

支撑我国“风光”大规模发展的关键金属稀缺性评估与循环策略模拟

任凯鹏^{1,2,3,4}, 唐旭^{2*}

1. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249
3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
4. 中国石油大学(北京)理学院, 能源交叉学科基础研究中心, 北京 102249

摘要 为评估支撑我国“风光”大规模发展的金属稀缺程度, 构建了金属稀缺度评估模型, 并对大规模“风光”发展所需的12种金属开展评估, 运用金属末端循环回收模型对稀缺性强的关键金属开展金属循环回收模拟。结果显示: 从金属稀缺角度看, 支撑“风光”大规模发展所需的6种关键金属为铜、镍、镉、碲、锌、银, 且碲、铜、镍的重要性更高; “风光”大规模发展路径的不确定性影响金属供需平衡和稀缺性, “风电主导”型路径较“光伏主导”型路径将引发更大的金属累积供应压力; 金属循环再生策略将在中长期发挥作用, 且对镉和银的效果更显著, 金属回收率绝对值提高20%~30%, 将使得金属矿产累积供应压力缓解5%~16%。研究表明, 我国现有金属矿产供应能力难以支撑大规模“风光”发展的设施建设需求, 金属循环回收策略对缓解金属稀缺具有一定的作用, 但仅凭单一策略难以系统解决金属矿产供应制约问题。建议针对金属稀缺性与供应安全挑战构建应对策略组合时, 应综合考虑金属矿产差异性、能源发展路径不确定性和金属供应规律演变3方面影响。

关键词 “风光”; 关键金属; 循环再生; 能源发展路径

作为具有成本、技术与政策优势的成熟低碳发电技术, 我国“风光”电力技术(风力发电技术与太阳能发电技术)在近10~15年增长势头迅猛。截至

2023年年底, 全国太阳能发电、风电装机容量同比分别增长55%和21%^[1]。在碳中和目标倒逼下, 我国2060年的“风光”发电技术装机规模至少是2020

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(72174206, 72404277); 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462023YQTD002, 2462023SZBH001); 中国博士后科学基金面上项目(2023M743871); 国家资助博士后研究人员计划项目(GZB20230865)

作者简介: 任凯鹏, 博士后, 研究方向为能源系统建模、资源环境政策与管理、能源经济管理, 电子信箱: kaipeng_ren@cup.edu.cn; 唐旭(通信作者), 教授, 研究方向为能源经济管理、资源环境政策与管理、管理系统工程, 电子信箱: tangxu@cup.edu.cn

引用格式: 任凯鹏, 唐旭. 支撑我国“风光”大规模发展的关键金属稀缺性评估与循环策略模拟[J]. 科技导报, 2024, 42(17): 111-124;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01189

年的10倍以上^[2]。大规模发展“风光”电力一方面将成为支撑我国新型电力系统与新型能源体系构建的关键举措,另一方面也将催生更大的金属物质资源需求。近年来,世界银行^[3-4]、国际能源署^[5]等国际权威机构对能源转型所需的关键金属矿产、关键物质原材料持续关注,强调新能源发展所需的关键金属矿产存在供应短缺风险^[6]。造成关键金属矿产潜在供应风险的直接原因是低碳电力技术对关键金属的需求远超化石电力技术^[7],同时关键金属矿产的空间地理集中度高^[8]。

产业生态学家Graedel领衔开展的金属关键性评价与清单确定是金属矿产供应安全评价的典型代表^[9],通过构建包含供应风险、环境影响和供应短缺损失的三维评价体系^[10],全球62种金属在2008年的关键性程度被量化表征,并聚合成不同类别。能源转型相关的金属关键性评价更加关注供应风险,即金属资源“够不够用”^[11]。实现2℃目标的全球风电部署计划所需的稀土金属规模是2011—2015年产量的11~26倍,金属矿产供需高度错配^[12]。Helbig等^[13]从供应风险评价角度,对CdTe(碲化镉)和CIGS(铜铟镓硒)为代表的薄膜光伏技术所需矿产的供应风险开展评价,发现CdTe光伏技术的矿产供应风险更低。Zhou等^[14]考虑市场、物理可得性、政治稳定性3个维度对中国光伏、风电、电动车所需的12种金属与非金属矿产的短期、长期供应安全进行了评价。

国务院于2024年3月发布的《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》将实施回收循环利用、推动资源高水平再生利用作为重要行动方向^[15]。金属循环回收作为破解金属废弃物管理的有效策略,具有提供再生金属矿产供应的潜力^[16]。金属循环回收也存在现实制约与技术挑战,当前稀土金属的循环回收率仍不到1%^[17]。从刻画方法角度看,除少数研究采用计量经济模型拟合二次金属与工业活动规模、经济发展水平的关系外^[18],多数研究采用动态物质流方法,并设定不同的回收率情景来刻画二次金属供应规模^[19-20]。Della等^[21]构建了动态物质流-多区废弃物投入产出综合集成模型,对全球能源低碳转型中所需的钴、锂、钕和镉到

