

引用格式: 成金华, 帅竞, 赵雨佳, 等. 关键矿产供应风险评估与预测: 以铜资源为例[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1778-1788.  
[Cheng J H, Shuai J, Zhao Y J, et al. Risk assessment and prediction of critical mineral resources supply for China: A case of copper  
[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1778-1788.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.06

# 关键矿产供应风险评估与预测 ——以铜资源为例

成金华<sup>1</sup>, 帅 竞<sup>2</sup>, 赵雨佳<sup>1</sup>, 段浩然<sup>1</sup>, 帅传敏<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430074; 2. 武汉纺织大学经济学院, 武汉 430200)

**摘 要:**【目的】当今世界全球安全风险剧增, 关键矿产资源也不例外。中国的关键矿产面临怎样的供应风险, 中国如何应对与日俱增的关键矿产供应风险亟待研究。【方法】为此, 本文引入国际竞争力指数、构建了矿产资源“环境-市场-资源-竞争力”(EMRC)供应风险评估与预测指标体系, 采用SMAA-TRI方法对中国2008—2021年铜资源的供应风险进行了评价, 并采用BP神经网络方法对中国铜资源供应风险进行了预测。【结果】研究显示: ①国际竞争力维度对中国铜资源供应风险的影响最大, 环境维度的影响最小; ②从铜资源整体供应风险来看中国铜资源供应整体上处于中高风险到高风险区域且呈现逐年上升的趋势; ③2022和2023年中国铜资源供应风险预测为中高风险。【结论】为提高铜资源的保障程度, 中国应加大铜资源勘查投入, 提高国内铜矿资源利用率, 加强资源外交, 分散进口来源。

**关键词:** 关键矿产; 铜资源; 供应风险; 评估与预测; 国际竞争力; SMAA-TRI方法

DOI: 10.18402/resci.2023.09.06

## 1 引言

人口增长、经济发展和技术变革共同导致关键矿产的需求达到了前所未有的水平<sup>[1]</sup>。关键矿产是指影响或制约一个国家经济发展的紧缺矿种或者优势矿种, 被广泛应用于清洁能源技术、电子工业、国防军工等产业<sup>[2]</sup>。特别是, 铜、锂和钴等多种矿产是太阳能、风能和新能源汽车等清洁能源技术的关键原材料。在第26届联合国气候变化大会提出“最晚在本世纪中叶达到全球净零排放”的目标下, 关键矿产资源的需求量迅猛增加<sup>[3]</sup>。据国际能源署(IEA)预测, 全球要实现《巴黎协定》的2℃温控目标必须大力发展清洁能源技术, 2040年对关键矿产资源的需求规模将是2020年水平的6倍。然而, 由于地理分布不均<sup>[4]</sup>、品位下降<sup>[5]</sup>、回收利用有限<sup>[6]</sup>以及易受到政府政策影响<sup>[7]</sup>等特点, 关键矿产供应的可靠性难以得到保证, 供需矛盾日益突出。因此, 为保

证关键矿产的持续稳定供应, 美国、日本、澳大利亚和欧盟等国家(地区)将钴、锂和稀土等矿产列入了关键矿产目录<sup>[8]</sup>。世界各国日益重视关键矿产的供应安全问题, 关键矿产资源供应风险评估对保障国家经济发展和产业安全十分重要。

中国在《“十四五”规划和2035远景目标纲要》中提出深入实施制造强国战略、发展壮大战略性新兴产业。此外, 习近平在第七十五届联合国大会上宣布, 中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和目标(简称“双碳”目标)。关键矿产资源是中国制造业、战略性新兴产业以及清洁能源产业发展的必备原材料。然而, 欧美等西方国家近期提出“去风险论”, 实质上是在关键原材料等重要领域限制中国发展, 同时限制中国市场在世界范围内的影响力。这给中国关键矿产的供给带来诸多挑战<sup>[9]</sup>。铜矿作为关键矿产之一,

收稿日期: 2022-08-29, 修订日期: 2023-07-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71991482); 教育部人文社会科学基金青年项目(21YJC790098)。

作者简介: 成金华, 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为资源环境经济。E-mail: chengjinhua100@126.com

通讯作者: 帅竞, 男, 湖北武汉人, 博士后, 助理研究员, 主要研究方向为资源环境经济和国际贸易。Emails: jshuai@wtu.edu.cn

2023年9月

是中国电力、基础设施建设以及清洁能源领域的核心金属<sup>[10]</sup>。中国也是世界上最大的铜资源消费国,每年消耗全球近一半的铜资源<sup>[11]</sup>。因此,铜资源的供应风险已成为中国需要关注和解决的迫切问题。开展中国铜资源供应风险评估和预测对于保障中国制造强国战略实现、战略性新兴产业发展和“双碳”目标实现具有重要意义。

现有关于矿产资源供应风险评估与预测的研究主要包括以下两个方面:

### (1) 矿产资源供应风险与预测指标体系方面

矿产资源供应风险的相关研究主要从矿产供应的影响因素出发构建指标体系<sup>[12]</sup>。这些常用的指标可以划分为环境、市场和资源等3个维度。例如,进口国政治稳定程度、环境污染水平等指标为环境维度,主要反映国外环境对矿产进口的影响<sup>[13]</sup>;需求增长、市场集中度等指标为市场维度,反映矿产资源需求及市场垄断程度<sup>[14]</sup>;储量、产量等指标为资源维度,反映一个国家的矿产资源禀赋<sup>[15]</sup>。然而,这些指标忽视了本国矿产在全球矿产供应中的优势或劣势地位,在全球供应中具有优势地位的矿产则可以持续稳定供应本国需求。为了反映本国矿产在全球供给中的地位,鲍荣华等<sup>[16]</sup>构建和测算了矿产资源国际竞争力指数,虽然该研究选取的“储量占世界总储量的比重”和“产量占世界总产量的百分比”等指标在一定程度上可以反映中国矿产资源的储量和产量在世界各国中的优势,但是这些指标没有精准地体现中国矿产资源在国际矿产资源贸易中的竞争力。

