>,本文更侧重明确劳动要素主体,选择采矿业从业人员占比(%)和制造业从业人员占比(%)表征劳动投入。在技术投入方面,在“双碳”目标下,地方政府重视科技研究,引进相关技术人才,为其提供科技专项资金支持并鼓励其低碳技术创新。与选用统计范围更广的科技财政支出解释技术投入相比<sup>[18]</sup>,本文强调科技基础设施建设与R & D经费在绿色转型过程中的具体作用,因此选择科技基础设施建设支出(亿元)与R & D经费占GDP比重(%)来衡量技术投入。资源型城市绿色转型过程中生态环境质量不容忽视。在环境投入方面,本文更侧重森林资源对资源型城市生态系统修复、改善和碳汇功能的影响,其有利于提高生态产品有效供给,提升资源型城市的生态环境水平<sup>[19]</sup>。此外,本文补充了

节能环保支出作为环境投入的重要指标,其有助于“降污扩绿”的战略思想,因此,环境投入选用节能环保支出(亿元)与造林面积( $10^4 \text{ hm}^2$ )进行衡量。

表 1 黄河流域资源型城市绿色转型效率评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of green transformation efficiency regions of resource-based cities in Yellow River basin

目标层	要素层	指标层	属性	权重
投入(A)	资本投入(A <sub>1</sub> )	采矿业投资(A <sub>11</sub> )	+	0.033
		制造业投资(A <sub>12</sub> )	+	0.018
	能源投入(A <sub>2</sub> )	能源消费总量(A <sub>21</sub> )	-	0.078
		原煤消费量占比(A <sub>22</sub> )	-	0.064
	资源投入(A <sub>3</sub> )	全社会用电量(A <sub>31</sub> )	-	0.022
		水资源总量(A <sub>32</sub> )	+	0.034
	劳动投入(A <sub>4</sub> )	采矿业从业人员占比(A <sub>41</sub> )	+	0.027
		制造业从业人员占比(A <sub>42</sub> )	+	0.013
	技术投入(A <sub>5</sub> )	科技基础设施建设支出(A <sub>51</sub> )	+	0.054
		R & D经费占GDP比重(A <sub>52</sub> )	+	0.041
	环境投入(A <sub>6</sub> )	造林面积(A <sub>61</sub> )	+	0.038
		节能环保支出(A <sub>62</sub> )	+	0.043
期望产出(B)	经济产出(B <sub>1</sub> )	采矿业人均收入(B <sub>11</sub> )	+	0.031
		制造业人均收入(B <sub>12</sub> )	+	0.014
		居民收入增长率(B <sub>13</sub> )	+	0.011
		第二产业增加值占GDP比重(B <sub>14</sub> )	-	0.037
	社会产出(B <sub>2</sub> )	一般工业固废综合利用率(B <sub>21</sub> )	+	0.016
		废水达标排放率(B <sub>22</sub> )	+	0.013
	环境产出(B <sub>3</sub> )	专利授权量(B <sub>23</sub> )	+	0.012
		碳汇量(B <sub>31</sub> )	+	0.077
		森林覆盖率(B <sub>32</sub> )	+	0.045
		空气质量优良率(B <sub>33</sub> )	+	0.009
非期望产出(C)	废水产出(C <sub>1</sub> )	工业废水排放量(C <sub>11</sub> )	-	0.024
		人均水耗(C <sub>12</sub> )	-	0.015
	废气产出(C <sub>2</sub> )	碳排放量(C <sub>21</sub> )	-	0.084
		工业SO <sub>2</sub> 排放量(C <sub>22</sub> )	-	0.049
	废物产出(C <sub>3</sub> )	单位GDP工业烟粉尘排放量(C <sub>31</sub> )	-	0.043
		单位GDP能耗(C <sub>32</sub> )	-	0.055

注:“+”表示正向关系;“-”表示负向关系。

从产出角度看,资源型城市转型推动地方经济绿色增长,产业结构随之相应调整,淘汰落后产能,在某种程度上降低资源依赖程度<sup>[20]</sup>,生态效益与资源利用效率提升,但短期内资源能耗所带来的负外部影响依然存在。在经济产出方面,基于经济增长与收入分配理论,产业收入受经济结构影响,其中,产业结构变化作用于要素配置效率,影响经济产出。资源型城市的采矿业投资与制造业投资相互促进并形成协同效应,直接影响采矿业、制造业收入,间接影响从业人员收入,推动经济持续增长。因此,本研究未沿用仅选择人均GDP(元/人)解释经济产出的思路,而是选用采矿业人均收入(元/人)、制造业人

