

文章编号: 1004-4051(2024)10-0012-11

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241947

新能源汽车动力蓄电池中关键金属的开发 潜力与碳减排效应研究: 以海南省为例

何朋蔚¹, 刘振宇¹, 彭亚山¹, 左绿水²

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093;

2. 中南大学公共管理学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 近年来, 新能源汽车产业的迅猛发展导致关键金属需求激增。同时, 汽车行业的温室气体排放问题已引起学者们的广泛关注, 新能源汽车的推广使用对于改善此问题具有积极作用。核算新能源汽车动力蓄电池中关键金属的开发潜力和新能源汽车的碳减排潜力可为提升城市矿产循环利用效率和落实碳减排策略的制定提供科学依据。海南省新能源乘用车保有量居全国第二位, 其在推动新能源汽车发展方面发挥着示范性作用。本文基于动态物质流模型, 核算了海南省 2023—2050 年新能源乘用车及其动力蓄电池中关键金属的需求量和回收量的未来发展趋势, 评估了新能源乘用车使用过程中的碳减排潜力。研究结果表明: 一是未来新能源乘用车动力蓄电池中关键金属需求量呈现快速发展模式, 2023—2050 年, 各关键金属的累计需求量: 锂 4.47 万~6.74 万 t、镍 7.64 万~11.51 万 t、钴 2.65 万~3.99 万 t、锰 2.43 万~3.66 万 t; 二是未来新能源乘用车动力蓄电池中关键金属回收量将快速增加, 2023—2050 年, 各关键金属的累计回收量: 锂 1.67 万~2.96 万 t、镍 3.10 万~5.51 万 t、钴 1.07 万~1.91 万 t、锰 0.99 万~1.75 万 t; 三是新能源乘用车的推广使用是有效的碳减排措施, 在现有政策和发展情景下, 新能源乘用车在使用过程中带来的碳减排量将在 2050 年达到最高值为 601.03~768.65 t(消极情景)、650.32~831.79 t(保守情景)、655.35~838.19 t(积极情景)。最后, 本文为关键金属的回收及碳减排策略的制定提供了相关建议。

关键词: 新能源汽车; 关键金属; 潜力评估; 碳减排; 动力蓄电池; 海南省

中图分类号: TD-9; F407.1 **文献标识码:** A

Research on the development potential of critical metals in power batteries and carbon emission reduction effects for new energy vehicles: a case study of Hainan Province

HE Pengwei¹, LIU Zhenyu¹, PENG Yashan¹, ZUO Lyushui²

(1. Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Public Administration, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In recent years, the rapid development of the new energy vehicle industry has led to a surge

收稿日期: 2024-08-16 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 国家社科基金重大项目资助(编号: 23&ZD106, 22&ZD098); 上海市“科技创新行动计划”软科学研究一般项目资助(编号: 24692109700); 上海市高校青年教师培养重点项目资助(编号: 1024303003)

第一作者简介: 何朋蔚, 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事资源环境管理、循环经济等方向研究, E-mail: hepengwei@usst.edu.cn。

通讯作者简介: 左绿水, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事国家金属资源安全、城市矿产方向研究, E-mail: zuo.lvshui@csu.edu.cn。

引用格式: 何朋蔚, 刘振宇, 彭亚山, 等. 新能源汽车动力蓄电池中关键金属的开发潜力与碳减排效应研究: 以海南省为例[J]. 中国矿业, 2024, 33(10): 12-22.

HE Pengwei, LIU Zhenyu, PENG Yashan, et al. Research on the development potential of critical metals in power batteries and carbon emission reduction effects for new energy vehicles: a case study of Hainan Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 12-22.

in demand for critical metals. At the same time, the issue of greenhouse gas emissions in the automotive industry has attracted widespread attention from scholars, and the promotion and use of new energy vehicles play a positive role in improving this problem. Assessing the development potential of critical metals in power batteries of new energy vehicles and the carbon emission reduction potential of new energy vehicles can provide a scientific basis for improving the efficiency of urban mineral recycling and implementing carbon reduction strategies. The number of new energy passenger vehicles in Hainan Province ranks second nationwide, playing a demonstrative role in promoting the development of new energy vehicles. Based on a dynamic material flow model, this paper calculates the future development trends of the demand and recycling volume of critical metals in the power batteries of new energy passenger vehicles in Hainan Province from 2023 to 2050, and assesses the carbon emission reduction potential of new energy passenger vehicles during their use. The research results show that: ①the demand volume for critical metals in the power batteries of new energy passenger vehicles in the future will show a rapid development trend. From 2023 to 2050, the cumulative demand volume for each critical metal: lithium 44 700-67 400 t, nickel 76 400-115 100 t, cobalt 26 500-39 900 t, manganese 24 300-36 600 t. ②The recycling volume of critical metals in the power batteries of new energy passenger vehicles in the future will increase rapidly. From 2023 to 2050, the cumulative recycling volume for each critical metal: lithium 16 700-29 600 t, nickel 31 000-55 100 t, cobalt 10 700-19 100 t, manganese 9 900-17 500 t. ③The promotion and use of new energy passenger vehicles is an effective measure for carbon emission reduction. Under the current policies and development scenarios, the carbon emission reduction volume brought about by the use of new energy passenger vehicles will reach its highest value in 2050, which is 601.03-768.65 t (pessimistic scenario), 650.32-831.79 t (conservative scenario), 655.35-838.19 t (positive scenario). Finally, this paper provides relevant suggestions for the formulation of recycling strategies for critical metals and carbon emission reduction strategies.

Keywords: new energy vehicle; critical metal; potential assessment; carbon emission reduction; power battery; Hainan Province

0 引言

新能源汽车是指采用非传统车用燃料作为动力来源,或使用传统车用燃料但配备新型车载动力装置,融合先进的动力控制与驱动技术,具备先进技术原理及新技术和新结构的汽车^[1]。新能源汽车构成了城市矿产领域的一个细分市场,而回收报废新能源汽车中的关键金属是城市矿产循环利用的一个重要环节。近年来,能源与环境问题对传统汽车产业发展构成了严峻挑战,新能源汽车凭借其独特的节能环保优势脱颖而出^[2]。中国是全球最大的新能源汽车生产国和消费国,海南省是首个明确提出 2030 年禁售燃油车的省份,新能源汽车推广应用成绩显著^[3-4]。根据《海南省新能源汽车推广中长期行动方案(2023—2030 年)》阶段性目标,到 2025 年,海南省将累计推广新能源汽车超 50 万辆,新增新能源汽车占比超过 60%。到 2030 年,海南省将累计推广新能源汽车超 150 万辆,新能源汽车保有量占比超过 45%,私人用车领域新增和更换新能源汽车占比达 100%^[5]。随着新能源乘用车需求的增长,动力蓄电池及其相关关键金属的需求也相应提升。2023 年,中国新能源汽车动力蓄电池需求达到 415 GWh 以上,比 2022 年增长 35%,新能源汽车动力蓄电池对锂、钴、镍的

需求量约为 140 kt、150 kt、370 kt,分别占相应金属总需求量的 85%、70%、10%^[6]。此外,乘用车的使用是温室气体排放的重要项目,乘用车的二氧化碳直接排放量占交通部门排放总量的 50%^[7]。在乘用车使用过程中,由燃料消耗所产生的二氧化碳排放量占其整个生命周期内二氧化碳排放总量的 68%~75%^[8]。因此,乘用车在使用过程中的碳减排潜力最大。

