中国稀土资源产业链供应链安全评价

郑明贵，罗俊彪*，刘鑫

江西理工大学经济管理学院，江西 赣州 341000

摘 要：基于资源获取安全、资源转化安全和资源流通安全3个角度，对2000—2023年中国稀土资源产业链供应链安全进行评价，分析影响中国稀土产业链供应链安全的主要因素，探究指标间的耦合协调水平。研究结果表明：(1)中国稀土资源产业链供应链安全在2000—2011年较为稳定，在2012—2023年呈现出波动下降的趋势，整体呈现出资源流通安全>资源获取安全>资源转化安全的发展格局；(2)资源获取和转化安全制约着中国稀土产业链供应链安全发展，具体表现在进口集中度、回收利用率、产品附加值率、应用技术竞争力、单位能耗强度和资源消耗系数等方面；(3)2000—2023年中国稀土资源产业链供应链安全的耦合协调水平呈现出下降的趋势，降低进口集中度和提高回收利用率是提升协调水平的有效举措。

关键词：稀土资源；产业链供应链安全；安全评价；障碍度模型；修正耦合协调模型

中图分类号：TD98 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-2518(2026)04-1028-15 DOI：10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.260

引用格式：郑明贵，罗俊彪，刘鑫.中国稀土资源产业链供应链安全评价[J].黄金科学技术，2026，34(4)：1028-1042.ZHENG Minggui，LUO Junbiao，LIU Xin.Security Evaluation of Industrial and Supply Chains of Rare Earth Resource in China[J].Gold Science and Technology，2026，34(4)：1028-1042.

稀土资源作为重要的战略性矿产资源，被称作“高科技命脉”。近年来，随着全球对稀土需求的持续攀升以及地缘政治因素的复杂交织，我国稀土资源的产业链供应链安全问题日益凸显。首先，根据美国地质调查局(USGS)公布数据，截至2024年底，中国以低于48%的储量占比供应全球69%以上的稀土消费，我国稀土资源面临消耗速率过快的风险。同时，中国稀土进口高度集中，且地缘政治风险长期处于高位。截至2024年底，我国进口的稀土资源92.8%源自缅甸、马来西亚和老挝，稀土资源获取面临着双重挑战。其次，中国逐步形成进口用于生产制造的稀土矿产品，出口以稀土永磁产品为主的功能材料的贸易模式。永磁材料作为下游终端应用环节生产的核心要素，消费价值占全球稀土消费价值的91%(郑国栋等，2021)，与稀土永磁材料密切相关的镨、钕、铽和镝，对稀土行业的产值贡献达85%~90%(陈占恒，2019)，其进口量却日益攀升，其中镨、钕和镝仍需高价进口。在西方国家大力推进稀土产业链供应链重构和“去中国化”的背景下，系统性地对稀土资源产业链供应链安全进行评价，不仅是保障国家经济安全的迫切需求，更是推动全球资源治理与可持续发展的关键举措。

产业链供应链安全是一个多维度的复杂概念，学术界对其内涵仍未达成共识。为明确产业链供应链安全的内涵，首先应分别明晰产业链和供应链的定义。产业链和供应链的概念起源于不同学科。其中，产业链这一概念源于经济学，最早在20世纪80年代提出(李天健等，2022)；供应链概念的提出同样可以追溯至20世纪80年代，管理学给出了供应链较为明确的定义(Mentzer et al，2001)。产业链

收稿日期：2025-09-03；**修订日期：**2026-04-06

基金项目：国家社会科学基金项目“中国战略性矿产资源产业链供应链安全稳定战略研究(2025—2060)”(编号：22XGL003)资助

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

***通信作者：**罗俊彪(2002—)，男，江西抚州人，硕士研究生，从事矿业技术经济研究工作。E-mail：junbiaoluo@163.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

供应链安全具体而言是涉及资源供给、市场需求和回收利用等多个环节的动态平衡(周之逸等,2024)。当前国内学者基于具体产业的产业链供应链安全研究主要集中在汽车(吕越等,2023)、医药(郭朝先等,2023)、煤炭(康红普等,2022)、铜(朱永光等,2023)、石油(郑明贵等,2025)和萤石(郑明贵等,2026)等。稀土资源产业链供应链安全的现有研究主要围绕稀土开发利用(黄小卫等,2011)、产业发展现状(钱九红等,2003)、资源储备(何欢浪,2014)、产业升级(吴一丁等,2021)、贸易格局(夏启繁等,2022)和安全评价(高丽等,2014;高思宇等,2017;赵桂梅等,2024)等方面。在安全评价领域,学者们对稀土资源安全的衡量和评价方法持不同观点。例如,严筱等(2016)基于PSR模型,将稀土资源安全视为在压力、状态和响应3个维度上的综合表现;卢虎生等(2020)将PSR模型与功效系数法相结合,对稀土资源安全进行综合评价;徐德义等(2023)基于全生命周期理论,从供给安全、流通安全、技术安全以及回收和环境安全4个维度建立战略性矿产评价体系。

现有研究建立的稀土产业安全评价体系虽各有特点,但少有研究基于资源获取、流通和转化3个方面的产业链供应链全链视角对我国稀土产业链供应链安全进行评价。本文以宏观视角为切入点,围绕稀土资源获取、流通和转化3个环节的安全问题,充分考虑稀土矿产的特殊性,构建系统化的安全评估指标体系。研究综合运用熵权法、德尔菲法、模糊综合评价法、障碍因子诊断模型和修正耦合协调度模型,对我国稀土产业链供应链的安全状况进行定量测度,并据此提出相应的政策优化方案和安全提升策略。

1 安全评价指标体系

1.1 影响因素识别

综合学者们构建的战略性矿产资源评价指标体系(李宪海等,2014;周娜等,2020),并结合稀土矿产资源的特点(魏龙等,2012),从资源获取、流通和转化3个方面综合考虑进行影响因素识别。

首先,在资源获取方面,我国虽为稀土储量大国,但出于稀土开采的环境影响和稀土行业发展的可持续性这两方面考虑,我国稀土资源的获取重心逐渐向国际进口倾斜。因此,在国内生产方面考虑国内保障度和回收利用率2个方面因素,稀土回收属于高技术壁垒领域,专利转移往往对应技术产业化,专利转让意味着回收技术从实验室走向工业化应用,且专利数据具有公开、连续和标准化的特点,适合长期监测,因此本文使用专利转移数与申请数之比来度量回收利用率。在国际进口方面考虑对外依存度和进口集中度2个方面因素。

其次,资源流通作为连接产业链供应链的桥梁,其安全关系到稀土资源在国际市场的流通与贸易,对产业链供应链的稳定影响颇深。近年来,国际形势愈加紧张,稀土产业链供应链地缘政治风险上升,稀土价格波动幅度较大,导致稀土市场不确定性增加,对我国稀土产业链供应链安全造成威胁。根据UN Comtrade公布的数据计算得出,稀土资源的表观进口价格在2022年的波动率高达338%;此外,2023年我国稀土资源产业链供应链地缘政治风险指标得分为3.8,相较于2022年(2.45)上升了近36%,反映出我国稀土资源供给的不稳定性。市场方面考虑地缘政治风险和价格波动率2个方面因素;贸易方面考虑贸易中心度和贸易自由度2个方面因素。

最后,资源转化安全决定产业链供应链的整链协作和产品的质量。目前我国稀土矿山的综合资源利用率普遍较低,存在生产成本高和精矿质量一般等问题(魏翔等,2024)。另外,我国稀土精深加工技术水平不高(王均超,2015),高科技应用产品的加工水平和科技含量较低(朱学红等,2018),产业仍处于附加值较低的产品初级加工阶段(王科唯等,2025),这在一定程度上限制了我国在国际市场上的竞争优势和地位。环境方面考虑资源消耗系数和单位能耗强度2个方面因素;产品方面考虑产品附加值率和应用技术竞争力2个方面因素。

1.2 指标体系构建

基于前文分析,借鉴吴巧生等(2020)、徐德义等(2023)和郑明贵等(2025)的研究,采用专家调查法,面向高等院校、矿山企业和设计院的70名相关领域专家发放问卷,最终收回问卷58份,基于回收问卷统计结果,构建中国稀土资源产业链供应链安全评价指标体系,具体指标及说明如表1所示。

