基于生态-技术-经济协同路径的生态脆弱地区绿色矿业集群建设*

钟媛[1],高志刚[2],龚风云[1],乌兰托娅[3]

(1.新疆科技学院 会计学院, 新疆 库尔勒市 841000;
2.新疆科技学院 经济学院, 新疆 库尔勒市 841000;
3. 巴音郭楞蒙古自治州工业和信息化局产业科, 新疆 库尔勒市 841000)

摘要:基于生态-技术-经济协同路径,运用超效率SBM模型结合GML指数方法,对新疆矿业绿色全要素生产率进行精准测算,系统评估新疆矿业产业集群的绿色发展水平。结果表明:新疆矿业绿色全要素生产率低于全国平均水平,技术创新能力不足是制约该地区矿业发展的重要因素;通过区位熵方法量化分析了新疆矿产资源产业集聚程度,发现其呈现"高集聚、低绿色、弱链条"特征,存在集群"虚胖"现象;借助向量自回归模型实证分析了产业集聚程度、绿色发展水平与区域经济增长之间的动态关系,其中绿色发展水平对矿业集群聚集程度影响显著,绿色发展水平与产业集聚程度的协同效应是经济可持续发展的核心动力,形成了"绿色技术-产业集聚-经济增效"的正反馈机制。基于此,提出需构建以"生态增值、技术赋能、网络协同、结构优化"为核心的"四位一体"绿色发展体系,为生态脆弱地区矿业集群绿色高质量发展提供切实可行的对策措施。

关键词:绿色矿业;产业集群;绿色全要素生产率;区位熵集聚度;向量自回归模型

中图分类号:F426 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0295-10

The Construction of Green Mining Cluster in Ecologically Fragile Areas Based on the Ecological-Technical-Economic Synergy Path

Zhong Yuan[1], *Gao Zhigang*[2], *Gong Fengyun*[1], *Wulan Tuoya*[3]

(1.School of Accounting, Xinjiang College of Science & Technology, Korla, Xinjiang 841000, China;
2.School of Economics, Xinjiang College of Science & Technology, Korla, Xinjiang 841000, China;
3. Industrial Division, Bureau of Industry and Information Technology, Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Based on the ecological-technical-economic synergy path, the super-efficiency SBM model combined with the GML index method was used to accurately measure the green total factor productivity in Xinjiang, and systematically evaluate the green development level of Xinjiang mining industry cluster. The results show that the green total factor productivity of mining industry in Xinjiang is lower than the national average, and the lack of technological innovation ability is an important factor restricting the development of mining industry in the region. Through the method of location entropy, the degree of industrial agglomeration of mineral resources in Xinjiang is quantitatively analyzed, and finds that it presents the characteristics of "high agglomeration, low green and weak chain", and there is a phenomenon of "virtual fat" in the cluster. With the help of vector autoregressive model, the dynamic relationship between industrial agglomeration degree, green development level and regional economic growth is empirically analyzed. Among them, the green development level has a significant impact on the agglomeration degree of mining clusters. The synergy effect of green development level and industrial agglomeration degree is the core driving force of sustainable economic development, forming a positive feedback mechanism of "green technology-industrial agglomeration-economic efficiency". Based on this, it is proposed to build a "four-in-one" green development system with "ecological value-added, technological empowerment, network synergy and structural optimization" as the core, so as to

* **收稿日期**:2025-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(72064035);新疆维吾尔自治区高校基本科研业务费科研项目(XJEDU2026P138);产教融合与新商科发展研究中心年度招标课题(2025-KYJD02)

作者简介:钟媛(1988—),女,四川内江人,硕士,讲师,主要从事资源环境审计及能源矿产业集群绿色发展研究。E-mail:470155470@qq.com

provide practical countermeasures for the green and high-quality development of mining clusters in ecologically fragile areas.

Key words: Green mining, Industrial cluster, Green total factor productivity, Location entropy agglomeration degree, Vector autoregression model

0 引言

当前,全球矿业正经历从“规模扩张”向“价值跃迁”的转型,产业集群化与绿色技术创新被视为破局关键。产业集群是助推区域经济增长的“加速器”和打造区域品牌的重要途径,在国家将产业集群建设的重点领域聚焦于绿色低碳、数字经济、医药健康等大背景的条件下,新疆也结合自身区域优势与特色极力打造了“十大产业集群”,新疆矿产资源储量丰富,但“三高”问题严重,“双碳”目标相比其他省份实施过程更加困难,是干旱区生态系统脆弱的典型代表区域。新疆在推动绿色矿业及加工产业集群建设的过程中,生态保护、技术创新与经济效益三者之间尚未形成协同机制,具体表现为技术“卡脖子”,制约低碳生产,生态修复补偿机制的缺失削弱了发展的可持续性,而集群产业链条短窄则导致资源“低价出走”,这种“有集群无协同”的发展模式,不仅对区域生态安全构成威胁,更可能使区域陷入“资源丰裕陷阱”。基于此,本文提出“四位一体”协同发展体系,旨在为破解资源型地区“增产不增效、集聚不增值”的困境提供新路径,为生态脆弱地区矿业高质量发展提供“新疆样板”,对筑牢西部生态屏障、重塑“一带一路”矿业价值链具有重要的战略意义。