目前,国内外学者对新能源汽车中关键金属的研究主要有以下两个方面。一是关于新能源汽车关键金属开发潜力的相关研究。邢佳韵等^[9]通过对新能源汽车发展趋势的展望分析了新能源汽车对锂、钴、镍等矿产资源到 2035 年的全球需求,研究得出 2035 年锂、钴、镍在新能源汽车中的全球总消费量将分别增长至当前的 16.0 倍、4.0 倍、2.4 倍;郑林昌等^[10]测算了中国新能源汽车生产端的锂消费,结果表明中国锂电池的生产技术持续提升,单位储电量的锂消费由 0.166 2 kg/kW·h 下降到 0.146 3 kg/kW·h;LIU 等^[11]分析了金属供应短缺对中国电动汽车行业发展的影响,发现中国目前的资源无法满足电动汽车产业的金属需求,金属短缺问题仍然存在;HUANG 等^[12]预测了中国电动汽车对锂离子电池关键金属的需求,评估了关键金属的回收对需求的缓释效应,结果指

出到 2050 年我国锂、钴、镍需求分别增长 42 倍、17 倍、32 倍;周园园等^[13]根据全球新能源汽车产业用镍情况分析全球镍资源供需和产业变化,指出未来全球镍产量能够满足动力电池领域增长的消费需求。二是关于新能源汽车减碳的相关研究。WANG 等^[14]探讨了推广新能源汽车对降低碳强度的效果,结果表明新能源汽车的推广使碳强度降低了约 4.5%,并为构建低碳交通系统提供了一些政策建议;XIONG 等^[15]分析了新能源汽车的使用对省级能效的影响,研究指出新能源汽车的使用不仅显著提高了各省份的能源效率,而且可以缩小省际能效差异,为新能源汽车的广泛应用提供了有益的参考;LI 等^[16]指出新能源汽车已成为减碳的重要驱动力,研究评价了新能源汽车补贴政策对实现碳减排的有效性,结果表明新能源汽车补贴政策可以通过促进新能源汽车销量来减少碳排放;金理军等^[17]为解决当前电动汽车碳排放评估不准确问题计算了其生命周期各阶段所产生的碳排放量,结果表明汽车使用阶段的碳排放量最高,该研究对于细化碳排放分析和提升降碳策略准确性具有重要意义;陈蕾等^[18]在研究中分析了新能源汽车动力电池生产过程中的碳足迹,以及生产工艺和能源投入对碳排放的影响,提出了减少碳排放的相应措施,为交通领域实现有效碳减排提供了思路。由此可见,众多研究者在新能源汽车关键金属和碳减排方面已取得相应成就,为现实生活中相关工作提供了明确的指导。尽管如此,目前,针对新能源汽车关键金属和碳减排的研究仍然存在不足之处。首先,大多数研究聚焦于国家层面和全球层面的分析,相比之下,针对特定区域的研究相对较少。为了提高矿产资源治理水平,需要更多区域尺度的研究来了解绿色转型目标与矿产资源之间的关系^[11]。其次,当前的研究主要聚焦于单一材料和特定类型的电池,而对多种材料和不同种类动力电池的研究则相对不足。此外,关于中国新能

源汽车碳减排的具体量化数据方面讨论较少。

综上所述,本文在区域尺度上以新能源乘用车及其动力电池中关键金属为研究对象,采用动态物质流模型,核算了海南省 2023—2050 年新能源乘用车及其动力电池中关键金属的需求量、报废量、回收量未来发展情景,分析了新能源乘用车在使用过程中的碳减排潜力。

1 研究方法

1.1 概念界定

本文以新能源私人乘用车(私人小型载客汽车)及其物质材料(锂、镍、钴、锰关键金属)为研究对象。当前,新能源乘用车市场以纯电动汽车(Battery Electric Vehicles, BEV)、插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV)为主。因此,本文对新能源乘用车中的纯电动汽车(BEV)和插电式混合动力汽车(PHEV)进行核算。鉴于关键金属主要应用于新能源乘用车动力电池,本文仅核算新能源乘用车动力电池中关键金属的报废量与回收量。

1.2 系统界定

海南省新能源乘用车物质代谢与碳排放核算模型如图 1 所示^[9]。关键金属在经过开采和精炼后转化为原材料,进而被纳入新能源乘用车的生产制造流程,并最终投放市场。随着消费者购买并使用这些车辆一段时间后,其会进入报废周期。在这一过程中,报废的新能源乘用车动力电池中所含的部分关键金属通过回收再利用转化为可再次投入新能源乘用车制造的二次资源,实现循环利用;而另一部分金属,由于未被有效回收,便从循环系统中流失。该研究的时间边界为 2023—2050 年,空间范围为海南省。

1.3 模型与方法

1.3.1 乘用车保有量

海南省乘用车保有量的核算分为两个阶段:历史(2010—2022 年)和预测(2023—2050 年)。2010—2022 年的乘用车保有量数据来自《中国统计年鉴》^[19]。

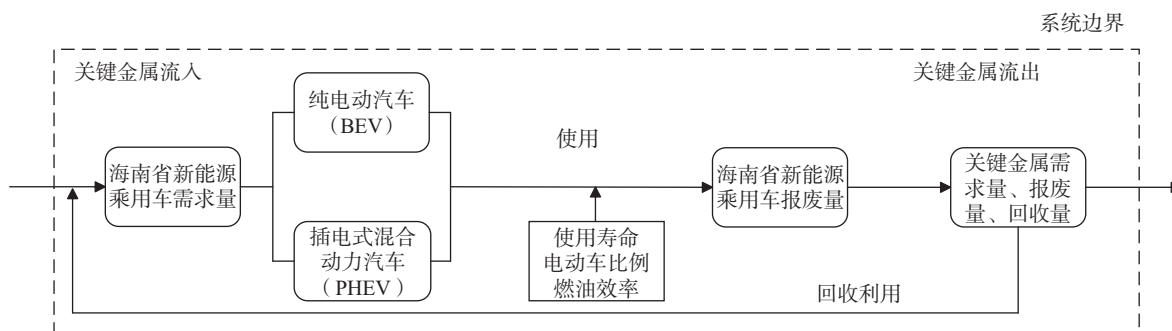


图 1 海南省新能源乘用车物质代谢与碳排放核算模型

Fig. 1 Dynamic model for the estimation of material metabolism and direct carbon emissions of new energy passenger vehicles in Hainan Province

2023—2050 年的乘用车保有量 (Stock, S) 由海南省第 t 年人均乘用车保有量 (Stock Level Per Capita, SPC) 和第 t 年人口数量 (Population, P) 计算得到, 具体公式见式 (1)。

$$S(t) = SPC(t) * P(t) \quad (1)$$

利用三参数 logistic 增长曲线来模拟 2023—2050 年间海南省人均乘用车保有量变化趋势^[3,20], 具体公式见式 (2)。

$$SPC(t) = \frac{K}{1 + (\frac{K}{SPC_0} - 1) * \exp(-\frac{K * d_0}{SPC_0 * (K - SPC_0)} * (t - t_0))} \quad (2)$$

式中: $SPC(t)$ 为第 t 年的人均乘用车保有量; SPC_0 为 t_0 年 (2022 年) 的人均乘用车保有量; d_0 为 t_0 年人均乘用车保有量的初始变化率; K 为 2050 年人均乘用车保有量的饱和水平。

1.3.2 新能源乘用车需求量和报废量

正态分布常用于构建产品服务年限模型, 且已有学者利用正态分布来模拟乘用车的使用寿命并计算其报废量^[3,21-22]。本文采用正态分布表征新能源乘用车的寿命分布, 概率密度分布函数见式 (3)。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}) \quad (3)$$

