中国矿业“安全降碳”效率的省际网络特征及协同发展研究*

孙国帅[1],杨鹏飞[2],冯娇[3]

(1.新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2.新疆大学 商学院, 新疆 乌鲁木齐 830091;
3.新疆财经大学 信息管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要:为探究中国矿业“安全降碳”态势,采用数据包络分析法测算2014—2022年中国30个省级行政区的矿业“安全降碳”效率,并结合社会网络分析法细致剖析其空间关联网络特征。结果表明:全国范围内矿业“安全降碳”效率整体呈现增长趋势,区域间差距较小,矿业绿色转型正朝着均衡协调的“安全降碳”方向发展;在空间关联网络方面,各省级行政区之间虽存在一定的互动关系,但整体联系紧密度较低,互动频率有待提升;不同区域在空间溢出效应中作用各异,部分省份在网络中占据重要地位,表现出较高的中心性,并在结构洞和中间人角色上具有突出作用;此外,各区域内部联系相对紧密,区域间的协同作用仍有提升空间。研究结果为全面理解中国矿业“安全降碳”态势提供了新的视角,并为优化政策设计、促进区域协同发展提供了科学依据。

关键词:矿业;安全降碳;绿色转型;效率测度;空间关联网络;数据包络分析法;社会网络分析法

中图分类号:F407.1;F426 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)12-0226-11

Study on Inter-Provincial Network Characteristics and Collaborative Development of Safe Carbon Reduction Efficiency in China's Mining Industry

SUN Guoshuai[1], *YANG Pengfei*[2], *FENG Jiao*[3]

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China;
2.School of Business, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830091, China;
3.College of Information Management, Xinjiang University of Finance & Economics, Urumqi, Xinjiang 830012, China)

Abstract: To explore the status of safe carbon reduction in China's mining industry, the data envelopment analysis (DEA) method was used to measure the safe carbon reduction efficiency of mining industry in 30 provincial-level administrative regions of China from 2014 to 2022. Additionally, social network analysis (SNA) method was utilized to examine the spatial correlation network characteristics in detail. The results reveal that the overall efficiency of safe carbon reduction in China's mining industry exhibits a growth trend with relatively small regional disparities, indicating the green transformation of the mining industry is moving towards a balanced and coordinated safe carbon reduction direction. In terms of the spatial correlation network, while there are some interactions among provincial-level administrative regions, the overall connectivity is weak, and interaction frequency needs improvement. Further analysis shows that different regions play distinct roles in spatial spillover effects. Certain provinces occupy key positions in the network, demonstrating high centrality and significant roles as structural holes and intermediary holes. Moreover, while intra-regional connections are relatively strong, the collaborative effects between regions still have room for enhancement. The research results provide a novel perspective for comprehensively understanding the status of safe carbon reduction in China's mining industry and offers scientific guidance for optimizing policy design and promoting regional collaborative development.

Key words: Mining industry, Safe carbon reduction, Green transformation, Efficiency measurement, Spatial correlation network, Data envelopment analysis method, Social network analysis method

---

* **收稿日期**:2025-02-19

基金项目:国家社会科学基金项目(22BGL202);自治区社科联新时代党的治疆方略理论与实践研究课题(2024ZJFLY36);教育部人文社会科学研究规划基金项目(24YJAZH130);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2024D01C18)

作者简介:孙国帅(1979—),男,辽宁锦州人,博士,教授,主要从事绿色矿业与可持续发展方面的教学与研究工作。E-mail:guoshuaisun@xju.edu.cn

0 引言

"安全降碳"是我国碳达峰、碳中和最高顶层设计提出的工作原则,即在绿色发展过程中要保障国家能源安全,在绿色转型中实现更大发展[1]。中共中央、国务院印发的《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》明确提出,要加快产业结构和能源的绿色低碳转型。推动绿色低碳发展既是实现高质量发展的必由之路,也是解决我国资源与生态环境问题的关键策略。在这一"安全降碳"背景下,绿色矿业的发展已被列为国家重点战略任务,并在各级地方政府中得到积极响应和具体落实[2]。然而,中国矿业绿色转型效率在不同地区存在明显差异,这与技术水平、经济结构及能源消耗模式等因素密切相关[3]。鉴于此,在以区域协同发展与市场配置为主导的时代背景下,单一省份仅凭自身技术和经验难以实现高效绿色转型,各地区间的协作与联系显得尤为重要[4]。因此,从空间网络视角系统分析省级矿业绿色转型效率及其空间关联网络结构,不仅有助于全面理解我国矿业"安全降碳"现状,还能为因地制宜制定相关政策提供科学依据。

现有研究从多重视角探讨了绿色转型效率。其中,董庆前等[5]基于 SBM-DEA 模型分析了碳排放约束下区域绿色经济增长的影响因素。谷书林等[6]运用 CCR 与对抗交叉评价模型定量分析了淮海经济区资源型城市的绿色转型效率。田泽等[7]通过超效率 SBM 模型测算了中国三大流域制造业绿色转型效率,并结合 Tobit 模型回归检验了影响因素。郭浩然等[8]基于规模报酬可变的数据包络分析法(DEA)模型测算了矿业企业绿色技术创新效率。这些研究表明,DEA 在绿色转型效率测度中应用广泛,但大多聚焦于某一区域或特定行业,缺乏全国范围的宏观研究。而在能源"安全降碳"领域,焦兵等[9]运用多期 DID 方法检验了国家级矿山试点项目的减污降碳效果。葛世荣等[10]以煤炭领域为例,研究了能源领域的降碳潜力和效力。XIAO 等[11]评估了矿产资源对碳减排的影响,促进了再生资源的可持续发展。PAN 等[12]研究了中国能源行业的低碳政策,并得出其对碳减排效果、绿色金融发展、居民健康、就业以及部分高耗能企业的社会影响。可以看出,现有的研究中鲜有关于"安全降碳"视角下能源行业碳减排效率空间相关性及协同发展的研究。