2050年的金属回收潜力进行了模拟测算。Liu等^[22]对中国光伏发电设施回收的经济效益开展测算,发现到2050年对中国硅基光伏发电设施开展回收将产生4亿~7亿元人民币的经济效益。

在开展我国“风光”大规模发展下的金属稀缺制约评估与策略应对的已有研究中,存在的研究缺口主要集中在2个方面。一方面,考虑新型电力系统构建的长周期性,光伏、风电技术发展过程中均面临不确定性^[23]。“风光”大规模发展路径不确定性背景下,如何考虑不同类别金属在“风光”不同技术中的应用程度,评估金属稀缺性并剖析造成稀缺性的原因,值得进一步研究。另一方面,随着中国风机、光伏装机规模的不断攀升,“风光”废弃物也存在增长趋势^[24],这给金属再生循环提供了机遇。在大规模“风光”发展背景下,针对光伏、风电退役设施开展金属循环回收可以从多大程度上缓解金属稀缺性值得关注。

1 研究方法

1.1 “风光”大规模发展所需金属稀缺度评估模型

通过对“风光”大规模发展背景下金属供需两侧量化结果的分析,考虑金属供需匹配程度,建立“风光”大规模发展所需金属稀缺度评估模型。在金属需求侧,考虑我国实现远期碳中和目标的电力低碳化约束、协调转型节奏与能源安全供应等不确定因素,梳理得到不同类型的“风光”大规模发展路径,并基于动态物质流分析模型得到其对应的金属需求规模。在金属供应侧,将金属年产量与储量分别作为不同类型金属短、长期供应能力评价指标。“风光”大规模发展所需金属稀缺度评估模型通过构建年供应压力指标与累积供应压力指标2类金属供应评估指标,对不同类型金属的稀缺度开展二维评估。

金属年供应压力指年金属需求规模在年原生金属矿产产量中的占比。通过刻画分析不同时点、不同金属的年供应压力进行分析,可深入把握金属矿产短期供需矛盾动态演化规律。金属年供应压力公式如下

$$AP_{it} = \frac{AD_{it}}{P_{it}} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中, AP_{it} 、 AD_{it} 、 P_{it} 分别是第 i 种金属在第 t 年的金属年供应压力、金属年需求量和金属年产量。

金属累积供应压力指累积金属需求规模在原生金属矿产储量中的占比。通过对特定研究期内特定用途的金属供应压力进行分析,可深入理解金属矿产长期供需矛盾态势。累积供应压力公式如下

$$CP_{iT} = \frac{CD_{iT}}{R_{iT}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$CD_{iT} = \sum_{t=1}^T AD_{it} \quad (3)$$

式中, CP_{iT} 、 CD_{iT} 、 R_{iT} 分别是第 i 种金属在第 T 时期内的金属累积供应压力、金属累积需求量和金属储量的平均值;第 T 时期内的金属累积需求量由该段时期内的金属年需求量加总得到。

1.2 “风光”大规模发展金属末端循环回收模型

与化石燃料不同,金属具有长时间使用而不产生额外耗散损失的特点,因而具有循环再生潜力。通过考察“循环经济”背景下“风光”电力设施的未回收利用过程,模拟量化再生金属的供应潜力。假定当电力设施到达运行寿命后,设施进入末端循环利用环节。同时,再生金属供应潜力受到两方面因素影响,即可供循环利用的金属可回收规模上限与回收过程中的末端回收率。

考虑上述两方面因素,构建“风光”大规模发展的金属末端循环回收模型。首先,特定年份的金属可回收规模上限的计算通过加总该年度不同类型“风光”设施的金属流出量得到。具体地,发电设施的金属流出量则可通过动态物质流分析中“存量-流量”间的演替关系刻画计算,即先计算设施退役规模,再计算设施所含的金属量。其次,回收过程的末端回收率指的是再生金属供应在金属可回收规模上限中的占比,且末端回收率受到金属报废环节的金属收集率与循环利用环节的金属再制造效率影响^[25]。金属报废环节的金属收集率指的是金属回收废弃物在金属流出量中的占比,其受到循环经济政策、法规推行力度与企业层级的政策接受程度影响,收集率越大则说明社会各层级的“循环经

