

# 基于 DEA-Malmquist 模型的四川省矿产资源开发效率评价

李俊波<sup>1,2</sup>, 浦华<sup>1</sup>, 吴昊<sup>3</sup>, 王月奇<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学数理学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学数学地质四川省重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学管理科学学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 提高矿产资源开发效率有利于加强资源保障能力, 对促进地区可持续发展有着重大现实意义。为探究四川省矿产资源开发效率提升路径, 本文采用 DEA-BCC 模型和 Malmquist 指数模型对四川省 2010~2018 年 21 个市州的矿产资源开发效率分别从静态和动态两个角度进行测度评价。结果表明, 四川省矿产资源开发水平正在逐步提升, 技术进步是效率提高的主要动力, 但纯技术效率和规模效率仍具有较大提升空间。其次, 区域之间矿产资源开发效率存在差异, 成都平原以及攀西地区开发效率提升最为明显, 川南、川东北等地区矿产资源开发效率提升则相对缓慢。本文最后根据评价结果提出对策建议为提高矿产资源开发效率提供参考。

**关键词:** 开发效率; DEA-BCC 模型; Malmquist 指数

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.000000

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0095-08

矿产资源作为我国重要的自然资源, 是社会生产发展的重要物质基础, 但矿产资源作为非可再生资源, 随着我国经济的不断发展, 矿产资源消耗不断增加, 且我国矿产资源禀赋不佳, 小矿多、大矿少, 贫矿多、富矿少, 共伴矿多、单一矿少, 矿山开发多、小、散的结构矛盾长期存在<sup>[1]</sup>, 为保障矿产资源供给, 应合理利用现有资源盘活呆滞资源, 大力发展综合利用技术<sup>[2]</sup>。四川省作为矿产资源大省, 矿业经济在经济社会发展中有着举足轻重的地位, 应不断加强四川省矿产资源综合利用开发效率的测度研究。

通过建立指标评价体系, 计算综合利用系数对矿产开发水平进行评价的方法已经较为成熟<sup>[3]</sup>, 但因所研究矿种的不同对指数评价方法所选择的评价指标存在较大差别, 因此很难形成一套关于区域整体矿产资源开发效率评价的

指数评价体系, 且在各指标之间的权重划分上仍存在较大分歧, 不少学者先后使用模糊综合评价、灰色关联分析以及层次分析等方法对相关指标进行赋权<sup>[4-6]</sup>。数据包络分析方法对矿产资源开发效率进行评价是从投入产出的角度来测度矿产资源开发的相对效率, 是一种非参数统计评价方法, 其应用和相关模型可以高效的确定最优生产前沿面, 且该方法的分析结果以数据为基础, 避免引入主观因素, 因此其结果较为合理, 目前被广泛应用于效率评价的各个领域。

矿产资源开发评价是以资源效益、经济效益、环境效益和社会效益的最佳组合为目标的一个典型的多目标决策问题<sup>[7]</sup>, 建立科学的评价指标体系及权重的确定、选择合理的评价方法是关键和核心问题<sup>[8-9]</sup>。目前四川省矿产资源开发方面

收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 四川省社科联基地重大项目 (SC20EZD004), 成都理工大学哲学社会科学研究基金项目 (YJ2021-ZD007), 数学地质四川省重点实验室开放基金项目 (scsxdz2021yb01)

作者简介: 李俊波 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境大数据。

的研究主要是在矿产资源开发利用水平以及矿产资源开发与经济、生态以及地质灾害之间的关系上，且现有研究多以攀西地区单个矿种或者矿山企业作为研究对象，针对区域矿产资源开发效率的测度评价较少。基于此本文在已有研究的基础上选择采用 DEA 模型和 Malmquist 指数分别从静态和动态两个角度对四川省 21 个市州的矿产资源综合利用开发效率进行测度分析，对丰富和完善绿色矿业具有重要的理论价值，有利于丰富绿色发展理论，拓展可持续发展内涵，在实践上可为规划编制和决策提供依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 DEA 模型