针对绿色矿业产业集群的理论建构,易建洲等[1]着重阐释了碳定价机制与生态补偿政策对产业绿色转型的规制效应。邓元媛等[2]系统论证了产业链协同与空间集聚对资源循环利用的强化作用。在方法论层面,学界普遍采用区位熵、产业集中度及H指数等指标量化评估产业集聚效应,并通过回归模型检验产业集聚与区域经济增长的关联机制[3]。值得注意的是,王思琪等[4]基于绿色全要素生产率(GTFP)的测度研究已形成主流范式,其研究成果为突破资源环境约束、推动经济可持续发展提供了新的理论依据。现有研究在理论与实践层面取得了三重突破:研究范式实现从经济集聚到绿色重构、从静态布局到动态演化、从区域封闭到跨境协同的跃迁,并形成了具有中国特色的“六化”标准体系[5]。但现有研究仍存在一定局限:其一,空间研究多聚焦东部发达矿区或单一典型矿区,对边疆地区矿业集群的系统性研究明显不足;其二,理论构建偏重单一驱动要素,对生态-技术-经济复合作用机制的解析存在缺环,且过度依赖欧美市场经验,难以解释新疆等边疆生态脆弱地区所面临的“生态脆弱性-资源依赖性-民族发展诉求”三重约束[6]。本研究聚焦边疆复合系统治理,突破传统单一维度分析框架,基于“生态-技术-经济”三维分析模型,研究特殊生态地缘环境下绿色矿业集群的建构逻辑与实施路径。

1 典型案例建设现状

新疆矿产资源储量丰富,已探明矿种有153个,占全国已发现矿种的87.9%。其中,探明能源矿产8种、金属34种、非金属57种、水气3种,占全国探明矿种的62.6%。区内19种优势矿产在资源量、品质及开发条件上具备显著竞争优势,粗钢、电解锰、海绵钛等产量居全国前列,电解铝、铜、锌等产能持续保持领先水平。当前,通过实施找矿突破战略,新疆矿产资源潜力持续释放,为国家能源资源安全提供了有力支撑。

近年来,新疆在绿色矿业及加工产业集群建设方面取得了显著进展,政府高度重视绿色矿业发展,出台了一系列政策措施。例如,新疆火烧云铅锌矿年产60万t铅锌冶炼工程的投料生产,作为新疆绿色矿业及加工产业集群的重要组成部分,标志着新疆在绿色矿业方面的具体进展。目前,新疆大中型矿山约占45%,3个县(区)被国家确定为绿色矿业发展示范区;截至2024年拥有国家级绿色矿山63家、自治区级绿色矿山97家;已建立7个大型基地,包括巴楚-阿图什的十亿吨级铁矿和千万吨级钛矿、阿尔金的百万吨级锂铍矿和千万吨级萤石矿、若羌的50万t级镍矿、阿克陶的百吨级金矿及阿勒泰的十亿吨级硅质原料矿。矿产资源开发朝着绿色化、集约化方向转型[7]。根据2023—2024年对自治区自然资源厅、自治区地质矿产勘查开发局、巴州工

信局、国家级绿色园区库尔勒经开区及典型矿企等的调研访谈,总结出典型地区案例,见表1。

表1 新疆绿色矿业集群建设典型案例汇总

Table 1 Summary of typical cases of green mining cluster construction in Xinjiang

矿业产业集群名称	资源类型	产业集群建设经验	建设效益
哈密铁矿及钢铁辅料基地	铁矿、铜镍矿	吸引八钢、西宁特钢等大型企业,形成采矿—铁精粉—球团矿产业链。	2023年铁矿采选规模达1 200万t,铁精粉450万t,球团矿450万t。
西昆仑矿区	有色金属	"山上开采+山下冶炼"模式,AT智能找矿(无人机磁力巡航)、共轴钻探技术、多金属伴生矿提取。	中南大学联合共建攻关全产业链技术短板;推动"政产学研用"融合,累计投资133.85亿元;2024年前三季度工业增加值同比增长120.7%。
昆冈经济技术开发区有色金属产业园	铜锌矿、铅锌矿	绿色智能产业园区,冶炼加工与循环利用核心引擎,形成采选—冶炼—深加工产业链,提高资源利用效率,增加产品附加值。	规划14.92 km^2,带动就业7 000人,计划总投资816亿元,达产后年产值1 557亿元。
阿舍勒铜矿	铜矿	尾矿制备膏体充填井下采空区,实现资源循环利用,废石不出井充填技术,废水循环利用。	绿化覆盖率100%,年节水48万m^3,节能3 627 t标煤,减少尾矿排放量30%。
新疆天华矿业	铁矿	投资数亿元改扩建采矿—选矿—尾矿处理全流程。	入选自治区级绿色矿山,资源利用率提升30%。
和田火烧云铅锌矿	铅锌矿	和田地区成立以主要领域挂帅的招商引资领导小组,实现高原生态扰动最小化。	全国最大铅锌矿(储量1 900万t),目标年产值500亿元,打造千亿级绿色矿业产业集群。
巴楚-阿图什铁矿基地	铁矿、钛矿	形成十亿吨级铁矿、千万吨级钛矿基地。	2023年建成十亿吨级铁矿基地。
阿尔金锂铍萤石基地	锂铍矿、萤石矿	开发百万吨级锂铍、千万吨级萤石。	锂辉石短流程提锂技术降低能耗30%。
乌恰县乌拉根铅锌矿	铅锌矿	投入1亿元安装了一套回水系统,把"三废"治理和生产工艺有机结合起来。	每年节能3 627.04 t标准煤,节水48万m^3。
卡特巴阿苏金矿	金矿	智能化绿色矿山(高压辊磨+浮选节能20%)远程控制系统智能开采标杆。	2025年5月30日投产,年处理矿石120万t,国内罕见高品位金矿。

2 绿色发展水平测度

2.1 数据来源

绿色全要素生产率(GTFP)是衡量经济增长质量的重要指标,它不仅考虑了劳动和资本等传统的生产要素,还纳入了如污染物、碳排放等环境因素,能够综合反映资源利用效率、技术进步和环境治理等方面的情况[8]。在指标选取方面,遵循科学性、系统性、可操作性和数据可得性的原则[9],数据主要来源于《新疆统计年鉴》《新疆自然资源年鉴》《中国环境统计年鉴》以及新疆维吾尔自治区统计局官网和实地调研数据等,搜集了2006—2024年新疆矿业经济变量数据,以此来测算绿色全要素生产率。