### (2) 矿产资源供应风险评价与预测方法方面

模糊综合评价模型(FCE)<sup>[17]</sup>、K-means聚类分析与主成分分析<sup>[18]</sup>和模糊C均值聚类算法<sup>[19]</sup>是供应风险评估的常用方法。但是这些方法的应用依赖于指标权重,不同的指标权重则会导致评价结果差异很大。随机多准则可接受性分析方法(SMAA-TRI)可以在没有权重的情况下,根据指标数据进行评价,避免了权重差异带来的评价结果不稳健不准确的问题。并且,该方法已被广泛应用于纳米材料分类<sup>[20]</sup>、绿色化学<sup>[21]</sup>和矿物供应风险<sup>[15]</sup>的相关评估中。一些学者还对矿产资源的供应风险进行了预测。Zuo等<sup>[22]</sup>采用突变级数法(CPM)和路径分析法

(Path)来识别稀土行业的预警状态;郑明贵等<sup>[23]</sup>利用改进的GM(1, 1)模型和BP神经网络模型对2008—2017年中国铝资源供应安全进行了评价和预测。

综上,已有研究在矿产资源供应风险的评估、供应风险预测等方面取得了一定成果,然而仍存在以下研究不足:①往往基于环境、市场和资源等维度构建矿产资源供应风险评价指标体系,忽视了国际竞争力维度,无法了解本国矿产在国际贸易中的地位;②供应风险评估方法依赖于指标权重,不同的指标权重对结果影响较大,如何降低权重差异对结果稳健性和准确性的影响是评估的关键问题。

本文主要贡献包括以下3个方面:①将国际竞争力维度引入关键矿产供应风险评价中,构建了“环境-市场-资源-竞争力(EMRC)”供应风险评估与预测的指标体系,有利于精准衡量本国矿产在国际矿产市场中的优势或劣势地位。②采用随机多准则可接受度分析方法,对2018—2021年中国铜资源供应风险进行评估,其中运用蒙特卡洛迭代模拟指标权重,并用供应风险类别的概率来显示矿产资源的总体供应状况,减少了确定性指标权重的差异对评价结果带来的不稳健性。③基于矿产供应风险传导理论和BP神经网络方法,分析了中国铜资源的供应风险演化趋势及其影响因素,提出了有利于提高中国铜资源供应保障程度的政策建议。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 关键矿产供应风险评估指标体系构建

关键矿产资源的供应风险不是只由国内资源禀赋决定,还受到矿产来源国环境、矿产市场以及矿产国际竞争力的影响。矿产的资源禀赋是关键矿产供给的基本保障;矿产来源国环境是影响矿产资源进口的不可控因素;矿产市场因素反映中国矿产的供给和需求对矿产供应风险的影响;国际竞争力衡量中国矿产在国际矿产市场中的优势或劣势地位。本文考虑指标的适用性和相关性以及数据的可用性和可信度,在Achzet等<sup>[13]</sup>、Jasiński等<sup>[15]</sup>和Helbig等<sup>[24]</sup>矿产供应风险相关研究的基础上,从环境、市场、资源和国际竞争力等4个维度选取8个定量指标,构建了关键矿产供应风险评估与预测指标

体系(图1),对中国关键矿产供应风险进行评估和预测,分析2008—2021年关键矿产资源供应风险的动态演变趋势。

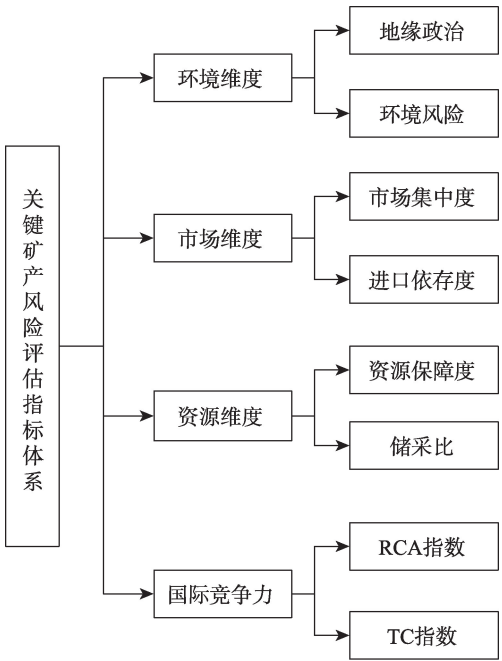


图1 关键矿产资源供应风险评估指标体系

Figure 1 Critical mineral resources supply risk assessment indicator system

本文所选的8个评价指标具体如下,各指标具体计算方法详见表1。

(1)环境因素

环境因素代表了国外不可控风险因素对关键矿产总供给的影响,该维度下包括两个指标:地缘政治和环境风险。地缘政治表示进口来源国政治环境的稳定程度,政治不稳定会对矿产的供应产生消极影响<sup>[14,25]</sup>。根据研究目标,选择全球治理指数(World Governance Index, WGI)中政治稳定(Political Stability No Violence)这一指标来表示地缘政治稳定性。WGI值越大,则该类矿产主要进口来源国的政治越稳定,进口来源国内部或外部因素破坏该国政治稳定的可能性越小,因此面临的供应风险越小。环境风险衡量了矿产来源国遭受环境污染和破坏的风险,采用环境绩效指标(Environmental Performance Index, EPI)来表示,EPI由减缓气候变化,空气质量,卫生和饮用水,重金属和废物管理,生物多样性和栖息地,生态系统服务,渔业,酸雨,农业,水资源等10项环境指标构成。研究表明,环境绩效低的国家面临更大概率的事故风险,进而阻碍矿产

