

doi: 10.12097/gbc.2022.08.030

中国锂资源安全评估与预警

郑明贵^{1,2}, 刘丽珍¹, 于明¹, 林玉华¹

ZHENG Minggui^{1,2}, LIU Lizhen¹, YU Ming¹, LIN Yuhua¹

1. 江西理工大学矿业发展研究中心, 江西赣州 341000;

2. 中国科学技术大学管理学院, 安徽合肥 230026

1. *Research Center of Mining Development, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;*

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

摘要: 锂是中国重要的战略性矿产资源, 在锂资源需求快速增加、进口依赖严重的背景下, 对中国锂资源安全进行评估与预警具有必要性和紧迫性。构建了以资源禀赋、进口安全、市场风险和地缘政治为一级指标的中国锂资源安全评估指标体系, 利用常权和变权模型对 2009—2021 年中国锂资源安全状况进行了评估, 采用 ARIMA-BP 组合模型对 2022—2035 年中国锂资源安全进行了预警。研究发现, ①进口依赖度、进口集中度和运输通道风险对锂资源安全的影响最大; ②2009—2021 年中国锂资源安全等级由黄色—基本安全等级波动下降至橙色—不安全等级, 资源禀赋和进口安全是导致锂资源安全等级较低的主要原因; ③2022—2035 年中国锂资源安全评分总体呈下降趋势, 除 2026 年处于黄色—基本安全等级外, 其余年份均处于橙色—不安全等级。

关键词: 锂资源; 安全评估; 预警; 变权; ARIMA-BP 模型

中图分类号: P618.71 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)02/03-0197-09

Zheng M G, Liu L Z, Yu M, Lin Y H. Lithium resources safety assessment and early warning of China. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 197-205

Abstract: Lithium is an important strategic mineral resource in our country, under the background of lithium resource demand to increase rapidly, relying on import seriously, to our country lithium resource safety early warning analysis is necessary and urgent. Resource endowments, import security, market risk and geopolitics are selected as first-level indicators to construct an index system for the security of China's lithium resources. The constant weight and variable weight models were used to evaluate the security of lithium resources in China from 2009 to 2021. The ARIMA-BP model was used to study the security of lithium resources in China from 2022—2035. The study results indicate that: ① External dependence, import concentration and transportation risk are the main factors affecting the security of lithium resources; ② From 2009 to 2021, the safety level of lithium resources in China fluctuated from yellow - basic safety level to orange - unsafe level, The resource endowments and the import security are the main reasons for the low level of resource security; ③ From 2022 to 2035, the security score of China's lithium resources continued to decline. Except for 2026, which were in the yellow -- basic safety level, the rest of the years were in the orange —— unsafe level.

Key words: lithium resources; security assessment; early warning; variable weight; ARIMA-BP model

锂作为新能源电池的重要材料, 被列入中国 24 种战略性矿产资源之一。根据美国地质调查局 (USGS, 2022) 数据, 2022 年中国锂资源储量占全球储量的 7.7%, 但人均储量仅为世界平均水平的

1/3 左右。另外, 中国锂资源品位低、赋存条件差等导致开发利用水平低, 产量无法满足国内需求 (李康等, 2016), 并长期高度依赖进口, 资源安全难以保障。2009 年起, 国家对新能源产业重视度逐渐提高,

收稿日期: 2022-08-29; 修订日期: 2023-04-10

资助项目: 国家自然科学基金重点项目《中国战略性矿产资源安全评估与预警研究(2020—2050)》(编号: 18AGL002)

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

出台了多项财政补贴政策,带动了新能源产业及锂资源消费的快速发展。根据中国有色金属协会锂业分会数据,2022年中国锂资源消费量高达 42.95×10^4 t LCE,较2009年增长了近20倍,成为世界第一大锂消费市场。《新能源汽车产业发展规范(2021—2035年)》提出,中国新能源汽车销量在2025年达到新车销售总量的20%,届时对锂资源的需求将进一步扩张,而锂资源安全是中国战略性新兴产业可持续发展的关键。

目前对战略性矿产资源安全的研究主要集中在煤炭、石油、天然气等能源矿产,以及铁、铜、铝等大宗金属矿产,而对于锂等关键矿种的研究相对较少。对锂资源安全的已有研究主要从两方面展开:一是从需求预测(周平等,2014;邢佳韵等,2015;张泽南等,2020)、进口依赖度(周园园,2019)、开发利用分析(王学评等,2014;蔡艳龙等,2017)等单一维度对锂资源安全状况进行研究;二是通过构建指标体系,对锂资源安全进行评估和预警。廖秋敏等(2022)建立了以生产成本、供需安全、生产集中度、地缘政治和未来供需趋势为准则层的供应风险评估指标体系,并对锂资源安全进行了评估与预警;郑人瑞等(2016)从资源开采、国内供需、地缘政治、进口市场等维度出发,对中国锂资源供应风险进行了评估;屈金芝等(2021)构建了锂资源安全“资源—市场—地缘—军事”指标体系,利用熵权法对中国锂资源2010—2020年安全形势进行综合评估;袁小晶等(2019)在对锂资源供应风险进行评估预警时,从国内需求、供应、贸易环境等角度进行分析;范军等(2016)从政策体系、产业结构、市场机制、进口依赖度、自主创新能力、可持续发展能力等方面评估了中国锂资源产业安全状况。