本文结合现有文献中的矿业绿色转型效率指标体系,基于 2014—2022 年的数据,运用 DEA 方法测算中国 30 个省级行政区的矿业"安全降碳"效率,并选取 2022 年的数据,通过社会网络分析法(SNA)系统探讨各省份在空间网络中的角色与地位。

本文可能的边际贡献如下:首先,在研究方法上,基于 DEA-Malmquist 指数模型构建了一套适用于绿色转型效率评价的投入产出指标体系,定量评估矿业"安全降碳"效率,深化对其演变规律的理解;其次,在研究视角上,从省级层面出发,借助空间网络关系视角,揭示我国各地区矿业"安全降碳"效率的相互影响及空间关联网络中的角色与地位,为推动区域协同发展提供理论支持与实践参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 DEA-Malmquist 指数模型

DEA-Malmquist 指数模型是一种衡量生产效率动态变化的非参数分析方法,最早由 Malmquist 于 1953 年提出,后经改进并与 DEA 相结合,形成跨期 Malmquist 生产率变化指数(TFP_$\{t,t+1\}$,t、$t+1$ 表示两个连续的时间点)[13]。该指数通过将全要素生产率变化(TFP)分解为技术效率变化(TEC)和技术进步(TC)两个组成部分,为评估效率变化提供了科学依据。当 TFP_$\{t,t+1\}$ 大于 1 时,表明全要素生产率及其分解成分呈增长趋势;反之,若小于 1,则意味着效率下滑。该模型为全面评估矿业"安全降碳"效率的动态变化提供了坚实的理论基础。

1.1.2 空间联系分析

在空间网络分析的框架下,各省级行政区被视为空间网络结构中的节点,它们之间的相互作用关系通过连线进行表征[14]。本文采用修正引力模型量化各省份在矿业"安全降碳"效率上的空间联系强度。依据文献[4]中的修正引力模型框架,构建并计算出各地区之间的空间联系强度矩阵。随后,根据矩阵中各行联系强度的算术平均值,对整个矩阵进行二值化处理:联系强度高于平均值的赋值为 1,低于平均值的赋值为 0,从而得到能够反映矿业"安全降碳"效率的 0-1 型空间联系矩阵。

1.1.3 社会网络分析

基于上述 0-1 型空间联系矩阵,利用 Ucinet 软件进行社会网络分析。社会网络分析方法通过计算

相关指标(如中心度)揭示空间网络中节点和连线的关系特性[7,15]。本文通过分析全国30个省级行政区的矿业“安全降碳”数据,研究各地区在矿业“安全降碳”过程中的互相影响及其网络地位,并计算多种中心性指标,如点度中心性、中介中心度和特征向量中心度,以刻画各地区在网络中的角色和作用。

1.2 数据来源与选取

1.2.1 矿业“安全降碳”效率数据选取

绿色转型效率的测度需综合考虑经济、环境和社会因素,关注投入与产出的效率及其资源环境成本[16]。本文在投入方面选取了矿业全社会固定资产投资额、矿业平均用工人数和矿业能源消费总量三项指标。在产出指标方面,参考张军等[17]的研究,采用改进的绿色GDP计算方法,即:矿业“安全降碳”产值=矿业产出产值/环境成本综合指数。其中,环境成本综合指数结合多维度指标综合测算,确保“安全降碳”效率测度的科学性与全面性。

1.2.2 数据来源说明

本文选取30个省级行政区在2014—2022年间可获得的有效数据,具体包括矿业产出产值、矿业全社会固定资产投资额、矿业平均用工人数和矿业能源消费总量。这些数据来源于《中国统计年鉴》、各省级行政区《统计年鉴》及EPS数据库等权威资料库。“安全降碳”效率的研究时段为2014—2022年,空间网络分析的主要研究年份为2022年,以保证结果的时效性与可靠性。

2 结果分析

2.1 矿业“安全降碳”效率分析

本研究中将30个省级行政区划分为七大地理区域,并计算出各区域2014—2022年矿业“安全降碳”效率值,见表1。根据上述方法计算,得出2014—2022年30个省级行政区矿业“安全降碳”效率的变化情况,如图1所示。

表1 2014—2022年我国矿业“安全降碳”效率值

Table 1 Efficiency values of safe carbon reduction of China's mining industry from 2014 to 2022

地区		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	平均值
华北	北京	1.10	1.22	1.24	1.30	1.01	1.13	1.03	1.49	0.82	1.15
	天津	1.02	1.03	1.49	0.85	1.08	0.98	1.36	0.78	1.61	1.13
	河北	1.07	0.99	1.37	1.13	0.92	1.15	1.12	0.97	1.23	1.11
	山西	0.92	0.85	1.15	1.41	1.01	0.99	1.24	1.39	1.20	1.13
	内蒙古	0.94	0.95	1.22	0.73	0.83	0.89	1.20	1.35	1.22	1.03
东北	辽宁	0.98	0.88	1.12	1.02	1.04	0.97	0.98	1.24	1.07	1.03
	吉林	1.06	1.14	1.54	0.97	0.58	1.05	1.19	1.06	1.04	1.07
	黑龙江	0.95	0.90	1.23	0.93	0.94	1.04	1.11	1.07	1.07	1.03
华东	上海	1.53	0.58	1.27	0.70	1.19	0.97	1.03	0.75	1.03	1.01
	江苏	1.02	1.07	1.37	1.18	1.26	1.14	1.18	1.11	1.06	1.15
	浙江	1.05	1.04	1.54	1.01	1.10	1.01	1.08	0.95	1.71	1.16
	安徽	1.03	0.93	1.30	1.16	0.95	1.01	1.12	1.07	1.00	1.06
	福建	1.27	1.07	1.26	1.26	1.01	0.95	1.21	0.92	1.54	1.17
	江西	1.04	0.96	1.03	1.27	1.14	1.05	1.22	1.25	1.04	1.11
	山东	1.01	0.94	1.38	1.18	0.87	0.99	1.16	1.14	1.00	1.08
华中	河南	0.97	1.06	1.62	1.30	0.86	0.98	1.19	1.02	0.91	1.10
	湖北	1.01	1.13	1.44	1.09	1.15	0.90	1.23	0.87	1.28	1.12
	湖南	1.08	1.09	1.40	1.08	0.90	1.03	1.35	1.13	1.14	1.13
华南	广东	1.02	1.05	1.26	1.17	1.21	1.03	1.06	1.17	0.86	1.09
	广西	1.02	1.18	1.43	0.86	0.84	1.12	1.07	1.06	1.13	1.08
	海南	0.81	1.19	1.17	1.12	1.05	0.97	0.88	1.21	1.14	1.06
西南	重庆	0.95	1.24	1.78	1.06	0.97	1.06	1.26	1.62	1.06	1.22
	四川	0.98	1.09	1.28	1.04	1.00	0.98	1.38	1.18	0.97	1.10
	贵州	1.17	1.17	1.76	1.02	0.93	0.91	1.55	1.14	0.97	1.18
	云南	1.05	1.02	1.01	1.20	1.08	0.96	1.39	1.02	1.22	1.11
西北	陕西	1.05	0.88	1.57	1.10	1.02	1.07	1.01	1.05	1.31	1.12
	甘肃	0.96	0.80	1.92	1.10	1.23	1.02	1.11	1.13	1.06	1.15
	青海	0.93	0.81	1.04	0.92	1.10	0.98	1.01	1.09	1.19	1.01
	宁夏	1.00	0.98	1.46	0.95	0.97	0.98	1.03	1.20	1.15	1.08
	新疆	0.97	0.89	1.20	1.23	1.30	1.17	1.05	1.21	1.28	1.15
平均值		1.03	1.00	1.36	1.08	1.02	1.02	1.16	1.12	1.14	1.10

