

# 全面电动化下乘用车永磁电机资源风险及少稀土化影响

佟鑫<sup>1,2</sup>, 孙铎<sup>3\*</sup>, 汪鹏<sup>4,5,6</sup>, 邱子桢<sup>3</sup>, 李建新<sup>3</sup>, 施建荣<sup>1</sup>, 王惠初<sup>1</sup>, 丁艺<sup>7</sup>

1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
3. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300
4. 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
5. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341119
6. 中国科学院大学, 北京 100049
7. 华东理工大学商学院, 上海 200237

**摘要** 采用动态物质流分析方法, 预测了中国乘用车电动化转型中对镨、钕、镝和铽4种稀土资源的需求, 并辨识了潜在的供需风险。建议协调推进资源安全与“双碳”战略, 深入探索资源减量与替代技术, 科学推进自主开采与国际合作, 进一步推进中国电动车可持续发展及稀土资源可持续利用。

**关键词** 碳中和; 电动汽车; 稀土; 资源风险

发展新能源汽车是中国落实“双碳”目标<sup>[1]</sup>, 推动绿色发展的重要举措<sup>[2-4]</sup>。目前, 中国已成为全球第一大电动汽车市场<sup>[5]</sup>, 稀土永磁是生产电动车

驱动电机不可或缺的材料<sup>[3,6]</sup>。新能源汽车行业的发展离不开稀土工业链的安全保障, 稀土资源的供应不足也将对中国新能源汽车行业的发展产生一

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-09-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20230205, DD20230003, DD20221631); 国家自然科学基金委员会联合基金项目(U2244211); 上海市浦江人才计划项目(2020PJC029)

作者简介: 佟鑫, 博士, 研究方向为前寒武纪地质学、资源风险分析, 电子信箱: tongxingcs@163.com; 孙铎(通信作者), 高级工程师, 研究方向为资源风险分析、物质流分析、生命周期评价等, 电子信箱: sunxin@catarc.ac.cn

引用格式: 佟鑫, 孙铎, 汪鹏, 等. 全面电动化下乘用车永磁电机资源风险及少稀土化影响[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 114-126; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.21.011

定影响。未来,在落实“双碳”目标的背景下,随着全面电动化的推进,中国稀土材料的下游需求将加速释放,并面临供不应求的风险<sup>[7-8]</sup>。因此,有效评估新能源汽车行业的稀土资源需求并识别潜在的资源风险,将为中国“双碳”目标的实现提供有力保障,也将为中国有效应对资源风险提供决策支持。

基于对稀土元素供应链风险及成本的考虑,国内外陆续有相关厂商开发及推广“少/无稀土”永磁电机技术。在2023年特斯拉投资者日上,特斯拉表示其下一代永磁电机将完全不使用稀土材料。此前,宝马、丰田等企业也提出了如同步磁阻电机、混合励磁电机等“少/无稀土”技术路线。然而,技术革命是一个长周期的慢变量,钕、铁、硼等稀土永磁材料仍是目前磁性最强、应用最广的稀土永磁材料。为此,亟需立足于中长期的技术情景分析,研判新能源汽车永磁电机技术演变对稀土供应链的演变及其供需分析的影响。

目前,国内外已有对于中国稀土资源供需风险的相关研究,但在技术进步背景下,电动汽车发展对关键资源供需平衡影响的模型方法研究仍有不足,车辆电动化与稀土资源供需风险间的相互关系及影响等问题仍有待回答。首先,在研究对象上,已有研究往往聚焦于纯电动乘用车,忽略了混合动力汽车对于稀土资源的需求<sup>[7]</sup>;其次,在电动汽车规模预测上,已有研究未将汽车产业发展规划和“双碳”目标之间的关系厘清,例如,在情景设置中不同温控情景与“双碳”目标的关系不明<sup>[7,9]</sup>;此外,已有研究新能源汽车稀土资源的使用强度数据往往来自国外文献,未有基于中国本土化的调研数据<sup>[7,9-11]</sup>;特别是,少有研究考虑未来少稀土和无稀土电机技术进步对于稀土资源需求的影响<sup>[12-14]</sup>。

因此,本研究采用动态物质流分析方法和情景分析方法,面向“双碳”目标,设置基准情景、2060年前碳中和情景以及2050年前碳中和情景3种情景,核算和预测中国新能源汽车产业目前和未来的稀土资源需求,分析未来少稀土和无稀土电机技术进步中对稀土资源的影响。

## 1 研究对象、方法与数据来源

### 1.1 研究对象

为保障国家战略新兴产业发展需求,2016年中国发布了《全国矿产资源规划(2016—2020年)》,稀土被列入中国战略性矿产目录<sup>[15]</sup>。在“双碳”背景下,新能源汽车也将成为稀土材料应用规模最大、增长速度最快的领域之一。在新能源汽车行业,稀土材料主要应用于新能源汽车驱动电机,其中,最重要的应用即为稀土永磁电机。稀土永磁电机主要是指采用稀土材料制作的永磁电机,其主要作用是为电动汽车提供动力,将动力蓄电池的电能转化为机械能。稀土材料的应用,将进一步提升驱动电机的动力能效性能,提升功率/转矩密度,并使系统运行更加可靠、工况效率更高。因此,稀土永磁电机具备体积小、重量轻、运行可靠和效率高等显著优势,是当前和未来电动汽车主流的驱动技术应用<sup>[16]</sup>。稀土永磁电机的重要材料为钕、铁、硼,其组成中大部分为稀土钕元素,及少量稀土镨、铽、镱<sup>[17]</sup>。因此,综合考虑稀土资源的战略性及在电动汽车领域应用的代表性,选择钕、镨、铽和镱4种稀土资源作为电动乘用车电机稀土资源风险分析的研究对象。只研究作为电动乘用车主驱电机的稀土永磁电机,而不考虑其他辅驱作用的感应电机。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 电动乘用车规模预测方法

从2009年到2022年,中国汽车产销总量连续14年稳居全球第1,新能源汽车产销连续8年位居全球第1<sup>[18]</sup>。2022年,中国汽车销量达到2686.4万辆,其中,新能源汽车销量超过680万辆,市场占有率提升至25.6%<sup>[18]</sup>。乘用车贡献了新能源汽车总量的主要份额,占比为95.6%<sup>[18]</sup>。在“双碳”背景下,预计中国未来一段时间将迎来新能源汽车的快速发展。本研究应用中国汽车生命周期评价车队模型(CALCM-Fleet)<sup>[19]</sup>对中国未来新能源汽车销量进行预测。考虑到汽车电动化的代表性和稀土永磁电机的使用特性,主要研究对象为电动乘用车,包括纯电动乘用车和插电式混合动力乘用车2种类型。