表1 关键矿产资源供应风险评价指标

Table 1 Risk assessment indicators of critical mineral resources supply

维度	指标	计算公式	变量说明	指标属性
环境	地缘政治	$I_1 = \sum_{j=1}^n (WGI \times \frac{MP_n}{MP_{sum}})$	WGI:全球治理指标中“政治稳定和无暴力/恐怖主义”的估计值来衡量 MP <sub>n</sub> :主要来源国的产量 MP <sub>sum</sub> :全球产量	负向指标
	环境风险	$I_2 = \sum_{j=1}^n (EPI \times \frac{MP_n}{MP_{sum}})$	EPI:环境绩效指数	负向指标
市场	市场集中度	$I_3 = \sum_{j=1}^n (\frac{MP_n}{MP_{sum}})^2$	n:该矿产资源主要来源国国家个数	正向指标
	进口依存度	$I_4 = \frac{IV-EV}{AC}$	IV:进口量 EV:出口量 AC:表观消费量	正向指标
资源	资源保障度	$I_5 = \frac{R}{MC}$	R:查明资源储量 MC:消费量	负向指标
	储采比	$I_6 = \frac{R}{MP}$	R:查明资源储量 MP:产量	负向指标
国际竞争力	RCA指数	$I_7 = \frac{X_i/X_j}{W_i/W_j}$	X <sub>i</sub> :一国某商品出口额 X <sub>j</sub> :一国商品出口总额 W <sub>i</sub> :世界某商品的出口额 W <sub>j</sub> :世界商品出口总额	负向指标
	TC指数	$I_8 = \frac{X_{ij} - M_{ij}}{X_{ij} + M_{ij}}$	X <sub>ij</sub> :i国j产品的出口额 M <sub>ij</sub> :i国j产品的进口额	负向指标



2023年9月

资源供应<sup>[26,27]</sup>。EPI指数越小,则表示该类矿产主要进口来源国环境风险越高,矿产资源面临的供应风险越大。

### (2) 市场因素

市场因素是指市场供需变化情况对矿产资源供应风险的影响,是一种外部风险因素,市场风险越高则矿产资源供应风险越大。该维度下包括两个指标:市场集中度(市场供应角度)和进口依存度(市场需求角度)。市场集中度常使用赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)来表示,代表国外矿产资源市场的垄断风险<sup>[28,29]</sup>。市场集中度过高,矿产供应受到的影响程度越大,供应风险就越大。进口依存度是矿产资源净进口量与消费量的比值,反映了国内矿产资源消费对国外资源的依赖程度<sup>[10]</sup>。进口依赖度越大,表明该国对国外资源越依赖,资源供应越容易受到他国影响,资源的供应风险就越大。

### (3) 资源因素

资源因素反映中国矿产的资源禀赋,是矿产资源供给的基本保障,属于内部脆弱性因素。资源安全程度越高,国内现有矿产资源供应越稳定,供应风险越小。该维度包括两个指标:资源保障度和储采比。资源保障度是储量与消费量的比值,反映了当外部资源供应渠道中断,外界供应量为0时国内资源的可支撑程度<sup>[30]</sup>。资源保障度越高,供应风险越小。储采比则是储量与产量的比值,代表当外部资源供应中断时国内资源的可持续性,是确定资源安全的另一依据,表示目前资源的储量可用于开采的时间<sup>[31]</sup>,在其他研究中也称作消耗时间<sup>[14]</sup>。储采比的值越大,表明该矿产资源越充足,即使外部资源供应中断也能够较长时间内满足国内的矿产开采,因此供应风险越低。

### (4) 国际竞争力因素

国际竞争力因素是指在国际矿产资源贸易中的竞争力,反映了关键矿产对国际矿产资源市场的控制能力。一些学者对国际竞争力的影响进行深入分析发现,高国际竞争力对资源供应安全具有积极的影响<sup>[32,33]</sup>。因此,本文创新性地将国际竞争力指数引入关键矿产资源供应风险评价指标体系:显示性比较优势指数(Revealed Comparative Advantage Index, RCA)和贸易竞争优势指数(Trade Spe-

cial Coefficient, TC)。关键矿产RCA指数指一个国家某种矿产出口额占其出口总值的份额与世界出口总额中这种矿产出口额所占份额的比率<sup>[34]</sup>。一般而言,RCA值接近1表示中性的相对比较利益,无法体现相对优势或劣势;RCA值大于1,表示该矿产资源的出口占这一国家出口总值的比重大于占世界出口总额的比重,则该国的矿产资源产品在国际市场上具有比较优势;RCA值小于1,则表示在国际市场上不具有比较优势,国际竞争力相对较弱。TC指数是指一国矿产资源出口和进口贸易的差额占其进口和出口贸易总额的比重<sup>[35]</sup>。指数越接近于1竞争力越大,等于1时表示该国矿产资源只出口不进口;指数越接近于-1竞争力越弱,等于-1时表示该国矿产资源只进口不出口。RCA指数更关注中国矿产资源在全球矿产贸易中的竞争力和市场份额,是从国际矿产市场的角度衡量矿产资源的竞争力;而TC指数主要关注中国矿产的进口和出口量,是从中国自身矿产贸易的角度对矿产的竞争力进行考量。

### 2.1.2 随机多准则可接受性分析(SMAA-TRI)方法

随机多准则可接受性分析方法(SMAA-TRI)是在ELECTRE TRI方法的基础上,考虑参数的缺失和不确定性,根据模糊排序关系和预先确定的准则,将备选方案划分到相应类别中的一种多准则决策方法。本文使用SMAA-TRI方法来评估中国铜资源的供应风险。该方法首先将矿产资源供应风险划分为以下5类:低风险、中低风险、中风险、中高风险和高风险。然后,通过类别可接受性指数衡量矿产资源被划分到各个风险类别中的概率。类别可接受性指数取值范围为[0, 1]。本文将概率最大的风险类别作为某一矿产资源的供应风险类别。

关键参数描述如下,关键矿产资源供应风险指标阈值设置如表2所示。

(1)指标的权重 $w$ (weight)。在本文中,SMAA-TRI方法在权重缺失的情况下使用了10000次蒙特卡洛迭代模拟指标权重,决策者不需要提供明确的指标权重,避免了权重的主观性对结果评估的影响。

(2)阈值分类 $Pr_h$ (profile)。每个风险等级 $h$ ( $h \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ )由阈值配置文件 $Pr_h$ 来界定。设

