



栗洋,刘妍慧.中国新能源汽车动力电池关键矿产资源回收潜力评估[J].中国人口·资源与环境,2025,35(11):161-173.[LI Y,LIU Y H.Critical mineral resource recycling potential from new energy vehicle power batteries in China[J].China population,resources and environment,2025,35(11):161-173.]

# 中国新能源汽车动力电池关键矿产资源回收潜力评估

栗洋,刘妍慧

(中南财经政法大学工商管理学院,湖北武汉430073)

**摘要** 退役动力电池的高效回收与梯次利用是实现新能源汽车产业链绿色低碳转型的关键一环,也是缓解关键矿产资源供需矛盾、构建资源闭环管理体系的重要基础。该研究基于新能源汽车消费由“政策驱动”向“市场驱动”的转型趋势,构建资源需求与回收潜力的预测模型,测算不同情景下锂、镍、钴资源的需求与回收潜力,并综合评估多路径处理方案的环境与经济效益。研究结果表明:2035年中国新能源汽车销量将达2750.18万辆,引发动力电池大规模退役。①基准情景下,2035年动力电池回收可实现梯次利用电能潜力1287.75GW·h,经济效益6.70亿元,锂、镍、钴的回收潜力分别达到14.67、56.59、23.32万t,与此对应的资源回收的经济价值将分别为942.30、759.22、471.83亿元。磷酸铁锂电池(Lithium Iron Phosphate battery, LFP)的广泛应用虽增强了梯次利用潜力,但其不含镍钴,在关键矿产资源回收方面贡献有限。②空间布局方面,动力电池退役量与回收网点分布明显不匹配,亟须优化回收网点布局。针对上述问题,该研究提出以下政策建议:首先,应完善生产者责任体系和建立完善的数据追踪与共享平台,以保障电池全生命周期的科学管理;其次,推动基于电池健康状态的分类分流,实现梯次利用与再生利用环节的高效衔接;再次,加强关键技术攻关与跨部门协同,促进回收技术与产业创新升级;最后,完善经济激励和政策支持体系,促进资源回收产业的规范化、规模化发展。研究成果可为动力电池资源循环利用政策的优化和实施提供科学依据和战略参考。

**关键词** 新能源汽车;动力电池;关键矿产;梯次利用;回收潜力

中图分类号 X705 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2025)11-0161-13 DOI:10.12062/cpre.20250620

新能源汽车产业是发展新质生产力的重要引擎,也是培育新质生产力的重要抓手<sup>[1-2]</sup>。动力电池作为新能源汽车的“心脏”,是驱动整车动力输出的核心,更是决定车辆续航能力、能源利用效率和环境友好性的关键因素<sup>[3-4]</sup>。随着新能源汽车市场快速发展,动力电池生产所需的锂、镍、钴等关键矿产资源的供应风险逐渐显现<sup>[5-6]</sup>,提升二次资源开发利用水平尤为迫切<sup>[7]</sup>。随着新能源汽车动力电池报废潮来临,大量退役动力电池流向灰色产业链,造成极大的资源浪费、环境污染及安全隐患。中国政府高度重视动力电池的回收利用,《“十四五”循环经济发展规划》将其列为“重点工程与行动”,相关政策体系已初步成形。2024年4月生态环境部发布的《固体废物分类与代码目录》将废旧锂电池纳入固体废物管理体系,标志着废旧动力电池回收政策进一步规范化与精细化<sup>[8]</sup>。2024年10月18日,中国资源循环集团有限公司作为国内首家专注于资源循环利用的中央企业成立,并通过市场化重组和资源整,优化国资布局,提高资源配置效率,

并以央企优势引领行业规范发展,助推资源循环利用产业的转型升级<sup>[9]</sup>。退役动力电池回收利用是新能源汽车产业高质量发展的重要环节<sup>[10-12]</sup>,评估退役动力电池关键矿产资源回收潜力是对其进行有效管理的基础。

## 1 文献综述

与传统汽车不同,新能源汽车采用的动力电池依赖于关键矿产资源,如锂、镍和钴<sup>[13]</sup>等。近年来,新能源汽车产业的快速发展引发关键矿产资源需求迅速增长,产业界及学界开始关注关键矿产资源的供需平衡与回收利用问题。在关键矿产资源需求影响因素方面,学者通常将新能源汽车的需求预测作为关键矿产资源需求预测的基础。新能源汽车的市场发展受国家政策、技术进步等多重因素的综合影响,其市场规模的扩张存在多种可能性,使得关键矿产资源的需求具有较高的不确定性。一些学者基于动力电池技术发展趋势<sup>[14-16]</sup>,以及退役动力电池回收率<sup>[17]</sup>预测新能源动力电池未来需求,进而预测

收稿日期:2024-12-18 修回日期:2025-06-18

作者简介:栗洋,博士,副教授,主要研究方向为资源环境管理、循环经济。E-mail:liyong@zuel.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年项目“基于生产者责任延伸制度的汽车产业绿色发展研究:国际经验与中国策略”(批准号:71804195);教育部人文社会科学研究青年基金项目“价值共创视角下再生资源产业高质量发展的驱动机制及路径优化研究”(批准号:22YJC790068)。

未来关键矿产资源需求变化。也有部分学者聚焦新能源汽车相关政策目标设定对新能源汽车销量的影响<sup>[18-20]</sup>, 以此预测未来关键矿产资源需求变化。

在关键矿产资源需求预测方面, 早期研究集中在锂资源需求预测上, 当前逐步扩展到钴、镍、锰、稀土元素等其他关键矿产资源<sup>[21-22]</sup>, 研究范围涵盖地方、国家及全球<sup>[23-25]</sup>。例如, Habib等<sup>[26]</sup>预测2050年全球新能源乘用车面临关键矿产资源短缺风险。Shafique等<sup>[24]</sup>比较了中美两国对镍、锂、铜、钴等关键矿产资源需求量。Ozawa等<sup>[27]</sup>预测日本2050年钴的需求量将会是2020年的20倍以上, 供应不足将会限制新能源汽车的发展。Qiao等<sup>[28]</sup>指出2060年中国钴总需求快速增长将导致钴材料供应风险。因此, 鉴于关键矿产资源需求的快速增长, 越来越多的学者开始关注资源回收与循环利用的相关研究。

在关键矿产资源回收方面, 当前研究集中在回收潜力预测和技术进步方面。首先, 在回收潜力预测方面, 许多学者对锂、钴、镍等关键矿产资源进行了回收潜力分析, 同样研究尺度涵盖全球、地方及国家。例如, Maisel等<sup>[29]</sup>指出在全球范围内2040年锂和镍的回收潜力将超过需求的一半, 钴的回收潜力将超过2040年的原材料需求。Bruno等<sup>[30]</sup>预测了欧盟电动汽车中关键矿产资源回收材料比例, 预计2030年可回收530 t钴和486 t镍。Hu等<sup>[31]</sup>指出2060年动力电池循环利用可以为电动汽车供应18%~30%的锂和20%~41%的钴、镍和锰。其次, 在回收技术方面, 除了关键矿产资源再生利用技术之外, 梯次利用技术也逐渐发展, 目前研究主要涉及技术可行性分析<sup>[32-33]</sup>和环境经济效益评估<sup>[34]</sup>。

综上所述, 现有研究主要聚焦于新能源汽车动力电池关键矿产资源需求预测与回收潜力评估, 未来动力电池消费变化及回收利用技术的发展对动力电池回收潜力的影响尚需深入探讨。本研究探讨新能源汽车消费从“政策驱动”向“市场驱动”转变过程中不同情景下锂、镍、钴等动力电池关键矿产资源需求的变化, 评估梯次利用与再生利用两种处理路径下动力电池回收的环境效益及经济效益, 为构建耦合共生的绿色高效化动力电池综合利用产业体系提供参考。

## 2 研究方法

### 2.1 新能源汽车销量预测模型

新能源汽车销量预测常用的经典模型有灰色预测模型<sup>[35]</sup>、Bass模型<sup>[36]</sup>及时间序列模型<sup>[37]</sup>等, 近年来BP神经网络<sup>[38]</sup>、LSTM模型<sup>[39]</sup>等机器学习方法也逐渐被用于汽车销量预测。本研究将就经典模型及机器学习预测结果进行对比, 以验证不同方法在预测精度和趋势刻画方面的