综上,已有研究对锂资源安全问题进行了深入探究,为本文研究奠定了良好基础,但仍存以下可改进空间:一是在评估过程中未根据极端指标值变化对指标权重进行调整,二是所用的预警模型多为单一模型,预测精度不高。由此,结合已有研究(范军等,2016;郑人瑞等,2016;袁小晶等,2019;周娜等,2020;廖秋敏等,2022),本文首先构建了中国锂资源安全评估指标体系,运用常权模型对2009—2021年中国锂资源安全进行评估;其次,为强化极端指标值的影响,利用变权模型进行评估,提高了评估结果的可靠性;最后,采用ARIMA—BP组合模型对2022—

2035年中国锂资源安全进行预警,并将部分指标预警值与2022年已公布的实际值进行对比,能够为未来锂资源风险预防措施制定及合理开发利用提供参考价值。

1 中国锂资源安全评估指标体系

在构建矿产资源安全评估指标体系之前,需要明确矿产资源安全的内涵,已有研究主要从对经济发展的支撑作用、对各类风险冲击的抵御能力,以及可持续发展3个维度进行界定(张吉军等,2005;王伯安等,2010;沈镭等,2018;田郁溟,2022),即在开放的市场经济条件下,矿产资源能够对国家经济发展起到支撑作用;在遭受各类风险的冲击时,有足够的抵御能力;在资源日渐稀缺的情况下,仍然能够维持持续发展的状态。综上,本文认为矿产资源安全是指能够以合理的价格水平,充足、稳定、持续并及时地供应资源,以满足国民经济发展的需求。

1.1 指标体系的构建

基于矿产资源安全的内涵,并结合中国锂资源禀赋条件差、进口依赖度高、受外部风险影响大(李康等,2016;崔晓林,2017)等特点,在识别锂资源安全主要影响因素的基础上,参考已有研究(李颖等,2015;余敬等,2017;龙如银等,2018),构建以资源禀赋、进口安全、市场风险和地缘政治为一级指标,以储采比、储量指数、新增探明储量、进口依赖度等为二级指标的中国锂资源安全评估指标体系(表1)。

利用灰色关联模型进一步验证指标选取的可行性。利用SPSS软件将样本数据进行无量纲化处理后,再计算指标灰色关联度,分辨系数取0.5,计算公式为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + p \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + p \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中, p 为分辨系数; ζ 为灰色关联度; x_0 为样本母序列; $k=1,2,\dots,13$; $i=1,2,\dots,10$ 。计算结果表明,各指标关联度均大于0.5,说明指标选取合理。

1.2 数据来源

锂资源储量及产量数据来源于美国地质调查局(USGS),中国人口、汇率数据来源于国家统计局,世界人口数据来源于联合国人口分局,锂资源消费数据来源于有色金属工业协会锂业分会,锂精矿进口

表 1 中国锂资源安全评估指标体系

Table 1 Evaluation index system of security of lithium resources in China

一级指标	二级指标	计算方法	指标方向
资源禀赋	储采比	锂矿储量/锂矿产量	正向
	储量指数	国内人均储量/世界人均储量	正向
	新增探明储量	当年储量-上年储量	正向
进口安全	进口依赖度	锂资源年进口量/锂资源年消费量	负向
	进口集中度	锂资源进口量排名前三的国家进口量之和/锂资源进口总量	负向
市场风险	生产垄断度	前五位锂资源生产国家产量总和/全球锂资源产量总和	负向
	价格波动率	(当年碳酸锂年均价格-上年碳酸锂年均价格)/上年碳酸锂年均价格	负向
	汇率	人民币对美元汇率(美元=100)(元)	负向
地缘政治	国家风险	利用国家风险指数(GWB)经产量份额(PCc)加权计算锂资源供应国整体风险, 公式为: $CR = \sum(PC_C \times GWB)$	负向
	运输通道风险	运输路程长短(L)及路途事故发生次数(T)经进口份额(P _i)加权计算, 公式为: $PR = \sum P_i(W_1 L_i + W_2 T_i)$, 式中, W ₁ 表示运输路程长短权重, W ₂ 表示路途事故发生次数所占权重, 权重由Critic法计算得出	负向