矿产资源开发是一个多投入多产出的复杂系统，而数据包络分析（DEA）在多投入多产出的情况时相比其他方法具有明显优势。DEA 是一种基于决策单元之间相对比较的非参数技术效率分析方法，主要用于多投入多产出下的效率分析<sup>[10]</sup>，根据不同市州矿产资源开发的投入产出数据进行 DEA 分析，并对其背后的经济意义进行解释，进而达到对各地区相对效率的评价。DEA 基础模型包括规模报酬不变（CRS）的 CCR 模型和规模报酬可变（VRS）的 BCC 模型，CCR 模型由 Charnes 等<sup>[11]</sup>于 1978 年首次提出，BCC 则是 Banker 等于 1984 年在 CCR 模型的基础上提出的一种可以估计规模效率的 DEA 模型，剔除了技术效率中规模效应的影响，得出“纯技术效率”（*Pure technical efficiency, PTE*）。我们可以根据综合技术效率（*Comprehensive technical efficiency, TE*）和纯技术效率（*PTE*）求得规模效率（*Scale efficiency, SE*），即  $SE=TE/PTE$ 。其中 BCC 模型的数学形式可以表达为式（1）：

$$s.t. \begin{cases} \min \theta \\ \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0, S^- \geq 0, S^+ \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\theta$  为决策单元的效率值， $j = 1, 2, \dots, n$  表示决策单元， $X_j, Y_j$  分别是投入、产出向量。 $\lambda_j$  代表权重系数， $S^-$  和  $S^+$  分别为剩余变量和松弛变量，分别反映决策单元的产出不足量和投入冗余量。

在上述模型 (1) 有下列定义：

- ①若  $\theta = 1, S^- = S^+ = 0$ ，则决策单元 DEA 有效；
- ②若  $\theta = 1, S^- \neq 0$  或  $S^+ \neq 0$ ，则决策单元 DEA 弱有效；
- ③若  $\theta < 1$ ，这表明决策单元 DEA 非有效。

### 1.2 Malmquist 指数

对四川省各市州之间的矿产资源开发效率的测度研究不仅需要静态分析同时也需要结合动态分析，Malmquist 指数能够很好的反映出四川省各市州不同时期矿产资源开发效率的动态变动趋势。Malmquist 全要素生产率指数是 Malmquist<sup>[12]</sup> 提出专门用于测度动态效率的一种指数，Fare<sup>[13]</sup> 最先将 Malmquist 指数分解为两个不同时期的综合技术效率改变和技术进步改变，其中技术进步改变反映的就是随着时间的改变生产前沿面的移动情况，综合技术效率的变动则是反映决策单元与生产前沿之前的距离变化。

Malmquist 指数模型中时期  $t$  到  $t+1$  的 Malmquist 指数表达式为：

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \sqrt{\frac{E^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^t(x^t, y^t)} \times \frac{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^{t+1}(x^t, y^t)}} \quad (2)$$

在 Malmquist 的计算公式中， $E^t(x^t, y^t)$  和  $E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$  分别是  $K$  在两个时期的技术效率值，可以将其作为两个时期的技术效率变化：

$$EC = \frac{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^t(x^t, y^t)} \quad (3)$$

对于生产前沿的移动情况，可以用以下表达式进行描述：

$$TC = \sqrt{\frac{E^t(x^t, y^t)}{E^{t+1}(x^t, y^t)} \times \frac{E^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}} \quad (4)$$

如果TC值大于1表示前沿前移，小于1表示前沿后退，前沿前移代表着技术进步。

Malmquist 指数、效率变化和技术变化三者之间的数量关系可以表示为：

$$MI = EC \times TC = \frac{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^t(x^t, y^t)} \times \sqrt{\frac{E^t(x^t, y^t)}{E^{t+1}(x^t, y^t)} \times \frac{E^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}} \quad (5)$$

若MI指数值大于1，则表示效率在提高；若MI指数值小于1，则表示效率在降低；若MI指数值等于1，则表示效率保持不变。

### 1.3 指标体系构建与数据来源

区域矿产资源开发是一个复杂多变的系统，它是矿业经济系统、矿业环境系统以及矿业社会系统的综合反映，因此指标体系的构建尤为重要。参考已有文献对矿产资源开发效率的研究，大多数学者选择从“三率”水平、资金和人员投入、资源消耗、经济效益以及环境损害程度等角度对矿产资源开发效率进行测度，本文在考虑指标数据之间的信息冗余、多重共线性以及数据包络分析方法对数据要求的同时，结合四川省矿业发展实际情况以及数据收集过程中的系统性、科学性、显著性、可获取性，选择从社会投入、劳动力投入以及资源消耗三个方面来反映四川省矿产资源开发的投入情况，选取矿山企业数、年末矿业从业人员数来表征社会投入和劳动力投入，选取矿山开采以及后续加工所消耗的资源总量表征资源消耗，选取矿业工业总产值和矿业综合利用产值来表征矿业生产过程中产生的经济效益。具体投入产出指标体系见表1。

