

Doi:10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2025.01.008

黄河流域工业碳排放绩效测度及影响因素研究

王雪¹,刘冠权^{1,2},张瑜¹

(1.青岛理工大学 管理工程学院,山东 青岛 266525;2.山东省高校智慧城市建设管理研究中心,山东 青岛 266525)

摘要:以黄河流域9个省(区)为研究对象,运用超效率SBM模型和Malmquist指数对2003—2021年静态和动态工业碳排放绩效进行测算,并揭示工业碳排放绩效的时空演变特征;在此基础上,利用Tobit面板模型,对黄河流域工业碳排放绩效的影响因素进行了研究。结果表明:(1)从静态绩效来看,黄河流域的工业碳排放效率总体呈现起伏增长的态势,相较于中部和西部,东部和南部的工业碳排放效率更高,但各省(区)的辐射作用相对较弱;(2)从动态绩效来看,除山西省外,其余省(区)的工业碳排放绩效均得到了改善,技术进步对黄河流域工业碳排放绩效变动的贡献最大;(3)从影响因素来看,产业结构、对外开放程度以及技术水平对工业碳排放绩效提升起推动作用,而城镇化水平对工业碳排放绩效有负向影响,工业经济发展水平和工业能源强度的影响不显著。

关键词:碳排放绩效;超效率SBM模型;Malmquist指数;影响因素;黄河流域

中图分类号:F062.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2025)01-0062-10

在工业化进程中,环境污染相关问题日益严峻,随之而来的是二氧化碳排放量的增加,从而导致温室效应、全球气候变暖等一系列问题。自2005年至2019年,我国每年碳排放量从60.98亿t增长到98.25亿t,这对环境的承载力是一个巨大挑战。黄河既是我国的重要生态屏障,又是我国经济发展的重要经济带。习近平主持召开深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会时,强调新时代要把“母亲河”保护好^[1]。在黄河流域生态保护与高质量发展的国家战略背景下,对黄河流域各省(区)工业碳排放状况进行评价,并揭示其时空演变特征,为黄河流域碳减排政策的制订、执行及评价提供依据和保证,对于促进我国绿色低碳发展具有重要的现实意义。

在此背景下,学者们从碳排放绩效的测算方法、影响因素等方面进行研究。碳排放绩效实质上是一种投入产出效率,早期研究主要以碳排放强度^[2]和碳生产率^[3]等作为衡量指标的单要素评价方法,后期则对以资本投资、能源消费和劳动力为投入变量、以工业增加值和碳排放量为产出变量的全要素评价方法考虑得更全面。在测度方法上,常

见的碳排放绩效测算方法包括随机前沿分析法(SFA)和数据包络分析法(DEA),SFA需要确定生产前沿的具体形式且仅能考虑单一产出,而DEA能够处理多投入多产出数据且无需设定生产函数的具体形式。文献[4—5]采用随机前沿模型测算了部分区域的碳排放效率;文献[6]利用DEA模型衡量和预测了全球二氧化碳的环境绩效;文献[7]运用DEA模型测度了中国城市的碳排放绩效,并探究了创新型城市建设对于城市碳绩效的影响。随着研究的深入,传统的DEA模型缺乏对于非期望产出的考量,同时无法解决投入产出变量具有的松弛性问题,学者们开始改进方法来测度碳排放绩效。文献[8—9]将DEA与Malmquist指数相结合,从工业、农业等方面来核算中国各省份的相关碳排放数据;文献[10—12]通过SBM模型对部分区域的碳排放绩效进行测算,并探究其时空分异特征;文献[13]采用超效率SBM模型与ML指数相结合的方法,从静态与动态两个角度研究黄河流域旅游业碳排放效率的时空演变规律。此外,随着对碳排放绩效问题研究的逐步深入,众多学者逐渐关注碳排放绩效的影响因素,且研究多通过面板计量模型展

收稿日期:2024-07-09;修回日期:2024-09-25

基金项目:山东省重点研发计划(软科学项目)一般项目(2019RKB01459);教育部人文社会科学研究青年基金(20YJC790158)

通信作者简介:刘冠权(1971—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为现代工业工程理论研究、绿色经济与可持续发展。

E-mail:lgq1971@163.com

开。文献[14]利用空间面板数据模型分析工业碳生产率的影响因素;文献[15]利用 Tobit 面板回归模型,探讨了中国物流行业碳排放绩效的关键因素。

基于以上研究成果,关于碳排放绩效的研究成果仍有可拓展之处。首先,目前的研究尺度主要集中于全国^[16]、主要城市群^[17]和长江经济带^[18]等区域,对黄河流域地区的研究较少;其次,目前对碳排放绩效的研究多从静态和动态角度分别进行研究,缺少静态与动态相结合的综合研究,所得绩效值不利于各地区间横向和纵向的全面对比。本文采用超效率 SBM 和 Malmquist 指数等方法,以黄河流域 2003—2021 年的工业碳排放绩效为研究对象,从静态和动态两个层次进行剖析研究,并在此基础上构建 Tobit 回归模型以探究黄河流域工业碳排放绩效的关键影响因素,为提升黄河流域工业碳排放水平提供决策支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

作为中国第二长河,黄河发源于中国青海省,经过青海、四川、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、山东和内蒙古等 9 个省(区),最后于山东省注入渤海。黄河流域连接着青藏高原、黄土高原和华北平原,对中国的经济、社会和生态安全起着十分重要的作用。参考文献[19]的研究结果,将黄河流域 9 个省(区)从总体上分为上游地区、中游地区和下游地区,上游地区包括青海、四川、甘肃、宁夏 4 个省(区),中游地区包括内蒙古、山西、陕西,下游地区包括河南省和山东省。