注: 表中的锂资源数据均使用碳酸锂数据代表, 其中, 进口数据为碳酸锂进口量加锂辉石精矿(澳大利亚)进口量折合的碳酸锂当量(LCE)。折算方法如下: 进口锂辉石精矿产品按Li₂O品位6%计算, 并按照国内锂资源行业提锂现状(生产1 t 碳酸锂需约8 t 品位为6%的锂精矿), 将锂辉石精矿进口量折算成碳酸锂当量数据, 其中, 锂精矿进口数据来源于中国海关

数据来源于中国海关。碳酸锂进口量及价格数据来源于联合国商品贸易统计数据库(UN Comtrade), 国家风险数据来源于国际国别风险指南(ICRG), 运输距离、事故发生次数数据分别来源于法国国际经济研究中心(CEPII)和国际海事组织(IMO)。

1.3 指标权重

指标权重确定采用组合赋权法, 该方法既能有效体现数据信息的优势, 又结合了专家丰富的经验知识(周航等, 2022)。客观权重用改进的 Critic 法确定; 主观权重采用德尔菲法确定, 向高等院校、矿山

企业及设计院 55 名专家发放意见征询表, 共收回有效问卷 47 份。经测算后的锂资源安全评估指标权重见表 2。一级指标中, 进口安全及资源禀赋所占比重最大, 表明进口安全和资源禀赋对中国锂资源安全影响更大。在二级指标中, 进口依赖度、运输通道风险及进口集中度的权重最大。

1.4 指标分级

为消除各指标间量纲及数量级差异可能对研究结果产生的影响, 对指标进行无量纲化处理。参考国际公认分级规则(APEC, 2007), 并结合已有研究

表 2 中国锂资源安全评估指标权重

Table 2 Weight of China lithium resource security evaluation index system

一级指标	综合权重	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重
资源禀赋	0.252	储采比	0.078	0.118	0.098
		储量指数	0.067	0.061	0.064
		新增探明储量	0.083	0.099	0.091
进口安全	0.293	进口依赖度	0.171	0.137	0.154
		进口集中度	0.109	0.111	0.110
市场风险	0.231	生产垄断度	0.092	0.078	0.085
		价格波动率	0.101	0.075	0.088
		汇率	0.096	0.098	0.097
地缘政治	0.224	国家风险	0.091	0.103	0.097
		运输通道风险	0.112	0.12	0.116

(郑明贵等, 2022), 将二级指标分级量化至(0,10], 分级结果即为安全评分, 分级规则见表3。

1.5 预警等级划分

根据表3分级规则, 并参考相关研究成果(郑明贵等, 2022), 依据安全评分以等距方式对锂资源安全评估与预警等级进行划分, 结果见表4。

2 2009—2021年锂资源安全评估

2.1 评估模型

常权模型无法衡量极端指标值发生变动对评估结果的影响。借鉴已有研究(武强等, 2013), 运用变权模型对指标权重进行进一步调整。在变权模型中, 指标权重随着极端值变动而调整, 依据评估问题特点, 采用激励型或惩罚型变权, 达到弱化或强化极端值在计算中造成负面影响的目的。其原理如下:

映射: $w_j: (0, 1)^m \rightarrow (0, 1), (x_1, \dots, x_m) \rightarrow s_j(x_1, \dots, x_m) (j = 1, 2, \dots, m)$

满足归一性: $\sum_{j=1}^m w_j(x_1, \dots, x_m) = 1$

连续性: $w_j(x_1, \dots, x_m)$ 关于每个变元 x_k 连续;

惩罚性: $w_j(x_1, \dots, x_m)$ 关于每个变元 x_k 单调递减。

均衡函数为:

$$\sum_{\alpha} (x_1, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m x_j^{\alpha} (\alpha > 0) \quad (2)$$

变权公式为:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}}{\sum_{j=1}^m w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}} \quad (3)$$

式中, $w_j(x_1, \dots, x_m)$ 表示评估指标权重, α 表示参数。式(3)中, 当 $0 < \alpha < 1$ 时, 为惩罚型变权公式; 当 $\alpha = 1$ 时, 为常权公式; 当 $\alpha > 1$ 时, 为激励型变权

公式。

变权综合评估值 V^* , 计算公式为:

$$V^* = \sum_{j=1}^m w_j(x_1, \dots, x_m) x_j \quad (4)$$

2.2 一级指标评估

为了更直观地反映中国锂资源安全主要影响因素的变动情况, 先对2009—2021年的4个一级指标进行评估。结果如图1所示。

(1)资源禀赋分析。2009—2021年资源禀赋安全等级呈波动下降趋势, 由蓝色—安全等级降为黄色—基本安全等级。其中, 2018—2019年, 受产量持续增加影响, 储采比不断下降, 安全等级分别降为红色—很不安全等级和橙色—不安全等级。2009—2021年中国锂资源人均储量不到世界平均水平的40%, 资源基础较薄弱。

