

战略性金属矿产供需关系评估 ——基于风电产业链的研究

段悦¹, 葛建平^{1,2*}

1. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083

2. 中国地质大学(北京)自然资源战略发展研究院, 北京 100083

摘要 随着中国能源结构转型的推进, 风电装机规模持续扩大, 风电产业链各环节对战略性矿产的需求快速增长, 战略性矿产的可持续供给问题成为保证中国风电产业高质量发展的战略性问题。采用广义翁氏模型对钨、锆、铀、镭、钼、镍、铜 7 种培育风电产业链所需的金属原材料开展了产量预测和开采路径模拟。同时, 考虑市场份额、技术进步和回收利用情况, 设计风电产业的低速发展情境、基准情境以及高速发展情境, 计算了不同情境下钨、锆、铀、镭、钼、镍、铜 7 种金属原材料的未来需求量。基于此, 对比分析风电产业链中战略性金属矿产资源的供需状态, 为保障风电产业链金属矿产资源合理供给提出政策建议。

关键词 广义翁氏模型; 风电; 战略性金属矿产

作为重要的可再生能源, 风力发电对中国经济可持续发展有着重要作用, 是“十四五”时期能源结构转型的重要支撑。近年来, 中国以风电为代表的可再生能源装机规模持续扩大。截至 2021 年, 全国发电装机容量约 23.70 亿 kW, 其中, 风电装机容量约 3.30 亿 kW, 占全国总发电装机容量的 16.50%^[1]。2060 年之前, 中国可再生能源的结构占比预计可达 70% 以上, 风力发电将通过替代燃煤

发电, 大幅贡献二氧化碳减排额度, 成为中国实现碳减排的重要路径^[2]。

从金属耗材看, 培育完整的风电产业链需要多种战略性金属矿产作为关键支撑材料。风电产业链可大致分为上游风力发电机零部件制造, 中游风力发电机整机制造和下游风电开发运营。风力发电机一般由机舱、转子叶片、齿轮箱、发电机等主要部件组成, 其机舱和转子叶片使用铜(Cu), 风电主

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(72274183); 北京市社会科学基金项目(21DTR059)

作者简介: 段悦, 硕士研究生, 研究方向为自然资源经济与管理, 电子信箱: 2007210094@cugb.edu.cn; 葛建平(通信作者), 教授, 研究方向为资源经济与政策, 电子信箱: gejianping@cugb.edu.cn

引用格式: 段悦, 葛建平. 战略性金属矿产供需关系评估——基于风电产业链的研究[J]. 科技导报, 2024, 42(5): 92-108; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.05.009

机的齿轮箱和发电机则以镍(Ni)、钕(Nd)、镝(Dy)、镨(Pr)、铽(Tb)、钼(Mo)和铜(Cu)等为主要耗材。因此,风电产业链的延伸和规模的扩张将带来战略性金属矿产消费的快速增长。以铜为例,目前,海、陆风电装机每GW新增耗铜量已分别达到0.54万、1.53万t^[3]。2020年10月《风能北京宣言》提出制定与碳中和目标适应的“十四五”风电发展规划,到2025年确保风电年均新增装机不低于5000万kW,政策目标驱动下战略性金属矿产消费需求将持续增加。

新时期,战略性金属矿产供应与风电发展需求之间的不平衡可能成为制约中国风电扩大发展的关键因素。中国作为全球主要的稀土生产国之一,稀土矿产量占全球的58.33%,但目前中国稀土储量仅占全球储量的36.67%^[4];与风电产业发展带来的高需求相对,2010—2020年,中国稀土产量占全球稀土产量的比重下降了57.35%^[4]。钼金属需求持续上涨,2022年4—6月,全球钼产量为6.57万t,消费量为7.31万t,供需缺口0.73万t^[5];同时,中国是最大的钼生产国,钼资源储量占全球的51%,但是全球钼产量在逐年下降,中国以外无新增产能,这可能会加大中国的供给压力。镍是中国紧缺性矿产资源之一,资源总量不高,但其广泛应用于工业、军工、风电产业,资源消费量居高不下,目前中国镍金属的对外依存度已高达90%^[6]。电力是中国铜的主要消费领域,2019年占比已达41.2%^[7],近年来中国精炼铜消费量也持续上涨,连续16年成为世界最大的铜消费国,未来风电产业的扩张将进一步扩大中国铜消费量。总体看来,战略性金属矿产资源供不应求可能成为中国风电未来发展的潜在危机。

目前,国内外关于风电产业链中战略性金属矿产供需预测的研究主要是从全球视角探讨风电发展的资源需求和可持续性问题。在需求侧,未来20~30年,风力发电对战略性金属矿产的需求量将持续上涨,而随着市场份额增加,全球风电产业的可持续发展也将更加依赖于战略性金属矿产的供应^[8];而全球新冠肺炎疫情暴发、环境成本和回收替代则成为影响可再生能源转型中战略性金属矿产

供应的重要因素^[9-12]。就中国风电产业链而言,风电行业呈蓬勃发展态势,而大规模的风电开发可能导致产业链内部战略性金属矿产资源短期和长期供应风险,技术进步以及回收利用的提高能够加大金属矿产长期供应的可能性^[13-14]。

本研究以培育风电产业链所需的钕、镨、铽、镝、钼、镍、铜7种金属矿产为主要研究对象。通过建立广义翁氏模型和基于文献聚类的情境分析,估算上述7种金属2022—2050年的国内产量和风电产业链资源需求量,在不同发展情境下对比分析中国风电产业链中,核心发电技术依赖的战略性金属矿产供求状况。

1 研究方法 with 数据来源

首先,利用稀土氧化物和钼、镍、铜的历史产量数据建立广义翁氏模型,预测钕、镨、铽、镝、钼、镍、铜7种金属的未来产量;其次,建立市场份额、技术进步和回收效率影响下的低速、基准和高速3种风电发展情境,对中国风电产业链的战略性金属矿产资源需求量进行预测;最后,根据预测结果分析中国风电产业链战略性金属矿产资源供需形势。

1.1 广义翁氏模型

广义翁氏模型是陈元千在翁文波的翁氏模型基础上推导出来,用于石油气产量预测的一种曲线拟合模型^[15-16]。能源生产预测领域常见的曲线拟合模型还有Hubbert模型、HCZ(胡-陈-张)模型^[17-18]。与上述模型相比,广义翁氏模型描述了事物从兴起、成长、成熟到衰退的全过程,它所得到的预测曲线形状不一定是对称的。中国金属矿产历史产量经过了快速上升期、稳产期和缓慢下降期,产量曲线应近似于不对称的“钟形”曲线,产量趋势与石油气产量有一定相似性。广义翁氏模型基于历史数据拟合出金属矿产的最优开采路径,侧重于描摹金属矿产生命周期变化规律,从不可再生资源可耗竭性角度模拟资源开采的最优速度和路径。基于历史产量数据所得的开采路径模拟结果,通过回归拟合将非理性的市场行为在一定区间内合理化,并根据资源禀赋情况对未来的开采行为作出了

合理规划,从而能够从矿产资源保障年限视角有效预测中国金属矿产的未来产量。此前广义翁氏模型也在稀土和能源矿产的未来产量预测中得到过广泛而有效的应用^[19-20],因此,用广义翁氏模型对钹、镨、铽、镝、钼、镍、铜7种金属的产量进行预测,相关函数表达式为

$$Q_t = at^b e^{-\frac{t}{c}} \quad (1)$$

式中, Q_t 为 t 时刻资源产量; t 为开发时间; a 、 b 、 c 为计算参数。

为确定模型中参数 a 、 b 、 c 的值,依据线性试差法进行求解,具体过程如下。

首先,将式(1)改写为 $\frac{Q_t}{t^b} = ae^{-\frac{t}{c}}$,对等式两边取自然对数,得

$$\ln \frac{Q_t}{t^b} = \ln a - \frac{t}{c} \quad (2)$$

当

$$A = \ln a \quad (3)$$

$$B = -\frac{1}{c} \quad (4)$$

式(2)可以写为

$$\ln \frac{Q_t}{t^b} = A + Bt \quad (5)$$

然后,根据7种金属的历史产量与时间的数值,给定不同的 b ,利用式(5)进行试差求解,得到相关系数最高的直线的 b ,同时可解得直线截距 A 和斜率 B 。再由式(3)、式(4)分别计算得到模型常数 a 和 c 的数值。最后,将 a 、 b 、 c 代入式(1)中可以预测各金属矿产的产量 Q 。

稀土氧化物及钼矿、镍矿、铜矿的历史产量数据来自原国家计委稀土办公室、国家发展和改革委员会稀土办公室、美国地质调查局(USGS),稀土氧化物产量缺失值由美国地质调查局(USGS)公布的中国稀土矿区氧化物产量配分平均值与当年稀土总产量估算作为补充。

