

## 中国乘用车电动化对动力电池关键金属材料的需求研究

谢航<sup>1,2</sup>, 张书瑞<sup>2,3</sup>, 张庭婷<sup>2</sup>, 谢晓敏<sup>2,4</sup>

(1. 上海交通大学智慧能源创新学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学碳中和发展研究院, 上海 200030;  
3. 上海交通大学中英国际低碳学院, 上海 201306; 4. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 新能源汽车作为交通运输领域节能减排的重点, 近年来的迅速发展导致其对锂、钴、镍、锰等电池材料的需求剧增。为评估相关资源的供应风险, 基于Gompertz曲线模型和物质流分析的方法, 对两种电池技术发展情景下中国2023—2050年新能源乘用车电池材料的需求进行了预测。结果显示, 在磷酸铁锂电池路线(LFPR)下, 2050年锂、钴、镍、锰的需求将分别达到238、169、362、158千吨; 在三元锂电池路线(NMCR)下, 2050年锂、钴、镍、锰的需求将分别达到242、201、1 084、187千吨。当前中国锂、钴、镍的产能将难以满足未来新能源汽车发展的需要。2050年的回收锂、回收钴和回收镍将至少能分别满足86.5%、93.5%和65.8%的新增需求。鉴于国内目前还缺乏有关废电池回收的全面法律法规, 制定相关标准势在必行。

**关键词:** 新能源汽车; 动力电池; 关键金属; 回收潜力

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.01.01

## Analysis of Demand for Critical Metal Materials in Power Batteries for the Electrification of Passenger Vehicles in China

XIE Hang<sup>1,2</sup>, ZHANG Shurui<sup>2,3</sup>, ZHANG Tingting<sup>2</sup>, XIE Xiaomin<sup>2,4</sup>

(1. College of Smart Energy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;  
2. Research Institute of Carbon Neutrality, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;  
3. China-UK Low Carbon College, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201306, China;  
4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The rapid development of new energy vehicles has dramatically increased the demand for battery materials such as lithium, cobalt, nickel, and manganese. To assess the supply risks of these resources, the demand for battery materials in China's new energy passenger vehicles from 2023 to 2050 was predicted using the Gompertz curve model and material flow analysis, under two different scenarios of battery technology development. The results indicate that by 2050, under the lithium iron phosphate route (LFPR), the demand for lithium, cobalt, nickel, and manganese will be 238, 169, 362, 158 kilotons, respectively. Under the nickel-manganese-cobalt (NMC) lithium battery route, the estimated demands will reach 242, 201, 1 084, 187 kilotons, respectively. Recycled lithium, cobalt and nickel in 2050 are expected to meet at least 86.5%, 93.5% and 65.8% of their annual demand, respectively. Given the current lack of comprehensive laws and

收稿日期: 2024-01-25 改稿日期: 2024-03-08 网络首发日期: 2024-06-06

参考文献引用格式:

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.

XIE Hang, ZHANG Shurui, ZHANG Tingting, et al. Analysis of Demand for Critical Metal Materials in Power Batteries for the Electrification of Passenger Vehicles in China[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(1): 1-10. (in Chinese)



regulations for waste battery recycling in China, it is essential to develop relevant standards.

**Keywords:** new energy vehicle; power battery; critical metal; recycling

新能源汽车作为交通运输领域节能减排的重点,近年来在相关政策的激励下,取得了迅速的发展<sup>[1]</sup>。根据中国汽车工业协会公布的数据,2022年中国新能源汽车销量为688.7万辆,同比增长93.4%,市场渗透率达到了25.6%<sup>[2]</sup>,这已经提前超过了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》中提到的2025年市场渗透率达到20%的目标<sup>[3]</sup>。

与传统的燃油汽车相比,新能源汽车动力电池的制造需要关键的金属材料:锂、钴、镍、锰等<sup>[4]</sup>。我国是关键金属消费大国,但其资源储量和产量有限<sup>[5]</sup>。2021年,中国锂消费约占全球总产量的72%,对外依存度高达67%<sup>[6]</sup>,钴和镍的对外依存度也分别在90%和80%以上<sup>[7-8]</sup>。中国关键金属矿产资源的自给能力较弱,存在较大的供给风险。

目前,国内外学者对动力电池关键金属材料需求预测已经开展的一些研究主要是聚焦全球视角<sup>[9-13]</sup>。MAISEL等<sup>[9]</sup>的研究显示,锂和钴在2040年的需求将超过目前产量的8倍,回收利用可有效降低对关键金属材料的需求。DUNN等<sup>[12]</sup>的研究表明,到2040年,全球退役电池回收利用可以满足60%的钴、53%的锂、57%的锰和53%的镍需求。聚焦于中国区域的相关研究还较少,且研究涵盖的关键金属种类也不太全面<sup>[14-15]</sup>。郑林昌等<sup>[14]</sup>测算了不同情景下中国新能源汽车的锂回收潜力。ZHANG Hongyan等<sup>[15]</sup>预测了到2050年中国电动汽车行业对镍的需求。

锂、钴、镍、锰是4种主要的电池金属材料。本文通过结合物质流分析的方法建立了一个自下而上的预测模型,对2023—2050年新能源汽车电池的锂、钴、镍、锰需求及其报废回收潜力展开了综合预测分析,并结合资源供给侧给出了相关建议。研究结果不仅可以为新能源汽车行业未来的发展路线规划提供参考,而且可以为相关政策的制定提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 系统边界和研究框架

