文章编号：1001-4632（2025）06-0244-11
引用格式：郭华，周芳检，靳卉珍，等. 基于DEA-GML模型的中部铁路安全效率评价[J]. 中国铁道科学，2025，46(6)：244-254.
Citation：GUO Hua，ZHOU Fangjian，JIN Huizhen，et al. Evaluation of Railway Safety Efficiency in Central Regions Based on the DEA-GML Model [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：244-254.

基于DEA-GML模型的中部铁路安全效率评价

郭 华[1,3,4]，周芳检[2]，靳卉珍[2]，阳金辰[1]

（1. 湖南科技学院 土木与环境工程学院，湖南 永州 425199；
2. 湖南科技学院 经济与管理学院，湖南 永州 425199；
3. 不可移动文物健康监测及智慧利用湖南省工程研究中心，湖南 永州 425199；
4. 砖石质文物智慧化保护利用技术湖南省重点实验室，湖南 永州 425199）

摘 要：为科学评价中部地区铁路安全效率，分析各省铁路安全效率差异及其影响因素，探索提升铁路安全效率的关键途径，基于2012—2023年中部6省铁路安全面板数据，构建铁路安全效率的静-动态评估体系。其中，静态分析通过DEA-CCR模型评估各省铁路安全的整体效率；动态分析则采用DEA-GML模型，探讨技术效率、纯技术效率和规模效率的变化及其对铁路安全效率的影响。结果表明：从静态来看，中部地区各省铁路安全效率差异显著，山西资源结构配置合理，持续保持DEA有效，湖北、江西综合效率表现良好，河南处于规模报酬递增阶段，安徽、湖南2省效率波动明显；从动态来看，技术效率、纯技术效率和规模效率成为推动铁路安全效率提升的关键因素。中部地区铁路安全效率的提升应侧重技术进步与规模优化的协同作用，研究结论为铁路安全资源配置优化提供了理论依据和决策参考。

关键词：铁路安全效率；中部地区；静-动态评估；DEA-GML模型
中图分类号：U298 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.24

随着我国铁路网络的不断加密，铁路运输的安全性问题逐渐成为国家交通发展战略中的关键议题[1−3]。中部地区作为国内交通网络的核心，其铁路系统在服务区域经济发展和促进资源优化配置方面发挥着重要的作用。尽管国铁集团始终将安全置于首位，但在区域层面仍存在资源配置不均衡、效率提升空间有限等问题[4−5]。

近年来，铁路安全效率成为学术研究的热点议题。在国际研究中，学者们多采用数据包络分析（DEA）及随机前沿分析（SFA）等方法对资源配置效率进行度量。文献［6］将增强型混合区间松弛基DEA方法应用于西班牙旅游业，分析了资源配置绩效，明确了资源投入与服务效率之间的关系。文献［7−8］将DEA方法引入铁路运输行业的安全管理效率研究中，验证了该方法在交通安全绩效分析中的适用性。此外，文献［9］提出的GML指数为衡量效率的时间变化趋势提供了有力工具，突出技术进步在提升效率中的作用。在国内，DEA方法也被广泛应用于交通运输和公共资源配置效率的研究中。王璞玉[10]运用DEA模型对我国地方铁路的效率问题及其影响因素进行了分析，并明确投入和产出指标来比较我国地方铁路效率的演变。夏恩君等[11]借助DEA-Malmquist模型探讨了中国铁路系统中资源配置效率的演变轨迹。刘翔宇[12]基于系统动力学方法对铁路运输企业的安全投入效率进行横向比对，揭示出安全资源投入存在冗余现象。李艳丽等[13]采用组合赋权-DEA方法在全面识别跨境铁路沿线风险的基础上进行风险评价，从而确定最大风险决策与最小风险决策结果。近年来，部分研究将GML指数纳入分析框

收稿日期：2025-07-27；修订日期：2025-11-20
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目（2024JJ7193）；湖南省社科评审委课题（XSP25YBZ174）
第一作者：郭 华（1989—），男，湖南永州人，副教授，博士。E-mail：ghaq1989@huse.edu.cn

架，以提升效率评价的时间维度敏感性，李艳鸽等[14]对铁路运营碳排放效率测度进行了动态分析，展示了GML模型的适用性。尽管这些研究为安全效率评价提供了宝贵的理论与方法借鉴，但多数集中于宏观系统或环保资源配置，针对特定区域铁路安全资源配置效率的研究仍显不足，亟待进一步深入探讨。

此外，DEA（Data Envelopment Analysis）与GML（Global Malmquist-Luenberger）的结合已成为效率分析中日趋常用的方法[15-19]。然而，当前研究仍存在3个方面的显著不足：其一，大部分研究主要集中于全国层面或行业整体效率，缺乏对区域差异的深入系统性分析；其二，现有研究偏重于运营绩效或环保投入，对安全资源专项配置效率问题的关注不多；其三，对于效率变化的动态演变研究尚不深入，GML指数的潜力未被充分挖掘[20]。因此，基于时间动态和区域尺度的深度研究，具有重要的理论意义和实际应用价值。

基于上述分析，本研究引入DEA-GML模型[21-22]，对中部地区铁路安全效率进行全面评估，其创新性主要体现在3个方面：第一，以中部省份为研究对象，聚焦该区域在国家铁路网络中的战略地位，分析其安全资源配置的效率特征与演变规律；第二，构建基于DEA-GML模型的评估体系，结合静态效率评估与时间演进分析，形成更为综合的安全资源效率评估方法；第三，引入多维度的铁路安全资源配置投入与产出指标，增强模型在实际安全绩效识别中的效能。该评价体系通过依托可靠的数据支持，结合DEA和GML模型，系统评估中部6省铁路安全效率，量化各因素影响，并通过建模分析，揭示区域间安全资源配置效率的差异及其改进空间，具有较强的可行性和现实指导价值，为铁路安全治理现代化提供实证支持。

