文章编号：1003-1421(2026)02-0193-12
引用格式：花均南，李梦如.长江经济带冷链物流绿色发展效率评价[J].铁道运输与经济，2026，48(2)：193-204.
HUA Junnan，LI Mengru. Green Development Efficiency Evaluation of Cold Chain Logistics in Yangtze River Economic Belt[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：193-204.

长江经济带冷链物流绿色发展效率评价

花均南，李梦如

(桂林电子科技大学 商学院，广西 桂林 541000)

摘 要：为推动长江经济带冷链物流绿色、高效及可持续发展，本研究科学构建冷链物流绿色发展效率评价指标体系，首先采用非期望产出超效率SBM(Slack-Based Measure)模型对2018—2022年长江经济带11个省份进行静态效率分析，然后用GML(Global Malmquist-Lunberger)指数方法对其进行动态分析，并构建“静态超效率SBM值-动态GML指数值”矩阵散点图综合评估其发展优势及不足，结果如下。①整体上研究期间长江经济带冷链物流绿色发展效率水平并不高；区域上效率呈现上游<中游<下游的趋势；省份中仅上海和安徽达到有效状态。②效率分解数据显示，技术进步与规模效率的提高共同促进冷链物流绿色发展效率提升，其中技术进步发挥更主要作用。③通过矩阵分析将省份分为引领型、潜力型、低谷型和稳定型4种发展类型。研究最后从多维度出发提出促进长江经济带冷链物流绿色发展效率提升的建议。

关键词：长江经济带；冷链物流；绿色发展效率；超效率SBM；GML指数；非期望产出
中图分类号：U2-9 **文献标识码**：A DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250324002

Green Development Efficiency Evaluation of Cold Chain Logistics in Yangtze River Economic Belt

HUA Junnan，LI Mengru

(School of Business, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541000, Guangxi, China)

Abstract: To promote the green, efficient, and sustainable development of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt, an evaluation index system was scientifically constructed for the green development efficiency of cold chain logistics. First, a super-efficiency slack-based measure (SBM) model with undesirable outputs was adopted to analyze the static efficiency of 11 provinces in the Yangtze River Economic Belt from 2018 to 2022. Then, the global Malmquist-Luenberger (GML) index method was applied for dynamic analysis. Furthermore, a “static super-efficiency SBM value-dynamic GML index value” matrix scatter plot was constructed to evaluate the development advantages and disadvantages comprehensively. The results show that: ① The overall green development efficiency level of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt remains relatively low during the study period; the efficiency presents a trend of upstream<midstream<ownstream; only Shanghai and Anhui achieve effective efficiency status. ② Efficiency decomposition data indicate that technological progresses and scale efficiency improvement jointly promote the

收稿日期：2025-03-24 **修订日期**：2025-08-24
通信作者：花均南(1977—)，男，广西桂林人，桂林电子科技大学商学院教授。
基金项目：广西壮族自治区哲学社会科学规划研究课题(17FJY009)

enhancement of green development efficiency of cold chain logistics, with technological progresses playing a dominant role. ③ The matrix analysis categorizes the provinces into four distinct development types: leading type, potential type, trough type, and stable type. Finally, multidimensional recommendations are proposed to improve the green development efficiency of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; Cold Chain Logistics; Green Development Efficiency; Super-Efficiency SBM; GML Index; Undesirable Output

0　引言

在全球气候治理步伐加速与我国“碳达峰、碳中和”战略深入实施的双重驱动下，冷链物流作为能源密集型产业，高能耗、高排放、低效率等短板愈发凸显，迫切需要低碳转型[1]。国家层面相继出台《“十四五”冷链物流发展规划》《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》等政策，均强调了促进冷链物流设施的数字化、标准化、绿色化转型。冷链物流绿色发展效率是指冷链物流行业在追求经济效益的同时，注重资源节约和环境保护，实现低碳、高效、可持续的发展，是衡量冷链物流绿色发展程度的关键，因此研究冷链物流绿色发展效率对其绿色转型十分重要。长江经济带横跨我国东中西部11个省份，区位优势显著，作为中国经济的重要引擎，其冷链物流需求快速增长，但同时也面临着能耗高、效率低等绿色发展问题，成为制约该区域乃至全国绿色物流发展的关键因素。在此背景下，研究长江经济带冷链物流绿色发展效率，对优化资源配置、促进区域协调和绿色经济发展具有一定意义。

目前关于冷链物流效率测度的研究已经取得一定成果，专家学者采用不同方法、对不同研究区域展开效率测度。在研究方法上，尚晓彤[2]和张璐[3]均使用CCR模型和BCC模型分析农产品冷链物流静态效率，用Malmquist指数分析动态效率；秦小辉等[4]运用三阶段DEA模型测算我国生鲜农产品冷链物流效率；李林强等[5]利用BAM三阶段模型对冷链物流效率进行全面评价；Sun等[6]和李军[7]运用TOPSIS模型，对冷链物流企业的供应链效率进行评价；方新等[8]用熵权法构建了包含3个维度的指标体系，衡量各省市冷链发展水平并研究其时空演变特征。在研究区域上，He等[9]对我国主要城市集群进行区域冷链物流的测度分析；彭文等[10]对我国中部6省份在碳约束下的生鲜农产品冷链物流效率进行分析；臧兴兵等[11]对我国30个省份(不含港澳台、西藏)的生鲜农产品冷链物流效率进行测度分析。另外，在对绿色发展效率的测度上，岳立等[12]与杨月等[13]均基于超效率SBM模型，分别聚焦于黄河流域沿线城市和浙江山区26县进行绿色发展效率测度；冯朝睿等[14]利用超效率SBM模型测度云南省农产品流通业绿色发展效率水平；范正根等[15]分别构建SE-SBM模型、GML指数及其分解指数模型对区域绿色发展水平进行静态和动态分析；李垚等[16]采用GML指数模型测度农业绿色发展动态效率；徐超毅等[17]分别运用超效率SBM模型和GML指数模型对华东地区“六省一市”的物流业绿色发展效率进行静态和动态双维度测度；孟珊珊等[18]运用超效率SBM模型对生鲜农产品冷链物流绿色效率进行测度，采用Dagum基尼系数进行空间差异分析。

从上述研究中发现，已有文献在冷链物流效率测度上已形成多方法(如DEA及其衍生模型、TOPSIS、熵权法)与多维度(如城市群、省域、全国层面)的分析框架，在绿色发展效率测度方面超效率SBM模型和GML指数的应用也具有可行性与实践价值，但冷链物流效率与绿色发展理念的融合仍存在一定局限。具体表现为：其一，受传统模型方法约束，现有指标体系多聚焦经济产出与规模产出，却忽视冷链物流运作中产生的碳排放等非期望产出，同时较少将能源消耗等环境压力纳入投入指标，导致效率评估结果偏离“环境-经济”协同优化的绿色发展目标；其二，尽管超效率SBM与GML模型已被应用于农业、物流业、区域经济等领域的绿色发展效率测度，但其综合应用在冷链物流领域的绿色发展研究尚且较少；其三，研究区域多集中于全国层面或局部省份，而对兼具“高冷链需求”与“生态优先”双重属性的长江经济带的关注不足。鉴于此，本研究聚焦长江经济带，通过科学