本研究设置3种情景,即基准情景、2060年前碳中和情景和2050年前碳中和情景。其中,基准情景考虑了现有政策规划中的要求,并根据最新数据做了更新,2060年前碳中和情景和2050年前碳中和情景是在基准情景的基础上,分别考虑了2060年和2050年2个汽车行业碳中和的时间点,设置了2种强度的减排情景,电动化率的预测数据来自行业调研和专家咨询结果<sup>[19]</sup>。

1) 乘用车保有量预测方法。本研究中乘用车保有量的预测方法采用千人保有量模型进行计算<sup>[20]</sup>。在该模型中,乘用车的千人保有量主要与一个国家的经济发展情况有关,随着人均国民生产总值(GDP)的提升,每千人的汽车保有量将增加。第 $y$ 年乘用车保有量( $S_y$ )的具体计算公式如下

$$S_y = V_y \times N_y / 1000 \quad (1)$$

$$V_y = V_{\max} \times e^{(-be^{-cE_y})} \quad (2)$$

式中, $V_y$ 为第 $y$ 年乘用车的千人保有量水平(辆/千人),即每1000人拥有的乘用车数量, $N_y$ 为第 $y$ 年的人口总数(人), $V_{\max}$ 为饱和千人保有量水平(辆/千人),本文假设为350辆/千人, $b$ 、 $c$ 为拟合参数,根据历史数据拟合得到, $E_y$ 为当年人均GDP(元/人)。

2) 乘用车报废量预测方法。乘用车报废量为当年从乘用车车队中退役的车辆,其由车辆的生存规律决定。本研究假设对于相同车辆类型中不同燃料类型的车辆的生存规律一致。第 $y$ 年的报废量( $C_y$ )的具体计算公式如下

$$C_y = \sum_a S_{y-1,a} \times (1 - R_a) \quad (3)$$

式中, $R_a$ 为乘用车的生存率,即处于特定车龄 $a$ 的车辆,在下一年继续服役的概率。

3) 乘用车销量计算方法。第 $y$ 年乘用车的保有量等于第 $y-1$ 年的保有量减去第 $y$ 年退役的车

辆,再加上第 $y$ 年的新售车辆的销量( $X_y$ )。乘用车保有量、报废量与销量之间的关系如公式(4)所示

$$S_y = \sum_p \sum_a (S_{y-1,p,a} + X_{y,p} - C_{y,p,a}) \quad (4)$$

式中, $p$ 表示燃料类型。

根据公式(1)和(3)计算得到每年的保有量和报废量预测值之后,便可倒推计算的到第 $y$ 年乘用车的销量( $X_y$ ),具体公式为

$$X_y = S_y - S_{y-1} + C_y \quad (5)$$

不同燃料类型乘用车的数量由该燃料类型车辆的市场份额决定。假设电动乘用车占第 $y$ 年的销量的比例(电动化比例)为 $K_{y,p}$ ,则第 $y$ 年电动乘用车的销量( $X_{y,p}$ )的计算公式为公式(6)所示

$$X_{y,p} = X_y \times K_{y,p} \quad (6)$$

### 1.2.2 稀土资源需求预测方法

本研究按照自下而上的分析方法评估电动汽车的稀土资源的理论需求,主要取决于电动乘用车每年的销量及其稀土资源(钕、镨、铽和镱)的使用强度,具体计算公式如下

$$Q_{i,t} = \sum_x S_{i,t} \times E_{i,t} \quad (7)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为稀土资源 $i$ 在第 $t$ 年的需求量(t); $S_{i,t}$ 为电动乘用车在第 $t$ 年的销量(辆); $E_{i,t}$ 为稀土资源 $i$ 在第 $t$ 年的使用强度(t/辆)。

## 1.3 数据来源

### 1.3.1 稀土资源的使用强度数据来源

通过企业调研和访谈得到不同企业的稀土资源的使用强度数据。如表1所示,被调研企业包括4家典型电动汽车企业和2家典型钢铁企业,用不同企业使用强度数据的平均值代表电动乘用车稀土资源的平均使用强度,并针对企业使用强度数据中的最大值和最小值进行不确定性分析。

表1 电动乘用车稀土资源的使用强度

(单位:g/辆)

编号	钕	镨	镨	铽	稀土资源总量
1	300.0~600.0	2.0~60.0	2.0~60.0	0	304.0~720.0
2	500.0	0	10.0	10.0	520.0
3	666.7	0	13.3	13.3	693.3
4	510.0	0	12.0	12.0	534.0
5	420.0~450.0	140.0~150.0	2.0	0	562.0~602.0
6	430.0~487.5	145.0~162.5	12.0~16.0	0	587.0~666.0
平均值	484.9	109.9	21.4	11.8	628.0

### 1.3.2 稀土资源产量数据来源

全球稀土资源分布较为集中,根据美国地质调查局2022年公布的数据,全球稀土资源储量约为1.2亿t,中国、越南、俄罗斯和巴西4个国家储量约占全球储量的90%,其中,中国储量约占36.7%<sup>[21]</sup>。近年来,随着汽车电动化的推进,全球稀土产量呈增长态势,2016年至2021年,全球稀土产量从12.9万t增长到28万t,年均增长23.4%。中国、美国、缅甸和澳大利亚4个国家为全球稀土主要生产国,2021年,4个国家稀土产量合计25.9万t,占全球稀土产量的92.5%。

中国为全球最大稀土出产国和出口国,2021年,中国稀土产量为16.8万t,占全球稀土产量的60%<sup>[21]</sup>,出口稀土产品4.89万t,出口额约为42.2亿元<sup>[22]</sup>。此外,中国已是包括稀土永磁体在内的多种稀土功能材料的全球第一大生产国<sup>[23]</sup>。根据稀土资源电子层结构和化学性质的差异,可将稀土资源分为轻稀土组(镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆)和重稀土组(钇、铽、镱、铟、铊、铋、镱、铋、铋、铋)。由于在稀土矿经分离得到的稀土混合物中,常以铈或钕含量占优,因此轻、重稀土组也分别称为铈组、钕组。中国轻稀土矿主要分布在北方地区,以内蒙古白云鄂博稀土矿为代表,还有山东微山稀土矿和四川冕宁稀土矿等,储量超过全国轻稀土资源的80%<sup>[24-26]</sup>。重稀土矿主要分布于广东省、福建省、江西省、云南

省等南方地区,储量占全国重稀土资源的90%,其中,江西赣州和粤东的重稀土资源储量分别占全国重稀土储量的44%和38%<sup>[8,27]</sup>。但从稀土矿的品位来看,中国与美国、澳大利亚等国家相比,还有一定的差距<sup>[28]</sup>。

为了评估全球不同稀土矿区各稀土资源产量的数据,本研究收集了全球各地矿区产量及矿石配额数据<sup>[21]</sup>,不同稀土资源(钕、镨、镱和铽)当前的产能用2018—2022年这5年产量的平均值代表。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电动汽车销量预测