式中: μ 为平均使用寿命; σ 为平均使用寿命的标准差。本文研究的概率密度分布如图 2 所示。

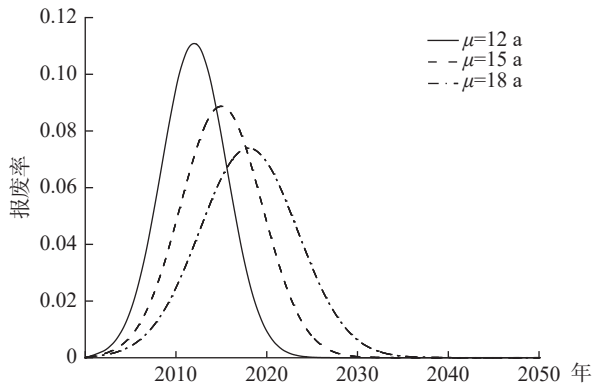


图 2 新能源乘用车寿命分布曲线

Fig. 2 Life distribution curves of new energy passenger vehicles

基于乘用车使用寿命模型, 结合动态物质流 (DMFA) 方法计算出每个目标年份乘用车的需求量和报废量, 具体公式见式 (4) 和式 (5)。

$$F_{out}(t) = \sum_{i=2010}^t F_{in}(t) * f(t-i) \quad (4)$$

$$F_{in}(t) = S(t) - S(t-1) + F_{out}(t) \quad (5)$$

式中: $F_{out}(t)$ 为乘用车在第 t 年的理论报废量; $f(t-i)$

为第 i 年生产的乘用车在第 t 年报废的概率; $F_{in}(t)$ 为乘用车在第 t 年的理论需求量。

新能源乘用车在第 t 年的理论需求量由第 t 年的乘用车理论需求量 ($F_{in}(t)$) 和第 t 年的新能源乘用车渗透率 ($R_{NEV}(t)$) 计算得出, 具体公式见式 (6)。

$$F_{NEV}^{in}(t) = F_{in}(t) * R_{NEV}(t) \quad (6)$$

新能源乘用车渗透率 (R_{NEV}) 的变化趋势用余弦函数进行模拟^[3,20], 具体公式见式 (7)。

$$R_{NEV}(t) = \frac{(\hat{R}_{NEV} - R_{NEV,0})}{2} (1 - \cos(\frac{\pi(t-t_0)}{t_1-t_0})) + R_{NEV,0} \quad (7)$$

式中: $R_{NEV,0}$ 为 2022 年新能源乘用车的渗透率; $\hat{R}_{NEV}$ 为新能源乘用车渗透率的饱和水平; t_0 为初始年份 (2022 年); t_1 为达到饱和水平的年份。

BEV 和 PHEV 在第 t 年的理论需求量由第 t 年的新能源乘用车理论需求量 ($F_{NEV}^{in}(t)$) 和第 t 年 NEV 理论需求量中 BEV 和 PHEV 的比例 ($R_{NEV-BEV/PHEV}(t)$) 计算得出, 具体公式见式 (8)。

$$F_{BEV/PHEV}^{in}(t) = F_{NEV}^{in}(t) * R_{NEV-BEV/PHEV}(t) \quad (8)$$

基于式 (8) 计算得出的 BEV 和 PHEV 的理论需求量, 通过式 (4) 可以计算出 BEV 和 PHEV 的理论报废量, 二者之和即为新能源乘用车的理论报废量。

1.3.3 关键金属需求量、报废量和回收量

本文假设新能源乘用车的使用寿命与其动力电池使用寿命相同, 基于每一目标年份 BEV 和 PHEV 的需求量 ($F_{BEV/PHEV}^{out}(t)$) 和报废量 ($I_{BEV/PHEV}^j(t)$), 结合第 t 年 j 类关键金属在 BEV 和 PHEV 中的使用强度 ($I_{BEV/PHEV}^j(t)$), 可以计算出第 t 年 BEV 和 PHEV 中 j 类关键金属的需求量 ($MD_{BEV/PHEV}^j(t)$) 和报废量 ($OutflowM_{BEV/PHEV}^j(t)$), 具体公式见式 (9)~式 (12)。

$$MD_{BEV/PHEV}^j(t) = F_{BEV/PHEV}^{in}(t) * I_{BEV/PHEV}^j \quad (9)$$

$$OutflowM_{BEV/PHEV}^j(t) = F_{BEV/PHEV}^{out}(t) * I_{BEV/PHEV}^j \quad (10)$$

$$I_{BEV/PHEV}^j(t) = C_{BEV/PHEV}(t) * B_j \quad (11)$$

$$B_j = BS_k * B_{k,j} \quad (12)$$

式中: $C_{BEV/PHEV}(t)$ 为第 t 年 BEV 或 PHEV 的动力蓄电池的容量, kW·h; B_j 为动力蓄电池中关键金属 j 的含量, kg/kW·h; BS_k 为 k 类动力蓄电池的市场份额; $B_{k,j}$ 为 k 类动力蓄电池中关键金属 j 的含量。

第 t 年关键金属 j 的回收量 ($RM_j(t)$) 由第 t 年新能源乘用车中关键金属 j 的报废量 ($OutflowM_{BEV/PHEV}^j(t)$)、第 t 年报废新能源乘用车收集率 ($CR_{NEV}(t)$) 和报废动力电池中关键金属 j 的回收率 (RR_j) 计算得出, 具体公式见式 (13)。

$$RM_j(t) = Outflow M_{NEV}^j(t) * CR_{NEV}(t) * RR_j \quad (13)$$

1.3.4 新能源汽车的碳减排效应核算

乘用车使用过程中的碳排放量由燃油车保有量、年平均行驶里程、燃油效率、燃油能量密度和碳排放强度计算得出^[3,20],具体公式见式(14)。

$$G(t) = (S(t) - (\sum_{i=2010}^t F_{BEV}^{in}(t) - \sum_{i=2010}^t F_{BEV}^{out}(t))) * K * F * U * V \quad (14)$$

式中: $G(t)$ 为第 t 年的二氧化碳(CO_2)排放量; $F_{BEV}^{in}(t)$ 和 $F_{BEV}^{out}(t)$ 分别为第 t 年纯电动乘用车的销量和报废量; K 为年平均行驶里程; F 为燃油效率; U 为燃油的能量密度; V 为燃油的碳排放强度。

1.4 模型参数与情景设置

人均乘用车保有量(SPC)。未来人均乘用车保有量和水平(K)参考相关文献^[3,20]进行设定,即到2050年海南省人均乘用车保有量为0.30辆/人(低保有量情景)、0.45辆/人(中等保有量情景)、0.60辆/人(高保有量情景)。2023—2050年间的人均乘用车保有量由式(2)计算得出,其中, d_0 为2022年的变化率(8.46%), SPC_0 为2022年人均乘用车保有量(0.141辆/人)。

人口数量(P)。海南省2010—2023年的人口数量数据来自国家信息中心中经网^[23]、《中国统计年鉴》^[19]和海南省统计局发布的统计公报^[24]; 2024—2050年的人口数量根据相关文献^[25-26]对海南省未来人口增长率的研究结果计算得到。