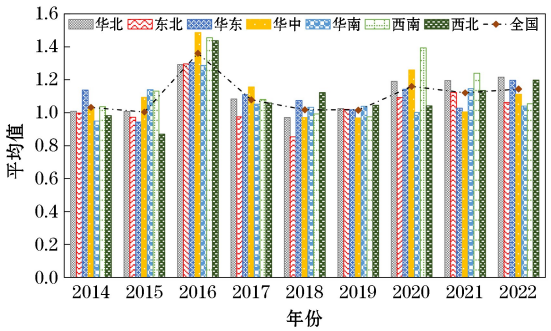


图 1 2014—2022 年我国矿业“安全降碳”效率值变动情况

Fig.1 Changes in the efficiency value of safe carbon reduction of China's mining industry from 2014 to 2022

从全国整体来看,矿业“安全降碳”效率呈现出逐年增长的态势,平均值为 1.10,表明 TFP 总体上保持增长。从时间发展脉络划分阶段审视各省级行政区矿业“安全降碳”效率值的演变历程,可以清晰发现不同时期呈现出各异的特征。

(1) 2014—2016 年,矿业“安全降碳”效率迎来增长高峰,整体增长率达到 36%。这是因为 2015 年提出的供给侧结构性改革加速了全要素生产率的提升,矿业领域绿色转型成为改革的重要方向。2016 年,政府出台了一系列促进矿业绿色发展的政策,如《全国矿产资源规划(2016—2020 年)》和《关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见》,推动转型效率达到高点。

(2) 2017—2019 年,转型效率增速放缓甚至有所回落。此阶段受国内外多重因素影响,例如 2018 年国务院机构改革,重组自然资源部和生态环境部,相关部门职能调整,导致矿业“安全降碳”政策衔接、标准制定和执行力度有所滞后。此外,受到复杂国际环境的影响,经济波动加剧,矿业企业经营困难增多,矿业“安全降碳”面临一定压力。

(3) 2020—2022 年,“安全降碳”效率再次迎来增长,增幅达 14%。这一阶段,政策引导和技术突破进一步推动矿业绿色化进程,尽管此后效率增速有所放缓,但整体水平仍高于 2014—2015 年。

从区域分布来看,七大区域矿业“安全降碳”效率的平均值分别为:西南(1.15)、华中(1.12)、华北(1.11)、华东(1.11)、西北(1.10)、华南(1.08)、东北(1.04)。这表明矿业“安全降碳”效率在全国范围内相对均衡,但也存在一定区域差异。

(1) 西南地区:以重庆为代表,“安全降碳”效率较高。得益于绿色矿山建设和跨行业协同发展,重庆显现出较强的“安全降碳”能力。

(2) 华中、华北、华东地区:处于全国平均值以上,这些地区政策支持力度较强,“安全降碳”水平较为稳定。

(3) 西北地区:虽受资金、技术等限制,整体效率略低,但以新疆为代表的区域通过产业集群发展推动了“安全降碳”的进程。

(4) 华南地区:因主要依靠高新技术产业发展,矿业“安全降碳”的投入力度相对较小,效率低于全国平均值。

(5) 东北地区:受产业结构单一、生态问题治理难度大等影响,“安全降碳”效率最低。历史遗留问题成为东北地区转型的主要掣肘,需长期政策支持和投入。

2.2 矿业“安全降碳”效率空间关联网络结构特征分析

2.2.1 整体网络特征

通过修正引力模型计算得到 0-1 型关系矩阵,使用社会网络分析法对 2022 年全国矿业“安全降碳”效率空间关联网络进行研究,图 2 为利用 Ucinet 软件生成的模型图。整体网络特征如下:网络中共有 214 条省际关联关系,表明矿业“安全降碳”具有一定的空间互动性;整体密度为 0.246,说明省际间的联系相对松散,关联紧密程度较低;网络关联度为 1,表明网络各节点均存在直接或间接的互相关联,没有孤立的省级区域;网络等级为 0.13,表明网络等级结构较为松散,缺乏显著的核心节点,即没有较大影响力的核心省份;网络效率为 0.70,存在一定冗余关联,说明网络内部具有一定的稳定性和抗冲击能力。