1.2 数据来源

以黄河流域 9 个省(区)为研究对象,研究时间为 2003—2021 年。有关数据从《中国经济普查年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国工业经济统计年鉴》以及所研究省(区)的统计年鉴获取,部分缺失数据用插值估算算法补全。

1.3 指标选取

参考文献[20—21]建立的碳排放效率测算指标体系,结合黄河流域实际情况以及考虑相关数据的全面性、合理性及完整性等原则,本文选取资本、能源和劳动力作为模型的基本投入变量。

由于固定资产投资额能够有效反映各地区的资金投入力度,因此选取固定资产投资额为资本投入,并将固定资产投资价格指数换算成以 2003 年为统计基期的不变价格;选取能源消费总量作为能源投入,单位统一换算为万 t 标准煤;从业人数能够真实有效地反映实际的劳动力情况,选取各省(区)的工业年末从业人数作为劳动投入。另外,选择工业增加值为期望产出,以衡量各省(区)的工业经济发展水平;选取碳排放量为非期望产出,以衡量各省(区)工业发展过程中对生态环境的污染程度,从而建立黄河流域工业碳排放绩效指标体系。具体指标见表 1。

表 1 黄河流域工业碳排放绩效指标体系
Tab.1 Performance indicators of industrial carbon emissions in the Yellow River basin

指标类型	一级指标	二级指标	单位
投入变量	资本投入	固定资产投资额	亿元
	能源投入	能源消费总量	万 t 标准煤
	劳动力投入	工业年末从业人数	万人
产出变量	期望产出	工业增加值	亿元
	非期望产出	碳排放量	万 t

1.4 研究方法

1.4.1 超效率 SBM 模型

在经济生产过程中,劳动力、资本和能源的投入不仅生产出工业产品,还会产生二氧化碳等副产物。以非期望产出为基础的超效率 SBM 模型^[22]可以克服投入产出的松弛性问题,当有效地区的超效率值大于 1 时,能够进一步区别大于 1 的高效决策单位。因此,本文采用基于非期望产出的超效率 SBM 模型测算黄河流域 9 个省(区)的工业碳排放绩效,其计算表达式为:

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\bar{x}}{x_{ik}} \right)}{r_1 + r_2 \left(\sum_{s=1}^{r_1} \frac{\bar{y}^d}{y_{sk}^d} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{\bar{y}^u}{y_{qk}^u} \right)},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij}, \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{sj}^d, \\ \bar{y}^d \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{qj}^d, \bar{x} \geq x_k, \\ \bar{y}^d \leq y_k^d, \bar{y}^u \geq y_k^u, \lambda_j \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ik} 表示第 k 个省份的第 i 个投入要素, y_{sk}^d 表示第 k 个省份的第 s 个期望产出的变量值; λ_j 为决策单元的权重, m 和 n 为投入变量个数, r_1 为期望产出变量个数, r_2 为非期望产出变量个数; \bar{x} 为投

入矩阵元素; \bar{y}^d 表示期望产出矩阵元素, \bar{y}^n 表示非期望产出矩阵元素; ρ 表示工业碳排放效率,其数值越大,说明决策单元效率越高。

1.4.2 Malmquist 指数

Malmquist 指数最早由 Malmquist^[23]提出,后来 Caves 等^[24]将其用于计算生产效率的变化。将每个省(区)看作一个 DMU,第 $t+1$ 年、第 t 年的投入产出量分别表示为 (x^{t+1}, y^{t+1}) 和 (x^t, y^t) , 距离函数分别记为 $D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$ 和 $D^t(x^t, y^t)$, 则 Malmquist 指数可以表示为:

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \left(\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^t, y^t)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

当 $M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) > 1$ 时,说明第 $t+1$ 年的碳排放效率相对于第 t 年有所提升;反之,则说明第 $t+1$ 年的碳排放效率相对于第 t 年有所下降。

在不变规模报酬的状态下,将 Malmquist 指数进一步分解为技术效率变化指数(P_{ECH})和技术进步指数(P_{TCH}),即:

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \times \left(\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^t, y^t)} \right)^{\frac{1}{2}} = P_{\text{ECH}} \times P_{\text{TCH}} \quad (3)$$

根据 Fare 等^[25]的研究结果,在可变规模报

酬的状态下,技术效率变化指数 P_{ECH} 可以相应地分解为纯效率变化 (T_{PECH}) 和规模效率变化 (T_{SECH}), 则得到如下公式:

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \frac{D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_v^t(x^t, y^t)} \times \left(\frac{D_v^t(x^t, y^t)}{D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_c^t(x^t, y^t)} \right) \times \left(\frac{D_c^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_c^t(x^t, y^t)}{D_c^{t+1}(x^t, y^t)} \right)^{\frac{1}{2}} = T_{\text{PECH}} \times T_{\text{SECH}} \times P_{\text{TCH}} \quad (4)$$

其中下标 v, c 分别对应可变规模和不变规模的报酬。

2 黄河流域工业碳排放绩效测度结果与分析

2.1 静态工业碳排放绩效分析

2.1.1 时序演变特征

以 2003—2021 年度的投入产出数据为基础,建立基于全局、无导向、规模报酬不变、包含非期望产出的超效率 SBM 模型,对黄河流域 9 个省(区)工业碳排放效率进行估算,具体效率值如表 2 所示。为更清晰地反映黄河流域工业碳排放效率情况,按照上游地区、中游地区和下游地区对静态效率结果进行分析,探究黄河流域工业碳排放效率时序演变特征,得到图 1。