1　方法介绍

1.1　DEA-CCR模型

在DEA-CCR模型中，每个被评价的独立实体均被定义为1个决策单元（desicion making unit，DMU），假设有n个决策单元，每个决策单元有m种类型的输入和s种类型的输出，要评价每个DMU的效率，必然涉及对每个输入输出分配权重，设x_{ij}为第j个决策单元对第i种输入的投入量，$x_{ij}>0$；y_{rj}为第j个决策单元对第r种输出的产出量，$y_{rj}>0$；v_i为DMU对第i种输入的1种度量（或称权）；u_r为DMU对第r种输出的1种度量（或称权），其中，$i=1,2\cdots,m$，$r=1,2\cdots,s$，$j=1,2\cdots,n$。则第j个决策单元的输入向量$\boldsymbol{x}_j$、第j个决策单元的产出向量$\boldsymbol{y}_j$、输入指标的权重向量$\boldsymbol{v}$、输出指标的权重向量$\boldsymbol{u}$的定义式为

$$\boldsymbol{x}_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})^{\mathrm{T}}\quad j=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

$$\boldsymbol{y}_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{sj})^{\mathrm{T}}\quad j=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

$$\boldsymbol{v}=(v_1,v_2,\cdots,v_m)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_m)^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

基于安全效率的定义可得决策单元j的效率h_j为

$$h_j=\frac{\sum_{r=1}^{s}u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^{m}v_i x_{ij}}\quad \forall j,h_j\leqslant 1 \tag{5}$$

考虑其中某个决策单元的效率时，模型的目标函数Z_1及其约束条件为

$$Z_1=\max\left(\frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}y_0}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}x_0}\right) \tag{6}$$

s.t.

$$\frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}y_j}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}x_j}\leqslant 1\quad j=1,2,\cdots,n$$

$$\boldsymbol{v}\geqslant 0,\boldsymbol{u}\geqslant 0$$

式中：x_0和y_0分别为被评估决策单元的输入和输出数据。

求解可得单个决策单元最优效率下，各输入、输出量的最优权重，最优效率评价指数与输出量及其量纲无关。由于上述模型为分式规划，因此存在解不唯一的问题。通过CC（Charnes-Cooper）变换，将其转化为等价的线性规划问题，该变换过程为

$$\boldsymbol{w}=\lambda\boldsymbol{v} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\mu}=\lambda\boldsymbol{u} \tag{8}$$

其中，

$$\lambda=\frac{1}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}x_j}$$

式中：$\boldsymbol{w}$和$\boldsymbol{\mu}$分别为输入和输出指标经变换后的权重；λ为尺度变换参数。

则目标函数Z_1可更新为

$$Z_1=\frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\cdot y_0}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\cdot x_0}=\lambda\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\cdot y_0 \tag{9}$$

h_j可进一步表示为

$$h_j=\frac{\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\cdot y_j}{\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\cdot x_j}=\frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\cdot y_j}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\cdot x_j}\quad h_j\leqslant 1 \tag{10}$$

经CC变换后所得线性规划模型的目标函数 $\dot{Z}_1$ 和约束条件为

$$\dot{Z}_1=\max(\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}y_0) \tag{11}$$

s.t.

$$\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}x_j-\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}y_j\geqslant 0\ j=1,2,\cdots,n$$
$$\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}x_0=1$$
$$\boldsymbol{w}\geqslant 0,\boldsymbol{\mu}\geqslant 0$$

1.2 DEA-GML模型

DEA-GML模型是1个以数据包络分析（DEA）为基础与全局Malmquist-Luenberger（GML）指数相结合的效率评价模型。GML指数由Pastor和Lovell于2005年提出，是1种基于全局技术集的Malmquist指数，其计算采用方向性距离函数（DDF）方法。根据Oh[9]的研究，将每个省份视为1个决策单元，假设共有m个省份，且有$i=1,2,\cdots,m$，每个省在时间t内（$t=1,2\cdots,n$）的投入要素为x（$x\in H_+^K$）；非期望产出为b（$b\in H_+^L$）；期望产出为y（$y\in H_+^C$）；投入要素、非期望产出和期望产出的个数分别为K，L和C。环境生产技术可用集合$E(x)$表示，其定义为$E(x)=\{(y,b)|P(x,y,b)\}$，其中$P(x,y,b)$当且仅当x能产出(y,b)时为真。但在实际生产过程中往往追求期望产出最大化与非期望产出最小化，为实现这一目标，Chung等[23]提出的方向性距离函数提供了有效的解决途径。DDF的核心优势在于可按不同的方向对投入与产出进行调整，从而在追求期望产出最大化的同时，实现投入与非期望产出的最小化。方向性向量的选取差异会导致方向性距离函数的结果不同，定义涉及的方向向量$\boldsymbol{\tau}=(\tau_y,\tau_b)$，则方向性距离函数$D(x,y,b;\tau_y,\tau_b)$为

$$D(x,y,b;\tau_y,\tau_b)=\max\left\{\varepsilon\left|(y+\varepsilon\tau_y,b-\varepsilon\tau_b)\in E(x)\right.\right\} \tag{12}$$

式中：ε为步长，是一个非负实数。

为了能够得到各省份的技术效率，采用同期和全局2种环境生产技术。同期环境生产技术定义为$T^{(t)}(x^{(t)})=\left\{(y^{(t)},b^{(t)})\left|x^{(t)}\rightarrow(y^{(t)},b^{(t)})\right.\right\}$；全局环境生产技术定义为$T^{(G)}=T^{(1)}\cup T^{(2)}\cup\cdots\cup T^{(q)}$。而全局Malmquist-Luenberger全要素生产率（在该研究中为铁路安全效率）指数的计算，需借助式（12）获取各决策单元与前沿面的间距，该间距即为技术效率。基于此，t至$t+1$时期的全局Malmquist-Luenberger全要素生产率指数$M_{\mathrm{TFP}}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},x^{(t)},y^{(t)})$可通过比较不同时期相对于全局前沿的效率变化来构建，它反映了投入转化为最终产出的综合效率，其表达式为

$$M_{\mathrm{TFP}}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},x^{(t)},y^{(t)})=\left[\frac{D_o^{(t)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)})}{D_o^{(t)}(x^{(t)},y^{(t)})}\times\frac{D_o^{(t+1)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)})}{D_o^{(t+1)}(x^{(t)},y^{(t)})}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