济”运行机制越成熟。循环利用环节的金属再制造效率指的是循环利用环节的再生金属产出规模与废弃金属投入规模之比,主要受到循环再生技术工艺水平的影响。本文考虑金属收集率与金属再制造效率,对金属终端回收率在研究期内进行模拟设定,具体见情景设定部分。模型中的数量关系可用下列公式表示

$$SP_{it} = AMU_{it} \cdot EoL_RR_{it} \quad (4)$$

$$AMU_{it} = \sum_{type=1}^n INFRAS_{type_OM_{it}} \quad (5)$$

$$INFRAS_{type_OM_{it}} = INFRAS_{type_IM_{i(t-L_{type})}} \quad (6)$$

$$EoL_RR_{it} = CR_{it} \cdot PR_{it} \quad (7)$$

式中, SP_{it} 、 AMU_{it} 、 EoL_RR_{it} 、 CR_{it} 、 PR_{it} 分别是第 i 种金属在第 t 年的再生金属供应量、金属可回收规模上限、末端回收率、金属收集率和金属再制造效率; $INFRAS_{type_OM_{it}}$ 、 $INFRAS_{type_IM_{it}}$ 分别是某种类型发电设施中第 i 种金属在第 t 年的金属流出量与金属流入量; L_{type} 为某种类型发电设施的寿命。

考虑再生金属供应贡献后,金属年、累积供应压力均可得到缓解,并可用下列公式重新计算

$$AP'_{it} = \frac{AD_{it}}{P_{it} + SP_{it}} \cdot 100\% \quad (8)$$

$$CP'_{iT} = \frac{CD_{iT}}{R_{it} + \sum_{t=1}^T SP_{it}} \quad (9)$$

2 情景设定与数据

由于大规模“风光”发展的金属稀缺程度受到金属供需两方面因素影响,本文从供需两方面出发开展情景参数设定。在金属需求方面,首先考虑新型电力系统构建过程中“风光”发展路径的不确定性,借鉴已有研究成果得到不同大规模“风光”发展路径所需的金属需求规模^[26]。在金属供应方面,考虑仅依赖原生金属供应的金属供应设定与同时考虑原生、再生金属供应的金属供应设定。基于上述 2 方面设定,在不考虑金属回收贡献的基础上,探究仅依靠原生金属矿产供应,究竟哪些金属面临更突出的供需冲突矛盾和较高的金属稀缺程度。同

时,重点考虑金属循环再生策略,构建回收正常发展、回收加速发展2个不同金属循环回收程度的金属回收情景,探究大规模“风光”发展背景下金属循环策略对金属供需矛盾的缓解程度差异,加速发展回收对哪些金属供需矛盾的缓解效果更大。

2.1 “风光”大规模发展的金属需求影响因素设定

参考已有文献得到7个“风光”能源路径组合所需的金属矿产需求规模,路径组合的来源与详细信息如表1所示。金属需求测算环节考虑铜、铝、铁、镍、锌、钨、镉、银、镉、碲、铟、镓共12种金属,上述金属种类覆盖大宗金属、稀有金属、稀土金属、伴生金属4大类,有利于探究不同类型金属供需的差异性,

并归纳各类金属供需特征。其中,光伏所需金属为铜、铝、铁、银、镉、碲、铟、镓;风电所需金属为铜、铝、铁、镍、锌、钨、镉。金属需求核算过程采用“存量-驱动”的动态物质流分析法。7个风光能源路径组合中,风能发电、光伏发电的相对规模大小存在差异,如图1所示。路径组合2、7是风电主导型路径,路径组合1、3、4、5、6则是光伏主导型路径。这表明,尽管“风光”作为新型电力系统的主力电源并大规模发展已成为广泛预期共识,但究竟哪种电力技术将获得更大的部署规模,从而发挥更大作用仍存在差异性认识,且光伏主导型路径在已有研究中被更多接受。

表1 能源发展路径基本信息汇总

能源路径组合	碳排放控制目标	发布年月	发布机构	文献名称
路径组合1	1.5℃	2018年5月	中国煤控项目1.5度能源情景课题组	中国实现全球1.5℃目标下的能源排放情景研究 ^[27]
路径组合2	1.5℃	2020年10月	清华大学气候变化与可持续发展研究院	中国长期低碳发展战略与转型路径研究综合报告 ^[28]
路径组合3	远低于2℃	2018年10月	国家发改委能源研究所	中国可再生能源展望2018 ^[29]
路径组合4	碳中和	2021年10月	生态环境部环境规划院	攻克十大关键技术,实现碳达峰碳中和 ^[30]
路径组合5	碳中和	2021年10月	国际能源署	中国能源系统碳中和路线图 ^[31]
路径组合6	碳中和	2021年3月	全球能源互联网发展合作组织	中国2030年能源电力发展规划研究与2060年展望 ^[32]
路径组合7	碳中和	2022年6月	中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院	“双碳”目标下中国能源中长期走势评估 ^[33]

