

引用格式: 谌金宇, 刘隽琦, 罗倩, 等. 多主体视角下新能源行业关键金属供需平衡动态仿真: 以锂为例[J]. 资源科学, 47(7): 1436-1448. [Chen J Y, Liu J Q, Luo Q, et al. Dynamic simulation of supply and demand balance of critical metals in new energy industry from a multi-entity perspective: Taking lithium as an example[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1436-1448.] DOI: 10.18402/resci.2025.07.04

# 多主体视角下新能源行业关键金属供需平衡 动态仿真 ——以锂为例

谌金宇<sup>1,2</sup>, 刘隽琦<sup>1</sup>, 罗倩<sup>1,3</sup>, 任晓航<sup>1</sup>

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 中南大学金属资源战略研究院, 长沙 410083;  
3. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

**摘要:**【目的】关键金属是能源转型的重要原材料, 新能源产业快速发展导致关键金属需求大幅增长, 对关键金属供需平衡造成严峻挑战。因此, 研究未来能源转型下中国新能源行业关键金属如何实现供需平衡成为亟待解决的关键问题。【方法】本文基于多主体视角, 以锂为例, 结合情景分析方法, 构建2023—2050年新能源行业关键金属供需平衡动态仿真模型。【结果】①在不同技术进步情景下, 通过模拟原生开采企业与再生回收企业的产量决策发现, 原生锂供给呈现剧烈波动态势, 而再生锂供给则呈现平稳增长趋势; 电动汽车制造部门的锂需求在2023—2035年快速增长, 在2035年以后则呈平稳趋势, 而储能装置部门的锂需求在2038年左右达到峰值。②在供给侧采选技术进步背景下, 锂需求的增长速度呈现S形变化趋势, 早期锂供给能力低于需求, 后期随着技术进步和产能扩张供给最终超过需求。③在供给侧循环回收技术进步情景下, 早期锂供给增速相对平缓, 后期锂供给在波动中向锂需求水平逐步趋近。【结论】在不依赖技术进步时, 未来中国新能源行业关键金属无法实现供需平衡, 应结合新能源产业特点, 针对性地采用开采和回收等不同技术进步路线, 同时加强供需主体协同, 统筹原生与再生金属开发利用, 缓解长期供需矛盾。

**关键词:** 多主体视角; 能源转型; 新能源行业关键金属; 供需平衡; 采选技术进步; 循环回收技术进步

DOI: 10.18402/resci.2025.07.04

## 1 引言

中国力争于2030年前实现碳达峰, 并于2060年前实现碳中和。因此, 推动新能源转型是实现碳中和目标的关键举措和必然选择<sup>[1]</sup>。新能源产业是推动能源转型的支柱和关键, 同时也是新质生产力的重要组成部分。新能源系统相较于传统能源系统, 展现出更高的金属密集度, 无论是涉及的金属种类还是所需的数量, 都显示出对新能源行业关键金属的较大需求<sup>[2,3]</sup>。新能源行业关键金属是指广泛应用于实现新能源转化和利用、发展新能源技术

的关键金属材料, 是发展新能源产业必不可少的关键资源<sup>[4]</sup>。作为新能源行业所需的原材料, 锂、钴等新能源行业关键金属具有重大战略意义。世界银行2020年发布的《矿产品促气候行动: 清洁能源转型的矿产消费强度》报告显示, 要实现全球温控2℃目标, 预计2050年将需要5倍以上的关键金属<sup>[5]</sup>, 因此, 维持关键金属供需平衡面临重大挑战。在此基础上, 研究新能源行业关键金属供需平衡, 挖掘新能源产业发展潜力, 是推动新能源转型的关键一环, 对于行业发展和战略稳定具有重要意义。

收稿日期: 2024-09-02; 修订日期: 2025-04-24

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1002002); 国家自然科学基金项目(72104253; 72474229)

作者简介: 谌金宇, 男, 湖南益阳人, 副教授, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: cjj2014@csu.edu.cn

通讯作者: 罗倩, 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 研究方向为能源经济。E-mail: 15243625571@163.com

2025年7月

在中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议上,“保障战略性矿产资源安全”被首次提升为国家层面的战略目标。能源转型激发了中国新能源行业关键金属需求增长,使得供需矛盾凸显,如何缓解新能源行业关键金属的供需矛盾,值得进一步探讨。近期,学术研究逐渐集中于探讨能源转型背景下新能源行业关键金属的供需状况。众多研究发现,随着新能源技术的快速进步和广泛应用,对于关键金属的需求将大幅增长,这可能导致未来这些金属的供应出现短缺现象<sup>[6]</sup>。影响关键金属供需平衡的因素有很多,这些因素主要分为供给侧和需求侧两大类。供给侧的影响因素包括储备<sup>[7]</sup>、价格波动<sup>[8]</sup>、技术革新<sup>[9]</sup>以及政策调控<sup>[10]</sup>等。需求侧的影响因素包括人口<sup>[11,12]</sup>、GDP<sup>[13,14]</sup>、能源强度<sup>[15-17]</sup>、产业结构<sup>[18]</sup>与技术进步<sup>[19]</sup>等。结合物质流动与守恒理论,可以识别和核算社会经济活动中的金属流动过程,进而探索经济发展和技术变革等因素对金属供需平衡机制的影响。要深入理解这些供需关系的动态变化,需要借助科学的定量研究方法,其中物质流分析方法因其系统性优势而成为研究新能源行业关键金属代谢的重要工具。

物质流方法旨在评估一个明确界定的系统内物质的流动和存储情况<sup>[20]</sup>。近年来,随着关键金属研究的重要性日益凸显,物质流方法的应用已经扩展到这一领域,并取得了显著成果。例如Hao等<sup>[21]</sup>通过构建动态物质流模型,系统预测了全球铂族金属的需求趋势,并评估了不同情景下的供给风险。类似地,Baars等<sup>[22]</sup>采用多情景分析方法,深入探讨了锂电池关键金属(如锂、钴、镍)在能源转型背景下的供需动态。谭雪萍等<sup>[23]</sup>的研究则将物质流方法应用于稀土元素领域,重点分析了镧元素在中国社会经济系统中的代谢特征及其对供应链安全的影响。随着研究的深入,学者逐渐认识到传统物质流分析在刻画市场异质性和政策反馈机制方面存在局限性。为突破这一瓶颈,Riddle等<sup>[24]</sup>将多主体系统引入关键金属研究领域。在物质流核算的基础上,构建了包含采矿、冶炼、制造等全产业链环节的多主体模型,实现了对稀土市场供给中断影响的动态模拟。这一创新方法随后在Riddle等<sup>[25]</sup>的研究中得到进一步发展,通过引入回收、替代等环节,使模型能够评估不同政策干预下的市场响应。这些研究表明,将物质流分析与多主体视角相结合,既能

保持对金属流动的量化优势,又能捕捉市场动态特征,为新能源行业关键金属供需研究提供了更全面的分析框架<sup>[26]</sup>。这些研究强调了不同主体的决策行为及其相互作用,更加精准地捕捉到了现实问题中的动态性和异质性。相比于针对单一主体使用物质流分析方法,多主体视角揭示了主体间的策略互动,考虑了市场和政策对于主体决策的影响,从而为新能源行业关键金属供需平衡的研究提供更为全面和深入的视角。