表2 关键矿产资源供应风险指标阈值

Table 2 Threshold values of critical mineral resources supply risk indicators

指标	低风险	中低风险	中风险	中高风险	高风险	$p$	$q$
地缘政治	> 0.218	0.108~0.218	0.069~0.108	-0.071	< -0.002	0.10	0.20
环境风险	> 63.767	58.706~63.767	53.646~58.706	48.585~53.646	< 48.585	4.30	8.60
市场集中度	< 0.104	0.104~0.124	0.124~0.144	0.144~0.163	> 0.163	0.25	0.50
进口依存度	< 0.00	0.00~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	> 0.75	0.25	0.50
资源保障度	> 29.091	19.700~29.091	10.308~19.700	0.917~10.308	< 0.917	0.50	1.00
储采比	> 40.000	31.275~40.000	22.551~31.275	13.826~22.551	< 13.826	2.50	5.00
RCA指数	> 0.975	0.689~0.975	0.404~0.689	0.119~0.404	< 0.119	0.50	1.00
TC指数	> 0.176	-0.379	-0.378	-0.379	< -0.960	0.50	1.00

资料来源:作者根据本文计算结果和参考文献[15,36]设计。

$C(\text{class})=\{C_1, \dots, C_h, C_k\}$  为按偏好升序排列的类别集合( $C_1$ 为“最差”类别)。设  $Pr_h(\text{profile})=\{p_1, p_2, \dots, p_h, \dots, p_{k-1}\}$ ,  $Pr_h$  为  $C_h$  类的上限值和  $C_{h+1}$  类的下限值。

(3) 偏好阈值(Preference threshold,  $p$  值)与无差异阈值(Indifference threshold,  $q$  值)。 $p$  值与  $q$  值是将 profile 的确定边界模糊化,以测量不同风险等级的不确定性。本文参考相关研究<sup>[15,36]</sup>,确定  $q$  值是  $p$  值的两倍。

(4) 切割水平  $\lambda$  代表了大多数的决策标准,本文确定  $\lambda \in \{0.65, 0.85\}$ 。

SMAA-TRI 方法的具体流程如图 2 所示。

### 2.1.3 BP 神经网络模型

本文运用 BP 神经网络对铜资源各个供应风险因素进行预测,将预测系统的构建看作是构建了 1 个 3 层的神经网络,其中包含输入层、隐含层以及输出层。本文对地缘政治、环境风险、市场集中度、进口依存度、资源保障度、储采比、RCA 指数和 TC 指数 8 个指标分别进行建模和预测。在传入训练输入数据与训练输出数据后,根据节点之间存在的阈值和权重来计算隐含层、输出层的输入数据与输出数

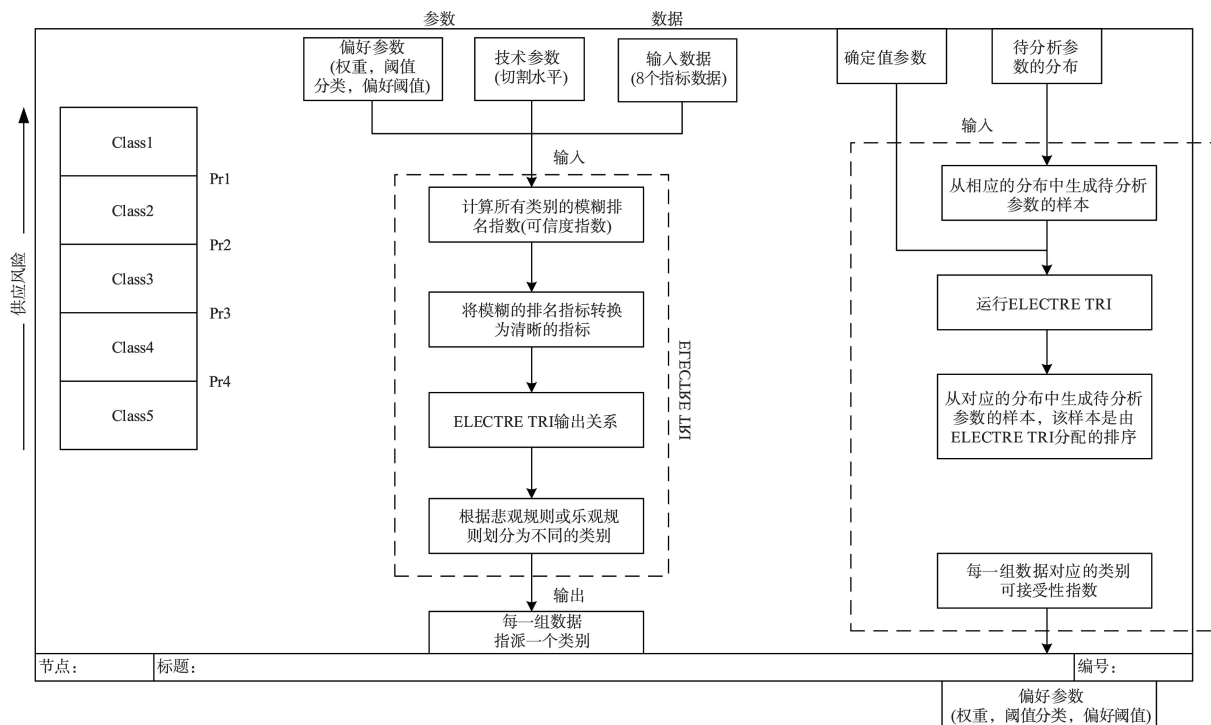


图2 基于 ELECTRE TRI 方法的 SMAA-TRI 计算流程图

Figure 2 Flowchart of SMAA-TRI calculation based on the ELECTRE TRI method

2023年9月

据,比较其输出值和训练输出值存在的差异。运用BP神经网络建立铜资源供应安全预测模型的过程如下所述:

### (1)预测网络设计

以2008—2021年共14年数据为基础,为了保证预测精度,选择前两年的数据作为序列的输入样本,下一年的数据作为网络的输出值,共获得12组样本数据。本文中神经网络输入节点数为2,输出节点数为1,隐含层中最佳节点数的选择参考以下方程式:

$$g < \sqrt{m+n} + a$$

式中:  $g$  为隐含层节点数;  $m$  为输入层节点数;  $n$  为输出层节点数;  $a$  为1~10的常数。通过逐步减少节点数的删减法则试算,确定各指标隐含层节点数目的最佳值,以避免“过拟合”现象<sup>[37]</sup>。隐含层神经元数量一般可取  $N=2n+1$ ,本文经训练发现当隐含层节点数目为5时,达到系统目标精度所需的迭代次数相对较少。隐含层神经元采用Tansig函数,输出层采用Purlin函数,网络训练采用Trainlm函数。根据经典BP神经网络算法经验<sup>[38]</sup>,确定最小学习速率为0.01,最大训练次数为1000次,允许误差为0.00001。BP模型参数设置如表3所示。