构建冷链物流绿色发展效率评价指标体系，综合运用非期望产出超效率SBM模型与GML指数模型分别进行静态效率分析和动态演变研究，旨在为长江经济带乃至全国冷链物流的绿色发展提供理论依据与实践指导，同时丰富这2种研究方法在冷链物流绿色发展领域的应用。

1　研究方法与评价指标体系

1.1　研究方法

1.1.1　非期望产出超效率SBM模型

数据包络分析(DEA)是Charnes、Cooper和Rhodes于1978年提出的一种非参数效率估计方法，可衡量多投入多产出情况下决策单元(DMU)的相对效率[19]。传统DEA模型因采用径向角度测度效率，易导致测度的效率结果产生偏差。为克服此局限，Tone[20]在2001年提出了考虑投入过剩和产出不足SBM模型，通过引入松弛变量提升了效率评价的精确性，并能处理非期望产出。然而，对于多个效率值为1的DMU，SBM模型仍无法区分，为此Tone[21]于2002年进一步提出了超效率SBM模型。

本研究采用能够处理非期望产出的超效率SBM模型对冷链物流绿色发展效率进行测度[22]，构建模型如下。

$$\rho_C^* = \min \frac{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{\overline{x_i}}{x_{io}}}{\frac{1}{l_1+l_2}\left(\sum_{q=1}^{l_1}\frac{\overline{y^g}}{y^g_{qo}}+\sum_{q=1}^{l_2}\frac{\overline{y^b}}{y^b_{qo}}\right)}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\overline{x} \geqslant \sum_{j=1,\ j\neq 0}^{n} x_{ij}\lambda_j & i=1,\ 2,\ \ldots,\ k\\ \overline{y^g} \leqslant \sum_{j=1,\ j\neq 0}^{n} y^g_{qj}\lambda_j & q=1,\ 2,\ \ldots,\ l_1\\ \overline{y^b} \geqslant \sum_{j=1,\ j\neq 0}^{n} y^b_{qj}\lambda_j & q=1,\ 2,\ \ldots,\ l_2\\ \lambda_j \geqslant 0,\ \overline{x} \geqslant x_o,\ \overline{y^g} \leqslant y^g_o,\ \overline{y^b} \geqslant y^b_o,\ \overline{y^g} \geqslant 0,\ \overline{y^b} \geqslant 0\end{cases} \tag{1}$$

式中：ρ_C^*为超效率值；n为决策单元个数；λ_j为决策单元j的权重；x_{i0}，y^g_{q0}和y^b_{q0}分别代表投入指标、期望产出指标和非期望产出指标；k，l_1和l_2为对应指标个数；$\overline{x}$，$\overline{y^g}$和$\overline{y^b}$则分别对应上述指标的松弛变量[23]。

1.1.2　GML指数模型

超效率SBM模型侧重于静态效率的评估，能有效区分并排序有效决策单元，但对动态效率评估有限。而Malmquist模型可以用于分析不同时期决策单元的效率动态变化情况，但其并未将非期望产出纳入考虑范围。因此Chung等[24]于1997年引入方向性距离函数，将非期望产出纳入效率测度形成了Malmquist-Luenberger(ML)指数模型，但其缺陷是仅能以相邻两期技术前沿为基准进行效率测算，长期效率趋势分析受限。为进一步解决此模型跨期不可比的局限性，Oh[25]在2010年创建了Global Malmquist-Luenberger(GML)指数模型，构建了全局技术前沿，将所有时期的生产技术纳入一个统一的参照系下进行分析，可以精确计算包含非期望产出的动态效率，包括技术效率变化、技术进步以及规模效率变化等多个维度的动态信息。

本研究参考蒲俊[1]的研究构建GML指数模型，具体原理如式(2)所示。

$$GML_t^{t+1}(x^t,\ y^t,\ b^t) = \frac{1+D^g(x^t,\ y^t,\ b^t)}{1+D^g(x^{t+1},\ y^{t+1},\ b^{t+1})} = \frac{1+D^t(x^t,\ y^t,\ b^t)}{1+D^{t+1}(x^{t+1},\ y^{t+1},\ b^{t+1})} \times \left[\frac{1+D^g(x^t,\ y^t,\ b^t)}{1+D^t(x^t,\ y^t,\ b^t)} \times \frac{1+D^{t+1}(x^{t+1},\ y^{t+1},\ b^{t+1})}{1+D^g(x^{t+1},\ y^{t+1},\ b^{t+1})}\right] = GTC \times GEC = GTC \times (GPEC \times GSEC) \tag{2}$$

式中将GML指数分解为全域技术进步指数(GTC)和全域技术效率变化指数(GEC)[26]。当考虑进一步的影响因素时，又可参考FGNZ分解方法，在规模报酬不变前提下将GEC分解为全域纯技术效率指数(GPEC)和全域规模效率指数(GSEC)[1]。GML分解效率指标阈值经济含义对照表如表1所示。

1.2　指标体系构建

1.2.1　评价指标选取

在对冷链物流绿色发展效率进行评价时，需要构建科学合理的评价指标体系，总结现有文献选取的投入产出指标如表2所示。

参考以上现有文献的研究成果，本研究以全要素生产率理论和生态效率理论为基础，遵循理论适配性、现实针对性和数据可得性的原则，对长江经济带冷链物流绿色效率的指标进行选取，构建评价指标体系如表3所示。

表1　GML分解效率指标阈值经济含义对照表

Tab.1　Economic meanings of GML decomposition efficiency index thresholds

指标数值	经济含义	指标数值	经济含义
GTC>1	行业整体技术水平提升	*GTC*<1	技术退步或创新不足
GEC>1	管理水平提升，资源配置合理	*GEC*<1	管理退化或规模失配
GPEC>1	管理水平提升	*GPEC*<1	管理能力退化
GSEC>1	规模经济效应显现(接近最优规模)	*GSEC*<1	规模不经济(过大或过小)

表2　现有文献选取的投入产出指标

Tab.2　Input-output indicators selected in existing literature

文献	投入指标	产出指标
尚晓彤[2]	冷库容量、固定资产投资、产业从业人员	货运量、农村居民人均可支配收入、人均农产品产量
李林强等[5]	冷藏车保有量、冷库容量	冷链货运量
He等[9]	固定资产投资、产业从业人员、碳排放、公路里程、冷库容量、冷藏车保有量	冷链物流总量、冷链物流总需求
邓梦杰等[22]	产业从业人员、固定资产投资、能源消费总量	产业增加值、货物周转量、产业碳排放量
李义华等[27]	产业从业人员、固定资产投资	产业总额、货运量、货物周转量

