

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.009

# 中国铁矿资源经济安全评价与预警

郑明贵<sup>1,2</sup>, 吴萍<sup>1\*</sup>, 尤碧莹<sup>1</sup>

ZHENG Minggui<sup>1,2</sup>, WU Ping<sup>1\*</sup>, YOU Biying<sup>1</sup>

1.江西理工大学经济管理学院,江西 赣州 341000;

2.中国科学技术大学管理学院,安徽 合肥 230026

1.School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2.School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

**摘要:**铁矿是中国重要的战略矿产资源,其经济安全关乎国民经济社会发展全局。为深入研究中国铁矿资源经济安全,从资源、进口市场、可持续发展3个层面出发,构建了中国经济安全评价指标体系,运用改进的TOPSIS法、障碍度模型和GM(1,1)-BP组合模型实现对2001—2018年中国铁矿资源经济安全的评价、主要障碍因子分析及2020—2025年铁矿资源经济安全预警。结果表明:①2001—2018年,中国铁矿资源经济安全水平总体呈先降后升趋势,安全预警等级经历了蓝色预警—红色预警—橙色预警的变化过程;②一级指标中,资源安全贴适度呈波动下降趋势,进口市场安全贴适度先升后降,可持续发展安全贴适度处于不断波动下降,但2016年之后又急剧上升趋势;③影响铁矿资源经济安全的主要障碍因子为储采比、探明储量增量、勘查投入增长率、资源回收利用率和资源相对丰度;④2020—2025年中国铁矿资源经济安全贴适度呈下降趋势,安全预警等级由橙色预警上升至红色预警。

**关键词:**铁矿资源;经济安全评价;经济安全预警;TOPSIS;组合模型;障碍因子

**中图分类号:**P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)05-0836-10

**Zheng M G, Wu P, You B Y. Economic security evaluation and early warning of iron ore resources in China. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 836–845**

**Abstract:** Iron ore is an important strategic mineral resource, and its economic security is related to the overall situation of national economic and social development. In order to further study the economic security of iron ore resources in China, the evaluation index system of economic security of iron ore resources in China is constructed from three aspects of resources, import market and sustainable development. The improved TOPSIS method, obstacle degree model and GM(1, 1) -BP combination model are respectively used to evaluate the economic security of iron ore resources in China from 2001 to 2018, analyze the main obstacle factors and give early warning of the economic security of iron ore resources in 2020–2025. The results show that: ① From 2001 to 2018, the economic security level of iron ore resources in China showed a general trend of first decreasing and then increasing, and the security warning level experienced a change from blue warning to red warning and to orange warning; ② Among the first level indicators, the resource security closeness showed a fluctuating downward trend, the import market security closeness first increased and then decreased, and the sustainable development security closeness was in a fluctuating downward trend, but increased sharply after 2016; ③ The main obstacles affecting the economic security of iron ore resources are the reserve production ratio, the increment of proven reserves, the growth rate of exploration investment, the utilization rate of resource recovery and the relative abundance of resources; ④ From 2020 to 2025, the

收稿日期:2021-02-08;修订日期:2021-04-11

资助项目:国家社会科学基金重点项目《中国战略性矿产资源国家安全评估与预警系统研究(2020—2050)》(批准号:18AGL002)、国家自然科学基金重点项目《大数据环境下的评价理论、方法和应用》(批准号:71631006)和江西理工大学重大项目培育计划《大数据驱动下国家矿产资源安全战略管理现代化研究》(编号:19ZDPY-08)

作者简介:郑明贵(1978-),男,博士,教授,从事资源经济与管理研究。E-mail:mgz268@sina.com

\*通信作者:吴萍(1995-),女,在读硕士生,从事资源安全评价研究。E-mail:jxlg213008@163.com

economic security closeness of iron ore resources in China will show a downward trend, and the security warning level will rise from orange warning to red warning.

**Key words:** iron ore resources; economic security evaluation; economic security early warning; TOPSIS method; combination model; obstacle factor

中国铁矿资源总量丰富,但贫矿多、富矿少,复杂难选矿利用率低<sup>[1-2]</sup>。随着中国工业化、城镇化进程的持续推进,国内钢铁需求快速增长,铁矿石海外进口量逐年提高。2001—2018年,中国铁矿石进口量由 $0.92 \times 10^8$  t增加至 $10.64 \times 10^8$  t,增长近12倍,2018年中国铁矿石对外依存度高达85.40%。此外,国际铁矿石市场高度垄断化、金融化,加之国内钢铁产业集中度较低,使中国并未掌握铁矿石国际定价权,进口价格长期较高且波动频繁,铁矿资源安全风险进一步加大。受经济政策环境不确定性影响,未来中国铁矿资源安全状况也存在较大的不确定性。因此,开展中国铁矿资源安全问题研究、优化铁矿资源安全改善路径,对维护铁矿资源供给安全具有重要意义。

目前,国内外铁矿资源安全研究主要从两方面展开:一是基于单一维度的铁矿资源安全形势分析,如从铁矿资源开发利用<sup>[3]</sup>、供需趋势<sup>[4]</sup>、定价机制<sup>[5-6]</sup>、进出口贸易<sup>[7-8]</sup>等方面分析铁矿资源安全状况;二是构建指标体系,对铁矿资源安全进行评价与预警。代表性成果包括以可用性、可得性、技术与效率、社会性与治理、环境可持续性为框架的安全评价指标体系<sup>[9]</sup>,以海外贸易铁矿石供应、海外投资权益矿供应、国内铁矿石供应、铁矿石替代资源供应、铁矿石战略储备供应为一级指标的供应安全指标体系<sup>[10]</sup>,以资源风险、经济风险、政治风险、投资环境、环境约束、中国因素为准则层的海外投资风险指标体系<sup>[11]</sup>。从评价方法看,主要有模糊综合评价法<sup>[12]</sup>、主成分分析法<sup>[13]</sup>、“明科夫斯基—邓氏”优化组合评价法<sup>[14]</sup>、BGR-VW<sup>[15]</sup>方法等。关于铁矿资源安全预警,Hou等<sup>[16]</sup>基于粗糙集理论,构建了中国铁矿资源进口风险预警粗糙模糊神经网络模型;闫军印等<sup>[17]</sup>结合地区资源特征、开发利用条件及产品市场价格变化,建议构建铁矿资源可供性预警系统。由此可知,国内外对铁矿资源某一时段安全状况评价的研究成果较多,而对未来安全趋势预警的研究成果较少;在评价铁矿资源安全状况时,多偏重于供应安全和综合安全,很少考虑经济