差异, 从而提高销量预测结果的可靠性, 为后续评估动力电池回收潜力奠定基础。

#### 2.1.1 经典模型: 时间序列模型

本研究首先采用时间序列模型预测中国新能源汽车销量。时间序列模型主要包括自回归模型 (autoregressive model, AR)、移动平均模型 (moving average model, MA)、自回归移动平均模型 (autoregressive moving average model, ARMA) 和自回归整合移动平均模型 (autoregressive integrated moving average, ARIMA)。当前ARIMA模型在新能源汽车销量、能源消费及交通出行等领域被广泛应用, 尤其在数据受限或需要构建基线趋势预测的情境下具有参考价值<sup>[40]</sup>。此外, 随着新能源汽车市场从“政策驱动”转向“市场驱动”, 历史销量数据已逐步内化了前期政策的影响, 从而提高了ARIMA模型基于历史趋势对当前阶段预测的有效性<sup>[41]</sup>。

ARIMA模型通过差分运算将非平稳时间序列转换为平稳序列, 然后对平稳序列进行建模和预测, 具体计算公式如下:

$$S(t) = c + \sum_{\varphi=1}^p \phi_{\varphi} S(t - \varphi) + \sum_{\omega=1}^q \theta_{\omega} \varepsilon_{t-\omega} + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中:  $t$  为当前预测的年份;  $p$  为自回归 (AR) 项的阶数;  $q$  为移动平均 (MA) 项的阶数;  $S(t)$  为时间序列在  $t$  年的值, 在本研究中指在  $t$  年的新能源汽车销量;  $c$  为常数项;  $\phi_{\varphi}$  为第  $\varphi$  阶自回归系数, 反映销量对过去  $\varphi$  期销量的依赖程度;  $\theta_{\omega}$  为第  $\omega$  阶移动平均系数, 反映销量对过去  $\omega$  期误差项的修正程度;  $\varepsilon_t$  为时间  $t$  的随机扰动项, 服从零均值的白噪声过程;  $\varepsilon_{t-\omega}$  为第  $\omega$  期前的随机扰动项。

#### 2.1.2 机器学习: LSTM模型

LSTM (long short-term memory, LSTM) 是一种改进的循环神经网络, 适用于序列数据的建模和预测。LSTM通过引入遗忘门、输入门和输出门, 有效解决了传统RNN在序列数据处理中出现的梯度消失问题。目前LSTM模型已广泛地应用在故障预测、需求预测等领域<sup>[39]</sup>。新能源汽车的销量受多种因素影响, 且其变化呈现非线性和不规则波动。LSTM模型擅长处理时间序列数据, 可有效拟合这种复杂的动态特征。因此, 本研究使用LSTM模型对新能源汽车销量进行预测, 以便与ARIMA模型的结果进行对比分析, 从而提高销量预测结果的可靠性。LSTM网络主要包括输入门、遗忘门、输出门、单元状态和隐藏状态等。其中, 单元状态是指LSTM单元的内部记忆状态, 而隐藏状态是指外部的隐藏层状态。输入门决定了传递到单元状态的信息量, 遗忘门决定了保留在当前单元状态的信息量, 输出门则决定了从单元状态输出到隐藏状态的信息量。具体公式如下:

$$u_i = \sigma(W_f[h_{i-1}, S(t-1)] + b_f) \quad (2)$$

$$\gamma_i = \sigma(W_y[h_{i-1}, S(t-1)] + b_y) \quad (3)$$

$$o_i = \sigma(W_o[h_{i-1}, S(t-1)] + b_o) \quad (4)$$

$$\widetilde{C}_i = \tanh(W_c[h_{i-1}, S(t-1)] + b_c) \quad (5)$$

$$C_i = u_i \odot C_{i-1} + \gamma_i \odot \widetilde{C}_i \quad (6)$$

$$h_i = o_i \odot \tanh(C_i) \quad (7)$$

$$S(t) = W_y \cdot h_i + b_y \quad (8)$$

式(2)–式(8)中: $S(t-1)$ 为 $t-1$ 年时的新能源汽车销量, $h_i$ 为隐藏状态, $C_i$ 为细胞状态, $u_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $o_i$ 分别为遗忘门、输入门、候选记忆、输出门的门控向量, $W_f$ 、 $W_y$ 、 $W_o$ 、 $W_c$ 分别为遗忘门、输入门、候选记忆、输出门的权重矩阵, $b_f$ 、 $b_y$ 、 $b_o$ 、 $b_c$ 分别为遗忘门、输入门、候选记忆、输出门的偏置向量, $W_y$ 和 $b_y$ 为输出层权重矩阵和偏置向量, $\sigma$ 为sigmoid激活函数, $\tanh$ 为tanh激活函数, $\odot$ 为元素乘法。

## 2.2 新能源汽车报废量预测模型

新能源汽车报废量可采用人口平衡模型结合寿命分布模型进行预测,具体表达式如下<sup>[42]</sup>:

$$E(t) = \sum_{T=1}^{T_{\max}} S(t-T)f(t) \quad t > T \quad (9)$$

式中: $E(t)$ 为新能源汽车在第 $t$ 年的报废量, $T$ 代表车辆进入使用阶段的累积使用时间, $T_{\max}$ 代表车辆最长使用寿命, $S(t-T)$ 代表在 $(t-T)$ 时新能源汽车的销量, $f(t)$ 代表新能源汽车的寿命分布的概率密度函数。

本研究选择Weibull分布预测新能源汽车报废量。Weibull分布具有极高的灵活性,可通过参数设置拟合不同情景下寿命衰减、部件磨损等过程,广泛应用于电子电器及汽车等耐久产品报废量预测<sup>[43]</sup>,其概率密度函数为:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \times (\frac{t}{\alpha})^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\beta$ 为形状参数, $\alpha$ 为尺度参数, $\alpha$ 与 $\beta$ 均大于0, $e$ 为自然常数。

## 2.3 动力电池回收潜力预测模型

选取目前中国新能源汽车主要装配的动力电池作为研究对象,包括磷酸铁锂电池(Lithium Iron Phosphate battery, LFP)、镍钴锰三元电池(Nickel Manganese Cobalt battery, NMC)和镍钴铝三元电池(Nickel Cobalt Aluminum battery, NCA)。其中,镍钴锰三元电池因其高能量密度和长寿命得到广泛使用<sup>[16]</sup>,根据正极材料中不同的镍、锰、钴比例,NMC可进一步分为NMC111、NMC532、NMC622和NMC811<sup>[44]</sup>。因此本研究选择LFP、NCA、NMC111、NMC532、NMC622和NMC811这6种动力电池作为研究对象,其销量预测公式如下:

$$S_i(t) = S(t)g_i(t) \quad (11)$$

式中: $S(t)$ 为全体新能源汽车在第 $t$ 年的销量, $i$ 为动力电池类型, $S_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年的销量, $g_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年的市场份额。

根据当前中国新能源汽车用户消费习惯,设定新能源汽车动力电池退役后,用户会选择购买新车而非更换电池<sup>[45]</sup>,此时动力电池退役量与新能源汽车报废量一致。新能源汽车动力电池退役后有两种处置方式:一种是通过检测的动力电池应用至其他领域,即梯次利用;另一种是通过拆解回收,使其中的关键矿产资源经过技术处理后再次投入使用,即再生利用。

动力电池梯次利用能源潜力是指退役动力电池进入梯次利用阶段的电容量,当新能源汽车动力电池容量低于80%时已不能满足新能源汽车的需求<sup>[46]</sup>,由此退役动力电池进入梯次利用阶段时还余80%的电容量,公式如下:

$$V_i(t) = AN_i(t)K_i(t) \times 80\% \quad (12)$$

式中: $V_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年进入梯次利用时提供的电容量, $N_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年的报废量, $K_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年的梯次利用率, $A$ 为动力电池额定容量。

动力电池梯次利用对应的经济价值的计算公式如下:

$$F(t) = lV_i(t) \quad (13)$$

式中: $F(t)$ 为第 $t$ 年的梯次利用能源潜力的经济价值, $l$ 为工业用电平均电价。

动力电池关键矿产资源回收潜力由直接再生利用得到的资源和经过梯次利用后再进行再生利用得到的资源组成,即

$$R_j(t) = \sum_{i=1}^6 (N_i(t)Z_i(t) + N_i(t)K_i(t)\tau(t))AM_{ij}r_j \quad (14)$$