2.2 绿色全要素生产率测算

基于超效率SBM模型,结合GML指数方法,对新疆绿色全要素生产率进行动态测算。超效率SBM模型能有效处理非期望产出(如工业废水、氧化硫和烟粉尘排放),避免传统模型因松弛变量导致的效率偏差;GML指数则用于捕捉跨期生产率变化,可反映技术进步和效率改进。具体实施中,以表2的投入-产出指标为基础,结合面板数据,运用MaxDEA软件进行求解,测算过程包括数据标准化处理、模型参数设定及迭代优化,以确保测算结果稳定可靠。

表2 绿色全要素生产率测度投入-产出指标

Table 2 Input-output indicators for measuring green total factor productivity

一级指标	二级指标	三级指标
投入指标	劳动力投入	从业人数/万人
	能源资源投入	用电量/(kW·h)
	资本投入	资本存量/万元
产出指标	期望产出	GDP/万元
	非期望产出	工业废水排放量/t
		氧化硫排放量/万t
		烟粉尘排放量/t

绿色全要素生产率及指数分解趋势如图1所示。由图1可知,绿色全要素生产率在2006—2024年存在波动,GTFP的增长呈非线性,发生明显的波动与经济政策的调整、外部经济环境的变化及技术冲击等多种因素有关。从绿色全要素生产率测量结果的变化来看,从2006年到2024年,GTFP从1.0增长到1.39,整体增长约39%。具体来看,2006—2009年,GTFP从1.0增长至1.371 3,表明经济增长质量有所提升,反映出技术进步和资源配置效率有所改善;2012—2015年,GTFP再次上升,特别是在2015年,GTFP达到1.596 1,表明技术创新和资源利用效率进一步提升;随后几年GTFP明显下降,尤其在疫情影响下低至1.15,直至2021年后开始稳步回升。GTFP的增长意味着在相同的劳动和

资本投入下,能够产生更多的经济产出,这直接体现了资源配置效率的提升,这一变化表明当前经济发展正向着绿色经济转型,且绿色经济发展已取得了初步成效。

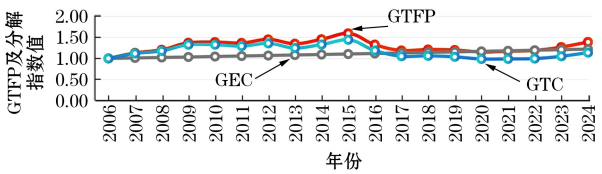


图 1 绿色全要素生产率及指数分解趋势

Fig.1 Green total factor productivity and index decomposition trend

2.3 绿色全要素生产率进一步分解

本研究进一步将测出的绿色全要素生产率拆解后发现,技术效率(GEC)在整个分析期间表现出稳定的增长趋势,年均增长率为 2%,这表明新疆的矿产业在逐步优化生产流程、提高资源利用效率。技术进步(GTC)的变化趋势则较为波动,反映了技术创新的不稳定性。部分年份技术进步显著,多与重大技术突破、产业转型升级或大规模的研发投入有关。例如,新能源技术的引入、智能制造的推广等,均能带来技术进步跃升。技术进步对 GTFP 增长贡献较大,尤其是在 2012—2015 年,显著推动了 GTFP 的提升。从拆解结果来看,技术效率与技术进步呈现阶段性变化特征。其中,技术进步(GTC)是 GTFP 增长的核心动力,贡献率为 68%;而技术效率(GEC)提升缓慢,年均仅 0.8%,暴露出“技术引进强于消化吸收”的短板。此外,GTFP 在 2015 年达到峰值(1.596 1)后进入波动期,这一变化与新能源政策调整周期高度同步,反映了政策连续性对 GETP 稳定增长的关键作用。

2.4 结果分析

新疆 GTFP 在 2006—2024 年总体呈缓慢上升趋势,年均增长率为 2.3%,全国绿色全要素生产率均值为 1.7,新疆绿色全要素生产率均值为 1.27,只达到了全国平均水平的 75%,这是因为新疆等西部地区地理位置偏远、经济基础相对薄弱,且对传统能源相对依赖,导致其绿色全要素生产率水平相对较低。例如:低碳采矿技术(如氢能采矿设备)依赖进口,尾矿资源化利用技术(如废渣提取稀有金属)的实际覆盖率不足 30%,这导致资源利用效率和环境治理水平有待进一步提高,技术创新能力不足仍是制约绿色矿业发展的重要因素。

3 矿业产业集群集聚程度分析

3.1 数据来源及方法选择

一般利用区位熵、产业集中度及 H 指数等方法来评估产业集聚效应,通过对多个产业的实证分析,验证了区位熵方法的有效性和适用性。区位熵是衡量某一产业在特定区域内相对集聚程度的重要指标[10-11]。选择 2010—2022 年的样本数据,这一时间段涵盖了新疆经济发展的重要阶段,有助于全面、深入地了解产业集聚的动态变化。同时,数据来源广泛且权威,包括《中国统计年鉴》《新疆统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及国家统计局官网和新疆维吾尔自治区统计局官网等,是实地调研中积累的宝贵资料,可全面评估新疆地区产业集聚的现状和特征,为后续的政策制定和产业发展提供有力的决策支持。