当$M_{\mathrm{TFP}}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},x^{(t)},y^{(t)})>1$时，表示全要素生产率TFP上升；$M_{\mathrm{TFP}}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},x^{(t)},y^{(t)})=1$时，表示全要素生产率TFP保持不变；$M_{\mathrm{TFP}}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},x^{(t)},y^{(t)})<1$时，表示全要素生产率TFP下降。基于此，GML指数可表示为

$$\begin{aligned}G^{(t),(t+1)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)},x^{(t+1)},y^{(t+1)},b^{(t+1)})=&\frac{1+D_o^{(t)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)})}{1+D_o^{(t+1)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},b^{(t+1)})}\times\\&\left[\frac{(1+D_o^{(g)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)}))/}{(1+D_o^{(g)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},b^{(t+1)}))/}\rightarrow\right.\\&\left.\leftarrow\frac{(1+D_o^{(t)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)}))}{(1+D_o^{(t+1)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},b^{(t+1)}))}\right]=\\&\frac{T_E^{(t+1)}}{T_E^{(t)}}\times\frac{B_g^{(t),(t+1)}}{B_t^{(t),(t+1)}}=\\&E_C^{(t),(t+1)}\times C^{(t),(t+1)}\end{aligned} \tag{14}$$

其中，

$$T_E^{(t)}=\frac{1}{1+D^{(t)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)})}$$

$$B_t^{(t),(t+1)}=\frac{1+D_o^{(t)}(x^{(t)},y^{(t)},b^{(t)})}{1+D_o^{(t+1)}(x^{(t+1)},y^{(t+1)},b^{(t+1)})}$$

式中：$T_E^{(t)}$为技术效率；$B_t^{(t),(t+1)}$为当期生产前沿面与跨时期构造的前沿面之间的差距，该差距反映了特定时期的生产技术效率与长期最优实践之间的缺口；B_t和B_g为基于不同计算方式测算的效率缺口，其比值可有效捕捉由生产前沿面移动所代表的技术进步；$E_c^{(t),(t+1)}$为效率改变指数；$C^{(t),(t+1)}$为最佳实践缺口改变指数。而全局Malmquist-Luenberger全要素生产率指数可分解为$E_c^{(t),(t+1)}$与$C^{(t),(t+1)}$的乘积。

1.3 指标选取

所提模型选择2012—2023年中部6省（山西、河南、安徽、湖北、湖南和江西）的铁路安全效率作为研究对象，中部地区铁路网处于我国米字型铁路网的核心，具有更密集的铁路交通网络承载量，这意味着它们在铁路安全效率方面具有更强的代表性和实践应用价值。此外，中部地区作为“一带一

路”的重要通道，其铁路安全效率研究具有显著的溢出效应，为我国构建全域性铁路安全资源配置优化模型提供可靠的样本支撑[24]。在选择投入与产出指标时，尽可能避免各指标间的线性关系对分析结果造成影响，同时兼顾样本数据的可操作性、可比性、可行性。根据刘翔宇[12]对铁路安全监管资源配置指标的选取，在借鉴优化这些指标的同时增加财力、物力和时间等指标，丰富了铁路安全效率投入指标，同时兼顾科学技术投入方面的因素，选取了监测设备数量，提高了指标系统的可用性、科学性。然而，官方发布的铁路安全投入数据通常未严格区分客运与货运系统，因此，为便于宏观分析，采用一省范围内铁路安全的总投入与总产出数据来评价各省铁路运输安全的整体配置效率。孙文桥（2025）等[25]基于系统性、适应性、科学性与可操作性原则，从设备因素、人员因素、管理因素和其他因素4个层面，构建涵盖15个一级指标、35个二级指标在内的基于本质安全的智能化编组站生产作业安全评价指标体系，并逐一进行指标解释和计算说明，受上述指标体系构建启发，此处所选铁路安全效率的投入指标包含职工数量、资金周转率、设备投入金额、安全培训费用和监测设备数量；期望产出指标包含隐患发现率、事故下降率和风险控制覆盖率；非期望产出指标为事故率。其中，资金周转率＝年度安全资金实际使用额/年度安全资金平均占用额，隐患发现率＝年度发现隐患数/年度应排查隐患点总数×100%，事故下降率＝（上年事故率-当年事故率）/上年事故率×100%，风险控制覆盖率＝已管控高风险点数/高风险点总数×100%，事故率＝年度事故起数/年度营业里程，具体见表1。

表1　我国铁路安全效率评价投入产出指标

指标类型	指标	变量	单位
投入指标	职工数量	X_1	人
	资金周转率	X_2	次·年$^{-1}$
	设备投入金额	X_3	亿元
	安全培训费用	X_4	万元
	监测设备数量	X_5	台
期望产出指标	隐患发现率	Y_1	%
	事故下降率	Y_2	%
	风险控制覆盖率	Y_3	%
非期望产出指标	事故率	Y_4	次·(10^6 km)$^{-1}$

2　实证分析

以2012—2023年为研究时间，选取中部6省作为研究对象，数据来源于中国国家铁路集团有限公司官网、中华人民共和国交通运输部官网、中国铁道学会官网、中国知网数据库、铁路数据库、国家统计局数据库以及中国铁道统计年鉴。使用的软件为MAXDEA，对各省的铁路安全资源配置技术效率指数、技术进步指数、纯技术效率指数、规模效率指数和综合效率指数进行比较和分析。

2.1　统计性描述

为进一步完善中部6省铁路安全效率评价的数据基础，在分析原始数据基础上，新增了各投入与产出指标的描述性统计，以更全面地反映2012—2023年间各项指标的分布特征与变异情况，统计详情见表2。由表2可知：各指标在不同省份和年份间存在较大差异，如职工数量（X_1）的最大值与最小值相差超过1.35倍，设备投入金额（X_3）、安全培训费用（X_4）、监测设备数量（X_5）和风险控制覆盖率（Y_3）的极差也较大，反映出各省在铁路安全资源投入方面的不均衡性；产出指标的变异系数较低，说明数据的离散程度小，稳定性高，分布更为集中。