基于现有研究,结合多主体视角和物质流方法研究新能源行业关键金属供需平衡具有必要性:①在新能源行业关键金属领域,其供需关系受到多种因素的影响,包括技术变革、经济波动、市场调控等。多主体视角能够有效整合这些复杂因素,弥补当下研究主要是从静态、单一角度对新能源行业关键金属进行研究的缺陷<sup>[27]</sup>。②结合物质流分析方法,本文研究了技术进步情景中的关键金属供需变化情况,更加全面地捕捉市场的复杂性和动态性,从而为微观主体的战略决策和宏观政策制定提供更有针对性的支持。因此,结合多主体视角和物质流方法不仅弥补了传统方法中对于主体行为机制刻画不足、对复杂市场考虑不周的弊病,还增强了模型对于复杂现实问题的解释能力和预测能力,提升了新能源行业关键金属供需平衡研究的科学性和有效性<sup>[1]</sup>。

本文从原生开采企业、再生回收企业、进口部门、电动汽车制造部门和储能装置制造部门五大主体出发,模拟新能源行业关键金属供需演化趋势,构建了2023—2050年间多主体视角下中国新能源行业关键金属供需平衡动态仿真模型。由于电动汽车和电网储能的发展和普及,金属锂具有愈发重要的战略作用<sup>[28]</sup>,锂资源的供需状态演变在新能源行业关键金属品类中具有代表性。以锂为例,本文对各个主体行为决策的影响因素进行分析,并探索了在不同情景下主体行为的动态响应。本文的贡献体现在如下两个方面:①通过组合供需主体的技术进步情景,创新性地结合了多主体视角和物质流分析框架,相比于以往研究,情景设计更加符合现实复杂多变的特点,精准模拟了真实市场环境下新能源行业关键金属供需主体的行为逻辑,捕捉了市场的复杂性和动态性,为系统解构中国新能源行业关键金属供需平衡提供了更加科学有效的研究视

角<sup>[20,23]</sup>。②综合构建了多主体视角下中国新能源行业关键金属供需平衡的仿真模型,摆脱以往从不同生产环节孤立地研究资源生产运用的框架,从动态的、多主体的视角定量分析了能源转型背景下中国新能源行业关键金属供需特征及其变动趋势<sup>[9,21]</sup>,为将来进一步推进关键金属行业发展提供了经验证据与模型支持。

## 2 研究边界、框架与模型构建

### 2.1 研究边界

结合中国新能源行业关键金属全生命周期的特点,本文将涉及的主体包括原生开采企业、再生回收企业、进口部门、电动汽车制造部门和储能装置制造部门,其中,进口部门假定为一个不受系统内部影响的外部主体。本文采用多主体视角下仿真模型作为工具,涵盖从2023—2050年的中国锂资源市场,整个模型需要基于稳定的经济环境,因此不考虑受经济周期或经济衰退影响的外部冲击。为此,首先需确定全局模型边界和假设。再确定主体的属性和行为:

(1)空间边界。本文以中国为空间边界,重点关注能源转型对中国锂资源供需平衡的影响。由于中国在全球锂资源中发挥着重要的作用,中国锂资源的供需趋势往往会影响锂资源的全球格局。

(2)需求范围。需求主体包括电动汽车(EV)和储能装置(ESS),该系统占锂资源消费的80%<sup>[29]</sup>。电动汽车包括纯电动汽车(BEV)和插电式混合动力电动汽车(PHEV)。储能装置包括可再生能源并网、电力辅助服务、分布式发电和微电网,以及电动汽车中的储能应用。

(3)供给范围。锂资源供给分为原生开采企业、再生回收企业和进口部门。原生开采企业从矿石和卤水中提炼原生锂,再生回收企业处理报废产品获取再生锂,进口部门则负责锂资源的进出口。除此之外,对于电动汽车制造企业和储能装置制造企业,不考虑与需求相关的成本、投资收益率和其他相关因素,未来市场需求基于国内需求趋势或官方规划策略。

### 2.2 研究框架

供需主体的行为和互动受到多种因素的影响。开采和回收主体可能受到生产成本和技术进步等的影响,而进口部门的净进口总量受到非主观外部因素的影响较大,难以预测。需求主体主要考虑电动汽车产量、储能市场发展趋势和技术进步等因素。价格与市场机制是市场供需模型的核心,涉及锂资源价格的历史趋势分析、供需关系对价格的影响以及市场交易与定价机制(图1)。

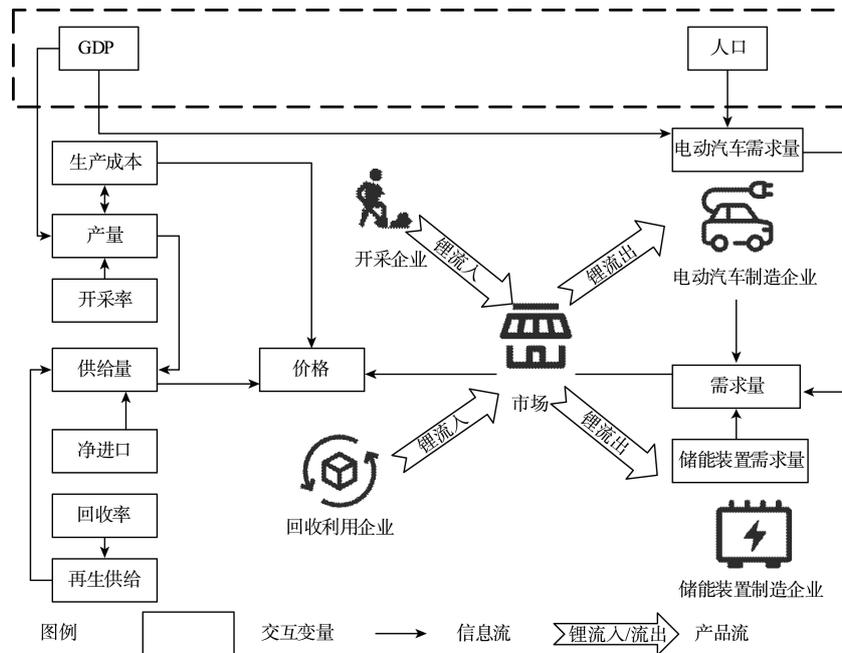


图1 主体关系图

Figure 1 Entity relationship diagram

在实际的工业生产和运用中,氢氧化锂和碳酸锂是锂存在的主要形式,其总和占中国锂盐产量的九成。因此,本文从碳酸锂和氢氧化锂入手,研究锂资源供给情况,数据来源于美国地质调查局(USGS)的官方统计数据库和碳酸锂、氢氧化锂行业分析。通过该数据库,模拟2023—2050年锂资源供需动态变化。在每个时间步长中,价格信息以及需求请求传递到供给主体,在传导过程中,主体的决策行为决定产品的价格,推动市场实现供需平衡。模型可以捕捉到供需主体自主决策和互动所产生的市场动态。

### 2.3 主体属性与行为建模

#### 2.3.1 主体属性及异质性

锂资源供需主体根据各自目标选择最优决策,并受到各种内外部因素的影响,如生产成本、价格和技术限制等。

(1)原生开采企业。主体的属性表示主体的功能和特征。在本文中,开采企业通过锂矿石的开采和盐湖锂的提取获取原生锂,主体属性包括产量、生产成本、价格和开采技术。

基于行业市场份额分布,本文选取了中国4家最大的碳酸锂和氢氧化锂生产企业作为产量决策企业,分别统计其市场占比,其余企业归为第五家原生生产企业(占比68.3%)。主体产量( $q_{i0}$ )根据2022年各企业实际产量占比确定。相关数据来源于SMM数据库、华经产业研究院以及上市公司年报。