企业数量区位熵的计算公式见式(1):

$$NS_{mn}=(N_{mn}/N_m)/(N_n/N) \tag{1}$$

式中:n 表示所研究区域;m 表示所研究行业;NS 表示企业数量区位熵;N 表示企业数量。

若 $NS_{mn}\leqslant 1$,则可以认为研究区域未发生产业数量集聚现象;若 $NS_{mn}>1$,则可以认为研究区域发生了产业区域集聚现象。

企业主营业务收入区位熵的计算公式见式(2):

$$LQ_{mn}=(M_{mn}/M_m)/(M_n/M) \tag{2}$$

式中:LQ 表示主营业务收入区位熵;M 表示企业产值。

若 $LQ_{mn}\leqslant 1$,则可以认为所研究区域未发生产业经济集聚现象;若 $LQ_{mn}>1$,则可以认为所研究区域发生了产业经济集聚现象。

3.2 产业集聚结果分析

在行业选择上,考虑到新疆“十大产业集群”,单独将矿业中的石油、天然气、煤矿筹划出来,建立油气生产加工产业集群、煤炭煤化工等产业集群,正在编制的《新疆绿色矿业产业集群发展行动计划》中,将新疆 152 种矿种形成的诸多产业链条归纳总结为黑色金属、有色金属、能源金属,为与新疆维吾尔自治区自然资源厅、工业和信息化厅等主管实务部门保持一致,数据筛选时,剔除了传统采矿业中不属于新疆绿色矿业的石油、天然气、煤矿等行业,仅保留了与矿业加工紧密相关的几个行业。根据以上区位熵计算

公式,计算汇总出新疆主要矿产资源产业数量区位熵和主营业务收入区位熵的具体数值见表 3,新疆整体矿产资源产业平均区位熵变化趋势如图 2 所示。

表 3 新疆主要矿产资源产业区位熵数据

Table 3 Location entropy data of mineral resources industry in Xinjiang

年份	类别	非金属矿采选业	黑色金属矿采选业	黑色金属矿冶炼	有色金属矿采选业	有色金属冶炼
2010	数量区位熵	0.95	3.58	1.33	3.08	0.69
	收入区位熵	0.56	1.88	1.29	1.49	0.29
2011	数量区位熵	1.27	3.93	1.72	2.69	0.78
	收入区位熵	0.51	1.60	1.31	1.33	0.41
2012	数量区位熵	1.14	3.31	1.18	2.79	0.88
	收入区位熵	0.44	1.65	1.30	1.38	0.62
2013	数量区位熵	1.35	3.30	1.31	2.71	1.08
	收入区位熵	0.48	1.79	1.15	1.22	1.15
2014	数量区位熵	1.06	3.09	1.34	3.05	1.05
	收入区位熵	0.45	1.71	0.99	1.21	1.54
2015	数量区位熵	0.95	2.95	1.28	3.22	1.05
	收入区位熵	0.46	1.59	0.73	1.21	2.32
2016	数量区位熵	0.83	3.13	1.12	3.24	1.14
	收入区位熵	0.35	1.68	0.78	1.65	2.59
2017	数量区位熵	0.95	3.48	1.19	3.55	1.13
	收入区位熵	0.43	3.28	1.03	2.06	2.39
2018	数量区位熵	0.90	3.10	1.49	3.78	1.27
	收入区位熵	0.49	3.07	0.76	2.75	2.46
2019	数量区位熵	0.97	4.29	1.23	3.86	1.24
	收入区位熵	0.51	3.28	0.76	2.88	2.29
2020	数量区位熵	1.06	3.92	1.14	4.28	1.08
	收入区位熵	0.59	2.61	0.70	3.12	2.34
2021	数量区位熵	1.17	4.11	1.15	3.97	1.08
	收入区位熵	0.47	2.64	0.69	3.20	2.19
2022	数量区位熵	1.18	4.09	1.14	3.95	1.08
	收入区位熵	0.40	2.31	0.58	2.99	1.86

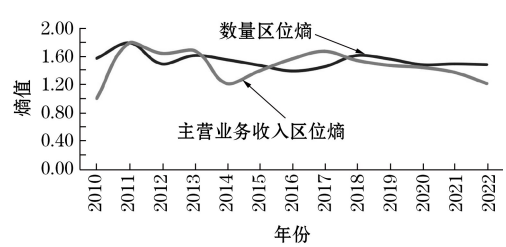


图 2 新疆整体矿产资源产业平均区位熵变化趋势

Fig.2 Change trend of arerage location entropy of mineral resources industry in Xinjiang

从表 3 和图 2 中可以看出,新疆矿业核心优势产业是黑色金属与有色金属采选业。黑色金属矿采选业的数量区位熵和收入区位熵长期处于高位,表明该产业企业数量集中度远超全国平均水平,凸显出产业规模与经济效益的双重优势,这得益于新疆丰富的矿产资源和良好的成矿地质条件。有色金属矿采选业的数量区位熵和收入区位熵变化反映出该产业企业集群正在加速形成,尽管 2022 年受疫情影响,收入区位熵略降至 2.99,但仍接近全国水平的 3 倍,经济效益依旧显著,产业集聚与盈利能力同步强化。而有色金属冶炼数量区位熵表明,该行业已进入成熟期,企业集群加速形成,企业密度位居全国前列。

此外,黑色金属矿冶炼的数量区位熵长期在 1.1~1.7 之间波动,收入区位熵从 2010 年的 1.29 持续下滑至 2022 年的 0.58,企业数量集中度稳定但无明显增长,表明企业数量集中但收入贡献不足,传统的高耗能模式未发生根本改变,难以应对复杂多变的矿区生态环境问题。非金属矿采选业数量区位熵呈波动上升,收入区位熵长期低迷,其中 2022 年仅 0.4,表明企业规模小、附加值低,集群效应未转化为经济效益,集群“虚胖”。从整体集群结构来看,新疆矿业集群存在明显失衡:一是集群结构单一,以矿产业为主导,产业结构不平衡,主要集中在采选环节,深加工不足 20%,高附加值产品少;二是下游产业零星,未形成规模集群,产业链垂直整合不足;三是集群内部协同性弱,再结合实地调研发现,企业间的网络活动关系薄弱,缺乏互补性和网络性特征,未形成“开采-加工-应用”闭环循环网络,呈现“集而不群”的状态。综上,新疆矿业及加工产业集群总体表现为“采选业高集聚,深加工薄弱”的特点[12-13]。