图1为提出的研究框架。研究的地域边界为中国内地,研究对象为乘用车;研究涵盖的新能源车型包括:纯电动汽车(BEV)、插电式混合动力汽车(PHEV)。

基于Gompertz曲线模型对2023—2050年间我国乘用车保有总量进行了预测,并在车队电气化水平假设的基础上,预测新能源汽车的保有情况。通过车辆的平均报废年限计算报废车辆的流出,用物质流分析(MFA)的方法估算新能源汽车的流入(销量)。考虑到电池技术的发展趋势,设置了两种电池技术发展路线,分析不同路线下关键金属需求、报废资源回收潜力等,并结合资源供应端提出相关的政策建议。

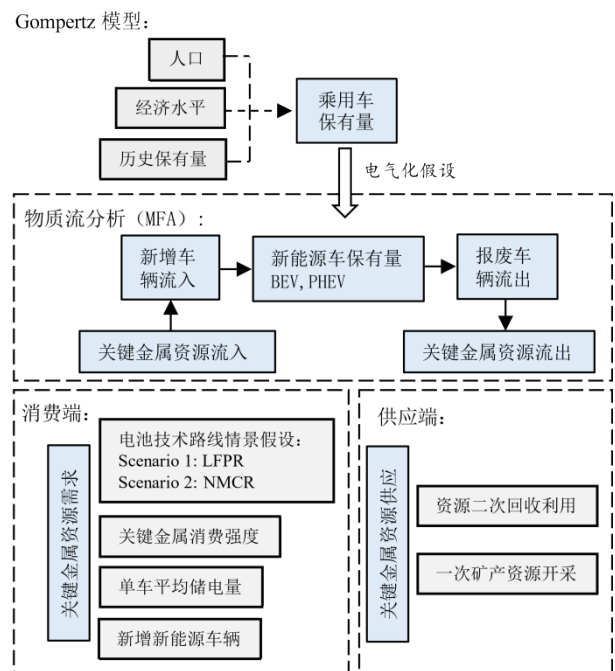


图1 研究框架

### 1.2 计算方法

#### 1.2.1 新能源汽车销量

估算新能源汽车的销量,首先需要乘用车总

保有量进行预测。美国、日本等发达国家的汽车产业发展历史数据表明，一个国家的乘用车人均保有量随着国民经济水平的提高会出现加速增长、减速增长、趋于饱和3个阶段性特征<sup>[16]</sup>，整体上呈S形的增长规律。Gompertz曲线模型是常用的S形非线性拟合曲线之一，已被很多学者应用于乘用车保有量的预测分析<sup>[16-18]</sup>。模型的表达式为：

$$R_{pv}(t) = a \times e^{-be^{-ct}} \quad (1)$$

$$S_{pv}(t) = R_{pv}(t) \times p(t) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中： $R_{pv}(t)$ 为第 $t$ 年的千人乘用车保有率，单位辆/千人； $S_{pv}(t)$ 为第 $t$ 年的乘用车总保有量，单位百万辆； $p(t)$ 为第 $t$ 年的人口数量，单位百万人； $a$ 为千人乘用车保有率饱和值，单位辆/千人； $x(t)$ 为第 $t$ 年的人均GDP，单位万元/人； $b, c$ 为模型参数。

清华大学、中国汽车工程协会等机构预测中国千人乘用车保有率饱和值在300~400辆/千人之间<sup>[19-20]</sup>。综合考虑本文中饱和值 $a$ 取400辆/千人。人口和国内生产总值（GDP）的历史数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[21]</sup>。人口和经济发展水平的未来假设参考中国人民大学陈卫<sup>[22]</sup>的研究和中国科学院陈锡康等<sup>[23]</sup>的研究。

基于乘用车总保有量进一步计算新能源汽车的保有量：

$$S_{ev}(t) = S_{pv}(t) \times E(t) \times \omega_{ev}(t) \quad (3)$$

式中： $S_{ev}(t)$ 为第 $t$ 年的BEV或PHEV乘用车保有量，单位百万辆； $E(t)$ 为第 $t$ 年的车队保有结构中的新能源汽车占比，单位%； $\omega_{ev}(t)$ 为第 $t$ 年新能源汽车中BEV或PHEV的占比，单位%； $E(t)$ 和 $\omega_{ev}(t)$ 的设置参考《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》<sup>[4]</sup>以及国家发展和改革委员会<sup>[24]</sup>的相关规划以及能源与交通创新中心<sup>[19]</sup>、中国汽车工程协会<sup>[25]</sup>、国际能源署<sup>[26]</sup>等机构对于未来中国的电动车销量和保有量的预测。具体的参数设置见表1。

新能源汽车的销量在保有量的基础上用物质流分析的方法计算。车辆的保有量 $S_{ev}$ 、销量（流入

表1 车队保有结构中的新能源汽车占比

	2022年	2030年	2040年	2050年
$E(t)/\%$	4.1 <sup>[27]</sup>	35.0	60.0	75.0
$\omega_{bev}(t)/\%$	79.8 <sup>[27]</sup>	83.2	86.6	90.0