均收入(元/人)、居民收入增长率(%)和第二产业增加值占GDP比重(%)来衡量经济产出。在社会产出方面,依据规模经济理论,要素集聚有利于降低生产成本,减少能源损耗。资源型城市的能源集中消耗,能够实现“低成本、高产出”,提高利用效率。根据内生增长理论,技术进步是经济增长的核心驱动力。城市转型倒逼资源企业转型升级,使其增加绿色低碳技术研发投入,技术创新具有“知识溢出效应”的特点,能够提高人力资本职业素养,赋能绿色转型发展<sup>[21]</sup>。创新技术成功申请专利加速清洁能源替代,有助于培育新兴产业,加速地方绿色转型进程。已有成果选择一般工业固废综合利用率解释社会产

出<sup>[22]</sup>, 本文在此基础上补充了废水达标排放率(%) 和专利授权量(件)两个指标。在环境产出方面, 森林资源具有固碳释氧、净化空气与涵养水源等生态服务功能, 增加造林面积能够降低政府在环境治理方面的投入。因此, 本文选择碳汇量(10<sup>4</sup> t)、森林覆盖率(%)与空气质量优良率(%)表征环境产出。在非期望产出方面, 按照外部性理论, 资源与能源消耗促进经济发展的同时, 可能带来环境污染等负外部性。黄河流域资源型城市易对资源、能源形成锁定效应, 短期内难以摆脱 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等有害气体与固体废弃物的高排放与高污染, 其空间外溢对大气、水源、土地等自然条件产生负外部效应。与已有成果不同之处在于<sup>[23]</sup>, 本文从“工业三废”的视角, 分别选择了工业废水排放量(10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)、人均水耗(m<sup>3</sup>/人)、碳排放量(10<sup>4</sup> t)、工业 SO<sub>2</sub> 排放量(10<sup>4</sup> t)、单位 GDP 工业烟粉尘排放量(t/10<sup>4</sup> 元)与单位 GDP 耗水量(t/10<sup>4</sup> 元)来衡量非期望产出。指标权重的确定方法包括德尔菲法、层次分析法和熵值法等, 前两种方法主观性较强, 故本文选择熵值法确定指标权重。

### 2.2.2 超效率 SBM 模型

参考已有成果, 本次评价转型效率从投入与产出角度, 借助数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型测度, 然而, 其局限在于倘若决策对象数量接近于投入产出指标总数, 测算结果与实际情况存在较大偏差。超效率 SBM 模型能够有效解决传统 DEA 和 SBM 模型存在的问题, 考虑输入和输出变量之间的相互关系, 通过引入一组虚拟基准点, 找到研究对象与最优状态之间的差距, 适用于城市转型效率评估<sup>[24]</sup>。因此, 黄河流域资源型城市绿色转型效率选用超效率 SBM 模型, 表示为

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n^x / x_{kn}^t}{1 + \frac{1}{M+I} \left( \sum_{m=1}^M S_m^y / y_{km}^t + \sum_{i=1}^I S_i^b / b_{ki}^t \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K Z_k^t x_{kn}^t + S_n^x = X_{kn}^t \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K Z_k^t y_{km}^t - S_m^y = y_{km}^t \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K Z_k^t b_{ki}^t + S_i^b = b_{ki}^t \\ Z_k^t \geq 0, S_n^x \geq 0, S_m^y \geq 0, S_i^b \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  表示绿色转型效率;  $x_{kn}^t$  与  $x_{kn}^t$  ( $y_{km}^t$  与  $y_{km}^t$ ,  $b_{ki}^t$  与  $b_{ki}^t$ ) 分别表示投入指标  $n$  (期望产出指标  $m$ 、非期望产出指标  $i$ ) 在第  $t$  与  $t'$  个年第  $k$  与  $k'$  个生产单元的值;  $N, M, I$  分别表示投入、期望产出、非期望产出的指标

数量;  $T$  表示年数;  $K, Z_k^t$  分别表示决策单元个数与权重;  $S_n^x, S_i^b, S_m^y$  分别表示投入、非期望产出冗余与期望产出不足。

### 2.2.3 绿色转型效率差异模型

与研究对象差异的泰尔指数、赫芬达尔指数等诸多方法相比<sup>[25]</sup>, Dagum 基尼系数具有将总体差异分解为地区间差异、地区内差异和超变密度, 从而有效甄别地区差异及其来源的优势, 其数值与研究单元的差异呈正向关系<sup>[26]</sup>。其中, 超变密度的识别可用于弥补被忽略的地区间交叠部分, 甄别区域差距贡献。因此, 本文选用 Dagum 基尼系数解释资源型城市绿色转型效率的空间差异, 表示为

$$DG = \frac{\sum_{u=1}^j \sum_{v=1}^j \sum_{w=1}^{g_u} \sum_{r=1}^{g_v} |e_{uw} - e_{vr}|}{2g^2 \bar{e}} \quad (3)$$

