

碳中和背景下中国电动车产业稀土需求预测

王晨阳¹, 汪鹏^{1,2*}, 汤林彬¹, 陈玮¹, 陈伟强^{1,2,3*}

1. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341100

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 构建了纯电动乘用车产业发展的3种情景, 即1.5℃温控情景、现有政策情景和基准情景, 并采用动态物质流分析方法计算了不同情景下纯电动乘用车的保有量和需求量, 预测了纯电动乘用车产业发展引起的镉、钕和镨3种稀土元素的未来需求量、报废量和潜在回收量。结果显示:(1) 在这3种情景下, 纯电动乘用车保有量均呈现增长趋势;(2) 在现有配额制下, 钕、镉和镨的中国年产能为15219、625、4509 t, 而未来需求量是5700~25900、1400~6100、600~2600 t, 如果不增加产能, 镉元素的产能将无法满足纯电动乘用车发展的需求, 钕元素的产能仅可以满足纯电动乘用车中短期(2020—2040年)的发展需求, 镨元素的产能可以满足未来纯电动乘用车发展的需求;(3) 回收纯电动乘用车中的稀土元素可以有效减少稀土原矿的需求量, 从而降低稀土资源一次供应量在总需求量中的比例。因此, 建议分元素管控稀土元素的供应, 提高针对钕、镉元素的指令性生产计划指标, 加强从电动乘用车中回收稀土元素的技术研发, 建立含稀土的固体废弃物如电动车、风电涡轮机的有效回收体系。

关键词 物质流分析; 电动车; 稀土; 碳中和

2020年12月12日, 习近平主席在第七十五届联合国大会上庄严宣布中国将“力争2030年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取2060年前实现碳

中和”^[1]。碳中和目标的承诺在带来能源转型、技术进步、产业结构调整、国际合作等多方面重大机遇的同时^[2-3], 也将给中国经济社会发展带来一系列

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(71904182, 42061049); 中国科学院赣江创新研究院自主部署项目(E055B004); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2021-3)

作者简介: 王晨阳, 研究实习员, 研究方向为金属供需预测, 电子信箱: ischenyangwang@foxmail.com; 汪鹏(通信作者), 副研究员, 研究方向为金属-能源关联系统建模与分析, 电子信箱: pwang@iue.ac.cn; 陈伟强(共同通信作者), 研究员, 研究方向为环境系统工程、城市矿产与循环经济、资源安全与可持续发展, 电子信箱: wqchen@iue.ac.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.08.005

重大挑战,比如能源转型面临的关键金属短缺^[4-5]和供应链安全问题^[6]等。

交通部门全面电气化是实现碳中和目标的重要举措之一^[7]。交通是全球第2大温室气体排放部门,其温室气体排放量约占全球总量的24.6%,并且这一比重还在不断增加^[8]。目前,中国交通部门温室气体排放量约占全国总量的10%左右^[8]。这一比重中有45%的温室气体排放来自包括乘用车在内的轻型车的尾气排放。因此,在交通部门推广使用纯电动乘用车,是减少温室气体排放的重要举措。中国政府将新能源汽车列为战略性新兴产业,不但制定了该产业的发展规划并出台了补贴政策,而且对该行业提出了“2025年新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量20%左右”的发展愿景^[7]。

稀土是制造新能源汽车驱动电机必不可少的关键原材料^[9-10]。驱动电机作为新能源汽车的“发动机”,是直接关系到新能源汽车性能与节能减排效果的核心部件^[11-13]。在碳中和目标的驱动下,中国稀土需求量将随着新能源汽车产业的发展而快速增加。因此,预测新能源汽车未来发展所需的稀土资源量,制定稀土产能调整计划与原材料储备方案,对中国碳中和目标的实现至关重要。

目前,国内外已有针对交通部门稀土供需预测的研究,但仍存在不足之处。首先,以往的稀土供需预测研究主要关注发电部门,未充分关注新能源汽车产业^[14-15];其次,新能源汽车的保有量预测大多依据历史数据构建的市场扩张模型或中国政府的产业规划,未将碳中和目标下的产业发展需求纳入预测情景中^[16-17];再次,已有研究多只聚焦于单一稀土元素,忽略了稀土元素共伴生的特性,或聚焦于多种关键矿产,未将稀土元素作为主要分析对象^[18-19];最后,已有研究大多只关注供应或回收等单一环节,未能将二者结合起来进行关联分析^[20-21]。

本研究采用动态物质流分析的方法,在构建1.5℃温控情景、现有政策情景和基准情景3种政策情景的基础上,核算和预测中国电动车产业发展驱动的稀土元素需求量与回收量。

1 研究方法数据来源

1.1 研究框架

将乘用车电气化中的主要终端产品——纯电动乘用车(完全由动力蓄电池提供电力驱动且符合《机动车类型术语和定义(GA802—2019)》^[22]中规定的小型载客汽车和微型载客汽车)作为研究对象,未将属于过渡推广车型的插电式混合动力乘用车和未被推荐推广的氢燃料电池乘用车纳入核算范围^[23]。本研究通过构建汽车保有量预测模型、寿命分布模型以及存量驱动的动态物质流分析模型,估算了纯电动乘用车及其所含稀土的存量和流量。本研究的时间边界为2010—2060年,空间边界为中国31个省、直辖市和自治区(不含港澳台)。具体研究步骤如图1所示。