2.2.2 个体网络特征

我国 30 个省级行政区矿业“安全降碳”效率空间关联网络的中心性指标和净溢出关系分别见表 2 和图 3。个体网络特征如下。

(1) 点度中心度。从表 2 可以发现,2022 年度全国矿业“安全降碳”效率空间关联网络的点度中心度平均值为 34.483,共有 14 个省级行政区域的点度中心度大于全国平均值,其中排名前五的省份是:陕西、浙江、天津、湖北、湖南,表明这些省份在矿业“安全降碳”的过程中有着较高的核心地位。结合图 3 可见,除江西省外,以浙江省为代表的华东地区在空间关联关系中处于净溢出情况,此情况多得益于中国东部地区有着更好的经济技术发展水平、更高效的资源利用率,这使得优良的生产要素更倾向于向外部省份溢出。点度中心度较低的省份为:黑龙江、甘肃、青海、吉林、海南和上海。这些省级区域由于绿色转型效率不高或产业侧重点不同等原因在空间关联结构中处于非核心地位。

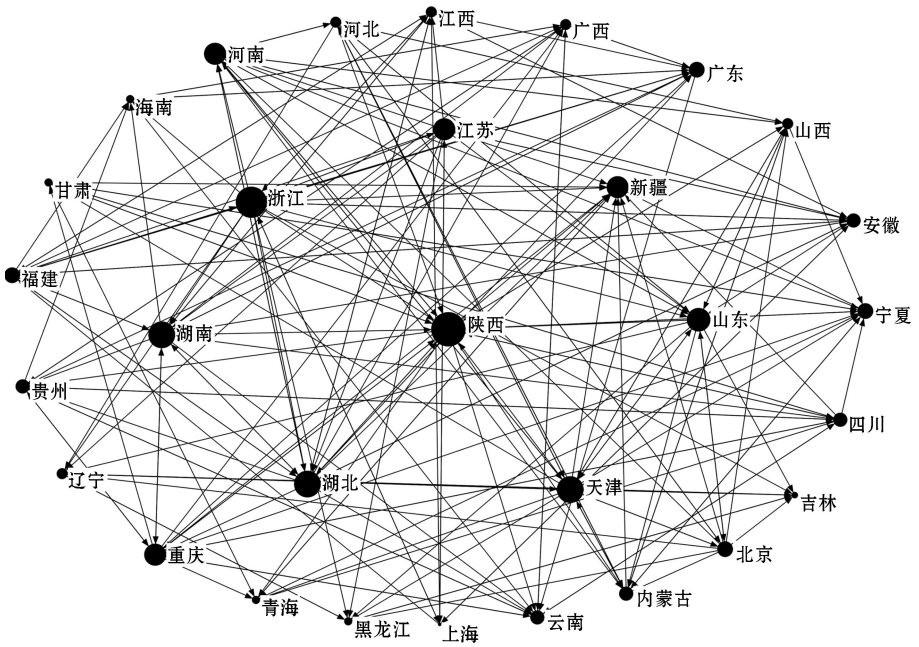


图 2 2022 年全国矿业“安全降碳”效率空间网络

Fig.2 Spatial network of safe carbon reduction efficiency for the national mining industry in 2022

表 2 我国 30 个省级行政区矿业“安全降碳”效率空间关联网络的中心性指标

Table 2 Centrality indicators of spatial correlation network of mining safe carbon reduction efficiency in 30 provincial-level administrative regions in China

省份	点度中心度	排名	接近中心度	排名	中介中心度	排名	特征向量中心度	排名
北京	34.483	11	50.877	25	1.231	16	22.176	19
天津	48.276	3	58.000	9	5.813	5	30.991	7
河北	27.586	20	51.786	19	0.400	25	20.455	22
山西	27.586	20	51.786	19	0.238	29	20.976	20
内蒙古	31.034	15	52.727	17	0.421	23	23.607	15
辽宁	27.586	20	52.727	17	1.021	17	18.775	24
吉林	20.690	29	50.877	25	0.290	26	14.556	29
黑龙江	24.138	25	51.786	19	0.557	21	17.046	28
上海	17.241	30	44.615	30	0.000	30	12.493	30
江苏	41.379	7	63.043	5	5.124	7	29.445	10
浙江	55.172	2	69.048	2	14.433	1	37.786	2
安徽	31.034	15	56.863	11	1.597	12	23.786	13
福建	34.483	11	51.786	19	1.634	11	23.678	14
江西	27.586	20	50.000	27	0.440	22	20.568	21
山东	44.828	6	63.043	5	4.388	10	30.823	8
河南	41.379	7	63.043	5	4.927	8	31.754	5
湖北	48.276	3	65.909	3	6.105	3	36.462	3
湖南	48.276	3	64.444	4	5.756	6	34.518	4
广东	34.483	11	54.717	13	1.477	14	24.517	12
广西	27.586	20	49.153	28	0.405	24	19.584	23
海南	24.138	25	49.153	28	0.604	20	17.202	27
重庆	41.379	7	58.000	9	4.543	9	29.490	9
四川	31.034	15	54.717	13	1.288	15	22.678	18
贵州	31.034	15	53.704	15	1.008	18	23.081	16
云南	31.034	15	53.704	15	1.008	18	23.081	16
陕西	58.621	1	70.732	1	13.874	2	42.367	1
甘肃	24.138	25	51.786	19	0.251	27	18.477	25
青海	24.138	25	51.786	19	0.251	27	18.477	25
宁夏	34.483	11	55.769	12	1.540	13	24.932	11
新疆	41.379	7	63.043	5	6.078	4	31.116	6
均值	34.483	—	55.954	—	2.890	—	24.830	—

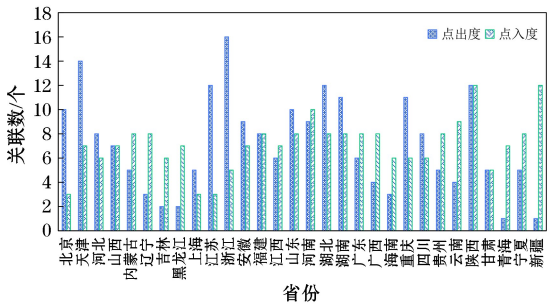


图 3　2022 年全国矿业“安全降碳”效率空间网络关系净溢出关系

Fig.3　Net spillover relationship between the spatial network relationship of safe carbon reduction efficiency of the national mining industry in 2022