表3　评价指标体系

Tab.3　Evaluation index system

变量类型	选取变量	指标名称
投入变量	劳动要素投入	产业从业人员数/人
	资本要素投入	冷库容量/万t 冷藏车保有量/辆
	能源要素投入	能源消费总量/万t标准煤
产出变量	规模产出	货物周转量/(亿t·km)
	经济产出	产业增加值/亿元
	非期望产出	产业碳排放量/万t

（1）投入指标。①劳动要素投入：以冷链物流产业从业人员数表征该行业的人力资源供给水平，是维持仓储、运输、配送等核心环节运营的基础生产要素。②资本要素投入：冷库容量与冷藏车保有量属于冷链物流行业的核心固定资产投资，因此将二者作为资本要素投入。冷库容量衡量冷链仓储基础设施的静态服务能力，体现区域冷链物流网络节点的覆盖密度与承载效率；冷藏车保有量代表冷链运输设备的动态服务能力，直接影响温控货物的中长途运输时效性与质量安全性。③能源消费总量：冷链物流是典型的高耗能行业，能源投入规模直接关联碳排放强度，该指标的选取契合绿色发展“降耗增效”的核心诉求。

（2）产出指标。①规模产出：货物周转量衡量物流服务规模，反映冷链网络的空间覆盖与经济价值转化能力，属于期望产出指标。②经济产出：产业增加值表征冷链产业链的经济附加值，体现行业对区域生产总值的贡献，属于期望产出指标。③非期望产出：产业碳排放量可以量化冷链活动对气候变化的负外部性，呼应“双碳”目标下“减排”的研究需求。

1.2.2　数据来源及处理

当前我国的产业分类中未划分“物流业”这一专门分类[28]，考虑到现代物流产业的特点，本研究参考学术界通用的做法，选用交通运输、仓储及邮政业数据作为物流业数据进行研究[29]。研究对象是物流业分支——冷链物流，除了投入指标中的“冷藏车保有量”和“冷库容量”是冷链物流专属指标且有独立统计外，其余指标在公开统计中大多缺乏专门的统计核算。因此“产业从业人员数”“能源消费总量”“货物周转量”“产业增加值”“产业碳排放量”这些指标均以交通运输、仓储、邮政业数据为基础，通过系数折算来代替对应冷链物流行业指标。参考邓梦杰等[22]和王俊文[30]的研究，构建折算系数K如式(3)所示，其中冷链物流总额与中国社会物流总额数据均来自当年《冷链物流发展报告》。

$$K=\frac{\text{当年冷链物流总额}}{\text{当年中国社会物流总额}} \tag{3}$$

长江经济带部分省份统计年鉴2024版并未出版，因此以2023版(统计年份为2022年)数据为最新数据进行研究，研究时间为2018—2022年。基础数据源自《中国统计年鉴》、各省历年统计年鉴、《中国冷链物流发展报告》、中关村绿色冷链物流产业联盟官网、CEADs及国家数据平台[22]。对全部原始数据进行清洗和处理工作，针对个别缺失数据则使用插值法补充，变量描述性统计如表4所示。

表4　变量描述性统计
Tab.4　Descriptive statistics of variables

指标类别	变量	均值	标准差	最大值	最小值
投入	产业从业人员数	6 070.180 4	2 513.614 2	11 251.154 8	2 018.466 6
	冷库容量	171.221 9	99.900 6	440.002 9	40.645 0
	冷藏车保有量	1 422.054 5	1 763.565 1	7 363.000 0	215.000 0
	能源消费总量	33.575 6	12.800 3	61.260 9	13.581 8
产出	货物周转量	178.268 7	187.996 1	817.302 5	24.871 9
	产业增加值	36.777 0	16.925 8	89.780 6	11.133 8
	产业碳排放量	63.604 3	24.231 2	115.915 4	25.661 1

2　实证分析

2.1　长江经济带冷链物流绿色发展效率静态分析

本研究运用Dearun软件，采用非径向非导向、规模报酬不变的超效率SBM模型，对2018—2022年长江经济带11个省份的冷链物流绿色发展效率进行测度，所得SBM效率值即为冷链物流绿色发展静态效率。长江经济带冷链物流绿色发展静态效率值如表5所示。

表5　长江经济带冷链物流绿色发展静态效率值
Tab.5　Static efficiency values of green development of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt

区域	年份					均值
	2018	2019	2020	2021	2022	
上海	0.478 3	0.542 3	0.896 8	1.019 3	1.040 5	0.795 4
江苏	0.414 5	0.434 9	0.471 5	0.536 0	0.535 9	0.478 6
浙江	0.612 2	0.693 9	0.686 8	0.735 1	0.760 3	0.697 7
安徽	1.032 8	1.068 1	1.007 1	1.053 2	1.055 4	1.043 3
江西	0.426 3	0.398 6	0.376 4	0.461 2	0.488 9	0.430 3
湖北	0.428 5	0.472 5	0.399 6	0.490 4	0.536 5	0.465 5
湖南	0.352 8	0.256 9	0.286 4	0.298 2	0.311 8	0.301 2
重庆	0.298 8	0.341 8	0.372 6	0.431 7	0.430 2	0.375 0
四川	0.242 4	0.244 7	0.257 0	0.278 0	0.289 6	0.262 3
云南	0.342 7	0.304 7	0.253 3	0.303 2	0.335 4	0.307 9
贵州	0.363 5	0.274 5	0.260 3	0.277 6	0.257 8	0.286 7
长江经济带	0.453 9	0.457 5	0.478 9	0.534 9	0.549 3	0.494 9
上游	0.316 2	0.274 6	0.256 8	0.286 3	0.294 3	0.285 6
中游	0.402 5	0.376 0	0.354 1	0.416 6	0.445 8	0.399 0
下游	0.634 5	0.684 8	0.765 5	0.835 9	0.848 0	0.753 7

2.1.1　绿色发展效率现状分析

表5中除单独计算长江经济带11个省份的绿色发展效率均值外，还按照地理位置和经济发展特点将其划分为下游(上海、江苏、浙江、安徽)、中游(江西、湖北、湖南)、上游(重庆、四川、贵州、云南)3个区域[31]，并逐年计算了各区域效率均值。为直观观测2018—2022年间上、中、下游区域的效率变化，绘制长江经济带冷链物流绿色发展静态效率均值变化趋势图如图1所示。