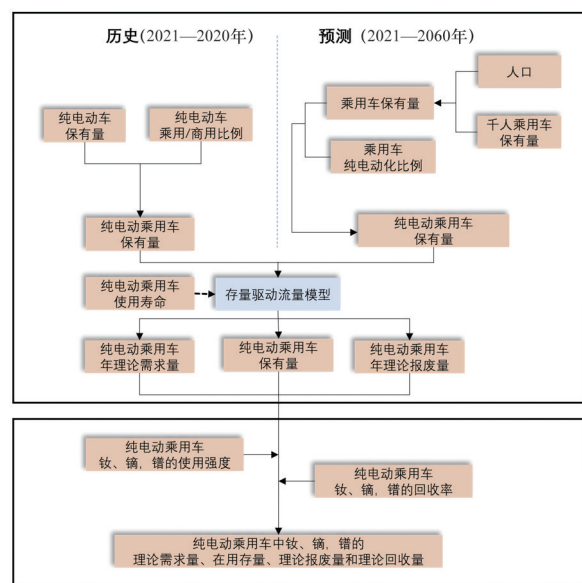


图1 2010—2060年中国纯电动乘用车及其所含稀土的流量与存量预测研究框架

1.2 方法与模型

1.2.1 保有量估算方法

纯电动乘用车保有量的核算针对2个时间段分别展开:历史阶段(2010—2020)和未来阶段(2021—2060)。其中,历史阶段的保有量通过统计数据计算得出,未来阶段的保有量 F_{stock} 根据未来人口数量(P)、千人乘用车保有量(c)及乘用车纯电动

化的比例(e)估算得到,具体公式为

$$F_{\text{stock}}(t) = P(t)c(t)e(t) \quad (1)$$

1.2.2 需求量和报废量核算方法

在物质流分析中,产品达到服务年限后会产生报废量(F_{out}),产品新投入使用会产生需求量(F_{in})。对纯电动乘用车流量的估算,核心在于构建其服务年限模型。常见的寿命分布函数有正态分布、指数分布、韦伯分布和伽玛分布等,其中,正态分布常被用于模拟零部件的失效情况^[24-26]。本研究采用正态分布对新能源汽车的服务年限进行估算,概率密度分布函数为

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

第 i 年生产的产品在第 t 年达到使用寿命的概率为

$$P_i^t = \int_{t-1}^t \frac{1}{\sigma^* \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (3)$$

式中, μ 为平均使用寿命; σ 为平均使用寿命的标准差。研究将 μ 设定为12年^[25], σ 的取值为平均寿命的25%。

基于产品服务年限模型,对新能源乘用车的流量进行估算。 F_{Outflow_t} 指在 t 年末到达使用寿命因而进入末端处理阶段的纯电动乘用车数量, F_{Inflow_t} 指在 t 年新投入使用的纯电动乘用车数量。理论报废量、理论需求量和在用存量之间的关系如下:

$$F_{\text{Outflow}_t} = \sum_{i=2015}^{i=t} F_{\text{Inflow}_i} P_i^t \quad (4)$$

$$F_{\text{Inflow}_t} = F_{\text{Stock}_t} - F_{\text{Stock}_{t-1}} + F_{\text{Outflow}_t} \quad (5)$$

车辆的使用寿命是影响本研究结果的重要因素。本研究设定车辆的平均寿命为12年^[25],也有研究设定为10年^[27]、15年^[28]和18年^[29]。本研究对平均寿命对研究结果的影响进行了敏感性分析,相关结果见2.1节。

1.2.3 稀土存量和流量估算方法

利用自上而下法估算纯电动乘用车中3种主要稀土元素(钕、镝、镨)的存量,其由纯电动乘用车的数量以及相应稀土元素在纯电动乘用车中的使

用强度确定:

$$M_{\text{Stock}_t}^i = F_{\text{Stock}_t} I_t^i \quad (6)$$

式中: $M_{\text{Stock}_t}^i$ 为 i 元素在第 t 年的物质存量; I_t^i 为纯电动乘用车中的稀土元素 i 在第 t 年的使用强度。

i 元素在第 t 年的理论需求量 $M_{\text{Inflow}_t}^i$ 和理论报废量 $M_{\text{Outflow}_t}^i$ 计算公式为

$$M_{\text{Inflow}_t}^i = F_{\text{Inflow}_t} I_t^i \quad (7)$$

$$M_{\text{Outflow}_t}^i = F_{\text{Outflow}_t} I_t^i \quad (8)$$

1.3 数据来源

1.3.1 保有量数据

纯电动车保有量:2015—2020年纯电动车保有量数据来自公安部交通管理局^[30];由于2010—2014年纯电动车的保有量数据小未被纳入官方统计范畴,故通过2015—2020年的数据外推得出(假设2010年为中国纯电动车发展起点,保有量为0)。

纯电动乘用车保有量:根据恒大研究院报告^[31],中国新能源汽车以乘用车为主、商用车为辅。由于乘用车销量占比超过90%,故假设在2010—2020年,纯电动车中乘用车的比例为90%。

中国人口数量:2021—2060年的中国人口数量来自《联合国世界人口展望2019》^[32]。该报告设置了高生育率、中生育率和低生育率3种人口生育情景。3种情景计算的2060年中国人口数量分别为15.05亿、13.33亿、11.75亿人。

千人乘用车保有量:2020—2060年千人乘用车保有量数据来自世界资源研究所报告^[23]。基准参数基于中国未来人均国内生产总值(GDP)年增长率为4.5%的假设,而低碳参数额外考虑到中国部分城市的限行、限购等交通管理政策及公共交通的发展。2060年千人乘用车保有量的基准参数和低碳参数分别为430、380辆。

乘用车纯电动化比例:2020—2060年千人乘用车保有量数据由世界资源研究所报告中的基准情景、现有政策情景及1.5℃温控情景^[23]计算而来。基准参数基于“十三五”规划设定;现有政策情景下的参数是在基准参数上增加了限行限购政策和“双积分政策”所产生的影响^[33];1.5℃温控参数在现有