(2)进口安全分析。2009—2021年进口安全等级没有发生明显变化, 一直处于红色—很不安全等级。长期以来, 中国锂资源进口依赖度达高70%左右, 且进口集中度超90%。进口依赖度和进口集中度居高不下, 导致资源外部防控和分散风险的难度大, 锂资源进口安全缺乏保障。

(3)市场风险分析。2009—2021年市场风险安全等级呈先上升后下降趋势。2009—2012年, 碳酸锂价格稳定, 且汇率下降, 安全等级不断提高, 由蓝色—安全等级提高到绿色—很安全等级; 2012—2021年, 随着汇率上升及碳酸锂价格的大幅波动, 市场风险安全评分有所下降, 但下降较为缓慢, 安全等级依旧处于绿色—很安全等级。

(4)地缘政治分析。2009—2021年地缘政治安全等级先波动上升后下降。2009—2017年, 中国从

表3 中国锂资源安全指标分级规则

Table 3 Classification rules for indicators of lithium resources in China

分 级	资源禀赋			进口安全		市场风险			地缘政治	
	储采比	储量 指数	新增探明 储量/10 ⁴ t	进口 依赖度	进口 集中度	生产 垄断度	价格 波动率	汇率 (美元=1)(元)	国家 风险	运输通道风险
0~2	<20	<20%	<5	≥60%	≥80%	≥90%	≥40%	≥8.0	≥8.0	≥40
2~4	[20,30)	[20%,50%)	[5,10)	[50%,60%)	[60%,80%)	[70%,90%)	[30%,40%)	[7.5,8.0)	[7.0,8.0)	[38,40)
4~6	[30,40)	[50%,80%)	[10,15)	[40%,50%)	[40%,60%)	[50%,70%)	[20%,30%)	[7.0,7.5)	[6.0,7.0)	[36,38)
6~8	[40,50)	[80%,110%)	[15,20)	[30%,40%)	[20%,40%)	[30%,50%)	[10%,20%)	[6.5,7.0)	[5.0,6.0)	[34,36)
8~10	≥50	≥110%	≥20	<30%	<20%	<30%	<10%	<6.5	<5.0	<34

表 4 中国锂资源安全等级划分

Table 4 Security assessment of lithium resources in China

安全评分	(0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10]
安全等级	很不安全	不安全	基本安全	安全	很安全
预警颜色	红色	橙色	黄色	蓝色	绿色

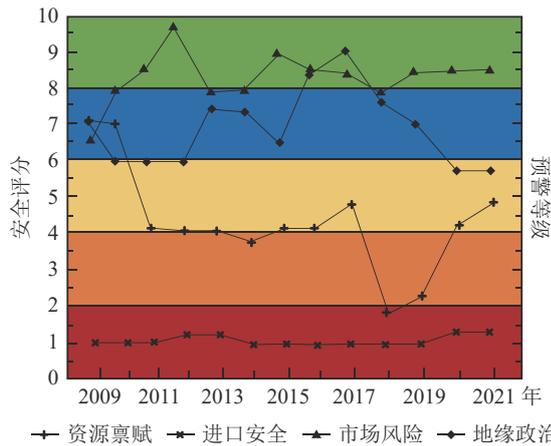


图 1 2009—2021 年中国锂资源一级指标评估趋势图

Fig. 1 Trend chart of primary index evaluation of lithium resources in China from 2009 to 2021

阿根廷进口碳酸锂份额增加,减少了对国家风险更高的智利的进口量,从而加强了地缘政治安全,安全等级由蓝色—安全等级提高到绿色—很安全等级;2018—2021 年,地缘政治安全受运输通道不断复杂化的影响不断降低,同时 2020 年新冠疫情的爆发使得供应国国家风险上升,地缘政治安全评分进一步下降,安全等级降至黄色—基本安全等级。

2.3 综合评估结果

参考已有研究(杨春风等,2019),取 $\alpha = 0.75$ 进行惩罚型变权评估,结果见图 2。由此可知,2009—2021 年中国锂资源安全评分在 3.18 ~ 4.15 之间,安全评估值总体较低,主要由资源禀赋和进口安全低导致。其中,2009—2013 年,除 2011 年和 2012 年受新增探明储量下降影响,安全等级降为橙色—不安全等级外,其余年份安全等级均为黄色—基本安全等级,该阶段碳酸锂价格较稳定,汇率及国家风险也呈下降趋势;2014 年开始,新能源产业发展迅猛,带动锂产量快速膨胀,储采比下降明显,同时碳酸锂价格波动剧烈,造成安全评分下降;2017 年,中国从阿根廷的进口量增加,减少了从国家风险及运输通道风险更大的智利的进口量,使锂资源安全评分上升,