表 2 黄河流域各省(区)工业碳排放效率值

Tab.2 Industrial carbon emission efficiency values of each province(district) in the Yellow River basin

年份	碳排放效率值									均值
	甘肃	河南	内蒙古	宁夏	青海	山东	山西	陕西	四川	
2003	0.373	1.043	0.464	0.290	0.247	1.105	0.460	1.108	0.630	0.636
2004	0.333	1.044	0.403	0.292	0.228	1.184	0.430	0.596	0.629	0.571
2005	0.353	1.113	0.405	0.271	0.270	1.142	0.444	0.654	1.051	0.634
2006	0.357	1.108	0.419	0.270	0.252	1.133	0.439	0.698	1.057	0.637
2007	0.452	1.144	0.409	0.296	0.249	1.139	0.447	0.693	1.099	0.659
2008	0.368	1.120	0.364	0.310	0.252	1.114	0.400	0.732	1.100	0.640
2009	0.395	1.089	0.398	0.305	0.251	1.133	0.377	0.747	1.074	0.641
2010	0.400	1.118	0.405	0.304	0.239	1.078	0.405	0.821	1.109	0.653
2011	0.400	1.128	0.375	0.302	0.236	1.052	0.439	0.809	1.146	0.654
2012	0.405	1.100	0.407	0.311	0.243	1.037	0.433	0.790	1.098	0.647
2013	0.438	1.067	1.019	0.351	0.266	1.038	0.469	1.007	1.068	0.747
2014	0.419	1.027	0.433	0.333	0.241	1.019	0.451	1.011	1.132	0.674
2015	0.385	1.043	0.426	0.306	0.235	0.725	0.386	1.006	1.153	0.630
2016	0.401	1.076	0.437	0.319	0.271	0.723	0.380	0.786	1.175	0.619
2017	0.331	1.038	1.033	0.314	0.265	0.688	0.381	0.694	1.158	0.656
2018	0.319	1.021	1.013	0.273	0.276	0.739	0.337	0.685	1.209	0.652
2019	0.320	1.071	0.417	0.278	0.287	1.001	0.340	0.667	1.161	0.616
2020	0.353	1.084	1.043	0.290	0.305	1.051	0.366	0.674	1.191	0.706
2021	0.364	1.069	1.050	0.289	0.295	1.064	0.414	0.676	1.235	0.717
平均值	0.377	1.079	0.575	0.300	0.258	1.009	0.410	0.782	1.078	0.652
排名	7	1	5	8	9	3	6	4	2	

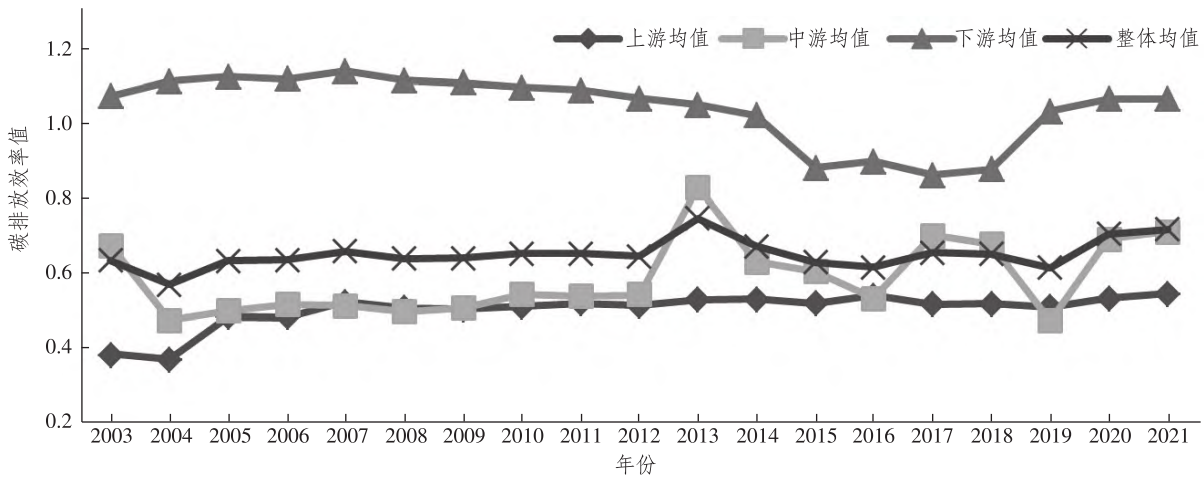


图 1 黄河流域上中下游地区工业碳排放效率变化曲线

Fig.1 Change curves of industrial carbon emission efficiency in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River basin

由图 1 可见,碳排放效率值整体呈波动增长的态势,均值为 0.650,存在 35%的改善空间。从工业碳排放效率均值的变动情况来看,按均值由大到小顺序排列,依次为下游地区、中游地区、上游地区;而中、上游地区整体均值偏低,未达到效率值 1;下游地区均值为 1.066,达到了生产前沿面,且工业碳排放效率波动相对较大,效率值大多在 1 左右。主要原因是下游地区各省(区)经济实力较强,在发展过程中相对中游和上游的各省(区)更加注重生态发展。此外,由表 2 可知:河南省整体均值相对于其他 8 个省(区)较高,拥有较高的碳排放绩效水平,且在 2003—2021 年间,发展趋势比较稳定,碳排放效率值维持在 1~1.25,整体碳排放效率值超过了 1,表明在 2003—2021 年间河南省工业的整体投入、产出情况处于生产前沿面上,资本、劳动力和能源投入合理,在实现工业经济发展的同时,合理控制碳排放,具有良好的经济效益,并达到低碳水平;而山东省作为经济强省,工业碳排放效率始终保持较高水平,2003—2013 年、2020—2021 年的效率值总体一直处于平稳状态,2014—2019 年走势呈“U”型发展。