式中: $j$ 为关键矿产资源的类型, $R_j(t)$ 为第 $j$ 种关键矿产资源在第 $t$ 年的回收潜力, $Z_i(t)$ 为第 $i$ 种动力电池在第 $t$ 年的再生利用率, $\tau(t)$ 为梯次利用后电池报废寿命分布(本研究将使用正态分布进行估算), $M_{ij}$ 为第 $i$ 种动力电池中第 $j$ 种关键矿产资源的使用强度, $r_j$ 为第 $j$ 种关键矿产资源的回收率。

动力电池关键矿产资源回收潜力的经济价值的计算公式如下:

$$D_j(t) = u_j R_j(t) \quad (15)$$

式中: $D_j(t)$ 为第 $j$ 种关键矿产资源在第 $t$ 年回收潜力的经济价值, $u_j$ 为第 $j$ 种关键矿产资源的市场单价。

## 2.4 情景设置及数据来源

为系统评估不同技术路径与政策导向下新能源汽车动力电池对关键矿产资源的需求变化及回收潜力,本研

究构建了组合情景分析框架。该框架围绕两个关键维度设置情景:一是动力电池材料向高镍低钴方向发展的程度,二是退役动力电池梯次利用的实施水平。通过将这两个维度进行交叉组合,共形成9种不同的情景,进而开展对比分析,以揭示未来不同发展路径下的资源需求与回收趋势。

高镍低钴技术发展情景的设置,主要依据国务院办公厅2020年发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》。该规划明确提出,应着力提升动力电池的单位质量能量密度与续航水平,而高镍低钴正被视为实现这一目标的重要技术路径之一。当前动力电池材料构成有高镍低钴发展趋势,主要影响NMC系列电池。本研究设定3种高镍低钴技术发展情景,分别为:S1(高镍低钴低技术水平情景)、S2(高镍低钴中技术水平情景)和S3(高镍低钴高技术水平情景)。在S1情景中,假设未来十年各类电池的市场结构保持稳定,即不同型号NMC系列电池的市场份额不发生变化,作为后续情景对比的参考基础。在S2情景中,政策引导和技术进步推动NMC622与NMC811电池的应用扩展,至2035年其市场份额分别达到20%与70%,而其他类型的NMC电池逐步淡出市场。在S3情景中,假设国家进一步加大对高镍化电池,尤其是NMC811的扶持力度,到2035年NMC622与NMC811电池的合计市场份额达到90%,其余NMC电池基本被淘汰。在S2和S3情景中,假设NMC市场份额将保持线性增长趋势。

退役动力电池梯次利用率的设置,主要参考工业和信息化部在发布的《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件(2024年本)》,其中提出应强化梯次利用,以有效减少资源浪费、延长电池全生命周期,并提升动力电池系统的综合经济性。基于此政策导向及当前梯次利用情况,本研究设置3种梯次利用率情景:E1(低梯次利用率情景)、E2(中梯次利用率情景)、E3(高梯次利用率情景)。在E1、E2、E3三种情景下2035年的梯次利用率分别达到50%、80%和100%,梯次利用率采用线性趋势进行拟合。

本研究通过将高镍低钴技术发展情景(S1、S2、S3)与退役电池梯次利用率情景(E1、E2、E3)进行交叉组合,构建出9种不同情景,并在此基础上分析关键矿产资源在不同路径下的回收潜力,具体结果见表1。

本研究中新能源汽车销量数据来自《中国汽车市场年鉴》(2011—2024年),动力电池电容量、关键矿产资源使用强度及回收率来自文献[21,47],工业用电平均电价来自中国价格信息网<sup>[48]</sup>,关键矿产资源价格来自上海有色网数据(2024年平均价格)<sup>[49]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 中国新能源汽车销量预测

本研究基于2010—2023年中国新能源汽车销量数据,分别采用ARIMA(1,1,0)模型和LSTM模型进行销量预测。尽管LSTM在处理非线性和长依赖时序问题方面具有较强能力,但由于本研究样本规模及时间跨度的限制,ARIMA模型在均方根误差(root mean square error, RMSE)与平均绝对误差(mean absolute error, MAE)两项评价指标上均优于LSTM模型,显示其在本研究中的预测精度更高(表2)。

受政策支持、基础设施完善及技术进步等因素共同驱动,新能源汽车销量呈现出持续性、趋势性较强的时间序列特征。ARIMA模型通过差分处理实现序列平稳化,并利用其线性建模优势,能够有效刻画销量的整体增长趋势,从而实现较为稳健的中长期预测。因此,在本研究设定的多情景动力电池需求预测中,采用ARIMA模型更能准确反映新能源汽车销量的演化趋势。

总体而言,中国新能源汽车市场将呈现持续增长趋势。预计从2024年的1 179.05万辆增长至2035年的2 750.18万辆,增幅达到2.33倍。在S1情景下,各类动力电池销量均将呈现上升趋势,2035年搭载NMC111、NMC523、NMC622、NMC811、NCA、LFP的新能源汽车销量分别增至740.62、215.34、856.13、459.01、150.16、

表1 2035年主要动力电池资源回收预测的9种情景组合

情景	高镍低钴技术发展情景			
	低技术水平情景(S1)	中技术水平情景(S2)	高技术水平情景(S3)	
梯次利用率情景	低度梯次利用率情景(E1)	S1E1 NMC622和NMC811分别占31.13%和16.69% 梯次利用率50%	S2E1 NMC622和NMC811分别占20%和70% 梯次利用率50%	S3E1 NMC占90% 梯次利用率50%
	中度梯次利用率情景(E2)	S1E2 NMC622和NMC811分别占31.13%和16.69% 梯次利用率80%	S2E2 NMC622和NMC811分别占20%和70% 梯次利用率80%	S3E2 NMC占90% 梯次利用率80%
	高度梯次利用率情景(E3)	S1E3 NMC622和NMC811分别占31.13%和16.69% 梯次利用率100%	S2E3 NMC622和NMC811分别占20%和70% 梯次利用率100%	S3E3 NMC占90% 梯次利用率100%



表2 ARIMA模型和LSTM模型销量预测精度对比

模型	均方根误差(RMSE)	平均绝对误差(MAE)
ARIMA模型	79.745	46.503
LSTM模型	2 276.678	2 269.072

244.49万辆。在S2情景下,搭载NMC111和NMC523的新能源汽车销量呈现下降趋势,并逐步退出市场。与S1情景相比,搭载NMC622的新能源汽车销量将减少306.13万辆,而搭载NMC811的新能源汽车销量将显著增加1 466.12万辆,分别达到550.04万辆和1 925.13万辆。在S3情景下,2035年搭载NMC811的新能源汽车将成为市场主导类型,销量高达2 475.16万辆。新能源汽车市场的迅猛发展显著加剧了对锂、镍、钴等关键矿产资源的中长期需求压力。

### 3.2 中国新能源汽车报废量预测

根据财政部等4部门联合发布的《关于2016—2020年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知》规定,新能源汽车生产企业应提供不低于8年或12万km的质保期限<sup>[51]</sup>,本研究设定新能源汽车使用寿命为8年,设定Weibull分布参数 $\alpha$ 为3.50, $\beta$ 为4.47<sup>[43,45]</sup>,搭载不同电池的新能源汽车报废量预测结果见表3。

由表3可知,中国新能源汽车报废量快速增长,2028年将达到1 037.43万辆,2035年将增至2 220.28万辆,相较于2028年增长2.14倍。S1情景下,2035年搭载NMC811、NMC111和NMC622的新能源汽车报废量将分别为370.57、597.92、691.17万辆。在S2情景下,2035年搭载NMC811的新能源汽车报废量可达1 200.31万辆。

搭载NMC111和NMC523的新能源汽车报废量将呈现出先增后减的趋势,其峰值出现在2031年。在S3情景下,2035年搭载NMC811的新能源汽车报废量将达到1 513.43万辆,占总报废量的68.16%。相较于S2情景下的持续增长趋势,搭载NMC622的新能源汽车报废量则将呈现快速下降趋势,至2035年已减少313.11万辆。由此引发的大规模动力电池“退役潮”,将带来巨大的回收处理压力,亟须构建绿色、高效且具备高经济价值的退役动力电池回收管理体系。