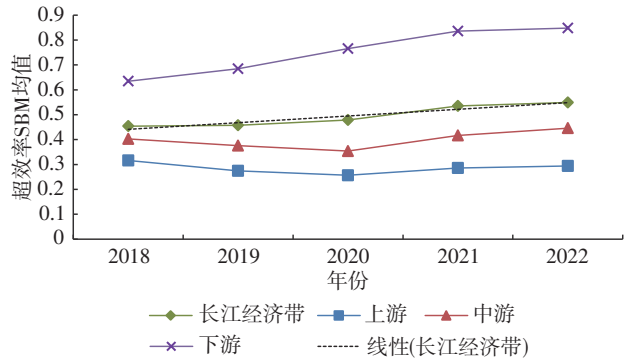

图1　长江经济带冷链物流绿色发展静态效率均值变化趋势图
Fig.1　Change trend of mean static efficiency of green development of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt

根据表5的测算结果以及图1所展示的变化趋势，从整体视角来看，长江经济带在5年间冷链物流的绿色效率平均值达到了0.494 9。尽管每年的效率均值都呈现出缓慢上升的态势，但平均水平仍然相对较低，这反映出该地区的冷链物流绿色发展程度并不高。分区域看，上、中、下游的冷链物流绿色发展效率均值分别为0.285 6，0.399 0和0.753 7，呈现下游>中游>上游的态势，说明区域之间存在一定差距。原因可能是下游地区经济更为发达，冷链物流基础设施更完善，绿色技术水平更高，管理经验更丰富，因此绿色发展效率更高。分省份看，各省效率均值中安徽省最高，为1.043 3，四川省最低，仅为0.262 3，说明安徽省的冷链物流绿色发展水平远高于四川省。安徽省5年的超效率SBM值始

终大于1，上海市在2021年和2022年大于1，表明这2个省份的冷链物流绿色发展位于长江经济带领先地位，究其原因可能是上海和安徽地理位置优越，运输便利，有利于冷链物流的发展，且在冷链物流技术创新和应用方面相较于其他省份做得更好。

2.1.2　绿色发展效率时空对比分析

本研究基于最大化类间差异并最小化类内差异的Jenks自然间断点分级法，将测算得到的超效率SBM值分为5个效率区间，以此直观展现地区间冷链物流绿色发展效率差异。2018年与2022年长江经济带冷链物流绿色发展效率对比图如图2所示。

由图2可知，2022年上海、江苏、江西、湖北、重庆5省份的冷链物流绿色发展效率较2018年实现了跨效率区间的提升，其效率提升的可能原因如下。上海、江苏依托长江三角洲一体化战略，率先落实《“十四五”冷链物流发展规划》中“四横四纵”骨干通道建设，促进了冷链物流绿色发展；湖北省印发《湖北省疫后重振补短板强功能冷链物流和应急储备设施工程三年行动实施方案(2020—2022年)》建设冷链物流设施项目122个，估算总投资257.82亿元；江西省印发了《江西省冷链物流发展规划(2018—2022)》，注重在提高基础设施的基础上，加快推进冷链物流标准化建设；而重庆在2019年开通了中欧班列冷链专线，有效提升了冷链物流运输时效。以上举措皆有利于促进冷链物流绿色化发展。

贵州的冷链物流效率经历了跨效率区间的降低，可能与其地理环境复杂，冷链物流基础设施建设难度大、成本高有关。而浙江、安徽、湖南、四川、云南效率值的波动幅度较小，同属于一个效率区间，说明其冷链物流绿色发展较为稳定。

2.2　长江经济带冷链物流绿色发展效率动态分析

2.2.1　动态效率GML指数

为探究冷链物流绿色发展效率的动态演变及构成特性，使用Dearun工具测算了长江经济带11个省份的冷链物流动态效率GML指数值。冷链物流绿色发展动态效率GML指数值如表6所示，冷链物流绿色发展动态效率GML指数变化趋势如图3所示。

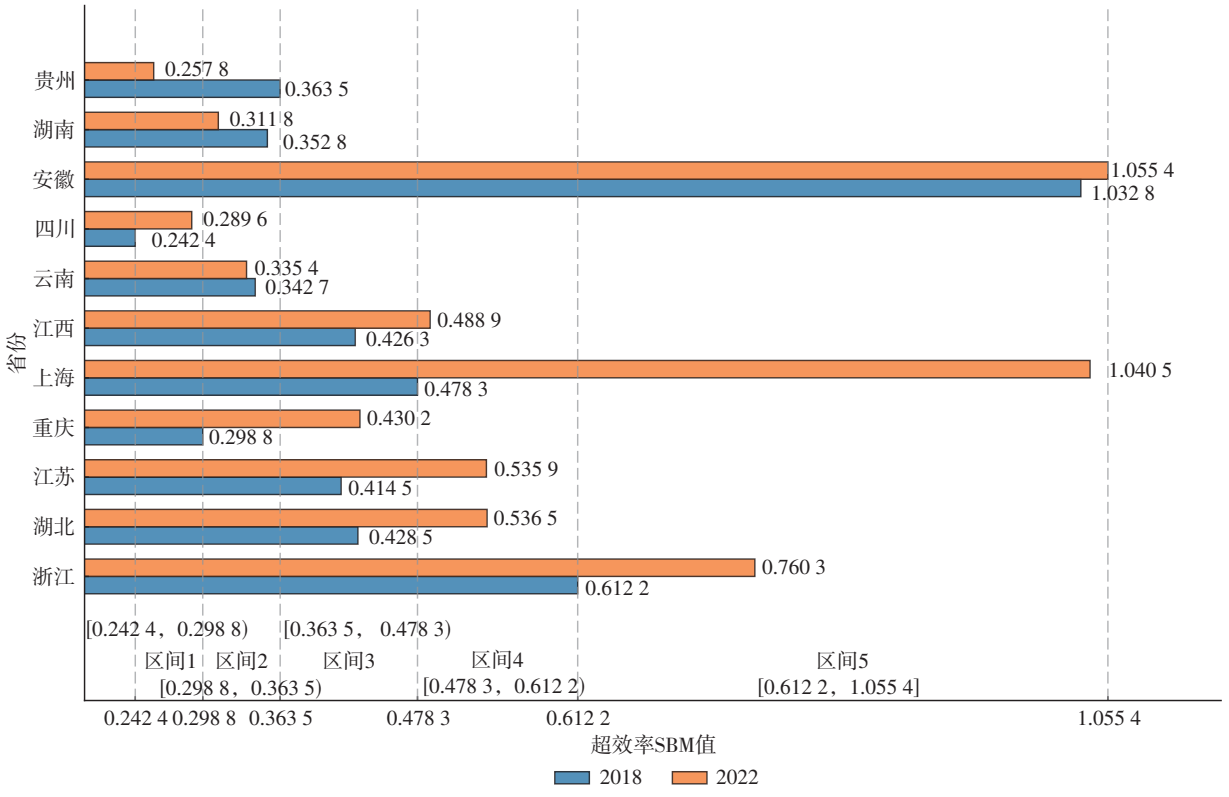

图2　2018年与2022年长江经济带冷链物流绿色发展效率对比图

Fig.2　Comparison of green development efficiency of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt between 2018 and 2022