式中: DG 表示基尼系数; 由于黄河流域分为上、中、下游地区, 故  $j$  取 3;  $g$  表示城市数量;  $g_u$  和  $g_v$  分别表示  $u, v$  地区的城市数量;  $e_{uw}$  和  $e_{vr}$  分别表示  $u, v$  地区  $w, r$  城市绿色转型效率;  $\bar{e}$  为黄河流域整体资源型城市绿色转型效率均值。

Dagum 基尼系数 (DG) 为地区内差异贡献度 ( $G_\alpha$ )、地区间差异贡献度 ( $G_\beta$ ) 与超变密度贡献度 ( $G_\gamma$ ) 三者之和, 分别表示为

$$G_{uu} = \frac{\sum_{w=1}^{g_u} \sum_{r=1}^{g_v} |e_{uw} - e_{vr}|}{2g^2 \bar{e}} \quad (4)$$

$$G_\alpha = \sum_{u=1}^j G_{uu} P_u Q_u \quad (5)$$

$$G_{uv} = \frac{\sum_{w=1}^{g_u} \sum_{r=1}^{g_v} |e_{uw} - e_{vr}|}{g_u g_v (\bar{e}_u + \bar{e}_v)} \quad (6)$$

$$G_\beta = \sum_{u=2}^j \sum_{v=1}^{g-1} G_{uv} (P_u Q_v + P_v Q_u) D_{uv} \quad (7)$$

$$G_\gamma = \sum_{u=2}^j \sum_{v=1}^{g-1} G_{uv} (P_u Q_v + P_v Q_u) (1 - D_{uv}) \quad (8)$$

$$P_u = \frac{g_u}{g}, P_v = \frac{g_v}{g}, Q_u = \frac{g_u \bar{e}_u}{g \bar{e}}, Q_v = \frac{g_v \bar{e}_v}{g \bar{e}} \quad (9)$$

$$D_{uv} = \frac{d_{uv} - P_{uv}}{d_{uv} + P_{uv}} \quad (10)$$

$$d_{uv} = \int_0^\infty dF_u(e) \int_0^e (e-r) dF_v(r) \quad (11)$$

$$P_{uv} = \int_0^\infty dF_v(e) \int_0^e (e-r) dF_u(r) \quad (12)$$

式中:  $G_{uu}$  为地区  $u$  的基尼系数;  $G_\alpha$  为地区内差异贡献;  $G_{uv}$  为地区  $u$  与  $v$  之间的基尼系数;  $G_\beta$  为地区间差异贡献;  $G_\gamma$  为超密度贡献;  $D_{uv}, d_{uv}$  分别表示地区间绿

色转型效率的相对影响和差值;  $F(\cdot)$  为密度函数;  $P_w$  为观测值的数学期望。

#### 2.2.4 绿色转型效率动态演进模型

核密度估计是一种典型的非参数概率密度估计检验方法,其优势在于能够更准确地估计近似值,运用密度函数绘制数据的概率分布情况,通过核密度图展示其整体分布特征<sup>[27]</sup>。统计软件Stata15.0广泛应用于数据分析、统计建模和数据可视化,可以通过kdensity命令将多个核密度图叠加在同一张图中,便于比较不同组别或条件下的数据分布。因此,本文选用该模型可以直观地反映资源型城市绿色转型效率演变差异,表示为

$$F(e) = \frac{1}{gh} \sum_{i=1}^g L\left(\frac{R_i - \bar{e}}{h}\right) \quad (13)$$

$$L(e) = \frac{\exp\left[-\frac{(\bar{e})^2}{2}\right]}{\sqrt{2\pi}} \quad (14)$$

$$h = \left(\frac{4}{3g}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (15)$$

式中:  $F(e)$ ,  $L(e)$  分别表示密度函数与核函数;  $R_i$  表示指标观测值;  $h$  表示带宽。

### 3 结果与分析

#### 3.1 绿色转型效率水平时空分异

依据公式(1)(2)得出,黄河流域资源型城市绿色转型效率由0.435增加至0.572,下游资源型城市绿色转型效率高于上、中游(图2)。绿色转型效率增幅变化大致分为两个阶段:2013—2019年不同地区资源型城市绿色转型效率平稳提升;2020—2022年不同地区绿色转型效率增幅较大,从2020年起,中游绿色转型效率年均增幅快于上、下游,形成了“下游领先,上、中游追赶”的特征。这与黄河流域高质量发展被确定为国家战略的时间点吻合。总之,2013—2022年下游资源型城市绿色转型效率水平领先于黄河流域整体水平,中游绿色转型效率水平小于流域整体水平,上、中、下游绿色转型效率水平逐渐接近。随着2019年黄河流域高质量发展战略与2020年“双碳”目标提出,资源型城市加大生态环境保护与治理力度,其生态系统结构不断完善与生态服务功能增强,使得资源型城市绿色转型效率水平不断提升且趋于好转,呈现出“小幅上涨—快速提升”的特点。