从中游地区来看,2012 年前碳排放效率值总体处于平稳发展阶段,之后呈现波折发展态势。内蒙古整体均值波动较大,在 2003—2011 年平稳发展,在 2012—2019 年经历两次直线上升并急速下降的过程,之后效率值快速上升。山西省整体工业碳排放效率比较低,趋势相对稳定,主要因为山西省作为煤炭大省,工业部门主要以煤炭作为能源,而煤炭燃烧是主要的碳排放源之一,因此工

业碳排放效率整体较低。而陕西省的发展趋势波动较大,初始值比较高,达到 1.108,在 2012—2016 年间,呈倒“U”型发展,之后效率均值持续下降,但在 2004 年碳排放效率值直线下降,此后效率值不断攀升。这主要得益于这一时期《能源中长期规划纲要(草案)》的颁布,各省(区)积极推动技术、体制和管理创新,且随着 2007 年《能源发展“十一五”规划》文件的颁布,陕西省积极响应国家相关政策,迅速对产业结构做出调整与优化,减少对能源投入的消耗和碳排放量的排放,使得碳排放效率稳定上升。

从上游地区来看,整体呈现缓慢上升趋势。其中,青海和宁夏效率值较低,主要原因在于青海的能源以煤炭和石油为主,缺乏多样化的清洁能源供应,加上能源消耗总量多但部分工业企业技术水平不高,生产工艺落后,导致能源利用效率和工业碳排放效率均低;而宁夏由于一些高耗能、高排放的产业占比较大,且对传统能源依赖程度较高,清洁能源占比相对较低,导致碳排放效率较低。甘肃省均值呈平稳趋势发展,而四川省则保持稳定上升趋势,效率值较高,直至 2021 年达到碳排放效率峰值 1.235,且工业增加值增长显著,而所消费的能源量及其产生的碳排放量都较少增加,高经济效益、低能耗以及低排放的良好发展状态是 2021 年效率值达到最高的原因之一。

2.1.2 空间演变特征

为深入探究黄河流域工业碳排放效率的空间分布特征,采用自然断点法将黄河流域 2003—2021 年各省(区)工业碳排放效率均值划分为 5 个等级,2003、2009、2015 和 2021 年碳排放效率

空间分布情况如图 2 所示。

从总体上看,黄河流域工业碳排放效率的分布特点表现为“下游优于中游,中游优于上游”,且黄河流域 9 个省(区)的工业碳排放效率呈现缓慢增长趋势。下游地区的河南、山东一直处于较高的效率水平,且发展较为稳定;中游地区效率相对稳定,但效率值较低;上游地区的甘肃、青海和宁夏则始终处于较低效率水平,主要因为这些地区经济发展相对落后,缺乏及时的技术创新,导致工业污染物排放相对较多,碳排放效率低下。

因此,黄河流域工业碳排放效率缓慢提升,但发展差距相对较大,总体呈现以下分布特征:第一,东部和南部省(区)工业碳排放效率初始水平高,优于中西部地区,东部的山东、河南以及南部的四川在 2003 年前后就达到较高水平且发展平稳;第二,各省(区)的辐射作用相对较弱,山东、河南、四川、内蒙古等效率较高的地区对周围省(区)的带动作用较小,黄河流域整体工业碳排放效率在未来有较大进步空间。