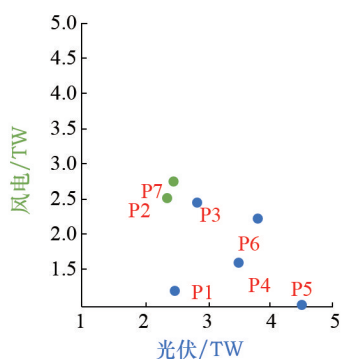


图1 不同“风光”发展路径2060年的发电装机规模对比

2.2 “风光”大规模发展的金属供应影响因素及循环策略设定

将金属供应情景分为基础供应情景(PS)、回

收正常发展情景(PSR1)与回收加速发展情景(PSR2)。3个情景采用相同的原生金属供应设定,即未来产量始终保持与2020年产量规模相同。不同金属2020年的产量如表2所示^[26,34-35]。事实上,未来金属产量规模存在上升增长期、达峰平台期和下降减少期,假定原生金属产量规模保持恒定的原因有两方面:一是有利于探究当前原生金属供应与未来增长需求之间的缺口规模,即回答仅依赖原生金属供应满足金属需求,当前金属供应规模需要如何调整;二是原生金属矿产供应预测有赖于对可储量等关键因素的动态演化规律判断,还需参考价格等外在因素的影响,存在较大的量化建模复杂性与不确定性。

表2 不同金属2020年产量

金属	年产量/t
铁	870000000
铝	37000000
铜	1700000
锌	4200000
镍	120000
钨	23647
镉	574
银	3200
镉	8200
碲	300
铟	500
镓	290

在PSR1情景和PSR2情景下,区分3类金属(稀土金属、伴生金属、大宗及稀有金属)分别设定

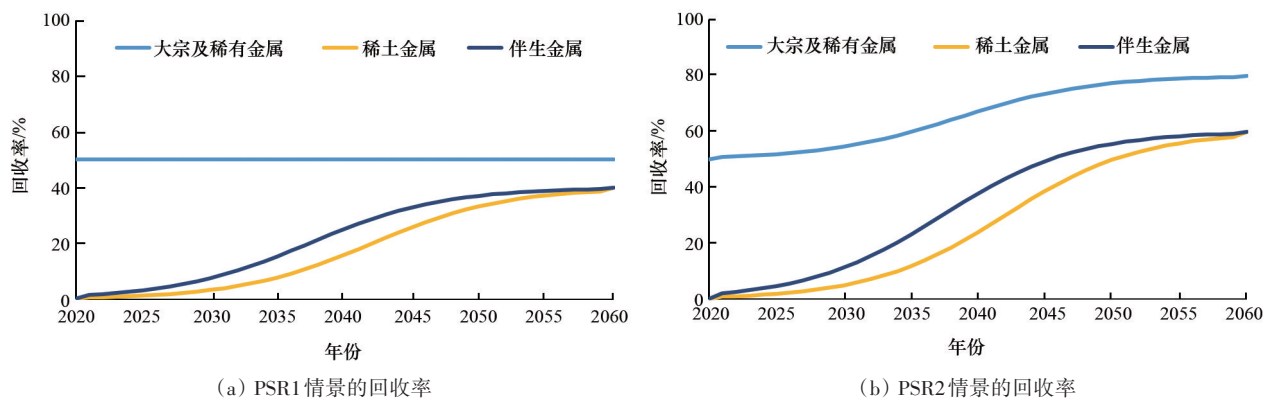


图2 不同回收情景的回收率设定

3 结果与讨论

在考虑路径不确定性和时间动态演化特征的基础上,从年供应压力与累积供应压力2个维度对不同金属稀缺程度开展评估:聚焦PS情景下的“风光”大规模发展所需金属匹配程度,评估仅考虑原生金属供应下的金属稀缺程度;通过对PSR1和PSR2情景下的分析,评估实施循环经济策略与加强的循环经济策略时金属稀缺程度的改善情况;聚焦“风光”发展路径不确定性对金属供应压力的影响开展分析。

3.1 支撑“风光”大规模发展的关键金属识别

若不考虑金属循环回收贡献,支撑“风光”大规模发展的年金属供需态势整体偏紧。在PS情景

回收率。回收率具体的设定通过先定关键时间节点,再填充中间年份的方式开展,具体如图2所示。PSR1情景下,大宗及稀有金属回收率保持当前水平50%不变,稀土金属、伴生金属的回收率均从当前的0增长到2060年的40%,且稀土金属回收率增速前期更快;PSR2情景下,大宗及稀有金属回收率从2020年的50%增长到2060年的80%,稀土金属、伴生金属的回收率均从当前的0增长到2060年的60%,且稀土金属回收率增速前期更快。由于技术进步遵循先快后慢的一般性规律,本文假定金属终端回收率的演变也遵循这样的规律。除上述关键节点的设定外,中间年份回收率的确定通过S型曲线拟合来得到。

下,截取2030、2045、2060年进行深入分析(图3),发现金属年供应压力整体看不容乐观。所有考察的金属中,铜、镍、镉、碲面临突出的金属矿产年供应压力。从时间动态演化规律看,除路径2、3外,其余路径下铜、镍、镉的年供应压力持续上升,压力极值出现在研究期的中后段;碲年供应压力则持续下降,压力极值出现在研究期的前中段。个别路径下,金属年供应压力呈现波动态势,先下降后上升或先上升后下降。例如,在路径3下,铜、镍、镉的年供应压力在2030年分别高于60%、80%和95%,之后于2045年下降,并在2060年反弹回升。