（2）接近中心度。全国平均接近中心度为 55.954，陕西、浙江、湖北等 11 个省份高于全国平均值，其中陕西、浙江、湖北、湖南、河南、山东处于前五位置，与点度中心度计算结果类似，这些省份同其他地区的关联路径较短，容易影响其他地区。陕西省是我国矿业资源大省，在技术、人才、资本等方面均有一定积累，同时其地理位置也优于我国其他西部省份，因此在矿业“安全降碳”过程中处于核心地位。处于后五位置的是北京、吉林、江西、广西、海南、上海，这些省份的路径距离相对较长，受发展情况或政策定位的影响，在矿业“安全降碳”中处于边缘地带。

（3）中介中心度。从表 2 可以看出，全国平均中介中心度为 2.890，10 个省份的中介中心度高于平均值，排名前五的是：浙江、陕西、湖北、新疆、天津。这些省份发挥着“桥梁”作用，充当着其他节点的中介角色。对于浙江、天津等地区而言，其在物流运输、投资融资、科技水平、信息服务、管理技术等方面有着一定的优势，同时这些地区拥有更高的经济活力，对于空间关联网络有着更强的配置能力；对于新疆、陕西等资源型省份而言，政策导向的支持有着一定的影响，例如新疆早在 2022 年便将“绿色矿业”作为其九大产业集群之一，推动了西北地区矿业“安全降碳”的进程，促进了各地区的交流。

2.3　矿业“安全降碳”效率空间关联网络块模型分析

基于前文所得空间关联 0-1 矩阵，运用 Ucinet 软件中的 CONCOR 模块进行块模型分析。本研究参照现有文献，以最大分割深度为 2、集中度为 0.2 的标准，进行块模型分析[18]。将 30 个省份划分为 4 个板块，第一板块包括 10 个省份：北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、河南、山东；第二板块包括 5 个省份：青海、陕西、新疆、宁夏、甘肃；第三板块包括 7 个省份：江苏、湖北、福建、浙江、安徽、江西、上海；第四板块包括 8 个省份：湖南、贵州、云南、广东、广西、海南、重庆、四川。全国矿业“安全降碳”效率空间关联板块的溢出效应见表 3。

表 3　全国矿业“安全降碳”效率空间关联板块的溢出效应

Table 3　Spillover effects of the spatial correlation plates of safe carbon reduction efflciency for the national mining industry

板块	关系矩阵				模块省份数量	接收关系数		溢出关系数		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%
	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块		板块内	板块外	板块内	板块外		
第一板块	54	14	2	0	10	54	16	54	16	31.03	77.14
第二板块	4	14	1	5	5	14	30	14	10	13.79	58.33
第三板块	12	5	34	17	7	34	7	34	34	20.69	50.00
第四板块	0	11	4	37	8	37	22	37	15	24.14	71.15

从表 3 可以看出，板块内部关联关系总数为 139，板块外关联关系数为 75，板块内关联关系占全部关联关系总数的 65%，说明 30 个省份矿业“安全降碳”效率的空间溢出效应主要在区域内体现。分析各板块的溢出与接收情况：在第一板块中，内部关系数为 54 条，接收板块外的溢出（16 条）与溢出到外板块的数量（16 条）相等，实际内部关系比例远大于期望内部关系比例，属于“经纪人”板块；在第二板块中，内部关系数为 14 条，接收板块外关系数为 30 条，向其他板块发出关系数为 10 条，接收关系数大于溢出关系数，实际内部关系比例大于期望内部关系比例，属于“净收益”板块；在第三板块中，内部关系数为 34 条，板块外接收关系数和溢出关系数分别为 7 条和 34 条，溢出关系数大于接收关系数，属于“净溢出”板块；第四板块的内部关系数为 37 条，接收其他板块的关系数为 22 条，溢出为 15 条，且其实际内部关系比例远大于期望内部关系比例，板块内与板块外均有较多互动联系，具有“双向溢出”板块特点。

在表 3 的基础上，计算了板块密度矩阵和像矩

阵,见表 4。若板块密度大于整体网络密度(0.246),赋值为 1,反之,则赋值为 0。将各板块网络的关联关系进行处理后,得到如图 4 所示的关系图。

表 4 全国矿业“安全降碳”效率空间关联板块的密度矩阵和像矩阵

Table 4 Density matrix and image matrix of the spatial correlation plates of safe carbon reduction efficiency for the national mining industry

板块	密度矩阵				像矩阵			
	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块
第一板块	0.600	0.280	0.029	0.000	1	1	0	0
第二板块	0.080	0.700	0.029	0.125	0	1	0	0
第三板块	0.171	0.143	0.810	0.304	0	0	1	1
第四板块	0.000	0.275	0.071	0.661	0	1	0	1

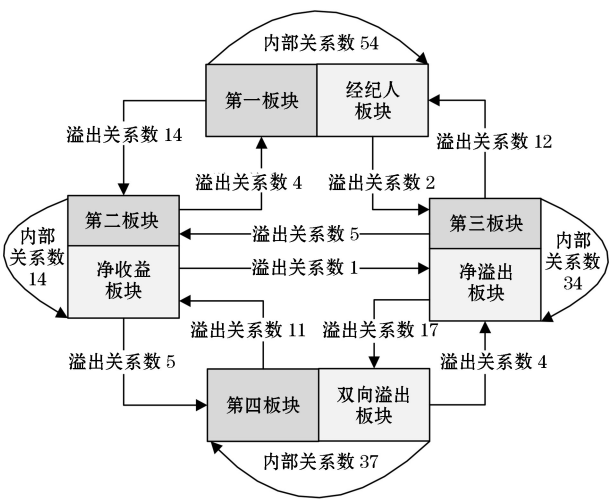


图 4 板块间网络关联关系

Fig.4 Network correlation between plates

由表 3 和图 4 可知,各板块内部具有较高的联系强度,均超过整体网络密度。在板块分组中,每个板块内通常存在较为“活跃”的省份,这些省份多为同一区域内的邻近省份,从而加强了板块内部联系的紧密性。具体而言,第二板块主要包括西北地区的省份,受限于较低的经济技术水平和不利的地理区位,这些省份在很大程度上依赖于其他板块的溢出效益,其“安全降碳”效率的提升多源于外部支持和资源引入。第三板块则由华东、华中等经济技术发达地区组成,该板块在网络中表现出显著的溢出效应。发达地区的资源优化配置能力、科技创新水平以及政策支持力度均使其对其他板块的“安全降碳”起到了重要的引领和带动作用。同时,第一板块和第四板块在关联网络中分别充当了溢出与接收之间的重要“纽带”。第一板块以华北地区为主,通过资源要素的传递增强了与其他板块的联动;第四板块以西南地区为核心,通过吸收外部资源进一步推动本区域的“安全降碳”进程。