(2)再生回收企业。回收锂资源有助于缓解锂资源稀缺的问题,再生回收企业专注于锂资源的再利用。再生锂资源的供给主要取决于废弃的含锂产品的总量和资源循环回收技术两个关键要素。锂资源的回收主要包括湿法冶金、热法冶金和直接回收。依据董雪松<sup>[30]</sup>和曾安琪<sup>[31]</sup>的做法,构建各种回收方法的表达式,并且使用S形曲线计算回收效率,计算方程如下:

$$RLi = OfI \cdot SRR \quad (1)$$

$$OfI = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^x Lid(\theta) \cdot \phi(x - \theta) d\theta \quad (2)$$

$$SRR = CRP \cdot CRL \cdot RR \cdot TRE \quad (3)$$

式中: $RLi$ 表示再生锂量; $OfI$ 表示锂的流出量; $SRR$ 表示回收效率; $Lid(\theta)$ 表示未来与过去锂存量的差

距; $\phi(x - \theta)$ 模拟生命周期分布函数; $t$ 和 $t_0$ 分别表示当前年份和初始年份; $CRP$ 表示报废的含锂最终产品的回收率; $CRL$ 表示锂电池的回收率; $RR$ 表示金属锂的回收率; $TRE$ 表示再生锂资源的技术回收效率。4种回收率均在仿真区间内呈S形增长。

(3)进口部门。随着锂在动力电池和储能领域的应用日益增多,世界各国(地区)都在加紧对锂资源的勘探和开发。根据美国地质勘探局的数据,全球已探明锂资源已达到98000千t金属锂当量。在巨大的锂资源供需市场上,中国作为并在一段时间内将持续作为碳酸锂净进口国和氢氧化锂的净出口国。基于此前提计算资源进口部门的锂资源净进口量。基于海关总署的进出口统计数据,本文选取了两种主要锂产品进行分析:碳酸锂(HS283691)和氢氧化锂(HS282520)。通过化学式计算,前者的锂含量为18.8%,后者为16.5%<sup>[32,33]</sup>,由此得到净进口的锂当量。净进口计算公式如下:

$$NIM_t = Import_t - Export_t \quad (4)$$

式中: $NIM_t$ 、 $Import_t$ 、 $Export_t$ 分别表示中国锂资源在 $t$ 年的净进口总量、进口量和出口量。

(4)电动汽车制造部门。电动汽车是锂资源需求增长的主要动力,对锂资源有大量需求,企业对未来的电动汽车需求的预测直接影响锂资源的需求,根据Habib等<sup>[34]</sup>和Zhang等<sup>[35]</sup>的设定,汽车需求的增长趋势呈现S形。本文使用Logistic模型来预测未来千人拥有的车辆数量<sup>[36]</sup>。具体公式如下:

$$VP_t = \gamma \cdot e^{-5 \cdot \exp(-0.14G_t)} \quad (5)$$

$$DEV_t = VP_t \cdot PO_t \cdot S_t \quad (6)$$

式中: $VP_t$ 表示千人拥有的车辆数量; $\gamma$ 表示千人车辆拥有率的饱和水平; $G_t$ 表示人均GDP; $DEV_t$ 表示电动汽车的需求量; $PO_t$ 表示人口规模; $S_t$ 代表电气化率。

电动汽车技术和电池技术会影响锂资源的需求量。为了进一步预测2023—2050年新能源技术的锂资源需求,本文采用Cao等<sup>[37]</sup>的方法,利用S形曲线预测未来的不同种类电动汽车的需求量,并根据董雪松<sup>[30]</sup>的方法计算两类电动汽车的需求量:

$$ET_t = \frac{ET_{\max}}{1 + \left(\frac{ET_j}{ET_0} - 1\right) \cdot e^{m(t - t_0)}} \quad (7)$$

$$SVBEV_t = DEV_t \cdot ET_t \quad (8)$$

$$SVPHEV_i = DEV_i \cdot (1 - ET_i) \quad (9)$$

式中： $ET_i$ 表示不同电动汽车技术*i*的渗透率； $ET_{\max}$ 表示2050年最大值； $ET_j$ 和 $ET_0$ 分别表示 $ET_i$ 的期末最大值和期初值，其比值用于计算自然底数e的系数； $m$ 表示 $ET_i$ 的增长率参数； $SVBEV_i$ 和 $SVPHEV_i$ 代表BEV和PHEV的需求量。

(5)储能装置制造企业。储能装置制造企业对新增储能装置需求量的预测将直接影响锂资源的需求。本文基于中关村储能产业技术联盟的历史数据预测储能装置容量，未来目标值来源于电力系统脱碳新动能—电化学储能技术创新趋势报告，且储能装置容量增长符合S形曲线模型。具体的预测公式如下：

$$DES_i = \frac{DES_{\max}}{1 + \left(\frac{DES_j}{DES_0} - 1\right) \cdot e^{n(t-t_0)}} \quad (10)$$

式中： $DES_i$ 表示储能装置总需求； $DES_{\max}$ 表示2050年的最大值； $DES_j$ 和 $DES_0$ 分别表示 $DES_i$ 的期末最大值和期初值，其比值用于计算自然底数e的系数； $n$ 表示 $DES_i$ 的增长率参数。

### 2.3.2 主体交互

主体交互是主体的属性和目标等与外部环境相互作用的结果，反映了主体决策的适应性。主体通过将自身属性、可用资源和其他主体进行交互，选择行为策略。具体的交互规则如下。

(1)供给调整。根据Cao等<sup>[37]</sup>给出的公式和Shao等<sup>[38]</sup>设定的锂资源价格，构造各开采企业锂生产成本 $Cost_{i,t}$ ：

$$Cost_{i,t} = aq_{i,t}^2 + (1000 - 20a)q_{i,t} + 10000 \quad (11)$$

式中： $q_{i,t}$ 表示原生开采企业*i*在*t*年的产量； $a$ 表示锂初级生产成本的参数；常数10000表示初始设定的锂价格。

锂的价格受到供需和成本的影响，能够灵敏地反映并调整锂产业内各个主体之间的运作情况。例如，随着锂需求的增长，价格上升激励了产量增加，以减少供给缺口。反之，面对锂供应过剩的局面，灵活的价格系统可以通过降低价格或促进替代品的使用来调整产能，以达到供需平衡的目的，根据Shao等<sup>[38]</sup>的方法，可以计算锂的价格 $P_i$ ：

$$P_i = P_{i-1} \cdot ECP_i \cdot ERP_i \quad (12)$$

$$ECP_i = 1 + SCP \cdot \left(\frac{\overline{Cost}_{i-1}}{P_{i-1}} - 1\right) \quad (13)$$

$$ERP_i = \left(\frac{1}{R_i}\right)^{SPR} \quad (14)$$

式中： $ECP_i$ 表示成本对锂价格的影响； $ERP_i$ 表示锂产需比对锂价格的影响； $\overline{Cost}_{i-1}$ 表示上一期所有原生开采企业的成本均值； $SCP$ 是价格对成本的敏感度； $SPR$ 代表价格对供需比例的敏感度； $R_i$ 表示锂的供需比。产量的决策如下：

$$q_{i,t} = \begin{cases} q_{i,t-1} \cdot (1 + GDP) \cdot \frac{1+d}{Eco} & P_i \geq Cost_{i,t} \\ q_{i,t} - q_{i,t} \cdot Con & P_i < Cost_{i,t} \end{cases} \quad (15)$$

$$K_t = \sum_i^n q_{i,t} \quad (16)$$

式中： $GDP$ 表示GDP增长率； $d$ 代表锂矿的开采效率常数； $Con$ 表示开采企业产量收缩率参数； $Eco$ 表示供需比对其他经济因素的参数； $K_t$ 表示锂开采企业的产量总和。