安全。

矿产资源经济安全概念的界定是构建评价指标体系的基础。矿产资源经济安全的本质在于供需矛盾,焦点在于均衡价格<sup>[18]</sup>。从目前定义看,主要集中在对国民经济发展的支撑、对各种内外风险因素的抵御及对资源可持续利用的维护3个方面<sup>[19-20]</sup>,既能保障当前供应,又能满足未来发展需求<sup>[21]</sup>,既强调国内自给的充足性和持续性,又注重海外获取的经济性和稳定性<sup>[22]</sup>。因此笔者认为,矿产资源经济安全指在合理价格水平范围内,一国矿产资源能够及时、足量、稳定地供应,并实现对进口风险的分散化和资源可持续性的保障,以更好地满足国民经济发展的需要。

本文边际贡献在于:①构建了以资源安全、进口市场安全、可持续发展安全为一级指标的铁矿资源经济安全评价指标体系,全面地刻画了矿产资源经济安全评价的内容体系;②运用改进的TOPSIS法评价2001—2018年中国铁矿资源经济安全,综合考虑了主客观权重的双重影响,提高了评价结果的科学性和准确性;③采用基于残差修正的GM(1,1)-BP组合模型对2020—2025年中国铁矿资源经济安全进行预警,预警结果可以为未来风险防范措施制定及铁矿资源合理开发提供参考依据。

## 1 研究方法与数据说明

### 1.1 指标选取及数据来源

基于矿产资源经济安全的内涵,结合中国铁矿资源禀赋条件差<sup>[23]</sup>、进口风险大<sup>[24]</sup>、可持续开发利用水平不高<sup>[25]</sup>等特点,借鉴相关研究成果<sup>[15,26]</sup>,初步构建了一套包含资源安全、进口市场安全、可持续发展安全3个一级指标,储采比、探明储量增量、资源相对丰度、进口集中度、对外依存度、国际市场垄断度、运输通道安全度、价格波动率、地缘政治风险、勘查投入增长率、自然灾害风险率、资源回收利用率12个二级指标的铁矿资源经济安全评价指标体系,进一步采用专家咨询法对评价指标进行筛选。根据专家调研反馈意见,由于国际市场垄断度

长期变化很小,运输通道安全度、自然灾害风险为不可抗力风险且难以测算与预测,因此将其剔除。最终构建了铁矿资源经济安全评价指标体系(表1)。

本文中国铁矿石原矿储量及探明储量数据来自《全国矿产资源储量通报(2001—2018)》<sup>[27]</sup>,铁矿石产量、生铁产量和粗钢产量数据来自《中国钢铁工业年鉴(2002—2019)》<sup>[28]</sup>,铁矿石进口量、进口价格和进口来源国数据来自 UN Comtrade 数据库<sup>[29]</sup>,国内总人口数来自国家统计局<sup>[30]</sup>,中国铁矿地质勘查投入数据来自《中国国土资源年鉴》<sup>[31]</sup>和《中国矿产资源报告》<sup>[32]</sup>,废钢回收利用量数据来自《中国矿产资源年报》<sup>[33]</sup>和国际回收局(BIR)<sup>[34]</sup>,中国及世界铁矿石储量(含铁量)数据来自美国地调查局<sup>[35]</sup>,世界总人口数和国家风险治理指数(WGI)来自世界银行(World Bank)<sup>[36-37]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 改进的 TOPSIS 法

TOPSIS 法最早由 Hwang 等<sup>[38]</sup>提出,是一种有限方案多目标决策分析方法,其对样本大小、指标多少、数据分布等均无严格限制<sup>[39]</sup>,具有计算量小、信息失真少、几何意义直观等特点<sup>[40]</sup>,可较好地应用于铁矿资源经济安全评价。传统的 TOPSIS 法在指标权重的确定上过于主观或客观,且基于欧氏距离对各方案进行排序的结果,并不能完全反映各种评价方案的优劣性<sup>[41]</sup>。鉴于此,本文采用“AHP+熵权法”相结合的组合赋权法确定指标权重,综合主客观权重的双重优势,有效地规避了单一主观或客

观赋权带来的偏差,并对评价对象与正、负理想解的距离公式进行了改进。评价步骤如下。

#### (1) 指标标准化处理

为消除各评价指标量纲不同对评价结果的影响,采用极差法进行无量纲化处理,得到指标标准化值,设为  $X'_{ij}$ 。

#### (2) 组合权重计算

首先,利用 AHP 法得到评价指标的主观权重,记为  $W_{1j}=(W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1j})$ 。

其次,运用熵权法得到评价指标的客观权重,记为  $W_{2j}=(W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2j})$ 。

最后,借鉴韩锦辉等的做法<sup>[42]</sup>,按照最小信息熵原理,将主观权重  $W_{1j}$ 和客观权重  $W_{2j}$ 进行优化处理,并利用拉格朗日乘子法得到组合权重,公式如下:

$$W_j = \frac{\sqrt{W_{1j}W_{2j}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{W_{1j}W_{2j}}} \quad (1)$$

#### (3) 加权规范化矩阵构建及正负理想解确定

结合指标权重与指标标准化矩阵,构建加权规范化矩阵  $V=(V_{ij})_{mn}=(W_jX'_{ij})_{mn}$ ,并找出各指标的最大值和最小值,分别将其作为正理想解和负理想解,设为  $V^+$ 、 $V^-$ :

$$V^+ = \{ \max V_{ij} | i=1, 2, \dots, m \} = \{ V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+ \} \quad (2)$$

$$V^- = \{ \min V_{ij} | i=1, 2, \dots, m \} = \{ V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^- \} \quad (3)$$

表 1 铁矿资源经济安全评价指标体系

Table 1 Economic security evaluation index system of iron ore resources

目标层	一级指标	二级指标	指标计算	属性
铁矿资源经济安全	资源安全	储采比 $X_1$	铁矿石储量/铁矿石产量	+
		探明储量增量 $X_2$	当年铁矿石探明储量-上年铁矿石探明储量	+
		资源相对丰度 $X_3$	国内人均铁矿石储量/世界人均铁矿石储量	+
	进口市场安全	进口集中度 $X_4$	铁矿石进口量最多的前四位国家(地区)进口量之和/铁矿石总进口量	-
		对外依存度 $X_5$	铁矿石净进口量/铁矿石消费量	-
		价格波动率 $X_6$	(当年进口均价-上年进口均价)/上年进口均价	-
		地缘政治风险 $X_7$	$\sum$ (各进口国来源国进口份额) <sup>2</sup> ×对应国家风险指数	-
	可持续发展安全	勘查投入增长率 $X_8$	(当年地质勘查投入-上年地质勘查投入)/上年地质勘查投入	+
		资源回收利用率 $X_9$	废钢回收利用量/粗钢总产量	+