### 3.3 动力电池梯次利用的潜在可用电能评估

动力电池梯次利用所能提供的潜在可用电能规模,与梯次利用技术的发展水平密切相关。针对不同退役动力电池梯次利用率情景(E1、E2、E3),本研究分析了可从退役电池中获得的可用电能及其经济效益,具体结果见表4。

在E1情景下,2035年动力电池梯次利用可获得的可用电能预计将达到643.88 GW·h,相应的经济效益为3.35亿元。随着梯次利用率的提升,在E3情景下2035年可用电能预计可提高至1 287.75 GW·h,经济效益增至6.70亿元,较E1情景提高近一倍。结果表明,推进梯次利用技术发展可显著提升退役动力电池的电能再利用价值和经济效益。

### 3.4 动力电池资源回收潜力预测

#### 3.4.1 锂的资源回收潜力预测

锂作为各类动力电池中的核心资源,其回收潜力不容忽视。图1显示了9种情景下动力电池中锂的资源回收潜力与未来需求的对比。

在相同梯次利用技术水平(梯次利用率50%)下,动

表3 2024—2035年3种高镍低钴技术发展情景下搭载不同动力电池的新能源汽车报废量 /万辆

情景	年份	/万辆						
		NMC111	NMC523	NMC622	NMC811	NCA	LFP	其他
S1	2024	54.58	14.33	60.54	30.33	8.71	19.51	6.78
	2030	392.49	114.12	453.71	243.25	79.58	129.57	44.31
	2035	597.92	173.85	691.17	370.57	121.23	197.38	67.50
S2	2024	51.98	13.56	59.47	35.44	8.23	20.60	5.53
	2030	243.02	69.83	392.81	536.66	51.90	145.75	17.49
	2035	175.22	48.60	518.96	1 200.31	42.95	222.03	12.21
S3	2024	51.98	13.56	57.55	37.37	8.23	20.60	5.53
	2030	243.02	69.83	282.09	647.37	51.90	145.75	17.49
	2035	175.22	48.60	205.85	1 513.43	42.95	222.03	12.21

表4 不同梯次利用率情景下退役动力电池可用电能及其经济效益

年份	E1		E2		E3	
	电能/(GW·h)	经济效益/亿元	电能/(GW·h)	经济效益/亿元	电能/(GW·h)	经济效益/亿元
2024	13.39	0.07	19.68	0.10	23.88	0.12
2030	255.62	1.33	401.69	2.09	499.07	2.60
2035	643.88	3.35	1 030.20	5.36	1 287.75	6.70

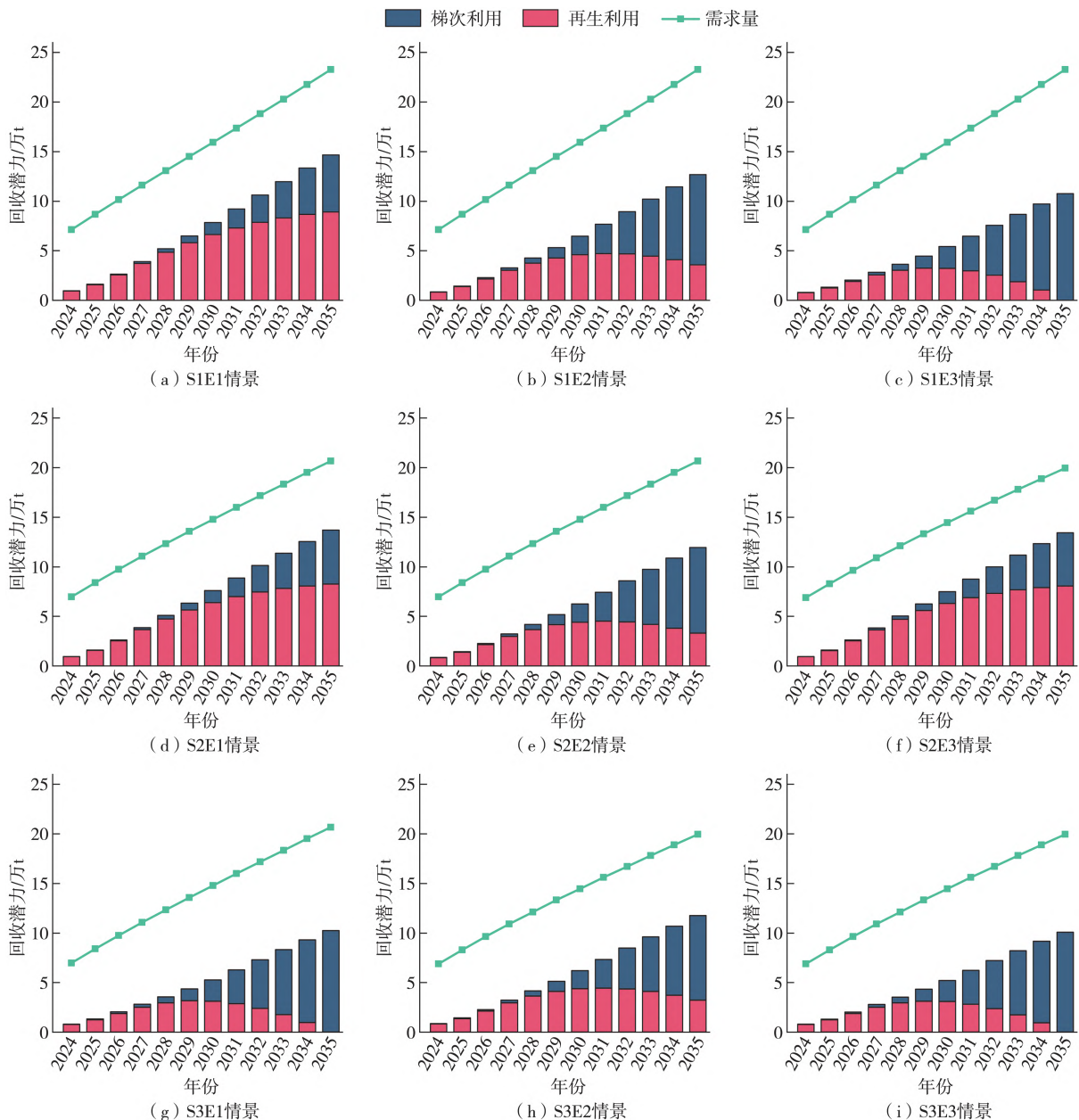


图1 2024—2035年9种情景下锂的回收潜力与未来需求

动力电池市场份额的变化对锂的回收潜力的影响较小。2035年,在S1E1、S2E1、S3E1三种情景下,退役动力电池锂的资源回收潜力将分别为14.67、13.71、13.43万t,分别覆盖动力电池生产对应需求量的63.06%、66.34%、67.33%。由此可见,高镍低钴技术发展将降低未来对锂的需求量,使得在S2E1和S3E1情景下,尽管锂的回收潜力下降,但其满足未来需求的比例却呈现出上升趋势。

### 3.4.2 镍的资源回收潜力预测

受益于新能源汽车动力电池高镍低钴技术发展的影响,镍的需求量将会不断增长,在此背景下讨论动力电池中镍的回收潜力至关重要。

如图2所示,动力电池市场高镍低钴技术发展显著影响了镍的未来需求。在S1E1情景下,2035年动力电池生产所需镍将为87.20万t。随着高镍低钴技术的推进,S2E1和S3E1情景下动力电池生产所需镍将分别增至105.29万t和108.26万t。同时,退役动力电池镍的回收潜力也呈现相应增长。在2035年S1E1情景下,退役动力电池镍的资源回收潜力将为56.59万t,可满足当年需求量的64.68%;在S2E1和S3E1情景下,退役动力电池镍的回收潜力将分别增加至63.86万t和64.97万t,可满足当年需求量的60.54%和60.01%。因此,在推动高镍低钴技术发展的同时,需确保梯次利用与再生利用有效衔接,