量) $f_{ev}^{in}$ 、报废量（流出量) $f_{ev}^{out}$ 三者的关系可以表示为：

$$f_{ev}^{in}(t) = S_{ev}(t) - S_{ev}(t-1) + f_{ev}^{out}(t) \quad (4)$$

第 $t$ 年的销量（流入量，百万辆) $f_{ev}^{in}(t)$ 由第 $t$ 年与前一年的保有量之差以及第 $t$ 年的报废数量（流出量，百万辆) $f_{ev}^{out}(t)$ 计算得到。

### 1.2.2 关键金属需求

乘用车电动化对动力电池关键金属的需求与电动汽车销量、动力电池平均容量、动力电池类型及其市场占有情况以及关键金属消费强度有关<sup>[9-11]</sup>。电动汽车销量的增加会导致对关键金属需求的上升。关键金属消费强度是指每千瓦时电池容量需要消耗的对应的关键金属质量。此外，动力电池平均容量以及动力电池市场占有情况也会影响关键金属需求的计算。本文对上述参数的具体设置和说明在第2节中给出。关键金属材料的需求可计算为：

$$W_m(t) = \sum_j (C_j(t) \times I_{j,m}) \quad (5)$$

$$C_j(t) = C(t) \times M_j(t) \quad (6)$$

$$C(t) = f_{bev}^{in} \times c_{bev}(t) + f_{phev}^{in} \times c_{phev}(t) \quad (7)$$

式中： $W_m(t)$ 为第 $t$ 年对材料 $m$ 的需求，单位千吨； $C_j(t)$ 为第 $t$ 年阴极材料为 $j$ 的电池新增装机容量，单位GWh； $C(t)$ 为第 $t$ 年的电池新增装机容量，单位GWh； $M_j(t)$ 为阴极材料为 $j$ 的电池在第 $t$ 年的市场占有份额，单位%； $I_{j,m}$ 为阴极材料为 $j$ 的电池对材料 $m$ 的消费强度，单位kg/kWh； $c_{bev}(t)$ 和 $c_{phev}(t)$ 分别为BEV和PHEV的动力电池平均容量，单位kWh/辆； $f_{bev}^{in}(t)$ 和 $f_{phev}^{in}(t)$ 分别为第 $t$ 年BEV和PHEV的销量（流入量），单位百万辆。

### 1.2.3 资源回收潜力

汽车使用达到一定年限或达到一定行驶里程后，其零部件的磨损和老化会逐渐加剧，导致故障率逐渐升高<sup>[28]</sup>。商务部对机动车强制报废年限作

出了规定<sup>[29]</sup>。已有研究结果显示,微型载客汽车和小型载客汽车的报废年限在7~12年之间频率最高<sup>[30]</sup>。本文设定车辆平均报废年限为10年。

退役动力电池的回收利用具有巨大的经济环境效益<sup>[31]</sup>。量化报废电池的资源回收潜力需要对电池回收率、电池第二寿命选择、拆卸、预处理、冶炼和精炼过程中的损失等因素进行考虑。本文对关键金属资源报废回收潜力的估算在以下假设的基础上进行:电池与新能源汽车同期报废且不参与梯度利用;估算的最大潜力是报废电池中的金属资源能被完全回收利用。最大资源回收潜力可表示为:

$$Q_m(t) = W_m(t - T) \quad (8)$$

式中:  $Q_m(t)$  为第  $t$  年对材料  $m$  的最大回收潜力,单位千吨;  $T$  为电池的使用寿命,单位年。

## 2 主要参数和情景设置

### 2.1 动力电池平均容量

动力电池平均容量随着电池技术的发展和汽车续航里程的提高而上升。2017—2022年工信部发布的《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》<sup>[32]</sup>中,2947款新能源车型数据显示:2017—2022年BEV动力电池平均容量提升了73.5%,由34 kWh/辆到59 kWh/辆;PHEV动力电池平均容量提升了92.3%,由13 kWh/辆到25 kWh/辆。随着新能源汽车技术的发展,其搭载的动力电池容量还会进一步上升,对动力电池平均容量的设定见表2。

表2 单位车辆平均储电量的设定 kWh/辆

年份	BEV平均储电量	PHEV平均储电量
2022年	58.8	25.5
2030年	64.6	27.9
2040年	67.9	29.3
2050年	68.0	30.0

### 2.2 关键金属消费强度

关键金属消费强度是指某种阴极材料的电池储存单位电量对特定金属的质量需求(kg/kWh)。不同阴极材料的电池对关键金属资源的需求不同。MAISEL等<sup>[9]</sup>和OLIVETTI等<sup>[33]</sup>的研究中给出了

关键金属消费强度的相关参数,本文涉及到的几种电池参数参考上述研究设定,见表3。

表3 关键金属消费强度 kg/kWh

	Li	Co	Ni	Mn
低镍/中镍材料				
NMC111	0.120	0.333	0.333	0.312
NMC532	0.121	0.205	0.512	0.191
NMC622	0.104	0.176	0.525	0.164
高镍材料				
NMC811	0.096	0.082	0.650	0.076
磷酸铁锂				
LFP	0.086	0	0	0