综上所述，可以得出总供给的表达式，总供给 $Q_t$ 由3个部分构成：

$$Q_t = K_t + RLi_t + NIM_t \quad (17)$$

(2)需求预测。计算公式如下：

$$DLi_t = EVLi_t + ESLi_t \quad (18)$$

式中： $DLi_t$ 表示锂资源总需求量； $EVLi_t$ 表示电动汽车行业锂资源需求； $ESLi_t$ 表示储能装置锂资源需求。

## 2.4 情景参数设置

### 2.4.1 社会经济情景参数

本文选取人口和GDP增长率2个变量来描述社会经济情景<sup>[11,12]</sup>，将其作为研究新能源行业关键金属生产的经济背景。GDP增长率在研究期内将维持在5.5%，GDP增速符合《中国经济社会发展的中长期目标、战略与路径》关于未来中国经济增长速度预测。此外，人口增长因素也将被纳入模型，根据联合国经济和社会事务部人口司于2022年预测的中国人口增长率，拟合人口增长函数，研究期间中国人口总量增长约2.5%

### 2.4.2 需求侧情景参数

评估需求侧新能源技术对中国锂资源供需平衡的影响应考虑技术和市场的不确定性。为了减少这些不确定性的影响，本文将未来的需求侧新能源技术分为两大类，沿用曾安琪<sup>[31]</sup>关于电动汽车和储能电池技术情景中的参数设置，并从不同技术情景组合中得到结论。

(1)储能装置技术情景。本文对储能装置装机容量设置基准和乐观情景。不同情景下2023年储能装机容量初始值均为33.80 GWH,截至2050年,基准和乐观情景下的装机容量分别增长至17913.58 GWH和19893.36 GWH。

(2)电动汽车技术情景。根据中国电动汽车的实际发展情况,预计到2050年,电动汽车需求量是50339万辆。本文设定了电动汽车技术情景下的关键变量参数,参数值定为2050年的目标值(表1)。

2.4.3 供给侧情景参数

中国锂资源供给侧主要考虑锂矿石的开采技术、锂产品回收、净进口,锂矿石的采选技术直接影响到中国原生锂的供给,锂资源的循环回收技术影响中国再生锂的供给,锂资源进出口量也会直接影响供需关系(表2)。

(1)采选技术情景。技术进步在矿物加工和盐湖提取领域显著提高了锂资源的提取效率,使得在同等规模和资源投入下能够带来更丰富的锂产出。据此,本文将锂资源的产量作为评估采选技术提升的标准。在不同情景下,设定不同的中国锂资源生产力的增长率:在基准情景中,随着采选技术的改进,生产力以10%的增长率线性增长;而在乐观情景中,考虑到可能的技术突破,锂矿石生产力从2023年起以14%的增长率线性增长至2050年。增长率数值和增长方式均参考曾安琪<sup>[31]</sup>。

(2)循环回收情景。锂资源的循环回收技术主要涉及从废弃的含锂产品(城市矿山)中高效回收锂资源的方法,这包括报废产品的收集率、回收效

率以及锂的提取率。报废回收率等于3个效率相乘,综合反映了这些因素。本文基于Harper等<sup>[39]</sup>和Baars等<sup>[22]</sup>的设定,设计了基准情景与乐观情景下的报废回收率,以反映循环回收技术水平。

(3)进口情景。中国锂产业的发展对进口资源具有一定依赖性,这一特征使锂资源进出口成为供需分析框架中的重要变量。当前国际贸易环境呈现出明显的复杂性特征,地缘政治冲突加剧,各国政策稳定性差异较大,导致进出口发展趋势难以预测。因此,本文以2022年锂资源净进口总量作为研究区间内进口量<sup>[31]</sup>。同时,从锂元素的流动过程可知,通过进口流入国内的锂矿石和卤水中的锂,其锂当量将在原生开采环节被引入模型。为了避免重复计算,将仅计入碳酸盐和碳酸锂、锂的氧化物和氢氧化物两类基础锂产品的净进口总量。

2.5 供需情景组合

依据新能源技术发展情景,构建需求侧的技术变化情景组合D1-D4,基于此可以分析每种技术变动对中国锂资源需求的具体影响,以及这些技术变动叠加后的总体效应(表3)。

基于锂资源采选、循环回收技术和进口的情景设定,本文进一步构建了供给侧情景组合,以分析不同技术发展对中国锂资源供应的潜在影响(表4)。在S1中,采选、循环回收、进口3个供给来源均设置为基准情景。在S2和S3中,分别设置采选技术和循环回收技术的乐观情景。

基于上述设定,组合S1-S3供给情景和D1-D4需求情景,可以得到多种供需组合情景(表5)。

表1 需求侧情景关键变量设置

Table 1 Key variable settings for demand-side scenarios

情景	储能装置技术情景		电动汽车技术情景	
	2050年 装机容量/GWH	汽车电气化率/%	电气化技术份额/(PHEV: BEV)	车辆人均保有量/(辆/千人)
基准情景	17913.58	86	1:9	450
乐观情景	19893.36	96	1:99	500

表2 供给侧情景关键变量设置

Table 2 Key variable settings for supply-side scenarios

情景	采选技术情景	循环回收情景	进口情景
	锂矿生产力增长率/%	报废回收率/%	2022年净进口/t
基准情景	10	63	8714.25
乐观情景	14	76	8714.25

表3 需求侧情景组合设置

Table 3 Combination settings for demand-side technological scenarios

序号	情景名称	情景组合		情景描述
		储能装置技术情景	电动汽车技术情景	
D1	需求侧技术基准情景	基准	基准	新能源技术情景均为基准情景
D2	储能装置技术进步情景	乐观	基准	仅储能装置技术调整为乐观情景
D3	电动汽车技术进步情景	基准	乐观	仅电动汽车技术调整为乐观情景
D4	需求侧技术进步情景	乐观	乐观	新能源技术情景均调整为乐观情景

表4 供给侧情景组合设置

Table 4 Combination settings for supply-side scenarios

情景序号	情景名称	情景组合		
		采选技术情景	循环回收情景	进口情景
S1	供给侧技术基准情景	基准	基准	基准
S2	采选技术进步情景	乐观	基准	基准
S3	循环回收技术进步情景	基准	乐观	基准

表5 供需情景组合设置

Table 5 Combination settings for supply-demand scenarios

组合情景	供给侧情景	需求侧情景
S1-D1	供给侧技术基准情景(S1)	需求侧技术基准情景(D1)
S2-D2	采选技术进步情景(S2)	储能装置技术进步情景(D2)
S2-D3	采选技术进步情景(S2)	电动汽车技术进步情景(D3)
S2-D4	采选技术进步情景(S2)	需求侧技术进步情景(D4)
S3-D2	循环回收技术进步情景(S3)	储能装置技术进步情景(D2)
S3-D3	循环回收技术进步情景(S3)	电动汽车技术进步情景(D3)
S3-D4	循环回收技术进步情景(S3)	需求侧技术进步情景(D4)