1.2 情境分析法

情境分析是通过分析研究对象未来发展过程中涉及的影响因素,来假定情境以及各种情境可能产生的影响,并对研究对象未来发展状况作出预测的一种方法,近年来在风电等可再生能源需求预测

中有广泛应用^[21-22]。本研究基于21世纪的可再生能源政策网络(REN21)、彭博新能源财经(BNEF)、国际能源署(IEA)、国际可再生能源署(IRENA)、全球风能理事会(GWEC)^[23-28]等12所主流能源研究机构发布的18份能源展望报告,分析风电产业链战略性新兴产业矿产资源需求的影响因素,假定风电产业发展情境,并预测未来风电产业链的金属需求。

1.2.1 影响因素分析

发电技术市场份额膨胀和高强度的金属材料使用拉动了风电产业链的战略性金属矿产耗材需求,回收技术则为其带来了二次资源供给。战略性金属矿产是制造永磁风力发电机的关键原材料,而技术进步可以降低这些金属材料的使用强度,同时,风力涡轮机中的永磁体不易报废,可以作为二次资源回收利用^[29]。因此,以风电装机容量表征中国风电产业发展情况,并构建综合情境,分析上述影响因素作用下,中国风电产业链的战略性金属矿产需求量未来变动趋势。

发电技术市场份额即永磁直驱风机在未来风力发电总装机容量中的占比。永磁风力发电机的制造以钹、镨、铽、镝、钼、镍、铜为主要耗材,该项发电技术市场份额越高,战略性金属矿产的需求量越大。目前中国风电机组的整机技术仍以齿轮箱增速驱动的双馈发电机为主,永磁直驱风机的市场占有率也在快速增长。相比传统的双馈发电机,永磁风力发电机具有结构简单、体积小、高效节能等优点,以海上风电为主要应用场景。《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》提出建设五大海上风电基地,未来海陆并重的风电发展趋势将进一步提高永磁风力发电机技术市场份额。

金属材料强度指建设每MW风电装机容量所需金属资源量。风力发电通过转换技术开发可再生的一次能源,但需要保障不可再生的战略性金属矿产的供应,作为风电技术基础性和关键性的材料支撑。相同的单机容量下,不同的发电机型对金属矿产的需求量不同,同种发电技术也会因制作工艺的不同导致材料强度有别^[3]。技术进步能够显著降低某些金属材料强度,从而影响风电产业的战略性新兴产业矿产需求。

回收技术的进步能够在一定程度上补充战略性金属矿产资源供应,能够提高金属矿产的总体供给量。废弃的风力涡轮机通常是因为叶片老化而停止工作,而作为核心部件的永磁直驱风机保护得较为完好,一般在废弃组件拆卸后可以将整个永磁体部件直接再循环投入。因此以报废磁体和工业废料作为战略性金属矿产二次供应来源,有巨大的回收潜力^[30]。2021年3月,国家市场监督管理总局、中国国家标准化委员会发布《光伏组件回收再利用通用技术要求》,对金属材料的再生利用标准作出规范,以再生利用率衡量矿产资源的回收效率。目前,风电产业尚未有相关国家标准出台,考虑到光伏金属回收技术与风电技术的共通性,本

研究参考《光伏组件回收再利用通用技术要求》对金属再生利用率的定义,计算回收技术进步对战略性金属矿产总需求的补充。金属再生利用率计算公式为

$$\eta = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (6)$$

1.2.2 情境设置

以永磁发电技术市场份额、金属再生利用率、金属材料强度分别表征市场份额、金属材料强度、回收技术变化对风电产业链战略性金属矿产需求的影响,参考能源研究机构对中国风电装机容量的断点预测,设计基础情境和2个模拟情境,分析展望中国风电产业链的战略性金属矿产需求(表1)。

表1 情境模式参数设置

年份	风电装机容量/GW			永磁技术市场份额/%			金属再生利用率/%	
	低速发展情境	基准情境	高速发展情境	低速发展情境	基准情境	高速发展情境	低速发展情境	基准情境
2025	350.70	443.35	536					
2030	533.33	704.17	875	35	55	75	70	80
2050	1190.77	1861.39	2532					

情境模式参数均来自能源机构报告和文献收集。目前关于全球及中国发电技术金属需求预测的文献,主要依据国家或能源机构对可再生能源发展做出的规划进行情境参数设置。研究一般假设复合年增长率保持不变,确定未来某个年份风力发电的发展规模,再计算出对金属材料的需求。研究机构的规划和情境设计中,金属材料强度一般不变,也有部分研究对稀土材料强度变化进行假设和预测,风力发电使用的金属材料强度以及受技术进步影响的稀土材料强度变化情况见表2。

表2 风力发电使用的金属材料强度

金属	强度/(kg·GW ⁻¹)		
	2025	2030	2050
钕	147.50	112.00	78.00
镨	39.00	30.00	20.00
铽	1.05	0.80	0.55
镱	23.50	18.00	12.00
钨		75.30~136.00	
镍		376.60~663.40	
铜		1012.00~11142.90	

中国风电装机容量预测数据由能源报告展望结果聚类得到,以报告统计结果分别设定2025—2050年中国风电装机容量的上界和下界,以报告统计结果中值为基础情境参数。永磁技术市场份额即永磁风机在未来风力发电总装机容量中的占比,根据现有文献对永磁技术市场份额的统计设置模拟情境参数,假定到2050年,风力发电市场中永磁发电机以低速、高速发展取得的最大市场份额分别为35%、75%^[31-33],以中值55%为基准情境。金属再生利用率参考《光伏组件回收再利用通用技术要求》,最低标准为70%,结合文献[34]考虑回收的最大影响,将3种发展情境中再生利用率分别设置为70%、80%、90%。金属材料强度数据来自文献[35-46],其中,金属铜的材料强度差值范围较大,海上风力发电机对金属铜的材料强度消耗一般为10 t/GW,陆上风电则为2 t/GW,因此其材料强度范围存在数量级的差异。

基准情境下(表1),产业布局、电机制造及材料回收技术以当前水平下逐渐趋于成熟,中国风电

产业进入稳步发展阶段。风电累积装机容量增长动力充沛,但速度放缓,预计到2050年全国累积装机容量1861.39 GW;永磁风机技术平稳发展但尚未实现规模应用,在风力发电市场中的市场份额为55%;回收利用技术在一定程度上提高风电产业的总体资源供给使得金属净需求有所下降,此时金属再生利用率达到80%。

高速发展情境假定中国风电产业持续快速发展,各影响因素呈现积极的发展趋势。风电市场规模迅速扩大,到2050年,风电装机容量将达2532 GW^[26];风电设备制造技术进一步提高,永磁风机应用实现大型产业化,在风力发电市场中取得75%的市场份额;回收技术日趋成熟,材料循环利用反哺产业需求,战略性金属矿产再生利用率达到90%。

低速发展情境中,假定中国风电产业受到新冠肺炎疫情、经济全球化逆流的变局影响,产业规模增长速度放缓。风电累积装机容量以年均32 GW的增速,在2050年达到1190.77 GW^[28];永磁风机技术发展缓慢,在风力发电技术市场中永磁风机占35%^[31];金属再生利用率达到国家最低标准70%。

2 结果与讨论

2.1 风电产业链战略性金属矿产产量预测及开采路径模拟

2.1.1 稀土产量及开采路径模拟

基于1991—2018年钕、镨、铽、镝的氧化物产量数据分别建立广义翁氏模型^[47],参数计算结果见表3。将预测参数代入模型进行计算,可得到4种稀土氧化物1991—2050年的开采路径模拟结果;同时,根据稀土氧化物的相对分子质量对上述预测结果进行换算,以测得钕、镨、铽、镝4种元素对应的金属矿产量理论值(图1)。

4种稀土金属矿产量峰值时间接近,均在2014年左右达到峰值;峰值产量差距较大,为0.06万~1.39万t(表4)。钕、镨、铽、镝4种金属的产量分别

表3 广义翁氏模型求解参数值

稀土氧化物	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
氧化钕	247.26	1.91	12.70
氧化镨	19.76	2.39	10.54
氧化铽	0.78	3.25	6.94
氧化镝	9.42	2.81	8.34