图1展示了不同情景下电动乘用车销量及渗透率随时间的变化趋势。2050年前碳中和情景中电动乘用车的渗透率提升速度最快,销量最早达峰且峰值最高。该情景下的渗透率预计到2035年达到90%,比基准情景和2060年前碳中和情景中分别提前25 a和15 a;2035年电动乘用车销量达到峰值,约为2600万辆,是其他2个情景的1.1倍左右。在基准情景中,中国电动乘用车渗透率逐年提升,预计2025年和2030分别达到30%和40%,并在2060年达到90%,2060年电动乘用车销售量在2300万辆左右。在2060年前碳中和情景中,预计中国乘用车中短期的电动化速度将进一步提升,

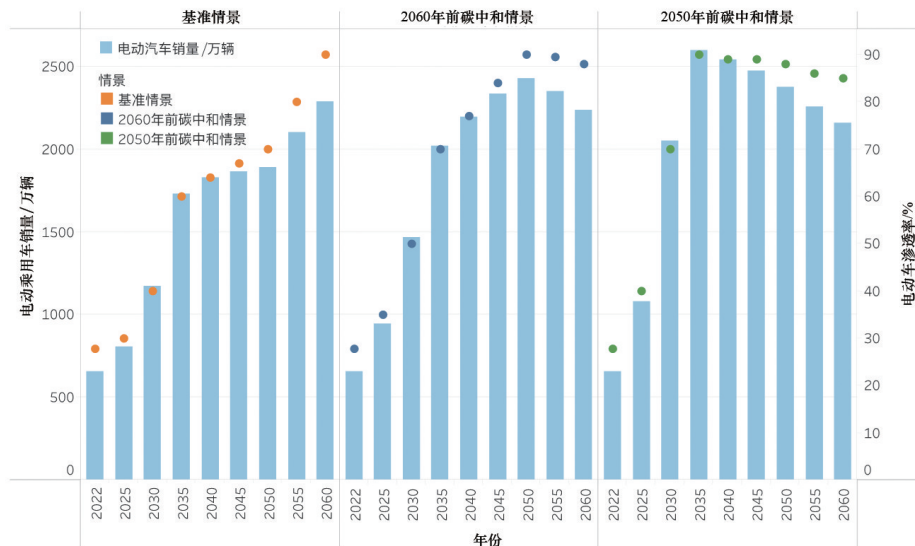


图1 中国电动乘用车销量及渗透率预测

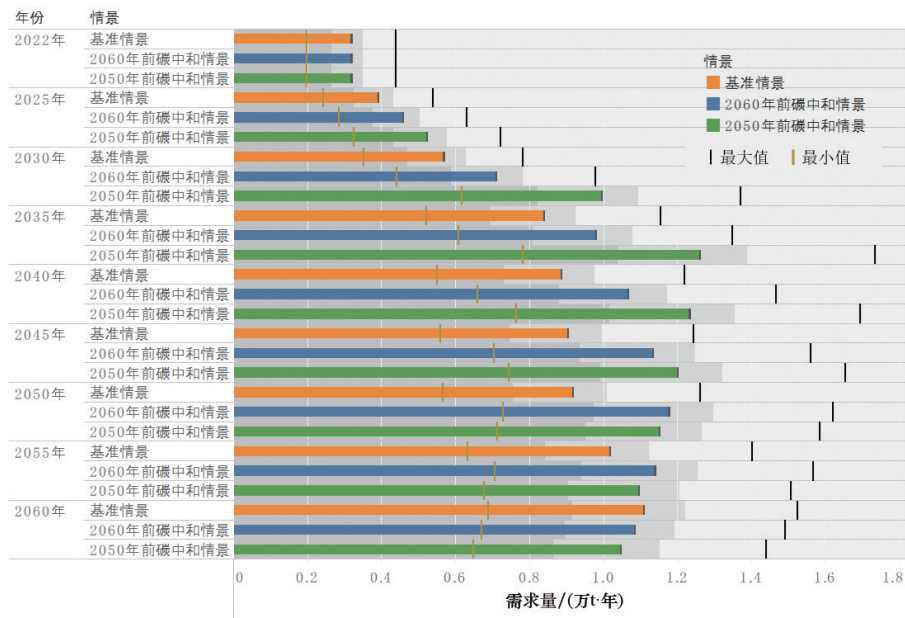
2025年和2030年分别为35%和50%;2050年电动乘用车渗透率达到90%,销售量在2400万辆左右。

2060年和2050年前碳中和情景中,由于电动乘用车渗透率先增后降,电动乘用车销量在达峰后有所回落。在2060年前碳中和情景中,2050年之后电动乘用车的渗透率走低,主要是考虑到新能源汽车中除电动汽车之外,燃料电池汽车所占比例有所提升;在2050年前碳中和情景中,假设燃料电池技术进步速度加快,燃料电池乘用车的推广力度加强,预计在2035年后会逐步替代一定比例的电动

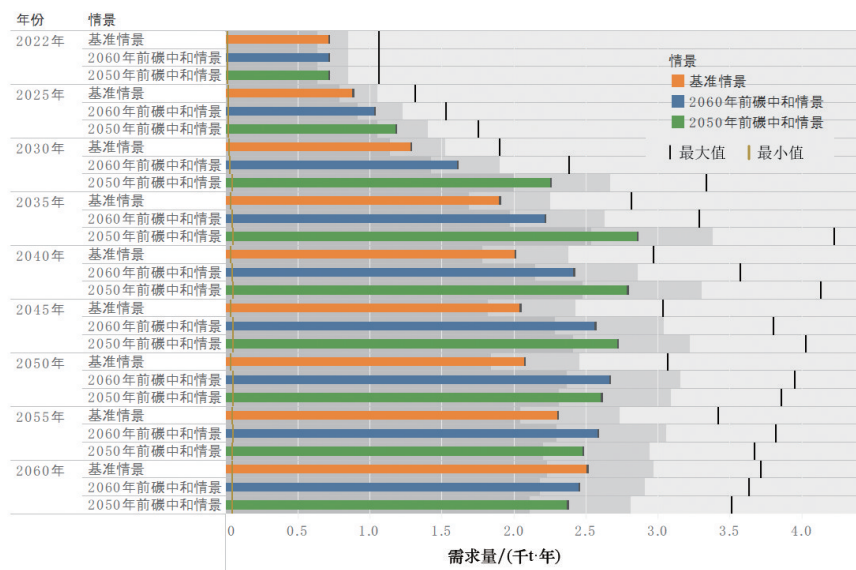
乘用车,到2060年燃料电池乘用车的比例达到15%。预计3种情景中2060年中国电动乘用车的销量为2200万~2300万辆,是2022年的3.3倍。