### (2)神经网络精度检验

经过网络训练,需要对训练模型进行精度测试,以确定预测模型的适用性。首先将2008—2018年的数据作为测试数据输入到模型中,运用训练好的模型,预测2019年、2020年和2021年各个预警指标的数值,并比较神经网络输出和期望输出之间的

差别。其中,期望输出是中国铜资源供应安全各项预警指标的历史值,神经网络输出是模型模拟计算得出的结果。平均绝对百分误差MAPE和拟合系数 $R^2$ 两个指标常被用于衡量模型精度,当模拟结果误差范围在20%左右,拟合系数 $R^2$ 高于90%,则评价结果较好<sup>[39]</sup>。通过比较输出结果,判断模型是否训练达标,以决定是否可以进行下一步的预测。

### (3)神经网络仿真分析

采用 $y=\text{sim}(\text{net}, x)$ 对中国2022年和2023年铜资源各指标进行预测,以2020—2021年数据为输入数据,预测得到2022年数据;以此类推,预测得到2023年数据。

## 2.2 数据来源

本文涉及的数据包括2008—2021年中国铜资源的进出口贸易量、进口贸易额、产量、储量以及消费量。其中,进出口量与进出口贸易额均来自联合国商品贸易统计数据库(UN comtrade),HS代码为2603;产量数据来自USGS\_Mineral Commodity Summaries(2009—2022年);储量数据来自中国矿业年鉴(2009—2018年);消费量数据来自USGS\_Mineral Commodity Summaries(2009—2022年)。此外,铜资源主要来源国全球治理指数来自世界银行报告中的Political Stability No Violence,环境绩效指数来自耶鲁大学报告。

## 3 结果与分析

### 3.1 中国铜资源供应风险影响因素及评估结果

#### 3.1.1 中国铜资源供应风险的影响因素

本文根据矿产供应风险的类别和指标阈值将各项指标划分为低风险、中低风险、中风险、中高风险和高风险5类,并分别赋值0、1、2、3、4,绘制中国铜资源供应风险影响因素占比图(图3),对环境、市场、资源、国际竞争力4个维度的指标取平均值,得到4个维度2008—2021年的供应风险等级(图4)。

在中国铜资源供应风险影响因素中,进口依存度在整体的供应风险中占比最大(图3),地缘政治对供应风险影响最小,但从2017年之后影响不断上升。从不同维度来看,2008—2021年中国铜资源供应风险环境维度风险波动较大,市场维度、资源维度和国际竞争力维度相对更加平稳,国际竞争力维度对中国铜资源供应风险的影响最大,环境维度的

表3 BP模型参数设置

Table 3 BPmodel parameter settings

项目类型	参数设置
输入层节点数	2
隐含层节点数	5
输出层节点数	1
激活函数(输入层到隐含层)	Tansig 函数
激活函数(隐含层到输出层)	Purlin 函数
训练函数	Trainlm 函数
最小学习速率	0.01
训练要达到的精度	0.00001
最大训练次数	1000

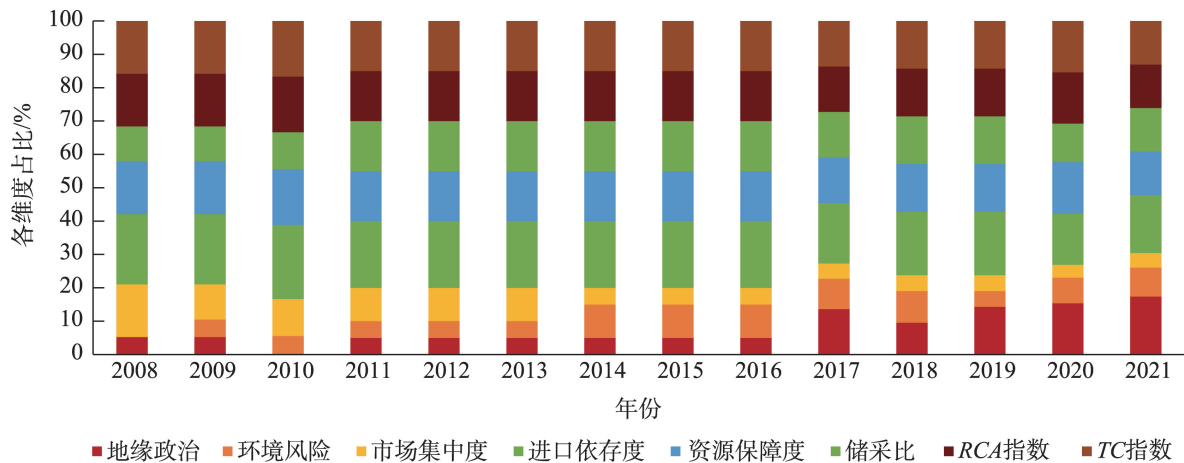


图3 2008—2021年中国铜资源供应风险影响因素占比图

Figure 3 Proportion of influencing factors of supply risk of copper resources in China, 2008-2021

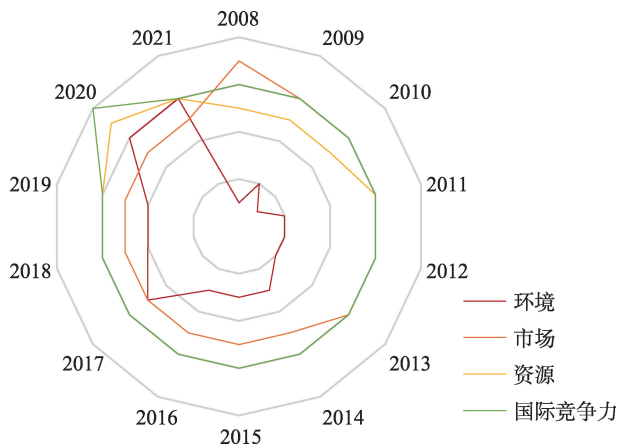


图4 2008—2021年中国铜资源供应风险维度图

Figure 4 Dimensions of the risk of China's copper resources supply, 2008-2021

影响最小。

从外部依赖性指标来看,2008—2021年间中国铜资源进口依存度均在80%以上,这意味着中国铜资源面临的地缘政治风险和環境风险、市场集中度受其主要来源国影响较大。智利、秘鲁是铜资源的生产大国,世界主要铜矿生产国与铜资源储量大国基本一致。自2020年新冠肺炎疫情暴发以来,随着