4 绿色-聚集-经济的动态关系实证分析

为了深入分析矿业产业集群绿色发展绩效水平、聚集效应与新疆经济三者之间的持续动态关系,本研究采用向量自回归(VAR)模型进行实证分析。VAR 模型作为一种数据驱动的统计工具,擅长剖析多变量间的动态关联,无需预设变量的内生或外生性,即可精准捕捉变量间的互动效应及反馈机制。数据来源主要包括《新疆统计年鉴》《新疆自然资源年鉴》《中国统计年鉴》以及相关企业的年报等。选取的变量包括矿业产业集聚程度(用主营业务收入

区位熵衡量)、绿色发展水平(用绿色全要素生产率衡量)、区域经济增长(用新疆地区生产总值衡量)等。对数据进行预处理,包括数据清洗、平稳性检验等,以确保数据的质量和可靠性。

4.1 理论模型设定

本研究运用向量自回归(VAR)模型对绿色全要素生产率(GTFP)、主营业务收入区位熵(LQ)与新疆地区生产总值(GDP)之间的关系进行回归分析,其优势在于能够精准评估变量间的显著相关性,并深入探究各变量自身变化造成的滞后效应,从而为政策制定提供坚实的科学依据。建立的三变量VAR(p)系统如下:

$$\begin{cases} GTFP_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \alpha_{1i} GTFP_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \alpha_{2i} LQ_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \alpha_{3i} GDP_{t-i} + \varepsilon_{1t} \\ LQ_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_{1i} GTFP_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \beta_{2i} LQ_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \beta_{3i} GDP_{t-i} + \varepsilon_{2t} \\ GDP_t = \gamma_0 + \sum_{i=1}^{p} \gamma_{1i} GTFP_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \gamma_{2i} LQ_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \gamma_{3i} GDP_{t-i} + \varepsilon_{3t} \end{cases} \tag{3}$$

式中:$GTFP_{t-i}$、LQ_{t-i}、GDP_{t-i} 分别为各变量的第 i 期滞后值;α_0、β_0、γ_0 为常数项;α_{1i}、β_{1i}、γ_{1i} 代表衡量GTFP滞后项的影响系数;α_{2i}、β_{2i}、γ_{2i} 代表衡量LQ滞后项的影响系数;α_{3i}、β_{3i}、γ_{3i} 代表衡量GDP滞后项的影响系数;ε_{1t}、ε_{2t}、ε_{3t} 为随机误差项,反映模型未解释的随机扰动。

4.2 时间序列数据的ADF检验

对数据进行VAR分析之前,需要对数据进行ADF检验以确保数据的平稳性。对新疆地区生产总值(GDP)、主营业务收入区位熵(LQ)和绿色全要素生产率(GTFP)进行取对数差分处理后,进行ADF检验,检验结果见表4。

表4 ADF检验结果

Table 4 ADF test results

变量	T	P	临界值		
			1%	5%	10%
GTFP	−5.197	0.000***	−4.223	−3.189	−2.730
LQ	−6.517	0.000***	−4.665	−3.367	−2.803
GDP	−4.495	0.000***	−4.223	−3.367	−2.803

注:*、**、*** 分别代表10%、5%、1%的显著性水平;T 为ADF检验统计量,用于检验变量是否存在单位根的核心统计量。

由表4可知,以GDP为变量时,显著性 P 值达到0.000,在统计学上具有显著性,原假设被拒绝,表明该序列属于平稳的时间序列。同样地,以LQ和GTFP为变量时,显著性 P 值为0.000,同样显示出显著性,原假设同样被拒绝,说明该序列也是平稳的时间序列。

4.3 VAR模型参数估计与解释

根据数据分析,滞后阶数选为1阶,即建立VAR(1)模型,VAR模型的估计结果见表5。

表5 VAR模型参数估计结果

Table 5 Parameter estimation results of VAR model

参数	估计量	GTFP	LQ	GDP
GTFP(−1)	系数	−0.530*	1.038**	−0.228*
	标准差	0.312	0.487	0.182
	系数 t 值	−1.703	2.132	−1.251
LQ(−1)	系数	−0.037	−0.530**	−0.055*
	标准差	0.139	0.217	0.081
	系数 t 值	−0.267	−2.438	−0.671
GDP(−1)	系数	0.920*	−3.130***	−0.016*
	标准差	0.554	0.867	0.324
	系数 t 值	1.660	−3.612	−0.048
常数	系数	−0.035	0.085**	0.043***
	标准差	0.025	0.039	0.015
	系数 t 值	−1.415	2.176	2.929

注:*、**、*** 分别代表10%、5%、1%的显著性水平(双侧 t 检测,临界值分别为1.645,1.96,2.576)。

依据表5得出了主营业务收入区位熵(LQ)、绿色全要素生产率(GTFP)以及新疆地区生产总值(GDP)之间存在的相互关系,见式(4)。

$$\begin{cases} LQ_t = -0.53LQ_{t-1} - 3.13GDP_{t-1} + \\ \quad 1.038GTFP_{t-1} + 0.085 \\ GTFP_t = -0.037LQ_{t-1} + 0.92GDP_{t-1} - \\ \quad 0.53GTFP_{t-1} - 0.035 \\ GDP_t = -0.055LQ_{t-1} - 0.016GDP_{t-1} - \\ \quad 0.228GTFP_{t-1} + 0.043 \end{cases} \tag{4}$$