乘用车平均使用寿命(μ)。参考相关文献^[3,20], 本文将乘用车的平均使用寿命设定为12 a(低)、15 a(中)、18 a(高)3个情景。

寿命的标准差(σ)。寿命的标准差设定为平均使用寿命的30%^[12]。

新能源乘用车渗透率(R_{NEV})。①消极情景: 考虑到欧洲取消了2035年禁售燃油车的计划, 以及宝马、奔驰、丰田等车企调整了既定的全电动化目标, 决定继续专注于燃油车的研发和生产等情况, 本文假定在消极情景下海南省新能源乘用车渗透率于2050年达到100%。②保守情景: 根据《第26届联合国气候变化大会关于加速乘用车和箱式货车实现100%零排放转型的宣言》^[27]的承诺、《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》^[28]和中国2060年前实现碳中和的目标^[29], 本文假定海南省新能源乘用车渗透率于2040年达到100%。③积极情景: 海南省人民政府制定的《海南省新能源汽车推广中长期行动方案(2023—2030年)》^[5]中指出到2030年私人用车领域

新增和更换新能源汽车占比达100%, 因此, 本文设定海南省在政策积极推动下新能源乘用车渗透率于2030年达到100%。2022年, 海南省新能源乘用车渗透率为42.1%, 其渗透率变化趋势由式(7)的余弦函数曲线模拟。

新能源乘用车理论需求量中BEV和PHEV的比例($R_{NEV-BEV/PHEV}$)。2022年, 海南省新能源乘用车理论需求量中BEV和PHEV的比例分别为84.54%和15.46%。根据文献调研^[30], 本文假设到饱和年份BEV的比例增至90%、PHEV的比例减至10%。BEV和PHEV的比例变化趋势由式(7)的余弦函数曲线模拟。

BEV或PHEV的动力蓄电池容量($C_{BEV/PHEV}$)。参考SAKUNAI等^[31]对新能源乘用车动力蓄电池容量的调研数据, 假设2010—2022年间BEV和PHEV动力蓄电池容量保持不变, 分别为40 kW·h/辆和9 kW·h/辆。2023年12月12日, 工业和信息化部发布了第七十二批《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》, 目录中BEV和PHEV的动力蓄电池容量最大值分别为102.7 kW·h和40.3 kW·h^[32]。因此, 本文假设到2050年BEV和PHEV动力蓄电池容量分别为102.7 kW·h和40.3 kW·h, 2023—2050年, BEV和PHEV动力蓄电池的容量由式(7)的余弦函数曲线模拟。

动力蓄电池中关键金属 j 的含量(B_j)。根据中国汽车动力电池产业创新联盟^[33]数据, 2023年, 我国三元(NMC、NCA)电池和磷酸铁锂(LFP)电池累计装车量分别占总装车量的32.6%和67.3%。因此, 本文假定三元(NMC、NCA)电池和磷酸铁锂(LFP)电池的市场份额分别为33%和67%。 k 类动力蓄电池中关键金属 j 的含量数据来自DUNN等^[34]的研究。动力蓄电池市场份额与关键金属含量数据见表1。

报废新能源乘用车收集率(CR_{NEV})。考虑到大量的“失踪、事故、自燃车辆”和出口, 2010—2022年的收集率设定为51%, 2050年的收集率设定为90%^[12]。2023—2050年, 报废新能源乘用车收集率的变化趋势由式(7)的余弦函数曲线模拟。

报废动力蓄电池中关键金属 j 的回收率(RR_j)。当前, 动力蓄电池回收工艺中湿法冶金工艺因金属回收率高被大规模应用^[12]。本文假设所有被回收的动力蓄电池都使用湿法冶金回收工艺处理, 关键金属锂、钴、镍、锰的湿法冶金回收率来自DUNN等^[34]的研究, 分别为90%、98%、98%、98%。

年平均行驶里程(K)。HABIB等^[35]的研究指出全球每辆乘用车每年平均行驶19 300 km, 因此, 本文假设乘用车年平均行驶里程为19 300 km。

燃油效率(F)。参考《中国汽车低碳行动计划研

表 1 新能源乘用车动力蓄电池市场份额和关键金属含量

动力蓄电池类型及市场份额		关键金属含量/(kg/(kW·h))			
		Li	Ni	Co	Mn
三元电池	NMC111	0.141	0.351	0.352	0.328
	NMC523	0.136	0.508	0.204	0.285
	NMC622	0.118	0.531	0.178	0.166
	NMC811	0.100	0.600	0.075	0.070
	NCA	0.102	0.672	0.127	0.000
	均值	0.119	0.532	0.187	0.170
	市场份额/%	33			
磷酸铁锂电池	LFP	0.095	0.000	0.000	0.000
	市场份额/%	67			
加权平均值		0.103	0.176	0.061	0.056

注：市场份额和关键金属含量数据分别来自中国汽车动力电池产业创新联盟^[34]和DUNN等^[35]的研究。

究报告 2020》^[8]和相关文献^[3]，本文假设 2010—2022 年乘用车燃油效率为 7.2 L/100 km，2023—2050 年，乘用车燃油效率提升至 4.5 L/100 km。

燃油的能量密度(U)和碳排放强度(V)。根据文献调研^[3]结果，本文将燃油的能量密度设定为 33.3 MJ/L，将燃油的碳排放强度设定为 70 g/MJ。

2 结果与讨论

2.1 新能源乘用车需求量和报废量

本文根据海南省人均乘用车保有量和人口数量得出海南省乘用车保有量曲线，如图 3 所示。由图 3 可知，2010—2022 年，海南省乘用车保有量增长速度较为缓慢，仅由 20.77 万辆增长至 145.25 万辆。2023—2040 年，乘用车保有量加速增长，由 175.97 万辆增长至 395.81 万辆。随着海南省未来人口增长逐渐缓慢，2040 年后乘用车保有量增速变缓，由 403.77 万辆增长至 2050 年的 453.38 万辆。

2023—2050 年海南省新能源乘用车需求量如图 4 所示。由图 4 可知，在不同情景下，海南省 BEV 理论

需求量呈现“S”型增长趋势。BEV 理论需求量于 2024 年加速增长，在 2045 年(消极情景)、2040 年(保守情景)、2030 年(积极情景)增速达到最高，此时，新能源乘用车理论需求量分别为 9.07 万~33.49 万辆、9.28 万~33.31 万辆、10.71 万~25.79 万辆，之后需求量缓慢上升，截至 2050 年，理论需求量达到 36.41 万辆、31.11 万辆、27.84 万辆。PHEV 理论需求量在保守情景和积极情景下呈现先增加后减少的趋势，最高分别达到 4.43 万辆、4.63 万辆，随后需求量迅速下降，于 2050 年下降至 4.05 万辆、3.46 万辆、3.09 万辆。PHEV 理论需求量在消极情景下呈现“S”型增长趋势，分别为 1.74 万~4.05 万辆、1.77 万~3.46 万辆、1.65 万~3.09 万辆。三种情景下，新能源乘用车渗透率分别于 2050 年、2040 年、2030 年达到 100%，因此，同一使用寿命下的 BEV 理论需求量、PHEV 理论需求量将会在 2050 年达到相同值。

2023—2050 年海南省新能源乘用车报废量如图 5 所示。由图 5 可知，2023—2030 年，新能源乘用车刚刚购买使用，处于使用寿命初期，报废量较少，呈现缓慢上升趋势，BEV 理论报废量由 0.06 万辆增长至最高 1.89 万辆，PHEV 理论报废量由 0.001 万辆增长至最高 0.34 万辆。2031—2050 年，报废量快速上升，BEV 理论报废量为 2.33 万~32.07 万辆，PHEV 理论报废量为 0.42 万~4.42 万辆。使用寿命越短，报废高峰期越早到来。在使用寿命为 12 a 的情况下，新能源乘用车由于较短的使用寿命，报废高峰期的到来也相对较早，因此，报废量始终保持在较高水平。相对而言，使用寿命为 18 a 的新能源乘用车由于其较长的使用寿命，因此，报废量相对较低。