2.2　DEA-CCR静态效率测度

对中部6省份进行静态分析，测算铁路安全效率的综合效率值，所得各省份的铁路安全效率见表3。铁路安全效率按年份变化趋势如图1所示。

表2　投入与产出指标描述性统计

变量	X_1/人	X_2/(次·年$^{-1}$)	X_3/亿元	X_4/万元	X_5/台	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/[次·(10^6 km)$^{-1}$]
样本数	72	72	72	72	72	72	72	72	72
最大值	5 095	2	55	917	2 020	2	1	101	1
最小值	3 771	1	19	480	928	1	1	75	0
极差	1 324	1	36	437	1 092	1	0	26	1
平均值	4 474	2	32	664	1 401	2	1	90	0
标准差	336	0	9	119	295	0	0	6	0
变异系数	0.075	0	0.281	0.179	0.211	0	0	0.067	

表 3　2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率

年份	安徽	河南	湖北	湖南	江西	山西
2012	1.000 0	0.994 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2013	0.987 4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2014	0.995 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2015	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2016	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2017	0.998 4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2018	1.000 0	1.000 0	0.987 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2019	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2020	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2021	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2022	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.979 5	0.998 8	1.000 0
2023	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
均值	0.998 4	0.999 5	0.999 0	0.998 3	0.999 9	1.000 0

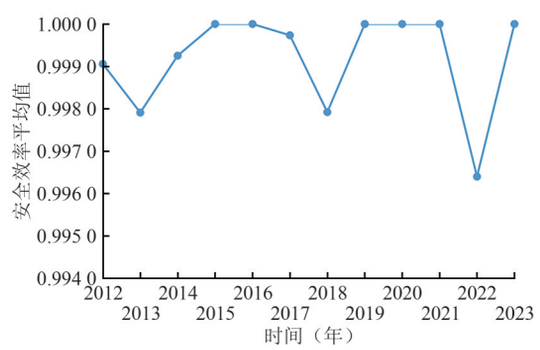


图 1　2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率值平均值变化趋势

结合表 3 和图 1 可知，中部 6 省 2012—2023 年执行效率均值呈波动变化，2015，2016，2019，2020，2021 和 2023 年所有省份的铁路安全效率值均为 1，2022 年 4 个省份的铁路安全效率为 1，当各省的铁路安全效率连续 2 年（2013—2015 年）上升至 1 后，在 2016 年又呈下降趋势，这与铁路安全资源配置综合效率均值呈下降趋势吻合。其原因在于中部省份的人力、财力、物力和时间的投入量都存在冗余，特别是铁路部门对于铁路安全支出的增加并不能很好地提高安全效率成果转化水平，导致综合效率均值也呈现下降的趋势，进一步导致了中部 6 省铁路安全效率下降的现象。

而从省级层面看，山西在考察期内均持续处于 DEA 有效状态，这表明其铁路安全资源配置效率持续处于最优状态，资源结构配置合理。作为铁路安全资源配置综合效率值排名第二的江西，却有规模效率小于 1 的情况，除 2022 年以外近 12 年中有 11 年都处于 DEA 有效状态。因此，处于规模报酬递增状态的江西需要扩大投入规模以提高铁路安全效率。湖北地处长江中游，素有“九省通衢”之称，其省会武汉是我国四大铁路枢纽之一，形成了米字型的铁路网，覆盖全国主要城市，京广高铁、沪汉蓉高铁在此交汇，“中欧班列”在此发车，所构建的“铁水公空”立体交通网可助力经济高质量发展。2012—2017 年的铁路安全资源配置综合效率值均为 1，然而 2018 年却表现出非 DEA 有效状态，进一步分析发现是由于规模效率不佳所导致的，其设备投入金额、安全培训费用和监测设备数量分别比上年增加了 5.23%，8.54% 和 5.53%，铁路安全资源配置投入量的大幅增加使得湖北处于规模报酬递减的阶段，对投入规模进行相应的缩减可使其重新达到 DEA 有效状态。河南近 11 年的铁路安全效率始终为 1，且一直处于规模报酬递增阶段，说明河南在 2012 年之后对于铁路安全资源配置方面的人力、物力、财力和时间的投入协调性较好，可适当增加投入量，以达到更优状态。安徽、湖南 2 省的铁路安全效率在波动中呈现出下降趋势，说明其在资源配置和投入规模方面尚存在较大的改善空间，调整人力、资金和财力配置结构的同时扩大投入规模是这 2 个省未来的调整方向。

2.3　DEA-GML 动态效率测度

在评估铁路安全效率的动态演进过程中，传统静态 DEA 模型缺乏动态方面的数据显示，难以分析技术异质性与跨期可比性等突出问题。因此，引入基于全局前沿的 GML 指数模型，通过整合中部 6 省 12 年铁路安全资源配置面板数据，建立动态效率分析框架。突破传统径向测度的局限性，采用非径向、非导向的距离函数，有效解决投入产出松弛量的测算偏误，与铁路安全系统中多指标投入（如人力、财力、物力和时间）与多指标产出（如隐患发现率、事故下降率）的情境适配性较高。应用 DEA-GML 指数对 2012—2023 年中部 6 省的铁路安全资源配置综合效率进行分解，并从时间特征、空间差异和效率值分解趋势 3 个方面展开分析。

2.3.1　时间特征

2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率 GML 指数及其分解项的时间维度数据见表 4，由表 4 可知：从整体效率变动来看，TFP（安全效率）均值为 0.999 1，下降了 0.09%；研究阶段中有 4 个时期的 TFP 值大于 1，表明这 4 个时期中部 6 省的铁路安全效率处于稳步上升阶段，其中 2014—2015 年的 TFP 为 1.020 0，上升了 2.00%，为 12 年间综合效率提升最为显著的阶段，其次为 2022—2023 年，综合效率为 1.006 2，上升了 0.62%，2016—2017 年