### 2.3 情景设置

目前中国动力电池市场以三元锂电池(NMC)和磷酸铁锂电池(LFP)为主。2022年电池总装机量NMC电池占37.5%,LFP电池占62.4%<sup>[34]</sup>,如图2所示。NMC电池按阴极材料的不同组分可进一步划分为高镍阴极材料(NMC811)和低/中镍阴极材料(NMC111\NMC532\NMC622)。提高镍的含量有助于提升电池能量密度,同时由于钴含量降低,电池材料成本也有所下降,一些研究表明,富镍电池可能成为未来的发展方向<sup>[35-36]</sup>。此外,固态电池、锂硫电池等电池技术也逐渐得到更多的关注<sup>[36]</sup>,但考虑到目前技术尚未成熟,缺少商业化的应用,在本文中暂不对其进行讨论。

本文设置了两种情景分别对应两种电池技术发展路线:一种为NMC电池情景(NMCR),此情景下NMC电池在未来占据市场的主导地位,且富镍电池技术得到发展和应用;另一种为LFP电池路线(LFPR),此情景下LFP电池被更广泛地使用。两种情景下2050年的电池市场结构假设见表4。

## 3 结果与讨论

### 3.1 新能源汽车销量预测

根据上述方法对中国2023—2050年乘用车保有量进行了预测,预测结果如图3所示。2005—2025年,全国乘用车保有量处于“S”形曲线的加

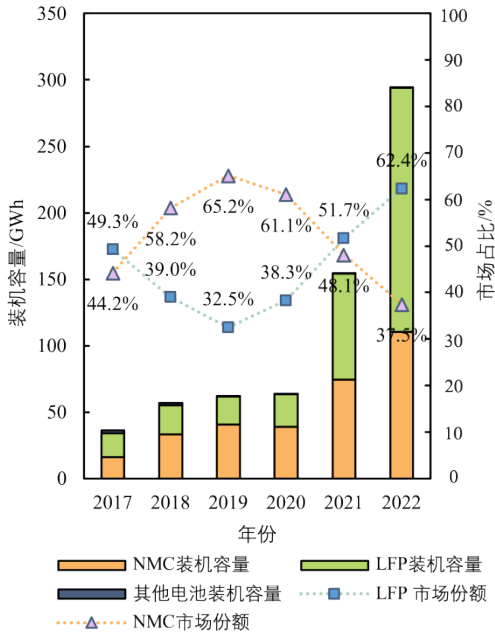


图2 动力电池市场历史数据

表4 2050年动力电池市场结构假设

	LFPR/%	NMCR/%
低镍/中镍阴极材料	27	7
高镍阴极材料	3	63
磷酸铁锂	70	30

速增长区，预计2025年底乘用车保有量将达到3.51亿辆；2025—2040年，乘用车保有量增长速度开始放缓，预计2040年底乘用车保有量将达到5.18亿辆；2040—2050年，全国乘用车保有量趋于饱和，预计到2050年达到5.21亿辆。

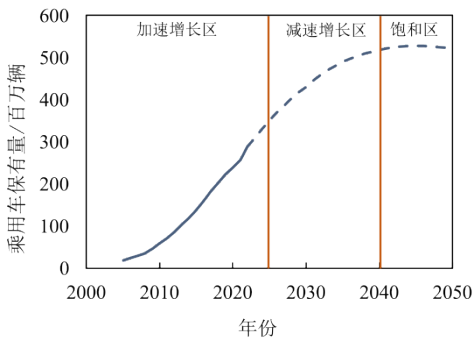


图3 乘用车保有量预测

新能源汽车的保有量和销量预测结果如图4所示。保有结构方面，2030年、2040年、2050年新能源汽车保有量分别达到1.51、3.11、3.65亿辆；

其中，BEV保有量分别达到1.23、2.67、3.28亿辆，PHEV保有量分别达到0.28、0.44、0.36亿辆，2050年，新能源汽车保有结构中BEV的占比在70%以上。销量方面，2030年、2040年、2050年BEV销量分别达到2.04、3.01、3.60千万辆，PHEV销量分别达到4.13、4.30、2.97百万辆。2040年前，新能源汽车销量增速较快；2040年后，由于保有量趋于饱和，销量逐渐趋于稳定，每年的新增销量主要用于补充因达到使用年限而报废退出的车辆。2050年新能源新车销量以纯电动汽车为主，插电式混合动力汽车逐渐退出市场。

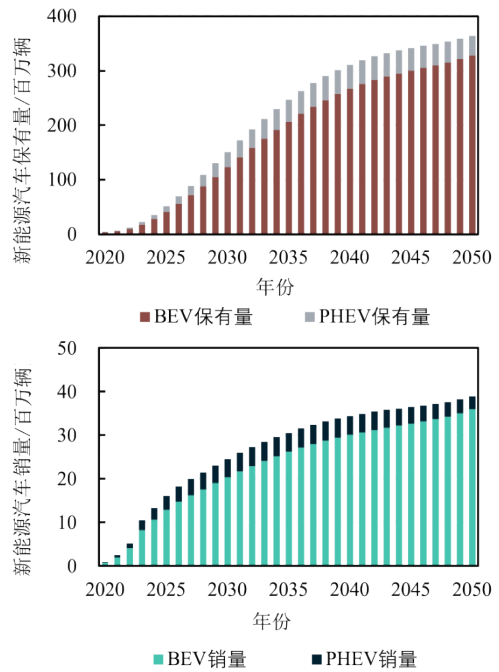


图4 新能源汽车保有量和销量预测

### 3.2 关键金属矿产资源需求

基于新能源汽车的销量计算了2023—2050年的动力电池装机容量。两种电池技术发展情景下，不同阴极材料的动力电池装机容量分布如图5所示。2050年新增动力电池装机容量将达到2 533.68 GWh。LFPR情景下不同阴极材料电池的新增装机容量如下：2030年磷酸铁锂、低/中镍阴极材料、高镍阴极材料3种电池的装机容量分别为928.04、456.84、50.76 GWh；2040年3种材料的电池装机容量分别为1 460.43、638.02、70.89 GWh；2050年