表1 安全评价指标体系

Table 1 Index system of safety evaluation

一级指标	二级指标	指标说明	指标公式	指标含义
资源获取安全I_1	国内保障度I_{11}^{+}	国内资源储采比	$I_{11}=\frac{Q_r}{Q_y}$	Q_r:国内稀土储量 Q_y:国内稀土产量
	对外依存度I_{12}^{-}	中国稀土资源消费中进口依赖程度	$I_{12}=\frac{Q_i}{Q_c}$	Q_i:中国稀土进口量 Q_c:中国稀土消费量
	进口集中度I_{13}^{-}	中国从主要进口国家进口量占进口总量份额	$I_{13}=\frac{IM_3}{Q_i}$	IM_3:本文选取进口量排名前三国家进口量之和
	回收利用率I_{14}^{+}	中国近10年稀土行业回收利用相关专利转移数和与申请数和之比	$I_{14}=\frac{P_t}{P_a}$	P_t:近十年来国内稀土行业在资源回收利用方面所涉及的专利权转让总数 P_a:近十年来国内稀土行业在资源回收利用方面所涉及的专利权申请总数
资源流通安全I_2	地缘政治风险I_{21}^{-}	我国稀土进口量排名前三国家的进口占比二次方与该国治理指标的乘积	$I_{21}=\sum S_i^2\times WGI_i$	S_i:中国从第i个进口国进口稀土的份额,本文选取进口排名前三国家的份额 WGI_i:第i国的世界治理指数
	价格波动率I_{22}^{-}	我国稀土进口价格的变动率绝对值	$I_{22}=\left\lvert\frac{P_n-P_{n-1}}{P_{n-1}}\right\rvert$	P_n:稀土第n年价格 P_{n-1}:稀土第n-1年价格
	贸易中心度I_{23}^{+}	中国在稀土贸易网络的点度中心度排名	$I_{23}=\frac{\sum_{i,j=1,i\neq j}^{N}Q_{ij}}{N-1}$	N:稀土贸易网络中的总节点数 $\sum_{i,j=1,i\neq j}^{N}Q_{ij}$:与节点$i$存在直接联系的节点数量
	贸易自由度I_{24}^{+}	中国在稀土贸易网络的接近中心度排名	$I_{24}=\frac{N-1}{\sum_{i,j=1,i\neq j}^{N}D_{ij}}$	D_{ij}:节点i与节点j之间的最短路径长度
资源转化安全I_3	资源消耗系数I_{31}^{-}	我国稀土消费量与稀土行业产值之比	$I_{31}=\frac{Q_c}{M}$	M:中国稀土行业产值
	产品附加值率I_{32}^{+}	我国稀土全产业链各环节的贸易净额与贸易总额之比	$I_{32}=\left\lvert\frac{(IM_u-EX_u)+(IM_m-EX_m)+(IM_d-EX_d)}{(IM_u+EX_u)+(IM_m+EX_m)+(IM_d+EX_d)}\right\rvert$	IM_u、IM_m、IM_d:稀土产业链上、中、下游产品的进口额;EX_u、EX_m、EX_d:稀土产业链上、中、下游产品的出口额
	应用技术竞争力I_{33}^{+}	核心领域应用专利在稀土专利总量中的比重	$I_{33}=\frac{P_h}{P}$	P_h:当年稀土相关专利中应用于关键领域的数量 P:当年稀土相关专利的总数
	单位能耗强度I_{34}^{-}	稀土行业能源投入产出比	$I_{34}=\frac{E}{M}$	E:中国稀土产业能源消费总量,本文选取有色金属矿采选业和有色金属冶炼和压延加工业能源消费总量代替

注:"+"代表正向指标,即指标值越大,对应指标表现越好;"-"代表负向指标,即指标值越小,对应指标表现越好

1.3 指标权重确定

本文采用主客观相结合的方式对中国稀土资源产业链供应链安全进行综合评价。主观权重部分采用德尔菲法,在考虑专家来源、从业年限和问卷数量等因素的前提下,向40名相关领域专家发放问卷,最终收回问卷36份,对收回问卷进行统计汇总获得主观权重。客观权重部分采用熵权法(章穗等,2010),通过以下步骤计算客观权重:

首先,利用极差法对原始数据进行规范化打分处理,消除指标单位和量纲差异的影响:

$$Z_{ij}=\begin{cases}\dfrac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}}+0.0001 & \text{(正向指标)}\\ \dfrac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}}+0.0001 & \text{(负向指标)}\end{cases} \tag{1}$$

正向指标越大,安全水平越高;负向指标越大,安全水平越低。式(1)中,X_{max}和X_{min}分别代表指标的最大值和最小值,并对正向指标和负向指标分别进行向右平移0.0001处理,防止后续取对数对结果产生影响(张爱琴等,2021)。

其次,计算指标的信息熵e_j($0<e_j<1$):

$$f_{ij}=x_{ij}\sum_{i=1}^{n}x_{ij} \tag{2}$$

$$e_j=\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}f_{ij}\ln f_{ij} \tag{3}$$

式中:f_{ij}为第j项指标第i年的特征比重。

最后,计算各指标的熵权w_j($0\leqslant w_j\leqslant 1$):

$$w_j=\frac{1-e_j}{n-\sum_{i=1}^{n}e_j},\ j=1,2,\cdots,m \tag{4}$$

式中:$\sum_{j=1}^{n}w_j=1$;$1-e_j$为各项指标的差异系数;n为总指标数,本文为12。

各指标的综合权重通过对主观权重和客观权重求算术平均得到,具体结果如表2所示。

表2 安全评价体系指标权重

Table 2 Index weight of sefety evaluation system

一级指标	权重	二级指标	局部权重	综合权重
资源获取安全I_1	0.38	国内保障度I_{11}	0.2408	0.0919
		对外依存度I_{12}	0.1387	0.0529
		进口集中度I_{13}	0.2756	0.1052
		回收利用率I_{14}	0.3449	0.1316
资源流通安全I_2	0.31	地缘政治风险I_{21}	0.3555	0.1085
		价格波动率I_{22}	0.2092	0.0638
		贸易中心度I_{23}	0.2474	0.0755
		贸易自由度I_{24}	0.1879	0.0573
资源转化安全I_3	0.31	资源消耗系数I_{31}	0.1941	0.0608
		产品附加值率I_{32}	0.2730	0.0855
		应用技术竞争力I_{33}	0.3989	0.1249
		单位能耗强度I_{34}	0.1340	0.0420

2 安全评价模型

2.1 数据来源

本研究所涉及的稀土资源储量和产量数据来自美国地质调查局(USGS)官方统计,专利数据来源于国家知识产权局,稀土资源进出口贸易量和价格等来源于UN Comtrade,地缘政治风险通过世界银行公布的世界治理指数计算得出,贸易中心度和贸易自由度通过联合国贸易数据库计算得出,其余数据均来源于国家统计局和CBC金属网。针对部分缺失数据采用插值法补齐。研究样本区间为2000—2023年。

2.2 指标分级与评价

由于不同指标的数量级和量纲不同,会对评价结果造成一定影响,本文借鉴世界银行和亚太能源研究中心等国际公认分级规则,并参考郑明贵等(2022)和罗婷等(2022)的研究,使用表3中的分级规则对二级指标进行分级赋值。

参考相关研究(徐美等,2012;吕军等,2017;罗宇文等,2022),划分安全评价预警等级(表4)。

表3 安全评价指标分级规则

Table 3 Grading rules for safety evaluation indexes

二级指标	8~10级	6~8级	4~6级	2~4级	0~2级
I_{11}	≥40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	<10
I_{12}	<40%	[40%,50%)	[50%,60%)	[60%,70%)	≥70%
I_{13}	<20%	[20%,40%)	[40%,60%)	[60%,80%)	≥80%
I_{14}	≥20%	[15%,20%)	[10%,15%)	[5%,10%)	<5%
I_{21}	<1	[1,2)	[2,3)	[3,4)	≥4
I_{22}	<10%	[10%,20%)	[20%,30%)	[30%,40%)	≥40%
I_{23}	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
I_{24}	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
I_{31}	<0.2	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	≥0.8
I_{32}	≥80%	[60%,80%)	[40%,60%)	[20%,40%)	<20%
I_{33}	≥10%	[8%,10%)	[6%,8%)	[4%,6%)	<4%
I_{34}	<0.2	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	≥0.8