#### 3.2 绿色转型效率空间差异及其来源

##### 3.2.1 绿色转型效率整体、地区间与地区内差异

按照公式(3),得出黄河流域不同地区资源型城

市绿色转型效率分布差异(表2)。从全域视角看,绿色转型效率的基尼系数从2013年的0.214下降到2022年的0.108。与2013—2018年绿色转型效率基尼系数年均下降率为2.88%相比,2019—2022年基尼系数年均下降率高达8.93%。从地区内差异看,上游和下游绿色转型效率的基尼系数均低于中游,表明中游资源型城市内部的绿色转型效率差异较大。从地区间差异看,中游—下游绿色转型效率的区域间基尼系数最大,充分说明中游和下游之间绿色转型效率仍存在差距,但差距趋于变小。从动态演进趋势看,地区内、地区间绿色转型效率的基尼系数均呈轻微波动下降趋势,与流域整体走势趋于一致。

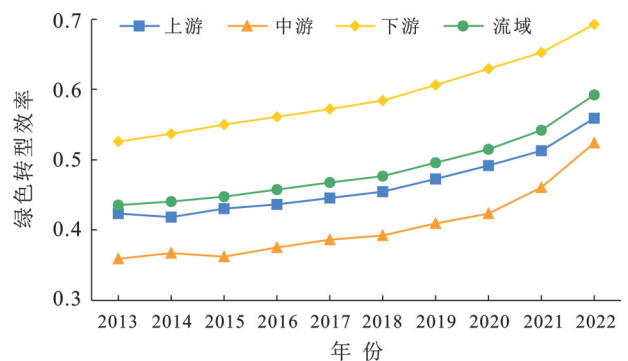


图2 不同地区绿色转型效率

Fig.2 Green transformation efficiency in different regions

表2 不同地区绿色转型效率的基尼系数

Table 2 Dagum Gini coefficient of green transformation efficiency in different regions

年份	整体基尼系数	地区内差异			地区间差异		
		上游	中游	下游	上游—中游	上游—下游	中游—下游
2013	0.214	0.119	0.143	0.068	0.184	0.201	0.247
2014	0.207	0.118	0.146	0.064	0.181	0.199	0.249
2015	0.196	0.122	0.142	0.065	0.180	0.198	0.246
2016	0.191	0.116	0.139	0.062	0.181	0.193	0.245
2017	0.186	0.113	0.139	0.058	0.180	0.197	0.243
2018	0.177	0.112	0.135	0.056	0.177	0.195	0.239
2019	0.168	0.110	0.132	0.057	0.176	0.193	0.235
2020	0.152	0.106	0.127	0.050	0.171	0.188	0.227
2021	0.131	0.101	0.120	0.046	0.168	0.182	0.214
2022	0.108	0.095	0.116	0.043	0.162	0.177	0.200

##### 3.2.2 地区差异的来源与贡献

在黄河流域资源型城市绿色转型效率地区差异中,地区间的差异贡献率占比最大,由2013年的77.6%下降至62.0%,年均降幅2.01%。地区内的差异贡献率占比次之,其上升区间为[17.3%,23.1%],且呈波动上升趋势。超变密度贡献率占比最小,但

具有逐年上涨的特点且年均增幅达到 7.16%(图 3)。从差异来源看,地区间差异是黄河流域绿色转型差异的主要影响因素,其差异贡献率降低表明全流域不同地区绿色转型差距趋于缩小,持续推进绿色转型均衡发展取得了阶段性成果,但超变密度明显上升发挥的作用不容忽视,需要结合不同地区特点制定差异化的绿色转型路径。

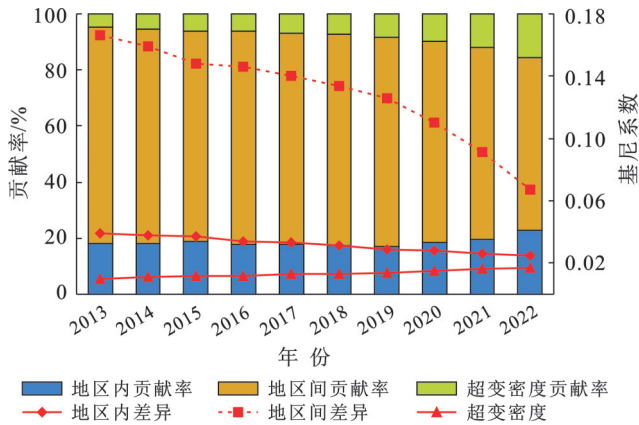


图 3 不同地区绿色转型效率基尼系数与差异来源

Fig.3 Dagum Gini coefficient and difference sources for green transformation efficiency of different regions