### 3 结果与分析

#### 3.1 多主体下锂资源供需变动趋势

(1)原生开采企业。原生锂资源开采企业的产量决策取决于价格与成本的动态关系。在S2与D2-D4的3种情景组合中,原生开采企业的锂供给呈现出剧烈波动的特征(图2)。在2033年之前,3种情景组合下原生锂供给的增长速度较快且增长曲线类似。2033年之后,原生锂供给的增速放缓,同时波动加剧。其中D4情景下的原生锂供给在长期维持较高水平,成为3条供给曲线中唯一在研究区间末期仍维持高位的。

(2)再生回收企业。通过模拟再生回收企业的产量决策,在不同技术进步情景下,再生锂供给则呈现平稳增长趋势。描述3条线将供给端情景固定为S3,观察S3-D2、S3-D3、S3-D4情景组合下再生锂供给的变动趋势,在研究区内,再生锂供给按照S形曲线增长,呈现出平稳增长的特征。不同技术进步展现出了对再生锂供给的差异化拉动作用,具体

体现为D4>D3>D2。表明电动汽车与储能装置共同技术进步对于再生锂增长的贡献最强,单一电动汽车技术进步次之,单一储能装置技术进步最弱。

(3)电动汽车制造部门。电动汽车制造部门的锂需求在2023—2035年快速增长,在2035年以后则呈相对平稳趋势,分析D1-D4情景下电动汽车制造部门的锂需求变化趋势,发现电动汽车制造部门的锂需求增速呈现出逐渐放缓的特征。在度过前6年的缓慢增长后,电动汽车制造部门的锂需求迎来了快速增长阶段。直到2035年之后,增速放缓,需求增长逐渐趋于平稳。不同情景下的增长曲线展现出相似的发展轨迹。

(4)储能装置制造部门。储能装置制造部门的锂需求呈现先上升后下降的趋势,在2038年左右达到峰值。D4情景下储能装置具有最强劲的需求增长,领先优势显著。D3情景紧随其后。D2情景储能装置维持中等需求水平;而作为参照基准的D1情景,其储能装置需求始终处于最低位。

2025年7月

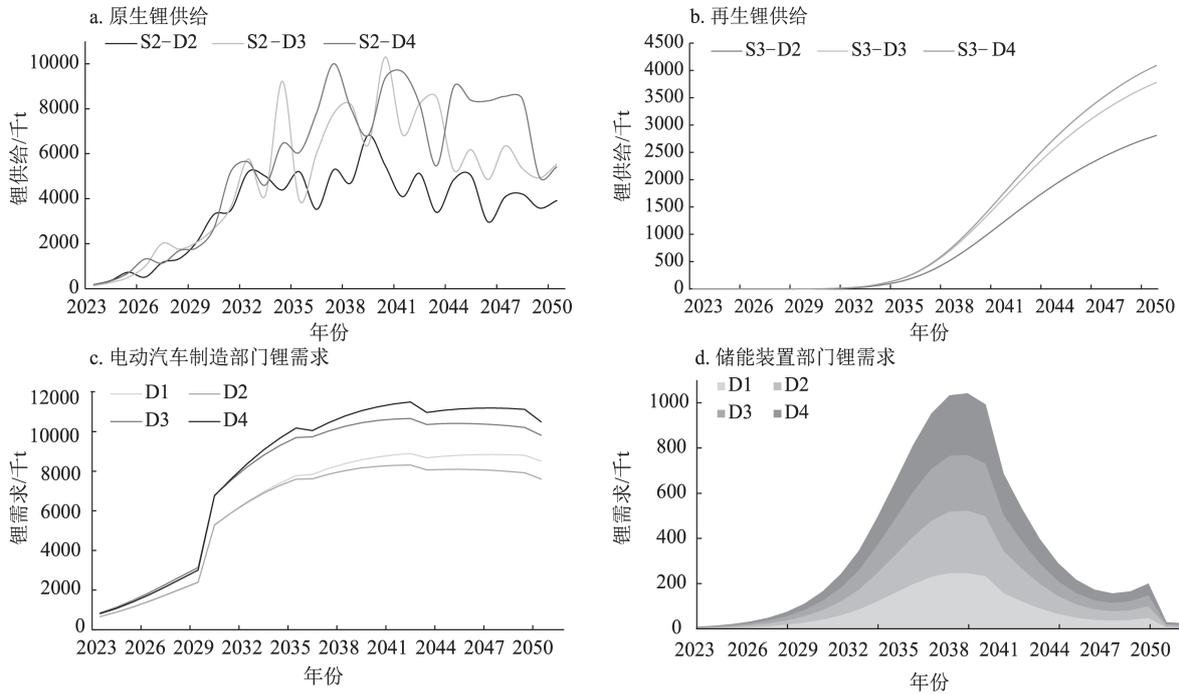


图2 2023—2050年多主体供需变动分析

Figure 2 Multi-entity supply-demand dynamics analysis, 2023-2050

### 3.2 供需情景组合分析

(1) 供需基准情景。在2023—2050年锂资源供需趋势的基准情景中(图3)。锂资源供给增长会在2029年迎来转折点,转而进入爆发式增长状态,增长速度在此之后缓慢下降,直至在2038年之后逐渐达到产量峰值。锂供给增长状况在整个模拟的时间区间内持续落后于需求的增长。这表明,当不考虑供需侧技术进步的前提下,锂资源供需将在研究区间内难以达到平衡状态,会长期保持供小于求的非平衡状态,长期供需失衡不利于锂工业行业发展。

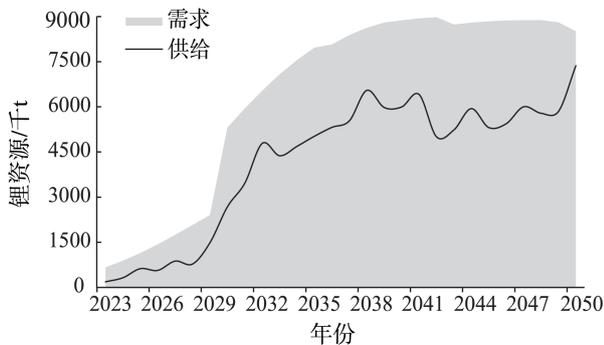


图3 2023—2050年基准情景下锂资源供需情况

Figure 3 Lithium resource supply-demand conditions under baseline scenario, 2023-2050

(2) 采选技术进步情景与需求侧情景组合。该情景组合S2分别与D2、D3、D4组合时锂资源的供需情况(图4)。与基准情景对比,本组情景组合中的锂资源供需情况更加均衡。在S2-D2情景下,需求增长的主要驱动之一是储能装置的技术进步。供给的增长速度前期慢于需求的增速,但在这段时间内,供给总体上能够跟上需求的增长,不会被需求的增长拉开距离。随着时间的推移,到2041年前后,供给增长加速,供求之间的差距快速缩小,最终在2046年供给全面超过需求。这可能预示着在某些时期内可能会出现供应短缺,因此导致了后续供给情况的快速变化。而这种快速变化导致了之后的产能过剩,引起了潜在的供需失衡。所以在S2-D2的最后几年中,供给会自我调整,走向维持在某一水平的供需平衡。相比于S2-D2, S2-D3情景下的供给波动频率更低。由于电动汽车技术进步是驱动需求增长的主要因素,当需求由电动汽车技术进步拉动时,供给反应十分迅速,在前期就体现出更快的增速,在2035年弥合了供求差距并一度导致产能过剩。在2035年之后,锂总供给回落到总需求下,供需差距维持在合理范围内。在S2-D4情景下,储能装置和电动汽车技术进步的共同引发供给