在年供应压力极端值预警方面,不同路径呈现较大差异。路径4、6、7下,2060年铜、镍、镉的年供应压力都大于90%。对这些路径而言,需加强关注

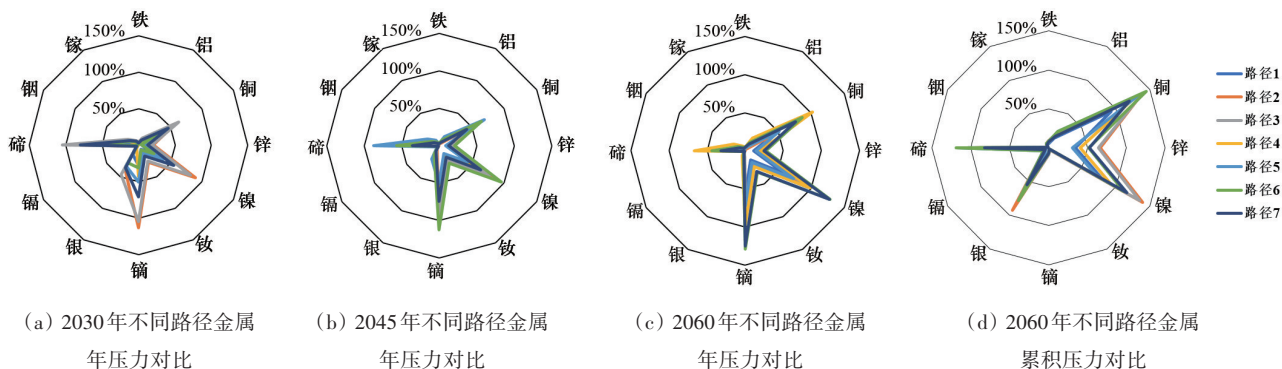


图3 PS情景下不同路径组合的金属年供应压力与累积供应压力

2060年碳中和目标收官期前后的年金属供需预警与风险识别。路径2、3、7下,2030年铜、镍、镉、碲的年供应压力处于高位。针对这些路径,需加强关注2030年碳达峰前后的年金属供需预警与风险识别。鉴于当前极端值预警期的临近,迫切需要金属原生产量的更快提升与其他策略的辅助。

不考虑金属循环回收贡献,支撑“风光”大规模发展的金属累积供应压力呈现严重分化的特点。在PS情景下,针对2020—2060年的金属累积供应压力开展分析,如图3所示。铜、镍、银、碲、锌面临突出的金属矿产供应压力。对各路径的累积供应压力取均值发现,铜、镍、碲的累积压力大于100%,锌和银的累积压力接近50%和70%。考虑路径异质性影响,路径2下镍、银、锌3种金属的累积供应压力出现极值,路径6下铜和碲的累积供应压力出现极值。考虑不同类型金属矿产累积影响,路径2、3、6的金属累积供应压力位居前3位。

结合上述2方面金属供应压力评价结果,可从金属、路径与时间动态特征3个维度对金属稀缺度评价丰富认识。一是金属供应高危路径的识别。从金属年供应压力与金属累积供应压力方面看,路径2和路径3是值得关注的金属供应高危路径,两者的共同之处在于2060年的风电装机规模均处于较高水平(接近或超过2500 GW)。二是关键金属的识别。年供应压力突出的金属矿产共4种,分别为铜、镍、镉、碲;累积压力突出的金属矿产共5种,分别为锌、银、碲、铜、镍。在这6种对风光发展制约性关键的金属中,有3种金属是重合(碲、铜、镍),对其开展管控措施可同时解决2方面的金属

制约问题。这表明对碲、铜、镍实施管理策略是解决金属矿产制约问题的重要抓手。三是金属供应压力极端阶段的预警与应对。从金属年供应压力角度看,2030、2060年这两大关键性时间节点不仅是我国实现碳达峰、碳中和的标志性节点,也都将面临极大的金属供需失衡挑战,需加强风险防范与预警措施。这表明大规模“风光”电力系统建设过程的金属供应压力同时面临短期与长期风险,需要系统性策略辅助。

3.2 支撑“风光”大规模发展的关键金属循环模拟

通过比较实施循环回收策略前后的年供应压力与累积供应压力改善效果,评估金属循环策略效果。如图4所示,将未考虑回收时的年供应压力设定为100%,聚焦铜、镍、镉、碲这4种金属矿产,对2030、2045、2060年的金属循环策略效果开展评估。结果表明,短期内(2030年前)回收策略难以起到缓解年供应压力的作用。中长期看,回收策略的作用效果存在异质性,效果排序依次为镉、镍、铜、碲。回收策略效果最佳的镉在PSR1情景下,年供应压力到2060年较未回收时平均下降34%,提高回收力度(PSR2情景)则可使得年供应压力较未回收时平均下降45%。PSR1情景下,镍、铜、碲的年供应压力在实施回收策略后相比未回收时到2060年下降21%~27%,提高回收力度(PSR2情景)则可使得年供应压力较未回收时平均下降28%~38%。