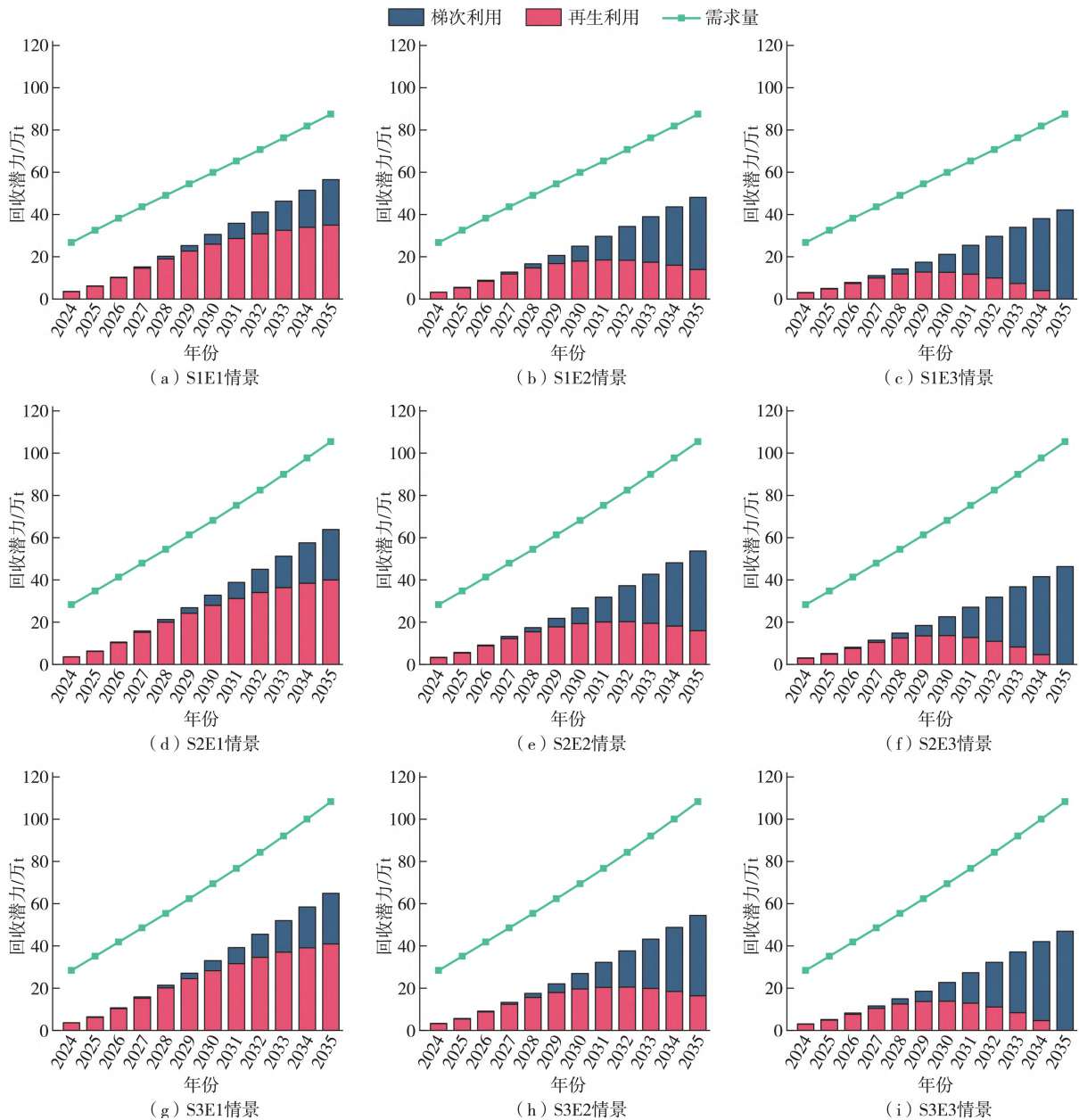


图2 2024—2035年9种情景下镍的回收潜力与未来需求

以缓解资源供需压力。

### 3.4.3 钴的资源回收潜力预测

钴价格波动较大,且高度依赖于进口<sup>[52]</sup>,从退役动力电池中回收钴资源作为二次材料供给,有助于提升新能源汽车供应链韧性。

如图3所示,动力电池市场份额的变化对钴需求量产生了显著影响。在S2E1情景下,动力电池生产中对钴的需求于2034年将达到峰值17.74万t,在S3E1情景下峰值提前至2031年,为14.81万t。随着高镍低钴技术的发展,未来动力电池生产所需钴资源量减少,因此尽管退役动力电池中可回收的钴资源潜力下降,但基本可满足生

产需求。S2E1情景下,2035年动力电池钴回收潜力可满足生产需求的89.27%,在S3E1情景下,动力电池钴回收潜力甚至能够完全满足该年动力电池生产的钴需求。未来需要根据钴实际储量及回收潜力,评估全产业链钴的开采及进口计划。