注:资源相对丰度指标中,中国及世界铁矿石储量按含铁量进行计算;资源回收利用率的计算考虑了废钢作为钢铁工业再生资源、铁矿石良好替代原料的重要特性

## (4) 欧氏距离计算

分别计算各评价对象到正、负理想解的欧式距离  $D_i^+$ 、 $D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

## (5) 相对贴近度的计算

计算评价对象与正理想解的接近程度  $C_i$ , 即铁矿资源经济安全贴近度, 公式为:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (6)$$

式中:  $C_i \in [0, 1]$ , 其值越大, 表明第  $i$  年铁矿资源经济安全水平越高, 预警等级越低; 反之安全水平越低, 预警等级越高。

## 1.2.2 因子障碍度模型

为识别中国铁矿资源经济安全主要影响因子, 引入障碍度模型, 计算公式为:

$$a_{ij} = \frac{S_{ij} W_j}{\sum_{j=1}^n S_{ij} W_j} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $a_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  项指标的障碍度,  $S_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  项指标实际值与最优值之差 (设为  $1 - X_{ij}'$ ),  $W_j$  表示因子权重。

计算一级指标对铁矿资源经济安全的障碍程度, 公式如下:

$$A_{ij} = \sum a_{ij} \quad (8)$$

## 1.2.3 GM(1,1)-BP 组合模型

GM(1,1) 灰色预测模型运算过程简便, 所需信息量少, 对趋势性明显的预测数据具有较大优势, 但处理波动性较大数据时, 预测效果往往欠佳。为提高 GM(1,1) 模型预测精度, 参照陈福集等<sup>[43]</sup>、范中洲等<sup>[44]</sup>的做法, 采用 BP 神经网络对 GM(1,1) 模型预测残差进行修正, 构建基于残差修正的 GM(1,1)-BP 组合模型。预警步骤如下:

设定原始数据序列  $(X^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n)$ , 根据 GM(1,1) 模型求得其预测数据序列 (设为  $X^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n$ ), 将原数据序列与预测数据序列相减, 求出残差序列:

$$e^{(0)}(k) = X^{(0)}(k) - \hat{X}^{(0)}(k) \quad (9)$$

构建一个三层 BP 神经网络, 采用滚动式预测

法, 将残差序列数值等距离处理, 取 5 年数据为一个节点, 递推下一年数据, 依此类推, 得到 BP 神经网络修正后的残差序列, 记作  $e^{(0)}(k)$ , 组合模型最终预测结果为:

$$\bar{X}^{(0)}(k) = \hat{X}^{(0)}(k) + e^{(0)}(k) \quad (10)$$

## 1.2.4 预警等级划分标准

参考相关研究成果<sup>[39, 45]</sup>, 依据贴近度以等距离方式将铁矿资源经济安全警情状况划分为 5 个等级 (表 2)。

## 2 结果与分析

## 2.1 铁矿资源经济安全评价

原始数据标准化处理结果见表 3。根据 AHP 法与熵权法原理, 结合公式 (1), 得到各指标权重计算结果 (表 4)。其中, 主观权重的计算融合了专家意见<sup>[46]</sup>, 采用问卷方式向高等院校、设计院、矿山企业等单位矿业工程和经济管理领域专家发放专家意见调查表, 请专家按 1~9 的标度对每一层次评价指标的相对重要性进行判断打分。共发放问卷 20 份, 收回 18 份, 整理并计算得到中国铁矿资源经济安全评价指标主观权重。

## 2.1.1 综合评价结果分析

根据公式 (2)~(6), 结合表 4, 测算得到 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全综合评价结果 (图 1)。

由图 1 可知, 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全贴近度整体呈现先降后升的变化趋势。分阶段看: 2001—2005 年, 铁矿资源经济安全贴近度从 0.6175 降至 0.4212, 预警等级由蓝色预警变为黄色预警, 由较安全转向临界安全。这一时期, 中国钢铁工业发展迅速, 铁矿石需求量不断增加, 供需缺口逐年增大。2006—2014 年, 铁矿资源经济安全贴近度位于 0.2548~0.4209 之间, 基本处于橙色预警

表 2 预警等级划分标准

Table 2 Classification standard of early warning level

贴近度 C	安全状态	预警等级
[0, 0.2]	不安全	红色预警
(0.2, 0.4]	较不安全	橙色预警
(0.4, 0.6]	临界安全	黄色预警
(0.6, 0.8]	较安全	蓝色预警
(0.8, 1.0]	安全	绿色预警

表3 2001—2018年中国铁矿资源经济安全评价指标标准化

Table 3 Standardization of economic security evaluation index of iron ore resources in China from 2001 to 2018

年份	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
2001	1.0000	0.0807	1.0000	0.0000	1.0000	0.6574	0.3830	0.2127	1.0000
2002	0.8845	0.0845	0.6204	0.0716	0.9525	0.7397	0.3494	0.1631	0.7899
2003	0.7613	0.0885	0.6527	0.1337	0.9074	0.4237	0.3452	0.4302	0.8682
2004	0.6176	0.2571	0.0583	0.3710	0.7749	0.0000	0.4849	1.0000	0.6594
2005	0.4302	0.1550	0.1428	0.3578	0.7885	0.6003	0.4274	0.4436	0.5164
2006	0.2687	0.2586	0.1747	0.3851	0.7992	0.7055	0.4171	0.6119	0.3691
2007	0.2082	0.1783	0.5798	0.4672	0.7832	0.3787	0.4655	0.2310	0.2648
2008	0.1790	0.2218	0.6157	0.4449	0.6541	0.2431	0.5891	0.9178	0.2348
2009	0.1235	0.3594	0.5282	0.4931	0.4442	1.0000	0.7171	0.2434	0.2302
2010	0.0839	1.0000	0.0000	0.6320	0.5181	0.1937	0.8213	0.3160	0.1831
2011	0.0152	0.2969	0.4117	0.8803	0.4916	0.4609	1.0000	0.2185	0.1483
2012	0.0179	0.4560	0.4442	0.9187	0.4383	0.8428	0.8904	0.2670	0.0643
2013	0.0000	0.3660	0.4177	1.0000	0.4545	0.6680	0.8172	0.0893	0.0036
2014	0.0050	0.6040	0.1192	0.6486	0.2166	0.8515	0.5991	0.0939	0.0214
2015	0.0218	0.1927	0.2546	0.2815	0.1362	0.9860	0.1438	0.0822	0.0000
2016	0.0307	0.0000	0.4494	0.3592	0.0464	0.7205	0.1863	0.0475	0.0452
2017	0.0329	0.2020	0.4205	0.3199	0.0000	0.4737	0.0857	0.0000	0.4236
2018	0.1417	0.1479	0.2006	0.2627	0.1486	0.6820	0.0000	0.0626	0.5616