表4 安全评价预警等级

Table 4 Early-warning level of sefety evaluation

预警评估等级	预警颜色	预警安全等级	划分标准
低	绿色	很安全	[8,10)
较低	蓝色	安全	[6,8)
一般	黄色	基本安全	[4,6)
较高	橙色	不安全	[2,4)
高	红色	很不安全	(0,2)

其中,贸易中心度和贸易自由度作为评价贸易网络的指标,不能从单个指标的角度对复杂的贸易网络进行节点安全分析,结合贸易网络中的“二八法则”进行等级划分(Cingolani et al,2018;何则等,2019; Chen et al,2020),贸易中心度和贸易自由度越接近0,则排名越靠前,安全等级越高。贸易中心度和贸易自由度安全等级划分具体如图1所示。对各指标分别赋值,结果如表5所示。

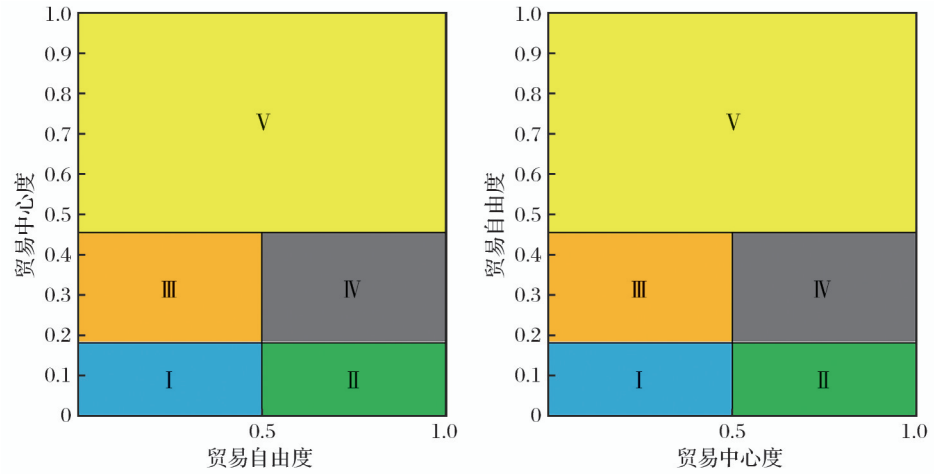


图1　贸易中心度和贸易自由度等级矩阵

Fig. 1　Trade centrality and trade freedom degree classification matrix

表5　2000—2023年中国稀土资源产业链供应链安全等级赋值结果

Table 5　Assignment results of the security level of industrial and supply chain of rare earth resources in China from 2000 to 2023

年份	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	I_{31}	I_{32}	I_{33}	I_{34}
2000	10	10	4	1	9	4	10	10	9	2	7	6
2001	10	10	5	1	10	10	10	10	8	2	7	6
2002	10	10	2	1	9	2	10	10	7	1	10	6
2003	10	10	4	1	9	6	10	10	8	1	6	7
2004	10	10	3	1	9	7	10	10	9	2	8	8
2005	10	10	4	1	9	10	10	10	8	1	5	8
2006	10	10	2	1	8	6	10	10	8	1	8	8
2007	10	10	2	1	9	8	10	10	9	1	5	8
2008	10	10	5	1	10	7	10	10	9	3	6	8
2009	10	10	5	1	10	5	10	10	7	1	5	6
2010	10	10	4	2	10	9	10	10	9	1	5	8
2011	10	10	4	2	9	9	10	10	9	3	7	9
2012	10	10	5	1	10	6	10	10	9	2	6	7
2013	10	10	2	1	9	10	10	10	9	2	8	7
2014	10	10	3	1	9	9	10	10	9	2	5	7
2015	10	10	2	1	8	8	10	10	9	2	3	6
2016	10	10	3	2	7	1	10	10	9	2	3	7
2017	10	9	1	2	5	1	10	10	9	2	3	8
2018	10	9	1	2	6	7	10	10	9	2	4	8
2019	10	9	1	2	3	1	10	10	9	2	5	7
2020	10	9	1	2	3	5	10	10	5	1	6	1
2021	10	9	1	2	1	1	10	10	9	2	4	8
2022	10	9	2	2	6	1	10	10	7	1	6	5
2023	10	9	1	2	3	8	10	10	5	2	3	5

最终，基于各维度指标的权重系数及其对应等级分值，运用线性加权综合法测算中国稀土资源产业链供应链安全评价综合指数CI：

$$CI=\Sigma_{j=1}^{n}W_jX_j \tag{5}$$

式中:W_j为各二级指标的综合权重;X_j为各二级指标的分级赋值;n为评价指标的个数,本文为12。

2.3 指标障碍度模型

为对中国稀土资源产业链供应链安全的主要影响因子进行识别,并判断其影响程度,结合本文指标与朱永光等(2023)研究,构建出指标障碍度模型,计算公式如下:

$$H_{ij}=\begin{cases}1-CI_{ij}, CI_{ij}\leqslant 1\\ 0, CI_{ij}>1\end{cases} \tag{6}$$

$$Q_{ij}=\frac{w_{ij}H_{ij}}{\sum_{j=1}^{m}w_{ij}H_{ij}}\times 100\% \tag{7}$$

式中:CI_{ij}为第j个指标的第i年安全综合分指数;H_{ij}为第i年CI_{ij}的偏离程度;Q_{ij}为指标障碍度;W_{ij}为各二级指标的权重,即该指标偏离程度占全部指标偏离程度之比作为该指标的指标障碍度,一级指标障碍度由各二级指标障碍度加总所得;m为总指标数,本文为12。当$CI_{ij}\leqslant 1$时,视为低于评分均值,说明该指标存在偏离,对安全水平的提升有阻碍,此时H_{ij}取值为均值与其差值,作为该指标的偏离程度;当$CI_{ij}>1$时,视为高于评分均值,该指标不存在阻碍,则取值为0,避免对偏离指标的计算产生影响。

2.4 修正耦合协调模型

作为一种高度复杂的集成系统,中国稀土资源产业链供应链安全评价指标体系由资源获取、流通和转化安全3个相互嵌套、协同联动的子系统构成。本文参考王淑佳等(2021)的研究思路,通过探讨上述三大维度的整体协同状况,对中国稀土资源产业链供应链安全态势予以客观研判,同时运用经修正的耦合协调模型对其耦合强度与综合协调水平加以测算。

$$C=\sqrt{\left[1-\frac{\sqrt{\left(CI_3-CI_1\right)^2}+\sqrt{\left(CI_3-CI_2\right)^2}+\sqrt{\left(CI_2-CI_1\right)^2}}{3}\right]\times\sqrt{\frac{CI_1\times CI_2\times CI_3}{\left[MAX\left(CI\right)\right]^3}}} \tag{8}$$

$$D=\sqrt{C\times T},\quad T=\gamma_1\times CI_1+\gamma_2\times CI_2+\gamma_3\times CI_3 \tag{9}$$

式中:C为评价体系各指标的耦合程度;CI_1、CI_2和CI_3为一级指标安全综合指数;D为系统的综合协调程度;T为一级指标的线性安全综合指数;γ_1、γ_2和γ_3为调节系数,本文采用一级指标的权重系数,取γ_1=0.38,γ_2=γ_3=0.31。

为直观反映一级指标间的耦合协调水平,本文借鉴崔靓等(2023)的研究,将综合协调度(D)划分为6个等级,即高度失调[0.00, 0.30)、轻度失调[0.30, 0.40)、低度协调[0.40, 0.50)、中度协调[0.50, 0.60)、高度协调[0.60, 0.80)和极度协调[0.80, 1.00]。

3 计算结果与分析

3.1 安全综合评价

图2所示为2000—2023年中国稀土资源产业链供应链安全综合指数和增长率变化趋势,图3所示为3个一级指标指数发展趋势。由图2可以看出,安全综合指数为4.82~7.07,整体呈现出先波动后下降的变化趋势。结合图2和图3,将综合指数变化发展过程划分为2个阶段(波动和下降阶段)进行分析。