2.2 关键金属需求量、报废量、回收量

随着新能源乘用车需求量的增长，关键金属需

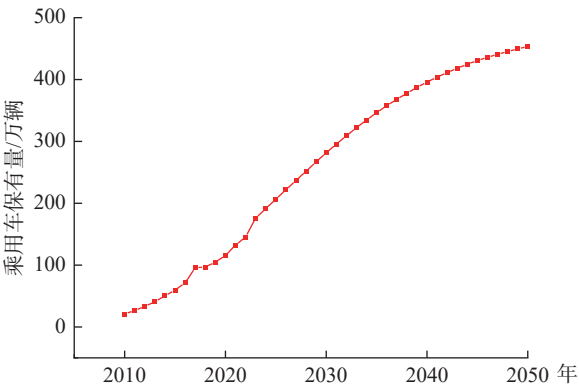


图 3 2010—2050 年海南省乘用车保有量
Fig. 3 Stocks of passenger vehicles in Hainan Province
from 2010 to 2050

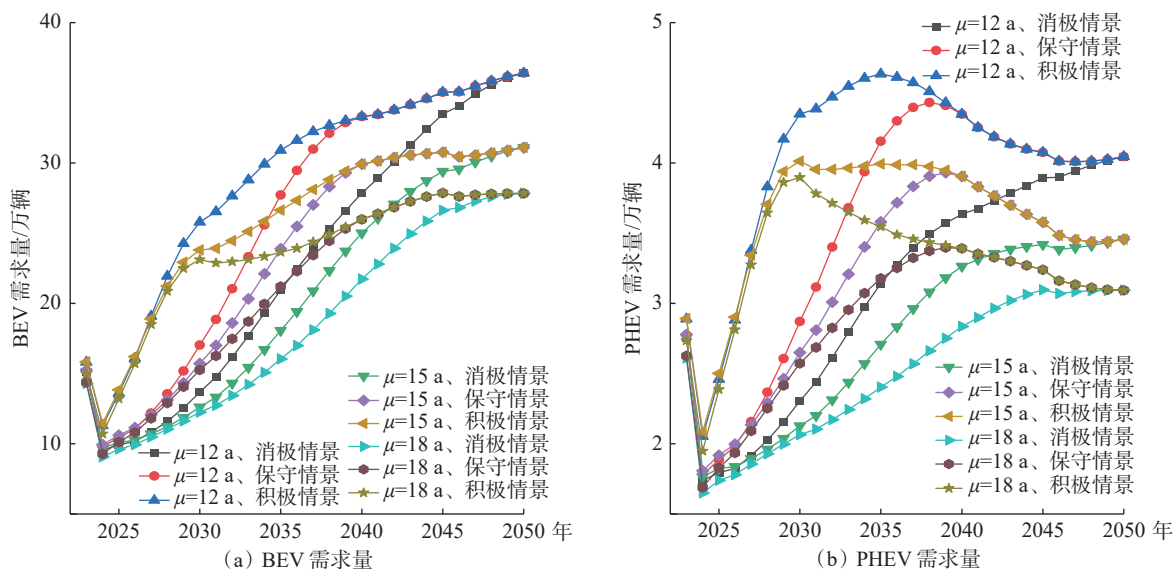


图4 2023—2050年海南省BEV需求量、PHEV需求量

Fig. 4 BEV and PHEV demand volume in Hainan Province from 2023 to 2050

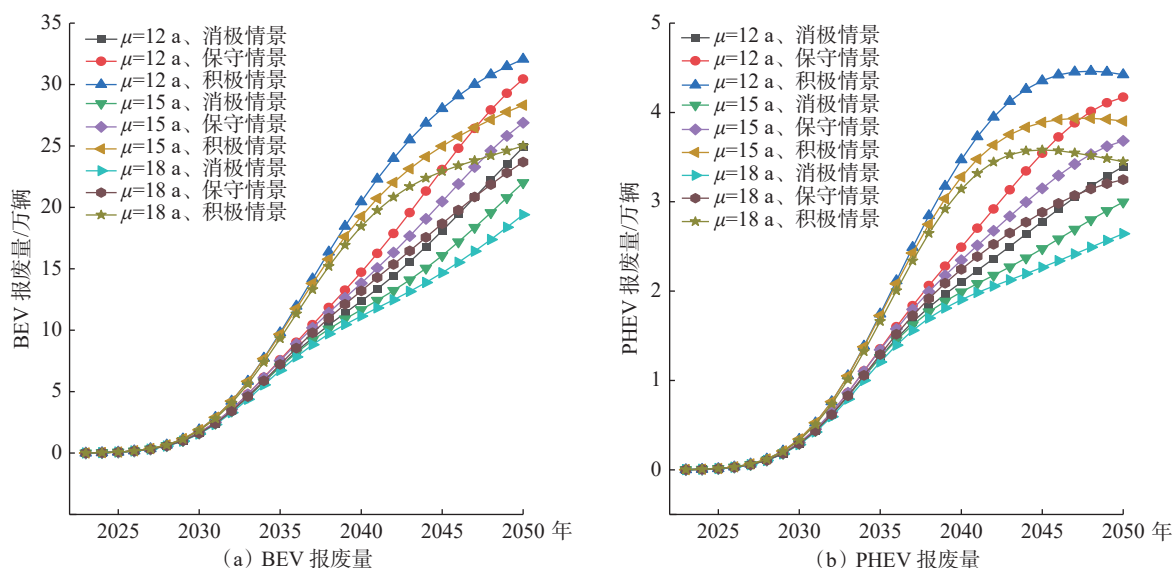


图5 2023—2050年海南省BEV报废量、PHEV报废量

Fig. 5 BEV and PHEV scrap volume in Hainan Province from 2023 to 2050

求量也呈现增长趋势,关键金属使用强度和新能源乘用车渗透率的不同使关键金属需求量呈现不同的变化,如图6所示。由图6可知,与新能源乘用车需求量变化趋势一致,2023—2050年,关键金属需求量也呈现快速增长的趋势,在2045年(消极情景)、2040年(保守情景)、2030年(积极情景)增速达到最高,此时,锂、镍、钴、锰的需求量分别为2 805.41~3 692.64 t、4 793.71~6 309.07 t、1 661.46~2 186.67 t、1 525.27~2 007.43 t,之后需求量缓慢上升,2050年,锂、镍、钴、锰的需求量最高分别达到4 018.93 t、6 867.30 t、2 380.14 t、2 185.05 t。整体来看,积极情景下锂、镍、钴、锰的需求量明显高于保守情景和消极

情景,这是因为积极情景下新能源乘用车渗透率最早达到100%。三种情景下,新能源乘用车渗透率分别于2050年、2040年、2030年达到100%,因此,同一使用寿命下的关键金属需求量将会在2050年达到相同值。

2023—2050年海南省新能源乘用车动力蓄电池中关键金属报废量如图7所示。由图7可知,与新能源乘用车报废量变化趋势一致,2023—2050年,海南省新能源乘用车动力蓄电池中关键金属报废量也呈现先增长缓慢后快速增长的趋势。关键金属报废量于2034年开始增长速率加快,此时,锂、镍、钴、锰的报废量分别为390.16~542.59 t、666.68~927.15 t、