4.4 VAR模型稳定性检验

VAR模型的关键稳定性条件在于其对应的特征方程的特征根绝对值均严格小于1,这一条件确保了模型动态行为的收敛性,进而保障了模型的稳定性,有效避免了伪回归的风险。VAR模型特征根检验如图3所示,通过将特征根的倒数投射到复平

面进行可视化检验。由图 3 可知,所有的点都落在单位圆内,表明 VAR 模型满足稳定性要求,模型可以进一步做脉冲响应分析和方差分解[14]。

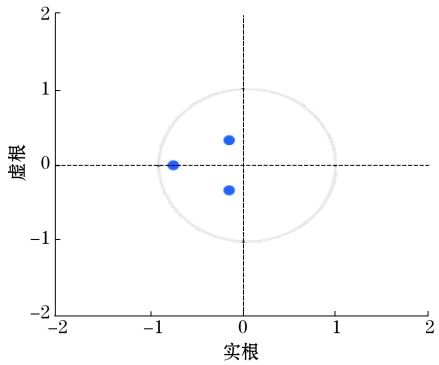


图 3 VAR 模型特征根检验

Fig.3 Eigenvalue test of VAR model

4.5 方差分解与贡献度分析

借助方差分解方法,能够量化各个结构冲击对内生变量变化方差的贡献率,进而评估不同冲击的相对重要性。因此,方差分解为 VAR 模型中各随机扰动对变量影响的相对重要性提供了有力的数据支撑,有助于深入理解变量间的相互影响机制。针对新疆地区生产总值、绿色全要素生产率与主营业务收入区位熵进行方差分解,结果见表 6。

表 6 方差分解结果

Table 6 Variance decomposition results

阶数	标准差	贡献率/%		
		LQ	GDP	GTFP
1	0.047	0.124	23.338	76.538
2	0.056	14.146	17.476	68.378
3	0.057	15.082	18.433	66.485
4	0.057	15.031	18.583	66.386
5	0.057	15.047	18.599	66.354
6	0.057	15.045	18.613	66.342
7	0.057	15.043	18.626	66.331
8	0.057	15.042	18.635	66.323
9	0.057	15.041	18.640	66.319
10	0.057	15.040	18.643	66.316

由表 6 可知,GTFP 的贡献率普遍超过了 66%,这凸显了绿色效益在维持系统稳定性中的核心作用。因此,为了确保长期均衡,环境规制措施必须保持连续性,避免因短期波动而破坏这一稳定性。此外,LQ 的贡献度持续提升,表明产业集聚与绿色效益的协同效应随时间推移而不断增强。

4.6 实证结果分析

短期阵痛:产业集群聚集度提升(区位熵)初期可能导致绿色效益波动,如资源争夺和产业生态失衡。新疆矿业年耗水量达 18.6 亿 m^3,占工业用水总量的 62%,对本就脆弱的水资源平衡造成较大压力,且园区能源系统过于依赖传统化石能源,未形成有效的循环利用网络,工业废水回用率不足 50%,单位产值碳排放强度达 3.2 t/万元,显著高于 2.1 t/万元的全国矿产均值。长期增益:长期通过技术共享和专业化分工,推动清洁技术扩散,显著提升绿色效率,进而驱动经济增长[15-17]。

新疆矿业产业集聚和绿色发展对其区域经济增长具有持续贡献,绿色全要素生产率(GTFP)的提升可降低环境成本、提高资源利用率,进而吸引高附加值产业集聚,形成“绿色技术-产业集聚-经济增效”的正反馈循环。矿业产业集聚为绿色发展提供了技术、资金和人才支持,助力绿色技术的研发和应用。GTFP 滞后项系数显著为正,表明绿色发展水平的提高能进一步增强矿业产业的竞争力,吸引更多企业集聚,推动产业集聚水平持续发展[18-20]。

5 结论与政策建议

5.1 结论

针对新疆矿业绿色全要素生产率(GTFP)和矿业产业集群集聚程度的测度,以及“绿色-聚集-经济”的动态关系实证研究,得出以下总体结论。

(1) 在结构层面,采选业集聚虚胖,深加工断链导致“规模不经济”。新疆矿业及加工产业集群总体上呈现采选业高集聚,深加工薄弱的特点,亟需上下游产业实现“采选-冶炼-深加工”环节的垂直整合与协同聚集,提升主营业务收入区位熵,推动产业链高附加值环节的集聚。

(2) 在效率层面,新疆矿业呈现“高集聚、低绿色、弱链条”特征,GTFP 落后于全国其他省份。技术瓶颈与资源错配制约绿色发展,这种地区间的差异提示生态脆弱区在未来的经济发展中,需更加注重绿色理念,推动其绿色全要素生产率的提升,避免过度集聚导致环境承载力下降。

(3) 在机制层面,短期内需规避集聚的生态风险,长期则需依托绿色技术构建“绿色技术-产业集聚-经济增效”的正反馈机制。短期内,政府需规避过度集聚导致的绿色效益损耗,如实施严格的环境规制;长期则需通过绿色基建投资和产业政策引导,如建设产业生态园区,强化集聚与绿色的协同效应。

5.2 “四位一体”政策建议

5.2.1 重构生态增值的低碳产业园区

借鉴卡伦堡、蔚山、川崎等国外典型生态产业园区绿色化和低碳化的发展模式,将废弃矿山转型为生态友好产业园区;建立“生物基因库+复垦+碳汇交易”模式,开发 AI 生态修复系统实时监测并生成方案,衔接碳市场交易;发展可再生能源与特色产业融合[21],推行“绿电配额-采矿权”捆绑机制,参考智利 Atacama 铜矿 70%绿电覆盖率经验,通过补贴政策激励企业提升绿电消纳比例,并将其与采矿权续期挂钩[22-25]。