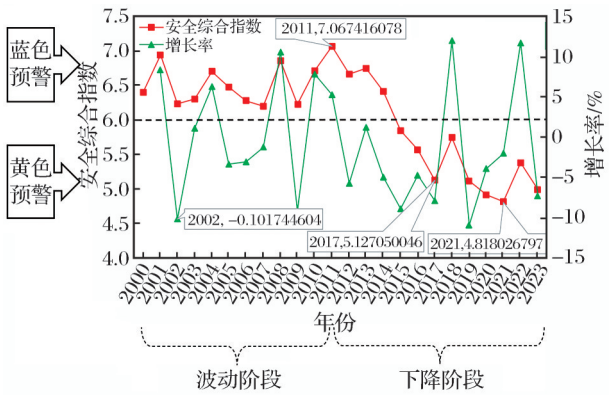


图2 安全综合指数和增长率变化趋势

Fig. 2 Variation trends of the safety composite index and growth rate

(1)波动阶段(2000—2011年):在该阶段内,安全综合指数虽呈现出在一定区间内波动的趋势,但指数均处于6.00以上,属于较高水平;分指标整体表现为资源流通安全>资源获取安全>资源转化安全。其中,资源流通安全呈现波动上升的变化趋势,资源获取安全较为稳定,资源转化安全呈现波动下降的趋势。主要原因可能是:①2001年中国加入世界贸易组织,无论是资源获取还是资源流通方

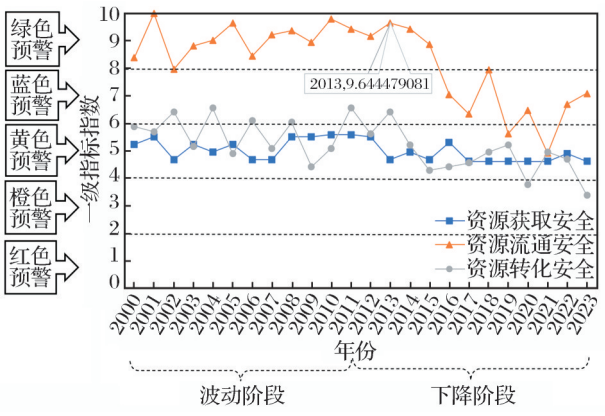


图3 一级指标指数变化趋势

Fig. 3 Variation trend of first-level indicator index

面的安全水平均有所提升，进而提高了稀土资源产业链供应链安全水平。②2002年，随着Mountain Pass矿山的停产，美国丧失了唯一的本土稀土供给基地，其稀土原料不得不依赖海外进口。这其中绝大部分来自中国。从我国稀土产量数据来看，2002年以后我国稀土产量明显增涨，虽然短期内增加了我国稀土的出口量，但从长远来看，影响了我国稀土行业的可持续发展，降低了我国稀土资源产业链供应链安全水平。③2004年国务院发布《关于投资体制改革的决定》规定规模以上稀土深加工项目将由相关部门核准，并启动《稀土产品出口目录》指定工作，进一步规范稀土产品出口秩序，提升稀土资源产业链供应链安全水平。④我国早期存在较多稀土矿私挖滥采的现象，截至2006年，仅凉山州冕宁县稀土矿历史遗留的地质灾害点达23处，采坑13处，容积达1 040万m^3，矿渣堆26处，堆渣体积达1 840万m^3。2006年4月，我国国土资源部停止发放稀土矿开采许可证，对稀土矿的开采、加工和出口开始严格调控。由图2可以看出，2006年我国稀土产业链供应链安全水平的下降趋势略有缓和，2007年又显著上升。⑤2010年我国首次提出稀土战略收储，同时美国重启Mountain Pass矿山，澳大利亚、越南等国加大对稀土资源的开采，但这些国家的稀土开采和加工成本高且技术落后，在短期内难以形成有效的产能，进一步凸显了中国在全球稀土供应链中的主导地位，增强了中国稀土资源产业链供应链的安全性。因此安全综合指数在本阶段内虽有波动，但仍处于较高水平。

（2）下降阶段（2012—2023年）：在此阶段内，安全综合指数整体呈现波动下降的变化趋势，且在2013—2017年下降趋势明显，2017年安全综合指数相较于2013年下降了20.03%，结合分指标变化趋势发现，导致期间内综合指数下降的主要因素是资源流通安全和资源转化安全。主要原因可能是：①2012年之前，中国的稀土采矿权证数量众多，盗采“黑稀土”现象严重，对生态环境造成严重破坏，2012年国务院发布《中国的稀土状况与政策》白皮书，强调要严格执行环境保护法律法规，包括环境影响评价制度、“三同时”制度、排污许可制度和《稀土工业污染物排放标准》，从源头上防止生态破坏和环境污染。由图2可以看出，2013年稀土产业链供应链安全水平略有回升。②2013年稀土价格大幅下跌，相较于2012年下跌近67.20%，同时出口配额使用率不足50%，反映出稀土市场的低迷状态，对稀土资源产业链供应链流通安全产生较大影响。③世界贸易组织（WTO）于2014年就美欧日三方诉中国稀土、钨和钼出口管理案发布专家组报告。该报告在初步裁决中指出，我国对相关金属产品征收出口关税并实施配额限制的做法，与WTO协定中的相关规定不符。这一败诉结果使得我国稀土产业在国际贸易中面临不利局面，被迫仓促取消出口关税和出口配额，进一步加剧了产业乱象，降低了我国稀土产业安全水平，导致安全评价指数下降。④2018年初以来，中美贸易冲突日趋严峻，美国对包括稀土氧化物、化合物、金属和稀土永磁体在内的稀土产品和稀土的应用终端产品加征10%关税，限制了我国稀土产业发展。⑤2022年，工信部和自然资源部分阶段核定并公布了稀土开采、冶炼分离的总量控制指标，同比增幅25%，提升行业集中度，促进稀土行业发展，保障我国稀土资源产业链供应链安全。因此，安全综合指数呈现2012—2021年大幅下降，然后略有缓和的变化趋势，但整体处于黄色预警状态。

3.2 影响因素分析

将各二级指标的障碍度进行聚合，得到资源获取、流通和转化安全3个维度的障碍度测算结果如图4所示。分析结果表明：资源获取安全维度的障碍度整体呈“波动下行—逐步趋稳”的演变态势，这意味着2000—2016年稀土资源供给端面临较为严

峻的安全挑战,而该领域的风险状况自2017年起有所缓解;资源流通安全障碍度在2000—2014年较为平稳,但在2015年以后呈现波动上涨的趋势,表明在2015年以后资源安全存在较大问题;资源转化安全在2000—2010年呈现波动上涨的趋势,2011年以后波动较大,反映出我国稀土资源的技术竞争力方面存在较大挑战。

总体而言,资源获取和转化安全的障碍度显著高于资源流通安全,该结论与我国稀土产业当前发展态势相一致。但在2014年以后,中国稀土资源流通安全障碍度显著上升,转化安全障碍度波动上升,获取安全障碍度出现明显的下降趋势,说明近年来中国稀土资源获取安全得到改善,但资源流通安全和资源转化安全仍面临威胁。

资源获取安全障碍度变化的主要原因可能是:2000—2013年我国未充分意识到稀土资源的重要战略地位,对稀土的过度开采导致我国稀土储量锐减,严重影响我国稀土行业的可持续发展,威胁我国稀土资源产业链供应链资源获取安全;2014—2017年我国开始注重对稀土资源的保护,稀土资源的主要来源开始依赖进口,且我国对稀土资源的应用主要集中在产品附加值较低的初级产品,精深加工水平不高,导致资源获取安全和转化安全成为制约我国稀土产业发展的主要因素;自2018年起,我国从稀土的净出口国转变为净进口国,且进口来源主要集中在少数国家,较高的对外依存度和进口集中度使得资源获取安全成为2018年以后制约我国稀土产业发展的主要因素。

资源流通安全障碍度变化的主要原因可能是:从2015年开始,缅甸成为我国稀土资源最大进口来源,大大提高了我国稀土进口的地缘政治风险。且2014年WTO败诉后,中国被迫取消出口管理措施,但替代机制未及时建立,导致稀土价格剧烈波动。在地缘政治风险和价格波动率的双重影响下,资源流通安全障碍度出现明显上升。直至2022年,美国Mountain Pass矿山产能扩张至4万t/a,中美第一阶段贸易协议执行,稀土关税排除,美国成为中国第二大稀土进口来源,进口集中度和地缘政治风险的降低使得资源流通安全有所改善。