表6　冷链物流绿色发展动态效率GML指数值

Tab.6　GML index values of dynamic efficiency of green development of cold chain logistics

GML指数值	年份				均值
	2018—2019	2019—2020	2020—2021	2021—2022	
上海	1.014 0	1.137 0	1.000 4	1.000 0	1.037 9
江苏	1.002 8	1.004 6	1.093 0	1.000 0	1.025 1
浙江	1.058 6	0.986 0	0.996 3	1.029 4	1.017 6
安徽	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
江西	1.001 0	0.981 1	1.072 4	1.030 9	1.021 4
湖北	1.142 1	0.850 7	1.168 5	1.183 0	1.086 1
湖南	0.982 5	0.988 3	1.034 9	1.026 5	1.008 1
重庆	1.015 9	1.013 1	1.049 9	1.016 0	1.023 7
四川	1.001 3	0.995 7	1.020 1	1.020 7	1.009 5
云南	1.398 6	0.702 3	1.252 9	1.136 5	1.122 6
贵州	0.990 0	0.995 0	1.019 5	1.008 3	1.003 2
均值	1.055 2	0.968 5	1.064 4	1.041 0	

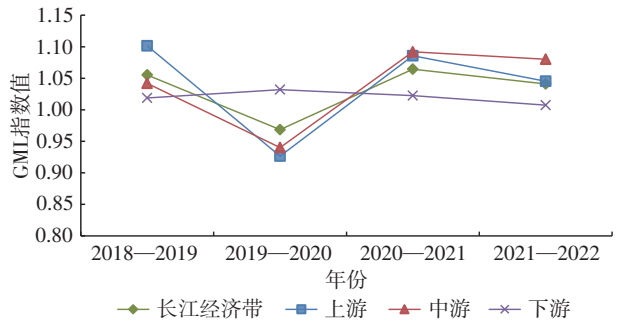

图3　冷链物流绿色发展动态效率GML指数变化趋势

Fig.3　Change trend of GML index of dynamic efficiency of green development of cold chain logistics

根据表6所示数据，长江经济带各省份在研究期间的冷链物流GML效率值呈轻微波动态势，2019—2020年间GML指数均值小于1，反映此期间多数省份呈现效率负增长；其余年份均值大于1，说明期间大多数省份效率呈正向增长趋势；其中2020—2021年的GML指数均值最大，说明这一阶段增幅最大，具体的省份数据也支持这一结论。

观察图3，比较3个区域的GML指数可以发现，下游地区动态效率增长较为平缓，2020年往后明显低于中游和上游的增长率，说明其冷链物流绿色效率达到较高水平，进入发展新常态，难以持续快速增长。相对而言，上游和中游的冷链物流效率基本维持在长江经济带的平均水平，说明发展较为稳定但仍存在提升空间；中、上游效率在2019—2020年迅速下降，这可能与新冠疫情冲击下冷链物流中断、能源管理效率下降有关。

2.2.2　GML指数分解

为探究冷链物流绿色发展效率提升或者下降的具体驱动因素，计算了2018—2022年长江经济带冷链物流绿色发展动态效率GML指数及其分解结果均值如表7所示，冷链物流绿色发展动态效率GML指数及其分解指数变化趋势如图4所示。

表7　2018—2022年长江经济带冷链物流绿色发展动态效率GML指数及其分解结果均值

Tab.7　Mean values of GML index and decomposition results of dynamic efficiency of green development of cold chain logistics in the Yangtze River Economic Belt from 2018 to 2022

地区	全域技术效率变化(GEC)		全域技术进步(GTC)	GML
	全域纯技术效率(GPEC)	全域规模效率(GSEC)		
上海	1.000 0	1.000 0	1.037 8	1.037 8
江苏	1.000 0	1.029 6	0.998 9	1.025 1
浙江	1.000 0	1.035 5	0.984 7	1.017 6
安徽	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
江西	1.000 1	1.012 1	1.010 0	1.021 3
湖北	1.000 0	1.057 9	1.030 7	1.086 1
湖南	0.973 2	0.997 6	1.057 1	1.008 1
重庆	1.000 0	0.998 3	1.025 7	1.023 7
四川	0.997 5	1.002 2	1.040 8	1.009 5
云南	1.000 0	1.000 0	1.122 6	1.122 6
贵州	1.000 0	1.013 4	0.992 8	1.003 2

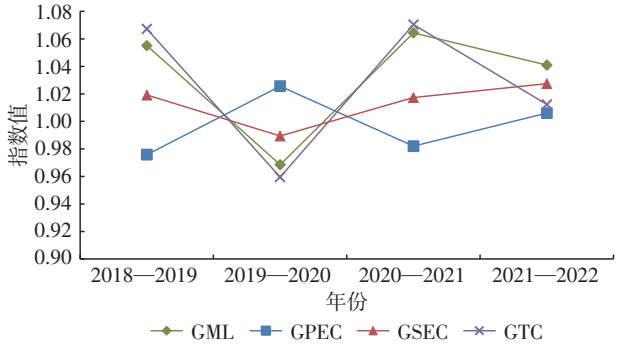

图4　冷链物流绿色发展动态效率GML指数及其分解指数变化趋势

Fig.4　Change trend of GML index and decomposition index of dynamic efficiency of green development of cold chain logistics

观察表7，大部分省份冷链物流GML效率值的增长均需要依靠GTC的提升，部分省份需要GSEC和GTC的共同驱动，说明技术进步与规模效率的提高共同促进冷链物流绿色发展效率提升，其中技术进步发挥更主要作用。图4显示，2018—2022年GML与GTC的发展趋势较为重合，因此进一步验证冷链物流绿色发展动态效率的提升与行业技术创新之间

存在密切的关联性。结合表7和图4看出，研究期间长江经济带的冷链物流GML指数均值为1.032 3，整体上呈现增长状态，但平均增长率为-0.17%，增长率为负主要是受到2019—2020年GML指数较大幅度下降的影响。2020—2021年，GML指数值增长最大，这得益于GSEC和GTC的共同进步，其中更主要的是依靠GTC进步。

对分解指数进行分析，纯技术效率变化指数(GPEC)均值为0.997 3接近1，表明长江经济带区域内冷链物流管理水平整体处于稳定状态，但尚未实现系统性突破；平均增长率为1.10%表明可能有局部改善趋势，反映部分区域或阶段的管理优化抵消了效率损失。例如研究期间浙江省市场监管局推广实施食品冷链智能温控系统，加强对冷库、冷藏运输车辆的管理，起到节能减排增效的效果。规模效率指数(GSEC)均值为1.013 3，平均增长率0.298%，表明研究期内整体规模效率处于微弱改善状态，生产规模接近最优水平，但提升幅度极小，推测原因是长江经济带部分省份冷链物流企业或行业在规模上的扩张带来了一定程度的效率提升。例如研究期间江苏省致力于打造农产品冷链物流产地和销地2张“网”，其中产地网方面建设了库容1~2万t的冷链集配中心。技术变化指数(GTC)均值为1.027 4，说明整体技术水平有所提升，生产前沿面上移；然而平均增长率为-1.321%，增长率为负说明这种提升的速度在放缓，可能存在技术扩散受阻或创新动力不足的问题。GTC的提升主要来源于绿色技术突破，如新能源冷藏车渗透率提升、光伏冷库技术应用以及智能温控系统推广等，这些技术可以通过降低单位冷链碳排放强度直接推动生产前沿面上移。