分别为 1 773.58、684.09、76.01 GWh。NMCR 情景下不同阴极材料电池新增装机容量如下：2030 年磷酸铁锂、低/中镍阴极材料、高镍阴极材料 3 种电池的装机容量分别为 763.97、470.17、201.50 GWh；2040 年分别为 902.60、570.03、696.70 GWh；2050 年分别为 760.10、354.72、1 418.86 GWh。两种不同电池技术发展路线的电池市场结构有较大差异，体现在资源需求上也有所不同。

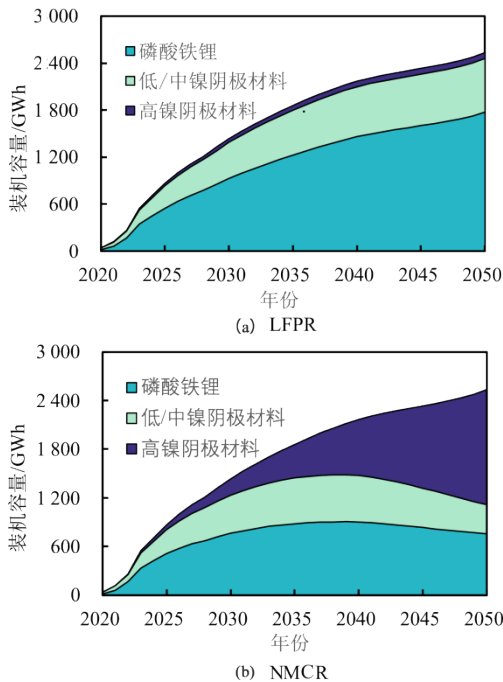


图5 动力电池新增装机容量预测

两种情景下的关键金属资源需求预测结果如图 6 所示。LFPR 情景下，2050 年锂、钴、镍、锰的需求分别达到了 238、169、362、158 千吨，分别约为 2022 年的 9.25、7.68、7.70、7.52 倍。4 种金属需求增速最快的区间都集中在 2022—2030 年间。NMCR 情景下，2050 年锂、钴、镍、锰的需求将分别达到 242、201、1 084、187 千吨，分别约为 2022 年的 9.68、9.14、23.06、8.90 倍。与 LFPR 情景相同，4 种金属需求增速最快的区间也集中在 2022—2030 年间。两种情景对比来看，NMCR 和 LFPR 对锂的需求相近，但对于钴、镍、锰 3 种金属，NMCR 下的需求要显著高于 LFPR，2050 年钴、镍、锰的需求量比 LFPR 要分别高出 32、722、29 千吨，其中，NMCR 镍的需求约为 LFPR 镍需求的 3 倍。

MAISEL 等<sup>[9]</sup>的预测结果显示，在 SSP2 关键金属情景（SSP2-Critical Metal Scenario）下，2040 年，全球电动汽车对锂、钴、镍、锰的年度需求分别为 464、354、2 589、683 千吨。结合本文的计算结果来看，在未来中国对上述 4 种金属的消费在全球总消费中仍占据很大比重。

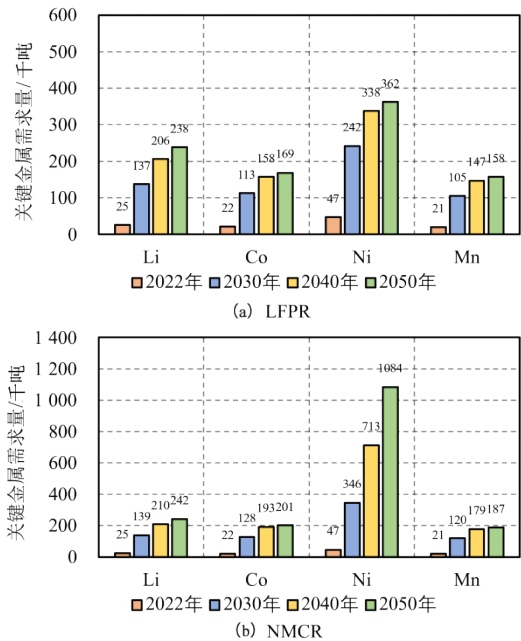


图6 关键金属资源需求预测

### 3.3 关键金属供应风险分析

资源的供应端应包括一次矿产资源的开采和对报废资源的回收二次利用。2022 年，全球锂、钴、镍、锰的一次矿产开采的产量分别是：130、190、3 300、20 000 千吨，中国的产量分别是 19、2.2、110、990 千吨<sup>[37]</sup>。2050 年，中国新能源汽车电池对于锂、钴、镍、锰 4 种金属的需求及其回收潜力如图 7 所示。