3.2.3 绿色转型效率动态演进的结果与分析 本文借助统计软件 Stata15.0 刻画 Kdensity 图,表征绿色转型效率的时空分布特点(图 4)。在时间维度上,全域和不同地区绿色转型效率的核密度曲线均向右移动,说明全域绿色转型效率水平明显提升,尤其以 2018—2022 年增幅较大。在空间维度上,不同地区的核密度曲线的右移幅度存在差异,上游与中游右移幅度小于下游,意味着上、中游绿色转型效率提升幅度低于下游。基于核密度曲线分布形态,由图 4a 可知,黄河流域峰值升高、带宽变窄且拖尾由长变短,表明全域资源型城市绿色转型效率呈上升趋势且存在差异,但其差异逐渐缩小。由图 4b,4c,4d 可知,上、中、下游资源型城市核密度曲线均向右移动,右移幅度由小变大,呈“缓—陡”的变化趋势,波峰拉高、带宽变窄明显,说明其绿色转型效率差异均变小。其中,中游地区核密度曲线形态较为特殊,2013 年中游资源型城市绿色转型效率呈“M”双峰型,意味着该时期区域内绿色转型效率差异较大;随后,2018 年、2022 年均由双峰向单峰为主转变,峰值拉高、带宽变窄,表明该时期区域内绿色转型效率差距趋于缩小。

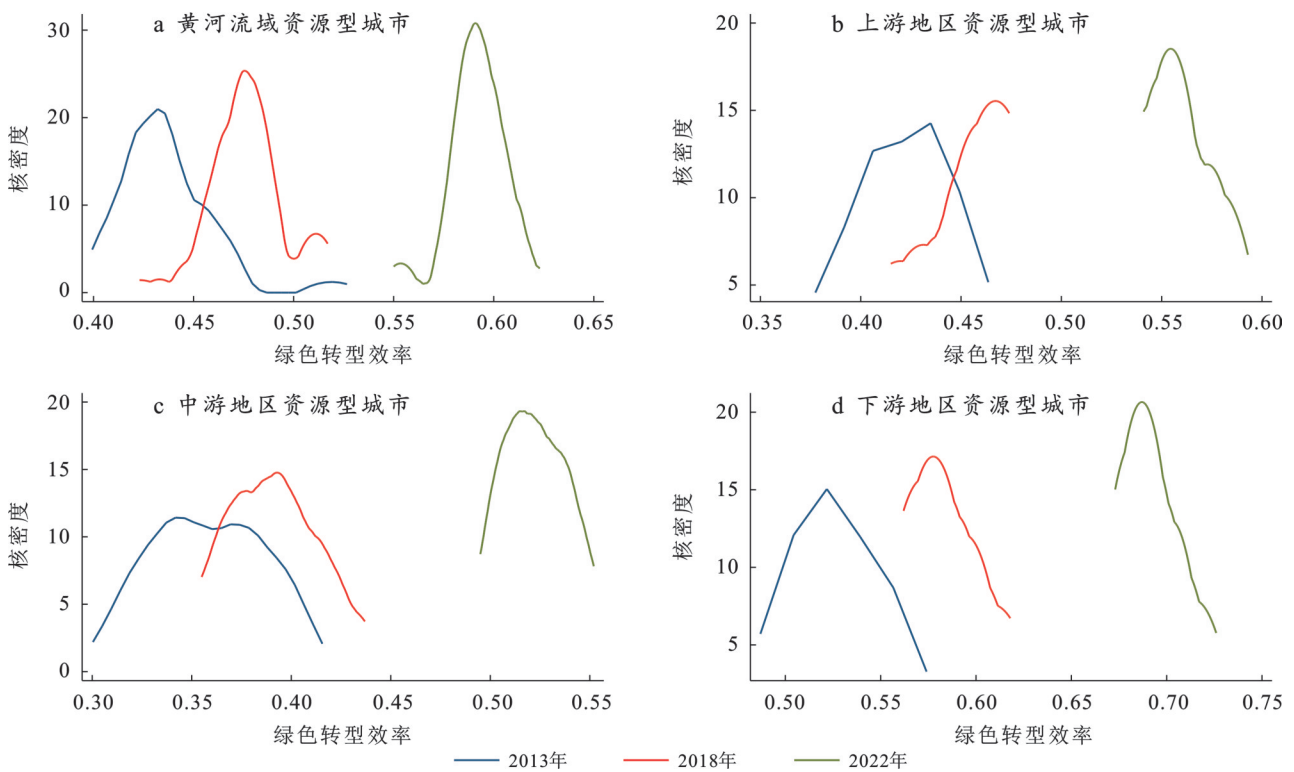


图 4 不同地区资源型城市绿色转型效率核密度曲线

Fig.4 Kernel density of green transformation efficiency of resource-based cities in different regions