表1 四川省矿产资源开发投入产出指标  
Table 1 Input and output indicators for the development of mineral resources in Sichuan Province

一级指标	二级指标	三级指标	单位
投入指标	社会投入	矿山企业数	家
	劳动力投入	年末矿业从业人员数	人
	资源消耗	资源消耗量	万吨
产出指标	经济效益	工业总产值	万元
		综合利用产值	万元

本文研究所用数据为2010~2018年期间四川省21个市州矿产资源开发数据，其中2014年数据缺失，其他个别缺失数据通过SPSS.26软件进行线性插值法补齐。各指标数据均来源于2010~2018年期间的《四川省矿产资源年报》。

## 2 四川省矿产资源综合利用开发效率评价

针对四川省矿产资源开发效率评价，考虑从静态和动态两个角度进行评价研究。首先采用DEA-BCC模型进行静态分析，得出各市州之间的相对效率，探究导致部分地区DEA无效的原因。接着利用Malmquist指数进行动态分析，分别研究四川省整体各年份的矿产开发效率变化和各市州2010~2018年期间整体的变化趋势，最后根据指数分解探究矿产开发效率变化的具体原因。

### 2.1 基于DEA模型的静态分析

基于上述DEA模型，运用MaxDEA 8.0软件选择非导向规模报酬不变(CRS)的CCR模型和非导向规模报酬可变(VRS)的BCC模型分别计算出四川省21个市州2010年、2015年和2018年的综合技术效率、纯技术效率以及规模效率，为突出表现四川省各地区之间的差异，本文将四川省21个市州划分为五个区域，并计算其相应效率值，结果见表2，图1，其中TE表示为综合技术效率，PTE为纯技术效率，SE为规模效率。

表 2 四川省各市州 2010 年、2015 年和 2018 年矿产资源开发效率值及其分解  
Table 2 Efficiency value of mineral resource development and its decomposition in the cities and prefectures of Sichuan Province in 2010, 2015 and 2018

地区	2010				2015				2018			
	TE	PTE	SE	规模报酬	TE	PTE	SE	规模报酬	TE	PTE	SE	规模报酬
攀枝花市	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
凉山州	0.918	1.000	0.918	递减	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
攀西地区	0.959	1.000	0.959	--	1.000	1.000	1.000	--	1.000	1.000	1.000	--
甘孜州	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
阿坝州	0.398	1.000	0.398	递增	0.773	1.000	0.773	递增	0.489	1.000	0.489	递增
川西北地区	0.699	1.000	0.699	--	0.886	1.000	0.886	--	0.745	1.000	0.745	--
宜宾市	0.515	0.805	0.640	递减	0.323	0.333	0.971	递增	0.303	0.315	0.960	递增
内江市	0.438	0.642	0.682	递减	0.302	0.303	0.999	递减	0.263	0.286	0.919	递增
泸州市	0.510	0.911	0.560	递减	0.424	0.424	1.000	递减	0.277	0.300	0.925	递增
乐山市	0.312	0.348	0.895	递减	0.272	0.272	0.998	递增	0.243	0.259	0.937	递增
自贡市	0.178	0.215	0.829	递增	0.247	0.437	0.564	递增	0.253	0.403	0.628	递增
川南地区	0.391	0.584	0.721	--	0.314	0.354	0.907	--	0.268	0.313	0.874	--
成都市	0.317	0.371	0.855	递增	1.000	1.000	1.000	不变	1.000	1.000	1.000	不变
绵阳市	0.216	0.218	0.990	递增	0.187	0.204	0.918	递增	0.104	0.170	0.614	递增
德阳市	0.359	0.475	0.755	递减	0.680	0.704	0.966	递减	0.450	0.569	0.791	递增
眉山市	0.372	0.384	0.970	递增	0.372	0.382	0.973	递增	0.280	0.410	0.683	递增
遂宁市	0.393	0.553	0.710	递增	0.398	0.740	0.537	递增	0.267	0.731	0.365	递增
雅安市	0.266	0.273	0.972	递减	0.272	0.285	0.957	递增	0.366	0.392	0.934	递增
资阳市	0.183	0.306	0.599	递增	0.209	0.397	0.526	递增	0.226	0.642	0.352	递增
成都平原地区	0.301	0.369	0.836	--	0.445	0.530	0.840	--	0.385	0.559	0.677	--
南充市	0.430	0.464	0.927	递增	0.426	0.475	0.897	递增	0.337	0.485	0.695	递增
达州市	0.195	0.378	0.517	递减	0.155	0.157	0.985	递增	0.201	0.202	0.996	递减
广安市	0.520	0.674	0.772	递减	0.299	0.315	0.948	递增	0.446	0.474	0.942	递增
巴中市	0.425	0.457	0.931	递增	0.889	0.930	0.957	递增	0.361	0.482	0.749	递增
广元市	0.338	0.531	0.637	递减	0.252	0.262	0.962	递增	0.156	0.176	0.886	递增
川东北地区	0.382	0.501	0.757	--	0.404	0.428	0.950	--	0.300	0.364	0.853	--
均值	0.442	0.572	0.788	--	0.499	0.553	0.902	--	0.430	0.538	0.803	--