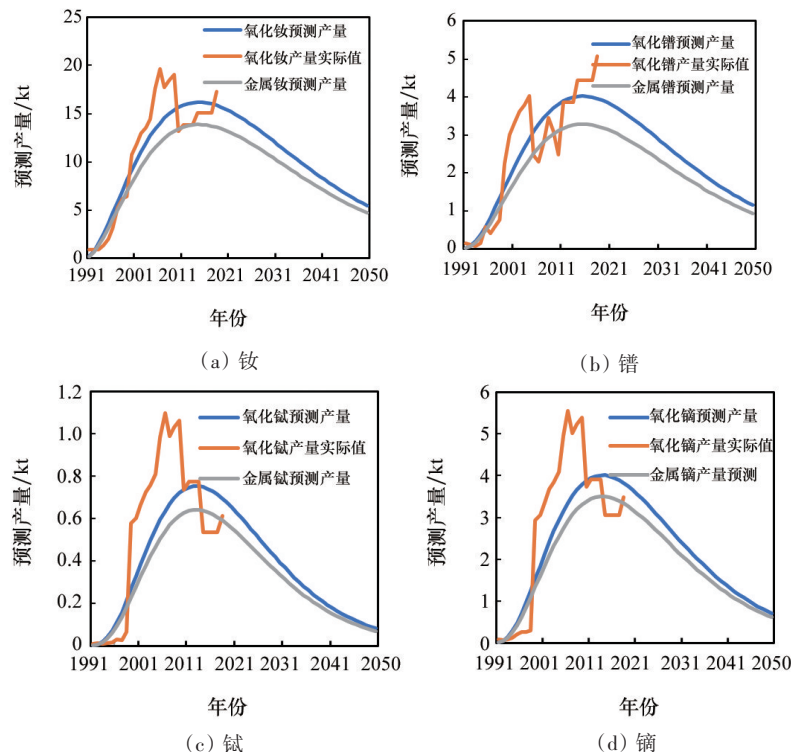


图1 1991—2050年钕镨铽镝元素产量情况

表4 4种稀土元素峰值产量及峰值时间

金属	峰值年份	峰值产量/t
钕	2014	13870.33
镨	2015	3297.64
铽	2013	641.18
镝	2014	3492.21

在2014、2015、2013、2014年达到开采峰值,峰值产量有较大差异,金属钕峰值产量最高,为1.39万t,金属铽产量最低,仅641.18t,金属镨和金属铽的最高产量理论值分别为0.33万、0.35万t。对照稀土氧化物的实际产量,历年来钕、镨、铽、镝4种稀土金属的最高产量分别为1.96万、0.51万、0.11万、0.56万t,钕、铽、镝的实际最高产量出现在2006年,镨则后移至2018年。2006年,中国开始实施稀土开采总量控制管理,自此每年下达稀土开采总量控制指标,任何单位和个人不得无指标和超指标生产,稀土开采总量控制政策严格约束了国内稀土供给。2018年,全国稀土开采、冶炼分离总量控制计划较2017年增加1.5万t,增幅14.3%,稀土金属的实际产量也有所回升。

2015—2050年,稀土金属矿产量将有明显下降,稀土金属减产可能会造成风电产业稀土供应风险。2010年开始,钕、铽、镝的产量均出现了明显的下降。以铽元素为例,2010年氧化铽实际产量较2009年减少328.35t,下降超过30%;短暂平台期过后,2014年又出现了明显的下降,所以在最优开采路径模拟中,峰值产量出现在稳定期2012—2013年,其他3种元素氧化物产量的路径模拟情况类似。2015—2050年,钕、镨、铽、镝4种稀土金属产量分别以1.89%、2.04%、2.54%、2.35%的速度递减,2050年,上述4种稀土金属产量或可下降至0.55万、0.12万、82.46、702.84t。

尽管2018年以来稀土开采总量控制指标逐年上升,但是分类开采管理指标与分元素产品市场的不平衡可能会导致个别稀土元素供给不足。稀土开采总量和冶炼分离产能总量指标控制自2006年起实行,受控制指标影响,4种稀土氧化物的实际产量也在相关政策实施后的5~7年出现了平台期或小幅下降趋势。一方面,历年来稀土开采指标配

额增幅不大,且增量主要集中在轻稀土领域。受国内环保和采矿权压力影响,南方重稀土矿开采普遍减量,铽镝减产明显;另一方面,虽然轻稀土开采指标配额上升,但政策严控之下,未来增量的弹性有限。2018年,《关于持续加强稀土行业秩序整顿的通知》(工信部联原[2018]265号)强调要严格落实开采和冶炼分离计划、严控新增冶炼分离产能,且美国、澳大利亚和缅甸三大海外供给区域接近满产,未来3~5年内增量不大^[48]。目前,4种稀土氧化物的实际产量呈现小幅回升趋势,但资源开采年限和预测产量已经经过最优开采路径的规划峰值,资源的长期供给仍然存在很大的不确定性。

2.1.2 金属钼产量及开采路径模拟

基于钼金属矿产量1994—2019年数据,选用线性关系较好的2003—2014年数据,运用线性试差法计算参数。预测参数为: $a=47.60$, $b=3.11$, $c=13.03$,将预测参数代入模型,预测出金属钼的未来产量(图2)。预测结果显示,金属钼的峰值产量出现在2033年,其峰值产量为20.92万t。

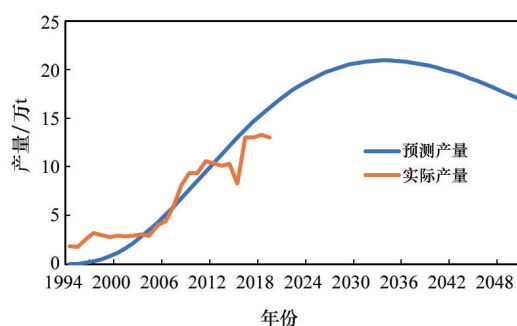


图2 1994—2050年金属钼产量情况

中国金属钼产量峰值出现在2033年,较当前产量预计增幅翻番。按照拟合结果,从2012年开始,金属钼矿产量保持在10万t以上,2027年预计突破20万t,2033年达到峰值20.92万t。高产能持续至2040年,2040年开始回落至20万t以内。对照实际产量来看,1994年以来,中国金属钼产量整体呈持续增长趋势,2019年实际产量13万t,较1994年增长622.20%;2008—2015年,受全球经济危机影响,对金属钼的消费量减小,制造业供给端收紧传导至金属钼需求端,行业产能过剩倒逼金属

钼减产。另外,2016年以来中国开启了两轮生态环境保护督察,环保政策及钼行业准入门槛收紧,一定程度上限制了金属钼产量的大幅增长。

中国金属钼资源保障供应能力较强,但实际开采量受限于社会经济形势,长期供给增长潜力有限。钼金属矿是中国的优势矿产,资源保障程度较好,静态保障年限达到了90年以上^[49],预计金属钼产量也将持续保持在高位。2022—2033年,中国金属钼产量持续增长,但增速放缓;2033—2050年,产量呈现下降趋势,但仍然保持在10万t以上。目前,中国已成为全球最大的钼生产国,也是2021年唯一增产的地区^[5],全球金属钼减产可能会加重中国的供应压力。同时,近年来国内综合治理采矿安全、环境保护,限制钼行业新增产能进入,可能会使中国金属钼产量受到一定制约。而中国风电产业链延伸发展提出风电叶片制造需求,钼作为主要金属耗材,未来供需有可能面临趋紧。

2.1.3 金属镍产量及开采路径模拟

1994—2050年镍矿产量的开采路径模拟如图3,模拟结果基于1994—2020年镍金属实际矿产量数据,广义翁氏模型预测参数为: $a=15042.52$, $b=0.92$, $c=22.18$ 。将预测参数代入模型,可得到金属镍峰值产量和峰值时间。

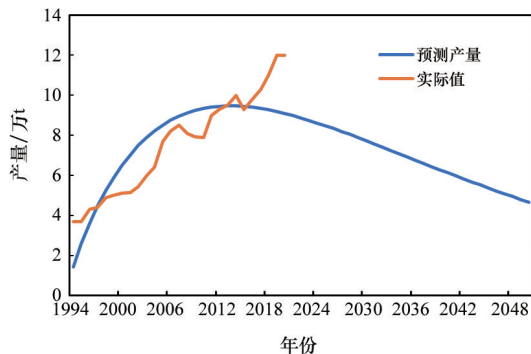


图3 1994—2050年金属镍产量情况

中国金属镍产量已过理论峰值,未来镍资源供应面临挑战。理论按照最优开采路径拟合,金属镍峰值产量应出现在2013年,峰值产量9.48万t,2008—2020年金属镍产量保持在9.00万t以上,2020年之后产量开始缓慢下降。中国是全球镍消费第一大国,但可供开发的金属镍总量较少,2015

年以来,中国镍的对外依存度长期保持在80%以上^[6]。对照实际产量,尽管在消费需求拉动下,中国金属镍产量持续增加,但受资源禀赋制约,2014年以来中国金属镍产量稳定在10万t左右。中国金属镍的主要进口来源国是印度尼西亚,2019年,受其全面禁止镍矿出口的政策影响,以及2020年以来新冠肺炎疫情的全球冲击,金属镍进口受限,国内产量有所回升。