黄河流域不同地区资源型城市绿色转型效率时空演进差异可解释为其资源禀赋、产业结构、生态环境与技术创新等影响因素不同。从资源禀赋与产业

结构层面看,上游地区资源禀赋以水与矿产等为主,产业结构倾向于资源开采和初级加工,导致绿色转型初始成本较高且效率较低。中游地区分布着黄河

流域“几”字湾的晋陕蒙等能源大省,其煤炭等矿产资源丰裕,形成了长期以矿产加工为主导,高污染、高排放的经济增长模式,使得转型过程中环境治理压力较大,但资金投入与技术引进相对较多,绿色转型效率呈上升趋势。下游地区工业门类齐全、产业结构丰富,深加工水平与经济发展程度较高,在技术优势的作用下,其绿色转型效率较高。从生态环境层面看,上游地区作为黄河水源保护地,其生态较为脆弱,主要表现为水土流失严重、部分地区出现荒漠化,加之资源开采的负面影响,制约其绿色转型效率的提高。中游地区矿产资源过度开采,“三废”排放问题突出,导致生态占用供求不均衡,政府通过环境规制倒逼资源型企业绿色转型,推动了产业升级,绿色转型效率有所提升。下游地区政策支持力度较大,环境治理意识较强,资源型企业积极推动绿色转型,使得转型效率明显高于上、中游地区。从技术创新层面看,上游地区资金投入相对不足,科技创新支撑能力较弱,绿色技术研发水平较低,使得其经济增速较缓且绿色转型较慢。中游地区虽然转型周期长,但部分资源型企业锚定“以煤为基、多元发展、路径创造”的绿色发展之路,加之绿色技术的引进与应用,使得绿色转型效率与高水平地区的差距逐年缩小。下游地区具有较强的技术创新能力,依托先进技术,形成“类型多元、产值占比较高”的接续替代产业布局,使得绿色转型效率明显提升。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 黄河流域上、中、下游资源型城市绿色转型效率存在差异且上游转型效率高于中游,与王晓楠等<sup>[9]</sup>的结论一致。但王晓楠等提出上、中游绿色转型效率差距较大且阈值差约为0.4,与本文观点不同。其原因在于研究对象依据资源类型划分、投入与产出选择指标以及解释变量的不同。王晓楠等在评价指标体系构建中,不同的投入、产出指标均选用单一指标表征,而本文依据投入-产出理论分析框架,将规模经济理论、内生增长理论与外部性理论等融入评价体系中,侧重资源、能源消耗对资源型城市绿色转型效率的影响,多维度覆盖、多层次细化,选用多个指标分别解释不同的投入、产出指标,凸显黄河流域资源型城市的地缘特点,丰富了指标内涵,健全了绿色转型效率评价指标体系,使研究结果更为科学、全面。

(2) 在“双碳”目标与黄河流域高质量发展的战略布局下,资源型城市必须减少资源损耗、降低碳排

放量,走绿色清洁低碳发展之路是其绿色转型的内在要求。研究结果显示,2013—2022年黄河流域资源型城市绿色转型效率稳步增长,与曹卫芳等<sup>[10]</sup>的研究结果基本一致,充分印证了所得结论的合理性,能够反映黄河流域资源型城市绿色转型的客观情况,而绿色转型效率较低则与宋成镇等<sup>[8]</sup>的结论相吻合。在此基础上,本文依据绿色转型效率变化测度结果,进一步明确了黄河流域中游绿色转型效率增幅快于上、下游且不同地区转型效率差距缩小,存在明显的“追赶效应”。此外,通过分解绿色转型效率的差异来源,得出地区间差异是黄河流域绿色转型差异的主要因素。基于此,未来可立足于资源型城市绿色转型效率水平与演进规律,从整体规划出发,整合区域资源与要素优势,建立“全方位、多层次、宽领域”的统筹协调与分工协作体系,制定差异化路径,减弱分化趋势。上、中、下游地区分别确立转型效率高的城市为核心,构建“多中心—枢纽转型圈”的绿色转型格局,以资金、技术与人才等资源为载体,使得优质要素集聚、自由流动且向周边地区扩散,充分发挥其空间“外溢效应”和辐射作用,形成上、中、下游联动发展的“绿色走廊”,推动黄河流域资源型城市降碳减污扩绿可持续发展。