资源转化安全障碍度变化的主要原因可能是:2000—2010年,我国稀土出口以氧化物和金属等初级产品为主,高端永磁材料、催化材料等深加工产品占比不足20%,整体产品结构偏向于初级产品,产品附加值率低,导致资源转化安全障碍度居高不下。该时期我国稀土相关专利申请量年均增长超过20%,但大量专利集中于冶炼分离工艺,应用于新能源、国防军工等关键领域的核心专利占比不足10%。专利结构的不合理导致应用技术竞争力不稳定,增加了资源转化安全障碍度的波动性。2011年国务院首次确立稀土战略资源地位,实施更为严格的开采总量控制和出口配额管理。行业整合加速了技术升级,六大稀土集团的组建推动了冶炼分离技术的集中优化,资源消耗系数趋于稳定。尽管政策鼓励发展高端应用材料,但我国稀土永磁材料的性能指标(如磁能积、矫顽力)与日本TDK、美国Molycorp等国际巨头仍存在差距。2017年以后,资源转化安全障碍度进入新一轮高位运行期,核心驱动因素是应用技术竞争力的持续下滑。

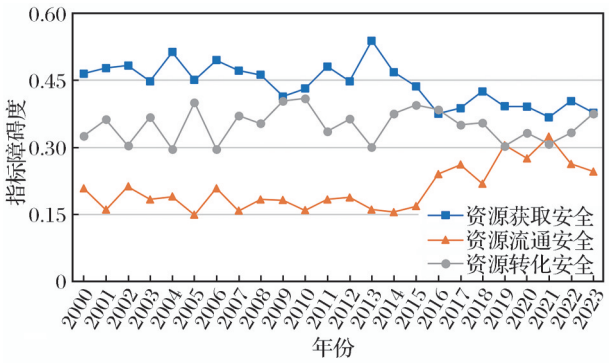


图4　一级指标障碍度发展趋势

Fig. 4　Variation trends of obstacle degrees of first-level indicater

表6为2000—2023年二级指标障碍度排名前五的障碍度因子。其中:进口集中度为24次、回收利用率为24次,产品附加值率为24次,价格波动率为15次,应用技术竞争力为14次,单位能耗强度为7次,资源消耗系数为6次,地缘政治风险为6次。表明研究期内进口集中度和回收利用率是影响资源获取安全的主要障碍因子;地缘政治风险是影响资源流通安全的主要障碍因子;产品附加值率、资源消耗系数和应用技术竞争力是影响资源转化安全的主要障碍因子。

进口集中度的障碍度呈现出在一定范围内波

表6 二级指标排名前五障碍度

Table 6 Top five obstacle degrees of the secondory indicator

年份	障碍因子1	障碍因子2	障碍因子3	障碍因子4	障碍因子5
2000	I_{14}(25.62%)	I_{32}(15.89%)	I_{13}(13.66%)	I_{22}(10.65%)	I_{34}(7.04%)
2001	I_{14}(27.76%)	I_{32}(17.22%)	I_{13}(12.11%)	I_{34}(7.63%)	I_{31}(7.58%)
2002	I_{14}(24.04%)	I_{13}(17.47%)	I_{32}(16.45%)	I_{22}(11.71%)	I_{31}(7.34%)
2003	I_{14}(24.69%)	I_{32}(16.90%)	I_{13}(13.16%)	I_{22}(8.51%)	I_{33}(6.76%)
2004	I_{14}(26.84%)	I_{13}(16.90%)	I_{32}(16.65%)	I_{22}(8.29%)	I_{34}(6.55%)
2005	I_{14}(24.83%)	I_{32}(16.99%)	I_{13}(13.23%)	I_{33}(10.18%)	I_{31}(6.78%)
2006	I_{14}(24.65%)	I_{13}(17.91%)	I_{32}(16.86%)	I_{22}(8.49%)	I_{31}(6.73%)
2007	I_{14}(23.47%)	I_{13}(17.05%)	I_{32}(16.06%)	I_{33}(9.63%)	I_{22}(6.41%)
2008	I_{14}(26.89%)	I_{32}(14.96%)	I_{13}(11.73%)	I_{22}(8.31%)	I_{33}(7.36%)
2009	I_{14}(24.09%)	I_{32}(16.49%)	I_{13}(10.51%)	I_{33}(9.88%)	I_{22}(9.16%)
2010	I_{14}(21.99%)	I_{32}(17.74%)	I_{13}(13.82%)	I_{33}(10.64%)	I_{34}(6.32%)
2011	I_{14}(24.50%)	I_{32}(16.06%)	I_{13}(15.39%)	I_{31}(6.95%)	I_{22}(6.86%)
2012	I_{14}(26.08%)	I_{32}(16.18%)	I_{13}(11.38%)	I_{22}(8.99%)	I_{33}(7.14%)
2013	I_{14}(27.34%)	I_{13}(19.86%)	I_{32}(15.03%)	I_{34}(7.10%)	I_{31}(6.57%)
2014	I_{14}(24.51%)	I_{13}(15.44%)	I_{32}(15.20%)	I_{33}(10.06%)	I_{34}(6.36%)
2015	I_{14}(21.72%)	I_{13}(15.78%)	I_{33}(14.84%)	I_{32}(13.47%)	I_{34}(5.97%)
2016	I_{14}(18.08%)	I_{33}(14.56%)	I_{13}(13.42%)	I_{32}(13.22%)	I_{22}(11.14%)
2017	I_{14}(16.63%)	I_{13}(16.14%)	I_{33}(13.40%)	I_{32}(12.16%)	I_{22}(10.25%)
2018	I_{14}(18.26%)	I_{13}(17.72%)	I_{32}(13.35%)	I_{33}(11.77%)	I_{21}(7.13%)
2019	I_{14}(16.80%)	I_{13}(16.31%)	I_{21}(12.68%)	I_{32}(12.28%)	I_{21}(10.36%)
2020	I_{14}(16.78%)	I_{13}(16.29%)	I_{32}(13.53%)	I_{21}(12.66%)	I_{22}(7.52%)
2021	I_{14}(15.78%)	I_{21}(15.74%)	I_{13}(15.32%)	I_{32}(11.54%)	I_{33}(10.17%)
2022	I_{14}(18.18%)	I_{13}(15.57%)	I_{32}(14.66%)	I_{22}(11.20%)	I_{21}(7.10%)
2023	I_{14}(16.21%)	I_{13}(15.74%)	I_{33}(13.06%)	I_{21}(12.23%)	I_{32}(11.85%)

动的趋势,但研究期内平均水平为15.06%,处于较高水平,反映出2000—2023年我国在稀土资源进口安全方面受到较大威胁;回收利用率的障碍度呈现下降趋势,但平均水平为22.30%,仍维持在较高水平;产品附加值率障碍度水平呈现缓慢下降的趋势,平均水平为15.10%,同样处于较高水平。

3.3 中国稀土资源产业链供应链安全耦合协调度分析

基于式(8)和式(9),对2000—2023年中国稀土资源产业链供应链三项一级指标的耦合度(C)、发展指数(T)和综合协调度(D)进行测算,具体结果列于表7。在此基础上,依据协调发展度等级划分标准实施分级判定,分级结果如图5所示。

图5表明,2000—2023年我国稀土资源产业链供应链3个一级指标的耦合协调水平在2000—2016年较为稳定,虽有波动,但普遍保持在协调水平;2017年以后普遍为高度失调水平,主要原因可能是:2017年中国从缅甸进口稀土量大幅上升,进口来源高度集中于东南亚三国,进口集中度提高,该年进口集中度I_{13}等级仅为1级,2016年为3级,进口集中度的提升导致资源获取安全受到影响。同时,进口国地缘政治风险较高,当年地缘政治风险I_{21}相较于上年由7级降为5级,导致该年耦合协调水平下降。

2018年资源流通安全和资源转化安全虽有提高,但2018年底缅甸克钦邦局势动荡,稀土进口通道多次面临中断风险,导致资源获取安全仍面临困境,整体水平并无太大变化,因此2018年耦合协调水平仍处于低位。