中国镍资源总量不高,金属镍长期增产潜力不大。2022—2050年,中国金属镍产量可能会以每年1.64%的速率下降;同时,受到镍资源全球贸易格局影响,中国以国际大循环为主体的镍资源国际化策略势必要在新发展格局下作出调整,镍资源供应安全策略亟待完善。

2.1.4 金属铜产量及开采路径模拟

基于2000—2019年铜金属矿产量数据建立广义翁氏模型,预测参数为: $a=20.06$, $b=1.22$, $c=11.80$ 。将预测参数代入模型进行计算,可得到铜矿产量2000—2050年的开采路径模拟结果(图4)。

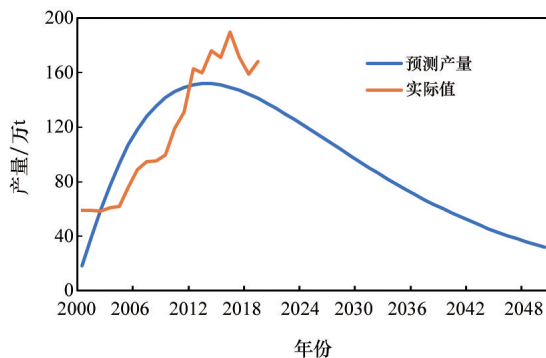


图4 2000—2050年金属铜产量情况

受资源禀赋限制,中国金属铜产量峰值持续期较短,未来7年可能下降至100万t以下。中国金属铜矿产量在2013年达到峰值产量150万t,2015—2028年均保持较高的产量水平,预计年产量超过100万t;2029—2050年,以每年3.08%的速率下降,到2050年,预计金属铜产量为31.84万t。目前,中国实际探明铜矿资源储量2600万t,占世界铜储量2.95%^[4],资源储量较少,对外依存度超过80%^[50]。对照实际产量来看,2005年开始,中国金属铜产量增长明显,呈稳步上升趋势。2010年金属铜产量

突破 100 万 t, 并持续保持在 100 万~200 万 t, 2016 年之后有所下降, 2019 年产量较 2016 年相比降幅 11.58%。

长期来看, 中国金属铜产量可能继续波动下降, 资源保供形势严峻。2022—2050 年, 中国金属铜减产可能达 75%, 下降速率为每年 2.6%。风电产业快速发展带来的新的消费需求可能会加剧中

国铜资源的供需矛盾。

2.2 风电产业战略性金属矿产需求量预测

2.2.1 稀土需求量

根据风电装机容量预测数据, 综合市场份额、材料强度、金属再生利用率影响, 得到低、中、高 3 种情境下, 风电产业稀土资源净需求量预测情况见图 5。

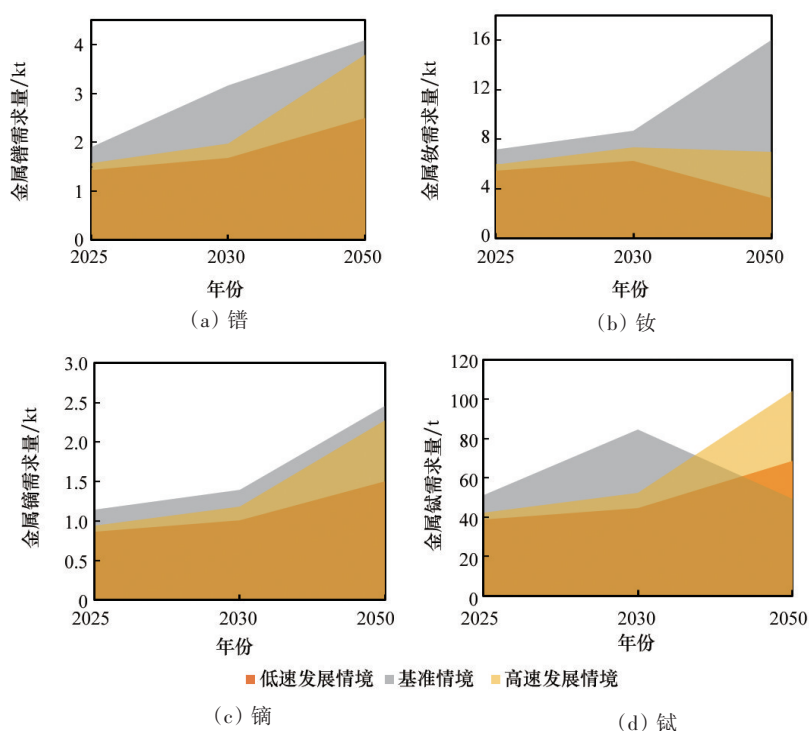


图5 不同情境下风电产业链稀土元素净需求预测

综合情境长期展望, 金属钕是未来风电产业需求最大的稀土材料, 预计最高需求量大达 1.60 万 t。低速发展情境下, 4 种稀土元素的需求量增长相对基准情境较缓, 镨、钕、铈 3 种金属需求量呈持续增长趋势, 2050 年需求量分别为 0.25 万、0.15 万、68.77 t; 该情境下钕元素的净需求量在 2030 年达到 0.63 万 t, 而 2050 年下降至 0.33 万 t, 但仍然占 4 种元素总需求量的 44%。基准情境下, 钕、镨、铈金属需求量在 2022—2050 年间持续增长, 在 2050 年分别达到 1.60 万、0.41 万、0.25 万 t; 金属钽需求量则在 2030 年需求达到 84.50 t, 2050 年下降至 49.12 t; 该情境下, 金属钽仍然是需求量最大的稀土元素, 2050 年, 金属钽需求量在 4 种元素总需求中占

70%。高速发展情境下各稀土金属需求量变化与低速发展情境类似, 镨、钕、铈金属需求量持续增长, 2050 年需求量分别达到 0.38 万、104.45、0.23 万 t; 而金属钽 2030 年需求量最大, 为 0.74 万 t, 2025、2030、2050 年金属钽净需求占 4 种金属总需求比值分别为 69.89%、69.65%、52.98%。

基准情境下, 中国风电产业稀土需求量最大 (图 6)。以基准情境估算中国风电产业链对钕、镨、钕、铈金属净需求, 2025、2030、2050 年合计值分别为 1.03 万、1.33 万、2.26 万 t。与低速发展情境相比, 各年分别增加 0.25 万、0.43 万、1.53 万 t 合计需求; 且 2030 年之后增速加快, 2025—2030 年, 镨、钕、钕、铈合计需求平均每年增加 504.20 t, 2030—

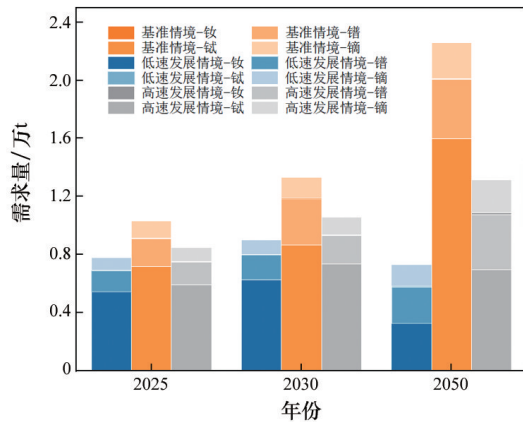


图6 不同情境下风电产业链稀土净需求

2050年升至762.57 t。高速发展情境下,镨、钕、铈、钆4种金属合计需求量在预测期内持续增加,但始终介于另外2种发展情境中间,2050年预计达到1.31万t。

提高金属再生利用率可以有效减少中国风电产业链的稀土需求(图7)。在技术进步导致金属降低速率不变的情况下,高速发展情境中风电装机容量和永磁风机技术市场份额均高于基准情境,稀土净需求量反而更少。相比于基准情境,高速发展情境下金属再生利用率提高了10%,2025—2050年,4种金属合计回收量年均增加0.33万t。如果不考虑回收,2050年,高速发展情境下4种稀土金属合计需求量将达到13.15万t,分别高出低、基准情境4.66万、2.60万t。