2.3　动态静态结合分析

本研究依据绿色发展效率静态效率(SBM值)与动态效率(GML值)两大核心指标，分别取其平均值0.494 9和1.032 3作为分类依据。通过建立横坐标为SBM值、纵坐标为GML值的二维坐标体系，构建了能够反映冷链物流发展特征的综合评价矩阵——“静态超效率SBM值-动态GML指数值”矩阵散点图如图5所示，将11个省份划分为4种发展类型。

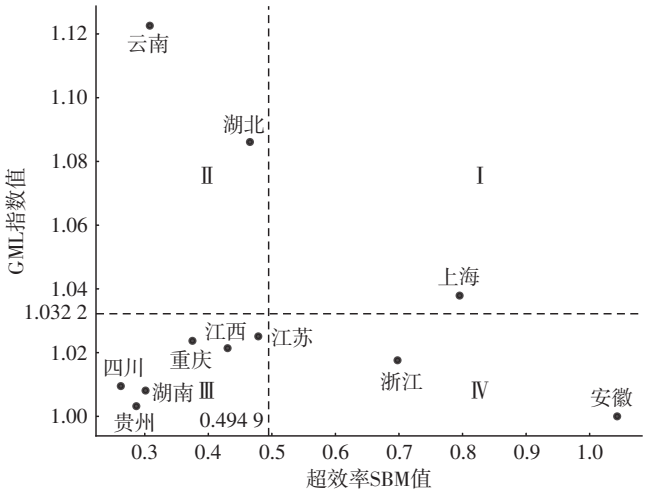

图5　“静态超效率SBM值-动态GML指数值”矩阵散点图

Fig.5　Matrix scatter plot of “static super efficiency SBM value-dynamic GML index value”

类型Ⅰ是引领型省份，其在冷链物流绿色发展效率动态和静态测度值上，均超越了长江经济带平均水平。引领型代表省份为上海市，冷链物流绿色发展水平较高，并且其增长速度颇为迅速，说明其投入的资源利用率较高，同时在发展过程中兼顾环境因素，是冷链物流绿色发展较为成功的省份，具有长期竞争优势。上海市可以在发挥自身优势的同时建设长三角冷链技术共享平台使其余省份能够借鉴其绿色冷链发展模式。

类型Ⅱ是潜力型省份，其冷链物流绿色发展静态效率尚低于平均水准，动态效率超越平均水平。该类型省份有湖北省和云南省，其冷链物流绿色发展水平相对滞后但发展速度较快，发展初期投入较多资源，但其发展模式对环境的考量不足未能充分体现绿色环保特性。因此，这些省份未来的冷链物流发展需更加重视资源利用率及环境保护策略，同时预示着拥有较大的发展潜力。具体而言，建议湖北省平衡规模扩张与生态约束，使中央财政多向绿色运输倾斜，推广新能源冷藏车，同时对高耗能企业征收碳调节税；建议云南省建立跨境农产品低碳标准，依托山地地形适配绿色技术，推广新能源冷链车辆，降低山区运输能耗。

类型Ⅲ是低谷型省份，超效率SBM值和全要素生产率GML指数值均处于平均水平以下。江苏、江西、重庆、湖南、四川和贵州6省份属于低谷型，这些省份冷链物流绿色发展水平低且增长迟

缓，具体分析如下。江苏省供销合作社于2023年指出本省存在产地绿色冷链基础设施薄弱、冷链物流行业绿色标准不统一、企业“小”而“散”的弊端，因此江苏省应积极加强冷链绿色仓储和冷链物流智慧综合服务平台的建设[32]，同时促进当地冷链头部企业对其他企业的引领作用。江西省冷库库容缺口大，建议依托井冈山、瑞金等红色旅游节点的人流集聚效应及周边特色农产品供应链需求，构建农旅融合型冷链集配中心，配套景区光伏供电冷库与旅游干线电动冷藏车网络，同步提升红色文旅生态价值与农产品流通效率。重庆市多式联运衔接低效、绿色技术应用滞后，建议建设“长江上游多式联运智慧枢纽”，试点“绿色冷链税收减免”，即对采用新能源车辆或智能温控技术的企业，减免增值税及车辆购置税。湖南省冷链设施落后且冷链网络覆盖不均，需进一步加强智能化绿色仓储和绿色冷藏车建设与投入，可以联合湖北省共建“洞庭湖冷链生态圈”，共享冷链设施与绿色技术标准。四川省农产品仓储保鲜冷链设施需求缺口大，枢纽网络不完善，资源有效利用率低，政府应投入更大力度财政支持，加强冷库和绿色冷链物流体系建设。贵州省因山路多等地理位置原因导致冷链网络密度低、基础设施不完善等，需要鼓励建设“最后一公里”绿色设施，同时政府补贴冷链扶贫基金。

类型Ⅳ是稳定型省份，其冷链物流绿色发展静态效率高于平均水平，但动态效率低于平均水平。代表省份为浙江和安徽，其冷链物流绿色发展水平较高，得益于优越的地理位置相较其他省份具备一定的竞争优势。然而，这种优势并未转化为持续创新的发展动力导致效率增速缓慢。浙江省应优化产业结构、规范市场，可以借助国家绿色发展基金支持技术创新；安徽省则继续发挥绿色发展效率优势，协同上海市共建研发中心，引进氢能制冷技术，土地指标向绿色技术企业倾斜，推广新技术新模式，保证发展稳中求进。

3　结论与建议

3.1　结论

本研究借助超效率SBM模型全面剖析了长江经济带11个省份冷链物流绿色发展效率的总体特性，同时，借助GML指数深入探究了这些省份冷链物流效率动态演变趋势，为更直观展现分析结果，构建了冷链物流综合评价矩阵将11个省份划分成4种类型，研究结论如下。

（1）静态分析结果显示，长江经济带冷链物流绿色发展效率整体较低，且存在显著的区域差异。具体表现为下游地区效率最高，中游次之，上游最低。下游地区与长江经济带总体的波动趋势接近，均为缓慢上升；而中游与上游则展现出相似的先降后升态势。就各省份而言，研究期间仅有安徽和上海达到效率有效，从而进一步说明省份间冷链物流发展存在一定差异。