政策参数上增加了新车分地区、分阶段的“禁燃”政策的影响。3种情景下,2060年乘用车纯电动化的比例分别为19%、70%、90%。

本研究创建了3个情景模式:基准情景、现有政策情景和1.5℃温控情景(表1)。

表1 情景模式参数设置

参数	情景模式		取值			
			2020年	2035年	2050年	2060年
人口数量/亿	以中人口为基准, 高人口作为上限, 低人口作为下限	高人口	14.1	15.1	15.1	15.1
		中等人口	14.1	14.6	14	13.3
		低人口	14.1	14.1	12.9	11.8
千人乘用车保有量/ (辆·10 ⁻³ ·人 ⁻¹)	基准情景 现有政策情景 1.5℃温控情景	基准参数	169	355	416	430
		低碳参数	169	286	356	380
		低碳参数	169	286	356	380
乘用车纯电动率/%	基准情景 现有政策情景 1.5℃温控情景	基准参数	1.3	12.3	17.4	19
		现有政策参数	1.3	22.5	50.1	70
		1.5℃温控参数	1.3	30	75.8	90

1.3.2 电动车稀土元素使用强度数据

本研究采用文献调研的方法,对多来源的强度数据取平均值作为纯电动乘用车中稀土元素的平均使用强度(表2)。

表2 电动车稀土元素使用强度

文献	强度/(g·辆 ⁻¹)		
	钕	镨	镝
[28]	150~360	90~210	50~120
[34]	749.3	225	98.01
[35]	500	34	0.5
[15]	304	4.13	—
[20]	435	135	—
[21]	609	189	—
[18]	695	83	—
[19]	450	75	—
[36]	620	90	—
[37]	695	83	—
[38]	576	336	—
[13]	790	370	—
[39]	567~2250	—	—
[40]	690	—	—
本研究所采用的平均值	652.5	148.0	67.1

本研究对纯电动乘用车中稀土使用强度对研究结果的影响进行敏感性分析,相关结果见2.1节。

1.3.3 稀土产量数据

收集了全球各稀土矿区产量及矿石配分数数据^[41],估算了不同矿区各稀土元素的产量,将主要稀土元素(镨、钕、镝)2014—2018年产量的平均值作为这些稀土元素的当前产能。

2 结果与讨论

通过估算1.5℃温控情景、现有政策情景和基准情景下纯电动乘用车的保有量,预测了纯电动乘用车发展所需的钕、镨、镝3种稀土元素的需求量,结合目前3种稀土元素的国内及全球产能,判断不同情景下3种稀土元素的供需关系,最后评估了3种稀土元素在不同情景下的回收量、一次供应需求和一次供应占比。

2.1 电动车保有量及稀土需求量预测

图2(a)反映了纯电动乘用车保有量的变化趋势,图2(b)反映了纯电动乘用车在不同平均寿命设定下的理论年需求量,图2(c)~图2(e)分别反映了汽车电气化导致的钕、镨和镝的年需求量变化。