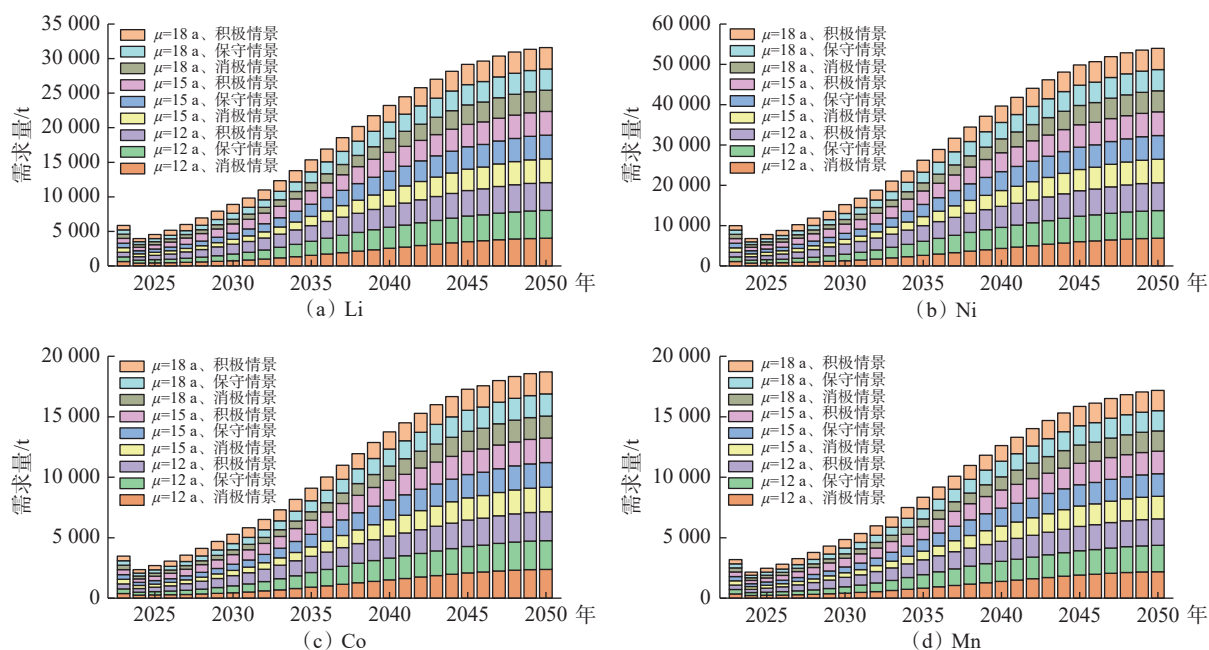


图6 2023—2050年海南省新能源乘用车动力蓄电池中关键金属需求量

Fig. 6 Demand volume of critical metals in power batteries for new energy passenger vehicles in Hainan Province from 2023 to 2050

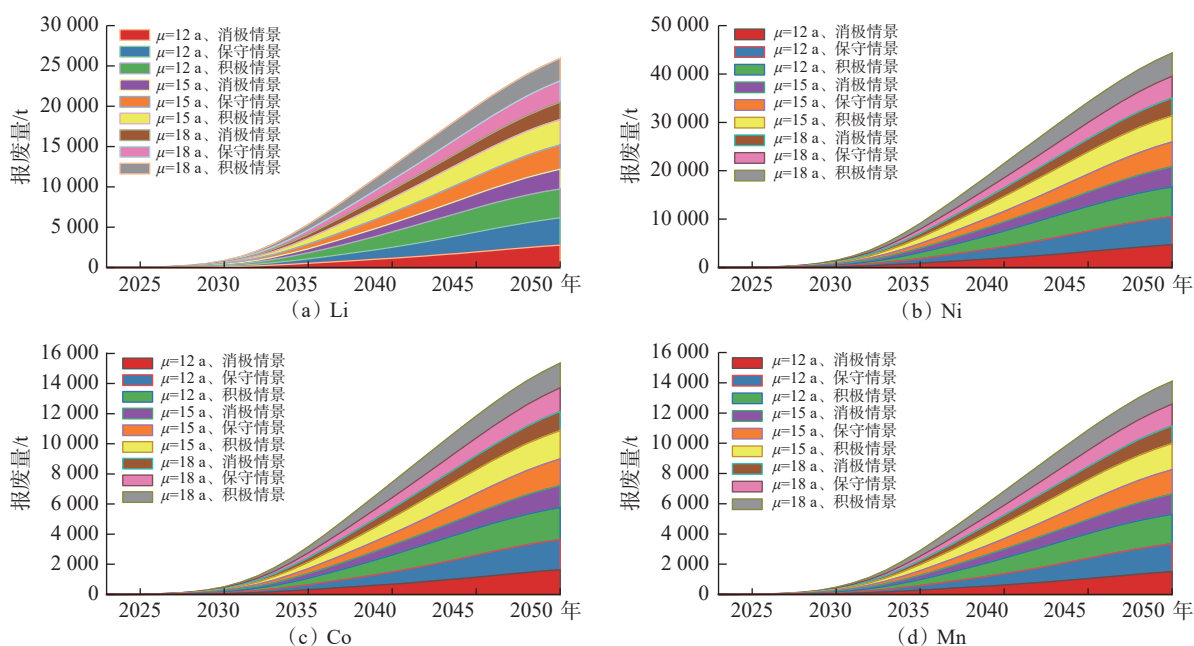


图7 2023—2050年海南省新能源乘用车动力蓄电池中关键金属报废量

Fig. 7 Scrap volume of critical metals in power batteries for new energy passenger vehicles in Hainan Province from 2023 to 2050

231.07~321.34 t、212.13~295.00 t。2050年,锂、镍、钴、锰的报废量最高分别达到3 575.76 t、6 110.03 t、2 117.68 t、1 944.10 t。由此可知,报废新能源乘用车动力蓄电池中镍、钴、锂、锰等关键金属含量巨大,其回收潜力巨大,对这些关键金属进行有效回收利用是必要的。

关键金属回收量随着关键金属报废量的增长也呈增长趋势,关键金属使用强度和新能源乘用车渗

透率的不同使关键金属回收量有不同变化,如图8所示。由图8可知,2023—2035年,由于新能源乘用车刚刚投入使用,处于使用寿命初期,报废新能源乘用车量较少,因此,关键金属回收量也较少,整体增长缓慢。海南省新能源乘用车动力蓄电池中锂、镍、钴、锰的回收量分别为0.12~446.06 t、0.23~829.95 t、0.08~387.65 t、0.07~264.08 t。2036—2050年,由于达到报废年限,关键金属回收量随着报废量的变化快