### 3.4.4 资源回收的经济价值

根据锂、镍、钴的价格及其回收潜力,可以评估其回收对应的经济价值,见表5。

由表5可知,高镍低钴技术发展虽然推动了镍的回收经济价值增长,但却使得锂和钴的回收经济价值减少。在S1E1情景下,预测2035年锂、镍、钴的回收经济价值分

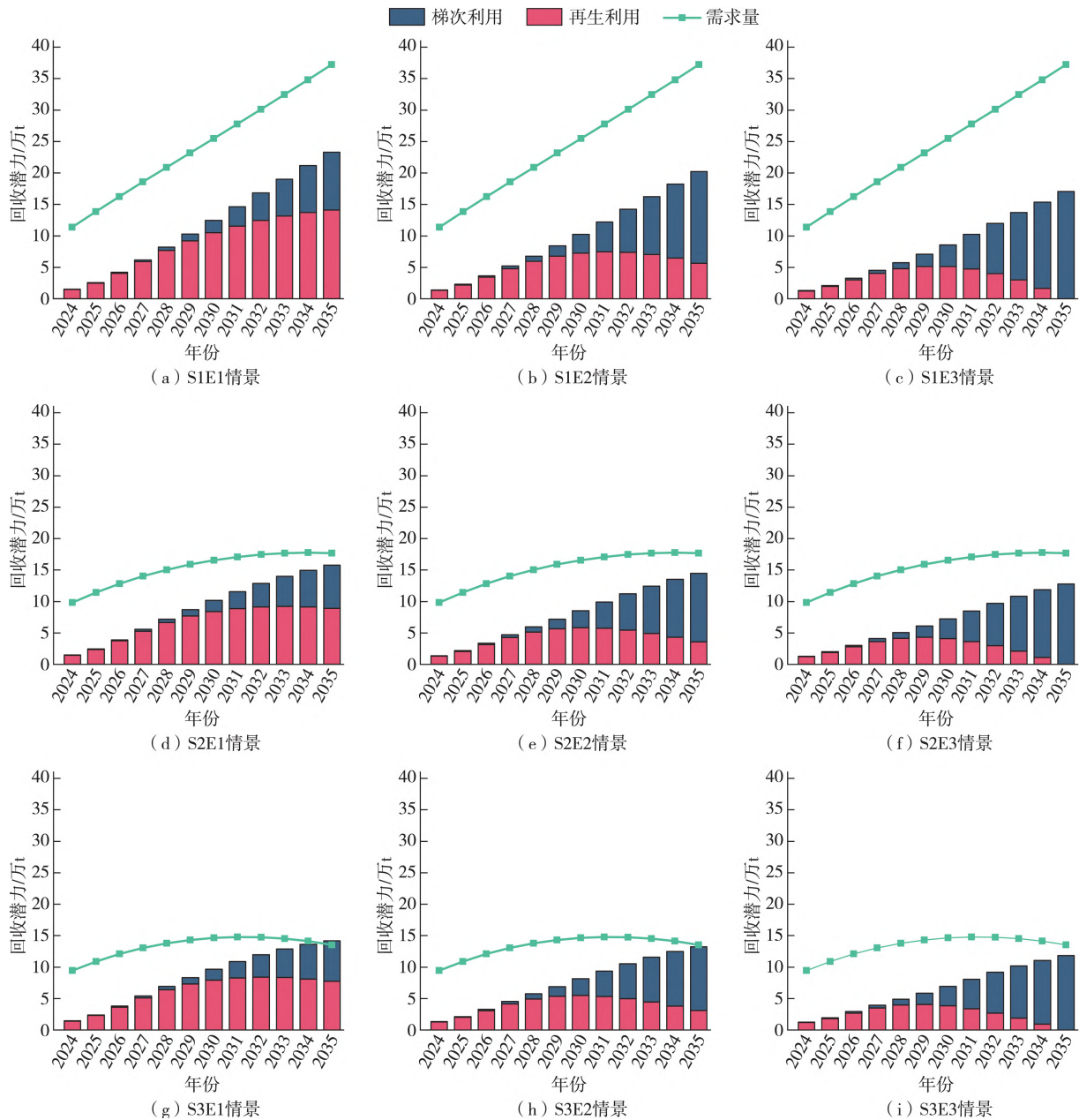


图3 2024—2035年9种情景下钴的回收潜力与未来需求

表5 不同情景下关键矿产资源回收潜力的经济价值

/亿元

关键矿产资源	年份	S1E1	S1E2	S1E3	S2E1	S2E2	S2E3	S3E1	S3E2	S3E3
锂	2024	62.10	56.55	52.84	62.02	56.47	52.77	61.93	56.38	52.69
	2030	509.61	416.55	354.51	492.60	403.91	344.79	487.05	399.71	341.47
	2035	942.30	800.07	705.26	880.29	754.56	670.74	862.18	741.02	660.24
镍	2024	48.44	44.03	41.09	48.94	44.48	41.51	49.02	44.55	41.58
	2030	410.58	335.59	285.61	440.48	358.27	303.47	445.03	361.73	306.19
	2035	759.22	644.63	568.23	856.85	717.64	624.84	871.72	728.77	633.46
钴	2024	31.29	28.49	26.63	30.50	27.78	25.96	30.33	27.63	25.82
	2030	255.17	208.58	177.52	208.13	172.90	149.42	198.19	165.37	143.48
	2035	471.83	400.61	353.14	318.22	285.73	264.07	285.78	261.47	245.26

别为942.30、759.22、471.83亿元。在S2E1情景下,2035年镍的回收经济价值增至805.46亿元,而锂和钴的回收经济价值则分别降至880.29亿元和408.45亿元。S1E2情景下,2035年锂、镍、钴的回收经济价值分别降至800.07、644.63、400.61亿元。由此可见,高镍低钴技术发展导致的经济价值波动主要源于实际资源使用量的变化,而梯次利用技术的提升虽然减少了资源回收的经济价值,但动力电池的梯次利用也带来了新的经济效益。

在新能源汽车动力电池回收利用中,会面临区域回收能力与实际回收需求不匹配、梯次利用市场需求与退役电池性能之间存在适配偏差等现实问题。这些因素导致回收路径选择缺乏明确依据,资源流向难以高效统筹,增加了系统整合与运作的成本。尤其是一些容量较低或健康状态不确定的电池,若未经筛选进入梯次利用环节,可能引发安全隐患,降低资源回收效率。因此,有必要通过建立科学的电池状态评估和分流机制,实现梯次利用与再生利用路径的有效衔接,提升资源综合利用水平。

### 3.5 讨论

#### 3.5.1 LFP普及对关键矿产资源回收潜力的影响

LFP由于其优越的安全性能和较长的循环寿命,在梯次利用中具有更大的优势<sup>[53]</sup>。由于LFP正极材料不含镍和钴,梯次利用率变化对这两种资源的回收潜力无直接影响。不同比例的LFP进入梯次利用对锂、镍、钴的回收

潜力的影响如图4所示。

从图4可以看出,2035年LFP电池梯次利用率分别为50%和80%的情景下,锂的回收潜力分别为12.75万t和10.99万t,可满足当年需求量的66.93%和57.68%。相比之下,镍和钴的回收潜力均来自三元系电池的再生利用,与LFP的梯次利用率关系不大。镍的回收潜力在2029年即可完全满足当年需求量,钴的回收潜力在2030年即可完全满足当年需求量。由此可见,回收退役动力电池中的镍和钴,可为关键矿产资源长期稳定供应提供保障。

#### 3.5.2 回收渠道布局对资源回收效率与规模的影响

中国退役动力电池分布存在明显的不均衡,回收服务网点合理布局尤为关键。本研究基于2023年中国31个省份(因研究数据缺失,未包括香港、澳门和台湾)新能源汽车保有量对新能源汽车报废量进行估算<sup>[54]</sup>,结合2024年新能源汽车动力电池回收服务网点信息<sup>[55]</sup>(表6),以明确省级层面报废压力和回收渠道建设情况。

由表6可知,中国新能源汽车动力电池退役量主要集中在东部经济发达省份,广东省高居全国榜首。当前动力电池回收网点分布存在不平衡的现象,可能导致动力电池使用量大、报废量高的经济发达省份,面临回收与处理能力不足的压力。同时,一些动力电池报废量较低的省份,由于回收站点数量有限,可能影响资源的集中回收与高效利用,造成资源浪费。针对省级层面动力电池报

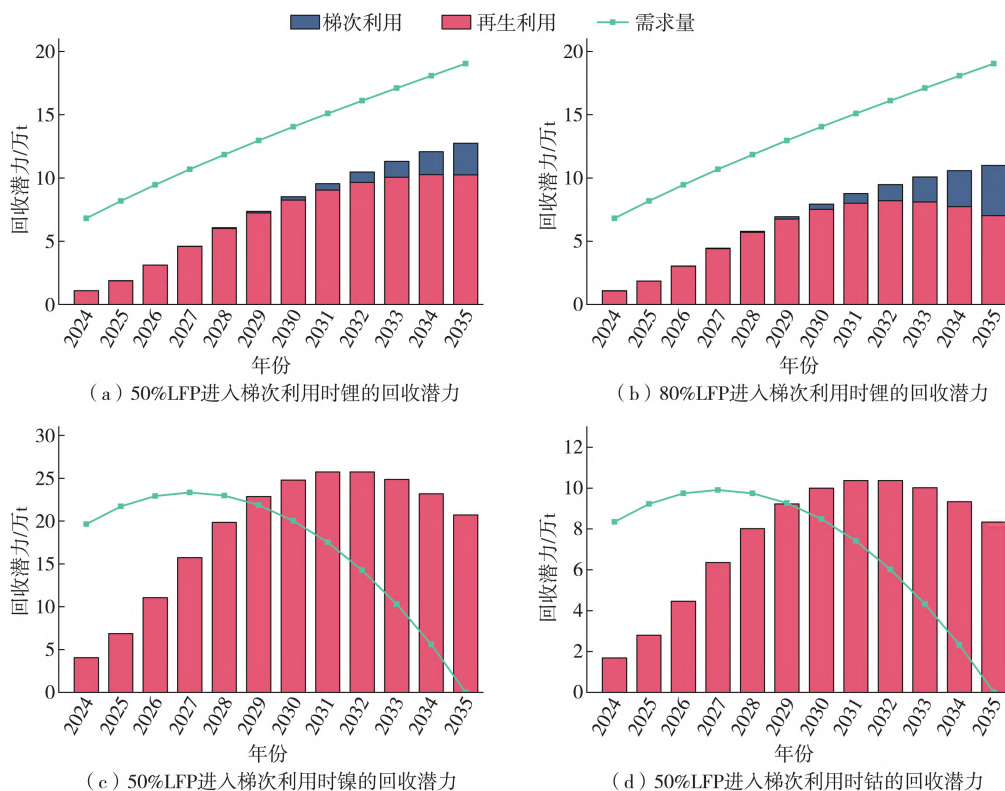


图4 LFP电池高速发展情况下关键矿产资源的回收潜力

表6 2035年动力电池退役量及2024年回收网点分布对照

省份	2035年报废量/万辆	2024年动力电池回收站点/个
广东	321.03	1 470
浙江	222.00	1 043
江苏	180.78	1 101
山东	154.09	1 114
河南	142.39	886
上海	140.16	436
北京	99.83	366
四川	96.60	742
河北	83.13	706
安徽	72.11	577
广西	69.76	382
湖北	69.37	585
湖南	59.95	647
福建	58.01	578
天津	57.61	293
陕西	57.57	405
重庆	48.66	287
山西	43.23	412
江西	39.36	473
云南	38.03	419
贵州	31.43	307
海南	30.59	158
辽宁	29.22	372
吉林	18.54	185
内蒙古	15.40	249
新疆	12.57	196
甘肃	10.89	215
黑龙江	8.76	220
宁夏	5.83	72
青海	2.75	51
西藏	0.67	29

废量与回收站点分布不均衡的现象,应优化全国新能源汽车动力电池回收网点布局。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本研究基于新能源汽车销量与报废量预测,构建了不同电池技术路径(高镍低钴)与梯次利用率水平的组合情景,对未来关键矿产资源的需求与回收潜力进行了系统评估。主要研究结论如下。