5.2.2 赋能绿色智能矿山技术

围绕矿山安全体系智能管控、低品位选矿、低能耗冶炼等关键核心技术,重点研发氢能采矿装备、尾矿资源化利用、智能矿山系统;深化 AI、大数据、物联网与矿业技术的融合[26-28]。矿企可参考新疆已试行的成功案例,例如紫金矿业的智能采矿可视化系统、伽师铜辉矿业的膏体胶结充填技术、克拉玛依的氢燃料电池矿山运输车试点、东天山铜镍矿带的量子传感矿物探测智能勘探试点以及特变电工天池能源的数字孪生智慧矿山系统,将人工智能的故障检测、诊断及超前干预技术应用于实际生产中[29]。

5.2.3 耦合关联产业协同网络

针对矿业集群空间割裂与网络协同低效问题,建设“矿链云”数据平台,实现“物理分散+云端聚合”的柔性虚拟网络架构;横向耦合关联产业,如“矿业+农业”融合开发项目、“矿业+文旅”融合项目、“矿业+新能源耦合开发”项目等,使绿色矿产业集群从“集而不群”转向“链式协同”。可借鉴和田玉矿文旅融合集群、矿区修复后转型非遗研学基地和富蕴可可托海三号矿脉文旅开发案例[30-32]。

5.2.4 构建绿色全产业链韧性体系

为解决集群结构单一、产业链附加值低的问题,改变单一线性产业结构,支持产业链链主企业构建低碳供应链,逐步形成集矿产品开采、矿产品原料供应、矿产品综合开发利用为一体的矿业全产业链[33-34]。例如,巴州若羌锂产业链包括上游锂资源开采、中游锂盐加工及下游锂电池制造等环节,还需开发下游深加工产品,发展镍氢电池、镍镉电池等产品,提升产业链供应链韧性和安全水平,构建以初加工为基础、精深加工为主导的绿色矿业产业体系。

参考文献(References):

[1] 易建洲,王啸祎,林德才,等.新一轮找矿突破战略行动背景下西藏矿业绿色发展建议[J].中国矿业,2023,32(7):45-49.
Yi Jianzhou, Wang Xiaoyi, Lin Decai, et al. Suggestions for green development of mining industry in Xizang against the background of a new round of strategic breakthrough in mineral exploration[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(7):45-49.

[2] 邓元媛,孙文萍,辛梦远.产业集群视角下独立工矿区转型策略研究:以晋城“老三矿”为例[J].中国矿业,2021,30(4):64-69.
Deng Yuanyuan, Sun Wenping, Xin Mengyuan. Industrial cluster research on transformation and upgrade strategy of independent industrial and mining area : taking Jincheng three old mines as an example[J]. China Mining Magazine, 2021,30(4):64-69.

[3] 张明.大型煤炭企业绿色低碳发展路径探索与实践[J].中国矿业,2023,32(增刊 2):44-48.
Zhang Ming. Exploration and practice of green and low-carbon development path for large coal enterprises[J].China Mining Magazine,2023,32(Suppl.2):44-48.

[4] 王思琪,陈应龙,姚远燕.人工智能如何提升绿色全要素生产率:来自中国 273 个城市的经验证据[J].商业经济,2025(6):36-40+61.
Wang Siqi, Chen Yinglong, Yao Yuanyan. How does artificial intelligence improve green total factor productivity: empirical evidence from 273 cities in China[J]. Business & Economy,2025(6):36-40+61.

[5] 季苏颖,卢晟.江苏省产业集群高质量发展路径研究[J].江苏科技信息,2023,40(5):9-12+37.
Ji Suying, Lu Sheng. Research on the high-quality development path of industrial clusters in Jiangsu province [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2023, 40(5):9-12+37.

[6] 谢国良,廉开元,严明林,等.生态脆弱矿区矿井水特征及资源化适宜性研究[J].矿业研究与开发,2025,45(4):278-288.
Xie Guoliang, Lian Kaiyuan, Yan Minglin, et al. Study on characteristics of mine water and suitability for resource utilization in ecologically fragile mining area[J]. Mining Research and Development,2025,45(4):278-288.

[7] 郭万达,马朝良.关于伊犁州战略性新兴产业集群发展的思考[J].新疆社科论坛,2023(4):11-21.
Guo Wanda, Ma Chaoliang. To further develop the strategic emerging industry clusters in Yili prefecture[J]. Tribune of Social Sciences in Xinjiang,2023(4):11-21.

[8] 赵梦楠.创新型产业集群对绿色全要素生产率的影响研究[D].大连:东北财经大学,2023.
Zhao Mengnan. Research on the impact of innovative industrial clusters on green total factor productivity[D]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics,2023.

[9] 张玉琴.国家级大数据综合试验区试点政策对绿色全要素生产率的影响研究[D].太原:山西财经大学,2023.
Zhang Yuqin. Research on the impact of pilot policies of national big data comprehensive pilot area on green total factor productivity[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics,2023.

[10] Oh D H. A global malmquist-luenberger productivity index [J].Journal of Productivity Analysis,2010,34(3):183-197.

[11] 王超.内蒙古矿产资源产业集聚与区域经济增长研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2016.
Wang Chao. Research on the mineral resources industrial agglomeration and regional economy growth[D]. Hohhot: Inner Mongolia University,2016.

[12] 马莉.我国绿色矿山发展水平评价及发展模式与长效机制研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
Ma Li. Study on the development level evaluation, development modes and long-term mechanism of China's green mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.

[13] 柳晓娟,侯华丽,孙映祥,等.关于中国绿色矿业内涵与实现路径的思考[J].矿业研究与开发,2021,41(10):180-186.
Liu Xiaojuan, Hou Huali, Sun Yingxiang, et al. Thinking about the connotation and realization path for green mining in China[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10):180-186.