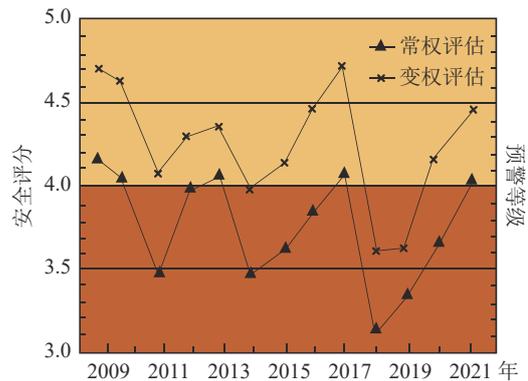


图 2 常权与变权评估结果对比

Fig. 2 Comparison of evaluation results between constant weight and variable weight

安全等级变为黄色—基本安全等级;2018—2019 年,受储采比下降、汇率上升及国家风险上升的共同影响,锂资源安全等级再次降为橙色—不安全等级;2020 年,碳酸锂价格大幅下跌,叠加新冠疫情导致的国家风险上升,安全等级依旧较低,为橙色—不安全等级。2021 年,锂资源探明储量有较大突破,新增探明储量 50×10^4 t,储采比增大,锂资源安全等级提升为黄色—基本安全等级。

3 2022—2035 年锂资源安全预警

3.1 ARIMA-BP 组合预警模型

ARIMA 模型具有持续性和动态性特点,可以根据已有数据信息,找出内部发展规律,判断未来变化趋势;而 BP 神经网络在挖掘数据背后的复杂非线性关系上具有较大优势(王翀,2018)。由于本文研究数据序列既包含线性又包含非线性成分,利用单一的 ARIMA 或 BP 模型进行预测均存在较大的局限性,而将两者进行组合,利用 ARIMA 模型拟合序列线性部分,BP 模型拟合序列非线性误差部分,可以提高总体预测精度(赵亚伟等,2016)。计算步骤如下:

(1)计算 ARIMA 模型残差序列。设定原始数据序列 [设为 $X^{(0)}(k), k=1,2,\dots,n$], 根据 ARIMA 模型求出预测序列 [设为 $Y^{(0)}(k), k=1,2,\dots,n$], 再将原始数据序列与预测序列相减,得到残差序列:

$$e^{(0)}(k) = X^{(0)}(k) - Y^{(0)}(k) \quad (5)$$

(2)计算 BP 模型误差序列。构建一个三层 BP 神经网络,采用迭代一步滚动式预测法,将误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,得到 BP 神经网络预测误差序列,记作

$e1^{(0)}(k)$ 。

(3)计算组合模型预测结果。将 ARIMA 模型与 BP 模型预测结果相加,得到组合模型预测结果:

$$\bar{X}^{(0)}(k) = Y^{(0)}(k) + e1^{(0)}(k) \quad (6)$$

3.2 安全预警

为了进一步考察 2022—2035 年中国锂资源安全评估值变化趋势,基于 2009—2021 年评估结果,采用 ARIMA-BP 组合模型进行预警分析。

首先,进行 ADF(Augmented Dickey-Fuller)检验以判断数据平稳性,结果见表 5。由此可知,数据在一阶差分下平稳,确定差分次数 d 为 1。对该序列进行白噪声检验,显示为非白噪声序列,因此可以进行建模。

其次,进行相关性和偏相关性分析。初步确定自回归阶数 p 为 2,移动平均阶数 q 为 1、2。经过多次试验,当 q 取 2 时,ARIMA(2,1,2) 模型的参数最优。

最后,按以下步骤对模型进行检验和拟合,以判断模型的有效性:①对 ARIMA(2,1,2) 模型残差进行相关性和偏自相关检验,结果表明残差为纯随机残

差,模型信息提取充分;②利用该模型得到 2009—2021 年锂资源安全评估值拟合结果,并利用公式(5)求出残差序列;③采用 Matlab 软件编程构建滚动神经网络预测模型,以 2009—2013、2010—2014、……、2016—2020 年 ARIMA 预测误差数据作为网络输入,以 2014—2021 年历年评估值作为理想输出,对网络进行学习训练,经反复试验,选取隐含层最优节点数为 5;④设定最大训练步数 50000,学习速率 0.1,目标精度 0.001,输入、输出层传递函数分别为 tansig、logsig,训练算法为 traingdx,得到误差拟合值及 ARIMA-BP 组合模型预测结果;⑤将 ARIMA 模型、BP 神经网络模型与 ARIMA-BP 组合模型预测误差进行对比,结果见图 3。