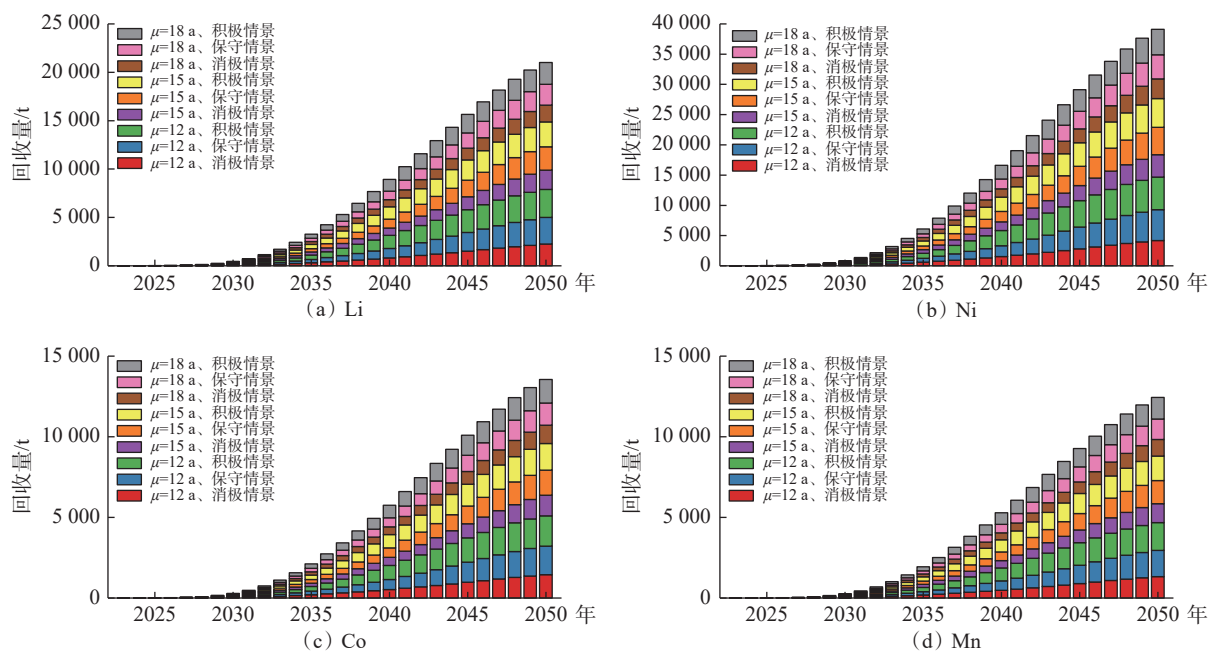


图8 2023—2050年海南省新能源乘用车动力电池中关键金属回收量

Fig. 8 Recycling volume of critical metals in power batteries for new energy passenger vehicles in Hainan Province from 2023 to 2050

速增长。海南省新能源乘用车动力电池中锂、镍、钴、锰的回收量分别为387.71~2 896.36 t、721.40~5 389.05 t、250.03~1 867.80 t、229.54~1 714.70 t。

2.3 新能源乘用车碳减排潜力核算

2023—2050年海南省新能源乘用车碳减排量如图9所示。由图9可知,随着社会对新能源乘用车需求的迅速增长,由此带来的二氧化碳减排量也在快速增加。保守情景和积极情景下的碳减排量成“S”型增长趋势,在2040年增速达到最高,此时,新能源乘用车碳减排量分别为481.40~603.05 t、561.88~696.89 t,碳减排量在2050年达到最高,分别为650.32~831.79 t、655.35~838.19 t。消极情景下的碳减排量趋于直线增长,由2023年的最低40.93 t增长至2050年的最高768.65 t。整体来看,积极情景下的碳减排

量明显高于保守情景和消极情景,原因在于积极情景下新能源乘用车渗透率最高,最早达到100%,最早代替了燃油车。由此可知,新能源乘用车的推广使用对降低二氧化碳排放量做出了极大贡献,有助于我国早日实现碳中和、碳达峰目标,缓解温室效应。

2.4 讨论

本文以动态物质流为基础,对新能源乘用车及其所需关键金属的需求量和报废量的未来发展趋势进行了模拟,同时评估了新能源乘用车使用过程中的碳减排潜力。核算结果并不是完全准确的,因为在核算过程中仍然存在未考虑的因素需要完善,以提高核算结果的准确性。新能源汽车的平均寿命作为产品服务年限模型的重要参数,直接影响着报废量和回收量的核算,新能源乘用车平均使用寿命越

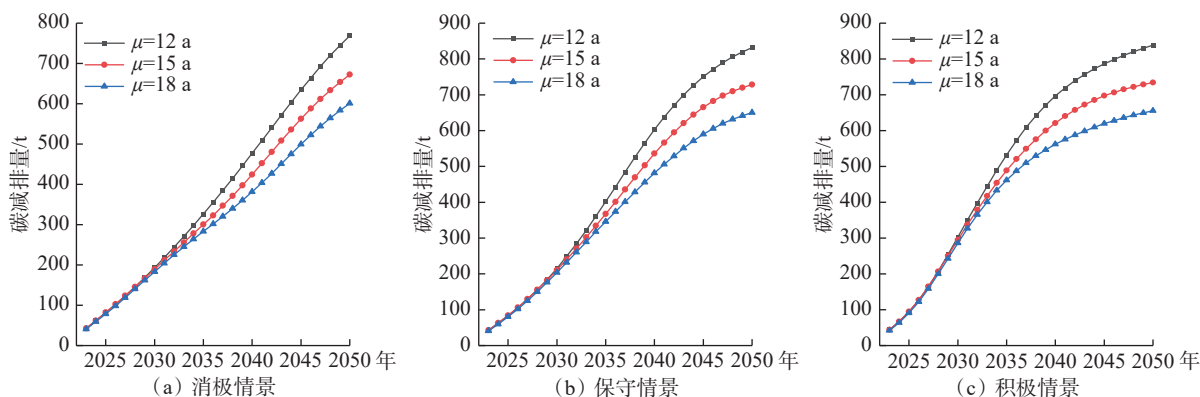


图9 2023—2050年海南省新能源乘用车碳减排量

Fig. 9 Carbon emission reduction of new energy passenger vehicles in Hainan Province from 2023 to 2050

短,产生的报废量和回收量就越大。平均使用寿命也会随着技术进步和使用习惯的不同而变化。新能源乘用车及相关关键金属的未来发展趋势受到诸多因素的影响,本文所考虑的情景非常有限。完善新能源乘用车保有量的情景因素从而对未来发展进行更准确的预测可以成为以后研究的重点。

未来由人口数量减少所导致的碳减排潜力较小,仅为5%^[9]。而用新能源乘用车代替燃油车是减少碳排放量的有效方式。但在实际生活中,目前新能源乘用车渗透率并不高,技术的相对不成熟让人们更加倾向于选择燃油车,提升家庭或个人新能源乘用车的保有量并非易事。政府管理者和企业制造商应考虑加强新能源乘用车的技术创新,例如提高新能源乘用车的续航里程和充电速度,减少用户的里程焦虑,从而增强人们购买新能源乘用车的意愿。此外,本文研究对碳减排潜力的评估仅限于新能源乘用车的使用阶段。未来的研究应当专注于新能源乘用车的生产环节与回收环节中潜在碳排放的量化,旨在为制定覆盖汽车整个生命周期的碳减排策略提供数据支撑。

3 结论与政策建议

3.1 结论

1)未来新能源乘用车动力蓄电池中关键金属需求量呈现“快速增加-趋于饱和”的发展模式。2023—2040年,随着新能源乘用车需求的快速增长,关键金属需求量呈现指数增长趋势,2040年后增速放缓。在2023—2050年间,各关键金属的累计需求量:锂4.47万~6.74万t、镍7.64万~11.51万t、钴2.65万~3.99万t、锰2.43万~3.66万t。

2)未来新能源乘用车动力蓄电池中关键金属回收量将快速增加。与关键金属报废量发展趋势一致,关键金属回收量也呈现指数型增长趋势。在2023—2050年间,各关键金属的累计回收量:锂1.67万~2.96万t、镍3.10万~5.51万t、钴1.07万~1.91万t、锰0.99万~1.75万t。