状态。此阶段中国钢铁工业继续保持较快的发展态势,铁矿石进口需求增加,对外依存度较高,进口价格波动明显,资源安全风险加大。2015—2018年,铁矿资源经济安全贴进度出现小幅增长态势,预警等级由红色预警降为橙色预警,安全状况轻微好转。究其原因,一方面是供给侧结构性改革深入推进,钢铁去产能取得积极成效,国内铁矿石需求程度有所降低;另一方面,国内废钢铁产业迅速发展,加之“地条钢”逐渐退出使废钢资源得到释放,废钢回收利用量呈明显增加趋势,资源回收利用率

表4 指标权重计算结果

Table 4 Index weight calculation results

评价指标	主观权重	客观权重	组合权重
$X_1$	0.1964	0.2427	0.2190
$X_2$	0.1309	0.1080	0.1193
$X_3$	0.1091	0.0827	0.0953
$X_4$	0.0698	0.0759	0.0730
$X_5$	0.0803	0.0803	0.0806
$X_6$	0.0496	0.0479	0.0489
$X_7$	0.0731	0.0714	0.0725
$X_8$	0.1552	0.1415	0.1486
$X_9$	0.1358	0.1496	0.1429

得到提高,一定程度上缓解了中国铁矿资源的供需压力。

#### 2.1.2 一级指标评价结果分析

2001—2018年中国铁矿资源经济安全一级指标评价结果如图2所示。

##### (1) 资源安全分析

由图2可知,2001—2018年,资源安全贴进度整体呈波动下降趋势,从0.6855降至0.1514,预警等级由蓝色预警上升为红色预警,由较安全转向不安全。进入21世纪,中国经济进入快速发展阶段,铁矿资源需求随之快速增加,储采比不断下降。2002—2018年中国铁矿石人均储量不足世界平均水平的50%,资源基础相对薄弱。

##### (2) 进口市场安全分析

2001—2012年进口市场安全贴进度由0.5107缓慢上升至0.6965,预警等级由黄色预警降为蓝色预警,由临界安全转向较安全。这一时期,随着中国铁矿石进口来源国增加,铁矿石进口集中度降低,地缘政治风险指数也由0.8460降至0.6443,铁矿资源进口市场安全状况得到改善。2012—2018年进口市场安全贴进度呈下降趋势,预警等级由蓝色预警上升至橙色预警,由较安全转向较不安全。

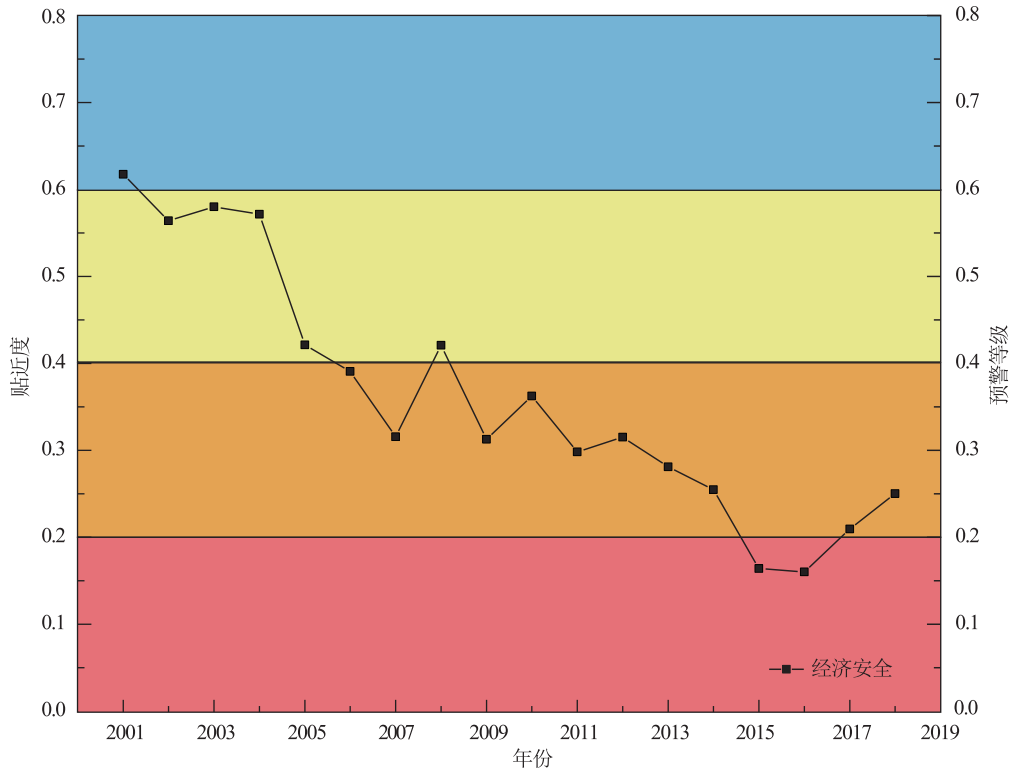


图 1 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全综合评价趋势图  
Fig. 1 Trend chart of comprehensive evaluation of economic security of iron ore resources in China from 2001 to 2018