由图 3 可知,与单一的 ARIMA 模型、BP 神经网络相比,ARIMA-BP 组合模型预测结果更趋近实际值,相对误差更小,精度更高。因此,利用 ARIMA-BP 组合模型对 2022—2035 年锂资源安全进行预警。其中各二级指标预警模型选择,对呈线性变动的指标使用 ARIMA 模型,非线性变动指标采用 BP 神经网络模型。由此,得到 2022—2035 年锂资源安全预警结果,见表 6;二级指标预警值按照表 3 进行分级,结果见表 7。

由表 6 可知,2022—2035 年中国锂资源安全预警值介于 3.12~4.13 之间,由于 2026 年锂资源价格波动率、进口集中度和进口依赖度相对较小,安全等级为黄色—基本安全;其余年份均为橙色—不安全

表 5 ADF 检验结果

Table 5 Results of ADF test

检验统计量	一阶差分 ADF 检验统计量	测试临界值		
		1%置信水平	5%置信水平	10%置信水平
t 统计量	-6.189869	-4.420595	-3.259808	-2.771129
p 值	0.0012			

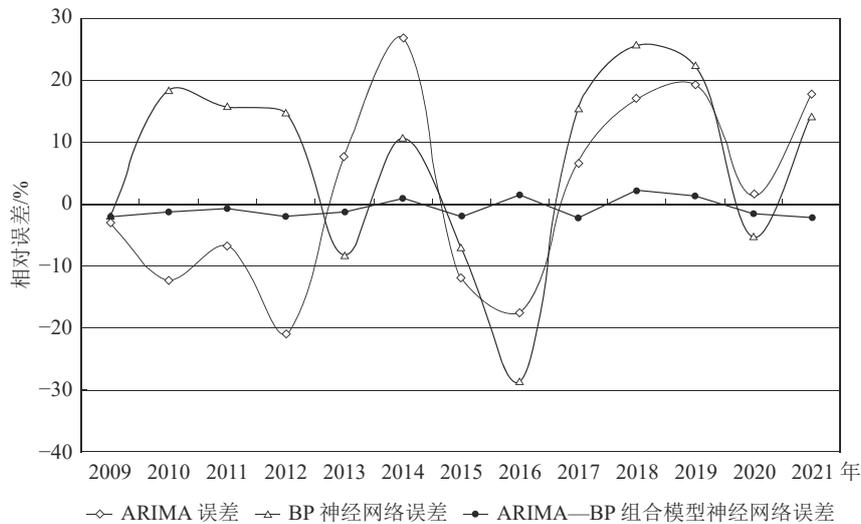


图 3 3 种模型预测相对误差

Fig. 3 Relative residuals predicted by three models

等级。总体来看,受储采比下降、进口依赖度高、进口集中度高、国家风险上升的影响,2022—2035 年中国锂资源安全风险较大。

由表 7 可知,2022—2035 年储采比、进口依赖度、进口集中度、生产垄断度等指标预警等级低,是影响中国锂资源安全的主要因素。中国新能源汽车销量若在 2025 年达到新车销售总量的 20%,届时锂资源需求预计将进一步增加,将更多地依赖进口,因此应重点关注锂资源外部风险防控及国内资源禀赋状况。

3.3 可靠性检验

为了进一步检验本文预警结果的可靠性,利用 2022 年已公布的部分指标数据与本文预警结果进行对比。由表 8 可知,2022 年锂资源价格、汇率、消费量、进口集中度、储量、世界储量等指标预警值与实际值相对误差均在 5% 左右,说明预警结果较科学可靠。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 构建了中国锂资源安全评估指标体系,利用组合赋权法对指标进行赋权。根据赋权结果,进口依赖度对中国锂资源安全影响最大,其次是进口集中度和运输通道风险。

(2) 利用变权模型对锂资源安全进行了评估。

表 6 2022—2035 年中国锂资源安全预警结果

Table 6 Early warning results of security level of lithium resources from 2022 to 2035 in China

年份	预警值	安全等级	预警颜色
2022	3.86	不安全	橙色
2023	3.61	不安全	橙色
2024	3.47	不安全	橙色
2025	3.89	不安全	橙色
2026	4.13	基本安全	黄色
2027	3.73	不安全	橙色
2028	3.71	不安全	橙色
2029	3.67	不安全	橙色
2030	3.73	不安全	橙色
2031	3.65	不安全	橙色
2032	3.54	不安全	橙色
2033	3.31	不安全	橙色
2034	3.28	不安全	橙色
2035	3.12	不安全	橙色

结果表明:2009—2021 年中国锂资源安全等级由基本安全降至不安全,评估值范围为 3.18~4.15,评分整体较低且呈下降趋势;资源禀赋和进口安全是导致锂资源安全等级较低的主要原因。