研究结果有以下3点。

1) 1.5℃温控情景中纯电动乘用车保有量最大。2060年该情景下的保有量是现有政策情景的

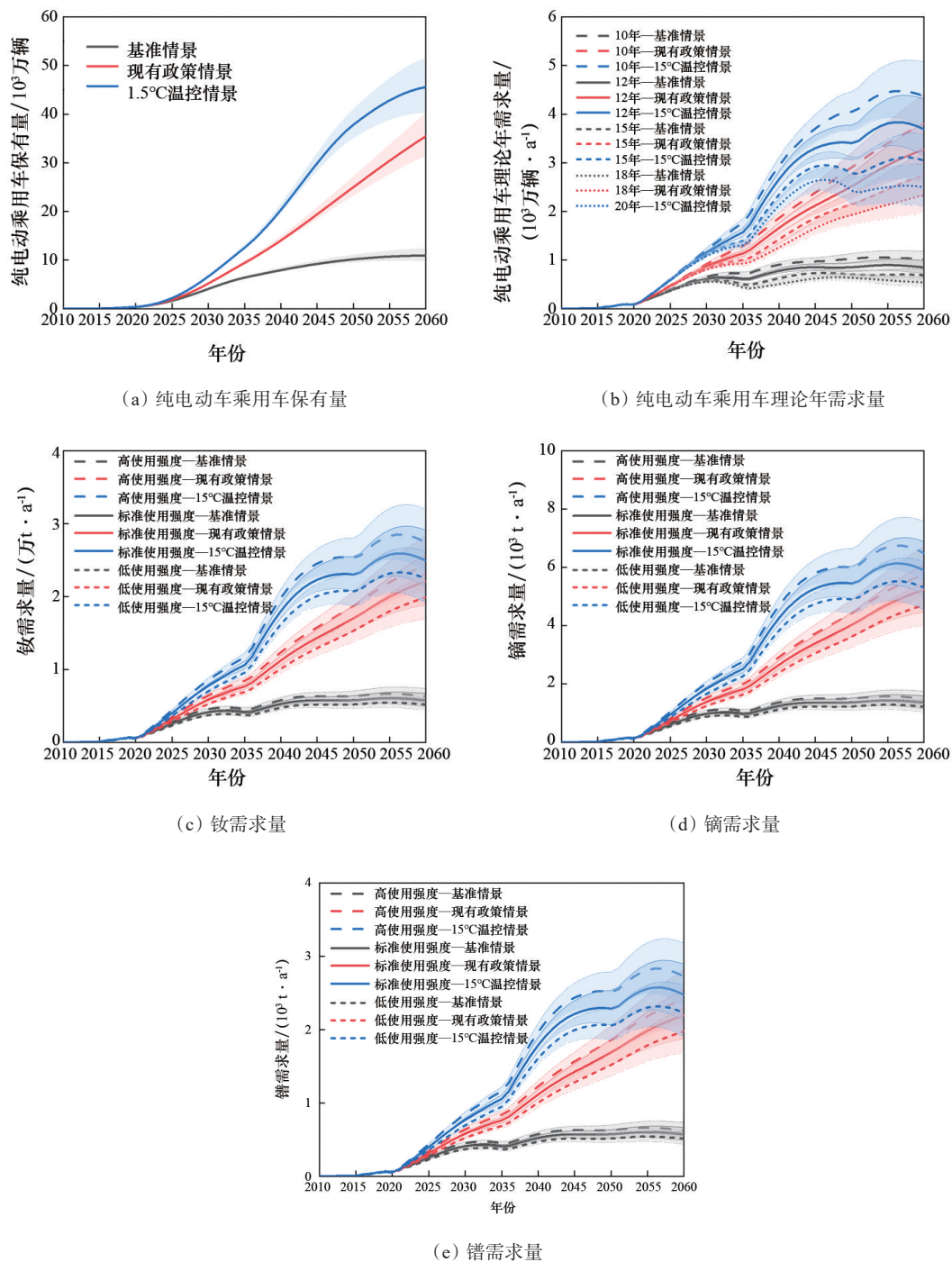


图2 2010—2060年中国纯电动乘用车存量与流量及其对稀土的需求量

1.3倍,是基准情景的3.7倍。在1.5°C温控情景中,纯电动乘用车保有量呈现S型增长趋势,即2020—2045年保有量加速增长,2045—2060年保有量增长放缓,2060年保有量达到峰值,约4.56亿辆(4.02亿~5.15亿辆)。在该情景下,2021—2060年中国

纯电动乘用车复合年增长率约为11.9%。在现有政策情景中,纯电动乘用车保有量匀速增长,在2060年达到最高,约3.55亿辆(3.13亿~4.01亿辆)。2021—2060年在该情景下,中国纯电动乘用车复合年增长率约为11.3%。在基准情景中,纯电动乘

用车保有量始终处于小幅上升状态。2021—2060年在该情景下,中国纯电动乘用车复合年增长率为8.0%,2060年达到最高,约1.09亿辆(0.96亿~1.23亿辆)。

2) 纯电动乘用车平均寿命的设定会通过影响报废速度进而影响到需求量。在存量驱动流量模型中,长使用寿命的设定会产生较小的报废量以及较小的需求量。相比于纯电动乘用车平均寿命为12年的假设,平均寿命为10、15、18年的假设可使纯电动乘用车总需求量分别升高13.0%~15.3%、下降13.2%~15.8%以及下降21.9%~27.4%。

3) 纯电动乘用车发展产生的稀土需求量因情景和稀土元素的不同而有差异。在1.5℃温控情景下,纯电动乘用车中稀土的需求量最大。其中,钕元素是需求量最大的稀土元素。1.5℃温控情景下,钕、镨和镝的需求量在2020—2035年匀速增长,2035—2045年增速加快,2045年后增速放缓,

2056—2057年达到峰值,分别为25900(22700~29600)t、6100(5400~7000)t和2600(2300~2900)t。2020—2060年纯电动乘用车年复合增长率为8.4%。在现有政策情景下,钕、镨和镝的需求量保持8.3%的年增长率,2060年达到峰值,分别为22100(18900~25700)t、5200(4500~6100)t和2200(1900~2600)t。在基准情景下,钕、镨和镝的需求量持续增长但增速较缓。2060年需求量分别为5700(4900~6700)t、1400(1200~1600)t和600(500~700)t,年复合增长率为4.5%。

2.2 汽车电气化导致稀土供需不匹配

稀土元素钕、镨和镝2014—2018年国内(不含港澳台地区)及全球2014—2018年产量及当前产能(本研究取2014—2018年产量平均值作为当前产能)如图3所示。国内钕、镨、镝当前产能分别为15220、630、4510 t,全球当前产能为19640、840、5810 t。

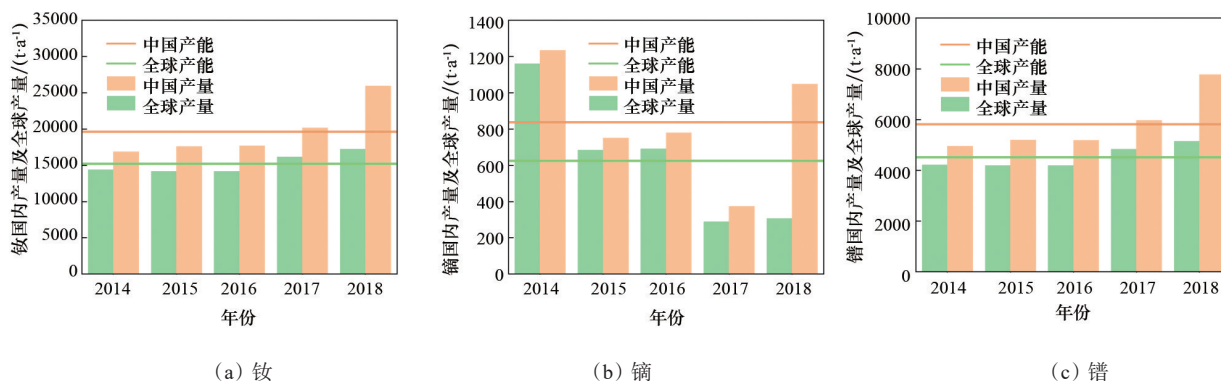


图3 镨、钕和镝2014—2018年产量与当前产能

不同情景下纯电动乘用车所需稀土量的变化如图4所示,稀土供需状况因情景和元素不同各有差异:

1) 现阶段的镨元素产能无法满足任何情景下对该元素的需求。基准情景下,纯电动乘用车对镨的需求量将持续增长但增速放缓,峰值为2051—2055年的1400(1300~1600)t,是目前国内年产量的2.2(2.1~2.5)倍;现有政策情景和1.5℃温控情景下镨元素需求的峰值为2056—2060年的4500(4000~5000)t和5800(5200~6600)t,分别为目前国

内产量的7.1(6.3~7.9)倍、9.2(8.3~10.5)倍。

2) 当前钕元素产能可以满足中短期(2021—2040年)纯电动乘用车制造的需求,但无法满足长期(2040年后)需求。现有政策情景和1.5℃温控情景下,汽车电气化对钕的需求量分别在2046—2050年和2041—2045年超过了中国钕元素的产能,峰值分别为2056—2060年的21300(18400~24500)t和25600(22200~29500)t,是当前国内年产能的1.4(1.2~1.6)倍和1.7(1.5~1.9)倍。

3) 当前镝元素产能充足,可以满足未来纯电

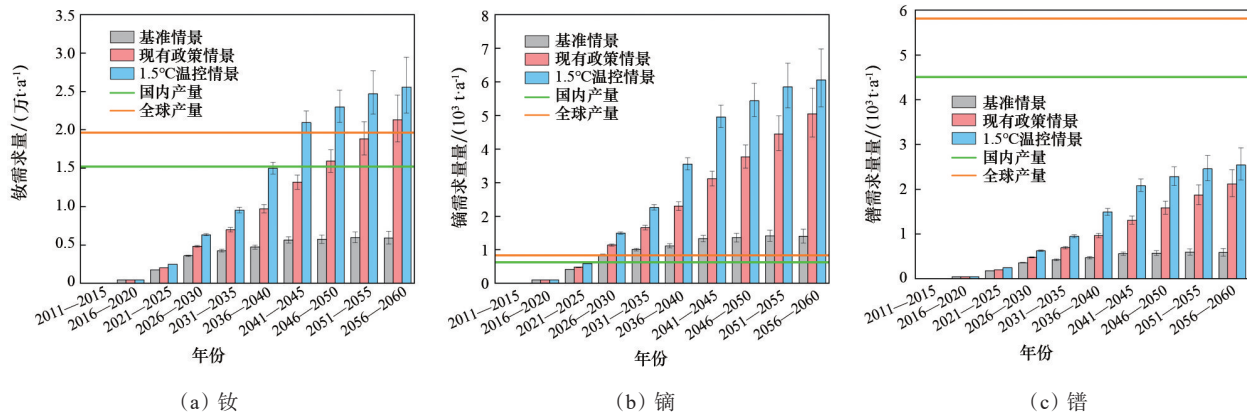


图4 2010—2060年不同情景下中国纯电动乘用车产业的稀土需求量与稀土产能对比

动乘用车发展的需求。基准情景、现有政策情景和1.5℃温控情景下,乘用车电气化对于镨元素的需求峰值分别为600(500~700)t、2100(1800~2400)t和2500(2200~2900)t,是当前国内产能的13.3%(11.1%~15.5%)、46.6%(39.9%~53.2%)和55.4%(48.8%~64.3%)。

综上,在3种情景下稀土元素镝和钕的供应均存在短缺,镨元素的供应暂不会短缺。1.5℃温控情景下稀土供不应求状况最严重,纯电动乘用车产业的迅猛发展导致镝、钕的需求量剧增,分别为当前国内产能的9.2(8.3~10.5)倍和1.7(1.5~1.9)倍。现有政策情景下,纯电动乘用车发展导致的稀土供不应求状况次之,镝、钕的需求量分别为当前供应量的7.1(6.3~7.9)倍和1.4(1.2~1.6)倍。基准情景下,当前产能可以满足纯电动乘用车对钕元素的需求,但不能满足对镝元素的需求。3种情景下,只有镨元素的当前产能可以满足纯电动乘用车的发展需求。

2.3 稀土回收潜力估算

纯电动车中的稀土元素主要用于制造磁体,此类磁体体积较大,易于获取,可通过直接重复使用的方式进行循环使用^[42-43]。本节基于50%、70%和90%的电动车稀土回收率,评估了钕、镝和镨3种元素在不同情景下的可回收量(图5(a)、图5(c)、图5(e))、一次供应的需求量(图5(b)、图5(d)、图5(f))、一次供应的占比(图5(g))和二次供应的占比

(图5(h)),得出如下结果。

1) 钕、镝、镨3种元素的可回收量在2020—2060年均处于增加状态,但其增长幅度在不同情景下差异明显。1.5℃温控情景下,纯电动乘用车的推广较早,保有量较高,因此含3种稀土元素的乘用车报废高峰期也更早出现。但在2055年后,乘用车报废量增速放缓。现有政策情景下,3种稀土元素的回收量匀速增长,但由于在此政策情景下纯电动乘用车的部署较晚,因此2060年尚未到达报废最高峰。基准情景下,3种稀土元素的回收量匀速增长,但相比于其他情景,增长率较小且呈现放缓趋势,主要原因在于纯电动乘用车的部署与其他情况相比较慢。

2) 钕、镝、镨3种元素的长期报废量巨大,具有很大的回收潜力。50%回收率下,在基准情景、现有政策情景和1.5℃温控情景下,2060年钕元素的报废量分别达到2900、7800和11400t;2060年镝元素的报废量分别达到700、1900、2700t;2060年镨元素的报废量分别达到300、800和1100t。钕、镝、镨3种元素的峰值报废量分别是当前国内产量的0.2~0.8、1.1~4.3、0.1~0.2倍。相比于50%的电动车稀土回收率,70%和90%的回收率设定将会导致稀土可回收量上升1.4倍和1.8倍。