2019年,缅甸矿政冲突加剧,使得地缘政治风险提高;同时美国与澳大利亚、马来西亚签署稀土合作协议"去中国化",对我国的稀土流通安全造成

表7　安全评价一级指标耦合协调度

Table 7　Coupling coordination degree of first-level indicators of sefety evaluation

年份	耦合度(*C*)	发展指数(*T*)	综合协调度(*D*)	年份	耦合度(*C*)	发展指数(*T*)	综合协调度(*D*)
2000	0.87	0.70	0.78	2012	0.84	0.83	0.83
2001	0.82	0.89	0.85	2013	0.33	0.61	0.45
2002	0.30	0.51	0.39	2014	0.57	0.59	0.58
2003	0.82	0.65	0.73	2015	0.31	0.36	0.33
2004	0.56	0.70	0.62	2016	0.62	0.50	0.56
2005	0.64	0.68	0.66	2017	0.10	0.20	0.14
2006	0.36	0.51	0.42	2018	0.08	0.34	0.17
2007	0.33	0.46	0.39	2019	0.06	0.22	0.12
2008	0.93	0.88	0.91	2020	0.10	0.13	0.11
2009	0.58	0.70	0.64	2021	0.01	0.15	0.04
2010	0.70	0.84	0.77	2022	0.84	0.34	0.54
2011	0.93	0.97	0.95	2023	0.01	0.13	0.04

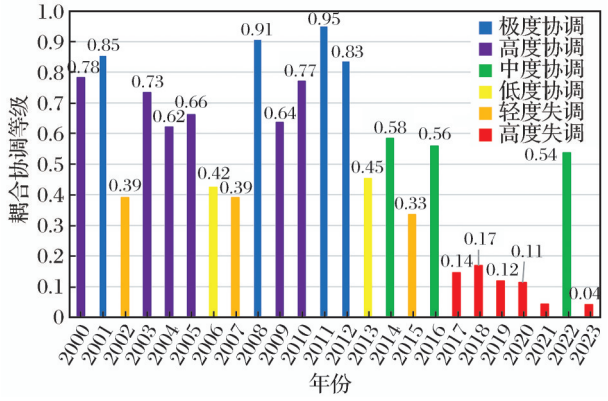


图5　一级指标耦合协调等级

Fig. 5　Coupling coordination grade of first-level indicator

影响,使得2019年耦合协调水平处于低位;2021年受新冠疫情影响,同时中缅边境管控,对资源流通安全造成影响,进口集中度I_{13}与地缘政治风险I_{21}均为1级,耦合协调度出现极低值。

2022年的耦合协调水平较为反常,从表5可知其可能原因是:2022年相较于2021年在资源获取和资源流通方面发生变化的仅有进口集中度和地缘政治风险2个指标,结合原始数据发现,相较于2021年,2022年我国从美国稀土进口份额大幅提升,资源获取来源的扩大降低了我国稀土资源进口集中率和地缘政治风险。

2023年缅甸内战升级,稀土进口通道多次中断,美国联合日本、澳大利亚限制对华稀土技术出口,资源获取和资源转化同步受到影响,耦合协调水平再次出现极低值。因此,在提高稀土资源产业链供应链安全水平时,既要重视资源获取、流通及转化环节各自的独立安全效能,亦需统筹三者间的协同演进关系,以系统性提升整体安全水平。

从标准化后的数据来看,资源获取安全是影响2017—2023年耦合协调水平的主要因素,结合表5赋值结果,发现影响资源获取安全的主要因素是进口集中度和回收利用率,因此,降低进口集中度和提高回收利用率是提升耦合协调水平的有效举措。

4　结论与建议

4.1　结论

通过德尔菲法、熵值法和专家调查法构建中国稀土资源产业链供应链安全评价的指标体系并测算其安全综合指数;进一步引入障碍度模型识别制约安全水平的关键障碍因素,同时采用修正耦合协调度模型解析一级指标维度间的协同互动关系。主要研究结论如下:

(1)中国稀土资源产业链供应链安全在2000—2011年较为平稳,处于蓝色预警状态;在2012—2023年呈现出波动下降的变化趋势,由蓝色预警状态转变为黄色预警状态。资源获取安全整体较为平稳,处于黄色预警状态;资源流通安全在2000—2014年较为稳定,处于绿色预警状态,在2015—2023年呈现出波动下降的趋势,安全水平最低时处

于黄色预警状态;资源转化安全整体呈现出波动下降的趋势,处于黄色预警和橙色预警状态。这种演变反映出我国稀土资源产业链供应链在资源流通和转化安全方面仍面临着较大威胁。

(2)通过障碍度模型计算发现资源获取和转化是2000—2013年中国稀土资源产业链供应链安全的主要影响因素,二者主要受到进口集中度、回收利用率、资源消耗系数、产品附加值率、应用技术竞争力和单位能耗强度等因素影响;2014年以后资源流通安全的影响逐渐提高,主要受到地缘政治风险和价格波动率的影响。主要影响因素的变化说明近年来我国在资源获取方面略有改善,但在资源流通和资源转化方面仍面临着一定风险。间接表明改善资源流通和资源转化机制是提高我国稀土资源产业链供应链安全的有效举措。

(3)通过修正耦合协调模型计算发现2000—2023年中国稀土资源产业链供应链的资源获取、流通和转化安全的耦合协调度具有较明显的下降趋势。资源获取安全是影响耦合协调水平的主要因素,降低进口集中度和提高资源利用率是提升耦合协调水平的有效举措。在提高单个方面的安全水平时,需兼顾各方面的整体协调发展,完善提升中国稀土资源产业链供应链安全的路径,保障整体产业链供应链的安全稳定。

4.2 建议

(1)资源获取安全方面:降低供给端风险,提升资源利用率

我国稀土资源储量丰富,但由于过度开采,我国的资源优势逐渐降低,威胁我国在全球稀土贸易网络中的地位。除此之外,我国稀土产业还面临着资源综合利用率不高,回收利用率低和资源获取较为困难等问题。为保障资源获取安全,可从以下3个方面入手:

①加强资源管理与技术创新:加强稀土资源冶炼分离体系和稀土资源回收体系建设,鼓励企业积极参与资源管理,通过智能化管理系统优化开采计划。②完善回收体系建设:目前稀土废料回收市场正在兴起,可鼓励企业与科研机构合作,开发高效的稀土回收技术,提高回收利用率。政府应出台更多政策支持回收产业发展,如设立专项基金、提供税收优惠等,推动稀土资源高效利用;同时鼓励新型开采技术研发,降低开采损耗。③拓展资源储备渠道:加大稀土资源勘探投入,除开发国内资源外,鼓励企业响应"走出去"战略,通过收购、并购等方式获取境外稀土矿产开采权,同时,加大勘探投入,寻找潜在矿源,并探寻替代资源,从源头保障稀土资源安全。

(2)资源流通安全方面:关注贸易风险,拓宽海外资源获取渠道

我国在2018年由稀土资源的净出口国转变为净进口国,贸易风险是我国稀土资源产业链供应链安全不可忽视的影响因素。然而,自2014年以来,我国稀土进口集中度平均水平高达94.01%,且地缘政治风险处于较高水平,极易导致供应链断裂。除此之外,价格波动率也是阻碍稀土产业链供应链安全发展的主要因子之一。为保障产业链供应链流通安全,可从以下3个方面入手:

①优化贸易结构与合作模式:我国稀土进口集中度高,且面临地缘政治风险。企业应积极拓展与非洲、南美洲等新兴矿产资源国家的合作,降低对传统供应国的依赖。政府可推动建立国际稀土资源合作联盟,加强与各国的交流与合作。②加强市场监测与价格调控:稀土市场价格波动频繁。政府应完善市场监测平台,整合市场信息,为企业提供决策支持。同时,建立价格预警机制,当价格波动超出一定范围时,通过调整进出口关税、释放或增加战略储备等措施进行调控。③建立战略储备体系:鉴于稀土资源的战略重要性,政府应加快建立稀土资源战略储备体系,合理确定储备规模和品种,确保在供应中断时能够满足国内重要产业的需求,保障产业链供应链安全稳定。

(3)资源转化安全方面:提升技术竞争力,推动产品高附加值化

我国稀土精深加工技术水平相对不高,高科技应用产品的加工水平和科技含量较低,产业仍处于附加值较低的产品初级加工阶段。由障碍度模型可知,产品附加值率和应用技术竞争力是阻碍稀土产业链供应链安全发展的主要影响因素。为保障产业链供应链转化安全,可从以下4个方面入手:

① 提升技术创新能力:稀土在新能源、新材料等战略性新兴产业中的应用价值不断提升。应鼓励企业加大研发投入,设立专项资金,支持企业在

如稀土永磁材料、催化剂和储氢合金等高端应用领域持续投入研发。②培育产业集群与龙头企业:我国稀土产业集中度低,市场竞争无序。政府应引导稀土企业向产业园区集聚,形成产业集群。同时,培育具有国际竞争力的龙头企业,通过全产业链整合,提升稀土企业成本控制能力和利润空间。③推动产品高附加值化:我国稀土产业仍处于附加值较低的产品初级加工阶段。企业应加强与科研单位合作,开发如钕铁硼永磁材料等高性能稀土产品。政府可出台政策支持企业向高附加值领域发展,推动产业升级。④加强环保治理:稀土开采和分离过程中产生的环境污染问题亟待解决。政府应当激励企业增加对环境保护的资金投入,开发创新的低碳生产工艺,以达成长期可持续发展目标。

(4)提升产业链供应链系统内部协调性方面

① 资源获取与流通安全的协同:当前我国稀土进口高度集中于缅甸、马来西亚和老挝3个国家,地缘政治风险与进口集中度形成"双重锁定"。在巩固东南亚传统来源的同时,应进行区域布局优化,系统性拓展非洲、中亚和南美洲等新兴供应地,降低进口集中度的同时,分散地缘政治风险。②资源获取与转化安全的协同:资源转化安全长期低迷的关键瓶颈在于,高端应用技术竞争力不足与产品附加值率低。建议将稀土回收利用纳入战略性新兴产业支持目录,设立专项基金支持城市矿山开发。重点突破废旧永磁材料、镍氢电池和催化剂中的稀土高效回收技术,建立"回收—分离—再利用"的全链条标准体系。③资源流通与转化安全的协同:我国稀土贸易中心度和贸易自由度长期维持满分,但这种网络地位主要建立在初级产品出口规模之上,技术含量低、附加值流失严重。建议将稀土贸易网络的建设重心从"扩大出口量"转向"嵌入技术链"。具体而言,在稀土永磁材料和催化材料等我国具备比较优势的领域,推动"产品+技术+标准"的打包输出;在稀土冶炼分离等我国占据绝对优势的环节,建立国际认证体系和质量标准的制定权。

参考文献(References):

Chen S W, Qiang Q P, 2020. The trade network structure of the "one belt and one road" and its environmental effects[J]. Sustainability, 12(9): 3519.

Cingolani I, Iapadre L, Tajoli L, 2018. International production networks and the world trade structure[J]. International Economics, 153: 11-33.

Mentzer J T, DeWitt W, Keebler J S, et al, 2001. Defining supply chain management[J]. Journal of Business Logistics, 22(2): 1-25.

陈占恒,2019. 稀土产业与市场的现状、问题和对策浅析[C]//第十一届中国包头·稀土产业论坛. 包头:内蒙古自治区人民政府. Chen Zhanheng. Brief analysis of the current situation, problems and countermeasures of rare earth industry and market[C]//The 11th China Baotou Rare Earth industry Forum Expert Report collection. Baotou: People's Government of Inner Mongolia Autonomous Region.

崔靓,李晓梅,姚若羲,2023. 数字物流、生态环境治理与区域经济增长的耦合协调度分析[J]. 统计与决策,39(1): 29-33. Cui Liang, Li Xiaomei, Yao Ruoxi, 2023. Analysis of the coupling and coordination degree among digital logistics, ecological environment management, and regional economic growth[J]. Statistics and Decision, 39(1): 29-33.

高丽,王毅,沈镭,等,2014. 基于PSR概念模型的稀土资源安全评价[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版),27(6): 990-994. Gao Li, Wang Yi, Shen Lei, et al, 2014. Security evaluation of rare earth resource with PSR conceptual model[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition), 27(6): 990-994.

高思宇,余敬,马林茂,2017. 稀土安全评价:集成算法改进与实证[J]. 数学的实践与认识,47(3): 90-101. Gao Si-yu, Yu Jing, Ma Linmao, 2017. Evaluation of rare earth security: improved integration algorithm and empirical application[J]. Mathematics in Practice and Theory, 47(3): 90-101.

郭朝先,许婷婷,2023. 我国医药产业链供应链韧性和安全水平研究[J]. 经济与管理,37(3): 82-93. Guo Chaoxian, Xu Tingting, 2023. Research on the resilience and safety of China's pharmaceutical industrial chain and supply chain[J]. Economy and Management, 37(3): 82-93.

何欢浪,2014. 下游进口国家的稀土储备与我国稀土出口政策[J]. 财经研究,40(4): 56-65. He Huanlang, 2014. Rare earth reserves of downstream importing countries and rare earth export policy in China[J]. Journal of Finance and Economics, 40(4): 56-65.

何则,杨宇,刘毅,等,2019. 世界能源贸易网络的演化特征

与能源竞合关系[J].地理科学进展,38(10):1621-1632.He Ze, Yang Yu, Liu Yi, et al, 2019.Characteristics of evolution of global energy trading network and relationships between major countries[J].Progress in Geography, 38(10):1621-1632.

黄小卫,张永奇,李红卫,2011.我国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J].中国科学基金,25(3):134-137. Huang Xiaowei, Zhang Yongqi, Li Hongwei, 2011.Development trend and research progress of rare earth extraction in China[J].Bulletin of National Natural Science Foundation of China,25(3):134-137.

康红普,谢和平,任世华,等,2022.全球产业链与能源供应链重构背景下我国煤炭行业发展策略研究[J].中国工程科学,24(6):26-37.Kang Hongpu, Xie Heping, Ren Shihua, et al, 2022.Development strategy of China's coal industry under the reconstruction of global industrial chain and energy supply chain[J]. Strategic Study of CAE, 24(6):26-37.

李天健,赵学军,2022.新中国保障产业链供应链安全的探索[J].管理世界,38(9):31-40.Li Tianjian, Zhao Xuejun, 2022.The exploration on ensuring industrial chain and supply chain security in new China [J]. Management World,38(9):31-40.

李宪海,王丹,吴尚昆,2014.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,23(4):30-33.Li Xianhai, Wang Dan, Wu Shangkun, 2014.The domestic strategic mineral resources evaluation index selection:thinking based on list of key-minerals such as the United States, the European Union[J].China Mining Magazine,23(4):30-33.

卢虎生,郑辰煦,王路,等,2020.中国稀土资源安全轨迹模拟与评价[J].稀土,41(6):144-154.Lu Husheng, Zheng Chenxu, Wang Lu, et al, 2020.Simulation and evaluation of rare earth resources safety trajectories in China[J].Chinese Rare Earths,41(6):144-154.

罗婷,张永庆,郑明贵,等,2022.中国钾盐资源安全评估与预警研究[J].地球科学进展,37(6):575-587.Luo Ting, Zhang Yongqing, Zheng Minggui, et al, 2022.Security assessment and early warning of potash resources in China[J].Advances in Earth Science,37(6):575-587.

罗宇文,吴萍,赖一鸣,2022.中国稀土资源国家安全评估与预警[J].稀土,43(6):143-154.Luo Yuwen, Wu Ping, Lai Yiming, 2022. National security assessment and early warning of rare earth resources in China[J].Chinese Rare Earths,43(6):143-154.

吕军,王德运,魏帅,2017.中国石油安全评价及情景预测[J].中国地质大学学报(社会科学版),17(2):86-96. Lü Jun, Wang Deyun, Wei Shuai, 2017.China's oil security evaluation and scenario prediction based on EM-PSO-SVM model[J].Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition),17(2):86-96.

吕越,邓利静,2023.着力提升产业链供应链韧性与安全水平:以中国汽车产业链为例的测度及分析[J].国际贸易问题,(2):1-19.Lü Yue, Deng Lijing, 2023.Striving to improve the resilience and security of the industrial chains and supply chains:measurement and analysis on China's automobile industrial chain[J].Journal of International Trade,(2):1-19.