表 4　2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率 GML 指数及分解项的时间维度数据

年份	安全效率	技术进步变化指数	技术效率变化指数	纯技术效率变化指数	规模效率变化指数
2012—2013	0.994 4	1.000 0	0.994 4	1.000 0	1.000 0
2013—2014	0.981 3	0.987 1	1.006 2	0.994 7	0.993 5
2014—2015	1.020 0	1.009 5	0.998 8	1.005 5	1.006 0
2015—2016	0.992 1	0.992 9	0.998 5	1.000 0	1.000 7
2016—2017	1.005 2	1.003 7	1.002 4	1.000 0	0.999 0
2017—2018	0.998 9	1.002 1	0.995 7	1.000 0	1.001 0
2018—2019	0.993 8	0.995 4	0.999 6	1.000 0	0.998 8
2019—2020	0.998 5	0.998 5	1.000 2	1.000 0	0.999 8
2020—2021	1.002 1	1.002 5	0.999 6	1.000 0	1.000 0
2021—2022	0.998 0	1.000 0	1.000 0	0.999 3	0.998 7
2022—2023	1.006 2	1.002 0	1.002 1	1.000 7	1.001 3
均值	0.999 1	0.999 4	0.999 8	1.000 0	0.999 9

位列第 3，综合效率为 1.005 2，上升了 0.52%，2020—2021 年位列第 4，综合效率为 1.002 1，上升了 0.21%。

将 TFP 进一步分解为技术效率变化指数（EFFCH）和技术进步变化指数（TECH），可以发现：技术效率变化指数增长存在 4 个时期，其中上升幅度最大的为 2013—2014 年，上升了 0.62%，技术效率指数下降存在 6 个时期，其中下降幅度最大的为 2012—2013 年，下降了 0.56%；技术进步变化指数上升存在 5 个时期，其中进步幅度最大的为 2014—2015 年，上升了 0.95%，技术效率退步存在 4 个时期，其中退步幅度最大的为 2013—2014 年，下降了 1.29%；总体而言，平均技术效率指数和平均技术进步指数分别下降了 0.02% 和 0.06%。这表明铁路安全效率的提升受到技术效率与技术进步的双重制约，因此，未来应聚焦于推动技术创新以促进技术进步指数的提升，并优化管理以提升技术效率。分析其原因在于技术效率的提升着重于“怎样用好现有资源”，而技术进步更关注“怎样用更好的资源”。铁路安全领域由于行业特点（重资产、重安全且技术成熟）和管理系统复杂性，短期内采取优化资源配置、提高管理精细化水平（技术效率）能够更直接、更有效地促进综合效率提升。但以长远来看，要想推动行业整体发展，关键在于技术进步，其效果显现周期长。

将 EFFCH 再进一步分解为纯技术效率变化指数（PECH）和规模效率变化指数（SECH），可以发现：纯技术效率指数上升存在 2 个时期，其中上升幅度最大的为 2014—2015 年，上升幅度为 0.55%，纯技术效率指数下降存在 2 个时期，其中下降幅度最大的为 2013—2014 年，下降了 0.53%；规模效率指数上升存在 4 个时期，其中上升幅度最大的为 2014—2015 年，上升了 0.6%，规模效率下降存在 5 个时期，其中下降幅度最大的为 2013—2014 年，下降了 0.65%；平均纯技术效率为 1，平均规模效率降低了 0.01%。这表明纯技术效率可有效促进铁路安全效率提升，仅规模效率出现较小幅度的退步，说明我国铁路安全领域管理能力和管理水平达到了最优状态，规模效率出现略微的不足但影响较小。结合铁路安全领域特点，分析其原因在于纯技术效率管理优化。因此，提升铁路安全效率需双轮驱动：一方面着力于技术创新以寻求突破，另一方面持续优化管理以提升技术效率。

2.3.2　空间差异

2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率的 GML 指数及其分解项的空间维度数据见表 5。结合现实情况及表中数据可对其空间差异分析如下。

表 5　2012—2023 年中部 6 省铁路安全效率的 GML 指数及分解项的空间维度数据

省份	安全效率	技术进步变化指数	技术效率变化指数	纯技术效率变化指数	规模效率变化指数
安徽	1.000 2	1.000 2	1.000 2	1.000 0	1.000 1
河南	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
湖北	1.000 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
湖南	1.000 7	1.000 2	1.000 0	1.000 1	1.000 0
江西	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
山西	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
均值	1.000 2	1.000 1	1.000 1	1.000 0	1.000 0

（1）湖南铁路安全效率位列榜首，增长 0.07%，原因在于湖南省政府高度重视铁路安全工作，出台了一系列政策法规，统筹铁路发展和安全，为铁路安全资源的合理配置提供了政策保障；技术进步变化指数上升最为显著，增长 0.02%，这是由于湖

南推广应用无人机、激光雷达等先进技术以及数字化检测工具，推动铁路沿线安全环境治理纳入城市运行管理服务平台和地方自然灾害风险基础数据库，此举可增强铁路沿线环境综合治理信息化水平，从而提高资源配置的精准性和效率；规模效率变化指数为1，已达到有效状态，这主要得益于湖南经济的持续增长所引致的客货运需求扩张，从而推动了铁路建设投资的增加与路网规模的提升，使规模效应得以充分发挥，并通过整合线路与站场资源、优化运输组织与调度管理，进一步提升了既有铁路资源的利用效率；纯技术效率变化指数上升0.01%，这归因于铁路安全管理能力的提升和管理水平的进步，共同促进了资源配置的合理化。

（2）安徽铁路安全效率排名第2，增长0.02%，技术进步变化指数和技术效率变化指数提升最为显著，均增长0.02%，这主要归功于铁路安全技术投入于硬件升级与调度算法优化等“软技术”的应用；规模效率变化指数也上升了0.01%，得益于长三角产业转移的规模经济释放，特别是铁路“班列化”运输降低了长距离物流的边际成本，为跨区域规模扩张提供了支撑。此外，纯技术效率变化指数为1，已达到DEA的有效状态，归因于安全管理体系较为完善以及资源配置的持续优化。