3) 回收纯电动乘用车中的稀土元素可以有效减少原生稀土矿的消耗量。对于钕元素,在考虑回收的影响下,基准情景和现有政策情景下钕元素原

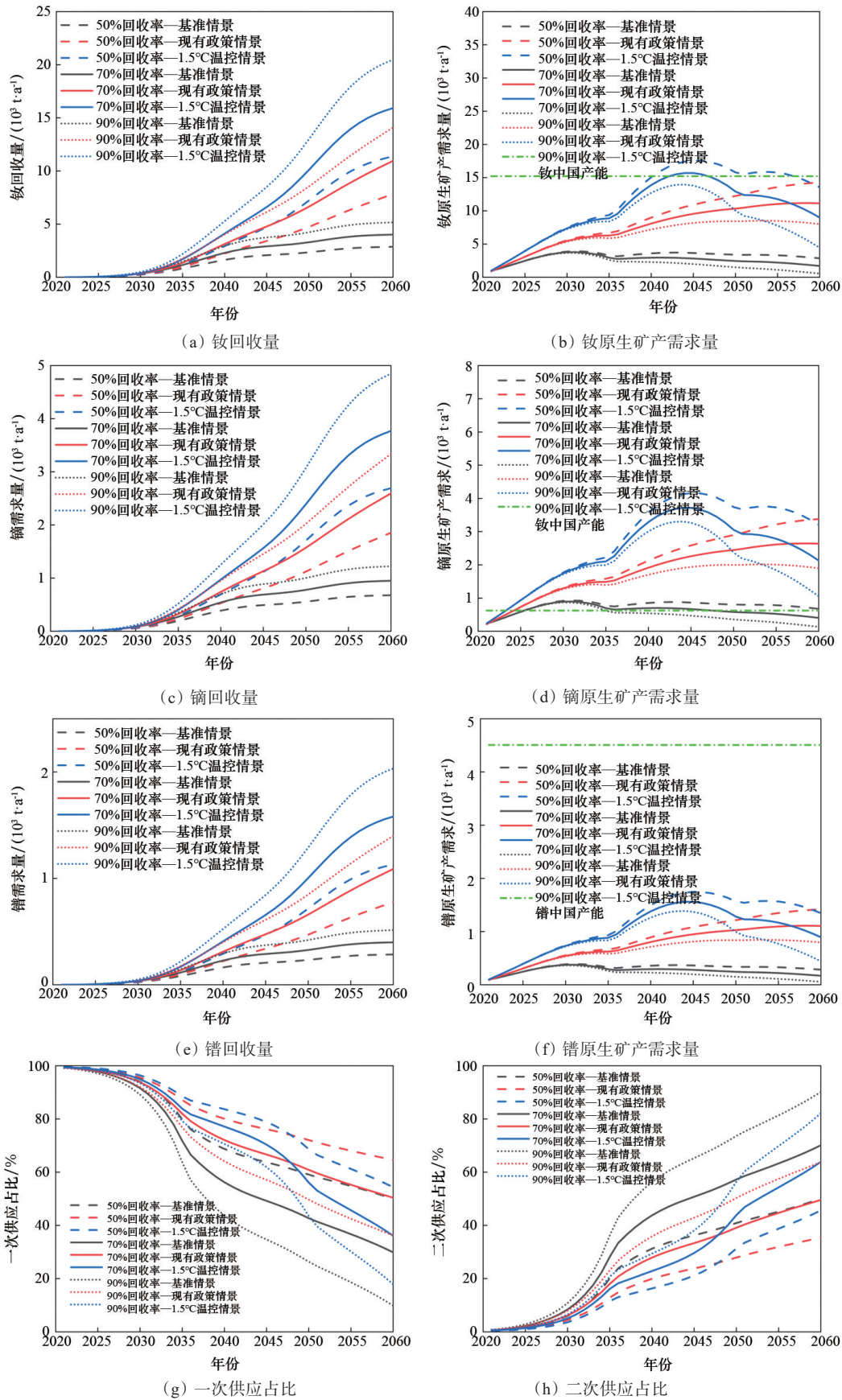


图5 2020—2060年全国纯电动乘用车的稀土资源可回收量、净需求量及一次供应、二次供应占比变化

生矿产需求未超过当前的钹产能;1.5℃温控情景中,低回收率(50%)和中回收率(70%)下,2040—2057年、2040—2047年原生矿产需求量将超过当前产能,仅高回收率(90%)设定可以将原生矿产需求量降低到当前产能以内。对于镉元素,只有中、高回收率(70%、90%)和基准情景的组合,可以将镉的原生矿产需求降低到当前产能以内,其余情景组合下都将远超过当前产能,可见镉元素的原生矿产供应面临极大的挑战。对于镨元素,其总需求量尚未超过当前产能,而回收措施的推行将进一步降低镨元素的原生矿产需求量。

4) 回收电动乘用车中的稀土元素可以改变稀土资源的供给结构,降低一次供应量在总需求量中的比例。50%、70%、90%的回收率,可以将2060年基准情景下原生矿产的供应比例降低到49.9%、29.9%和9.9%,可以将现有政策情景下原生矿产的供应比例降低到64.6%、50.4%、36.2%,可以将1.5℃温控情景下原生矿产的供应比例降低到54.4%、36.1%、17.8%。