从资源需求量来看，两种电池技术发展路线在 2050 年对锂的需求量相近，约为 240 千吨，大约是 2022 年世界锂产量的 1.8 倍，中国锂产量的 12.6 倍。LFPR 路线下，2050 年的钴需求为 169 千吨，低于 2022 年的世界钴产量（190 千吨）；NMCR 路线下的钴需求（201 千吨）则略高于 2022 年的世界钴产量。值得注意的是，中国金属钴的生产能力较弱，仅占全球总产量的 1.16%。两种电池路线对镍的需

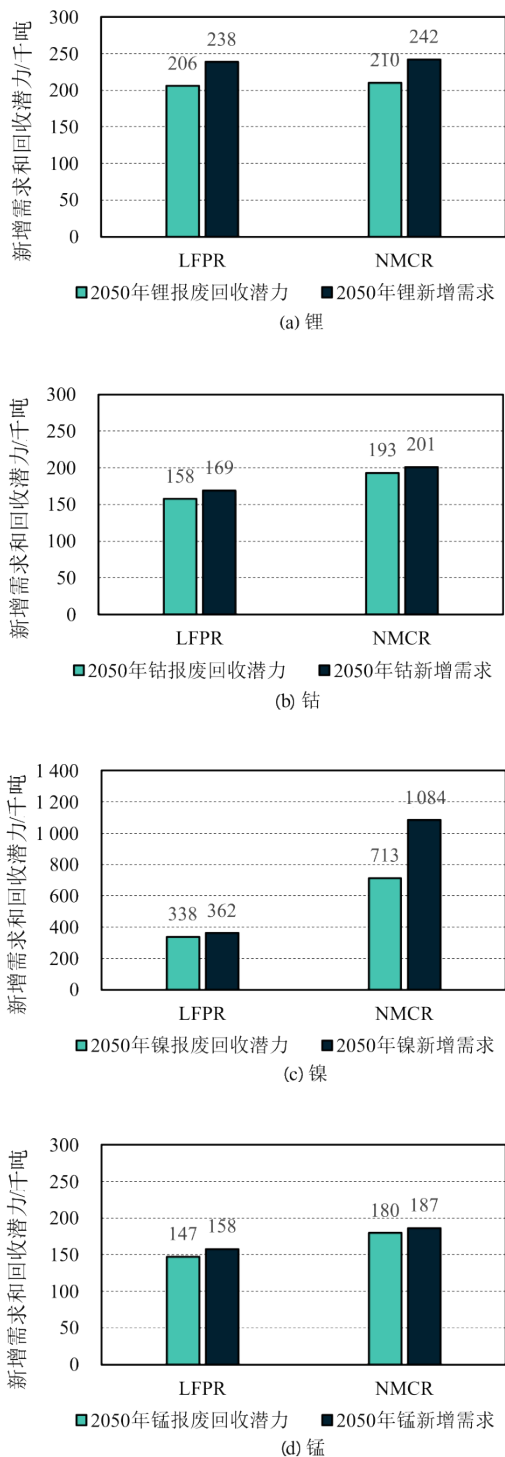


图7 2050年锂、钴、镍、锰需求及报废回收潜力

求有较大的差异。LFPR 路线下 2050 年对镍的需求约为 2022 年中国镍产量的 3.29 倍，NMCR 路线下为 9.85 倍。金属锰在 2050 年的需求在两种路线下分别为 158 千吨和 187 千吨。锰的世界产量和中国产量较高，供应风险较小。

从资源的产地来看，中国的锂、钴、镍本土产量与需求量存在较大差距，本土一次矿产资源开采供应难以满足新能源汽车发展电池材料的需要。从资源的回收潜力来看，在未来中国本土关键金属资源具有巨大的二次回收利用潜力。假设报废回收的动力电池关键金属材料能完全被二次利用，那么 2050 年，LFPR 和 NMCR 路线下，回收锂将分别达到 206 千吨和 210 千吨，这分别是它们在当年需求的 86.5% 和 86.8%；回收钴将分别达到 158 千吨和 193 千吨，分别是当年需求的 93.5% 和 96.0%；回收镍将分别达到 338 千吨和 713 千吨，分别是当年需求的 93.4% 和 65.8%。2050 年，二次回收利用资源可以满足大部分的新增金属需求。鉴于国内目前还缺乏有关废电池回收的全面法律法规，制定相关标准势在必行<sup>[38]</sup>。

#### 4 结论与建议

本文基于 Gompertz 曲线模型、情景分析以及物质流分析的方法对中国 2050 年新能源乘用车电池材料的需求进行了预测，得出的主要结论如下。

1) 新能源汽车的推广降低了汽车行业对传统化石燃料的依赖，减少了交通运输部门的温室气体排放。但制造电池的几种关键金属材料在中国的储量和产量都相对较低，存在一定的供应风险。

2) 2022—2050 年，新能源汽车电池对关键金属矿产资源的需求量提升显著。LFPR 电池路线下，2050 年锂、钴、镍、锰的需求分别是 2022 年需求的 9.25、7.68、7.70、7.52 倍；NMCR 电池路线下，2050 年上述 4 种金属的需求分别是 2022 年的 9.68、9.14、23.06、8.90 倍。从时间上来看，4 种金属需求增速最快的区间都集中在 2022—2030 年。

3) 当前中国本土锂、钴、镍的一次矿产资源开采水平难以满足新能源汽车发展的需要，但金属锰的储量和产量较高，供应风险较小。中国未来的关键金属资源具有巨大的二次回收利用潜力。在 LFPR 和 NMCR 两种情景下，2050 年的回收锂、回收钴和回收镍至少能满足 86.5%、93.5% 和 65.8% 当年对应金属的需求。