### 2.2 稀土资源需求预测

不同情景下中国电动乘用车稀土资源需求量预测结果如图2所示。其中,图2(a)~图2(d)分别展示了乘用车电动化相关的钕、镨、镝和铽的需求量。在不同情景针对不同类型的稀土资源,中国电动乘用车稀土资源需求量存在一定的差异。首先,面向碳中和目标,中国电动乘用车稀土资源需求量

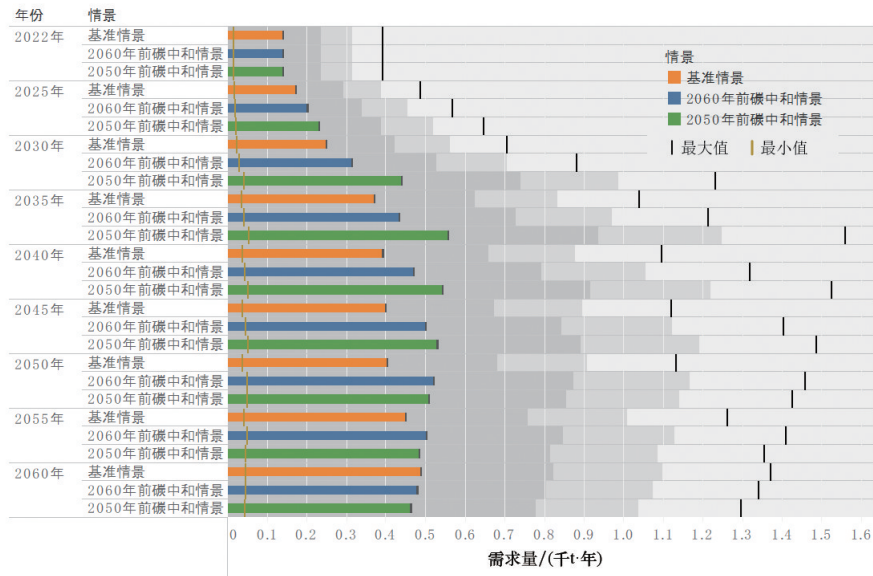


(a) 钕需求量

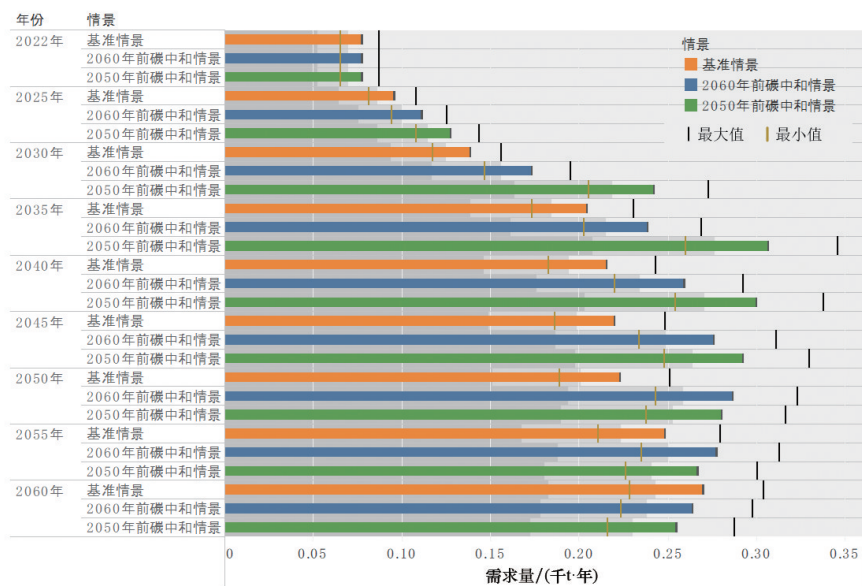


(b) 镨需求量

图2 不同情景下中国电动乘用车稀土资源需求预测



(c) 镝需求量



(d) 铈需求量

图2 不同情景下中国电动乘用车稀土资源需求预测(续)

随电动化进程的不同而表现出差异。在不同情景下,不同稀土资源需求量的变化趋势相似,在基准情景中稀土资源需求逐年上升,2022—2060年复合增长率为3.2%,到2060年钕、镨、镝和铈的需求量分别为11090、2513、489、270 t。在2060年前碳中和情景中,稀土资源钕、镨、镝和铈的需求于2050年达峰,分别为11780、2669、520、287 t,2022—2050年复合增长率为4.8%。在2050年前碳中和情景中,稀土资源2022—2035年复合增长率为

11.2%,乘用车电动化相关的稀土资源需求将于2035年达峰,钕、镨、镝和铈的需求量分别为12600、2856、556、307 t。总体而言,碳中和目标越激进对稀土资源的需求量越旺盛。在2050年前碳中和情景中,中国电动乘用车稀土资源需求量最大,钕、镨、镝和铈需求量的峰值分别是其他2种情景的1.1倍左右。

对于电动乘用车中不同类型的稀土资源,面向碳中和目标的需求量将呈现明显的差异。在不同

情景的同一年份中,中国电动乘用车对钕元素的需求分别是镨、镝和铽的4倍、14倍和41倍。由于电动乘用车对于不同稀土资源的使用强度的范围差异较大,整体而言,钕和铽需求量的不确定性较低,镨和镝需求量的不确定性较高,例如镝的需求量的最大值是平均值的近3倍,是最小值的近30倍。总之,钕元素是中国乘用车电动化过程中需求量最大的稀土资源,其次是镨,而对镝和铽的需求量较少。

### 2.3 稀土资源供需风险分析

2018—2022年,稀土元素钕、镨、镝和铽在中国(不含港澳台地区)及全球的产量如图3所示。由数据可知,近年来,中国钕的产量方面与国外相比具有明显的优势,并呈现逐年增长的趋势,2022

年国内钕产量达到国外的7倍以上,占全球的近90%。中国镨产量与国外相当,全球镨产量在过去5年呈整体上升趋势,并在2022年略有收紧,2022年占中国镨产量全球的近70%。过去5年,全球镝和铽的产量在2021年达到峰值,并在2022年下降到低于2020年的水平。中国镝和铽的产量相比其他2种元素国际优势不足,2022年分别占全球产量的40%和52%,但其产量比较平稳。本研究选取2018—2022年,5年产量的平均值作为当前产能,计算得到中国稀土元素钕、镨、镝和铽当前产能分别为21566、6393、751、158 t,全球当前产能为25853、10681、2193、374 t。