不同金属对回收策略的响应程度呈现差异性,也使得金属矿产供应安全管控更加复杂。对识别得到的金属供应高危路径(路径2、3)实施回收策略,可发现镍、镉的年供应压力缓解更显著。在

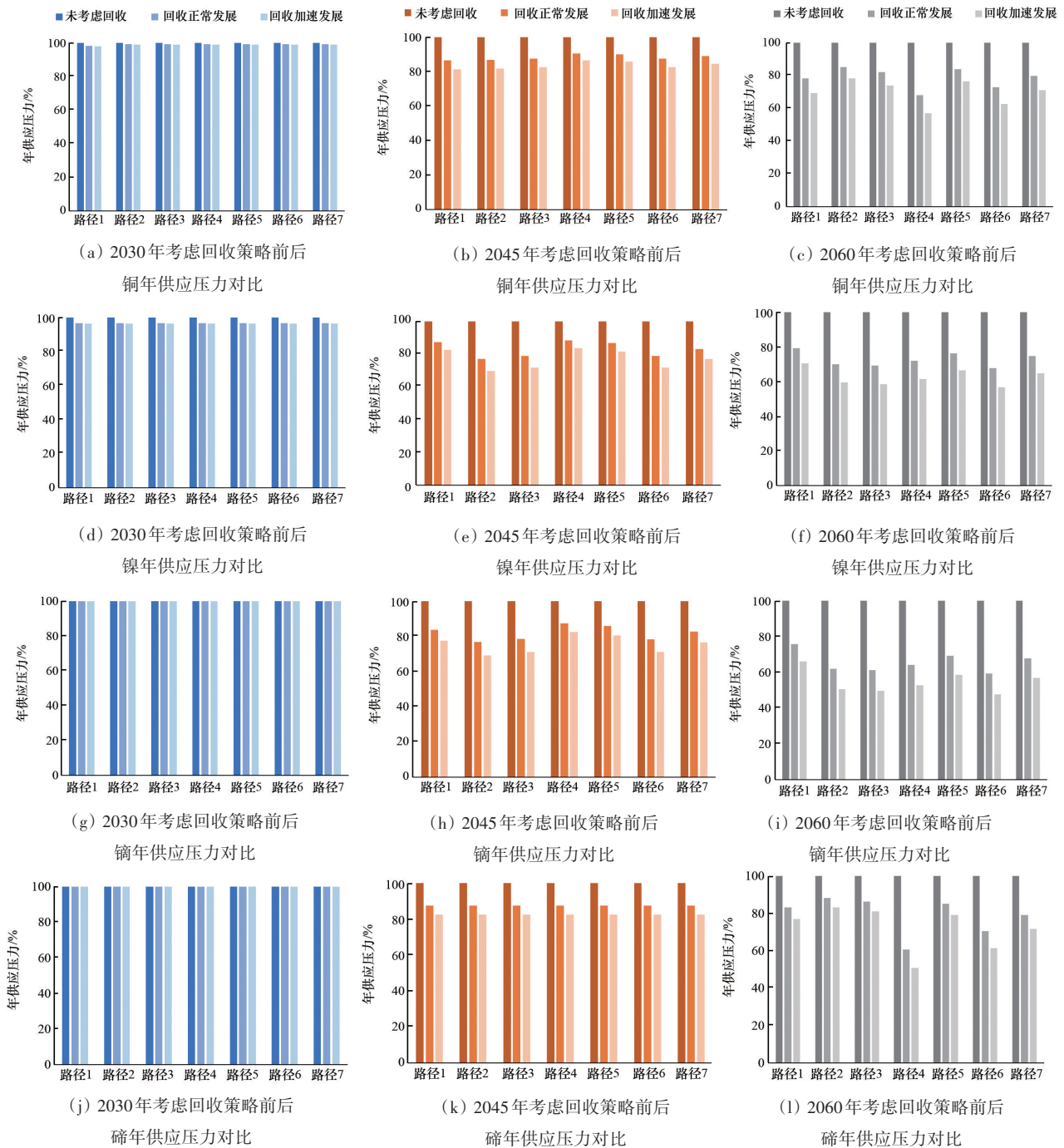


图4 回收策略对年供应压力的改善效果对比

PSR2情景下,路径2、3中的镍年供应压力相比未回收时下降41%~42%;镉年供应压力相比未回收时下降49%~50%。而铜、碲实施回收策略,金属供应高危路径所对应的年供应压力并未得到显著改变。在PSR2情景下,路径2、3中的铜年供应压力相比未回收时下降22%~26%;碲年供应压力相比

未回收时下降17%~19%。从重点关注金属的年供应压力缓解方面看,即使在PSR2情景下,镉和镍中后期的年供应压力仍超过50%,碲前期较大的供应压力仍难以得到改善。