基于上述结论, 提出以下建议。

1) 新能源汽车对于实现碳中和目标具有重大意义, 但其发展过程中遇到的资源供给风险问题较突出。考虑到国内相关资源储量和产量均较低, 建议国家层面尽快拓展上游矿产资源供应商, 保障进口资源供给。

2) 磷酸铁锂电池技术路线比三元锂电池技术路线对锂、钴、镍、锰 4 种金属的需求更低, 但总

体来看, 两种技术路线在未来都面临着资源供应不足的问题。建议加大对新兴电池技术的开发与应用, 如固态电池、氢燃料电池等, 以缓解资源压力。

3) 预计到 2050 年, 关键金属资源具有巨大的二次回收利用潜力, 建议尽快建立新能源汽车动力电池报废回收标准体系, 完善废电池回收的法律法规, 加强对报废金属资源的二次回收利用。

## 参考文献 (References)

- [1] 万钢. 新时代推进我国新能源汽车发展的新思考[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(4): 235-238.  
WAN Gang. New Thoughts on Promoting the Development of China's New Energy Vehicles in the New Era [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(4): 235-238. (in Chinese)
- [2] 中国汽车工业协会. 我国新能源汽车产销连续 8 年全球第一 [EB/OL]. (2023-01-24) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content\\_5738622.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content_5738622.htm). China Association of Automobile Manufacturers. China's New Energy Vehicle Production and Sales Have Ranked First Globally for 8 Consecutive Years [EB/OL]. (2023-01-24) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content\\_5738622.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/24/content_5738622.htm). (in Chinese)
- [3] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)的通知 [EB/OL]. (2020-10-20) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm). General Office of the State Council. Notice of the General Office of the State Council on Issuing the Development Plan for the New Energy Vehicle Industry (2021—2035) [EB/OL]. (2020-10-20) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm). (in Chinese)
- [4] International Energy Agency. Global Electric Vehicle Outlook 2022 [R/OL]. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- [5] Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, China Geological Survey (CGS). Assessment Report for Lithium, Cobalt, Nickel, Tin, and Potash Reserves in the World [R]. Beijing: CGS, 2021.
- [6] 邢凯, 朱清, 任军平, 等. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 2023, 42(8): 1402-1421.  
XING Kai, ZHU Qing, REN Junping, et al. Analysis of Global Lithium Resource Characteristics and Market Development Trends [J]. Geological Bulletin, 2023, 42(8): 1402-1421. (in Chinese)
- [7] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国钴资源供应风险评价与治理研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 50-56.  
LIU Quanwen, SHA Jinghua, YAN Jingjing, et al. Risk Assessment and Governance of Cobalt Resource Supply in China [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 50-56. (in Chinese)
- [8] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1317-1328.  
MA Yufang, SHA Jinghua, YAN Jingjing, et al. Research on Safety Evaluation and Countermeasures of Nickel Resource Supply in China [J]. Resource Science, 2019, 41(7): 1317-1328. (in Chinese)
- [9] MAISEL F, NEEF C, MARSCHIEDER-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, 192: 106920.1-106920.11.
- [10] NGUYEN R T, EGGERT R G, SEVERSON M H, et al. Global Electrification of Vehicles and Intertwined Material Supply Chains of Cobalt, Copper and Nickel [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 167: 105198.1-105198.11.
- [11] 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: 104603.1-104603.12.
- [12] 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.
- [13] JONES B, ELLIOTT R J R, NGUYEN-TIEN V. The EV Revolution: The Road Ahead for Critical Raw Materials Demand [J]. Applied Energy, 2020, 280: 115072.1-