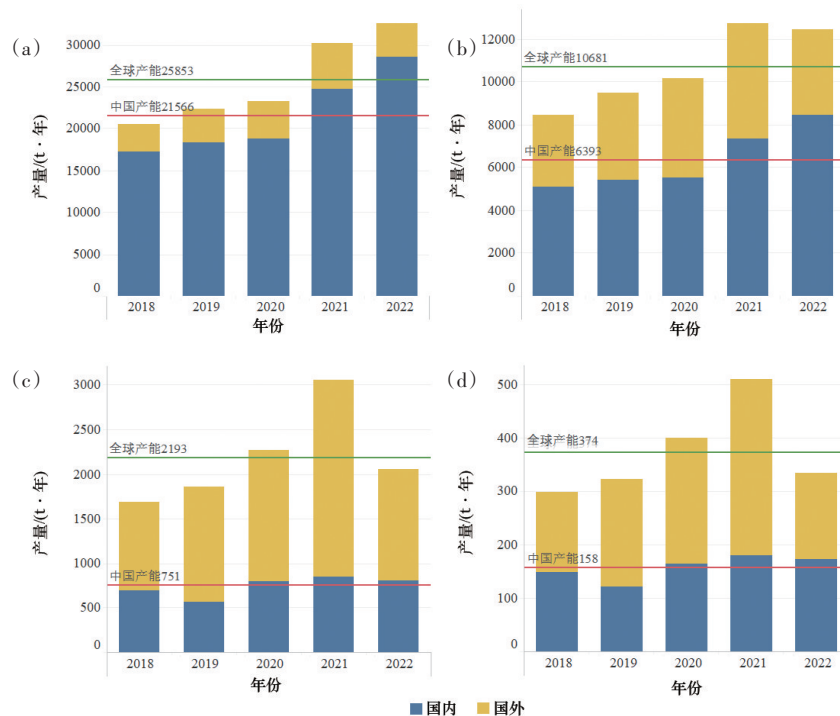


图3 2018—2022年钕(a)、镨(b)、镝(c)和铽(d)资源产量与当前产能

图4展示了不同情景下中国电动乘用车稀土资源供需情况的预测结果,由于不同稀土资源的产能及电动化拉动的需求量的差异,不同稀土资源的供需情况差异明显。

当前钕元素产能充足,预计可以满足未来乘用车电动化的需求。在基准情景、2060年前和2050年前碳中和情景中,乘用车电动化对稀土资源钕需

求的峰值分别是11090(6860~15240)、11780(7290~16190)、12600(7800~17320) t,是目前中国产能的50.4%(31.2%~69.3%)、53.5%(33.1%~71.3%)和57.3%(35.4%~78.7%)。预计未来中国乘用车全面电动化对于钕元素的需求将至多占到约50%。

当前镨元素产能也比较充足,预计可以满足未

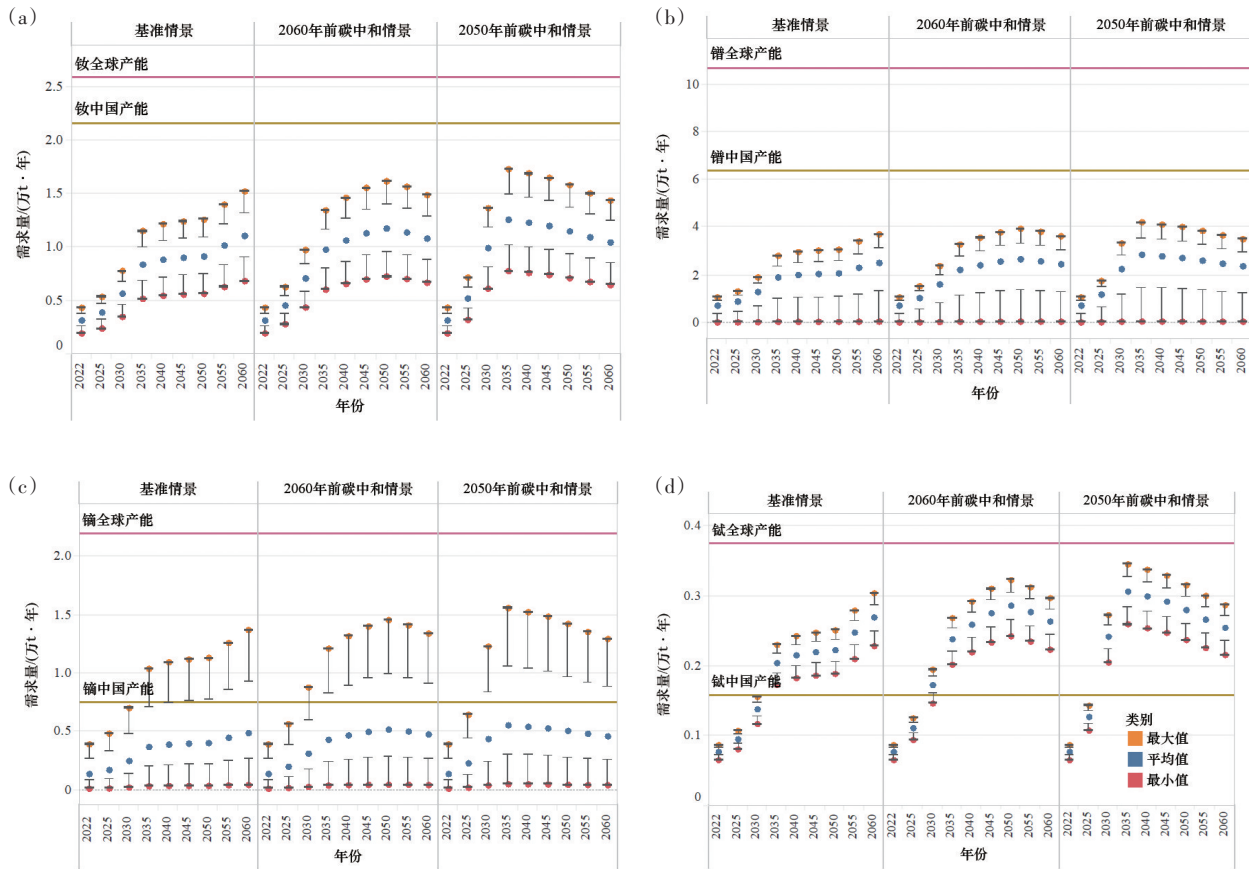


图4 不同情景下中国电动乘用车稀土资源钕(a)、镧(b)、镨(c)和铽(d)供需分析

来乘用车电动化的需求。在基准情景、2060年前和2050年前碳中和情景中,乘用车电动化对稀土资源镧的需求峰值分别是2513(46~3716)、2669(49~3947)、2856(52~4222) t,是目前中国产能的39.3%(0.7%~58.1%)、41.7%(8.0%~61.7%)和44.6%(0.8%~66.0%)。由于镧元素的强度数据最小值与最大值之间的差距较大,导致中国未来乘用车电动化对于镧元素的需求跨度较大,但仍在中国产能供给保障范围内,预计产能供给量约为镧元素平均最大需求量的约2倍有余。