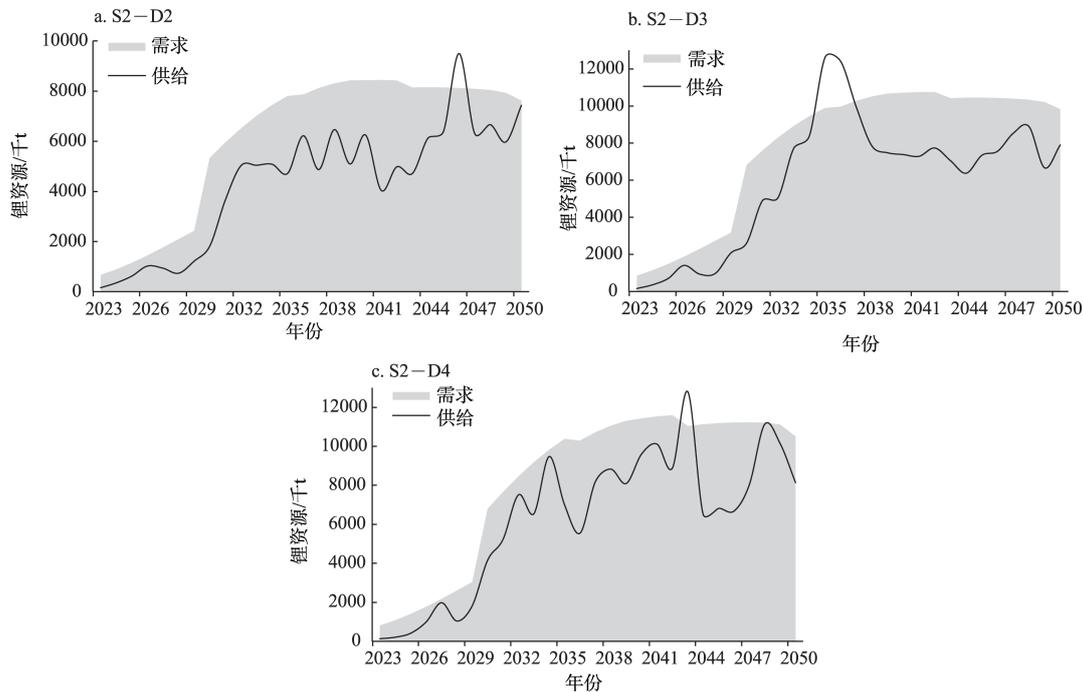


图4 2023—2050年原生开采技术进步情景下锂资源供需平衡分析

Figure 4 Analysis of lithium resource supply-demand balance under primary mining technological progress scenarios, 2023-2050

的快速增长。研究区间内没有出现严重的供求失衡,即使供求偏激均衡也会迅速自我更正。在该情景下,供给和需求保持在相近水平,并因为市场情况和外界突发事件随机波动,该情景是采选技术进步供给情境下锂资源供需平衡状况最佳的一组。

(3)循环回收技术进步情景与需求侧情景组合。S3-需求侧情景组合与S2-需求侧情景组合的供需演变趋势有较大区别(图5)。在S3-D2中,增长相比其他情景比较缓慢,并且在达到均衡前就会出现多次波动,这可能是受到市场和投资预期的周期性波动、政策和市场调节、国际政治经济因素等原因的影响,是一种正常的市场现象。且供给在长期整体呈现出不断趋近需求的特征,在2048年达到了供需均衡。S3-D3和S3-D4中也有类似波动,S3-D3中的供求演化趋势和S2-D3比较相似,均为快速增长达到供需一致后,供给转而出现在小幅度波动和下降,研究区间后期供给略低于需求,但供求差距处于可控范围,该情景具备达成供需均衡的前提。相比之下,S3-D4在区间内未曾达到过供需均衡。但整体上供给呈现出了缓慢增长的趋势。这种供求现象的成因包括多种因素,可能与技术进步的局限性、市场和投资失灵、资源分布不均和供应端遭遇瓶颈有关。

### 3.3 敏感性检验

基于仿真模型中选定的5个可变参数,本文进一步验证中国锂资源供需平衡对参数变化的敏感性。这一分析旨在确定对锂资源供应影响较大的关键变量,为未来研究提供明确的方向和支持。我们的模型结构参数包括生产成本系数( $a$ )、价格成本敏感度( $SCP$ )、价格供需敏感度( $SPR$ )、价格-其他经济因素系数( $Eco$ )和产量收缩系数( $Con$ ),基于在基准情景中选定的参数值,将这些参数分别减小5%或扩大10%,重新输入模型,评估截至2050年时锂需求总量的变化幅度(图6)。

模型输出结果与结构参数的变化呈现非线性关系,这一特征源于多重复杂因素。首先,采用的多主体物质流模型本身具有非线性属性,决定了输入与输出之间的非线性映射关系。其次,模型包含多个阶段,各阶段具有独特的动态特性:参数变化可能产生差异化的阶段效应,包括延迟效应、阈值效应以及参数间的交互作用——单一参数的改变可能引发连锁反应,影响其他参数乃至主体行为。这些机制共同导致了锂需求的非线性变化特征。

此外,由敏感性分析结果可得,在同等的参数改变中, $SPR$ 是引起锂需求变动最剧烈的参数。当 $SPR$ 提升10%时,锂总需求增加了54%,表明锂需求

2025年7月

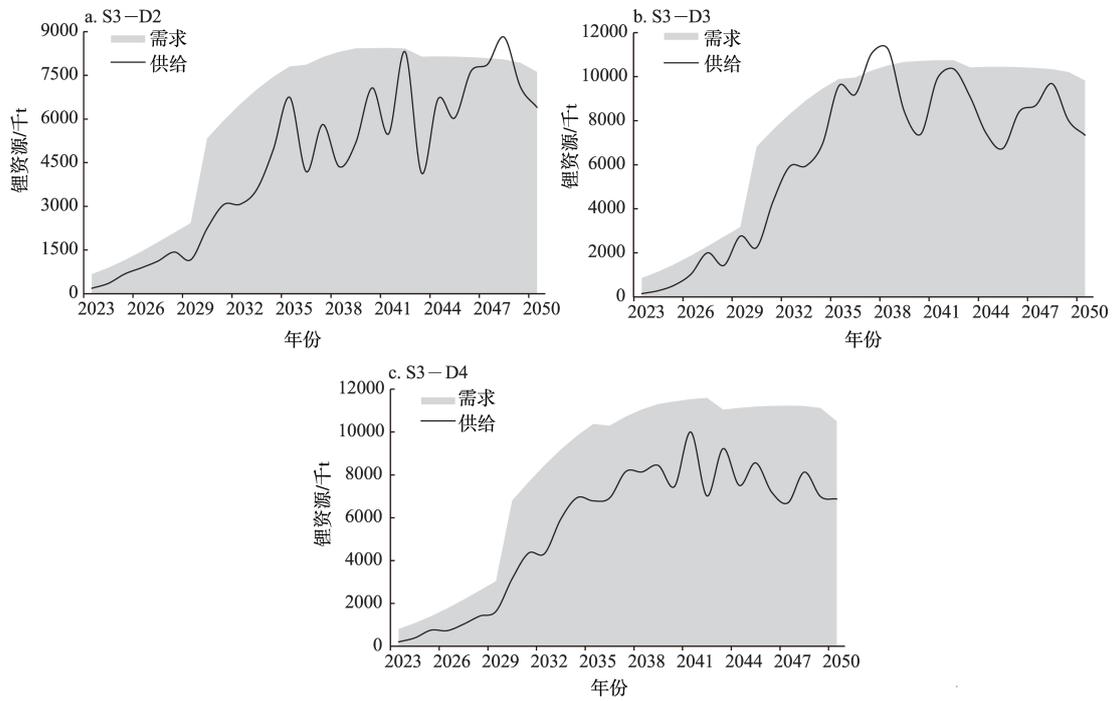


图5 2023—2050年循环回收技术进步情景下锂资源供需平衡分析

Figure 5 Analysis of lithium resource supply-demand balance under recycling technological progress scenarios, 2023-2050