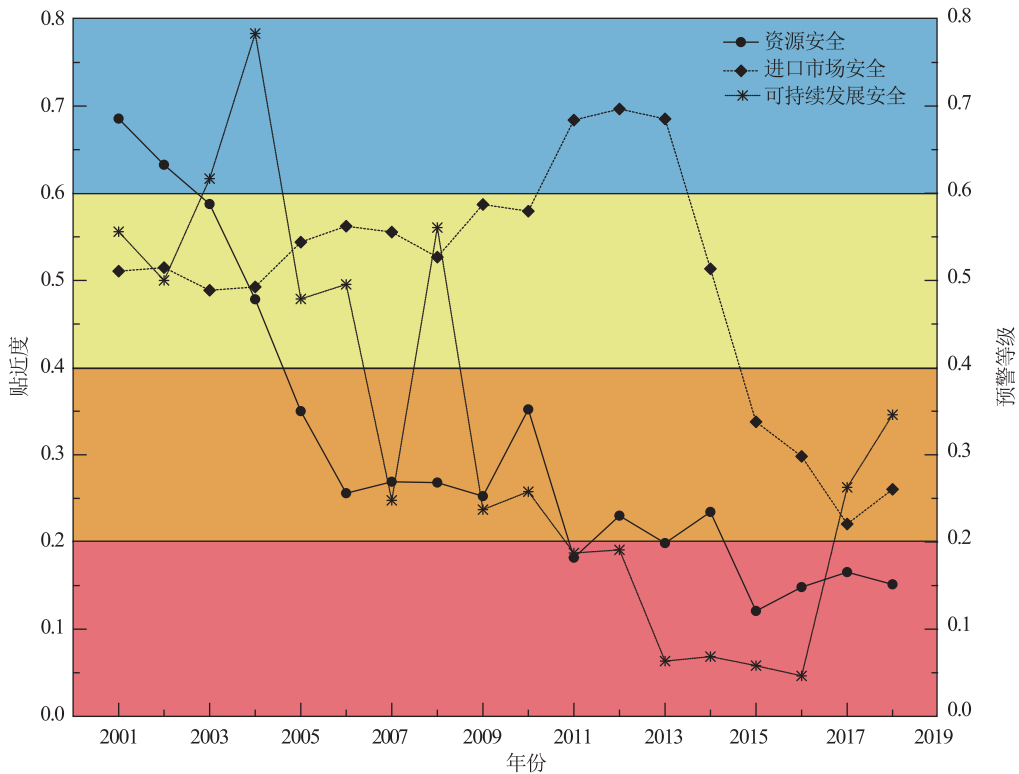


图 2 2001—2018 年中国铁矿资源一级指标评价趋势图  
Fig. 2 Trend chart of first-level indicator evaluation of iron ore resources in China from 2001 to 2018

该时期虽然中国铁矿石进口价格有所下降、价格波动率相对稳定,但进口集中度、对外依存度和地缘政治风险逐步上升,导致铁矿资源进口市场安全状况下降。

### (3)可持续发展安全分析

2001—2018年,可持续发展安全贴近度处于不断波动下降,但2016年之后又急剧上升的趋势。受资源回收利用率下降影响,2001—2016年可持续发展安全贴近度波动下降,其中2004年和2008年出现明显峰值,主要原因是2004年和2008年铁矿地质勘查投入力度加大,资金增长率分别高达248.60%和223.54%。2016—2018年,国内废钢铁产业迅速发展及“地条钢”逐渐退出,废钢回收利用率从 $9010 \times 10^4$  t增加至 $18756 \times 10^4$  t,资源回收利用率从11.16%提高到20.21%,铁矿资源可持续发展安全状况得到改善。

## 2.2 障碍因子诊断分析

### 2.2.1 二级指标障碍因子

根据公式(7),计算得到2001—2018年中国铁矿资源经济安全各二级指标障碍度,选取障碍度值排序前五的指标作为主要障碍因子进行分析(表5)。

由表5可知,不同年份影响铁矿资源经济安全的障碍因子各不相同。2001—2004年,主要障碍因子分散在资源安全、进口市场安全和可持续发展安全中,主要包括勘查投入增长率( $X_8$ )、探明储量增量( $X_2$ )、进口集中度( $X_4$ )、地缘政治风险( $X_7$ )等。2005—2010年,储采比( $X_1$ )成为影响铁矿资源经济安全的第一大障碍因子,且其障碍度逐年缓慢上升;其他障碍度较大的因子主要集中在资源安全和可持续发展安全中,但价格波动率( $X_6$ )的影响也不容忽视。2011—2018年,储采比( $X_1$ )仍为最大障碍因子;资源回收利用率( $X_9$ )、勘查投入增长率( $X_8$ )、探明储量增量( $X_2$ )和资源相对丰度( $X_3$ )次之;这一时期对外依存度( $X_5$ )的影响程度在逐渐增大。整体看,2001—2018年,储采比( $X_1$ )、探明储量增量( $X_2$ )、勘查投入增长率( $X_8$ )、资源回收利用率( $X_9$ )、资源相对丰度( $X_3$ )5个障碍因子出现的总次数均大于10,出现频率均超过70%,为研究期内最主要的障碍因子。

### 2.2.2 一级指标障碍因子

根据公式(8),得到2001—2018年中国铁矿资源经济安全各一级指标障碍度(图3)。

表5 2001—2018年中国铁矿资源经济安全二级指标主要障碍因子障碍度

Table 5 Obstacle degree of main obstacle factors for second-level indicators of economic security of iron ore resources in China from 2001 to 2018