目前镨元素的产能无法满足3种情景下未来中国乘用车电动化的需求。在基准情景中,电动乘用车对于稀土资源镨的需求将随时间逐渐增加,虽然乘用车电动化对镨元素的平均需求一直在中国产能之下,但预计到2035年,镨元素的最大需求将超过中国产能,并在之后持续走高;预计到2060年达到峰值489(46~1372) t,峰值的最大需求为中国

产能的1.8倍。与基准情景相比,在2060年前和2050年前碳中和情景中,镨元素的最大需求将在2030年超越中国产能,供需的平衡点将提前5年左右,预计峰值分别在2050年的520(49~1457) t和2035年的556(52~1559) t,且峰值的最大需求将达到中国产能的2倍左右。

目前铽元素的产能可以满足近期乘用车电动化的需求,但无法满足未来中长期的需求。在基准情景中,电动乘用车对于稀土资源铽的需求预计在2030—2035年超过中国产能;但在2060年前和2050年前碳中和情景中,预计提前5~10年,于2025—2030年超过中国产能。在需求超越产能之后,乘用车电动化对于铽元素的需求将继续上涨直达到达峰值,预计3种情景的峰值分别为270(229~304) t、287(243~323) t、307(260~346) t,是目前中国产能的1.7(1.4~1.9)倍、1.8(1.5~2.0)倍、1.9(1.6~2.2)倍。

综上所述,根据对未来电动乘用车电机的稀土资源的供需分析,在3种情景中,中国稀土资源钕和镨的供应充足,可以满足未来乘用车电动化的需求。但稀土资源镱和铽均存在未来供应短缺风险,且碳中和目标越激进,供不应求的风险越紧迫。未来镱和铽元素的最大需求量将超过目前中国产能的2倍左右,供不应求的时间点将在2030年左右凸显。相比而言,铽元素的供应短缺风险将更严峻,也将更早出现供给不平衡的现象。

由于目前中国尚未对电动车报废电机中的稀土资源进行强制回收,相关废旧电机稀土资源实际回收量数据缺乏,所以本研究暂未对未来稀土资源回收量进行分析。

#### 2.4 永磁电机少稀土或无稀土技术的影响

当前,电动汽车主驱电机仍呈现出永磁化趋势,辅驱电机永磁化占比约为60%<sup>[29]</sup>。对于主驱电机而言,技术发展趋势为重稀土向少稀土方向、稀土永磁向无稀土永磁方向2条路线发展。在重稀土向少稀土技术发展方向中,部分少稀土永磁电机已开始应用,精准渗镱(或铽)、烧结钕铁硼等技术

将成为主要趋势<sup>[30]</sup>。在稀土永磁向无稀土永磁技术发展方向中,如同步励磁电机、开关磁阻电机,虽然其在功率/转矩密度提升、转速区间扩展、振动与噪声控制等技术领域发展前景仍不明朗<sup>[31]</sup>,但仍会是国内外车企摆脱“稀土依赖”的重要途径。此外,对于电动汽车而言,随着动力电池的容量提升,对于电机功率密度和效率的关注度会逐渐降低,势必会影响驱动电机类型的选择。

假设未来少稀土永磁电机成为主要技术趋势,同时无稀土技术替代将随之兴起,预计2035年,少稀土和无稀土永磁电机各占1/4,仍有半数是其稀土永磁电机;2050年,少稀土永磁电机完成市场替代,无稀土电机技术占比达到40%;2060年少稀土和无稀土电机各占50%。在材料使用强度方面,假设钕、镨、镱和铽元素在稀土永磁电机中的使用效率不断提升,预计在2050年和2060年钕和镨、镱和铽元素的使用强度分别为现在的50%和30%。未来稀土永磁电机技术占比与稀土资源使用强度的参数设置如图5所示。

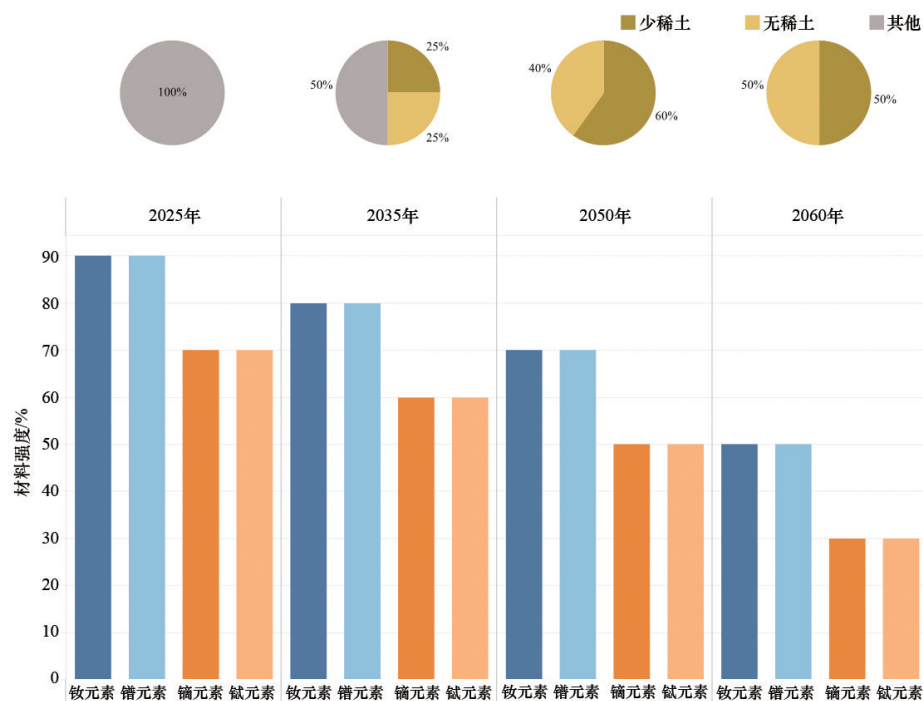


图5 稀土永磁电机技术占比与稀土资源使用强度预测

根据计算,随着少稀土或无稀土永磁电机技术的不断发展,预计未来在2035、2050、2060年,钕和镨元素的需求将分别降低30%、58%、75%,镓和铽元素的需求将分别降低35%、70%、85%。如图6所示,从未来稀土资源的需求量变化来看,预计在2035、2050、2060年,钕的需求量将分别降低2520~3780 t、5313~6832 t、7854~8316 t,镨的需求量将分

别降低571~857 t、1204~1548 t和1780~1885 t,镓的需求量将分别降低130~195 t、283~364 t和393~416 t,铽的需求量将分别降低72~107 t、156~201 t和217~229 t。面向碳中和目标,少稀土或无稀土永磁电机技术会大大降低乘用车电动化引发的稀土资源的供需风险,特别是未来镓和铽元素供应短缺的风险。