- 115072.23.
- [14] 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. ZHENG Linchang, ZHANG Yanan, LI Zeyang, et al. Lithium Recovery Potential of New Energy Vehicles in China Under Different Consumption Scenarios [J]. Resource Science, 2022, 44(1): 97-113. (in Chinese)
- [15] ZHANG Hongyan, LIU Guwang, LI Jianwu, 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, 859: 159964.
- [16] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高. 中国乘用车与商用车保有量预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(6): 868-872. HAO Han, WANG Hewu, OUYANG Minggao. Prediction of China's Passenger and Commercial Vehicle Ownership [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2011, 51(6): 868-872. (in Chinese)
- [17] HAO Han, WANG Hewu, YI Ran. Hybrid Modeling of China's Vehicle Ownership and Projection Through 2050 [J]. Energy, 2011, 36(2): 1351-1361.
- [18] ELSHKAKI A. Long-Term Analysis of Critical Materials in Future Vehicles Electrification in China and Their National and Global Implications [J]. Energy, 2020, 202: 117697.1-117697.14.
- [19] 自然资源保护协会. 中国传统燃油汽车退出时间表研究[R]. 北京: iCET, 2019. Natural Resources Conservation Association. Study on the Exit Schedule of Traditional Chinese Fuel Vehicles [R]. Beijing: iCET, 2019. (in Chinese)
- [20] 中国汽车工程学会. 中国汽车行业中长期发展趋势及用能需求预测模型研究[Z]. 北京: 中国汽车工程学会, 2017. Chinese Society of Automotive Engineers. Research on Medium and Long Term Development Trends and Energy Demand Prediction Models in the Chinese Auto-motive Industry [Z]. Beijing: CSAE, 2017. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022. (in Chinese)
- [22] 陈卫. 中国人口负增长与老龄化趋势预测[J]. 社会科学辑刊, 2022(5): 133-144. CHEN Wei. Prediction of Negative Population Growth and Aging Trends in China [J]. Journal of Social Sciences, 2022(5): 133-144. (in Chinese)
- [23] 陈锡康, 杨翠红, 祝坤福, 等. 2023 年中国经济增长速度的预测分析与政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 81-90. CHEN Xikang, YANG Cuihong, ZHU Kunfu, et al. Forecast Analysis and Policy Recommendations on China's Economic Growth Rate in 2023 [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 81-90. (in Chinese)
- [24] NDRC. China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study [Z]. National Development and Reform Commission, Beijing, China, 2015.
- [25] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线 2.0 [Z]. 北京: 中国汽车工程学会, 2020. Chinese Society of Automotive Engineers. Energy Conservation and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0 [Z]. Beijing: CSAE, 2020. (in Chinese)
- [26] International Energy Agency. World Energy Outlook 2016 [R/OL]. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>.
- [27] 中华人民共和国政府. 我国新能源汽车保有量达 1310 万辆 [EB/OL]. (2013-01-11) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm). The Government of the People's Republic of China. The Number of New Energy Vehicles in China has Reached 13.1 Million [EB/OL]. (2013-01-11) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content\\_5736281.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736281.htm). (in Chinese)
- [28] 陈元华, 杨沿平, 胡纾寒, 等. 我国报废汽车回收利用现状分析与对策建议[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 113-119. CHEN Yuanhua, YANG Yanping, HU Shuhan, et al. Analysis of the Current Situation of Scrap Vehicle Recycling and Suggestions for Countermeasures in China [J]. China Engineering Science, 2018, 20(1): 113-119. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国中央人民政府. 商务部等部门发布《机动车强制报废标准规定》[EB/OL]. (2013-01-14) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/gzdt/2013-01/14/content\\_2311948.htm](https://www.gov.cn/gzdt/2013-01/14/content_2311948.htm). The Central People's Government of the People's Republic of China. The Ministry of Commerce and Other Departments have Issued the "Regulations on Compulsory Scrapping Standards for Motor Vehicles" [EB/OL]. (2013-01-14) [2024-01-23]. [https://www.gov.cn/gzdt/2013-01/14/content\\_2311948.htm](https://www.gov.cn/gzdt/2013-01/14/content_2311948.htm). (in Chinese)
- [30] 余林峰. 中国汽车报废量预测方法及其再利用价值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

- YU Linfeng. Research on the Prediction Method and Reuse Value of China's Automobile Scrap Volume [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [31] 刘永涛, 刘永杰, 袁诗泉, 等. 新能源汽车动力电池回收利用过程减碳成效测算[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 24-32.
- LIU Yongtao, LIU Yongjie, YUAN Shiquan, et al. Assessing Carbon Reduction Effect of New Energy Vehicles During the Power Battery Recycling Process[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(1): 24-32. (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国工业和信息化部公告[EB/OL]. (2013-06-07)[2024-01-23] [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content\\_6885807.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885807.htm).
- The Central People's Government of the People's Republic of China. Announcement of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China [EB/OL]. (2013-06-07) [2024-01-23] [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content\\_6885807.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885807.htm). (in Chinese)
- [33] OLIVETTI E A, CEDER G, GAUSTAD G G, et al. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals [J]. Joule, 2017, 1(2): 229-243.
- [34] 中华人民共和国国家统计局. 中国汽车工业年鉴 2013—2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013—2022.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Automotive Industry Yearbook 2013—2022 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2013—2022. (in Chinese)
- [35] 张雅岚, 苑志祥, 张浩, 等. 高镍三元高比能固态锂离子电池的研究进展[J]. 化学学报, 2023, 81(12): 1724—1738.
- ZHANG Yalan, YUAN Zhixiang, ZHANG Hao, et al. Research Progress of High-Energy-Density Solid-State Lithium Ion Batteries Employing Ni-Rich Ternary Cathodes [J]. Acta Chimica Sinica, 2023, 81(12): 1724—1738. (in Chinese)
- [36] DING Yuanli, CANO Z P, YU Aiping, et al. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives [J]. Electrochemical Energy Reviews, 2019, 2(1): 1-28.
- [37] National Minerals Information Center. Mineral Commodity Summaries 2023 [R/OL]. Reston: USUG, 2023. <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2023>.
- [38] 陈轶嵩, 赵俊玮, 乔洁, 等. 我国电动汽车动力电池回收利用问题剖析及对策建议[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(2): 97-103.
- CHEN Yisong, ZHAO Junwei, QIAO Jie, et al. Analysis and Countermeasures of Recycling Electric Automotive Power Battery in China [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(2): 97-103. (in Chinese)

## 作者简介



谢航 (2000-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车动力电池材料需求预测分析。  
E-mail: xiehang631@sjtu.edu.cn

## 通信作者



谢晓敏 (1976-), 女, 陕西华县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为“碳中和”相关战略及政策、生命周期分析、能源系统评价、区域可持续发展。  
E-mail: xiexiaomin@sjtu.edu.cn