值得注意的是,第一板块和第四板块之间缺乏直接的互动联系,这与两者主要包含的地理区域特征有关。第一板块集中于华北地区,而第四板块多为西南省份,由于两者之间地理距离较远且经济联系较为薄弱,这种隔离性对整体网络密度产生了一定的制约。然而,从另一个角度看,这也表明提升板块间的协同互动,特别是加强华北与西南地区之间的联动,是未来优化全国矿业“安全降碳”效率空间关联网络的重要方向。

2.4 结构洞与中间人分析

在块模型分析的基础上,本研究进一步利用 Ucinet 软件中的结构洞和中间人板块功能进行分析。

2.4.1 结构洞分析

结构洞用于描述两个行动者之间的非冗余关系,其占据者因具有信息优势和控制优势,在网络结构中比其他位置的成员拥有更高的竞争力[19]。本文采用结构洞指标,通过 Ucinet 软件对全国矿业“安全降碳”效率网络中的结构洞指标进行测算,见表 5。从表 5 可以看出,陕西、浙江、天津、湖北等省份表现出较高的有效规模和效率,同时具有较低的限制度。这与前文中点度中心度的测算结果相符,反映了这些省份在网络中的重要地位。以陕西省为例,该省与其他省份建立了大量的非冗余联系,结合块模型分析,陕西在第二板块中承担了协调人的重要角色。陕西省接收来自其他板块的溢出关系,并将其传递至第二板块内的其他省份,其净溢出关系为 0,表明陕西省作为连接西北地区与华北、华南等地区的“中转站”,在信息传递与资源配置方面具有显著的优势。

表 5 全国矿业“安全降碳”效率网络结构洞指标

Table 5 Structural hole indicators of safe carbon reduction efficiency network for the national mining industry

省份	有效规模	效率	限制度	等级度
北京	5.154	0.515	0.302	0.084
天津	9.071	0.648	0.233	0.064
河北	3.250	0.406	0.333	0.049
山西	3.071	0.384	0.330	0.036
内蒙古	4.000	0.444	0.310	0.049
辽宁	4.591	0.574	0.318	0.067
吉林	2.938	0.490	0.393	0.065
黑龙江	3.778	0.540	0.353	0.068
上海	1.375	0.275	0.435	0.052
江苏	7.500	0.625	0.240	0.102
浙江	11.310	0.707	0.198	0.091
安徽	4.625	0.514	0.287	0.043
福建	5.125	0.512	0.289	0.054
江西	3.154	0.394	0.335	0.050
山东	7.778	0.598	0.248	0.076
河南	7.211	0.601	0.221	0.051
湖北	8.975	0.641	0.202	0.052
湖南	8.447	0.603	0.229	0.049
广东	5.286	0.529	0.292	0.052
广西	3.917	0.490	0.333	0.044
海南	3.389	0.484	0.349	0.071
重庆	7.294	0.608	0.247	0.066
四川	5.143	0.571	0.284	0.064
贵州	4.462	0.496	0.310	0.051
云南	4.462	0.496	0.310	0.051
陕西	11.896	0.700	0.181	0.047
甘肃	3.450	0.493	0.336	0.066
青海	3.375	0.482	0.333	0.033
宁夏	5.654	0.565	0.271	0.057
新疆	8.538	0.712	0.198	0.043

2.4.2 中间人分析

中间人是网络中位于两个行动者之间的主体,其主要功能是传递信息和资源[20]。根据中间人在所处团体中发挥的作用,可细分为协调人、守门人、代理人、顾问和联络人 5 种角色。本文结合块模型分析的省份分组,对全国矿业“安全降碳”效率空间关联板块的中间人角色进行分析,见表 6。从表 6 可以看出,全国矿业“安全降碳”网络中不存在担任顾问角色的板块。这表明,在全国矿业“安全降碳”过程中,没有任何板块能够完全控制非自身板块的信息流动或资源配置。各省份在转型过程中保持了一定的独立性,并形成了各自的优势和特色。

第一板块的角色分布较为多元,在协调人、守门人和代理人角色中均有涉及,该板块作为信息和资源的“中转站”,在整体网络关系的流动中发挥了重要作用,保障了全国网络的活力。第二板块和第三板块则分别以联络人和代理人角色为主。第二板块倾向于控制信息和资源的流向,是信息资源的重要枢纽。相比之下,第三板块更倾向于控制信息和资源的输出,表现出较强的辐射能力。第四板块主要承担守门人的角色。受益于来自第三板块的信息资源,该板块在接受信息的基础上,将资源进一步向第二板块输出。这种角色分工体现了全国矿业“安全降碳”网络中信息流动与资源配置的层次性和协同性,为推进全国矿业“安全降碳”进程提供了实践依据。

表 6 全国矿业“安全降碳”效率空间关联板块的中间人角色占比

Table 6 Proportion of intermediary roles in the spatial correlation plates of safe carbon reduction efficiency for the national mining industry

板块	协调人/%	守门人/%	代理人/%	顾问/%	联络人/%
第一板块	29.09	30.91	34.55	0.00	5.45
第二板块	0.00	37.62	15.84	0.00	46.53
第三板块	11.92	12.58	66.89	0.00	8.61
第四板块	25.71	42.86	26.43	0.00	5.00