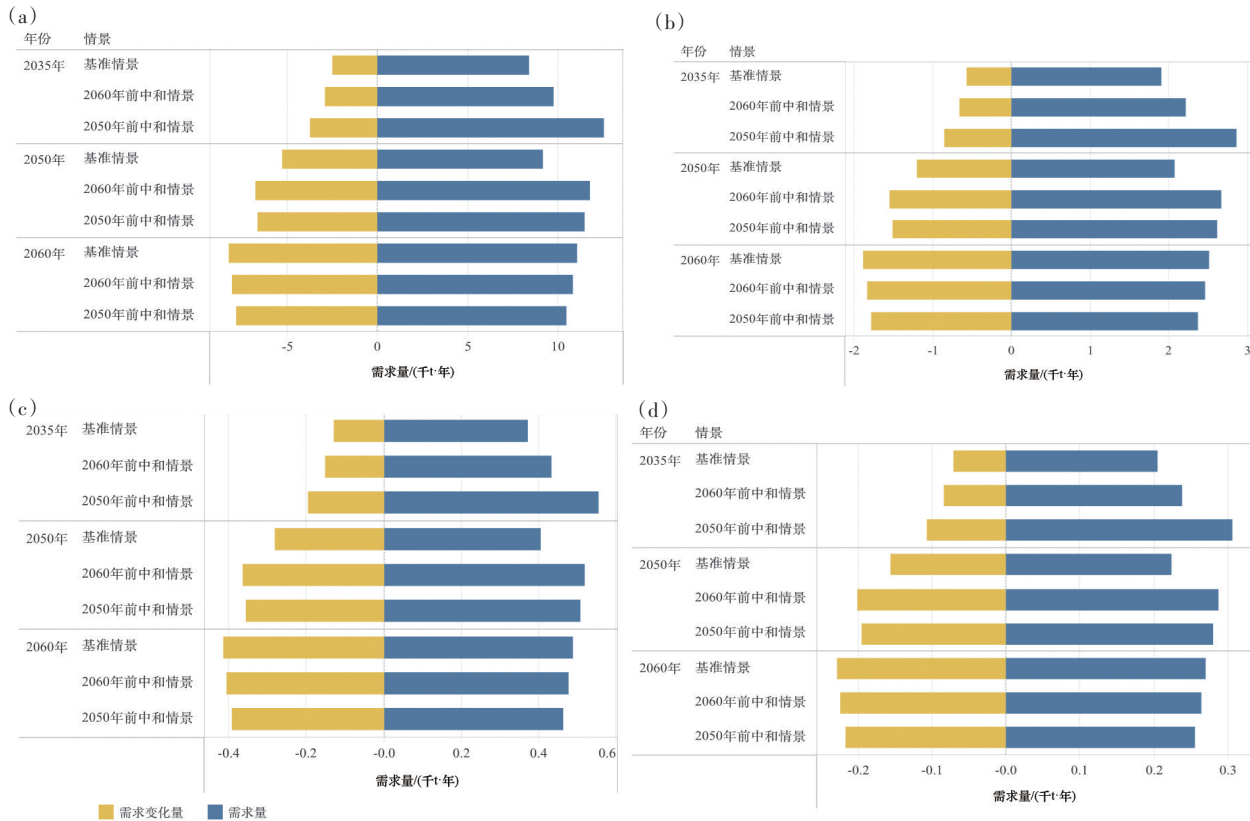


图6 少稀土或无稀土永磁电机技术发展下的稀土资源钕(a)、镨(b)、镓(c)和铽(d)需求量变化

### 3 结论

聚焦汽车电动化发展趋势,预测了中国电动乘用车未来的稀土资源钕、镨、镓和铽的需求量,并结合中国目前稀土资源的产能,辨识了不同情景中4种稀土资源的供需风险。

1) 2050年前碳中和情景中电动乘用车渗透率提升速度最快,销量最早达峰且峰值最高。2060年和2050年前碳中和情景中,由于电动乘用车渗透率先增后降,电动乘用车销量在达峰后有所回落。预计3种情景中,中国电动乘用车的销量峰值在2300万~2600万辆,电动车渗透率最高将达到90%。

2) 面向碳中和目标,中国电动乘用车稀土资源需求量随电动化进程的不同而呈现差异。碳中和目标越激进对稀土资源的需求越旺盛,3种情景中,2022年到需求达峰之间的年复合增长率分别为3.2%、4.8%、11.2%。对于不同的稀土资源,面向碳中和目标的需求量将呈现明显的差异,钕元素是中国乘用车电动化过程中需求量最大的稀土资源,其需求量的峰值范围为1.1万~1.3万t;其次是镨,需求量的峰值将近0.3万t;镓和铽的需求量较低。

3) 通过对未来电动乘用车电机的稀土资源的供需分析,中国稀土资源钕和镨供应充足,在3种情景中均可以满足未来乘用车电动化的需求,但稀

土资源镨和铽均存在未来供应短缺风险。资源供需的风险将随着电动化的深入和碳中和目标年的提前而愈加凸显。未来镨和铽元素的最大需求量将超过目前中国产能的2倍左右,预计在2030年左右将引发供需的不平衡。

4) 随着少稀土或无稀土永磁电机技术的不断发展,预计未来在2035、2050、2060年,钕和镨元素的需求量将分别降低30%、58%、75%,镨和铽元素的需求量将分别降低35%、70%、85%。面向碳中和目标,少稀土或无稀土永磁电机技术会大幅降低乘用车电动化引发的稀土资源的供需风险,特别是未来镨和铽元素供应短缺的风险。

下一步研究中,可以考虑开展乘用车稀土资源循环及生产配额调整的相关研究,研究不同情景及回收率的情况下稀土资源原矿的需求动态变化,为中国稀土资源供应的配额调整提出政策建议。基于研究结论,对未来中国电动汽车产业发展及稀土资源可持续利用提出以下建议。

1) 协调推进资源安全与“双碳”战略。中国需要加紧研究制定电动汽车关键矿产资源管理办法,建立国家级的资源风险预警与决策支持平台,结合不同稀土资源供需风险的影响程度,对轻稀土与中重稀土制定差异化的保障性政策,进一步加强中重稀土的供应安全,构筑电动汽车产业链的资源安全保障体系。

2) 深入探索资源减量与替代技术。资源减量与替代技术创新是应对资源风险的有力保障,中国应加大稀土永磁电机少稀土和无稀土技术的研发力度,特别是针对镨和铽这样供需风险较高的中重稀土资源,应进一步促进相关技术的示范应用,以技术引领为中国稀土资源安全和汽车电动化可持续发展保驾护航。