结合表 2 和图 1 可以看出，四川省 2010 年、2015 年以及 2018 年的矿产资源开发综合技术效率均小于 0.5，整体效率水平偏低，距离达到 DEA 有效仍存在明显差距。从纯技术效率和规模效率角度分析，四川省 2010 年、2015 年和 2018 年规模效率均在 0.8 左右，规模效率未达到 DEA 有效，仍具有较大提升空间，而纯技术效率值均未超过 0.6，由此可见制约四川省矿产资源高效开发的主要是纯技术效率。

从各大地区矿产资源开发效率来看，各区域

之间矿产资源开发水平参差不齐，攀西地区和川西北地区的效率明显高于其他地区，其中攀西地区 2015 年和 2018 年的综合技术效率均达到了 DEA 有效状态。成都平原地区、川南地区和川东北地区 2010 年、2015 年以及 2018 年的综合技术效率均未达到 0.5，分析其缘由可以看出三个地区综合技术效率偏低仍是其纯技术效率较低所导致的。

从各市州的矿产资源综合利用开发效率可以得出，2010 年综合技术效率达到 DEA 有效状态的

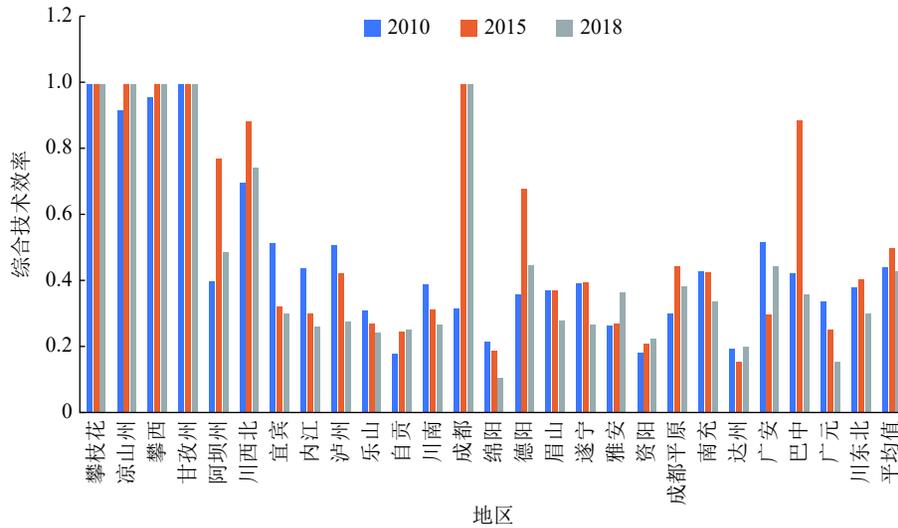


图1 四川省各市州 2010 年、2015 年和 2018 年综合技术效率对比

Fig.1 Comparison of the development efficiency of mineral resources in various cities and prefectures in Sichuan Province in 2010, 2015 and 2018

市州仅有攀枝花市和甘孜州，占全部地级市的 9.52%，2015 年和 2018 年达到 DEA 有效的市州增至四个，分别是攀枝花市、凉山州、甘孜州以及成都市，占全部地级市的 19.05%。从 DEA 无效市州的规模报酬来看，主要呈现为递增状态，因此导致四川省大部分市州规模效率无效的主要原因是生产规模较小，应考虑在原有资源配置下加大投入扩大生产规模，提高规模效率。