矿产品价格快速上涨,以智利、秘鲁、墨西哥等为主的铜资源储量大国高举资源民族主义大旗不仅影响自身的铜产量,也推高了铜资源获取成本,加剧了地缘政治风险,使得中国铜资源面临更大的供应风险。另一方面,从内部脆弱性指标来看,中国铜资源的资源保障度与储采比在供应风险影响因素占比较高,这意味着中国铜资源的资源安全程度较低,资源供应也不稳定,这与我国铜矿目前现状相吻合。中国铜矿产资源的RCA指数和TC指数在供应风险影响因素中同样占有较大比重,这意味着中国铜矿较弱的国际竞争力将影响其供应风险。

### 3.1.2 中国铜资源供应风险评估结果

本文采用SMAA-TRI方法得到2008—2021年中国铜资源的供应风险等级可接受性指数(图5),图6展示了2008—2021年中国铜资源的供应风险波动对比图。

由图5和图6可以看出,中国铜资源整体供应风险处于中高风险到高风险区域。2008—2021年,呈现逐渐风险逐渐上升的趋势,从中高风险上升到高风险区域。2016年与2017年供应风险高风险发

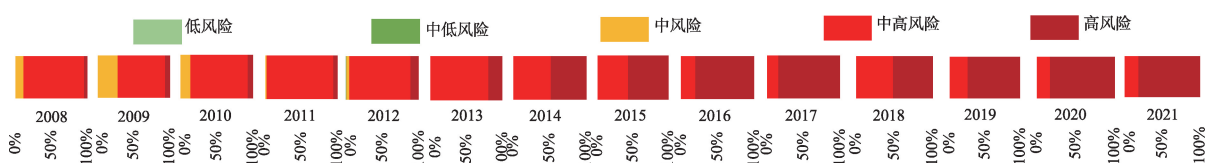


图5 2008—2021年中国铜资源供应风险等级可接受性指数

Figure 5 Acceptability index of supply risk level of copper resources in China, 2008-2021



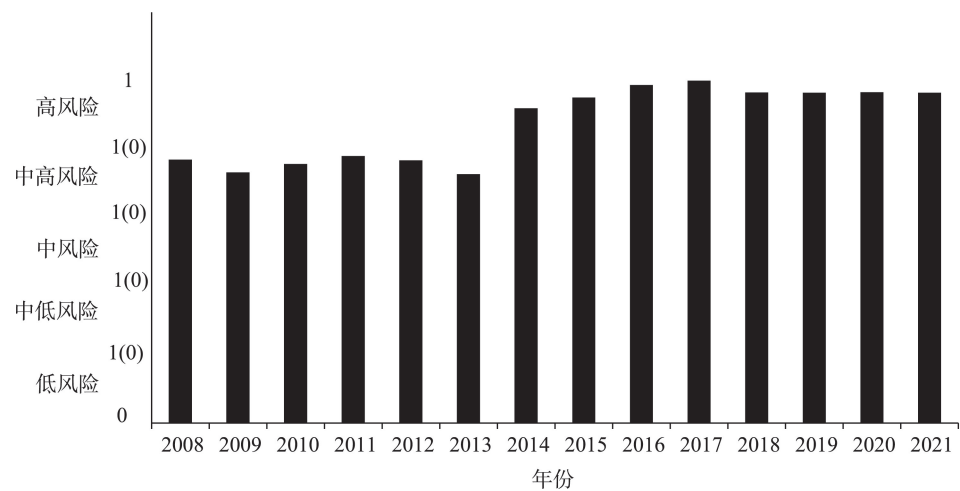


图6 2008—2021年中国铜资源供应风险图

Figure 6 Supply risks of copper resources in China, 2008-2021

生概率占比达到90%以上,是近14年内供应风险最高的时期。

3.2 基于BP神经网络模型的中国铜资源供应风险预测

3.2.1 模型精度检测结果

中国铜资源8项指标的模拟输出与期望输出之间的回归相关系数均在90%以上,表明模型的拟合程度较高。模型测试结果和期望输出结果对比中满足误差范围在20%左右,表明输出预测结果良好。

3.2.2 模型预测结果

由于国际形势长期处于变动当中,做长期的预测缺乏科学性和准确性。因此,本文应用训练好的BP神经网络模型来预测2022—2023年中国铜资源供应风险指标值,各项指标的预测结果如表4所示。

将2022—2023年中国铜资源供应风险各项指标的预测值输入SMAA-TRI方法进行供应风险评价,最终得到其供应风险类别可接受度如表5所示。从表5可以看出,2022年、2023年中国铜资源供应风险概率占比最大为中高风险,占比分别为50.09%和49.95%,因此本文预测中国铜资源2022年和2023年的供应风险为中高风险。在2018年以前,中国处在经济飞速发展的阶段,铜矿产资源需求旺盛,但国内铜资源保障不足,进口依赖度较大,面临着与日俱增的资源竞争压力。但从未来的长期发展来看,在双碳背景下能源结构的转型为铜资

表4 中国铜资源供应风险各指标的预测值

Table 4 Predicted values of various indicators of supply risk of copper resources in China

预警指标	预测值	
	2022年	2023年
地缘政治	-0.02667	-0.0221
环境风险	62.5334	62.5334
市场集中度	0.10526	0.1063
进口依存度	0.90976	0.9094
资源保障度	3.5422	3.8451
储采比	11.8345	11.8345
RCA指数	0.18989	0.1899
TC指数	-0.84418	-0.8442

资料来源:作者利用Matlab2017b仿真程序计算所得。

表5 2022—2023年中国铜资源供应风险预测值

Table 5 Predicted values of supply risk of copper resources in China, 2022-2023

	低风险	中低风险	中风险	中高风险	高风险
2022年	0	0	0.0321	0.5009	0.4670
2023年	0	0	0.0322	0.4995	0.4683