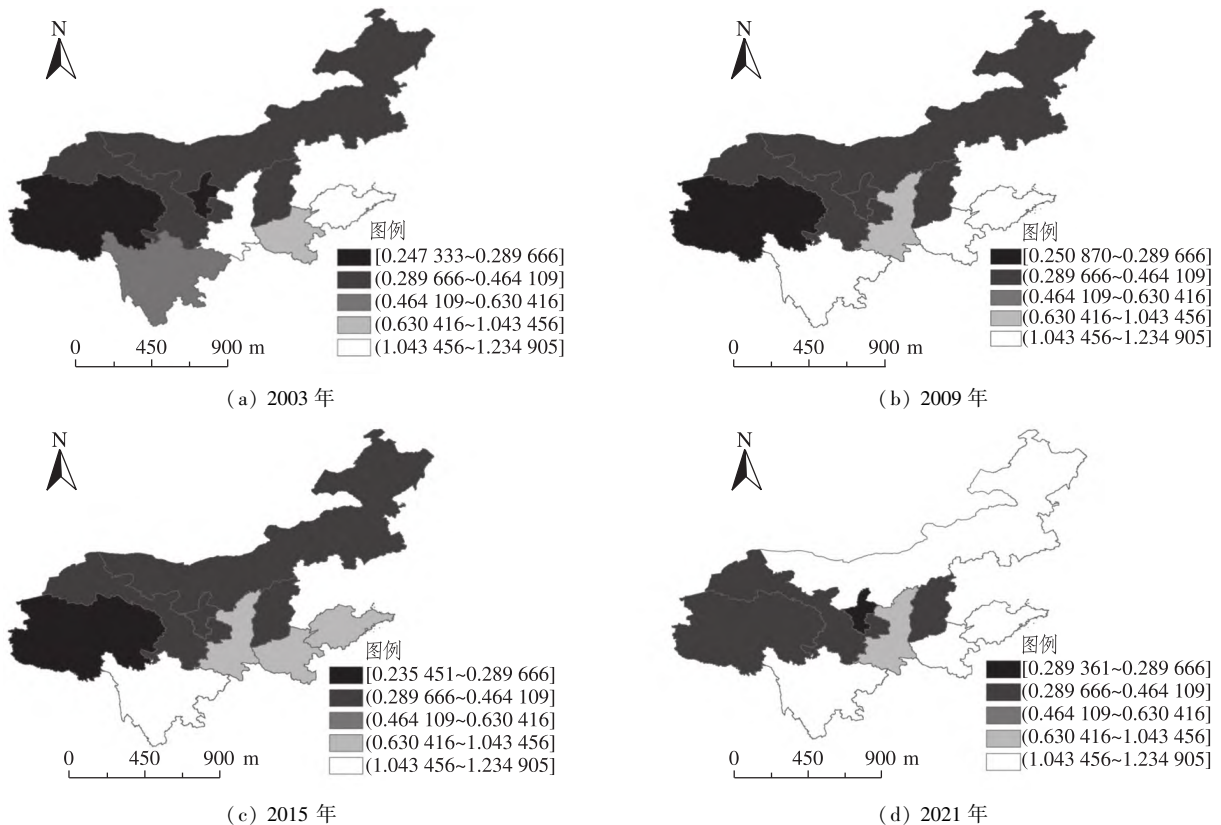


图 2 黄河流域工业碳排放效率空间分布格局

Fig.2 Spatial distribution patterns of industrial carbon emission efficiency in the Yellow River basin

注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1818 号的标准地图制作,底图边界无修改。

2.2 动态工业碳排放绩效分析

为了更全面地分析效率变化情况,本节利用 Malmquist 指数及其效率分解结构对黄河流域工业碳排放绩效的变化值进行分析,根据各省(区)与生产边界的相对位置变化(技术效率)以及生产边界的移动(技术进步)得到其动态变化情况,具体结果见表 3。

由表 3 可知,除山西省外,其余省(区)年均 Malmquist 指数值均超过 1,碳排放绩效在一定程

度上得到了改善,且甘肃、四川、宁夏和青海的年均改善幅度超 6%,使得上游地区的 Malmquist 指数值较中、下游地区高。进一步分析表 3 结果可以得到,甘肃、四川、宁夏、青海、内蒙古和河南的工业碳排放绩效的提高主要是技术效率增长和技术进步共同作用的结果。在技术效率均值水平上,四川和内蒙古技术效率指数最高,技术效率提升的幅度较大,说明这两省(区)碳排放绩效的提升主要来源于技术效率的提升;而在技术进步均值水平上,宁夏和青海的技术进步指数较高,其中

宁夏的规模效率指数和纯技术效率指数增长率分别为 6.5%、-2.9%,这是因为规模效率的增长抵消了纯技术效率的降低,从而提升了它的技术效率。陕西省和山东省在技术进步的正面效应超过

了技术效率的负面效应,使得 Malmquist 指数值有所提高;而山西省的工业碳排放绩效没有得到改善,主要是由于技术效率下降和技术退步的双重影响,最终导致中游地区均值较低。

表 3 2003—2021 年黄河流域各省(区) Malmquist 指数平均变化及分解结果
Tab.3 Average changes and decomposition results of Malmquist index in each province(district) in the Yellow River basin from 2003 to 2021

省(区)	Malmquist 值	技术效率指数	技术进步指数	纯技术效率指数	规模效率指数
甘肃	1.064	1.010	1.058	1.014	1.006
四川	1.072	1.046	1.029	1.043	1.002
宁夏	1.103	1.017	1.088	0.971	1.065
青海	1.093	1.010	1.086	1.000	1.010
上游地区	1.083	1.021	1.065	1.007	1.021
内蒙古	1.118	1.034	1.086	1.025	1.008
山西	0.974	0.930	0.992	0.994	0.998
陕西	1.009	0.986	1.026	0.981	1.015
中游地区	1.034	0.983	1.035	1.000	1.007
河南	1.034	1.003	1.030	1.003	1.000
山东	1.038	0.999	1.039	1.002	0.999
下游地区	1.036	1.001	1.035	1.003	1.000

表 4 为 2003—2021 年黄河流域的 Malmquist 绩效值及其分解指数。由表 4 可知:在考察期内,黄河流域工业碳排放绩效总体保持上升态势,除了 2013 年,其余年份的 Malmquist 指数值均大于 1,且总体均值为 1.063,平均增长率达 6.3%,碳排放绩效水平有较大提升;技术效率和技术进步

指数均值均有所提高,其中技术效率增长率为 1.1%,技术进步增长率为 5.5%,这体现为生产可能性边界的移动及内部投入产出的组合整体达到最优状态。而在 2013 年, Malmquist 碳排放绩效指数为 0.984,主要因为技术进步水平不高,导致其动态碳排放绩效出现了下滑。

表 4 2003—2021 年黄河流域各省(区) Malmquist 绩效值及其分解指数
Tab.4 Malmquist performance values and its decomposition index in each province(district) in the Yellow River basin from 2003 to 2021