(1)新能源汽车报废量的激增将加剧未来动力电池回收的压力。预测结果表明,中国新能源汽车销量将从2024年的1 179.05万辆增长至2035年的2 750.18万辆,增幅达2.33倍。相应地,新能源汽车的报废量将从2024年的194.76万辆增加至2035年的2 220.28万辆。这一

趋势不仅加剧了资源消耗和环境压力,也对动力电池回收与再利用体系提出了更高的要求。

(2)动力电池市场份额变化和梯次利用技术发展对关键矿产资源的回收潜力及供需平衡产生显著影响。高镍低钴技术趋势导致未来锂和钴资源需求下降,尽管其回收量有所减少,其资源循环利用率反而提升。相比之下,镍需求量因高镍低钴技术发展而大幅增长,但其回收潜力难以跟上需求增长速度,导致其循环利用率持续下降。梯次利用技术的进步推动了回收路径由直接拆解向梯次利用后再次拆解回收转变,对锂、镍的循环利用率产生负面效应,但钴在高镍低钴技术发展下有提升空间。因此,电池技术升级和梯次利用路径之间需要协同优化。

(3)动力电池回收经济价值的提升是关键矿产资源循环利用体系可持续运行的重要支撑。预测结果表明,2035年,锂、镍、钴的回收经济价值分别增长至942.30、714.58、605.63亿元。尤其是在高镍低钴技术发展趋势下,镍的回收经济价值大幅提升。尽管梯次利用技术可能降低短期内的回收经济价值,但其所带来的梯次利用电能潜力(至2035年可达1 287.75 GW·h)和经济效益(6.70亿元)可以提升整个资源循环体系的多元收益。

### 4.2 建议

在新能源汽车快速发展背景下,动力电池材料结构的演化与利用路径的差异深刻影响着未来关键矿产资源供需格局与回收体系的构建。要实现资源安全与循环利用协同推进,需要从动力电池回收政策、回收路径、回收利用技术和市场激励机制等多维度综合施策。本研究提出的政策建议具体如下。

(1)健全回收政策体系,夯实动力电池全生命周期管理基础。应完善生产者责任延伸制度,明确整车厂与电池生产企业在电池回收环节中的主体责任,推动动力电池产品在设计阶段即充分考虑可拆解性、可回收性与再利用性。同时,需加快统一回收技术标准和责任划分规范的制定,健全回收数据共享与溯源管理平台,引导企业与公众合规参与回收流程。在空间布局上,可以构建“国家—区域—地方”三级资源循环体系,鼓励重点省份根据退役电池数量设立区域资源循环中心,优化回收网络布局,提升资源回收系统的效率与韧性。

(2)建立路径分流机制,提升梯次利用与再生利用的协同效率。应建立基于电池状态评估的“动态分流机制”,通过智能检测技术快速判断其剩余容量与使用风险,实现路径精准匹配:健康电池优先用于储能等梯次利用场景,状态不良或存在安全隐患的电池则直接进入再生利用环节。为提升系统运行效率,可以在区域资源循环中心建设共享前处理平台,统一开展初步拆解与检测,



避免重复运输与操作造成的资源浪费。此外,可通过合同定价机制实现电池所有权与回收路径选择权的分离,赋予专业第三方运营者更多资源调配自主性,推动多路径回收网络的高效协同。

(3)强化关键技术攻关,提升动力电池回收利用的技术支撑能力。应着力推动关键矿产资源替代、高效回收与绿色再制造等领域的技术突破。可以设立专项科研基金,鼓励产学研协同研发,重点突破高镍低钴正极材料、电池结构模块化设计及自动化拆解等问题。同时,推动动力电池制造企业、新能源汽车企业与技术研发机构建立跨主体研发合作机制,提升技术转化效率与成果落地能力。另外,还可以通过构建全国性关键金属动态监测与预警机制,实时追踪退役电池规模与下游关键金属需求变化,为政策制定和产业部署提供决策依据。

(4)完善市场机制与激励体系,推动资源回收体系规模化、可持续发展。应制定系统性的成本-效益评估标准,明确不同回收路径与技术路线的经济性阈值,提升项目可行性判断能力。政府通过在项目审批、财政补贴、税收减免等方面给予具备回收全链条能力的“白名单”企业政策倾斜,鼓励其发展“回收利用—梯次利用—再生利用”一体化服务模式。同时,可通过地方试点工程培育一批具备综合回收能力的领军企业,发挥其示范带动作用,推动形成市场驱动、主体多元、路径清晰的资源循环产业格局。

#### 参考文献

[1] 国务院国有资产监督管理委员会. 加快构建新质生产力 迈向新发展[EB/OL]. (2024-09-29)[2024-11-23]. <https://www.sasac.gov.cn/n4470048/n29955503/n31729007/n31729012/c31729113/content.html>.

[2] 安徽省发展和改革委员会. 加快培育新能源汽车新质生产力[EB/OL]. 安徽日报, (2024-08-06)[2024-11-23]. <https://fzgw.ah.gov.cn/ywdt/mtjj/149549651.html>.

[3] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.

[4] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1-19.

[5] 陈伟强, 汪鹏, 钟维琼. 支撑“双碳”目标的关键金属供应挑战与保障对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1577-1585.

[6] 谢航, 张书瑞, 张庭婷, 等. 中国乘用车电动化对动力电池关键金属材料的需求研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(1): 1-10.

[7] 卫寿平, 孙杰, 周添, 等. 废旧锂离子电池中金属材料回收技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1196-1207.

[8] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部印发《固体废物分类与代码目录》和《固体废物污染环境防治信息发布指南》[R/OL]. (2024-04-03)[2024-10-29]. [https://www.mee.gov.cn/ywzg/gtffwyhxpj/gtffw/202404/t20240403\\_1070030.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywzg/gtffwyhxpj/gtffw/202404/t20240403_1070030.shtml).

[9] 吴柳. 国家发展改革委:支持组建中国资源循环利用集团[J]. 中国石油和化工, 2024(10): 22.

[10] 姚海琳, 王昶, 黄健柏. EPR下我国新能源汽车动力电池回收利用模式研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(18): 84-89.

[11] 张淑英, 李天钰. 中国新能源汽车动力电池报废量预测与对策建议:基于蒙特卡洛模拟的测算[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(6): 101-105.

[12] 刘光富, 林锦灿, 田婷婷. 新能源汽车动力电池报废量估算和资源潜力分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 96-99.

[13] GU X, ZHOU L, HUANG H, et al. Electric vehicle battery secondary use under government subsidy: a closed-loop supply chain perspective [J]. International journal of production economics, 2021, 234: 108035.

[14] NURDIAWATI A, AGRAWAL T K. Creating a circular EV battery value chain: end-of-life strategies and future perspective [J]. Resources, conservation and recycling, 2022, 185: 106484.

[15] TANG C, SPRECHER B, TUKKER A, et al. The impact of climate policy implementation on lithium, cobalt and nickel demand: the case of the dutch automotive sector up to 2040 [J]. Resources policy, 2021, 74: 102351.

[16] 郑林昌, 张亚楠, 李泽阳, 等. 不同消费情景下中国新能源汽车锂回收潜力[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 97-113.

[17] ILOEJE C O, XAVIER A S, GRAZIANO D, et al. A systematic analysis of the costs and environmental impacts of critical materials recovery from hybrid electric vehicle batteries in the U. S. [J]. iScience, 2022, 25(9): 104830.

[18] LIU B, ZHANG Q, LIU J, et al. The impacts of critical metal shortage on China's electric vehicle industry development and countermeasure policies [J]. Energy, 2022, 248: 123646.

[19] DUNN J, KENDALL A, SLATTERY M. Electric vehicle lithium-ion battery recycled content standards for the US-targets, costs, and environmental impacts [J]. Resources, conservation and recycling, 2022, 185: 106488.

[20] LIANG Y, KLEIJN R, VAN DER VOET E. Increase in demand for critical materials under IEA net-zero emission by 2050 scenario [J]. Applied energy, 2023, 346: 121400.

[21] LI Y, LIU Y H, HUANG S Y, et al. Estimation of critical metal stock and recycling potential in China's automobile industry [J]. Frontiers in environmental science, 2022, 10: 937541.

[22] 王欣悦, 彭频. “双碳”背景下我国钴资源需求预测及分析[J]. 中国国土资源经济, 2024, 37(7): 83-89.

[23] CALDERON J L, SMITH N M, HOLLEY E, et al. Critical mineral demand estimates for low-carbon technologies: what do they tell us and how can they evolve? [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2024, 189: 113938.