资料来源:作者计算所得。

源带来了新的增量需求,2035—2050年中国对铜资源的需求将持续维持高位,在资源保障薄弱和供应能力受限情况下,进口依存度依然是未来铜资源面临的关键问题。

4 结论与政策建议

4.1 结论

通过以上实证研究,本文得出以下研究结论:



(1)从维度来看,国际竞争力维度对中国铜资源供应风险的影响最大,环境维度的影响最小。影响因素中对中国铜资源供应风险影响最大的是进口依存度,中国国内铜资源保障不足,且需求量较大,严重依赖国外市场。因此,中国的铜资源应通过加快关键技术的突破,以加强铜矿勘探和提高铜资源利用率,从而在降低进口依赖度的同时提高自身国际竞争力。

(2)中国铜资源供应整体上处于中高风险到高风险区域且呈现逐年上升的趋势。这可能是由于中国经济飞速发展,拉动了铜资源市场的需求量,而中国铜资源大部分依赖进口;随着大国竞争和新冠疫情等因素的影响,国际贸易形势日趋复杂,铜矿价格上涨带来的风险难以预测,导致中国铜资源整体供应处于中高风险到高风险。

(3)短期预测来看,2022—2023年中国铜资源供应风险预测均为中高风险。从长期来看,双碳背景下能源结构转型给铜资源提出了新增增量需求,2035—2050年,中国对铜资源的需求仍将保持较高水平,在资源安全薄弱、供应能力有限的情况下,进口依赖度高仍是铜资源未来发展的关键问题。

## 4.2 政策建议

基于以上结论,本文提出如下政策建议:

(1)中国政府应高度重视铜资源供应风险的管控,加大铜资源勘查投入以确保铜矿相关产业安全和可持续发展。随着全球经济快速发展,铜资源作为基础设施建设不可或缺的原料,其供应风险的管控显得尤为重要,且《巴黎气候协定》各国对电动汽车的需求也会逐渐加大,对用于制造电动汽车不可或缺的铜资源的需求也将随之增长。由于中国铜资源需求量大,且主要依赖进口,未来应该加强对国内铜资源的重新评估,应加大铜资源勘查投入,寻找新的铜资源后备基地,进一步加大对具有找矿潜力地区的地质调查和资源评估的政策支持。

(2)中国应以提高国内铜资源利用率,减轻对铜资源进口依赖,降低国际贸易风险。面对国内铜资源保障程度低的问题,在没有铜矿新增储量的情况下,提高资源利用率是缓解铜资源供需矛盾的有效途径之一。特别是,再生铜作为一种回收的废铜

再冶炼的产品,不仅能缓解中国铜资源匮乏的现状,还符合当前节能减排和环保的要求。目前,在发达国家已经有完善的再生铜循环利用体系,如美国再生铜产量占总产量的60%,德国占比80%。而中国再生铜循环利用的水平与国外相比还有很大差距。因此,中国应加大对铜资源的回收利用的政策支持,提高再生铜产量,加强相关技术研发,提高再生铜的循环利用效率,以缓解中国铜资源的供应压力。

(3)中国应加强资源外交,开拓铜矿海外供给,分散进口来源。中国应加强与秘鲁、智利等资源大国的联系,发挥本国的基础设施建造优势,通过基础设施换资源等方式实现互利共赢,共同做大铜资源供应的蛋糕,不断提高全球治理能力。

## 参考文献(References):

- [1] Nassar N T, Brainard J, Gulley A, et al. Evaluating the mineral commodity supply risk of the U. S. manufacturing sector[J]. Science Advances, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.aay8647.
- [2] 葛建平, 刘佳琦. 关键矿产战略国际比较: 历史演进与工具选择[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1464–1476. [Ge J P, Liu J Q. International comparison of key mineral strategies: Historical evolution and tool selection[J]. Resource Science, 2020, 42(8): 1464–1476.]
- [3] Islam M M, Sohag K, Hammoudeh S, et al. Minerals import demands and clean energy transitions: A disaggregated analysis[J]. Energy Economics, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106205.
- [4] National Science and Technology Council Subcommittee on Critical and Strategic Mineral Supply Chains. Assessment of Critical Minerals: Screening Methodology and Initial Application[M]. Washington: Executive Office of the President, 2016.
- [5] Mudd G M. The Environmental sustainability of mining in Australia: Key mega-trends and looming constraints[J]. Resources Policy, 2010, 35(2): 98–115.
- [6] Graedel T E, Allwood J, Birat J P, et al. What do we know about metal recycling rates?[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(3): 355–366.
- [7] Galbraith, J. US tariffs on steel and aluminum imports go into effect, leading to trade disputes[J]. The American Journal of International Law, 2018, 112(3): 499–504.
- [8] 吴巧生, 周娜, 成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1439–1451. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. Summary and prospect of research on supply security of strategic key mineral resources[J]. Resource Science, 2020, 42