时间	Malmquist 值	技术效率指数	技术进步指数	时间	Malmquist 值	技术效率指数	技术进步指数
2004/2003	1.045	0.960	1.089	2014/2013	1.032	0.962	1.076
2005/2004	1.128	1.087	1.043	2015/2014	1.029	0.963	1.069
2006/2005	1.122	1.005	1.116	2016/2015	1.075	1.031	1.043
2007/2006	1.160	1.031	1.125	2017/2016	1.046	0.978	1.070
2008/2007	1.080	0.973	1.111	2018/2017	1.096	0.998	1.101
2009/2008	1.035	0.983	1.052	2019/2018	1.067	0.995	1.072
2010/2009	1.067	1.026	1.042	2020/2019	1.022	1.054	0.971
2011/2010	1.055	1.053	1.004	2021/2020	1.041	1.014	1.028
2012/2011	1.047	0.983	1.066	均值	1.063	1.011	1.055
2013/2012	0.984	1.098	0.904				

图 3 给出 2003—2021 年黄河流域 Malmquist 绩效值及其分解变化情况。由趋势分布变化曲线可看出;Malmquist 指数趋势波动较大,在 2003—2021 年间经历了 5 次先升后降,最终在 2021 年降到了 1.041。进一步分析发现,技术进步与

Malmquist 指数的变化有着正相关性,而技术效率则有反向的变化趋势,这说明技术进步对 Malmquist 指数值起主要作用,黄河流域整体工业碳排放绩效的提升主要来自于技术进步的贡献。

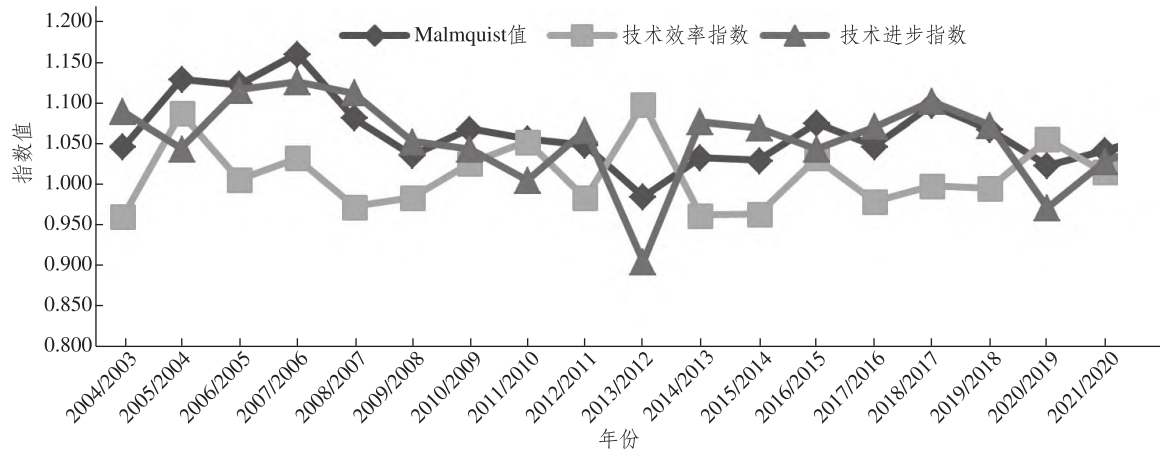


图 3 2003—2021 年黄河流域工业碳排放 Malmquist 指数及其分解变化

Fig.3 Malmquist index of industrial carbon emissions and its decomposition changes in the Yellow River basin from 2003 to 2021

3 黄河流域工业碳排放绩效影响因素

3.1 指标选取与模型构建

文献[26—27]是从经济发展水平、产业结构和对外开放程度等方面进行影响因素分析,基于学者们的研究现状及黄河流域工业的发展特征,本文遵循数据可获得性原则,从经济发展水平、产业结构、能源强度、市场化程度、技术水平和城镇化水平等 6 个方面来探究碳排放绩效的影响因素,具体变量列举如下。(1) 工业经济发展水平(X_1):由人均 GDP 指标表示,并进行对数化处理。(2) 产业结构(X_2):利用第二产业产值占 GDP 的比值表示。(3) 工业能源强度(X_3):利用工业能源消耗总量与工业增加值的比值表示,并进行对数化处理。(4) 对外开放程度(X_4):由进出口贸易总额(以当年美元平均汇率换算为人民币)占 GDP 的比值表示。(5) 技术水平(X_5):用各地区的国内专利授予数表示,并进行对数化处理。(6) 城镇化水平(X_6):用城镇人口占总人口的比值表示。各个变量的描述性统计分析结果见表 5。

表 5 变量的描述性统计

Tab.5 Descriptive statistics of variables

变量名	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
X_1	171	9.855	0.548	8.616	11.040
X_2	171	0.452	0.064	0.315	0.620
X_3	171	1.294	0.653	0.169	2.464
X_4	171	0.119	0.087	0.008	0.410
X_5	171	8.747	1.857	4.248	12.710
X_6	171	0.486	0.098	0.270	0.682

3.2 Tobit 回归模型结果分析

用 Stata16.0 软件进行求解,根据 LR 检验、 F 检验和 Hausman 的检验结果,最终选取面板 Tobit 随机效应模型^[28]进行估计,整理归纳后的回归结果见表 6。对总体样本的回归数据进行分析,得到如下结果。

1) 工业经济发展水平对工业碳排放绩效的影响为正,但不显著,说明工业经济发展水平对工业碳排放绩效有正向作用,但影响不大。因此,黄河流域各省(区)应在注重经济发展的同时,兼顾好生态环境的平衡发展,实现节约能源、减少碳排放、提高经济效益的目的。

2) 产业结构位于 1% 的水平上,且对工业碳排放绩效的影响显著系数为正,说明伴随着第二产业占比的提升,黄河流域碳减排效率和经济发展质量均有所提升,通过优化产业结构有助于黄河流域工业碳排放绩效的提高。