### 4.2 结论

(1) 黄河流域资源型城市绿色转型效率平稳提升。2013—2022年全域资源型城市绿色转型效率由0.435增加至0.572,呈逐年上升趋势,其变化大致分为2013—2019年“小幅上涨”和2020—2022年“快速提升”两个阶段,同时具有“下游领先,上、中游追赶”的特点。

(2) 黄河流域不同地区资源型城市绿色转型效率存在空间异质特征。从不同地区差异看,下游绿色转型效率高于上、中游,从地区间差异看,中一下游绿色转型效率的区域间基尼系数最大。基于差异来源分解结果,地区间差异是不同地区资源型城市绿色转型效率差异的主要来源,其年均贡献率达到73.17%。

(3) 黄河流域不同地区资源型城市绿色转型效率分化趋势明显减弱。基于时空分异与局部特征,不同地区资源型城市绿色转型效率存在异质性,但其差异趋于变小,且下游地区绿色转型效率差异变化小于上、中游地区。

### 参考文献(References)

- [1] 任玲玲,曹霞.对外开放对资源衰退型城市经济转型的影响研究[J].经济问题,2025,(3):117-127.  
Ren Lingling, Cao Xia. Research on the impact of opening

- up on the economic transformation of resource-declining cities [J]. *On Economic Problems*, 2025, (3):117-127.
- [2] Kim D H, Lin S C. Natural resources and economic development: New panel evidence [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2017, 66(2):363-391
- [3] 邓国营, 龚勤林. 创新驱动对资源型城市转型效率的影响研究[J]. *云南财经大学学报*, 2018, 34(6):86-95.  
Deng Guoying, Gong Qinlin. Study on the impact of innovation-driven on the transformation efficiency of resource-based cities in China [J]. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 2018, 34(6):86-95.
- [4] 滕宇法, 卢现祥. 制造业企业技术创新与创新驱动发展困境[J]. *科研管理*, 2023, 44(11):124-133.  
Teng Yuhong, Lu Xianxiang. Technological innovation and innovation-driven development dilemma in manufacturing enterprises [J]. *Science Research Management*, 2023, 44(11):124-133.
- [5] 秦建辉, 郭灵辉. 河南省煤炭资源型城市绿色转型经济-环境-社会协调发展研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(5):93-101.  
Qin Jianhui, Guo Linghui. Study on the coordinated development of economy, environment and society of green transformation of coal resource-based cities in Henan Province [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2023, 42(5):93-101.
- [6] 董锋, 龙如银, 李晓晖. 考虑环境因素的资源型城市转型效率分析: 基于DEA方法和面板数据[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5):519-524.  
Dong Feng, Long Ruyin, Li Xiaohui. Resource-based cities transformation efficiency analysis based on DEA method and panel data with environmental factors involved [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(5):519-524.
- [7] 李江苏, 王晓蕊, 苗长虹. 基于两种DEA模型的资源型城市发展效率评价比较[J]. *经济地理*, 2017, 37(4):99-106.  
Li Jiangsu, Wang Xiaorui, Miao Changhong. Comparison of development efficiency evaluation in resource-based cities based on DEA model [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(4):99-106.
- [8] 宋成镇, 刘庆芳, 宋金平, 等. 黄河流域城市转型效率动态演变及经济转型的影响路径[J]. *经济地理*, 2024, 44(2):71-80.  
Song Chengzhen, Liu Qingfang, Song Jinping, et al. Dynamic evolution of urban transformation efficiency and the impact path of economic transformation on the urban transformation efficiency in the Yellow River basin [J]. *Economic Geography*, 2024, 44(2):71-80.
- [9] 王晓楠, 孙威. 黄河流域资源型城市转型效率及其影响因素[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10):1643-1655.  
Wang Xiaonan, Sun Wei. Transformation efficiency of resource-based cities in the Yellow River basin and its influencing factors [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10):1643-1655.
- [10] 曹卫芳, 薛天培, 崔云昊. 黄河流域资源型城市转型的时空格局演变及影响因素研究[J]. *经济问题*, 2023(12):108-114.  
Cao Weifang, Xue Tianpei, Cui Yunhao. Spatial-temporal pattern evolution and influencing factors of resource-based cities transformation in the Yellow River basin [J]. *On Economic Problems*, 2023(12):108-114.
- [11] 张国兴, 王涵, 闫磊超. 基于绿色发展效率的黄河流域资源型城市转型发展研究[J]. *区域经济评论*, 2021(5):138-144.  
Zhang Guoxing, Wang Han, Yan Leichao. Study on the economic transformation path of resource-based cities in the Yellow River basin based on green development efficiency [J]. *Regional Economic Review*, 2021(5):138-144.
- [12] 卢硕, 张文忠, 李佳洺. 资源禀赋视角下环境规制对黄河流域资源型城市产业转型的影响[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1):73-85.  
Lu Shuo, Zhang Wenzhong, Li Jiaming. Influence of environmental regulations on industrial transformation of resource-based cities in the Yellow River basin under resource endowment [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1):73-85.
- [13] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*, 2019, 74(12):2431-2436.  
Lu Dadao, Sun Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River basin: A preliminary understanding and suggestion [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12):2431-2436.
- [14] 蒋毓琪, 杨怡康, 田文博, 等. 黄河流域资源型城市碳生态安全差异测度、来源分解与时空演进[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(4):1184-1194.  
Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Difference measurement, source decomposition and spatial-temporal evolution of carbon ecological security in resource-based cities of the Yellow River basin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(4):1184-1194.
- [15] 张赛茵, 王启翔, 袁佳欣, 等. 资源型城市韧性水平与绿色发展效率耦合的时空分异特征[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2024, 51(6):753-768.  
Zhang Saiyin, Wang Qixiang, Yuan Jiabin, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics of the coupling of urban resilience and green development efficiency in resource-based cities [J]. *Journal of Zhejiang University*