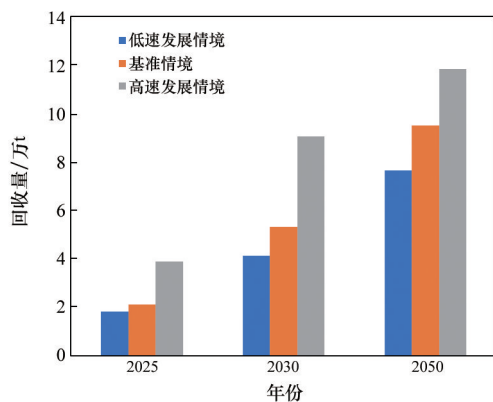


图7 不同情境下风电产业链稀土回收量

2.2.2 金属钼需求量

根据风电装机容量预测数据和风力发电技术使用钼金属的材料强度范围,综合市场份额、金属

再生利用率影响,得到低、中、高3种情境下,风电产业链金属钼净需求量预测情况如下(图8)。

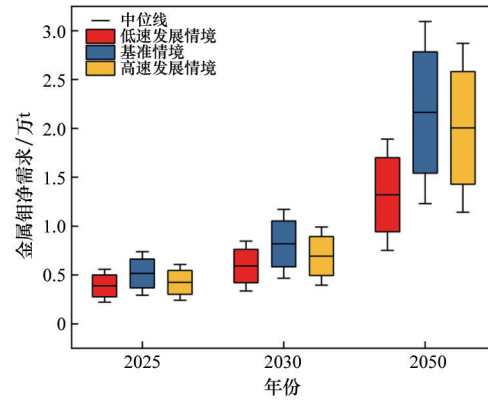


图8 不同情境下风电产业金属钼净需求预测

风电产业发展对金属钼需求长期影响更明显。3种情境下,金属钼的净需求均呈现加速扩大趋势。低速发展情境下,2025年金属钼净需求区间为0.28万~0.50万t,2030年上升至0.42万~0.76万t,2050年达到0.94万~1.70万t。假定金属材料强度不变,低速的市场份额扩张也能够带来需求的加速增长,2025—2030年,金属钼净需求增速52.08%;2030—2050年,增速达到123.27%,增速增加71.19%。中高速发展情境下,金属钼净需求均表现出了相同的变化趋势,2030—2050年净需求的增长速度均超过2025—2030年,达到164.34%、189.37%,较2025—2030年增速增加105.51%、126.12%。

3种发展情境相比,基准情境将带来更多的需求量增长。基准情境下,金属钼净需求量明显超过了低速和高速发展情境,2025、2030、2050年的净需求区间分别为0.37万~0.66万t、0.58万~1.05万t和1.54万~2.78万t,与低速和高速发展情境相比,最大差值超过1.00万t。

另外,回收技术的进步在一定程度上反哺了金属钼的需求,但是难以改变未来需求持续扩张的趋势。高速发展情境下,2050年回收量范围达到最大,为12.87万~23.24万t,而对应总需求为1.43万~2.58万t,受风电装机容量和技术市场份额扩张影响,金属钼的需求基数庞大,金属再生利用率提高对减缓金属钼需求扩张的作用尚不明显。

2.2.3 金属镍需求量

综合市场份额、金属再生利用率影响,根据风电装机容量预测数据和金属镍材料强度范围,测算低、中、高3种情境下,风电产业链金属镍净需求量情况(图9)。

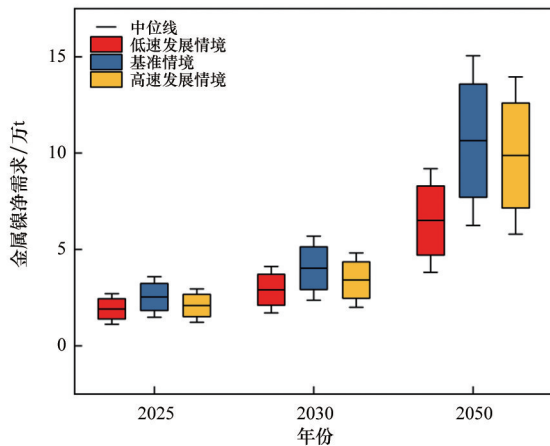


图9 不同情境下风电产业金属镍净需求预测

风电产业发展对金属镍净需求总体保持增长,长期影响显著。综合3种发展情境估算结果来看,金属镍净需求也将持续保障增长,2050年3种发展情境下金属镍净需求区间均上涨至4.71万t以上。低速发展情境下,到2050年,金属镍净需求达4.71万~8.29万t,较2025、2030年的净需求计算结果均实现了成倍增长,分别为2025、2030年净需求量的3.40、2.23倍。基准情境下,按金属材料强度高值测算,2050年金属镍净需求达到13.58万t,超过2025年净需求3倍。高速发展情境下,金属镍净需求也呈现出与前两类假设情境相似的变化趋势,2050年的净需求高值超过了10万t,与2025年相比上涨超372%。

回收技术进步有效缓解了金属镍需求持续扩张的问题,未来最大回收量113.38万t,覆盖90%的金属需求。高速发展情境下,假定金属再生利用率达到90%,与基准情境相比提高了10%,2050年,该情景下金属镍的最大回收量预计可达113.38万t。由于二次资源的补充,相对基准情境,高速发展情境下2025、2030、2050年金属镍净需求将分别减少17.57%、15.28%、7.25%(以区间高值计算)。但是

金属再生利用率增长对需求的抑制作用在前2个情境对比中并不明显,整体来看,基准情境下金属镍的净需求区间均高于低速发展情境。

2.2.4 金属铜需求量

根据风电装机容量预测数据和风力发电技术使用铜的金属材料强度范围,综合市场份额、金属再生利用率影响,得到低、中、高3种情境下,风电产业链金属铜净需求量预测情况如图10所示。

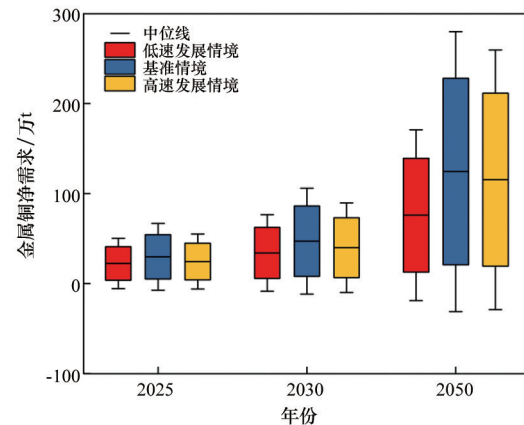


图10 不同情境下风电产业金属铜净需求预测

风电产业链使用铜的金属材料强度大,未来净需求可能超100万t。风电产业发展中,发电机、变压器、齿轮箱和塔筒电缆均以铜为主要耗材,因此金属材料强度大。随着风电装机容量和永磁风机技术市场份额扩张,金属铜的净需求也持续增长。3种预测情境下,2050年金属铜的净需求区间均超10万t,基准情境中净需求最大,2025—2050年分别为4.94万~54.34万t、7.84万~86.31万t和20.73万~228.15万t。

回收技术进步可能会在未来作为一种替代方案,减少金属铜一次资源需求。高速发展情境中,金属再生利用率提高至90%,而金属铜的净需求相比基准情境有所减少。此情境下,2025—2050年金属铜净需求区间分别为4.07万~44.79万t、6.64万~73.13万t和19.22万~211.60万t,与基准情境相比分别将减少9.55万、13.18万、16.55万t(以区间高值计算)。与金属镍净需求趋势变化相同,基准情境下金属铜的净需求高于低速发展情境,此时回收技术的影响还未显现。

2.3 风电产业链战略性金属矿产供需缺口分析

2.3.1 稀土供需缺口分析

1) 单种稀土供需缺口分析。

不同情境下中国风电产业链稀土供需情况如

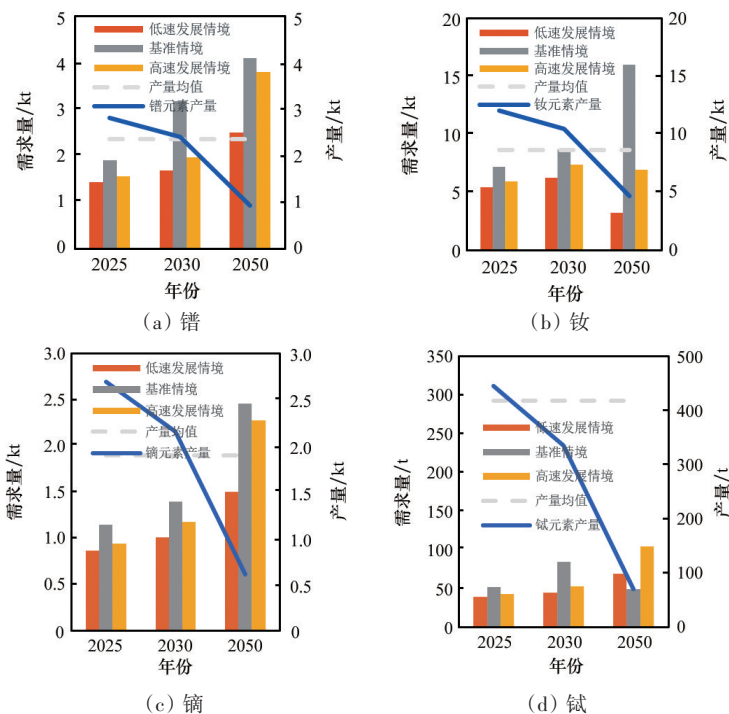


图 11 不同情境下风电产业稀土供需情况

钕元素产量能够覆盖低速发展情境下风电产业链的资源需求,2050年则无法满足基准和高速发展的风电产业链资源需求。低速发展情境下,2025、2030、2050年的供需差额分别为0.66万、0.42万、0.14万t。2050年,基准情境和高速发展情境的供需缺口分别为1.13万、0.23万t。