3) 科学推进自主开采与国际合作。一方面,针对不同稀土资源的供需特征,制定科学合理的稀土资源开采计划,保障中国汽车电动化转型过程中的稀土资源的国内供给;另一方面,继续深化与共建“一带一路”国家、发展中国家和发达国家的合作,在汽车电动化转型的关键资源保障方面提供中国方案。

## 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) [2022-07-27]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content\\_5570055.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.htm).
- [2] 冯屹,张鹏,赵冬昶,等. 面向碳中和的汽车行业低碳发展战略与转型路径(CALCP 2022)[M]. 北京:中汽数据有限公司,2022:3-4.
- [3] 中华人民共和国国务院办公厅. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)[R]. 北京:中华人民共和国国务院办公厅,2020.
- [4] 中华人民共和国国务院办公厅. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[R]. 北京:中华人民共和国国务院办公厅,2012.
- [5] 公安部. 全国机动车保有量已达3.93亿辆,为十年前的1.64倍[EB/OL]. (2021-12-03) [2022-07-27]. <https://www.mps.gov.cn/n2255079/n6865805/n7355741/n735578-0/c8250433/content.html>.
- [6] 中华人民共和国自然资源部. 《中国矿产资源报告2022》[R]. 北京:中华人民共和国自然资源部,2022.
- [7] 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.
- [8] 杨斌清,张贤平. 世界稀土生产与消费结构分析[J]. 稀土,2014,35(1):110-118.
- [9] 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.
- [10] Xu G, Yano J, Sakai S-I. Scenario analysis for recovery of rare earth elements from end-of-life vehicles[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(3): 469-482.
- [11] Alonso E, Sherman A M, Wallington T J, et al. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(6): 3406-3414.
- [12] Zheng S, Zhu X, Xiang Z, et al. Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2022, 1(1): 100012.
- [13] Depraiter L, Goutte S. The role and challenges of rare

- earths in the energy transition[R]. Paris: HAL Open Science, 2023.
- [14] Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1285–1303.
- [15] 中华人民共和国自然资源部. 全国矿产资源规划(2016–2020年)[EB/OL]. (2016–11–01) [2023–06–09]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzU0ODE3NTQzOA==&mid=2247484307&idx=1&sn=da36ee84e6bd072b363-a635de1642d05&chksm=fb4268b2cc35e1a4ffe90b6647f-9bf4d5d7184f804b680331c54c1e32301860c660625ddf6-5a&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzU0ODE3NTQzOA==&mid=2247484307&idx=1&sn=da36ee84e6bd072b363-a635de1642d05&chksm=fb4268b2cc35e1a4ffe90b6647f-9bf4d5d7184f804b680331c54c1e32301860c660625ddf6-5a&scene=27).
- [16] 丁荣军, 刘侃. 新能源汽车电机驱动系统关键技术展望[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(3): 56–60.
- [17] 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.
- [18] 中国汽车工业协会. 2022年汽车工业产销情况[EB/OL]. (2023–01–12) [2023–06–09]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzA3MjQ4MzIwMw==&mid=2651873164-&idx=2&sn=059ceb10ca34e42d61220ac3adbec42&chksm=84f95760b38ede76d239187d5cc7bbacf4b546e24f3-c37f712dfd8ab8e5be7d58f2196803aad&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3MjQ4MzIwMw==&mid=2651873164-&idx=2&sn=059ceb10ca34e42d61220ac3adbec42&chksm=84f95760b38ede76d239187d5cc7bbacf4b546e24f3-c37f712dfd8ab8e5be7d58f2196803aad&scene=27).
- [19] 中汽数据有限公司等. 面向碳中和的汽车行业低碳发展战略与转型路径[M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2022.
- [20] Wu T, Zhang M, Ou X. Analysis of future vehicle energy demand in China based on a gompertz function method and computable general equilibrium model[J]. *Energies*, 2014, 7(11): 7454–7482.
- [21] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2022[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2022.
- [22] 陈占恒. 2021年稀土产品进出口统计[J]. *稀土信息*, 2022(2): 28–34.
- [23] 吴一丁, 彭子龙, 赖丹, 等. 稀土产业链全球格局现状、趋势预判及应对战略研究[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(2): 255–264.
- [24] 王惠初, 张家辉, 任云伟, 等. 华北克拉通中北部麻粒岩带基础地质调查进展及相关问题讨论[J]. *华北地质*, 2022, 45(1): 18–41.
- [25] 郝美珍, 赵永岗, 张顺, 等. 白云鄂博超大型Nb-Fe-REE矿床主矿体形态变化及深部找矿方向的探讨[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(3): 167–175.
- [26] 吉力强, 陈明昕, 顾虎, 等. 轻稀土资源现状及在新能源汽车领域的应用[J]. *中国稀土学报*, 2020, 38(2): 129–138.
- [27] 付伟, 赵芹, 罗鹏, 等. 中国南方离子吸附型稀土矿床成矿类型及其母岩控矿因素探讨[J]. *地质学报*, 2022, 96: 1–25.
- [28] 王路, 汪鹏, 王翹楚, 等. 稀土资源的全球分布与开发潜力评估[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 27–39.
- [29] 蔡蔚, 贡骏, 张舟云, 等. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [30] Cai W, Wu X, Zhou M, et al. Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles[J]. *Automotive Innovation*, 2021, 4(1): 3–22.
- [31] Yang Z, Shang F, Brown I P, et al. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, 3(1): 245–254.

## Research on resource risk and influence of rare earth reduction in permanent magnet motor of passenger vehicles under full electrification

TONG Xin<sup>1,2</sup>, SUN Xin<sup>3\*</sup>, WANG Peng<sup>4,5,6</sup>, QIU Zizhen<sup>3</sup>, LI Jianxin<sup>3</sup>, SHI Jianrong<sup>1</sup>, WANG Huichu<sup>1</sup>, DING Yi<sup>7</sup>

1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China
4. CAS Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
5. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341119, China
6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
7. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

**Abstract** As a core key component of new energy passenger vehicles, permanent magnet motor that add rare earth minerals such as dysprosium and terbium can improve the basic characteristics such as remanence and coercivity. With the acceleration of the comprehensive electrification of vehicles, the prominent contradiction between supply and demand of rare earth minerals is highlighted. A dynamic material flow analysis method is used in this study to predict the demand for praseodymium, neodymium, dysprosium, and terbium resources in China's passenger car electrification transformation. This analysis identifies the supply and demand risks for different rare earth resources. To promote the sustainable development of electric vehicles and sustainable utilization of rare earth resources in China, the study suggests coordinating the promotion of resource security and the dual carbon strategy, exploring resource reduction and alternative technologies, and scientifically promoting independent mining and international cooperation.

**Keywords** carbon neutrality; electric vehicle; rare earth; resource risk ●



(责任编辑 王微)