综上,目前纯电动乘用车中的稀土元素具有很大的回收潜力。稀土回收可以有效减少制造业对稀土原矿的需求量,降低稀土原矿在稀土供应格局中的比例。然而,回收报废产品中的稀土元素仍面临诸多挑战。首先,中国稀土回收产业起步较晚,还未形成高效的回收体系。这将导致稀土金属回收率低,限制稀土回收产业的发展。其次,稀土资源供需不平衡导致的稀土金属价格高涨可能会促进稀土应用企业研发稀土减量化或替代技术。这将导致报废产品中稀土元素含量降低,稀土金属回收潜力减小,稀土回收技术更加复杂^[44]。同时,相关企业的稀土回收意愿也将降低^[42,45]。

3 结论与建议

基于物质流分析的方法,核算了中国电动车产业产生的稀土元素需求总量,预测了1.5℃温控情景、现有政策情景和基准情景下纯电动乘用车所需的3种稀土元素(钹、镨、镉)的资源量、报废量与回收量。主要结论如下:

1) 纯电动乘用车保有量在1.5℃温控情景、现有政策情景和基准情景下均显著增长。2060年中国纯电动乘用车保有量在3种情景下分别达到4.56亿、3.55亿、1.09亿辆,是2020年的101.0、61.1、25.3倍。

2) 3种情景下稀土元素需求量的年复合年增长率分别为8.4%、8.3%、4.0%。其中,镉元素的供需矛盾最突出,钹元素在1.5℃温控情景和现有政策情景下均存在供需矛盾,镨元素暂时不存在供需矛盾。

3) 目前纯电动乘用车中的稀土元素具有较高的回收潜力。钹、镉、镨3种稀土元素理论报废量的峰值分别是当前国内产量的0.4~1.5、2.2~8.6、0.1~0.5倍。回收纯电动乘用车中的稀土元素可以有效减少对于稀土原矿的需求量,降低稀土一次供应量在总供应量中的比例。2060年,基准情景、现有政策情景和1.5℃温控情景下,稀土一次供应量在总供应量中的比例分别降至49.9%、64.6%和54.4%(基于电动车稀土回收率为50%测算)。

基于此,对中国电动车产业及稀土产业的未来发展提出以下建议:

1) 发展新能源汽车是中国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路,是应对气候变化、实现碳中和目标的重要战略。目前新能源汽车的渗透率还有待提升。传统燃油车企业应利用现有的整车制造经验和销售体系,实现新能源汽车技术的突破和销量的扩大。新能源汽车企业应发挥“后发优势”,加快布局新能源汽车产业。

2) 短期内,为保障碳中和目标下新能源汽车产业的发展,稀土产业的产能应大幅提升。国家应有计划地提高稀土指令性计划生产指标和总量控制指标,并进行稀土分元素管理,提升稀土资源的一次供应量。

3) 长期来看,从报废的纯电动乘用车中回收稀土元素可有效缓解稀土元素的供需矛盾。汽车报废拆解行业与稀土回收行业应提前进行电动车中稀土回收技术的储备,改进稀土分离、提纯等方面的工艺、技术和设备,建立科学的稀土回收体系,保障纯电动乘用车产业对稀土资源的长期需求。

参考文献 (References)

- [1] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL]. (2020-12-12)[2021-06-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c_1126853600.htm.
- [2] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- [3] Climate Action Tracker. China going carbon neutral before 2060 would lower warming projections by around 0.2 to 0.3 degrees C[EB/OL]. (2020-09-23)[2021-06-01]. <https://climateactiontracker.org/press/china-carbon-neutral-before-2060-would-lower-warming-projections-by-around-2-to-3-tenths-of-a-degree>.
- [4] Omasta T J, Peng X, Miller H A, et al. Beyond 1.0 W cm⁻² performance without platinum: The beginning of a new era in anion exchange membrane fuel cells[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(15): J3039-J3044.
- [5] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. One Earth, 2020, 3(1): 116-125.
- [6] Zhang H M, Feng T T, Yang Y S. Influencing factors and critical path of inter-sector embodied heavy rare earth consumption in China[J]. Resources Policy, 2022, 75: 102492.
- [7] 能源转型委员会, 落基山研究所. 中国 2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://www.rmi-china.com/static/upfile/news/nfiles/ETC.pdf>.
- [8] 蒋小谦, 奚文怡, 蒋慧, 等. 城市的交通排放: 路径分析方法、关键举措和对策建议[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://www.wri.org.cn/report/202004/Achieving-Net-Zero-Carbon-Emission-of-Transportation-Sector-CN>.
- [9] Knobloch V, Zimmermann T, Gößling-Reisemann S. From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 272-282.
- [10] Restrepo E, Løvik A N, Wäger P, et al. Stocks, flows, and distribution of critical metals in embedded electronics in passenger vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1129-1139.
- [11] 杨朋. 稀土永磁电机的应用现状及其发展趋势[J]. 中国设备工程, 2019(1): 190-191.
- [12] 郭咏梅, 王王伟, 白雪, 等. 稀土永磁电机在汽车领域节能减排必由之路[J]. 稀土信息, 2018(7): 8.
- [13] Alonso E, Wallington T, Sherman A, et al. An assessment of the rare earth element content of conventional and electric vehicles[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2012, 5(2): 473-477.
- [14] Valero A, Valero A, Calvo G, et al. Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways[J]. Energy, 2018, 159: 1175-1184.
- [15] Månberger A, Stenqvist B. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development[J]. Energy Policy, 2018, 119: 226-241.
- [16] Li X Y, Ge J P, Chen W Q, et al. Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018-2030[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 145: 322-331.
- [17] 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.
- [18] Watari T, McLellan B C, Ogata S, et al. Analysis of potential for critical metal resource constraints in the international energy agency's long-term low-carbon energy scenarios[J]. Minerals, 2018, 8(4): 156.
- [19] Zhou B L, Li Z X, Chen C C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies[J]. Minerals, 2017, 7(11): 203.
- [20] Rademaker J H, Kleijn R, Yang Y. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: A systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(18): 10129-10136.
- [21] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 113: 12-27.
- [22] 中华人民共和国公安部. 道路交通管理 机动车类型: GA 802—2019[S]. 北京: 中华人民共和国公安部, 2019.
- [23] 薛露露, 靳雅娜, 禹如杰, 等. 中国道路交通 2050 年“净零”排放路径研究[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://wri.org.cn/sites/default/files/2021-12/toward-net-zero-emissions-road-transport-sector-china-CN.pdf>.
- [24] 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.