(3) 运用 ARIMA-BP 组合模型对 2022—2035 年中国锂资源安全进行了预警,结果表明,该阶段锂资

表 7 2022—2035 年二级指标预警分级值

Table 7 Predicted value classification for level 2 indicators from 2022 to 2035

年份	储采比	储量指数	新增探明储量	进口依赖度	进口集中度	生产垄断度	价格波动率	汇率	国家风险	运输通道风险
2022	2	3	10	1	2	2	10	7	4	8
2023	2	3	10	1	2	2	9	7	4	8
2024	2	3	9	1	2	2	9	8	4	8
2025	1	3	9	1	2	1	9	8	4	9
2026	1	3	9	2	2	1	9	8	4	9
2027	1	3	9	2	1	1	9	8	3	9
2028	1	3	9	2	1	1	8	8	3	10
2029	1	3	9	2	1	1	8	8	3	10
2030	1	3	8	2	1	1	8	8	3	10
2031	1	3	8	2	1	1	8	8	3	10
2032	1	4	8	2	1	1	8	8	2	10
2033	1	4	8	2	1	1	8	9	2	10
2034	1	4	8	2	1	1	8	9	2	10
2035	1	4	8	2	1	1	8	9	2	10

表8 预警结果与2022年部分实际指标数据对比

Table 8 The comparison of the forecast results with some actual index data in 2022

指标	2022年实际值	2022年预警值	相对误差
价格/(美元·kg ⁻¹)	7.180	6.997	-2.549%
汇率(美元=100)/元	675.360	656.650	-2.770%
进口集中度	0.985	0.994	-0.914%
锂资源消费量/10 ⁴ t LCE	42.951	40.963	-4.629%
世界储量/10 ⁴ t	2600.000	2480.000	-4.615%
中国储量/10 ⁴ t	200.000	210.400	5.200%

源安全等级较低, 储采比、进口依赖度、进口集中度、生产垄断度等指标是主要影响因素。

4.2 建议

(1) 改善资源禀赋状况, 关注供应端风险

中国锂资源勘探潜力巨大, 目前资源查明率仅25.4%, 建议进一步加强锂资源地质勘探工作, 加大勘查投入, 以提高储采比, 从源头上保障锂资源安全。同时, 提升锂资源回收技术, 并积极寻找替代资源, 以缓解锂资源供应压力。近2年锂价的疯狂暴涨, 导致大量资金涌入到相关行业, 容易形成企业盲目扩张导致的产能过剩, 不利于锂资源企业的技术创新, 加上未来新能源汽车电池技术或将发生革新, 锂离子电池或将被矾电池、钠离子电池等替代, 届时将减少对锂的使用量, 产能过剩问题将进一步加剧。因此, 应引导锂资源企业结合实际和产业趋势合理制定发展目标, 避免盲目扩张和低水平同质化发展, 建立创新引领、有序扩张、供应安全的锂资源发展格局。

(2) 开发高效提锂技术, 提高锂资源自给率

国内锂资源大部分为盐湖锂资源, 近年来中国盐湖提锂技术得到快速发展, 已步入成熟期, 开发工艺简单、能耗低、锂回收率高和绿色环保的盐湖提锂技术成为今后研究的重点和方向。尽管卤水锂矿资源总量占据优势, 但在中国锂资源消费需求保持上升、锂价仍处于高位的情况下, 硬岩锂的补充也至关重要, 如以宜春雅山414矿床为典型代表的花岗岩型锂矿, 以福建南平伟晶岩型锂矿床、江西广昌伟晶岩型锂辉石锂矿床、湖南传梓源锂矿床等为代表的伟晶岩型锂矿。另外, 中国粘土型锂资源也较丰富, 这类矿床具有分布面积广、产出层位稳定、厚度大等优点, 如能研究出高效的提锂技术, 将有望成为一种新型锂资源类型。

(3) 拓展海外获取渠道, 降低市场风险

在稳定与主要锂资源供应国现有合作的基础上, 积极寻找新的锂资源供应国。当下, 南美盐湖竞争愈发激烈, 严重阻碍了中国相关企业投资的步伐, 澳洲也对中国企业关闭了投资窗口, 而非洲正在成为锂资源的下一个前沿地区, 津巴布韦、刚果民主共和国、加纳、纳米比亚等地的锂资源已成为各锂资源大国的博弈热点。除巨大的资源潜力优势外, 非洲还是仅次于澳洲的锂辉石聚集区, 相较于澳、美等矿业企业, 中国企业在矿山生产方面更具成本优势, 而中国企业的基金、技术等优势, 与非洲的短板形成良性互补, 使得中国企业进入非洲寻锂前景更加乐观。

(4) 关注国家风险和运输通道风险防控, 加强地缘政治安全

一方面, 应注重国家风险防控, 稳定并加强与锂资源主要供应国的合作关系, 防范突发风险而导致的锂资源外部供应中断, 同时根据供应国风险大小和稳定程度适当调整进口份额, 对于国家风险较高的澳大利亚及风险较不稳定的阿根廷, 适当降低进口份额, 以降低国家风险; 另一方面, 应重点关注运输通道风险, 尽量避免进口锂资源途径高风险海域, 并完善运输安全保障措施, 进一步提高应对和处理各类突发事件的能力, 保障运输通道安全。