3) 工业能源强度对工业碳排放绩效的影响为负,但不显著。煤炭在工业能源中占有很大的比例,其碳排放系数很高,由于在使用煤炭时会释放出大量的二氧化碳,这对碳排放绩效会产生一定的影响,因而区域的煤炭消费情况会在一定程度上影响该区域碳排放量。

4) 对外开放程度是在 10% 的水平上,且对工业碳排放绩效的影响显著系数为正。通过对外开放,借助外资推动工业产业增长,同时将国外先进技术设备和管理经验用于工业中,以改善碳排放绩效。

5) 技术水平位于 1% 的水平上,且对工业碳

排放绩效的影响显著系数为正,即技术水平对工业碳排放绩效能够产生积极的促进作用。因此,各省(区)应积极推动企业数字化转型与智能化发展,加强人才培养与国际合作,为地区发展提供科技人才以促进技术水平的提升。

6) 城镇化水平是在5%的水平上,且对工业碳排放绩效的影响显著系数为负,说明城镇化水平的提高对碳排放效率产生显著的抑制作用。由于城镇化水平的提高使得黄河流域的资源不能得到最优配置,加重节能减排负担,从而抑制碳排放效率的提升。

表6 Tobit 模型回归结果

Tab.6 Regression results of the Tobit model

变量名	系数	Z 值	$P > Z $
X_1	0.0984	0.91	0.364
X_2	0.8886***	2.94	0.003
X_3	-0.0483	-0.63	0.530
X_4	0.6120*	1.95	0.051
X_5	0.0842***	2.88	0.004
X_6	-0.7881**	-1.97	0.049

注:***、**、* 分别表示显著性水平为1%、5%、10%;Z 值表示回归系数和标准误差的商;P 值用于说明回归系数的显著性。

4 结论及建议

4.1 结论

本文采用非期望产出的超效率 SBM 模型对黄河流域的工业碳排放绩效进行测算,同时从静态和动态两个角度进行分析,并运用 Tobit 回归模型探究其影响因素,得出以下结论。

1) 从静态绩效来看,在2003—2021年间,黄河流域的工业碳排放效率总体呈现起伏增长的态势,从工业碳排放效率均值的变动情况来看,由大到小顺序排列依次为下游地区、中游地区、上游地区。从空间分布上看,东部和南部地区的工业碳排放效率初始水平高,优于中、西部地区,但各省(区)的辐射效应比较弱。

2) 从动态绩效来看,在2003—2021年间,黄河流域工业碳排放绩效总体大致保持上升态势,除山西省,其余省(区)的工业碳排放绩效均得到了有效改善,宁夏和内蒙古的改善程度较大,陕西和河南的改善程度较小。指数分解结果进一步表明,技术进步与 Malmquist 指数的变化有着正相关性,对黄河流域工业碳排放绩效变动的贡献

最大。

3) 在影响因素方面,产业结构、对外开放程度和技术水平对黄河流域工业碳排放绩效水平有显著的正向影响,能提高碳排放效率,而城镇化水平对黄河流域工业碳排放绩效有明显的抑制影响,工业经济发展水平和工业能源强度的影响则不显著。

4.2 建议

基于以上研究结果,本文提出以下政策建议。

1) 大力发展经济建设。2003—2021年间,黄河流域工业发展迅速,但工业碳排放绩效水平增长缓慢。由影响因素知,工业经济发展水平对碳排放绩效有积极作用,但作用效果较弱,因此地方政府应该在兼顾好绿色发展的同时,大胆推进经济增长,提升碳排放效率,促进经济和生态环境的协调发展。

2) 推动技术进步并提高技术效率。由动态绩效结果可知,技术进步贡献较大,而技术效率偏低,所以黄河流域各省(区)可以在推动技术进步和提高技术效率方面采取有效措施:一是通过市场机制和行政手段推动企业自主研发行为,加快技术创新;二是加强企业的制度创新和管理创新,提高企业的软实力。此外,各省(区)应重视产业结构的正向效应和工业能源强度的负向影响,加强黄河流域工业企业的技术创新能力,推进低碳高效技术的革新,降低对高含碳能源的依赖程度,优化能源结构。

3) 积极提高对外开放水平。各省(区)应大力拓展对外合作领域和深度,对接国际高标准,培养高素质人才;改善投资环境,吸引高质量的外资项目,促进技术和管理经验的提升。此外,提出以碳减排和碳中和为主要指导的新型城镇化,既要研究落后区域在城市化进程中对碳排放的影响,也要关注发达地区高质量绿色发展,从而达到资源、能源优化配置的目标。

参考文献:

- [1] 王统勋,安雯.黄河流域生态环境协同治理面临的政策法规困境及对策[J].寒旱农业科学,2023,2(8):713-718.
- [2] 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.