- [25] Pauliuk S, Dhaniati N M A, Müller D B. 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.
- [26] Davis J, Geyer R, Ley J, et al. Time-dependent material flow analysis of iron and steel in the UK. Part 2. Scrap generation and recycling[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(1): 118–140.
- [27] Dunant C F, Shah T, Drewniok M P, et al. A new method to estimate the lifetime of long-life product categories [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(2): 321–332.
- [28] Watari T, McLellan B C, Giurco D, et al. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 148: 91–103.
- [29] Weymar E, Finkbeiner M. Statistical analysis of empirical lifetime mileage data for automotive LCA[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(2): 215–223.
- [30] 公安部交通管理局. 公安部: 截至2019年底全国新能源汽车保有量381万辆[EB/OL]. (2020-01-09)[2021-06-01]. <https://www.china5e.com/news/news-1080397-1.html>.
- [31] 连一席. 全球动力电池竞争报告: 2019[EB/OL]. [2021-06-01]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201912201372266094_1.pdf?1576866211000.pdf.
- [32] United Nations. World population prospects 2019[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://population.un.org/wpp>.
- [33] Oscar D, Josh M, Ben S, et al. Estimating the fuel efficiency technology potential of heavy-duty trucks in major markets around the world[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://theicct.org/publications/estimating-fuel-efficiency-technology-potential-heavy-duty-trucks-major-markets-around>.
- [34] Valero A, Valero A, Calvo G, et al. Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways[J]. *Energy*, 2018, 159: 1175–1184.
- [35] Fishman T, Myers R J, Rios O, et al. Implications of emerging vehicle technologies on rare earth supply and demand in the United States[J]. *Resources*, 2018, 7(1): 1–15.
- [36] Habib K, Wenzel H. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 348–359.
- [37] Hoenderdaal S, Espinoza L T, Marscheider-Weidemann F, et al. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?[J]. *Energy*, 2013, 49: 344–355.
- [38] Valero A, Valero A, Calvo G, et al. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 178–200.
- [39] Deetman S, Pauliuk S, van Vuuren D P, et al. Scenarios for demand growth of metals in electricity generation technologies, cars, and electronic appliances[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(8): 4950–4959.
- [40] De Koning A, Kleijn R, Huppel G, et al. Metal supply constraints for a low-carbon economy? [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 202–208.
- [41] 《中国稀土学会年鉴》编辑委员会. 中国稀土学会年鉴2018[R]. 北京: 中国稀土学会, 2018.
- [42] Binnemans K, Jones P T, Blanpain B, et al. Recycling of rare earths: A critical review[J]. *Journal of cleaner production*, 2013, 51: 1–22.
- [43] Zhang Y, Gu F, Su Z, et al. Hydrometallurgical recovery of rare earth elements from NdFeB permanent magnet scrap: A review[J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2020, 10(841): 841.
- [44] Du X, Graedel T E. Uncovering the end uses of the rare earth elements[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 781–784.
- [45] Zhang S, Ding Y, Liu B, et al. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE[J]. *Waste Management*, 2017, 65: 113–127.

Forecast of rare earth demand driven by electric vehicle industry in China: 2010–2060

WANG Chenyang¹, WANG Peng^{1,2*}, TANG Linbin^{1,3}, CHEN Wei¹, CHEN Weiqiang^{1,2,3*}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341100, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The electrification of the transportation sector is an important initiative to achieve the carbon neutrality target. It is important to accurately determine the future demand for the rare earth elements (REEs) from the sector of the battery electric passenger vehicle (BEPV), to predict the recovery potential of the materials containing REEs, and to dynamically assess the relationship between the supply and the demand, for promoting the electrification of the transportation sector and ensuring the security of the supply of the REEs. In this paper, three scenarios are identified for the development of the BEPV, namely, the business as the usual scenario, the state policy scenario and the scenario of 1.5 degrees (temperature rising) scenario. By a dynamic material flow analysis, the stocks and the flows of the BEPV are calculated; the future demand, the end-of-life volume and the potential recycling of neodymium (Nd), dysprosium (Dy) and praseodymium (Pr) are predicted. It is shown that: (i) under all scenarios, the BEPV stock shows a growing trend; (ii) the current annual production capacity of Nd, Dy and Pr in China is 15219, 625 and 4509 t, while the future demand is 5700–25900, 1400–6100 and 600–2600 t. If the production capacity is not increased, the demand for Dy of BEPV can not be met, and the demand for Nd of BEPV can only be met in the short term (2020–2040); (iii) recovering the REEs from the BEPV can effectively reduce the demand for the REEs from the virgin source. Therefore, it is recommended to control the supply of the REEs according to each element's features, to increase the directive production plan target for Nd and Dy, to strengthen the technology research and development for recovering the REEs from the BEPV, and to establish an effective recycling system for solid wastes containing the REEs, such as electric vehicles and wind turbines.

Keywords material flow analysis; electric vehicles; rare earth elements; carbon neutrality ●



(责任编辑 刘志远)