- (Science Edition), 2024, 51(6):753-768.
- [16] 蒋毓琪, 杨怡康, 田文博, 等. 黄河流域碳生态安全水平空间格局与动态演进[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 419-425.  
Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Spatial pattern and dynamic evolution of carbon ecological security level in Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):419-425.
- [17] 张萌物, 丰富. 黄河流域绿色发展效率与产业结构升级空间交互溢出效应[J]. 人民黄河, 2024, 46(11):1-8.  
Zhang Mengwu, Feng Fu. Spatial interaction spillover effect of green development efficiency and industrial structure upgrading in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2024, 46(11):1-8.
- [18] 阎晓, 任苏平, 涂建军. 资源型城市知识基础演化及创新合作驱动机理[J]. 资源科学, 2024, 46(10): 1912-1929.  
Yan Xiao, Ren Suping, Tu Jianjun. Change of knowledge base and the driving mechanism of innovation cooperation in resource-based cities [J]. Resources Science, 2024, 46(10):1912-1929.
- [19] 姚材仪, 何艳梅, 程建兄, 等. 岷江流域生态安全格局评价与优化: 基于最小累积阻力模型和重力模型[J]. 生态学报, 2023, 43(17):7083-7096.  
Yao Caiyi, He Yanmei, Cheng Jianxiong, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Minjiang River basin based on MCR model and gravity model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17):7083-7096.
- [20] 崔盼盼, 赵媛, 郝丽莎, 等. 中国能源行业碳排放强度下降过程中的省际减排成效评价[J]. 地理研究, 2020, 39(8):1864-1878.  
Cui Panpan, Zhao Yuan, Hao Lisha, et al. Evaluation on the effectiveness of provincial emission reduction in the process of carbon emission intensity decline in China's energy industry [J]. Geographical Research, 2020, 39(8):1864-1878.
- [21] 崔艳芳, 张国兴. 黄河流域资源型城市碳排放影响因素与达峰预测研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(2):9-14.  
Cui Yanfang, Zhang Guoxing. Research on the influencing factors and peak prediction of carbon emission of resources-based cities in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2023, 45(2):9-14.
- [22] 席振鑫, 马丽, 金凤君, 等. 黄河流域典型资源型城市工业转型的时空特征、类型与路径[J]. 资源科学, 2023, 45(10):1977-1991.  
Xi Zhenxin, Ma Li, Jin Fengjun, et al. Spatiotemporal characteristics, types, and paths of industrial transformation in typical resource-based cities in the Yellow River basin [J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1977-1991.
- [23] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J]. 地理学报, 2019, 74(6):1131-1148.  
Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6):1131-1148.
- [24] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1):32-41.
- [25] 章激扬. 长三角城市群创新发展空间差异及收敛性研究: 基于Dagum基尼系数分解[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(2):235-249.  
Zhang Jiyang. Spatial difference and convergence of innovative development in Yangtze River delta: Based on dagum Gini coefficient and decomposition [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(2):235-249.
- [26] 刘娇妹, 王刚, 付晓娣, 等. 黄河流域河南段生态保护和高质量发展评价研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(7):7-13.  
Liu Jiaomei, Wang Gang, Fu Xiaodi, et al. Evaluation of ecological protection and high-quality development level in Henan section of the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2023, 45(7):7-13.
- [27] 刘宜卓, 石悦泽, 荆克迪. “双碳”目标下黄河流域九省区横向区域碳补偿机制构建研究[J]. 生态经济, 2024, 40(1):29-37.  
Liu Yizhuo, Shi Yueze, Jing Kedi. Research on the construction of horizontal regional carbon compensation mechanism in nine provinces of the Yellow River basin with the goal of “double carbon” [J]. Ecological Economy, 2024, 40(1):29-37.