2023年9月

- (8): 1439–1451.]
- [9] 郭言. “去风险”成脱钩新马甲[N]. 经济日报, 2023–06–08(003). [Guo Y. Risk Mitigation as A Detached New Paradigm[N]. Economic Daily, 2023–06–08(003).]
- [10] 曾涛. 中国铜资源供应安全预警研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Zeng T. Study on The Early Warning of Copper Resource Supply Security in China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.]
- [11] 韩见, 夏鹏, 邢佳韵, 等. 后疫情时代中国铜资源供应形势分析[J]. 地球学报, 2021, 42(2): 223–228. [Han J, Xia P, Xin J Y, et al. An analysis of China’s copper resources supply situation in the Post-COVID-19 era[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2021, 42(2): 223–228.]
- [12] Van D B S, Kleijn R, Sprecher B, et al. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104743.
- [13] Achzet B, Helbig C. How to evaluate raw material supply risks: An overview[J]. Resources Policy, 2013, 38(4): 435–447.
- [14] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 1063–1070.
- [15] Jasiński D, Cinelli M, Dias L C, et al. Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis [J]. Resources Policy, 2018, 58: 150–158.
- [16] 鲍荣华, 王淑玲, 刘树臣, 等. 矿产资源国际竞争力指数的研究和测算[J]. 中国国土资源经济, 2006, (11): 20–24. [Bao R H, Wang S L, Liu S C, et al. Research and count on the index of international competitive power of mineral resources[J]. Natural Resource Economics of China, 2006, (11): 20–24.]
- [17] Liu M, Wei J H, Wang G Q, Wang F. Water resources stress assessment and risk early warning: A case of Hebei Province China [J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 358–368.
- [18] 李宏勋, 吴复旦. 我国进口天然气供应安全预警研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2018, 34(4): 1–6. [Liu H X, Wu F D. Study on early warning for imported natural gas supply in China [J]. Journal of China University of Petroleum (Social Science Edition), 2018, 34(4): 1–6.]
- [19] Xiao T, Zhang T, Zhang N. Research on energy supply chain risk prediction based on the fuzzy C-means clustering algorithm[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2022, 44(1): 65–75.
- [20] Tervonen T, Linkov I, Figueira J R, et al. Risk-based classification system of nanomaterials[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2009, 11: 757–766.
- [21] Cinelli M, Coles S R, Nadagouda M N, et al. Robustness analysis of a green chemistry-based model for the classification of silver nanoparticles synthesis processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 938–948.
- [22] Zuo Z L, Cheng J H, Guo H X, et al. Catastrophe progression method-path (CPM-PATH) early warning analysis of Chinese rare earths industry security[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102161.
- [23] 郑明贵, 王萍, 潘天阳. 中国铝资源供应安全预警系统研究[J]. 科技促进发展, 2020, 16(11): 1307–1316. [Zheng M G, Wang P, Pan T Y. Research on security warning system of aluminum resource supply in China[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(11): 1307–1316.]
- [24] Helbig C, Wietschel L, Thorenz A, et al. How to evaluate raw material vulnerability? An overview[J]. Resources Policy, 2016, 48: 13–24.
- [25] Kaufmann D, Kraay A, Mastruzzi M. The worldwide governance indicators: Methodology and analytical issues[J]. Hague Journal on the Rule of Law, 2011, 3(2): 220–246.
- [26] Hsu A, Zomer A. Environmental Performance Index[R]. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, 2014.
- [27] Zhang L, Bai W L Y S, Yu J, et al. Critical mineral security in China: An evaluation based on hybrid MCDM methods[J]. Sustainability, 2018, DOI: 10.3390/su10114114.
- [28] Brown T. Measurement of mineral supply diversity and its importance in assessing risk and criticality[J]. Resources Policy, 2018, 58: 202–218.
- [29] Zhou Y J, Li J W, Wang G S, et al. Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 217–225.
- [30] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国钴资源供应风险评价与治理研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 50–56. [Liu Q W, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and governance of cobalt resources supply in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 50–56.]
- [31] Hatayama H, Tahara K. Evaluating the sufficiency of Japan’s mineral resource entitlements for supply risk mitigation[J]. Resources Policy, 2015, 44: 72–80.
- [32] Campi M, Dueñas M, Fagiolo G. Specialization in food production affects global food security and food systems sustainability[J]. World Development, 2021, DOI: 10.1016/j.worlddev.2021.105411.
- [33] Ling T J, Shamsudin M N, Bing W Z, et al. Mitigating the impacts of COVID-19 on domestic rice supply and food security in Southeast Asia[J]. Outlook on Agriculture, 2021, 50(3): 328–337.
- [34] Erdem T. Competitiveness of dried sector: A case study of world and Turkey[J]. Agricultural Economics, 2020, DOI: 10.17221/98/2020-AGRICECON.
- [35] Windrum P, Tomlinson M. Knowledge-intensive services and international competitiveness: A four country comparison[J]. Tech-

- nology Analysis & Strategic Management, 1999, DOI: 10.1080/095373299107429.
- [36] Yu S W, Duan H R, Cheng J H. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101891.
- [37] 郭杰, 欧名豪, 刘琼, 等. 基于BP神经网络的南通市建设用地区域需求预测[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1355-1361. [Guo J, Ou M H, Liu Q, et al. Construction land demand forecast in Nantong city based on BP neural network[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1355-1361.]
- [38] 白宝光, 朱洪磊, 范清秀. BP神经网络在乳制品质量安全风险预警中的应用[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(7): 42-45. [Bai B G, Zhu H L, Fan Q X. Application of BP neural network in dairy product quality and safety risks[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(7): 42-45.]
- [39] 刘浩然, 赵翠香, 李轩, 等. 一种基于改进遗传算法的神经网络优化算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1573-1580. [Liu H R, Zhao C X, Li X, et al. Study on a neural network optimization algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1573-1580.]

## Risk assessment and prediction of critical mineral resources supply for China: A case of copper

CHENG Jinhua<sup>1</sup>, SHUAI Jing<sup>2</sup>, ZHAO Yujia<sup>1</sup>, DUAN Haoran<sup>1</sup>, SHUAI Chuanmin<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. School of Economics, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

**Abstract:** [Objective] In today's world, global risks have increased dramatically, and critical mineral resources are no exception. What are the supply risks of critical minerals for China and how should China deal with the increasing risks of critical mineral resources supply? [Methods] To answer these questions, we established an evaluation and prediction indicator system of environment-market-resource-competitiveness (EMRC) for assessing the supply risks of critical mineral resources by introducing an international competitiveness index, evaluated the supply risk of copper resources in China from 2008 to 2021 by using the stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA-TRI) method, and predicted the supply risk of copper resources in China by adopting the back propagation (BP) neural network. [Results] The results show that: (1) The international competitiveness dimension had the greatest impact on China's copper supply risk, while the environmental dimension had the least impact; (2) From the perspective of the overall supply risk of copper resources, China's risk is generally in the medium-high to high range, with a rising trend year by year; (3) From 2022 to 2023, the predicted value of China's copper resources supply risk is medium-high. [Conclusion] To enhance the security of copper resources supply, China should increase investment in copper exploration, improve the utilization rate of domestic copper resources, strengthen resource diplomacy, and diversify import sources.

**Key words:** critical minerals; copper resources; supply risk; evaluation and prediction; international competitiveness; SMAA-TRI