年份	指标排序					%
	1	2	3	4	5	
2001	$X_8(32.40)$	$X_2(30.36)$	$X_4(20.22)$	$X_7(12.38)$	$X_6(4.64)$	
2002	$X_8(27.24)$	$X_2(23.92)$	$X_4(14.25)$	$X_7(10.33)$	$X_3(7.92)$	
2003	$X_2(24.49)$	$X_8(19.08)$	$X_4(14.25)$	$X_1(11.78)$	$X_7(10.69)$	
2004	$X_3(19.46)$	$X_2(19.22)$	$X_1(18.16)$	$X_6(10.60)$	$X_9(10.56)$	
2005	$X_1(21.36)$	$X_2(17.26)$	$X_8(14.16)$	$X_3(13.98)$	$X_9(11.84)$	
2006	$X_1(27.02)$	$X_9(15.21)$	$X_2(14.92)$	$X_3(13.26)$	$X_8(9.73)$	
2007	$X_1(26.42)$	$X_8(17.41)$	$X_9(16.01)$	$X_2(14.93)$	$X_3(6.10)$	
2008	$X_1(31.76)$	$X_9(19.33)$	$X_2(16.40)$	$X_4(7.16)$	$X_6(6.54)$	
2009	$X_1(30.08)$	$X_8(17.62)$	$X_9(17.25)$	$X_2(11.97)$	$X_3(7.04)$	
2010	$X_1(31.72)$	$X_9(18.47)$	$X_8(16.07)$	$X_3(15.06)$	$X_6(6.23)$	
2011	$X_1(32.21)$	$X_9(18.19)$	$X_8(17.35)$	$X_2(12.53)$	$X_3(8.37)$	
2012	$X_1(33.48)$	$X_9(20.82)$	$X_8(16.96)$	$X_2(10.10)$	$X_3(8.24)$	
2013	$X_1(31.23)$	$X_9(20.31)$	$X_8(19.30)$	$X_2(10.78)$	$X_3(7.91)$	
2014	$X_1(29.10)$	$X_9(18.69)$	$X_8(17.99)$	$X_3(11.21)$	$X_5(8.43)$	
2015	$X_1(25.33)$	$X_9(16.90)$	$X_8(16.13)$	$X_2(11.39)$	$X_3(8.40)$	
2016	$X_1(24.73)$	$X_8(16.49)$	$X_9(15.90)$	$X_2(13.90)$	$X_5(8.95)$	
2017	$X_1(25.97)$	$X_8(18.23)$	$X_2(11.67)$	$X_9(10.11)$	$X_5(9.88)$	
2018	$X_1(24.15)$	$X_8(17.90)$	$X_2(13.06)$	$X_3(9.79)$	$X_9(8.05)$	

注:括号内数值表示障碍度

由图3可知,3个一级指标障碍程度及其变化趋势存在较大差异。从变化趋势看,资源安全障碍度2001—2004年逐年上升,之后不断波动并趋于下降;进口市场安全障碍度2001—2012年波动下降,2013—2018年急剧上升;可持续发展安全障碍度先下降(2001—2004年)后波动上升(2004—2013年),最后缓慢下降(2013—2018年)。从障碍度均值看,2001—2018年资源安全、进口市场安全、可持续发展安全障碍度均值分别为47.60%、30.26%、22.14%,是影响铁矿资源经济安全的第一、第二、第三障碍因子。因此,为全面提升中国铁矿资源经济安全,应着重从提高资源安全和可持续发展安全入手,同时注重维护进口市场安全。

### 2.3 铁矿资源经济安全预警

基于2001—2018年中国铁矿资源经济安全贴近度值,根据前文预警步骤,首先得到GM(1,1)模型拟合结果。其次,按公式(9)进一步计算得出残差序列,利用Matlab软件编程,构建BP神经网络,将2001—2005、2002—2006……2013—2017年

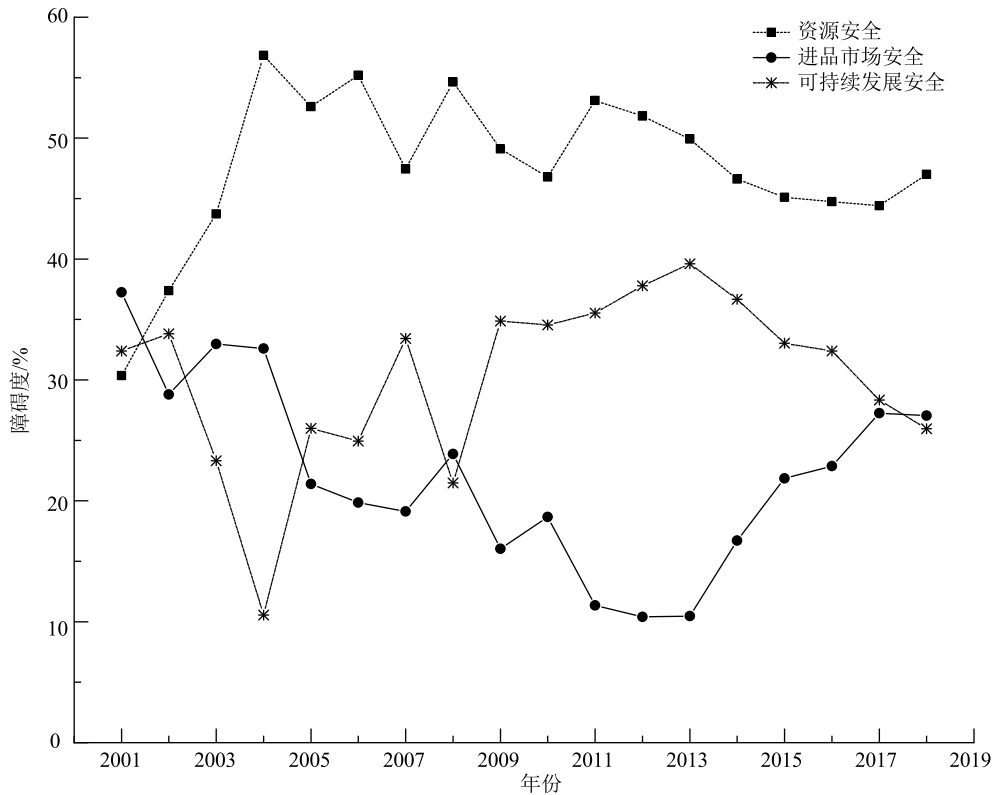


图 3 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全一级指标障碍度

Fig. 3 The first-level indicator obstacle degree of economic security of iron ore resources in China from 2001 to 2018

GM(1,1) 预测残差数据作为网络输入,2006—2018 历年数据作为理想输出,即输入层单元数为 5,输出层单元数为 1,对网络进行学习训练。通过试凑法确定隐含层最优节点数为 5,设置最大训练步数为 50000,学习速率为 0.001,目标精度为 0.00001,隐含层连接函数为  $\text{tansig}$ ,输出层连接函数为  $\text{logsig}$ ,训练算法为  $\text{traingdx}$ ,得到残差拟合值及 GM(1,1)-BP 组合模型预测结果。GM(1,1) 模型与 GM(1,1)-BP 组合模型预测结果对比如表 6 所示。

由表 6 可知,GM(1,1) 模型与 GM(1,1)-BP 组合模型预测平均相对误差分别为 12.83% 和 0.08%。与 GM(1,1) 单一模型相比,GM(1,1)-BP 组合模型的预测结果更趋近实际值,平均相对误差更小,预测精度更高。由此,采用 GM(1,1)-BP 组合模型对 2020—2025 年中国铁矿资源经济安全趋势进行预警,结果见表 7。