致谢: 本文在主观权重确定过程中向高等院校、矿山企业及设计院多名专家发放意见征询表, 在此感谢各位专家的反馈, 同时审稿专家对论文提出了较多建设性、指导性的建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

APEC. 2007. A Quest for Energy Security in the 21st Century[R]. Asia

- Pacific Energy Research Centre: 5-12.
- USGS. 2022. Lithium statistics and information[EB/OL].<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf>.
- 蔡艳龙, 李建武. 2017. 全球锂资源开发利用形势分析及启示[J]. *地球学报*, 38(1): 25-29.
- 崔晓林. 2017. 中国锂矿资源需求预测及供需分析[D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 范军. 2016. 我国锂矿资源开发及产业发展策略研究[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.
- 李康, 王建平. 2016. 中国锂资源开发利用现状及对策建议[J]. *资源与产业*, 18(1): 82-86.
- 李颖, 陈其慎, 柳群义, 等. 2015. 中国海外矿产资源供应安全评估与形势分析[J]. *资源科学*, 37(5): 900-907.
- 廖秋敏, 孙明浩. 2022. “逆全球化”背景下中国锂资源供应安全评估[J]. *矿业研究与开发*, 42(4): 179-186.
- 龙如银, 杨家慧. 2018. 国家矿产资源安全研究现状及展望[J]. *资源科学*, 40(3): 465-476.
- 屈金芝, 张艳松, 张艳, 等. 2021. 新形势下中国锂矿资源供应安全评估[J]. *中国矿业*, 30(12): 1-7.
- 沈镭, 张红丽, 钟帅, 等. 2018. 新时代下中国自然资源安全的战略思考[J]. *自然资源学报*, 33(5): 721-734.
- 田郁溟, 琚宜太, 周尚国. 2022. 我国战略矿产资源安全保障若干问题的思考[J]. *地质与勘探*, 58(1): 217-228.
- 王伯安, 张德胜. 2010. 中国石油经济安全评估指标体系设计[J]. *科学与科学技术管理*, 31(1): 141-144.
- 王学评, 柴新夏, 崔文娟. 2014. 全球锂资源开发利用的现状与思考[J]. *中国矿业*, 23(6): 10-13.
- 王翀. 2018. 基于模型组合的我国能源消费需求趋势预测[J]. *统计与决策*, 34(20): 86-89.
- 武强, 李博, 刘守强, 等. 2013. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评估——以开滦蔚州典型矿区为例[J]. *煤炭学报*, 38(9): 1516-1521.
- 邢佳韵, 彭浩, 张艳飞, 等. 2015. 世界锂资源供需形势展望[J]. *资源科学*, 37(5): 988-997.
- 杨春风, 任雁飞, 王可意. 2019. 基于惩罚-激励变权的 TOPSIS 法边坡安全评估模型[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 38(2): 59-64.
- 余敬, 高思宇, 张龙. 2017. 重要矿产资源安全评估的集成算法与实证[J]. *统计与决策*, (6): 59-61.
- 袁小晶, 马哲, 李建武. 2019. 中国新能源汽车产业锂资源需求预测及建议[J]. *中国矿业*, (8): 61-65.
- 张吉军. 2005. 论我国矿产资源经济安全[J]. *科技进步与对策*, (3): 44-46.
- 张泽南, 张照志, 吴晴, 等. 2020. 中国锂矿资源需求预测[J]. *中国矿业*, 29(7): 9-15.
- 赵亚伟, 陈艳晶. 2016. 多维时间序列的组合预测模型[J]. *中国科学院大学学报*, 33(6): 825-833.
- 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.
- 郑人瑞, 唐金荣, 周平, 等. 2016. 我国锂资源供应风险评估[J]. *中国矿业*, 25(12): 30-37.
- 周航, 廖昕, 陈仕阔, 等. 2022. 基于组合赋权和未确知测度的深埋隧道岩爆危险性评估——以川藏交通廊道桑珠岭隧道为例[J]. *地球科学*, 47(6): 2130-2148.
- 周娜, 吴巧生, 薛双娇. 2020. 新时代战略性矿产资源安全评估指标体系构建与实证[J]. *中国人口·资源与环境*, 30(12): 55-65.
- 周平, 唐金荣, 张涛. 2014. 全球锂资源供需前景与对策建议[J]. *地质通报*, 33(10): 1532-1538.
- 周园园. 2019. 中国锂资源供需形势及对外依存度分析[J]. *资源与产业*, 21(3): 46-50.