（2）动态分析显示，技术进步与规模效率的提高共同促进冷链物流效率提升，其中技术进步发挥了主要作用。

（3）静态效率和动态生产率结合分析显示，上海是活跃型省份，湖北和云南是潜力型省份，江苏、江西、重庆、湖南、四川和贵州是低谷型省份，浙江和安徽是稳定型省份。

3.2　建议

基于上述研究结论，为促进长江经济带冷链物流的发展，提出以下建议。

（1）统筹绿色发展战略，建立跨区域协调机制。秉持绿色发展理念，联合相关政府部门、行业协会等多方力量，共同制定长江经济带冷链物流绿色发展战略规划。推动长江经济带冷链物流产业在实现自身高效发展的同时，与生态保护深度融合、协同共进。

（2）加大绿色技术研发与应用推广。重视冷链物流中的环境污染，尤其是碳排放问题。可设立专项基金，鼓励高校、科研机构及企业研发节能制冷、新能源冷藏车、环保包装及智能温控等技术，提高能源效率，降低环境影响。政府应提供税收优惠、财政补贴等政策[33]，如税收减免、设备购置补贴，降低企业采用绿色技术的成本。

（3）提升冷链物流基础设施水平[34]。需加大对长江经济带尤其是上游和中游地区的投入，改善冷库与冷藏运输设备。土地利用规划中应优先保障冷链物流用地，合理布局设施，以扩大覆盖范围，提升服务能力。

（4）针对不同发展类型省份，应采取差异化策略。活跃型省份主要注重技术扩散与标准引领；潜力型省份平衡规模扩张与生态约束，依托区位优势激活特色需求；低谷型省份应注重结构改革，弥补绿色冷链基础设施短板，强化政策扶持；稳定型省份需要建立跨区域技术联盟，通过碳交易试点、绿色信贷等市场化手段，激活企业创新动能，突破技术锁定效应。

参考文献：

[1] 蒲　俊. 低碳视角下区域冷链物流效率测度及影响机理研究[D]. 镇江：江苏大学，2022.

[2] 尚晓彤. 我国农产品冷链物流效率评价及提升对策研究：基于DEA-Malmquist指数[J]. 物流工程与管理，2023，45(1)：81-83，80.
SHANG Xiaotong. Research on the Evaluation and Promotion Strategy of Agricultural Products Cold Chain Logistics Efficiency in China：Based on the DEA-Malmquist Index[J]. Logistics Engineering and Management，2023，45(1)：81-83，80.

[3] 张　璐. 基于DEA的我国生鲜农产品冷链物流空间效率测度及提升策略研究[J]. 保鲜与加工，2024，24(6)：87-95.
ZHANG Lu. Research on the Measurement and Promotion Strategy of Spatial Efficiency of Cold Chain Logistics of Fresh Agricultural Products in China Based on DEA[J]. Storage and Process，2024，24(6)：87-95.

[4] 秦小辉，赵晨曦. 生鲜农产品冷链物流效率评价研究[J]. 保鲜与加工，2023，23(1)：63-69.
QIN Xiaohui，ZHAO Chenxi. Study on Evaluation of Cold Chain Logistics Efficiency of Fresh Agricultural Products[J]. Storage and Process，2023，23(1)：63-69.

[5] 李林强，任建伟，王源琦，等. 基于三阶段BAM模型的区域冷链物流效率评估[J]. 内蒙古公路与运输，2023(6)：58-62.
LI Linqiang，REN Jianwei，WANG Yuanqi，et al. Evaluation of Regional Cold Chain Logistics Efficiency Based on Three-Stage BAM Model[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia，2023(6)：58-62.

[6] SUN D C，HU X F，LIU B Q. Comprehensive Evaluation for the Sustainable Development of Fresh Agricultural Products Logistics Enterprises Based on Combination Empowerment-TOPSIS Method[J]. PeerJ Computer Science，2023，9：e1719.

[7] 李　军. 冷链物流供应链效率指标体系构建与实证研究[J]. 商业经济研究，2017(23)：93-95.

[8] 方　新，彭艺丹. 长江经济带冷链发展水平测度及时空演变分析[J/OL]. 重庆工商大学学报(社会科学版)，2024：1-17. (2024-06-20)[2025-01-31]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1154.C.20240619.1717.006.html.
FANG Xin，PENG Yidan. Measurement and Spatial-Temporal Evolution of Cold Chain Development in Yangtze River Economic Belt[J/OL]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Social Science Edition)，2024：1-17. (2024-06-20)[2025-01-31]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1154.C.20240619.1717.006.html.

[9] HE M L，YANG M，WU X H，et al. Evaluating and Analyzing the Efficiency and Influencing Factors of Cold Chain Logistics in China's Major Urban Agglomerations under Carbon Constraints[J]. Sustainability，2024，16(5)：1997.

[10] 彭　文，邹　筱. 碳约束下生鲜农产品冷链物流效率和时空特征分析：以中部六省为例[J]. 石家庄铁道大学学报(社会科学版)，2024，18(2)：28-35.
PENG Wen，ZOU Xiao. Analysis of the Efficiency and Spatiotemporal Characteristics of Cold Chain Logistics for Fresh Agricultural Products under Carbon Constraints：A Case Study of Six Provinces in Central China[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Social Science Edition)，2024，18(2)：28-35.

[11] 臧兴兵，杨文欢. 生鲜农产品冷链物流效率时空演化与因素分解研究[J]. 中国商论，2025(4)：95-99.
ZANG Xingbing，YANG Wenhuan. Study on the Spatial-Temporal Evolution and Factor Decomposition of Efficiency of Cold Chain Logistics for Fresh Agricultural Products[J]. China Journal of Commerce，2025(4)：95-99.

[12] 岳　立，薛　丹. 黄河流域沿线城市绿色发展效率时空演变及其影响因素[J]. 资源科学，2020，42(12)：2274-2284.
YUE Li，XUE Dan. Spatiotemporal Change of Urban Green Development Efficiency in the Yellow River Basin and Influencing Factors[J]. Resources Science，2020，42(12)：2274-2284.

[13] 杨　月，翁异静. 浙江山区26县绿色发展效率的时空格局及影响因素[J]. 环境工程技术学报，2025，15(3)：1065-1075.
YANG Yue，WENG Yijing. Spatial-Temporal Pattern and Influencing Factors of Green Development Efficiency of 26 Mountainous Counties in Zhejiang Province[J]. Journal of Environmental Engineering Technology，2025，15(3)：1065-1075.

[14] 冯朝睿，张　楠. 云南省农产品流通业绿色发展效率测度及影响因素研究[J]. 经济问题探索，2024(4)：124-135.
FENG Zhaorui，ZHANG Nan. Research on the Measurement and Influencing Factors of Green Development Efficiency of the Agricultural Product Circulation Industry in Yunnan Province[J]. Inquiry into Economic Issues，2024(4)：124-135.

[15] 范正根，邓志康，张普伟，等. 生态文明试验区绿色发展效率测度及其影响机理[J]. 统计与决策，2022，38(5)：75-79.