由表 7 可知,2020—2025 年中国铁矿资源经济安全贴近度整体呈下降趋势,预测值由 0.2255 下降

至 0.1219,预警等级由橙色预警上升至红色预警,安全风险进一步增大。

### 3 结论及建议

#### 3.1 结论

本文以中国铁矿资源经济安全为研究对象,构建基于资源安全、进口市场安全、可持续发展安全为一级指标的铁矿资源经济安全评价指标体系,将主观赋权法(AHP)和客观赋权法(熵权法)相结合确定指标权重,运用改进的 TOPSIS 法对 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全状况进行评价,结合障碍度模型探析了影响铁矿资源经济安全的主要障碍因子,最后采用基于残差修正的 GM(1,1)-BP 组合模型对 2020—2025 年中国铁矿资源经济安全变化趋势进行预警,主要结论如下。

(1) 2001—2018 年中国铁矿资源经济安全贴近度总体呈先降后升趋势,预警等级经历了蓝色预警—红色预警—橙色预警的变化过程;各一级指标中资源安全贴近度呈波动下降趋势,进口市场安全贴近



表 6 GM(1,1)模型与 GM(1,1)-BP 组合模型预测结果对比

Table 6 Comparison of prediction results between GM(1,1) model and GM(1,1)-BP combination model

年份	经济安全 贴适度	GM(1,1)模型		BP神经网络模型		GM(1,1)- BP组合 模型预测值	GM(1,1)模型预测 相对误差/%	GM(1,1)-BP组合模型 预测相对误差/%
		预测值	残差	残差预测	残差预测			
2001	0.6175	0.6175	0.0000				0.00	
2002	0.5640	0.5785	-0.0145				2.57	
2003	0.5800	0.5380	0.0420				7.24	
2004	0.5716	0.5004	0.0712				12.46	
2005	0.4212	0.4654	-0.0442				10.49	
2006	0.3908	0.4329	-0.0421	-0.0422	0.3907		10.77	0.02
2007	0.3157	0.4026	-0.0869	-0.0861	0.3165		27.53	0.24
2008	0.4209	0.3745	0.0464	0.0464	0.4209		11.02	0.00
2009	0.3127	0.3483	-0.0356	-0.0356	0.3127		11.38	0.02
2010	0.3624	0.3240	0.0384	0.0385	0.3625		10.60	0.02
2011	0.2981	0.3013	-0.0032	-0.0032	0.2981		1.07	0.00
2012	0.3151	0.2803	0.0348	0.0347	0.3150		11.04	0.02
2013	0.2809	0.2607	0.0202	0.0202	0.2809		7.19	0.01
2014	0.2548	0.2425	0.0123	0.0123	0.2548		4.83	0.01
2015	0.1641	0.2255	-0.0614	-0.0614	0.1641		37.42	0.00
2016	0.1602	0.2097	-0.0495	-0.0495	0.1602		30.90	0.03
2017	0.2096	0.1951	0.0145	0.0145	0.2096		6.92	0.01
2018	0.2503	0.1815	0.0688	0.0672	0.2487		27.49	0.64
平均相对误差							12.83	0.08

度呈先升后降趋势,可持续发展安全处于不断波动下降,但 2016 年之后又急剧上升的趋势。

(2)从障碍因子诊断结果看,一级指标中资源安全为最大障碍因子,可持续发展安全、进口市场安全次之;二级指标中储采比、探明储量增量、勘查投入增长率、资源回收利用率、资源相对丰度为影响铁矿资源经济安全的主要障碍因子。

(3)2020—2025 年,中国铁矿资源经济安全贴适度呈下降趋势,预警等级由橙色预警上升至红色预警,安全状况由较不安全转向不安全。

### 3.2 对策建议

(1)加强铁矿资源地质勘查工作。第一,2001—2011 年中国铁矿资源勘查投入年均增长 66.03%,

表 7 2020—2025 年中国铁矿资源经济安全预警结果

Table 7 Early warning results of economic security of iron ore resources in China from 2020 to 2025

年份	经济安全贴适度	预警等级
2020	0.2255	橙色预警
2021	0.1693	红色预警
2022	0.1580	红色预警
2023	0.1336	红色预警
2024	0.1254	红色预警
2025	0.1219	红色预警

2012 年达到峰值,2012—2018 年勘查投入年均下降 37.90%。为改善勘查投入下降和储量增量不足的现状,应持续稳定地增加铁矿地质勘查的中央和地方政府资金投入,同时广泛吸纳社会资金参与;第二,强化铁矿成矿理论研究,运用新技术、新方法开展原有矿山外围找矿和深部找矿,以增加后备资源,缓解产量递减;第三,加大对勘查程度较低的西部地区找矿力度,充分挖掘铁矿资源勘查开发潜力,进一步增加资源探明储量。

(2)加强低品位铁矿资源综合利用的研发工作。中国铁矿石贫矿多、品味低、开采条件差、选冶困难、成本较高,制约了铁矿石产量的提高。建议设立重大专项引导大型铁矿企业和科研院所联合攻关,着力解决低品位、共伴生铁矿资源的开发利用难题,以增加铁矿石产量。

(3)完善废钢铁资源回收利用机制。目前中国废钢铁回收利用率仅为 20% 左右,与全球 35%~45%、发达国家 50% 以上水平相比还存在较大差距。第一,建议加强废钢回收体系建设,完善废钢领域法律、法规及规范,增加相关指令性条款并作强制要求;第二,鼓励建立回收处理大宗废钢铁的大型企业,推广以废钢为原料的炼钢工艺及装备应用;第三,对符合准入标准的废钢铁大型企业给予税收优惠和补

贴,以不断提高废钢铁资源回收利用工艺水平。

(4)稳定和拓宽海外铁矿资源获取渠道。第一,利用“一带一路”战略机遇,与地缘政治风险较低且铁矿资源丰富的国家(如俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦等)加强合作,深入拓展铁矿资源开发合作项目;第二,鼓励大型铁矿企业并购海外优质铁矿资源,提高海外权益矿供应比重。