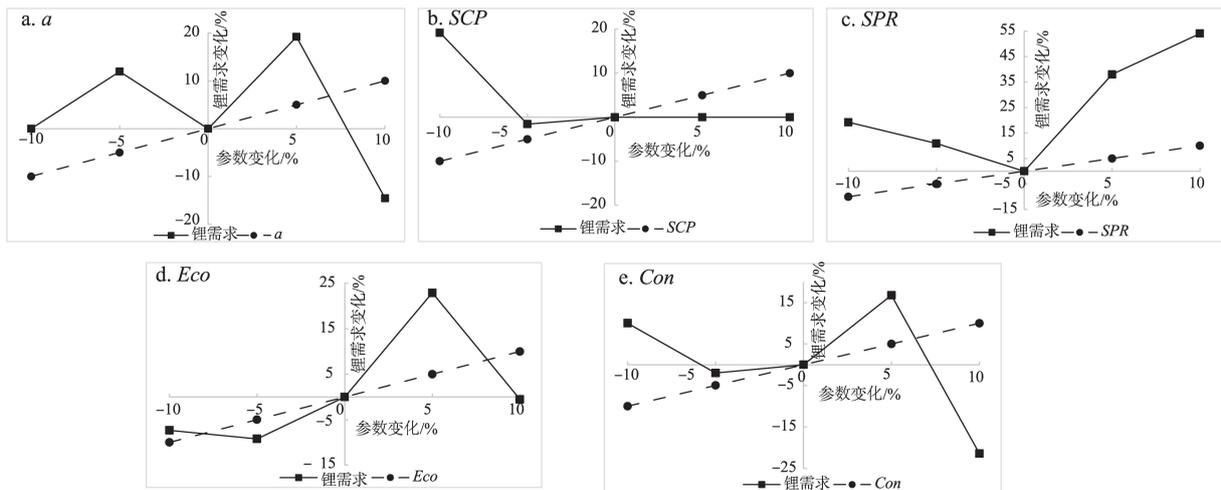


图6 敏感性分析

Figure 6 Sensitivity analysis

对于价格供需最为敏感。同时,锂需求对于价格成本参数最不敏感,在SCP从降低5%到增加10%的范围内,锂需求的变动幅度都比较微小。

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

本文基于多主体视角,设计原生开采企业、再生回收企业、进口部门、电动汽车制造部门、储能装置制造部门5个主体,以锂为例,构建2023—2050

年间新能源行业关键金属供需平衡动态仿真模型,并借助情景分析,针对性设计不同技术进步情景,全面评估不同供需组合情景下中国新能源行业关键金属供需平衡动态演化趋势,以反映能源转型对新能源行业关键金属供需平衡的潜在影响。主要结论如下:

(1)在不同技术进步情景下,通过模拟原生开采企业与再生回收企业的产量决策发现,原生锂供

给呈现剧烈波动态势,而再生锂供给则呈现平稳增长趋势;电动汽车制造部门的锂需求在2023—2035年快速增长,在2035年以后则呈平稳趋势,而储能装置部门的锂需求呈现先上升后下降趋势,在2038年达到峰值。

(2)在供给侧开采技术进步背景下,锂需求的增长速度经历S形变化,早期锂供给会低于锂需求,后期随着技术进步和产能扩张逐渐加速并反超。在长期,锂需求渐趋平稳,而锂供给则会逐渐趋近平稳状态。

(3)在供给侧循环回收技术进步情景下,早期锂供给增速相对平缓,后期受市场因素影响,锂供给波动性较大,但整体向锂需求水平逐步趋近,这一趋势为在长期实现锂资源供需平衡提供了乐观预期。但在S2-D4情景下,锂资源一直未能实现供需平衡。

#### 4.2 政策建议

通过前文结果,不同技术进步情景下锂资源供需平衡具有差异性。供需侧技术进步可以缓解锂资源供需紧张的问题,但是也存在相互抵消,甚至扩大供需不平衡的问题。因此,不能盲目采取技术组合,需要根据新能源行业发展和技术进步状况酌情制定相关政策,以充分实现新能源行业关键金属供需平衡。具体建议如下:

(1)加强全产业链技术创新,缓解长期供需矛盾。基于中国未来发展新能源产业的迫切需求和不同供给侧技术进步背景,从本质上解决该问题的关键是加强技术创新,提高资源利用效率。要加强全产业链技术创新,对新能源行业关键金属不同环节的关键技术进行攻关,对“关键金属-关键技术-关键材料”进行一体化考量,积极布局前沿技术,进一步推动关键金属开采、循环回收技术实现突破,实现资源的可持续利用。

(2)供需主体协同,统筹原生与再生金属开发利用。根据研究结论,供需主体以及外部社会经济因素共同影响着新能源行业关键金属的供需平衡态势。供给主体要统筹原生与再生金属开发利用,进一步加大国内新能源行业关键金属勘探开发力度,同时加强“城市矿产”利用,提高资源回收利用率,从而提高自主保障能力,降低供应风险。需求主体应准确把握新能源产业发展规律,及时捕捉新

能源技术前沿发展方向,从而准确研判新能源行业关键金属需求趋势,进一步提高资源利用效率,最终通过供需协同,实现新能源行业关键金属供需平衡。

#### 参考文献(References):

- [1] 连旭,裴童心,汪文生,等. 碳交易机制与技术应用对中国煤电行业碳减排的影响: 基于强化学习的多智能体仿真[J]. 资源科学, 2024, 46(6): 1186-1197. [Lian X, Pei T X, Wang W S, et al. The impact of carbon trading mechanism and technology application on carbon emission reduction in China's coal-fired power industry: Multi-agent simulation based on reinforcement learning[J]. Resources Science, 2024, 46(6): 1186-1197.]
- [2] Calderon J L, Smith N M, Bazilian M D, et al. Critical mineral demand estimates for low-carbon technologies: What do they tell us and how can they evolve?[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113938.
- [3] Harprecht C, Xicotencatl B M, van Nielen S, et al. Future environmental impacts of metals: A systematic review of impact trends, modelling approaches, and challenges[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107572.
- [4] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions[EB/OL]. (2021-05-05) [2025-06-20]. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [5] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition [J]. Applied Energy, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113612.
- [6] Maisel F, Neef C, Marscheider-Weidemann F, et al. A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106920.
- [7] Müller D, Groves D I, Santosh M, et al. Critical metals: Their applications with emphasis on the clean energy transition[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2025, DOI: 10.1016/j.geogeo.2024.100310.
- [8] Considine J, Galkin P, Hatipoglu E, et al. The effects of a shock to critical minerals prices on the world oil price and inflation[J]. Energy Economics, 2023, DOI: 10.1016/j.eneco.2023.106934.
- [9] Zhang S G, He X F, Ding Y J, et al. Supply and demand of platinum group metals and strategies for sustainable management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, DOI: 10.1016/j.rser.2024.114821.
- [10] Debroy T, Elmer J W. Metals beyond tomorrow: Balancing supply, demand, sustainability, substitution, and innovations[J]. Materials Today, 2024, 80: 737-757.
- [11] Fishman T, Schandl H, Tanikawa H. The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures[J]. Ecological Economics, 2015, 113: 76-84.