3)新能源乘用车的推广使用是有效的碳减排措施。在现有政策和发展情景下,新能源乘用车在使用过程中带来的碳减排量将迅速增加,并在2050年达到最高值为601.03~768.65t(消极情景)、650.32~831.79t(保守情景)、655.35~838.19t(积极情景),有助于我国早日实现碳达峰、碳中和目标。

3.2 政策建议

1)海南省政府应加快建立和完善动力电池的回收利用体系,实现全链条管理,包括建立电池回收网

络、制定回收政策和激励措施,以及推动相关技术的研发和应用。

2)海南省的回收企业应加大对新能源汽车动力蓄电池回收技术的研发投入,提升电池回收率和关键金属再利用率。同时,海南省的生产企业应采用环保材料和工艺,减少生产过程中的环境污染。

3)新能源乘用车行业可通过内部自建光伏风电系统、外部采购绿色电力等方式,提升绿色能源使用比例,减少乘用车使用过程中的碳排放。

4)海南省应持续推动新能源汽车的普及,尤其是在公共交通、出租车和城市物流等领域。这可以通过提供购车补贴、建设充电基础设施和实施限行政策来鼓励燃油车更换为新能源汽车来实现。

参考文献(References):

- [1] 史利民.我国新能源汽车产业现状及发展趋势[J].电器工业,2011(7):16-20.
SHI Limin. The current status and development trend of China's new energy vehicle industry[J]. China Electrical Equipment Industry, 2011(7): 16-20.
- [2] 王昶,孙晶,左绿水,等.新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J].中国科技论坛,2018(4):83-93.
WANG Chang, SUN Jing, ZUO Lyushui, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles[J]. Forum on Science and Technology in China, 2018(4): 83-93.
- [3] 宋璐璐,曹植,代敏.中国乘用车物质代谢与碳减排策略[J].资源科学,2021,43(3):501-512.
SONG Lulu, CAO Zhi, DAI Min. Material metabolism and carbon emission reduction strategies of passenger cars in China's mainland[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 501-512.
- [4] 王存福.海南自贸港:新能源汽车的引领之路还有多远[N].经济参考报,2024-09-06.
- [5] 海南省人民政府.海南印发新能源汽车推广中长期行动方案[EB/OL].(2023-08-09)[2024-09-08].<https://www.hainan.gov.cn/hainan/5309/202308/a1c1c3ae48974ef1939423aaa819e665.shtml>.
- [6] IEA. Global EV outlook 2024[R]. 2024.
- [7] IEA. Key world energy statistics 2019[M]. 2019.
- [8] 中汽数据有限公司.中国汽车低碳行动计划研究报告2020[R]. 2020.
- [9] 邢佳韵,陈其慎,张艳飞,等.新能源汽车发展下锂钴镍等矿产资源需求展望[J].中国矿业,2019,28(12):67-71.
XING Jiayun, CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, et al. Related mineral demand forecast under the development of global new energy automobile[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(12): 67-71.
- [10] 郑林昌,张亚楠,吴锦霞.中国新能源汽车生产端锂消费的测算[J].中国矿业,2021,30(3):43-51.
ZHENG Linchang, ZHANG Yanan, WU Jinxia. Research on lithium consumption of new energy vehicles from the production end in China[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 43-51.
- [11] 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.
- [12] HUANG J, DONG X, CHEN J, 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.
- [13] 周园园, 方秀丽, 杨国蕾, 等. 能源转型背景下全球镍资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 69-77.
ZHOU Yuanyuan, FANG Xiuli, YANG Guolei, et al. Analysis of supply and demand of nickel resource in global under the background of energy transition[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(7): 69-77.
- [14] WANG K, ZHENG L J, ZHANG J Z, et al. The impact of promoting new energy vehicles on carbon intensity: causal evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2022, 114: 106255.
- [15] XIONG Y, CHENG Q. Effects of new energy vehicle adoption on provincial energy efficiency in China: from the perspective of regional imbalances[J]. *Energy*, 2023, 281: 128324.
- [16] LI J, JIANG M, LI G. Does the new energy vehicles subsidy policy decrease the carbon emissions of the urban transport industry? Evidence from Chinese cities in Yangtze River Delta[J]. *Energy*, 2024, 298: 131322.
- [17] 金理军, 王关晴, 郑光华, 等. 基于全生命周期的电动汽车碳排放分析与评价[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2024, 44(3): 51-58.
JIN Lijun, WANG Guanhua, ZHENG Guanghua, et al. Carbon-emission analysis and evaluation of electric vehicles base on full life cycle[J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University(Natural Sciences)*, 2024, 44(3): 51-58.
- [18] 陈蕾, 胡淑恒. 新能源汽车动力电池生产碳足迹研究[J/OL]. 资源开发与市场: 1-12[2024-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1448.n.20240914.1326.002>.
CHEN Lei, HU Shuheng. Research on the carbon footprint of new energy vehicle power battery production[J/OL]. *Resource Development & Market*: 1-12[2024-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1448.n.20240914.1326.002>.
- [19] 国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. [2024-09-14]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>.
- [20] STEFAN PAULIUK N M A D. Reconciling sectoral abatement strategies with global climate targets the case of the Chinese passenger vehicle fleet[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 140-147.
- [21] 王晨阳, 汪鹏, 汤林彬, 等. 碳中和背景下中国电动车产业稀土需求预测[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 50-61.
WANG Chenyang, WANG Peng, TANG Linbin, et al. Forecast of rare earth demand driven by electric vehicle industry in China: 2010-2060[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(8): 50-61.
- [22] ZENG A, CHEN W, RASMUSSEN K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1341.
- [23] 国家信息中心中经网. 海南省常住人口数[EB/OL]. (2023-02-20)[2024-09-14]. <https://wap.ceidata.cei.cn/detail?id=RJeNzhdPklo%3D>.
- [24] 海南省统计局. 2023年海南省国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-20)[2024-09-14]. https://stats.hainan.gov.cn/tjj/tjgb/fzgb/2023/202402/t20240220_3598617.html.
- [25] CHEN Y, GUO F, WANG J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 83.
- [26] SHEN J, CHEN X, LI H, et al. Incorporating health cobenefits into province-driven climate policy: a case of banning new internal combustion engine vehicle sales in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(3): 1214-1224.
- [27] ZATZC. COP26 declaration on accelerating the transition to 100% zero emission cars and vans[EB/OL]. (2022-11-17)[2024-09-14]. <https://www.gov.uk/government/publications/cop26-declaration-zero-emission-cars-and-vans/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-and-vans>.
- [28] 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)[2024-09-14]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5560291.htm.
- [29] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. 2021.
- [30] SONG H, WANG C, SEN B, et al. China factor: exploring the byproduct and host metal dynamics for gallium-aluminum in a global green transition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2699-2708.
- [31] SAKUNAI T, ITO L, TOKAI A. Environmental impact assessment on production and material supply stages of lithium-ion batteries with increasing demands for electric vehicles[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, 23(2): 470-479.
- [32] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国工业和信息化部公告[EB/OL]. (2023-12-12)[2024-09-14]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2023/art_ad77622c8a904f2a846f90f4452b23eb.html.
- [33] 中国汽车动力电池产业创新联盟. 2023年12月动力电池月度信息[EB/OL]. (2024-01-11)[2024-09-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/OU1uV15dvUsQnpbfvaMZtQ>.
- [34] 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.
- [35] 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.