（3）湖北铁路安全效率位列第3，但同比仅微增0.01%，这一缓慢增长主要归因于2方面因素的叠加影响：一是安全投入低效，安全投入大部分用于传统设施维护，技术升级滞后削弱效率提升空间；二是政策协同不足与体制障碍，多头管理及环保与安全目标之间的矛盾，影响了整体效能发挥。技术进步变化指数、技术效率变化指数、纯技术效率变化指数以及规模效率变化指数均为1，达到了DEA有效状态，湖北技术效率方面表现突出，说明智能化技术应用提升技术效率以及管理机制创新达到了充分有效的状态。

（4）山西、河南与江西3省的铁路安全效率均为1，均达到DEA有效状态。山西省规模效率变化指数和纯技术效率变化指数均为1，这主要得益于煤炭产业集中度提升带来的规模效应、政策驱动下的产业集群布局以及能源保供背景下的产能释放，同时安全管理有序和资源配置合理也支撑了其效率表现；河南省纯技术效率变化指数和技术进步指数均为1，归因于交通枢纽红利的释放、管理效率提升以及智能化投入加大（如AI轨道检测系统），加之数字化转型与智慧铁路建设中新技术、新设备的广泛应用；江西省技术进步指数和纯技术效率变化指数均为1，主要凭借其连接华东、华南与华中的区位优势和多重国家战略叠加，在运输需求增长背景下持续加大基础设施与安全投入，并通过推进信息化建设、应用大数据等技术实现精准调度与实时监控，同时管理人员素质提升也为效率提供了保障。

（5）从2012—2023年中部6省铁路安全效率来看，其效率平均值为1.000 2，累计上升0.02%，这得益于铁路安全资源的优化配置、设施升级及管理制度的完善，资源利用得到更好的整合与协调，整体提升了系统的生产效率；在各项效率指标中，进步最为显著的是技术进步变化指数和技术效率指数，均上升0.01%，主要归因于铁路行业的规模化发展，随着运输量的增长及运输网络的扩展，技术创新和技术效率在大规模运营中得到了更广泛应用，推动了整体效率的提升；纯技术效率变化指数和规模效率变化指数均达到DEA有效状态，反映了中部地区在铁路安全管理能力和管理水平方面已实现充分有效，规模效率也达到了充分有效的状态。此外，从宏观层面看，中国铁路网已具备世界领先的规模优势，然而，庞大的网络规模也对持续保持并提升全域性的安全管理效率提出了更高的要求。

综上所述，中部6省铁路安全效率的变化幅度和所引起的原因存在差异，整体来看，技术效率与综合效率变化是引起铁路安全效率提升的关键因素，大部分省份的纯技术效率变化和规模效率变化对铁路安全效率的提升作用微乎其微。因此，各省可从优化资源投入结构、提升技术应用水平和完善协同管理机制等方面提高铁路安全效率。

2.3.3 效率值分解趋势

根据表4数据绘制的中部6省铁路安全效率Malmquist指数及其分解项的时间动态趋势如图2所示。该图直观呈现了各效率指数的波动情况，揭示了效率演变中存在显著的周期性波动特征。

由图2可知：2014—2015，2016—2017，2020—2021和2022—2023年，中部省份铁路安全效率明显较高，呈进步状态；而其余年份较低，呈退步状态，整体变动呈周期性波浪形变动；2013—2014，2016—2017，2019—2020和2022—2023年，技术效率变化指数实现正增长，整体变动呈周期性波浪形变动；2014—2015，2016—2017，2017—2018，2020—2021，2022—2023年，技术进步变化指数实

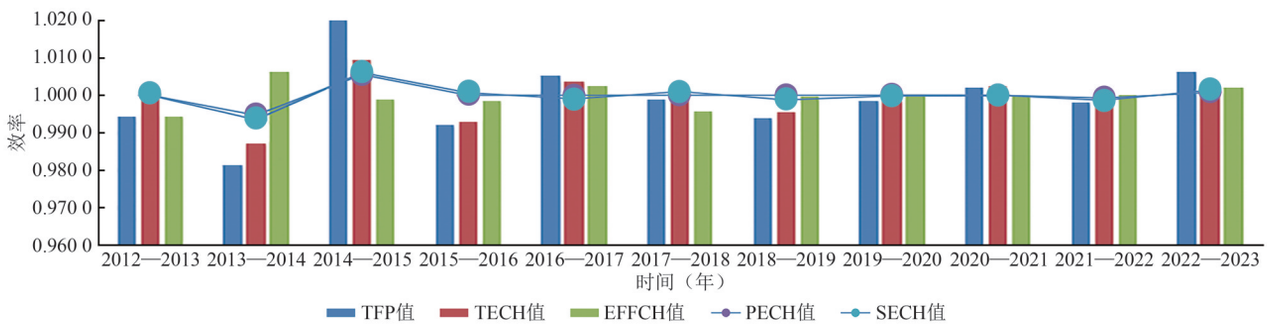


图 2　2012—2023 年中部 6 省 5 大效率值变动趋势

现正增长，其余时期保持不变或出现负增长，整体变动呈现周期性波浪形变动，与整体的铁路安全效率变化周期相似。这种波动反映了不同安全要素配置效率的差异，硬件投入效率（如监测设备等具有显著规模效应的投入）是推动SECH增长的主要原因，其波动周期与投资周期基本一致。相比之下，管理与技术应用效率（如人员培训等对应PECH和TECH）的提升则是一个渐进且时有波动的过程，易受管理体制变革、技术迭代周期及人员适应性等因素影响，这在图中表现为PECH和TECH的波动更为频繁但幅度较小。其展示的周期性波动现象，与铁路安全效率中“规模投资驱动短期效率跃升”和“管理技术升级推动长期稳健改善”的双重规律相契合。因此，该趋势图从宏观动态视角佐证了基于数据分解（表4和表5）所得出的结论，即：规模扩张是中部地区铁路安全效率提升最直接、最有效的短期路径，而实现长期可持续的效率改进，则需弥补纯技术效率与管理协同方面的短板。