## 参考文献

- [1] 赵文报,李英.“走出去”化解钢铁行业产能过剩问题研究[J].河北经贸大学学报,2018,39(2): 78-86.
- [2] 王勋,韩跃新,李艳军,等.钒钛磁铁矿综合利用研究现状[J].金属矿山,2019,(6): 33-37.
- [3] 张泾生.我国铁矿资源开发利用现状及发展趋势[J].钢铁,2007,(2): 1-6.
- [4] 张艳飞,陈其慎,于汶加,等.2015—2040 年全球铁矿石供需趋势分析[J].资源科学,2015,37(5): 921-932.
- [5] Ma Y. Iron ore spot price volatility and change in forward pricing mechanism[J].Resources Policy,2013,38(4): 621-627.
- [6] Wårell L. The effect of a change in pricing regime on iron ore prices[J]. Resources Policy,2014,41: 16-22.
- [7] 朱永光,徐德义,成金华,等.国际铁矿石贸易空间互动过程及中国进口策略分析[J].资源科学,2017,39(4): 664-677.
- [8] Hao X, An H, Sun X, et al. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: from network perspective[J]. Resources Policy,2018,57: 45-54.
- [9] Zhang L, Bai W, Yu J, et al. Critical mineral security in China: an evaluation based on hybrid MCDM methods[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4114.
- [10] 吴新春.中国铁矿石资源供应安全研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2011.
- [11] Huang J, Liu J, Zhang H, et al. Sustainable risk analysis of China's overseas investment in iron ore[J].Resources Policy,2020,68: 101771.
- [12] 贺喜,张举钢,周吉光,等.河北省铁矿资源保障能力分析[J].地球学报,2013,34(6): 731-737.
- [13] 刘贤信.基于 SPSS 的我国铁矿石供应安全评价[J].金属矿山,2010(10): 34-37.
- [14] 王贵成.我国铁矿资源安全现状综合评价[J].矿业研究与开发,2011,31(5): 121-124.
- [15] 范松梅,沙景华,闫晶晶,等.中国铁矿石资源供应风险评价与治理研究[J].资源科学,2018,40(3): 507-515.
- [16] Hou Y B, Yang J. Application of rough fuzzy neural network in iron ore import risk early-warning[C]//Berlin Heidelberg: Advances in Neural Networks - ISNN 2010,2010: 432-438.
- [17] 闫军印,齐阔.区域矿产资源可供性评价及风险分析——以河北省铁矿资源为例[J].地质与勘探,2018,54(2): 426-434.
- [18] 王伯安,张德胜.中国石油经济安全评价指标体系设计[J].科学与科学技术管理,2010,(1): 141-144.
- [19] 张吉军.论我国矿产资源经济安全[J].科技进步与对策,2005,(3): 44-46.
- [20] 李宪海,王丹,吴尚昆.我国战略性矿产资源评价指标选择:基于美国、欧盟等关键矿产名录的思考[J].中国矿业,2014,23(4): 30-33.
- [21] Gong C, Gong N, Qi R, et al. Assessment of natural gas supply security in Asia Pacific: composite indicators with compromise benefit-of-the-doubt weights[J].Resources Policy,2020,67: 101671.
- [22] 任晓娟,范凤岩,柳群义,等.中国铝土矿的供应安全评价[J].中国矿业,2019,28(7): 52-59.
- [23] 蒋佐斌,贺瑞,张欢.中国铁矿资源循环经济政策矩阵研究[J].生态经济,2010,(6): 78-81.
- [24] 张会清.中国铁矿石进口风险的量化评估——兼评进口多元化策略的成效[J].国际经贸探索,2014,30(1): 44-56.
- [25] 邵安林.铁矿资源战略与矿冶工程管理——“五品联动”模式的工程哲学思考[J].科研管理,2013,34(8): 158-164.
- [26] 姚震,黎江峰,吴巧生,等.中国天然气资源安全态势分析[J].地质通报,2018,37(7): 1374-1378.
- [27] 国土资源部矿产资源储量司.2018 年全国矿产资源储量通报[M].北京:中华人民共和国国土资源部,2019.
- [28] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会.中国钢铁工业年鉴 2002—2019[M].北京:《中国钢铁工业年鉴》编辑部,2002-2019.
- [29] UNComtrade Database. Trade Statistics [EB/OL]. (2020-10-04) [2020-12-10]. <https://comtrade.un.org/data>.
- [30] 中华人民共和国国家统计局.国家数据 [EB/OL]. (2020-10-15) [2020-11-20]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [31] 中华人民共和国国土资源部.中国国土资源年鉴 2001-2016[M].北京:中国国土资源年鉴编辑部,2001-2016.
- [32] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告 [EB/OL]. (2020-10-20) [2020-12-15]. [http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc\\_19263/zgkczybg/](http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/).
- [33] 中华人民共和国国土资源部.中国矿产资源年报 [M].北京:中华人民共和国国土资源部,2016.
- [34] BIR. Ferrous Metals [EB/OL]. (2020-10-11) [2020-12-18]. <https://www.bir.org/the-industry/ferrous-metals>.
- [35] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries [EB/OL]. (2020-10-17) [2020-12-20]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.
- [36] World Bank. World Population [EB/OL]. (2020-10-15) [2020-11-30]. <https://data.worldbank.org/cn/indicator/SP.POP.TOTL>.
- [37] World Bank. Worldwide Governance Indicators [EB/OL]. (2020-10-15) [2020-11-30]. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=worldwide-governance-indicators>.
- [38] Hwang C L, Yoon K P. Multiple attribute decision making: methods and applications [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1981.
- [39] 徐美,刘春腊,李丹,等.基于改进 TOPSIS-灰色 GM(1,1)模型的张家界市旅游生态安全动态预警[J].应用生态学报,2017,28(11): 3731-3739.
- [40] 孙涵,聂飞飞,胡雪原.基于熵权 TOPSIS 法的中国区域能源安全评价及差异分析[J].资源科学,2018,40(3): 477-485.
- [41] 赵宏波,马延吉.东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子——以吉林省为例[J].应用生态学报,2014,25(2): 515-524.
- [42] 韩锦辉,赵文晋,杨天通,等.基于改进 TOPSIS 法的东北农牧交错区土地可持续利用评价及障碍因子诊断[J].水土保持研究,2018,25(3): 279-284,291.
- [43] 陈福集,史蕊.基于残差修正的多因素灰色模型的网络舆情预测研究[J].情报科学,2017,35(9): 131-135.
- [44] 范中洲,赵羿,周宁,等.基于灰色 BP 神经网络组合模型的水上交通事故数预测[J].安全与环境学报,2020,20(3): 857-861.
- [45] 徐美,朱翔,刘春腊.基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警[J].地理学报,2012,67(10): 1411-1422.
- [46] 闫金凯,赵银鑫,王志恒,等.银川市地下空间资源综合质量评价[J].地质通报,2021,40(10): 1636-1643.