由以上分析可以看出，导致四川省矿产资源开发综合技术效率较低的主要原因是纯技术效率偏低，应加强内部管理，完善矿产资源开发制度，提升从业人员技术。

### 2.2 基于 Malmquist 指数的动态分析

根据四川省各市州 2010-2018 年期间的矿业绿色发展面板数据利用 DEAP 2.1 软件计算全要素生产率变动、综合技术效率变动、技术进步变动、纯技术效率变动、规模效率变动，计算结果见表 3、4，图 2，其中 tfpch 表示为全要素生产率变化，techch 为技术进步变化指数，effch 为综合技术效率变化指数，sech 为规模效率变化指数，pech 为纯技术效率变化指数，且它们存在如下关系：

$$tfpch = techch \times effch = techch \times sech \times pech$$

表3 2010-2018 年四川省矿产资源开发 TFP 指数及其分解

Table 3 TFP index and its decomposition of mineral resources development in Sichuan Province from 2010 to 2018

年份	effch	techch	pech	sech	tfpch
2010~2011	1.022	1.007	0.935	1.093	1.029
2011~2012	0.865	1.071	0.892	0.97	0.927
2012~2013	0.872	1.092	0.921	0.947	0.952
2013~2015	1.384	0.999	1.239	1.117	1.382
2015~2016	0.876	1.429	1.098	0.797	1.252
2016~2017	1.174	0.813	0.975	1.205	0.954
2017~2018	0.826	1.577	0.952	0.868	1.302
均值	0.986	1.116	0.996	0.990	1.100

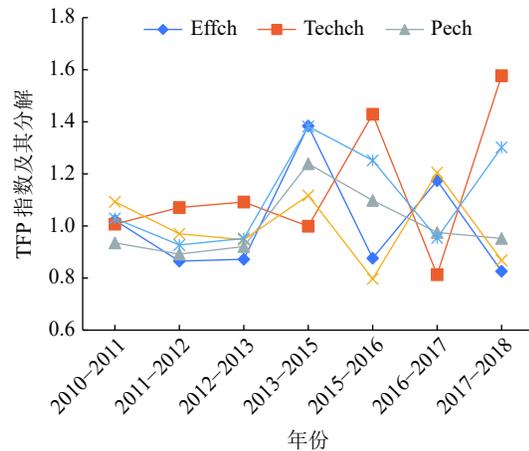


图2 2010~2018 年四川省全要素生产率及其指数分解变化趋势

Fig.2 Change trend of total factor productivity and its index decomposition in Sichuan Province from 2010 to 2018

(1) 四川省各年份 2010~2018 年期间矿产资源开发效率变动

从表 3 可以看出, 四川省 2010~2018 年期间各年份矿产资源开发的全要素生产率均值为 1.100, 说明四川省 2010~2018 年期间矿产资源开发效率在不断提高。其综合技术效率变化和技术进步变化分别为 0.986 和 1.116, 因此四川省矿产资源开发效率提升的主要原因是技术的不断进步, 但综合技术效率整体有所下降, 究其原因, 四川省 2010~2018 年期间的纯技术效率变化和规模效率变化均小于 1, 表明两者都存在一定程度的下降, 共同导致了综合技术效率的下降。结合图 2 可知, 四川省 2010~2018 年期间矿产资源开发全要素生产率整体波动较大, 2013~2016 年期间矿产资源开发效率提升最为明显, 2011~2013 年期间矿产资源开发效率出现连续下降, 从指数分解来看, 2011~2013 年期间技术进步变化均大于 1, 但综合技术效率变化均未超过 0.9, 因而使得矿产资源开发效率出现连续下降。与此相反, 2016~2017 年期间综合技术效率变化大于 1, 但技术进步变化仅为 0.813, 因此导致全要素生产率小于 1。整体来看, 全要素生产率仍主要受技术进步变化影响, 应重视技术研发, 加强产学研结合, 同时优化生产规模加强管理, 提高综合技术效率, 双向发力, 共同提高矿产资源开发效率促进矿业发展。

(2) 四川省各市州 2010~2018 年期间矿产资源开发效率变动

表 4 反映出四川省 2010~2018 年期间各地区矿产资源开发的全要素生产率及其分解情况, 除内江市外, 其余市州全要素生产率均值均大于 1, 其中成都市全要素生产率均值达到了 1.556, 表明各州矿产资源开发效率在逐步提高。