3　研究局限性

尽管本研究已从数据来源与指标定义层面保障可靠性，但仍存在2方面局限性：其一，部分指标的实际统计执行细节可能存在地区差异，例如“风险控制覆盖率”中的“高风险点”认定，虽依据国家铁路安全相关法规明确了核心标准（如线路防护等级、客流量阈值），但不同省份在具体执行过程中，可能因区域铁路运营特点（如山西以货运为主、湖北以综合枢纽为主）对“高风险点”的细化判定存在细微差别，可能对横向省份效率对比产生微弱影响；其二，研究周期内法规修订可能导致部分数据存在口径衔接问题，例如2013年《铁路安全管理条例》修订、2020年《高速铁路安全防护管理办法》出台后，“事故率”的“事故”的判定标准略有调整（如新增轻微事故统计类别），虽已通过国家铁路局文件明确调整节点并在动态分析中对2020年前后数据进行标注，但仍无法完全消除法规变化对跨期效率对比的潜在干扰。未来研究可加强实地调研获取一手统计数据，进一步验证指标执行一致性，同时扩大样本期，减少短期法规调整对长期效率趋势分析的影响。

4　结　论

（1）从静态DEA分析，中部6省铁路安全效率在省际间存在显著差异。山西省在2012—2023年间持续处于DEA有效状态，反映其资源配置与规模匹配已达最优；江西省于2022年出现投入规模不足导致的非DEA有效状态，需适度扩大资源投入；湖北省在2018年因投入冗余而偏离有效前沿，应压缩冗余以提升效率；河南省整体协调性良好，具备规模报酬递增潜力；安徽与湖南2省效率波动下行，需在优化资源配置结构的同时扩大有效投入规模。

（2）从时间维度分析，技术效率提升侧重于存量资源的精细化管理，技术进步则关乎技术系统的整体升级。在铁路安全领域，由于铁路系统资产密集、技术成熟与运营复杂的特性，短期内通过管理优化提升技术效率是推动综合效率改善最直接的路径；长期来看，则应依靠技术进步引领行业系统性升级，尽管其见效周期较长。

（3）从空间角度分析，技术效率与综合效率变化是区域铁路安全效率提升的核心动力，而纯技术效率与规模效率的贡献普遍有限。因此，各省应结合自身实际，从资源结构优化、技术集成应用与管理协同机制等方面实施差异化提升策略。

（4）从整体变化趋势分析，硬件与软件技术水平的提升是铁路安全效率增长的主要因素，其波动

与投资周期高度同步；管理及技术应用效率的提升则呈渐进与波动特征，受体制调整、技术迭代与人员适应等因素制约。规模扩张仍是当前中部地区铁路安全效率提升最有效的短期路径，而实现长期可持续改进，必须弥补纯技术效率与管理协同方面的系统短板。

参 考 文 献

[1] 王海星,陈同喜.铁路安全体系建构与实施评价研究[M].北京:中国铁道出版社,2021.
(WANG Haixing, CHEN Tongxi. Research on the Construction and Implementation Evaluation of the Railway Safety System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021. in Chinese)

[2] 齐志华,王晓敏,韩安平,等.基于状态影响因子的高速铁路电务安全指数优化[J].中国铁道科学,2023,44(4):195-205.
(QI Zhihua, WANG Xiaomin, HAN Anping, et al. Optimization of Signaling & Communication Safety Indexes for High-Speed Railway Based on State Impact Factors [J]. China Railway Science, 2023, 44 (4): 195-205. in Chinese)

[3] 雷蕾,肖永青,关卉雯,等.基于市场交易关系的合资铁路安全生产投入管理优化研究[J].铁路采购与物流,2023,18(7):29-31.
(LEI Lei, XIAO Yongqing, GUAN Huiwen, et al. Research on Optimization of Safety Production Input Management for Joint Venture Railways Based on Market Transaction Relationships [J]. Railway Purchasing and Logistics, 2023, 18 (7): 29-31. in Chinese)

[4] JURAJ Č, NEDELIAKOVÁ E, ADRIÁN Š, et al. The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools [J]. Transportation Research Procedia, 2021, 53: 39-49.

[5] 李笑红,徐金辰,杨南.基于资源配置决策的铁路货运场站综合评价[J].中国铁道科学,2020,41(4):146-152.
(LI Xiaohong, XU Jinchen, YANG Nan. Comprehensive Evaluation for Railway Freight Yard Based on Resource Allocation Decision [J]. China Railway Science, 2020, 41 (4): 146-152. in Chinese)

[6] ARANA-JIMÉNEZ M, SÁNCHEZ-GIL M C, YOUNESI A, et al. An Enhanced Hybrid Interval Slacks-Based DEA Model with Super-Efficiency and Application [J]. Computational and Applied Mathematics, 2025, 44 (2): 76.

[7] BONDARABADI M A, RAHIMI H, AREFKHANI H, et al. A New Approach to Assess Safety Performance of Rail Regions with an Emphasis on the Resources and Equipment of each Region [J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2023, 25: 100371.

[8] BLAGOJEVIĆ A, STEVIĆ Ž, MARINKOVIĆ D, et al. A Novel Entropy-Fuzzy PIPRECIA-DEA Model for Safety Evaluation of Railway Traffic [J]. Symmetry, 2020, 12 (9): 1479.