[14] 郑志伟.美联储加息对中国宏观经济的溢出效应:基于 VAR 模型的实证研究[J].中国市场,2024(3):7-11.
Zheng Zhiwei. Spillover effects of the federal reserve's interest rate hikes on China's macro economy: an empirical study based on the VAR model[J]. China Market,2024(3): 7-11.

[15] 钟琛,胡乃联,段绍甫,等.有色金属绿色矿山评价体系研究[J].矿业研究与开发,2019,39(7):146-151.
Zhong Chen, Hu Nailian, Duan Shaopu, et al. Research on evaluation system of green mines in non-ferrous metal industry[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7):146-151.

[16] 陈苗苗.陕西省油气资源产业集群发展模式研究[D].西安:西安石油大学,2021.
Chen Miaomiao. A study on development model of oil and gas resources industrial cluster in Shaanxi province[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University,2021.

[17] 陈莲芳,严良.中国西部矿产资源产业集聚度与竞争力研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(5):31-37.
Chen Lianfang, Yan Liang. Research on the relevance between the degree of mineral industrial agglomeration and industrial competitiveness in China's western region[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(5):31-37.

[18] 金晓武.加快培育绿色新能源产业集群[J].浙江经济,2023(1):70-71.
Jin Xiaowu. Accelerate the cultivation of green new energy industry cluster[J]. Zhejiang Economy,2023(1):70-71.

[19] 丁莉.广东打造世界级绿色石化产业集群[J].宁波经济(财经视点),2024(2):16.
Ding Li. Guangdong builds a world-class green petrochemical industry cluster[J]. Ningbo Economy (Financial View), 2024(2):16.

[20] 陈志涛,龚德波,邹一铭.旬阳:打造绿色循环产业集群[N].陕西日报,2023-06-05(005).
Chen Zhitao, Gong Debo, Zou Yiming. Xunyang: build a green circular industry cluster[N]. Shaanxi Daily,2023-06-05(005).

[21] 蔡绍洪,廖文华.循环产业集群是西部跨越式绿色发展的有效途径[J].改革与战略,2012,28(9):81-84.
Cai Shaohong, Liao Wenhua. Circular industrial cluster is one of the most efficient ways to realize the leap-forward and green development in Western China[J]. Reform and Strategy,2012,28(9):81-84.

[22] Ning L T, Wang F, Li J. Urban innovation, regional externalities of foreign direct investment and industrial agglomeration: evidence from Chinese cities[J]. Research Policy,2016,45(4):830-843.

[23] Phelps N A, Wijaya H B. Joint action in action? local economic development forums and industry cluster development in Central Java, Indonesia[J]. International Development Planning Review,2016,38(4):425-449.

[24] Sosnovskikh S. Industrial clusters in Russia: the development of special economic zones and industrial parks [J].Russian Journal of Economics,2017,3(2):174-199.

[25] Ekaterina T, Ari V A. Global connectedness and local innovation in industrial clusters[J]. Journal of International Business Studies,2018,49(6):706-728.

[26] 柳晓娟,侯华丽,武强,等.生态文明背景下绿色矿山企业经济效益的路径分析[J].中国矿业,2022,31(8):44-50.
Liu Xiaojuan, Hou Huali, Wu Qiang, et al. Path analysis of economic benefits of green mining enterprises based on ecological civilization construction[J]. China Mining Magazine,2022,31(8):44-50.

[27] 刘国昊,崔育菘,姜立华,等.辽宁省国家级绿色矿山建设现状及发展对策研究[J].中国矿业,2023,32(增刊1):44-47.
Liu Guohao, Cui Yusong, Jiang Lihua, et al. Construction status and development countermeasures research of national green mine construction in Liaoning Province[J]. China Mining Magazine,2023,32(Suppl.1):44-47.

[28] 沈琳.绿色矿山建设伦理价值体系重要性研究[J].中国矿业,2023,32(增刊1):40-43.
Shen Lin. Study on importance of ethical value system in green mine construction[J]. China Mining Magazine,2023, 32(Suppl.1):40-43.

[29] 王箫航,赵连荣,劳昕.资源型城市矿产-经济-矿山环境耦合协调发展研究[J].矿业研究与开发,2025,45(5):277-288.
Wang Xiaohang, Zhao Lianrong, Lao Xin. Coupling coordination development of mineral-economy-mine environment in resource-based cities[J]. Mining Research and Development,2025,45(5):277-288.

[30] 崔娜.矿产资源开发效率与经济高质量发展耦合协调关系研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):217-224.
Cui Na. Research on coupling coordination of relationship between mineral resources exploitation efficiency and high-quality economic development[J]. Mining Research and Development,2023,43(10):217-224.

[31] 强海洋,高兵,郭冬艳,等.碳中和背景下矿业可持续发展路径选择[J].中国国土资源经济,2021,34(4):4-11.
Qiang Haiyang, Gao Bing, Guo Dongyan, et al. Options for sustainable development of mining industry under the background of carbon neutrality[J]. Natural Resource Economics of China,2021,34(4):4-11.

[32] 张德霖.从系统观视角和生态文明建设逻辑探索矿产资源有效管理与矿业新发展[J].中国国土资源经济,2021,34(1):4-10.
Zhang Delin. Exploring the effective management of mineral resources and the new development of mining from the perspective of system theory and the logic of eco-civilization construction[J]. Natural Resource Economics of China,2021,34(1):4-10.

[33] 胡振琪,肖武.关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考:基于生态修复视角[J].煤炭科学技术,2020,48(4):35-42.
Hu Zhenqi, Xiao Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration[J]. Coal Science and Technology,2020,48(4):35-42.

[34] 汪学彬,孙呈鹏,杨沛,等.中国矿山绿色转型与区域发展不平衡性问题分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):135-140.
Wang Xuebin, Sun Chengpeng, Yang Pei, et al. Analysis on transformation and the imbalance of regional development of mining green in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021,32(1):135-140.