从各区域来看, 攀西、成都平原地区的矿产资源开发效率提升明显, 全要素生产率平均值均在 1.1 以上, 且技术进步变化和综合技术效率变化

表 4 2010~2018 年四川省各市州矿产资源开发全要素生产率及其指数分解

Table 4 Total factor productivity and its index decomposition of mineral resources development in all cities and prefectures of Sichuan Province from 2010 to 2018

地区	effch	techch	pech	sech	tfpch
攀枝花市	1.000	1.146	1.000	1.000	1.146
凉山州	1.012	1.115	1.000	1.012	1.129
攀西地区	1.006	1.131	1.000	1.006	1.138
甘孜州	1.000	1.011	1.000	1.000	1.011
阿坝州	1.030	1.093	1.000	1.030	1.126
川西北地区	1.015	1.052	1.000	1.015	1.069
宜宾市	0.927	1.084	0.883	1.050	1.004
内江市	0.930	1.052	0.915	1.016	0.978
泸州市	0.917	1.105	0.863	1.062	1.013
乐山市	0.965	1.131	0.974	0.991	1.091
自贡市	1.051	1.094	1.087	0.967	1.150
川南地区	0.958	1.093	0.944	1.017	1.047
成都市	1.178	1.320	1.136	1.037	1.556
绵阳市	0.901	1.166	1.015	0.887	1.051
德阳市	1.033	1.135	1.072	0.963	1.171
眉山市	0.960	1.124	1.038	0.925	1.079
遂宁市	0.946	1.121	1.036	0.913	1.061
雅安市	1.047	1.064	1.061	0.986	1.114
资阳市	1.031	1.091	1.074	0.959	1.124
成都平原地区	1.014	1.146	1.062	0.953	1.165
南充市	0.966	1.155	1.015	0.951	1.116
达州市	1.004	1.086	0.947	1.060	1.091
广安市	0.978	1.118	0.966	1.013	1.094
巴中市	0.977	1.134	0.995	0.982	1.108
广元市	0.895	1.119	0.883	1.014	1.002
川东北地区	0.964	1.122	0.961	1.004	1.082
均值	0.986	1.116	0.996	0.990	1.100

均大于 1, 由此可见两区域的矿产资源开发属于多方面协调发展共同进步, 但仍可以看出推动全要素生产率提高的主要因素仍是技术进步指数的提升; 尽管川西北地区技术进步指数变化和综合技术效率变化均大于 1, 但增长幅度较小, 使得全要素生产率提升并不明显; 川南地区和川东北地区全要素生产率均大于 1, 主要是受到技术进步指数提高的影响, 而综合技术效率变化小于 1, 将综合技术效率变化指数分解来看, 川南地区和川东北地区的规模效率变化均小于 1, 因此两地综合技术

效率不断下降属于资源要素配置不合理所致，生产规模或大或小，未能达到最佳水平。因此各地应根据自身特点，认识到矿产资源开发效率提高受限的原因，以及效率提升的主要动力，各市州间取长补短，有针对性的采取措施提升矿产资源开发效率。

### 3 结 语

(1) 静态分析结果表明，四川省 2010~2018 年整体矿产资源开发效率较低，且各地区之间差异明显，矿产资源丰富的攀西和川西北等地的效率明显高于其他地区；导致四川省矿产开发效率偏低的主要原因是纯技术效率较低，四川省大部分市州规模效率未达到 DEA 有效均表现为规模报酬递增，生产规模较小使得产能不足。

(2) 动态分析结果表明，尽管四川省 2010~2018 年期间各市州矿产资源开发效率较低，但矿产资源开发全要素生产率正在不断提高，表明各市州矿产资源开发效率正在不断提升；四川省矿产资源开发全要素生产率的提升主要受技术进步的影响，综合技术效率并未出现太大变化。

(3) 四川省矿产资源开发水平正在逐步提升，技术进步是效率提高的主要动力，但纯技术效率和规模效率仍具有较大提升空间。其次，区域之间矿产资源开发效率存在差异，成都平原以及攀西地区开发效率提升最为明显，川南、川东北等地区矿产资源开发效率提升则相对缓慢。

### 参考文献：

[1] 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 J H, QIANG H Y. The trend and direction of green development of the mining industry in China[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(2):7-12.  
[2] 刘淑鹏, 张小伟. 基于区域协同量化的矿山尾矿综合信息管理构想研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):17-20.