- [3] 焦高乐, 严明义. 中国城镇化水平与碳生产率耦合度测度[J]. 城市问题, 2016(8): 32-38.
- [4] ZHANG C Q, CHEN P Y. Industrialization, urbanization, and carbon emission efficiency of Yangtze River economic belt: empirical analysis based on stochastic frontier model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(47): 66914-66929.
- [5] HERRALA R, GOEL R K. Global CO₂ efficiency: country-wise estimates using a stochastic cost frontier [J]. Energy Policy, 2012, 45: 762-770.
- [6] RAMANATHAN R. A multi-factor efficiency perspective to the relationships among world GDP, energy consumption and carbon dioxide emissions [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2006, 73(5): 483-494.
- [7] 张华, 丰超. 创新低碳之城: 创新型城市建设的碳排放绩效评估[J]. 南方经济, 2021(3): 36-53.
- [8] 韩晶, 王赟, 陈超凡. 中国工业碳排放绩效的区域差异及影响因素研究: 基于省域数据的空间计量分析[J]. 经济社会体制比较, 2015(1): 113-124.
- [9] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究: 基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 129-138.
- [10] WANG Y, ZHAO T, WANG J, et al. Spatial analysis on carbon emission abatement capacity at provincial level in China from 1997 to 2014: an empirical study based on SDM model [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(1): 97-104.
- [11] YAN D, LEI Y L, LI L, et al. Carbon emission efficiency and spatial clustering analyses in China's thermal power industry: evidence from the provincial level [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 518-527.
- [12] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [13] 杜娅明, 白永平, 梁建设, 等. 黄河流域旅游业碳排放效率综合测度及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 2074-2085.
- [14] LONG R Y, SHAO T X, CHEN H. Spatial econometric analysis of China's province-level industrial carbon productivity and its influencing factors [J]. Applied Energy, 2016, 166: 210-219.
- [15] 马飞, 胡江艳, 孙启鹏, 等. 中国省际物流业碳排放绩效测度及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(9): 27-33.
- [16] 魏丽莉, 侯宇琦, 曹昊煜. 中国城市碳排放绩效: 动态分解、空间差异与影响因素[J]. 统计与信息论坛, 2024, 39(2): 69-83.
- [17] 张征华, 彭迪云. 城市工业碳排放绩效的测算分析与对策建议: 以南昌市为例[J]. 企业经济, 2013(9): 124-128.
- [18] 张文洁, 许宁, 洪名勇. 长江经济带碳排放绩效的分布动态与地区差异研究[J]. 经济问题, 2023(11): 105-113.
- [19] 陈明华, 岳海璐, 郝云飞, 等. 黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(9): 25-44.
- [20] 张悦, 王晶晶, 程钰. 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1435-1448.
- [21] 程钰, 张悦, 王晶晶. 中国省域碳排放绩效时空演变与技术创新驱动研究[J]. 地理科学, 2023, 43(2): 313-323.
- [22] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [23] MALMQUIST S. Index numbers and indifference surfaces [J]. Trabajos de Estadística, 1953, 4(2): 209-242.
- [24] CAVES D W, CHRISTENSEN L R, DIEWERT W E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1982, 50(6): 1393-1414.
- [25] FARE R, GROSSKOPF S, NORRIS M, et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries [J]. American Economic Review, 1994, 84(1): 66-83.
- [26] 肖国安, 陈诚, 高雅婕. 中国五大城市群碳排放效率的动态演进特征及影响因素分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(21): 159-163.
- [27] 米莹, 蔺雪芹, 王岱, 等. 中国东部沿海地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(4): 476-486.
- [28] 吴小妮, 管卫华, 张惠, 等. 长三角城市群碳排放效率与高质量发展的时空耦合特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2273-2284.

The Performance Measurement and Influencing Factors of Industrial Carbon Emissions in the Yellow River Basin

WANG Xue¹, LIU Guanquan^{1,2}, ZHANG Yu¹

(1.School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2.Shandong University Research Center for Smart City Construction and Management, Qingdao 266525, China)

Abstract: Taking nine provinces (districts) of the Yellow River basin as the research object, the super-efficient SBM model and the Malmquist index were used to measure their static and dynamic industrial carbon emission performance from 2003 to 2021 and to reveal the spatial and temporal evolution characteristics of industrial carbon emission performance. On this basis, the Tobit panel was used to study the factors affecting the performance of industrial carbon emissions in the Yellow River basin. The results are shown as follows. (1) From the perspective of static performance, the industrial carbon emission efficiency of the Yellow River basin generally shows a fluctuating growth trend. The industrial carbon emission efficiency in the eastern and southern regions is higher than that in the central and western regions, and the radiation effect of each province (district) is relatively weak. (2) From the perspective of dynamic performance, except for Shanxi Province, the industrial carbon emission performance of other provinces (districts) has been improved, and technological progress has made the greatest contributions to the change of industrial carbon emission performance in the Yellow River basin. (3) From the perspective of influencing factors, industrial structure, degree of opening up to the outside world and technical level all play a key role in promoting the improvement of industrial carbon emission performance, while urbanization level has a negative impact on industrial carbon emission performance, and the impact of the level of industrial economic development and industrial energy intensity is not significant.

Keywords: carbon emission performance; super-efficient SBM model; Malmquist index; influencing factors; the Yellow River basin

版权声明

根据《中华人民共和国著作权法》《信息网络传播权保护条例》等法律法规的规定,本刊作如下声明。

1. 作者向本刊投稿,即表明同意将作品的发表权、删改权、信息网络传播权、数字化汇编权、数字化复制权、数字化制品形式(包括光盘、互联网出版物)出版发行权等权利授予本刊,并视同许可本刊官方新媒体免费转载以及与有关数据库的合作(本刊不再另行支付费用)。如不同意以上授权,请在投稿时说明。

2. 本刊刊载的全部编辑内容归《鲁东大学学报(自然科学版)》编辑部所有,非经书面同意,任何单位和个人不得转载、摘编、刊印或以其他方式使用。如有违反,本刊保留一切法律追究的权利。

3. 本刊版面、栏目等受著作权保护,对复制、仿制、假冒者将追究法律责任。

4. 已在本刊发表的论文,本刊具有无偿结集出版精华本、合订本以及相关电子产品的权利,有特别声明者除外。

《鲁东大学学报(自然科学版)》编辑部