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

[10] 王璞玉.基于DEA模型的中国地方铁路效率评价研究[D].北京:北京交通大学,2017.
(WANG Puyu. Research on the Evaluation of Local Railway Efficiency in China Based on DEA Model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. in Chinese)

[11] 夏恩君,魏星,周亮锦.基于DEA-Malmquist指数的中国铁路运输业全要素生产率研究[J].科技与管理,2017,19(4):69-77.
(XIA Enjun, WEI Xing, ZHOU Liangjin. Empirical Analysis of the Total Factor Productivity of Railway Transport Industry in China: Based on DEA-Malmquist Index [J]. Journal of Science and Technology Management, 2017, 19 (4): 69-77. in Chinese)

[12] 刘翔宇.铁路安全监管作用路径分析与投入资源配置优化研究[D].成都:西南交通大学,2022.
(LIU Xiangyu. Analysis of Railroad Safety Supervision Role Path and Optimization of Input Resources Allocation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. in Chinese)

[13] 李艳丽,马帅,李利军,等.基于组合赋权-DEA的跨境铁路外部环境风险评价[J].铁道工程学报,2024,41(1):107-113.
(LI Yanli, MA Shuai, LI Lijun, et al. External Environmental Risk Assessment of Cross-Border Railways Based on Combination Weighting DEA [D]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41 (1): 107-113. in Chinese)

[14] 李艳鸽,伍生,王天宇,等.基于超效率SBM-GML指数模型的铁路运营碳排放效率测度[J].铁道科学与工程学报,2025,22(5):2303-2316.
(LI Yange, WU Sheng, WANG Tianyu, et al. Carbon Emission Efficiency Measurement of Railway Operation Based on

the Super-SBM-GML Index Model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22 (5): 2303-2316. in Chinese)
[15] SOLTANIFAR M, HOSSEINZADEH LOTFI F, SHARAFI H, et al. Resource Allocation and Target Setting: a CSW-DEA Based Approach [J]. Annals of Operations Research, 2022, 318 (1): 557-589.
[16] 穆鑫,程学庆,张玺,等.基于DEA交叉效率模型的铁路重载货车效率评价[J].中国铁道科学,2014,35(1):130-134.
(MU Xin, CHENG Xueqing, ZHANG Xi, et al. Efficiency Evaluation of Railway Heavy Haul Freight Car Based on DEA Overlapping Efficiency Model [J]. China Railway Science, 2014, 35 (1): 130-134. in Chinese)
[17] 刘澜,黄豪.基于最优决策的国际铁路多式联运合作伙伴选择模型[J].中国铁道科学,2019,40(5):110-117.
(LIU Lan, HUANG Hao. Partner Selection Model for International Railway Intermodal Transportation Based on Optimal Decision [J]. China Railway Science, 2019, 40 (5): 110-117. in Chinese)
[18] SAMENI M K, MANSOURIC M R K, LANGERODI M M. Comparing Relative Safety of Railway Transport Level Crossings by Data Envelopment Analysis [J]. Transportation Research Procedia, 2025, 82: 3827-3837.
[19] ZHANG L L, HUA X K. Evaluating Efficiency of Railway Transportation Based on Cross-Efficiency Evaluation Method and Relative Entropy Evaluation Method in China [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2023, 17 (12): 2410-2418.
[20] 刘伟,董晓瑞,于秀燕,等.煤炭企业安全生产费用效率评价[J].中国安全生产科学技术,2024,20(1):43-49.
(LIU Wei, DONG Xiaorui, YU Xiuyan. Evaluation on Work Safety Cost Efficiency of Coal Enterprises [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20 (1): 43-49. in Chinese)
[21] 黄彩德.基于DEA的运输包装(铁路)安全投入效益分析[D].兰州:兰州交通大学,2014.
(HUANG Caide. Analysis of Safety Investment-Benefit in Railway Transport Packaging Based on DEA Model [J]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. in Chinese)
[22] 方瀚萱,金辉,李再帏,等.面向公共交通融合发展的城市地铁运营绩效评价方法[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1365-1378.
(FANG Hanxuan, JIN Hui, LI Zaiwei, et al. Evaluation Method of Urban Subway Operation Performance for the Integrated Development of Public Transportation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (4): 1365-1378. in Chinese)
[23] 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.
[24] 王健."一带一路"倡议实施对城市创新效率的影响及其空间溢出[J].科技管理研究,2024,44(7):70-79.
(WANG Jian. The Implementation Impact of the Belt and Road Initiative on Urban Innovation Efficiency and Its Spatial Spillover Effects [J]. Science and Technology Management Research, 2024, 44 (7): 70-79. in Chinese)
[25] 孙文桥,刘启钢,赵国盛,等.基于本质安全的智能化铁路编组站生产作业安全评价指标体系构建研究[J].铁路物流,2025,43(4):50-56.
(SUN Wenqiao, LIU Qigang, ZHAO Guosheng, et al. Construction of Safety Evaluation Index System for Intelligent Railway Marshalling Station Operations Based on Inherent Safety [J]. Railway Logistics, 2025, 43 (4): 50-56. in Chinese)

Evaluation of Railway Safety Efficiency in Central Regions Based on the DEA-GML Model

GUO Hua[1, 3, 4], ZHOU Fangjian[2], JIN Huizhen[2], YANG Jinchen[1]

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan 425199, China;
2. School of Economics and Management, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan 425199, China;
3. Hunan Engineering Research Center of Health Monitoring and Intelligent Utilization in Immovable Cultural Relics, Yongzhou Hunan 425199, China;
4. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Protection and Utilization Technology for Brick and Stone Cultural Relics, Yongzhou Hunan 425199, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the railway safety efficiency in central regions, the differences in

railway safety efficiency among provinces and their influencing factors are analyzed to explore the key ways of improving railway safety efficiency. Based on the railway safety panel data of 6 provinces in central regions from 2012 to 2023, a static-dynamic evaluation system of railway safety efficiency is constructed. Among them, the static analysis evaluates the overall efficiency of railway safety in each province through the DEA-CCR model; the dynamic analysis uses the DEA-GML model to explore the changes in technical efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency and their impacts on railway safety efficiency. The results show that from the static point of view, there are significant differences in railway safety efficiency among provinces in central regions. The resource structure in Shanxi province is reasonable, and it continues to maintain DEA effective. The comprehensive efficiency of Hubei and Jiangxi provinces show good performance. Henan province is in the stage of increasing returns to scale, and the efficiency of Anhui and Hunan provinces have significant fluctuations. From the dynamic point of view, technical efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency have become the key factors to promote the improvement of railway safety efficiency. The improvement of railway safety efficiency in central regions should focus on the synergy between technological progress and scale optimization. The study conclusion provides a theoretical basis and decision-making reference for the optimization of railway safety resource allocation.

Key words: Railway safety efficiency; Central regions; Static-dynamic evaluation; DEA-GML model

（责任编辑　杨婧婕）