LIU S P, ZHANG X W. Research on comprehensive information management of mine tailings based on regional cooperative Reduction[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):17-20.  
[3] 袁宗仪. 建立我国矿产资源综合开发利用评价体系[J]. *矿产综合利用*, 1993(5):31-36.  
YUAN Z Y. Establish an evaluation system for the comprehensive development and utilization of mineral resources in my country[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1993(5):31-36.  
[4] 罗德江, 吴昊, 何苏, 等. 基于犹豫模糊 TOPSIS 的绿色矿山多属性评价方法[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):41-49.  
LUO D J, WU H, HE S, et al. Multiattribute evaluation method for green mines based on hesitant fuzzy TOPSIS[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):41-49.  
[5] 吴安兵, 郭科, 罗德江. 滇东南地区矿产资源开发效率的模糊层次综合评价[J]. *国土资源科技管理*, 2014, 31(5):63-70.  
WU A B, GUO K, LUO D J. Evaluation of mineral resources development efficiency of Southeast Yunnan Region based on fuzzy hierarchy comprehensive evaluation method[J]. *Land and Resources Science and Technology Management*, 2014, 31(5):63-70.  
[6] 吴仲雄, 赵文彬. 广西优势矿产资源开发利用评价[J]. *中国矿业*, 2006, 15(12):91-94.  
WU Z X, ZHAO W B. Evaluation about the exploitation and utilization of Guangxi superior mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(12):91-94.  
[7] 李学全, 李松仁, 尹蒂. 矿产资源综合开发利用评价的多目标决策灰色关联度方法[J]. *矿产综合利用*, 1996(2):39-43.  
LI X Q, LI S R, YIN D. Multi-objective decision-making grey relational degree method for the evaluation of comprehensive development and utilization of mineral resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1996(2):39-43.  
[8] 薛盈杉, 张军军, 曾小波. 基于 AHP-熵权法的金属矿山开发利用水平综合评价研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):66-72.  
XUE Y S, ZHANG J J, ZENG X B. Comprehensive evaluation of exploitation and utilization level of metal mines based on AHP and entropy weight method[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):66-72.  
[9] 丁其光, 徐明. 矿产开发利用效率评价指标及方法初探[J]. *矿产综合利用*, 2012(1):53-55.  
DING Q G, XU M. Discussion of evaluation index framework

for mineral development efficiency[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2012(1):53-55.

[10] 成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2014.

CHENG G. Data envelopment analysis: method and MaxDEA software[M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2014.

[11] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of*

*Operational Re-search*, 1979, 2(6):429-444.

[12] Malmquist S. Index numbers and indifference surfaces[J]. *Trabajos De Estadistica*, 1953, 4(2):209-242.

[13] Fare R, Grosskopf S, Lindgren B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980-1989: Anon-parametric Malmquist approach[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, 3(1/2):85-101.

## Development Efficiency Evaluation of Mineral Resources in Sichuan Province Based on DEA-Malmquist Model

Li Junbo<sup>1,2</sup>, Pu Hua<sup>1</sup>, Wu Hao<sup>3</sup>, Wang Yueqi<sup>1</sup>

(1.School of Mathematics and Physics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China;

2.Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 3.College of Management Science, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** Improving the efficiency of mineral resource development is conducive to strengthening the ability to guarantee resources, and is of great practical significance to promoting the sustainable development of the region. In order to explore the improvement path of mineral resource development efficiency in Sichuan Province, this paper uses DEA-BCC model and Malmquist index model to measure and evaluate the mineral resource development efficiency of 21 cities and prefectures in Sichuan Province from 2010 to 2018 from static and dynamic perspectives. The results show that the development level of mineral resources in Sichuan Province is gradually improving, and technological progress is the main driving force for efficiency improvement, but there is still much room for improvement in pure technical efficiency and scale efficiency. Secondly, there are differences in the efficiency of mineral resource development between regions. The development efficiency of the Chengdu Plain and Panxi Region has improved the most, while the improvement of mineral resource development efficiency in southern and northeastern Sichuan has been relatively slow. At the end of this article, countermeasures and suggestions are put forward based on the evaluation results to provide references for improving the efficiency of mineral resource development.

**Keywords:** Mineral resources development; DEA-BCC model; Malmquist index