3 区域协同发展路径

基于对中国矿业“安全降碳”效率空间网络特征的分析,结合各板块的特点与区域间的互动模式,提出区域协同发展路径。

(1) 构建区域分工协作机制。结合各省级行政区资源禀赋、经济发展水平和技术能力等特点,构建多层次的区域分工协作机制。在资源开发利用方面,鼓励核心省份如陕西、浙江等通过技术输出和经验分享,带动周边省份提升“安全降碳”能力;在资源管理和政策制定方面,建立跨区域协调平台,推动各省份在碳排放管控、绿色技术研发和产业链优化等方面形成协同效应。

(2) 完善区域协同创新网络。加强矿业“安全降碳”相关技术的协同创新,推动区域内高校、科研机构和企业的合作,形成创新共同体。依托第一板块和第四板块的纽带作用,强化区域间技术研发、成果转化的交流与合作,搭建跨区域技术共享平台,提高技术传播效率。针对西北和西南地区等发展相对滞后的区域,加大科技创新投入,增强区域自主创新能力,弥补“安全降碳”中的技术短板。

(3) 优化空间关联网络结构。针对空间网络中

各板块之间联系紧密度较低的问题,进一步打通省际间的信息和资源流通渠道。重点加强第一板块与第四板块的沟通互联,建立高效的信息共享机制,降低信息传递中的壁垒。推动跨板块合作项目的实施,促进不同板块间的溢出效应,实现资源的合理配置与高效利用。

(4) 推动区域“安全降碳”示范区建设。在“安全降碳”效率较高的省份(如陕西、浙江)建立区域性示范区,探索“安全降碳”与绿色发展的创新模式。通过典型示范和经验推广,带动周边省份实现效率提升。同时,引导不同板块根据各自的资源禀赋特点,形成“一板块一策略”的转型路径。例如,西北板块可重点发展矿业清洁生产技术,东部板块则聚焦绿色产业链延伸和高端化发展。

(5) 健全协同发展政策体系。完善区域协同发展政策,建立激励机制,支持企业在“安全降碳”中跨区域合作;加快区域间绿色认证标准的统一,促进跨区域贸易和绿色产品流通;在碳排放权交易、矿产资源综合利用等领域实施联动政策。通过政策协调与协同监管,形成区域间良性互动和共同发展格局。

综上,中国矿业“安全降碳”的区域协同发展需以分工协作、创新驱动、网络优化为基础,探索多元化、系统化的协同路径,助力我国矿业实现更高水平的“安全降碳”和可持续发展目标。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究采用数据包络分析法和空间网络分析法,从绿色转型效率维度测算和分析了 2014—2022 年间中国 30 个省级行政区的矿业“安全降碳”效率,并探讨了区域协同发展路径。得出的主要研究结论如下。

(1) 全国矿业“安全降碳”效率整体呈现增长趋势。从总体来看,全国矿业“安全降碳”效率在研究期间呈现出持续增长的态势,区域间差异较小,显示出我国矿业“安全降碳”的相对均衡与协调发展特征。2014—2016 年,矿业“安全降碳”效率出现显著增长,高峰增长率达到 36%;2017—2019 年,效率均值有所回落;2020—2022 年,效率增长率再度回升至 14%。这种波动趋势与国内外政策环境的变化密切相关,例如绿色发展理念的深化、生态文明建设政策的推进以及国际能源格局的调整。

(2) 空间网络分析揭示区域间的协同特征和差异化角色。空间网络分析结果显示,尽管省际间存在一定程度的互动关系,但整体空间关联的紧密程度较低,互动频率较弱。网络中,各板块在空间溢出效应中扮演着差异化的角色。部分省份在网络中占据重要地位,表现出显著的结构洞优势和中间人角色,充分发挥了信息传递和资源配置的关键作用。

(3) 板块间互动模式揭示区域联动机制。板块分组分析结果显示,不同区域在矿业“安全降碳”中的互动模式具有显著差异。其中,第一板块和第四板块在进行溢出与接收的过程中,承担了“纽带”作用,连接其他板块并促进资源和信息的流通。这种作用有助于提升全国矿业“安全降碳”的整体协同性,为优化区域联动机制提供了依据。然而,板块间的联系密度偏低,表明跨区域协作仍有较大的提升空间,未来需要加强区域间的协同发展与资源共享,进一步提升全国矿业“安全降碳”效率的整体水平。

4.2 建议

针对上述结论,本文提出以下建议。

(1) 强化政策引导,提升主导地位。政府应继续制定并完善有利于矿业“安全降碳”的政策,确保政策的连贯性和稳定性,同时针对不同区域的发展特点和阶段制定差异化政策措施。具体而言,需建立健全政策监测与预警机制,密切关注国内外政策环境的变化,及时评估其对矿业“安全降碳”的影响,为政策调整提供依据。此外,应加强国际合作与交流,积极参与全球矿业“安全降碳”规则的制定,提升我国在国际矿业“安全降碳”中的话语权和影响力。在此基础上,借鉴国际先进经验与技术,推动我国矿业“安全降碳”与国际接轨,强化我国在矿业“安全降碳”领域的主导地位。

(2) 加强协同发展,释放联动效能。为了提升区域间的协同效应,可建立省际矿业“安全降碳”合作平台,定期举办经验分享、技术交流与信息共享等活动。鼓励各省、市、区之间加强合作,通过优化资源配置与技术交流实现互利共赢,推动上下游企业跨区域合作,形成高效协同的产业链体系。核心省份如陕西、浙江等应继续发挥在资源、技术和管理等方面的优势,进一步强化其在矿业“安全降碳”中的引领作用。一方面,这些核心省份可通过分享成功经验,为其他省份提供借鉴;另一方面,应建立核心省份与其他省份的结对帮扶机制,通过技术援助、资源支持等方式帮助薄弱省份提升矿业“安全降碳”能

力,实现共同发展。

(3) 优化网络结构,畅通流通脉络。各板块应结合自身特点,加强内部协同,特别是提升第一板块(以华北、东北地区为主)和第四板块(以西南地区为主)内部及相互之间的联系紧密度。通过加强板块间的沟通与资源共享,促进跨区域资源、技术和信息的有效流通,提升整体网络的协同性与辐射带动能力。

综上,通过强化政策引导、促进区域协同发展、优化网络结构等措施,可有效提升我国矿业"安全降碳"效率,为推动我国矿业可持续发展奠定坚实基础。

参考文献(References):

[1] 朱信凯,龚斌磊.高质量发展背景下实现"双碳"目标的风险挑战与路径选择[J].治理研究,2022,38(3):13-23+2+124.
ZHU Xinkai, GONG Binlei. Risks, challenges and pathways towards carbon peaking and climate neutrality in the context of high-quality development[J]. Governance Studies, 2022, 38(3):13-23+2+124.