2030年之前,镨元素产量能够覆盖低速和高速发展的风电产业链关键环节资源需求,但在基准情境中出现了供需缺口,2050年3种情境的镨元素需求量均高于预测产量。基准情境下,2030年镨元素的供需逆差为763.74 t;2050年,3种情境下镨元素的供需缺口分别为0.15万、0.32万、0.29万t。

铽元素产量基本可以满足2050年之前所有情境下的产业链资源需求。2050年,基准情境下,风电产业链铽元素的需求量和产量基本达到了平衡,

图 11 所示,稀土供需状况因情境和元素变化而各有不同,风电需求的长期增长可能带来稀土资源供需不匹配。

仅盈余 20.99 t;同时,如果风电产业参考高速发展情境,则会出现供需缺口,产量缺额 34.34 t。

镧元素供需状况与钕元素类似,在 2050 年出现了供需缺口。2050 年,镧元素产量已无法满足任何情境下风电产业的资源需求,3 种情境的供需缺额分别为 887.98、0.18 万、0.17 万 t。

2) 多金属共伴生稀土供需缺口分析。

表 5 汇总了 3 种情境下钕、镨、铽、镧 4 种稀土元素的供需预测结果,以及 1999—2018 年的稀土矿配分数据以及当前预测水平下 4 种元素对应稀土总产量。稀土配分是以百分比表示的各稀土元素或其稳定氧化物在稀土总量中所占的比例^[51],以稀土配分情况倒推算出 4 种元素对应稀土总产量,分析 4 种稀土元素之间供给和需求的潜在差距。

风电产业对4类元素的需求量是不均衡的,4种元素之间供给和需求的潜在差距短期内会导致产能过剩风险。2025年,钷元素按照最优开采路径预测产量为1.20万t,根据历年配分情况推算得中国稀土总产量为8.14万~13.10万t(表5)。在此产出水平下,可以满足2025年3种情境下风电产业链钷元素需求量,对应镨、铽、镱产量分别为0.26万~0.55万t、0.04万~0.11万t、0.24万~0.55万t。对比

3种情境下风电产业对镨、铽、镱元素的需求,则分别会导致3种元素产量300~3000t不等的盈余。同样的,以2025年镨元素预测产量推算稀土总产量,对应钷、铽、镱产量分别为0.61万~1.29万t、340.00~726.88t、0.19万~0.37万t,能够满足3种元素的风电需求,但仍然会导致钷、铽、镱元素200~2000t的剩余。

表5 钷镨铽镱供需预测汇总及对应的稀土目标产量

金属	稀土元素	3种情境需求量/t			预测产量/t			根据预测产量和配分推算总产量/万t		
		2025年	2030年	2050年	2025年	2030年	2050年	2025年	2030年	2050年
钷	9.16~14.74	5431.47~7193.35	6271.96~8675.31	3250.80~15970.68	11997.89	10446.31	4695.39	8.14~13.10	7.09~11.40	3.19~5.13
镨	3.22~4.23	1436.12~1901.97	1679.99~3168.74	2500.62~4095.05	2819.96	2405	935.54	6.67~8.76	5.69~7.47	2.21~2.91
铽	0.51~0.83	38.67~51.21	44.80~84.50	49.12~104.45	445.57	334.66	70.11	5.37~8.74	4.03~6.56	0.84~1.37
镱	2.91~4.18	865.35~1146.06	1007.99~1394.25	1500.37~2457.03	2696.75	2155.17	612.39	6.45~9.27	5.16~7.41	1.46~2.10

钷、镨、铽、镱4种元素最优开采路径的差异会影响风电产业稀土元素的供需平衡状况(图12)。根据镨元素产量预测结果,2030年,镨元素产量将低于基准情境下的风电产业链镨需求量(图12(b))。而按照当前镨元素产出水平和配分数据推算,2030年中国稀土总产量为5.69万~7.47万t,对应的钷、铽、镱产量分别为0.52万~1.10万t、289.94~619.93t、164.59~3122.02t,这3种元素的供需缺口并不明显,而且有产能过剩风险。

2050年,除铽元素外,按照最优开采路径预测,钷元素产量仅可满足低速发展的风电产业需求,而镨、镱元素的产量无法满足任何情境下的风电产业链资源需求,说明长期来看中国风电产业链稀土资源将存在较明显的供需缺口。2050年,以钷元素最优开采路径和配分数据计算的稀土开采总量为3.19万~5.13万t,是4种元素中较大的产值。以此为基准估算的镨、铽、镱元素产量均大于3种元素最优开采路径下的预测产量。镨元素仍无法满足任何情境下的风电发展需求,但最大需求

缺口由0.32万t减小到0.19万t;铽元素产量能够满足3种情境下的风电发展需求;以最高配分计算的镱元素产量能够满足低速发展的风电需求,但在中高速情境中供需缺口仍然存在。

2.3.2 钼供需缺口分析

2025—2050年未来中国金属钼产量保持稳定,但是风电需求的长期增长可能使得钼供需趋紧。不同情境下中国风电产业金属钼供需情况如图13所示。

综合情境分析显示,金属钼在风电产业这一新兴领域有广阔的需求空间,未来风电产业对钼需求的拉动会更加显著。2025—2050年,低速发展情境、基准情境、高速发展情境下金属钼的净需求量均呈递增趋势,风电业日益成为拉动金属钼需求的新兴应用场景。尽管按照目前的开采路径来看,金属钼的未来产量仍然远大于风电产业的净需求,但是供需差额在下降。2050年,3种情境下风电产业金属钼的最大供需差分别为16.10万、15.50万、15.61万t,相比于2025年的19.05万、18.96万、19.02万t,差额分

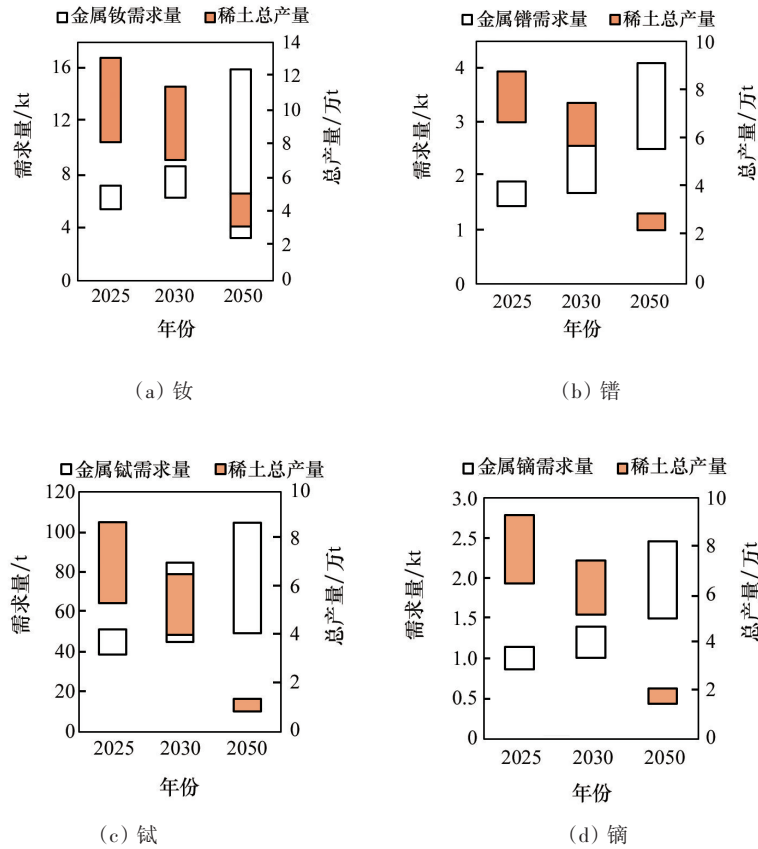


图 12 钕镨铕镉需求量及稀土总产量预测情况

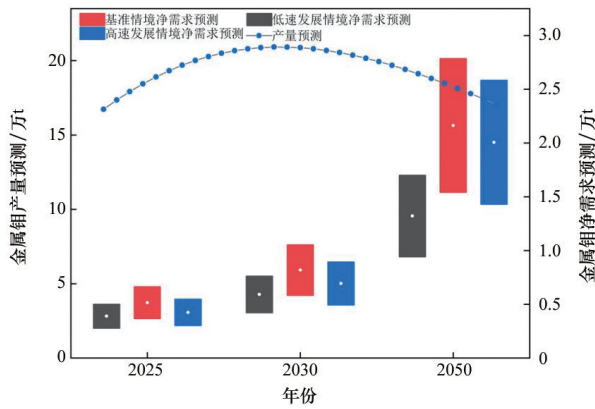


图 13 不同情境下风电产业金属钼供需情况

别减少了15.49%、18.25%、17.94%。另外,不考虑回收时一次资源生产量与金属钼总需求量之间的差额将骤缩。高速发展情境下,2025、2030年最小供需差将缩减至13.86万、11.74万t,与考虑回收后的净需求相比分别减少了26.20%、29.92%;若不考虑回收带来的二次资源供应,2050年金属钼将出现供需逆差,供需缺口达8.79万t。