如图5所示,将未考虑回收时的2020—2060年累积供应压力设定为100%,聚焦铜、镍、碲、锌、银

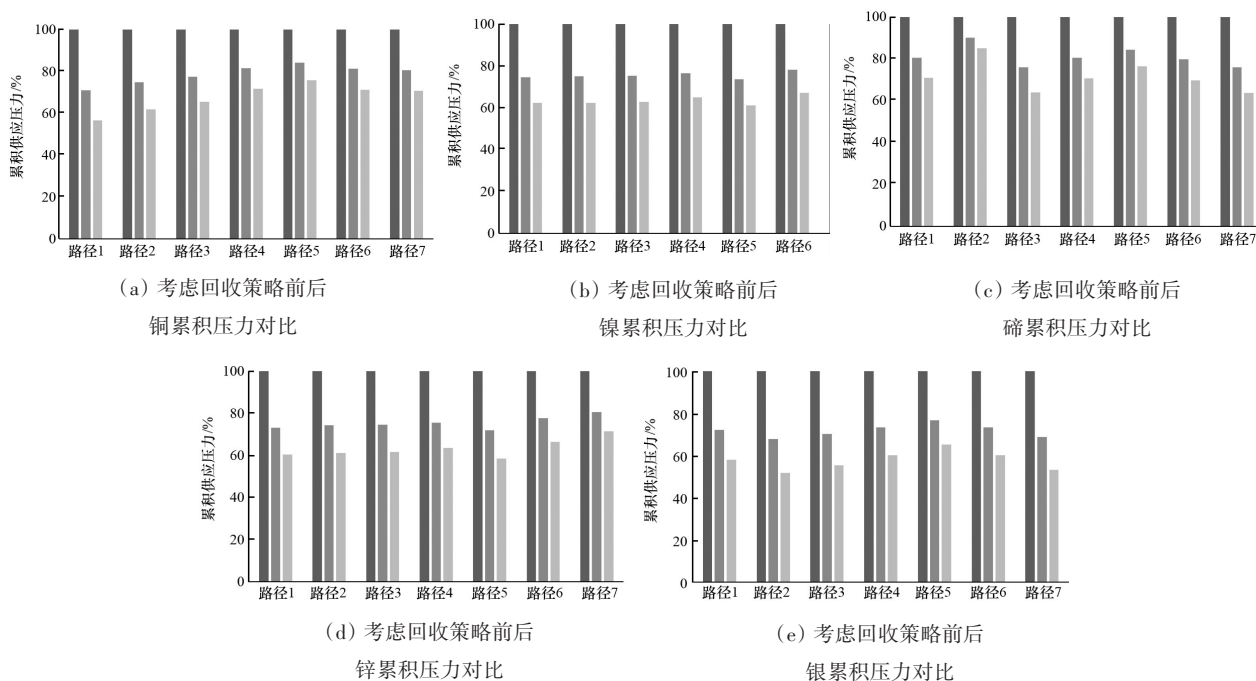


图5 回收策略对累积供应压力的改善效果对比

5种金属矿产,对开展循环回收策略后的累积供应压力开展评估。结果表明,实施回收策略对银累积供应压力的缓解最显著,其次是锌和镍,对铜和锡的累积供应压力缓解效果较差。PSR1情景下,考虑回收策略可使除锡外的其余金属矿产累积供应压力下降超过20%;PSR2情景下,随着回收的加速发展,考虑回收策略可使除锡外的其余金属矿产累积供应压力下降超过30%。

不同金属开展回收策略时,对累积供应压力的影响也会因金属类别不同而产生异质。回收加速发展可将不同路径下对应的银和锌累积供应压力均降至50%以下(安全状态);镍、铜、锡的累积供应压力仍高于50%(处于非安全状态)。不同情景对回收率设定的差异为金属回收作用机理的初步揭示提供了比较参照。比较2个回收情景可发现,研究期内铜、镍、锌、银的回收率从50%提高到80%,会使得累积供应压力下降8%~16%;锡回收率从40%提高到60%,会使得累积供应压力下降5%~12%。

3.3 “风光”发展路径对金属供应压力影响的不确定性分析

本部分聚焦7组“风光”发展路径下的金属累积、年供应压力,量化分析“风光”发展路径不确定

性对金属供应压力的影响,结果如图6所示。在评估不确定性影响时,首先选取规模最小的路径作为基准,分别计算其余路径相比基准路径的提升幅度百分比、其余路径下的金属压力相比基准路径下的金属压力增加百分比,再用两者做比得到装机规模增加1%时,对金属累积/年供应压力的影响。采用上述的不确定性分析方法既可对7组不同“风光”发展路径下的结果做深入分析,又可省去对每条路径开展灵敏性分析所带来的额外计算量。因此,图6中的每个子图展示的均为除规模最小路径以外其余路径的不确定性影响。