[2] 鞠建华,强海洋.中国矿业绿色发展的趋势和方向[J].中国矿业,2017,26(2):7-12.
JU Jianhua, QIANG Haiyang. The trend and direction of green development of the mining industry in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2):7-12.

[3] 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(4):759-772.
HUANG Jie. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China[J]. Resources Science, 2018, 40(4):759-772.

[4] 史玉芳,兰欣颐.我国矿业绿色转型效率的空间网络结构及区域协同提升研究[J].生态经济,2023,39(1):101-108.
SHI Yufang, LAN Xinyi. Research on spatial network structure and regional collaborative promotion of green transformation efficiency of mining industry in China[J]. Ecological Economy, 2023, 39(1):101-108.

[5] 董庆前,李治宇.碳排放约束下区域经济绿色增长影响因素研究[J].经济体制改革,2022(2):66-72.
DONG Qingqian, LI Zhiyu. Research on the influencing factors of regional economic green growth under the constraint of carbon emissions[J]. Reform of Economic System, 2022(2):66-72.

[6] 谷书林,谭俊涛.淮海经济区资源型城市绿色转型效率评价[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2024,42(3):7-12.
GU Shulin, TAN Juntao. Evaluation of green transformation efficiency of resource-based cities in Huaihai economic zone[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2024, 42(3):7-12.

[7] 田泽,方琪,鞠云,等.中国三大流域制造业绿色转型效率评价及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(10):2072-2084.
TIAN Ze, FANG Qi, JU Yun, et al. Evaluation of efficiency of manufacturing industry transformation and influencing factors in China's three major river basins[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(10):2072-2084.

[8] 郭浩然,李松青.矿业企业绿色技术创新效率及影响因素分析[J].矿业研究与开发,2022,42(4):187-192.
GUO Haoran, LI Songqing. Analysis on green technology innovation efficiency and influencing factors in mining enterprise[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(4):187-192.

[9] 焦兵,郝佳馨,张文彬.国家级绿色矿山试点示范项目的经济增效与减污降碳双赢效应研究[J].管理学刊,2024,37(5):32-47.
JIAO Bing, HAO Jiaxin, ZHANG Wenbin. Study on the win-win effect of economic efficiency increase, pollution and carbon reduction of national green mine pilot demonstration projects[J]. Journal of Management, 2024, 37(5):32-47.

[10] 葛世荣,刘淑琴,刘金昌,等.能源强国目标下煤炭安全保供及高效降碳效力研究[J].中国工程科学,2024,26(4):40-51.
GE Shirong, LIU Shuqin, LIU Jinchang, et al. Effectiveness of secure supply and carbon reduction in the coal sector for strengthening the energy power of China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4):40-51.

[11] XIAO Junfu, CHEN Siying, TAN Zhixiong, et al. Examining the carbon reduction effect of renewable resource utilization: based on national "urban mining" demonstration base[J]. Industrial Management & Data System, 2024, 124(12):3298-3323.

[12] PAN Jiawei, CHEN Xiaofang, LUO Xiaona, et al. Analysis of the impact of China's energy industry on social development from the perspective of low-carbon policy[J]. Energy Reports, 2022, 8(7):14-27.

[13] YE Feifei, HAN Sirui, LU Haitian. Carbon emissions management efficiency evaluation based on indicator information integration and DEA-Malmquist index[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11:1301091.

[14] WANG Zhaofeng, LIU Qingfang, XU Jianhui, et al. Evolution characteristics of the spatial network structure of tourism efficiency in China: a province-level analysis[J]. Journal of Destination Marketing & Management, 2020, 18:100509.

[15] 刘小瑜,余海华.中国省际绿色发展的空间关联及溢出效应[J].江西财经大学学报,2020(3):14-24.
LIU Xiaoyu, YU Haihua. Spatial correlation and spillover effect of China's inter-provincial green development[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2020(3):14-24.

[16] 傅春,欧阳欢蕤,赵雪茹.基于DEA及Malmquist指数模型的江西省绿色发展效率测度与评价[J].生态经济,2020,36(6):51-57+172.
FU Chun, OUYANG Huanrui, ZHAO Xueru. Measurement and evaluation on green development efficiency of Jiangxi Province based on DEA and Malmquist index model [J]. Ecological Economy,2020,36(6):51-57+172.

[17] 张军,佃杰.广东省绿色经济效率测算及实证研究[J].生态经济,2017,33(8):114-117+155.
ZHANG Jun, DIAN Jie. Calculation and empirical study of green economic efficiency in Guangdong Province [J]. Ecological Economy,2017,33(8):114-117+155.

[18] 孙才志,马奇飞.中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J].地理研究,2020,39(1):53-63.
SUN Caizhi, MA Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China[J]. Geographical Research,2020,39(1):53-63.

[19] 严玲艳,张窈.基于结构洞理论的在线学术社交用户中间人角色分析[J].情报杂志,2022,41(11):164-170.
YAN Lingyan, ZHANG Yao. Analysis of brokerage roles of online academic social users based on structural hole theory [J]. Journal of Intelligence,2022,41(11):164-170.

[20] 陈瑾宇,张娟.兰西城市群协同创新网络的结构洞与中间人研究[J].工业技术经济,2023,42(7):102-112.
CHEN Jinyu, ZHANG Juan. Research on the structural hole and middleman of the collaborative innovation network of Lan-Xi urban agglomeration [J]. Journal of Industrial Technological Economy,2023,42(7):102-112.