2.3.3 镍供需缺口分析

在当前开采水平下,2025—2050年,与风电产业加速膨胀的需求相对,金属镍的国内供给将持续下滑,供需形势由盈余向紧缺转变。不同情境下中国风电产业金属镍供需情况如图14所示。

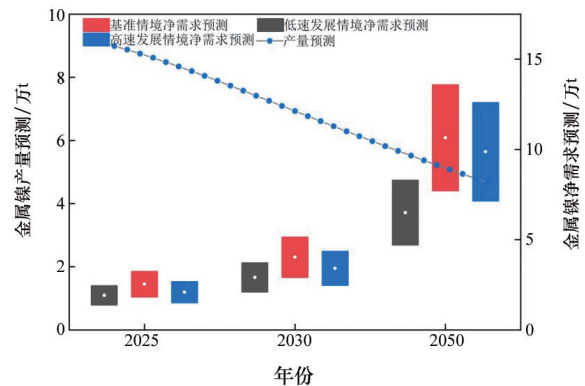


图 14 不同情境下风电产业金属镍供需情况

短期来看,金属镍产量可以供给综合情境下的风电产业需求,但是供需持续收紧,至2050年出现

短缺。镍在风力发电中的主要作用是提高低合金钢的强度和韧性,随着风电产业扩张,风电产业钢材消耗对金属镍的需求整体呈增长态势,2025—2050年综合情境下金属镍的最高需求出现在2050年,需求量达到7.71万t。与之相对,中国镍资源相对稀缺,产量增长乏力,未来呈现持续下滑趋势。2050年,中国镍产量已经无法保障国内风电产业的资源供给,在3种预测情境下均出现了供需逆差,最大供需缺口分别达到3.63万、8.92万、7.94万t。再生回收利用技术带来的二次资源供应缓和了镍金属总需求,若不考虑回收,3种情境下最大供需缺口将扩大至18.19万、35.80万、121.32万t,比前者多3~14倍。

2.3.4 铜供需缺口分析

2025—2050年,中国风电产业金属铜的供需形势可能发生逆转,由供给过剩转向紧平衡,甚至出现供不应求。不同情境下中国风电产业金属铜供需情况如图15所示。

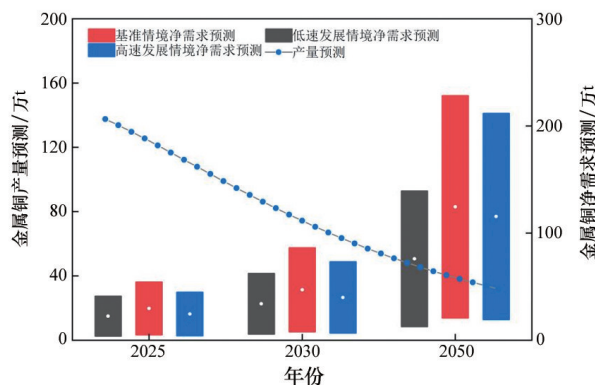


图15 不同情境下风电产业金属铜供需情况

中国铜资源较为贫乏,资源供应“大头在外”的局面难以逆转,风电产业资源保障供应困难。2025—2050年,中国铜矿产量持续下降,面对风电产业急速膨胀的消费需求,资源保供压力吃紧。尽管高速发展情境中,回收带来的二次资源供应将覆盖90%的资源需求,但按照当前开采水平估算,2050年金属铜的一次资源供应量与中国风电产业净需求相比,仍然存在107.48万~196.31万t的供需缺口。另外,由于海陆风电金属铜使用强度差异较大,因此铜需求区间范围更广。

其他新能源应用场景的持续开拓也在带动战略性新兴产业金属矿产消费需求上涨,需求竞争或将加剧风电产业链战略性新兴产业供应风险。2025年,中国新能源汽车动力电池对金属镍的需求将达到26.2万t^[52],而光伏和储能模块对铜的增量需求或达到139万t^[53]。新的需求增量将使得战略性新兴产业矿产供需不平衡加剧,并带来金属价格的抬升^[54],原料供应紧缺和高成本的双重挑战是未来风电产业发展必须突破的“瓶颈”。

3 结论与建议

通过广义翁氏模型模拟了钹、镨、铽、镱、钼、镍、铜7种风电产业所需的金属的开采路径,基于文献聚类在基准情境和2个参考情境下分别预测了中国风电产业战略性新兴产业矿产需求量,对比分析供需风险。主要结论如下:

1) 长期来看,除金属钼外,战略性新兴产业矿产在中国风电产业的3个发展情境下均存在供不应求的状态。稀土元素中,镨和镱元素的供需矛盾更为突出。2050年,金属镨和金属镱的产量分别为935.54、612.39 t,净需求量为0.25万~0.41万t和0.15万~0.25万t,供需缺口0.16万~0.32万t、887.98~1844.64 t。钹元素在基准和高速发展情境下均存在供需缺口,铽元素在高速发展情境中会出现供需矛盾。基准情境下,金属镍和金属铜2050年在风电产业供需缺口预计为8.92万、196.31万t。

2) 风电产业链对7种战略性新兴产业矿产的需求存在差异,稀土伴生元素之间供需不匹配问题显著,金属钼存在产能过剩问题。就中国风电产业链稀土需求而言,3种发展情境下钹的产量和需求量都明显大于镨、铽、镱。若按照钹元素开采路径估算,2025年镨、铽、镱元素产量分别为0.26万~0.55万t、415.12~1087.15 t、0.24万~0.55万t,与风电产业链的需求对照,3种元素都将有300~3000 t不等的盈余。2025—2050年,3种情境下风电产业链金属钼的净需求占预测产量的比重由2025年低速情境的1.43%上涨至2050年高速情境下的16.34%,风电产业发展有望持续拉动金属钼需求,但仍未成

为钼消费的主场景。

3) 回收技术进步有效降低了风电产业链战略性金属矿产供应风险。以稀土为例,高速发展情境中风电装机容量和永磁风机技术市场份额均高于基准情境,由于金属再生利用率的提高,稀土净需求量反而更少。2025、2030、2050年,高速发展情境下钕、镨、铽、镝合计净需求量较基准情境分别减少0.18万、0.28万、0.94万t。

基于此,对中国风电产业未来发展及战略性金属矿产保障供应提出如下建议:

1) 加快永磁风机技术突破,提高金属矿产利用效率以缓解供应压力。国家应当继续加强高效永磁节能电机的政策支持,推动高效永磁节能电机的广泛应用的同时,鼓励企业和研究院所加强重点领域前瞻性研究,提高战略性金属矿产使用效率。

2) 推动回收利用关键环节提质增效,提高战略性金属矿产回收利用率防范供应风险。回收利用是缓解未来战略性金属矿产供需矛盾的关键环节,而钕铁硼磁体、钕钴磁体等永磁材料正是战略性金属矿产二次资源回收的主要来源。开发风电产业链战略性金属矿产回收潜力,要加强技术研发和推广应用,优化战略性金属矿产回收企业扶持和产业链完善相关配套政策,提高风电产业链战略性金属矿产回收利用率,增强中国战略性金属矿产二次资源保障。

3) 加强供给侧结构性改革,进一步加强战略性金属矿产资源管理。为保障风电产业长足发展,提高战略性金属矿产资源科学管理水平,应当结合市场需求和资源潜力科学制定生产配额,严格行业准入条件,有序开发利用资源。同时,在战略性矿产资源供给侧,加大金属矿勘查投入,有计划地提高计划生产指标和总量控制指标,适度扩大生产规模,保证战略性金属矿产稳定供给。

4) 优化开发利用布局,提高行业集中度。布局协调风电产业链战略性金属矿产供需矛盾,应当加强国内资源整合,以国家统筹安排和重点建设的战略核心区域为依托,优化生产力布局和基础设施建设,结合风电产业链需求有组织地推进资源开发,提高资源行业规模化利用效率和保障供应水平。

参考文献 (References)