[16] 李　垚，赵　林，宋小语，等. 降碳减污视角下山东省农业绿色发展效率的时空格局与影响因素分析[J]. 地理与地理信息科学，2024，40(3)：104-112.
LI Yao，ZHAO Lin，SONG Xiaoyu，et al. Spatio-Temporal Pattern and Influencing Factors of Agricultural Green Development Efficiency in Shandong Province under the Perspective of Reduction of Pollution and Carbon Emissions[J]. Geography and Geo-Information Science，2024，40(3)：104-112.

[17] 徐超毅，齐　豫. 我国区域物流业绿色发展效率测度和空间分析：以华东地区为例[J]. 生态经济，2023，39(4)：81-88.
XU Chaoyi，QI Yu. Measurement and Spatial Analysis of Green Development Efficiency of Regional Logistics Industry in China：Taking East China as an Example[J]. Ecological Economy，2023，39(4)：81-88.

[18] 孟珊珊，刘维忠，孙　宇. 生鲜农产品绿色物流效率空间差异及影响因素[J]. 商业经济研究，2024(19)：75-79.

[19] TONE K，TOLOO M，IZADIKHAH M. A Modified Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis[J]. European Journal of Operational Research，2020，287(2)：560-571.

[20] TONE K. A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis[J]. European Journal of Operational Research，2001，130(3)：498-509.

[21] TONE K. A Slacks-Based Measure of Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis[J]. European Journal of Operational Research，2002，143(1)：32-41.

[22] 邓梦杰，李义华，吴露青，等. 基于超效率SBM-GML指数模型的冷链物流绿色发展效率[J]. 中南林业科技大学学报，2024，44(4)：189-200.
DENG Mengjie，LI Yihua，WU Luqing，et al. Green Development Efficiency of Cold Chain Logistics Based on the Super-SBM-GML Index Model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2024，44(4)：189-200.

[23] 何景师，王术峰，徐　兰. 碳排放约束下我国三大湾区城市群绿色物流效率及影响因素研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(8)：30-36.
HE Jingshi，WANG Shufeng，XU Lan. Research on the Efficiency and Influencing Factors of Green Logistics in Three Bay-Area City Clusters under the Constraint of Carbon Emission[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(8)：30-36.

[24] CHUNG Y H，FÄRE R，GROSSKOPF S. Productivity and Undesirable Outputs：A Directional Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Management，1997，51(3)：229-240.

[25] OH D H. A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index[J]. Journal of Productivity Analysis，2010，34(3)：183-197.

[26] 张　杰，刘　润，杨永春，等. 中国城市生态福利绩效的时空演变及其动态模拟[J]. 生态学杂志，2025，44(1)：226-239.
ZHANG Jie，LIU Run，YANG Yongchun，et al. Spatiotemporal Variations of Ecological Well-Being Performance in Chinese Cities and Its Dynamic Simulation[J]. Chinese Journal of Ecology，2025，44(1)：226-239.

[27] 李义华，吴露青. 我国农产品冷链物流效率时空演化特征[J/OL]. 吉首大学学报(社会科学版)，2024：1-11. (2024-12-26). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JSDX20241225002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
LI Yihua，WU Luqing. Spatio-Temporal Evolution of Agricultural Cold Chain Logistics Efficiency and Its Influencing Factors[J/OL]. Journal of Jishou University (Social Sciences)，2024：1-11. (2024-12-26). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=JSDX20241225002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[28] 谯熙康，陈　斌，黄福友. 组态视角下我国低碳物流效率分析及提升路径研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：61-72.
QIAO Xikang，CHEN Bin，HUANG Fuyou. Efficiency Analysis and Improvement Path of Low-Carbon Logistics in China from the Perspective of Configuration[J]. Railway Logistics，2025，43(5)：61-72.

[29] 花均南，胡美佳. 考虑非期望产出的我国物流业效率空间关联网络结构分析[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：42-50.
HUA Junnan，HU Meijia. Analysis of Spatial Correlation Network Structure of Logistics Efficiency in China Considering Undesirable Outputs[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(4)：42-50.

[30] 王俊文．乡村振兴背景下区域农产品电商与冷链物流协同发展实证及建议[J]. 商业经济研究，2023(23)：107-111.

[31] 周正祥，查嫣媛，孙久文．长江经济带物流产业效率测度及时空演化研究[J]. 中国软科学，2024(12)：75-86.
ZHOU Zhengxiang，ZHA Yanyuan，SUN Jiuwen. Research on the Efficiency Measurement and Spatiotemporal Evolution of the Logistics Industry in the Yangtze River Economic Belt[J]. China Soft Science，2024(12)：75-86.

[32] 王　言，周凌云，李　进，等．铁路冷链物流高质量发展制约因素及实施路径研究[J]. 铁道货运，2024，42(3)：48-53.
WANG Yan，ZHOU Lingyun，LI Jin，et al. Research on the Restrictive Factors and Implementation Path of Railway Cold Chain Logistics High Quality Development[J]. Railway Freight Transport，2024，42(3)：48-53.

[33] 宋子平．绿色物流背景下铁路货运经营转型升级对策[J]. 铁道货运，2018，36(3)：19-22，48.
SONG Ziping. A Solution on Rail Freight Business Transformation and Upgrading under the Background of Green Logistics[J]. Railway Freight Transport，2018，36(3)：19-22，48.

[34] 张光远，户克玮，李亚凌，等．铁路冷链运输服务产品发展研究[J]. 铁道货运，2024，42(10)：13-22.
ZHANG Guangyuan，HU Kewei，LI Yaling，et al. Development of Railway Cold Chain Transportation Service Products[J]. Railway Freight Transport，2024，42(10)：13-22.

(责任编辑　魏　然)

(上接第180页)

用[D]. 北京：北京邮电大学，2021

[12] 王　菲，郑平标，王　晶，等．铁路货物运输市场耦合协调发展研究[J]. 铁道货运，2020，38(12)：32-37.
WANG Fei，ZHENG Pingbiao，WANG Jing，et al. Coupled and Coordinated Development of Railway Freight Transportation Market[J]. Railway Freight Transport，2020，38(12)：32-37.

[13] 谢奔一，黄永燊．交通运输与经济系统耦合协调的研究[J]. 铁道运输与经济，2016，38(6)：29-34.
XIE Benyi，HUANG Yongshen. Study on Coupling and Coordination between Transportation and Economic System[J]. Railway Transport and Economy，2016，38(6)：29-34.

[14] 钟佳妤．基于K-means聚类算法的客户背景分析[J]. 电子技术(上海)，2023，52(6)：49-51.

[15] 沈　采．大数据背景下基于客户画像的精准营销研究：以N银行基金营销为例[D]. 南京：东南大学，2023.

[16] LIU L H. Application of K-means Supported by Clustered Systems in Big Data Association Rule Mining[J]. Systems and Soft Computing，2025，7：200211.

(责任编辑　吴文娟)