[24] SHAFIQUE M, RAFIQ M, AZAM A, et al. Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China [J]. Resources, conservation and recycling, 2022, 178: 106061.

[25] XU C J, DAI Q, GAINES L, et al. Future material demand for automotive lithium-based batteries [J]. Communications materials, 2024, 5(1): 1-11.

- 2020, 1: 99.
- [26] 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, 154: 104603.
- [27] OZAWA A, MORIMOTO S, HATAYAMA H, et al. Energy-materials nexus of electrified vehicle penetration in Japan: a study on energy transition and cobalt flow[J]. *Energy*, 2023, 277: 127698.
- [28] QIAO D H, MA Y L, BAO Y H, et al. Exploring the potential impact of electric passenger vehicle battery recycling on China's cobalt supply and demand under the goals of carbon peaking and carbon neutrality during 2010—2060[J]. *Journal of cleaner production*, 2024, 444: 141139.
- [29] MAISEL F, NEEF C, MARSCHEIDER-WEIDEMANN F, et al. A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithiumion batteries in electric vehicles [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2023, 192: 106920.
- [30] BRUNO M, FIORE S. Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: material flow analysis and environmental assessment [J]. *Journal of environmental management*, 2024, 358: 120758.
- [31] HU Z M, YU B Y, DAIGO I, et al. Circular economy strategies for mitigating metals shortages in electric vehicle batteries under China's carbon-neutral target [J]. *Journal of environmental management*, 2024, 352: 120079.
- [32] 徐莹莹, 符丽雅, 吕希琛, 等. 新能源汽车生产商与梯次利用企业合作商业模式选择机制研究: 基于退役电池梯次利用视角[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(10): 151-157.
- [33] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(6): 184-195.
- [34] 豆咏琪, 宋小龙, 庄绪宁, 等. 退役磷酸铁锂电池梯次利用生命周期评价与碳减排情景分析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(7): 4091-4100.
- [35] 朱曼宇, 张峥. 基于GM(1, 1)模型的新能源汽车销量预测研究[J]. *物流工程与管理*, 2023, 45(2): 138-141.
- [36] 周玲芝, 孙竹, 孙林, 等. 新能源汽车发展对传统汽车业的影响: 基于Bass模型的实证研究[J]. *国际经济合作*, 2018(2): 37-42.
- [37] 陈科秀, 刘娟. 基于ARIMA模型的欧拉黑猫新能源汽车销量预测[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(3): 169-171.
- [38] 杨东红. 基于改进BP神经网络的新能源汽车销量预测[J]. *自动化与仪器仪表*, 2021(11): 60-63.
- [39] 卢志平, 玉晓晶, 陆成裕. 融合VMD和LSTM模型的新能源汽车销量预测方法[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2023, 45(4): 546-551.
- [40] 缪辉, 唐晨添, 罗露璐. 基于ARIMA模型的新能源汽车销量预测[J]. *企业科技与发展*, 2020(10): 97-98.
- [41] 梁亚玲, 陈英伟, 刘思佳. 基于SSA-SVR模型的国内新能源汽车销量预测研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2023, 13(9): 290-293.
- [42] 张安迎, 童昕, 曾现来. 中国报废汽车中铂族金属回收潜力估算[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(11): 4821-4830.
- [43] LI Y, LIU Y H, JU Y Y, et al. Forecasting the echelon utilization potential of end-of-life electric vehicle batteries: a province-level investigation in China [J]. *Clean technologies and environmental policy*, 2024.
- [44] HUANG J B, DONG X S, CHEN J Y, et al. The slow-release effect of recycling on rapid demand growth of critical metals from EV batteries up to 2050: evidence from China [J]. *Resources policy*, 2023, 82: 103504.
- [45] LI Y, LIU Y H, CHEN Y, et al. Estimation of end-of-life electric vehicle generation and analysis of the status and prospects of power battery recycling in China [J]. *Waste management & research: the journal for a sustainable circular economy*, 2022, 40(9): 1424-1432.
- [46] 工业和信息化部. 车用动力电池回收利用梯次利用第4部分: 梯次利用产品标识 [R/OL]. (2021-08-20) [2024-10-29]. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?heno=78C8CDEC23989903F399E8137B9689D6>.
- [47] DUNN J, SLATTERY M, KENDALL A, et al. Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles [J]. *Environmental science & technology*, 2021, 55(8): 5189-5198.
- [48] 国家发展改革委价格监测中心. 11月上旬36个大中城市天然气、煤气、工业用电价格 [EB/OL]. (2023-11-28) [2024-11-19]. <https://www.chinaprice.cn/syny/51076.jhtml>.
- [49] 上海有色金属网贵金属行情中心. 今日金属价格(上海有色网) [EB/OL]. (2024-07-20) [2024-11-27]. <https://www.smm.cn/>.
- [50] 财政部, 科技部, 工业和信息化部, 发展改革委. 关于2016—2020年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知 [EB/OL]. (2015-04-22) [2024-11-20]. [https://www.mof.gov.cn/zcsjstsgb/gfxwj/201504/t20150422\\_3583332.htm](https://www.mof.gov.cn/zcsjstsgb/gfxwj/201504/t20150422_3583332.htm).
- [51] AI N, ZHENG J J, CHEN W Q. U.S.end-of-life electric vehicle batteries: dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2019, 145: 208-219.
- [52] 李杰, 李芳琴, 黄莉, 等. 报废产品中钴金属回收潜力研究[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 2960-2969.
- [53] 王华, 王文秀, 张铎, 等. 废旧磷酸铁锂电池回收方法研究[J]. *电力勘测设计*, 2023(12): 49-54.
- [54] 智谷超充能源科技有限公司. 2023年全国31省和342市新能源车保有量 [EB/OL]. (2024-05-06) [2024-11-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1798270368037120403&wfr=spider&for=pc>.
- [55] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车动力电池回收服务网点信息 [EB/OL]. (2024-07-20) [2024-11-01]. <https://wap.miit.gov.cn/datainfo/zysjk/xnyqcdlxdcshfwddxx/index.html>.



## Critical mineral resource recycling potential from new energy vehicle power batteries in China

*LI Yang, LIU Yanhui*

(School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan Hubei 430073, China)

**Abstract** The efficient recycling and echelon utilization of retired power batteries are essential for promoting the green and low-carbon transformation of the new energy vehicle (NEV) industry chain, as well as for alleviating the supply-demand imbalance of critical mineral resources and establishing a closed-loop resource management system. Based on the transition of NEV consumption from “policy-driven” to “market-driven,” this study constructed a predictive model for resource demand and recovery potential, calculated the demand and recovery potential of lithium, nickel, and cobalt under different scenarios, and comprehensively evaluated the environmental and economic benefits of multiple treatment pathways. The results showed that by 2035, NEV sales in China would reach 27.50 million units, triggering large-scale retirement of power batteries. Under the baseline scenario, echelon utilization of retired batteries would yield an energy potential of 1 287.75 GWh and generate an economic benefit of CNY 670 million in 2035. The recovery potential of lithium, nickel, and cobalt would reach 146 700 t, 565 900 t, and 233 200 t, respectively, with the corresponding resource recovery values being CNY 94.23 billion, 75.92 billion, and 47.18 billion, respectively. While the widespread application of Lithium Iron Phosphate (LFP) batteries significantly enhanced the potential for echelon utilization, they made limited contributions to critical mineral resource recovery due to the absence of nickel and cobalt. Spatially, there was a notable mismatch between the retirement volume of power batteries and the distribution of recycling networks, indicating an urgent need for optimization of recycling network layout. In response to these issues, this study proposes the following policy recommendations: First, the extended producer responsibility system should be improved and a robust data tracking and sharing platform should be established to ensure scientific management of the entire life cycle of batteries; Second, routing mechanisms based on battery health status should be promoted to ensure efficient coordination between echelon and regenerative utilization; Third, key technology R&D and cross-departmental collaboration should be strengthened to promote recycling technology and industrial innovation and upgrading; Fourth, economic incentives and policy support systems should be improved to promote the standardization and scaling of the recycling industry. The findings of this study provide scientific evidence and strategic guidance for optimizing and implementing policies for circular utilization of power battery resources in China.

**Key words** new energy vehicle; power battery; critical mineral; echelon utilization; recycling potential

(责任编辑:田 红)