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2022-01-26)[2022-07-29]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [2] 周健奇. “十四五”期间分布式光伏将充分释放潜力[N]. 人民政协报, 2020-12-15(7).
- [3] Wood Mackenzie. Global wind turbine fleet to consume over 5.5Mt of copper by 2028[EB/OL]. (2019-10-02)[2022-11-22]. <https://www.woodmac.com/press-releases/global-wind-turbine-fleet-to-consume-over-5.5mt-of-copper-by-2028/>.
- [4] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022[R/OL]. (2022-01-31)[2022-11-24] <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022>.
- [5] International Molybdenum Association. Global production and usage of molybdenum rose in Q2 2022[EB/OL]. (2022-10-06)[2022-11-22]. <https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/latest-news/latest-news-details.php?objectID=683&lang=en>.
- [6] 唐萍芝, 陈欣, 王京. 全球镍资源供需和产业结构分析[J]. 矿产勘查, 2022, 13(1): 152-156.
- [7] 王婧. 矿产品对外依存度计量方法模型与应用研究[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(9): 60-67.
- [8] Wei W D, Ge Z W, Geng Y, et al. Toward carbon neutrality: Uncovering constraints on critical minerals in the Chinese power system[J]. *Fundamental Research*, 2022, 2(3): 367-374.
- [9] Klimenko V V, Ratner S V, Tereshin A G. Constraints imposed by key-material resources on renewable energy development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 111011.
- [10] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113612.
- [11] Golroudbary S R, Makarava I, Kraslawski A, et al. Global environmental cost of using rare earth elements in green energy technologies[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 832: 155022.
- [12] Huber S T, Steininger K W. Critical sustainability issues in the production of wind and solar electricity generation as well as storage facilities and possible solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: 130720.
- [13] Ren K P, Tang X, Wang P, et al. Bridging energy and

- metal sustainability: Insights from China's wind power development up to 2050[J]. *Energy*, 2021, 227: 120524.
- [14] Zhou Y J, Li J W, Wang G S, et al. Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 217–225.
- [15] 陈元千. 对翁氏预测模型的推导及应用[J]. *天然气工业*, 1996, 16(2): 22–26.
- [16] 黎斌林. 基于广义翁氏模型与多循环Hubbert模型对全球石油峰值的预测[J]. *资源开发与市场*, 2015, 31(4): 427–430.
- [17] Hubbert M K. Nuclear energy and the fossil fuel[J/OL]. *Drilling and Production Practice*, 1956. [2022–11–08]. <https://www.resilience.org/stories/2006-03-08/nuclear-energy-and-fossil-fuels/>.
- [18] 胡建国, 陈元千, 张盛宗. 预测油气田产量的新模型[J]. *石油学报*, 1995(1): 79–87.
- [19] Feng L Y, Li J C, Pang X Q. China's oil reserve forecast and analysis based on peak oil models[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(11): 4149–4153.
- [20] Wang X, Lei Y, Ge J, et al. Production forecast of China's rare earths based on the Generalized Weng model and policy recommendations [J]. *Resources Policy*, 2015, 43: 11–18.
- [21] Zhao X G, Wang W, Wang J Y. The policy effects of demand-pull and technology-push on the diffusion of wind power: A scenario analysis based on system dynamics approach [J]. *Energy*, 2022, 261: 125224.
- [22] 刘之琳, 李江涛, 唐伟, 等. 基于情景设置的全球能源发展趋势分析[J]. *中国煤炭*, 2022, 48(3): 15–22.
- [23] Renewable Energy for the 21st Century. Renewables 2022 global status report[R]. Paris: Renewable Energy for the 21st Century, 2022.
- [24] BloombergNEF. New energy outlook 2020[R]. New York: BloombergNEF, 2020.
- [25] International Energy Agency. Technology roadmap: China wind energy development roadmap 2050[R/OL]. (2011–10–31)[2022–03–07]. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-china-wind-energy-development-roadmap-2050>.
- [26] International Renewable Energy Agency. World energy transitions outlook 2021[R/OL]. (2022–03–29)[2022–11–24]. <https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>.
- [27] Global Wind Energy Council. Global wind report 2022 [R]. Brussels: GWEC, 2022.
- [28] Zhou N, Lu H Y, Khanna N, et al. China energy outlook: Understanding China's energy and emissions trends 2020[R]. Berkeley: ETA, 2020.
- [29] Deng X, Ge J P. Global wind power development leads to high demand for neodymium praseodymium (NdPr): A scenario analysis based on market and technology development from 2019 to 2040[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123299.
- [30] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 113: 12–27.
- [31] Elshkaki A, Shen L. Energy-material nexus: The impacts of national and international energy scenarios on critical metals use in China up to 2050 and their global implications[J]. *Energy*, 2019, 180: 903–917.
- [32] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for U. S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1209–1226.
- [33] Manberger A, Stenqvist B. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the of substitutes, technological mix and development[J]. *Energy Policy*, 2018, 119: 226–241.
- [34] Zeng X L, Xu M, Li J H. Examining the sustainability of China's nickel supply: 1950–2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 139: 188–193.
- [35] 文博杰, 代涛, 韩中奎, 等. 中国铜资源在用存量与二次供应潜力[J]. *地球学报*, 2023, 44(2): 325–332.
- [36] Elshkaki A, Graedel T E. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 260–273.
- [37] Wang P, Li W, Kara S. Dynamic life cycle quantification of metallic elements and their circularity, efficiency, and leakages[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1492–1502.
- [38] Fizainea F, Court V. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI[J]. *Ecological Economics*, 2015, 110: 106–118.
- [39] Valero A, Calvo G. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 178–200.
- [40] Moss R L, Tzimas E, Kara H, et al. The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic

- Energy Technologies[J]. Energy Policy, 2013, 55: 556–564.
- [41] Chen W Q, Graedel T E. Anthropogenic cycles of the elements: A critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8574–8586.
- [42] 落基山研究所, 能源转型委员会. 电力增长零碳化(2020—2030): 中国实现碳中和的必经之路[R/OL]. (2021-01-15) [2023-02-14]. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/01/RMI_ETC_China-Zero-Carbon-Electricity-Growth-report-2020_CN.pdf.
- [43] BP outlook: 2022 edition[R/OL].(2022-03-15)[2022-11-24]. https://www.bp.com.cn/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/bp-energy-outlook/2022/energy-outlook-2022-edition-cn.pdf.
- [44] International Energy Agency. World energy outlook 2021 [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [45] 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.
- [46] 陈占恒. 稀土产业与市场的现状、问题和对策浅析[C]//第十一届中国包头·稀土产业论坛专家报告集. 包头: 中国稀土学会, 2019: 6–8.
- [47] 陈元千, 胡建国. 对翁氏模型建立的回顾及新的推导[J]. 中国海上油气地质, 1996, 8(5): 317–324.
- [48] 齐丁, 王政, 王建润. 有色金属行业分析: 稀土镨钕供需有望迎来重大拐点[R/OL]. (2021-01-27)[2023-02-10]. https://m.hibor.com.cn/wap_detail.aspx?id=d9ffd12b-a034e0fd1e5e1cf1b159d8a1.
- [49] 张亮, 杨卉芑, 冯安生, 等. 全球钼矿资源现状及市场分析[J]. 矿产综合利用, 2019(3): 11–16.
- [50] 梁松. 关于中非矿产资源合作的思考[J]. 经济师, 2022(9): 101–103.
- [51] 张臻悦, 何正艳, 徐志高, 等. 中国稀土矿稀土配分特征[J]. 稀土, 2016, 37(1): 121–127.
- [52] 杨俊峰, 潘寻. “十四五”中国锂动力电池产业关键资源供需分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 37–41.
- [53] 东方证券: 新能源新动能 2025 年或将拉动铜需求 7% [EB/OL]. (2023-02-02)[2023-02-10]. <https://news.smm.cn/news/101448063>.
- [54] 张邦胜, 刘贵清, 刘昱辰, 等. 2020 年硫酸镍市场分析[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(1): 86–91.

Rising imbalance between supply and demand of strategic metal minerals: A study based on wind power industry

DUAN Yue¹, GE Jianping^{1,2*}

1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Institute of Natural Resources Strategic Development, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract With the transformation of China's energy structure, the installation scale of wind power continues to expand and the demand for strategic minerals in all segments of the wind power becomes a strategic issue of the high-quality development of China's wind power industry. In this paper, a generalized Weng's model is used to forecast the production and simulate the mining paths of seven raw metals required to cultivate the wind power industry chain: neodymium, praseodymium, terbium, dysprosium, molybdenum, nickel and copper. At the same time, the future demands for the aforementioned seven raw metals are calculated under different scenarios where market share, technological progress and recycling are taken into account. Based on this, the supply and demand status of strategic metal mineral industry chain is analyzed and policies to promote sustainable supply of strategic minerals for the power industry chain are suggested.

Keywords generalized Weng model; wind power; strategic metal minerals ●



(责任编辑 刘志远)