钱九红,李国平,2003.中国稀土产业的发展现状[J].稀有金属,27(6):813-818.Qian Jiuhong, Li Guoping, 2003.Status of development of rare earth industry in China[J].Chinese Journal of Rare Metals,27(6):813-818.

王钧超,2015.矿业形势新常态下中国稀土产业发展的管理政策探讨[J].中国矿业,24(5):6-9.Wang Junchao, 2015.Discussion of management policy for China's rare-earth industry development under the new normal of mining situation[J].China Mining Magazine,24(5):6-9.

王科唯,张寅,刘永团,2025.新质生产力赋能稀土产业高质量发展的现实困境、内在机理与实践路径[J].中国矿业,34(2):149-157.Wang Kewei, Zhang Yin, Liu Yongtuan, 2025.The realistic dilemma, internal mechanism, and practical path of empowering high-quality development of rare earth industry with new quality productive forces[J].China Mining Magazine,34(2):149-157.

王淑佳,孔伟,任亮,等,2021.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,36(3):793-810.Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al, 2021.Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J].Journal of Natural Resources,36(3):793-810.

魏龙,潘安,2012.中国稀土资源可持续发展研究[J].软科学,26(11):27-32.Wei Long, Pan An, 2012.Research on sustainable development of rare earth resource in China[J].Soft Science,26(11):27-32.

魏翔,夏安全,赵迪,等,2024.推动我国稀土产业可持续发展的策略探讨[J].中国矿业,33(增刊1):5-9.Wei Xiang, Xia Anquan, Zhao Di, et al, 2024.Exploring strategies for the sustainable development of China's rare earth industry[J].China Mining Magazine,33(Suppl.1):5-9.

吴巧生,周娜,成金华,2020.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,42(8):1439-1451.Wu

Qiaosheng, Zhou Na, Cheng Jinhua, 2020. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals [J].Resources Science,42(8):1439-1451.

吴一丁,王雨婷,罗翔,2021.供应链稳定性对我国稀土产业升级的影响研究[J].工业技术经济,40(1):42-47.Wu Yiding, Wang Yuting, Luo Xiang, 2021. The influence of supply chain stability on the upgrading of rare earth industry in China[J].Industrial Technology & Economy,40(1):42-47.

夏启繁,杜德斌,段德忠,等,2022.中国稀土对外贸易格局演化及影响因素[J].地理学报,77(4):976-995.Xia Qifan, Du Debin, Duan Dezhong, et al, 2022. Evolution and influencing factors of China's foreign trade in rare earth metals[J].Acta Geographica Sinica,77(4):976-995.

徐德义,王迪,李军辉,等,2023.新发展格局下战略性矿产资源产业链供应链安全内涵及指标体系研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),57(1):1-12.Xu Deyi, Wang Di, Li Junhui, et al, 2023. The security connotation and index system of industry chain and supply chain of strategic mineral resources under the new development pattern [J].Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences),57(1):1-12.

徐美,朱翔,刘春腊,2012.基于RBF的湖南省土地生态安全动态预警[J].地理学报,67(10):1411-1422.Xu Mei, Zhu Xiang, Liu Chunla, 2012. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF[J].Acta Geographica Sinica,67(10):1411-1422.

严筱,陈莲芳,严良,等,2016.基于PSR模型的我国重要矿产资源安全评价[J].中国矿业,25(1):43-49.Yan Xiao, Chen Lianfang, Yan Liang, et al, 2016. Evaluation of major mineral resources' security in China based on PSR model [J].China Mining Magazine,25(1):43-49.

张爱琴,薛碧薇,张海超,2021.中国省域创新生态系统耦合协调及空间分布分析[J].经济问题,(6):98-105.Zhang Aiqin, Xue Biwei, Zhang Haichao, 2021. Analysis on coupling coordination and spatial distribution of China's provincial innovation ecosystem[J].On Economic Problems,(6):98-105.

章穗,张梅,迟国泰,2010.基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J].管理学报,7(1):34-42.Zhang Sui, Zhang Mei, Chi Guotai, 2010. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10th five-year of China[J].Chinese Journal of Management,7(1):34-42.

赵桂梅,耿涌,魏文栋,2024.基于可持续发展视角我国稀土资源贸易安全评价研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),24(2):93-105.Zhao Guimei, Geng Yong, Wei Wendong, 2024. Evaluating the trade security of rare earth resources in China from a sustainable development perspective [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition),24(2):93-105.

郑国栋,王琨,陈其慎,等,2021.世界稀土产业格局变化与中国稀土产业面临的问题[J].地球学报,42(2):265-272.Zheng Guodong, Wang Kun, Chen Qishen, et al, 2021. The change of world rare earth industrial structure and the problems faced by China's rare earth industry [J]. Acta Geoscientica Sinica,42(2):265-272.

郑明贵,温东洪,董娟,等,2026.中国萤石资源产业链供应链安全评价[J].地质通报,45(2/3):221-235.Zheng Minggui, Wen Donghong, Dong Juan, et al, 2026. Safety evaluation of the industrial chain and supply chain of fluorite resources in China [J]. Geological Bulletin of China, 45(2/3):221-235.

郑明贵,倪京生,罗来文,等,2025.中国石油资源产业链供应链安全评价[J].中国矿业,34(2):99-110.Zheng Minggui, Ni Jingsheng, Luo Laiwen, et al, 2025. Security evaluation of industry and supply chains of petroleum resources in China[J].China Mining Magazine,34(2):99-110.

郑明贵,王萍,曾健林,等,2022."十四五"时期中国天然气国家安全预警分析[J].天然气工业,42(3):129-137.Zheng Minggui, Wang Ping, Zeng Jianlin, et al, 2022. Early warning analysis on China's natural gas national security during the 14th Five-Year Plan[J].Natural Gas Industry, 42(3):129-137.

周娜,吴巧生,薛双娇,2020.新时代战略性矿产资源安全评价指标体系构建与实证[J].中国人口·资源与环境,30(12):55-65.Zhou Na, Wu Qiaosheng, Xue Shuangjiao, 2020. A new security evaluation framework of strategical minerals in the new era [J]. China Population, Resources and Environment,30(12):55-65.

周之逸,樊锦绮,成金华,等,2024.中国锂资源安全综合评价及预测预警研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),58(5):571-588.Zhou Zhiyi, Fan Jinqi, Cheng Jinhua, et al, 2024. Research on comprehensive evaluation and prediction of lithium resource security in China [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 58(5): 571-588.

朱学红,张宏伟,李心媛,2018.中国稀土国际市场势力测度及政策有效性研究[J].国际贸易问题,(1):32-44.Zhu Xuehong, Zhang Hongwei, Li Xinyuan, 2018. Measure-

ment of the international market power of China's rare earth and the effectiveness of policy[J].Journal of International Trade,(1):32-44.
朱永光,张伍丰,王迪,等,2023.中国铜资源产业链供应链韧性评价[J].资源科学,45(9):1761-1777.Zhu Yongguang, Zhang Wufeng, Wang Di, et al, 2023. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain[J].Resources Science,45(9):1761-1777.

Security Evaluation of Industrial and Supply Chains of Rare Earth Resource in China

ZHENG Minggui, LUO Junbiao, LIU Xin
School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, *Jiangxi, China*

Abstract: The author developed an evaluation index system and model to assess the security of China's rare earth resource industrial and supply chains from three perspectives: resource-acquisition security, resource-conversion security, and resource-circulation security. This study evaluates the security of these chains from 2000 to 2023. The primary factors affecting security were identified using the obstacle degree model. Subsequently, the coupling and coordination among the three primary indicators were assessed using a modified coupling coordination model. The findings are as follows: (1) The security of China's rare earth industrial and supply chains remained stable from 2000 to 2011 but experienced irregular declines from 2012 to 2023, with the order of security being resource-circulation security>resource-acquisition security>resource-conversion security. (2) Resource-acquisition and resource-conversion security are identified as the principal impediments. The challenges are rooted in import concentration, recycling rates, product value-added rates, application-technology competitiveness, energy consumption per unit, and resource consumption coefficients. From 2000 to 2023, there has been a decline in the coupling and coordination of the rare earth industry and supply chain security. Enhancing and refining the security-improvement strategies can enhance coordination.

Key words: rare earth resources; industrial and supply chains security; security evaluation; obstacle degree model; modified coupling coordination model