2025年7月

- [12] Steinberger J K, Krausmann F, Eisenmenger N. Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1148–1158.
- [13] Rasul K, Hertwich E G. Decomposition analysis of the carbon footprint of primary metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(19): 7391–7400.
- [14] Yang J Y, Liu Y Q, Xu S T, et al. China's unpeaked metal footprint is on the rise in an inverted "N" curve[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107592.
- [15] Fu R, Peng K, Wang P, et al. Tracing metal footprints via global renewable power value chains[J]. *Nature Communications*, 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-39356-x.
- [16] Mishchuk H, Tryhuba V. From energy intensity to sustainability: An analysis of trends in the aluminium industry[J]. *Journal of Management*, 2024, 40(2): 51–56.
- [17] Torrubia J, Valero A, Valero A. Energy and carbon footprint of metals through physical allocation. Implications for energy transition[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107281.
- [18] Dong X S, Huang J B, Chen J Y. Driving factors and key paths of metal consumption in China: Evidence from structural decomposition and structural path analysis[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2025, 27(4): 9357–9377.
- [19] Kinas S, Jermakowicz-Bartkowiak D, Pohl P, et al. On the path of recovering platinum-group metals and rhenium: A review on the recent advances in secondary-source and waste materials processing [J]. *Hydrometallurgy*, 2024, DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106222.
- [20] 安紫瑶, 闫晶晶, 安海忠, 等. 中国新能源汽车中铜资源循环利用策略有效性评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2440–2455. [An Z Y, Yan J J, An H Z, et al. Effectiveness evaluation of copper resource recycling strategies for China's new energy vehicles[J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2440–2455.]
- [21] Hao H, Geng Y, Tate J E, et al. Securing platinum-group metals for transport low-carbon transition[J]. *One Earth*, 2019, 1(1): 117–125.
- [22] Baars J, Domenech T, Bleischwitz R, et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 71–79.
- [23] 谭雪萍, 耿涌, 肖诗荳, 等. 2011–2020年中国镧资源动态物质流分析[J]. *资源科学*, 2023, 45(2): 344–360. [Tan X P, Geng Y, Xiao S J, et al. Dynamic material flow analysis of lutetium resources in China during 2011–2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(2): 344–360.]
- [24] Riddle M, Macal C M, Conzelmann G, et al. Global critical materials markets: An agent-based modeling approach[J]. *Resources Policy*, 2015, 45: 307–321.
- [25] Riddle M E, Tataru E, Olson C, et al. Agent-based modeling of supply disruptions in the global rare earths market[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.100042.
- [26] Knoeri C, Wäger P A, Stamp A, et al. Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand- With material flow supply modelling approaches[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 808–812.
- [27] 陈丽强, 高明, 梁开荣. 多主体视角下“城市矿产”开发利用决策模型及动态仿真分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(1): 224–240. [Chen L Q, Gao M, Liang K R. Decision-making model and dynamic simulation analysis of the development and utilization of “urban mining” from a multi-agent perspective[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2022, 42(1): 224–240.]
- [28] Hao H, Liu Z W, Zhao F Q, et al. Material flow analysis of lithium in China[J]. *Resources Policy*, 2017, 51: 100–106.
- [29] Bae H T, Kim Y S. Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: A review[J]. *Materials Advances*, 2021, 2 (10): 3234–3250.
- [30] 董雪松. 中国新能源汽车行业关键金属需求预测与可持续供应保障研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023. [Dong X S. Research on the Demand Forecast and Sustainable Supply Guarantee of Critical Metals in China's Electric Vehicle Industry[D]. Changsha: Central South University, 2023.]
- [31] 曾安琪. 新技术革命背景下中国钴资源需求预测及供需平衡研究[D]. 长沙: 中南大学, 2021. [Zeng A Q. Research on Cobalt Demand Forecasting and Supply Demand Balance of China Under the Influence of New Technological Revolution[D]. Changsha: Central South University, 2021.]
- [32] Sun X, Hao H, Zhao F Q, et al. Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 124: 50–61.
- [33] Zhou N, Wu Q S, Hu X P, et al. Synthesized indicator for evaluating security of strategic minerals in China: A case study of lithium[J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101915.
- [34] Habib K, Hansdóttir S T, Habib H. Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104603.
- [35] Zhang H Y, Liu G W, Li J W, et al. Modeling the impact of nickel recycling from batteries on nickel demand during vehicle electrification in China from 2010 to 2050[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159964.
- [36] Lu Y, Peng T D, Zhu L J, et al. China's road transport decarbonization pathways and critical battery mineral demand under carbon neutrality[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.trd.2023.103927.
- [37] Cao J J, Choi C H, Zhao F. Agent-based modeling for by-product metal supply: A case study on Indium[J]. *Sustainability*, 2021, 13 (14): 7881–7881.
- [38] Shao L G, Jin S Z. Resilience assessment of the lithium supply

chain in China under impact of new energy vehicles and supply interruption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119624.

[39] Harper E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the metal of the goblins: Cobalt's cycle of use[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1079–1086.

## Dynamic simulation of supply and demand balance of critical metals in new energy industry from a multi-entity perspective: Taking lithium as an example

CHEN Jinyu<sup>1,2</sup>, LIU Junqi<sup>1</sup>, LUO Qian<sup>1,3</sup>, REN Xiaohang<sup>1</sup>

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract: [Objective]** Critical metals serve as important raw materials for energy transition. The rapid development of the new energy industry has led to substantial growth in the demand for critical metals, posing severe challenges to their supply-demand balance. Therefore, investigating how to achieve supply-demand balance of critical metals in China's new energy industry under future energy transition has become a pressing issue to be addressed. **[Methods]** Based on a multi-entity perspective and taking lithium as an example, this study employed a scenario analysis approach to construct a dynamic simulation model for supply-demand balance of new energy metals from 2023 to 2050. **[Results]** (1) Under different technological progress scenarios, simulation of production decisions by primary mining enterprises and recycling enterprises revealed that primary lithium supply showed drastic fluctuations, while recycled lithium supply demonstrated a stable growth trend. Lithium demand from the electric vehicle manufacturing sector grew rapidly from 2023 to 2035 and then stabilized after 2035. For the energy storage device sector, lithium demand reached its peak around 2038. (2) Under supply-side mining technological progress scenarios, the growth of lithium demand followed an S-shaped trend. In the early stage, lithium supply capacity was lower than demand, but with technological progress and production capacity expansion in later stages, supply eventually exceeded demand. (3) Under supply-side recycling technological progress scenarios, the early-stage growth of lithium supply remained relatively moderate, while lithium supply in the later stage gradually approached the lithium demand levels amid fluctuations. **[Conclusion]** Without relying on technological progress, China's new energy industry cannot achieve critical metal supply-demand balance in the future. It is necessary to adopt targeted technological progress pathways such as mining and recycling combined with the characteristics of the new energy industry, while strengthening coordination between supply and demand entities, and coordinating the development and utilization of primary and secondary metals to alleviate long-term supply-demand conflicts.

**Key words:** multi-entity perspective; energy transition; critical metals in new energy industry; supply-demand balance; primary mining technological progress; recycling technological progress