从发电设施存量角度看,2060年“风光”发电装机总量每增加1%,大宗金属累积供应压力相应增加0.3%~2%。路径1下的2060年“风光”装机总量最小,被选为基准路径。其余路径下铁的路径敏感度相比其他两类金属更高。路径2下铁的供应压力最大,路径5下铁的供应压力最小,主要原因在于铁的消费集中于风电设施,而路径2下的风电装机规模大于路径5。路径7尽管风电装机规模最高,路径7下的铁路径敏感度却低于路径2。造成这种差异性的主要原因是,路径7大致遵循“先慢后快”的增长模式,而路径2则遵循“先快后慢”的

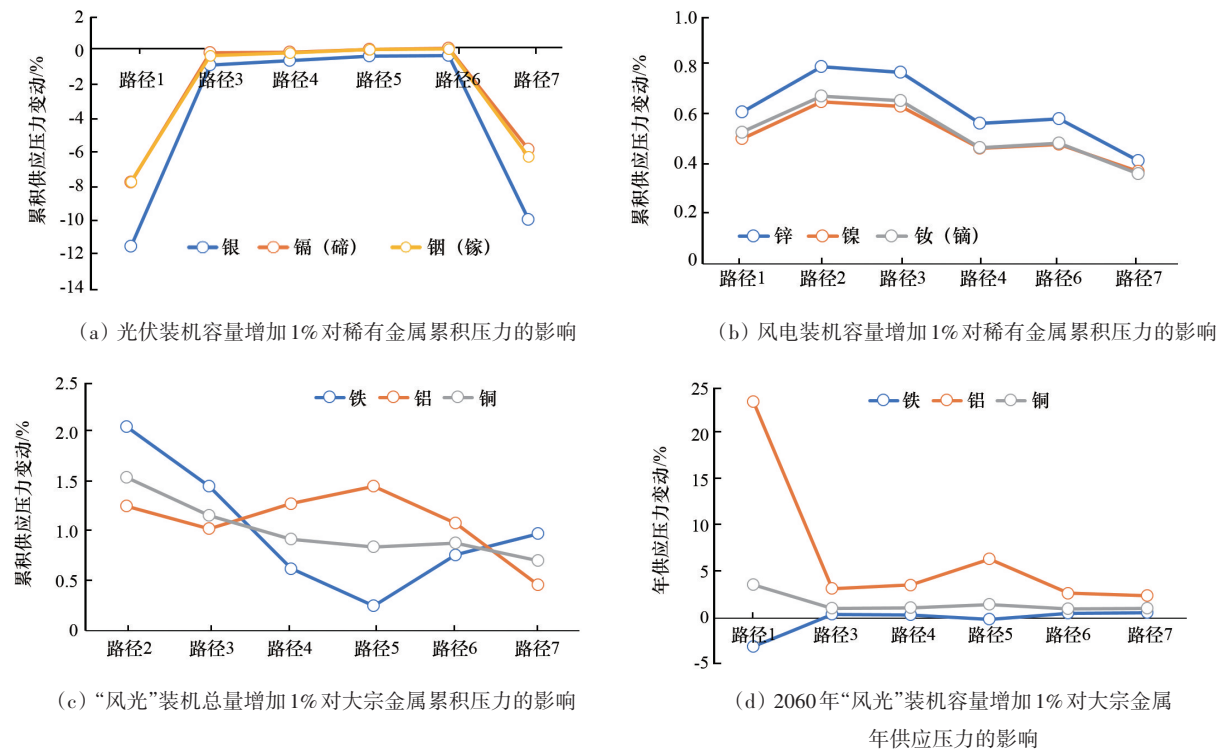


图6 “风光”发展路径不确定性对大宗金属累积/年供应压力影响

增长模式,因而路径2需要补充研究前中期部署的大量风机在研究后期退役造成的装机缺口。铜的路径敏感程度最小,且其受路径不确定性的影响始终介于铝和铁之间。在路径5下,路径不确定性对铝的影响最大,2060年“风光”发电装机总量每增加1%,铝累积供应压力相应增加1.5%。聚焦光伏装机规模不确定性影响时,路径2被选为基准路径。尽管路径2的装机规模最小,但由于其遵循“先快后慢”的增长模式,路径2下的稀有金属处于较高水平,因此导致部分路径下路径不确定性对累积压力的影响是负值。路径1和7下,路径不确定性对稀有金属累积压力的影响程度相似,原因是其光伏装机规模较低。在其余光伏装机规模较高的路径下,稀有金属累积压力受到路径不确定性的影响则处于同一量级。聚焦风电装机规模不确定性影响时,路径5被选为基准路径。不同路径下,2060年风电总装机容量每增加1%,锌、镍、钨、铈的累积供应压力增加0.3%~0.8%。

从发电设施流量角度看,2060年“风光”发电装机新增规模每增加1%,大宗金属年供应压力相应增加-3%~23%。路径2的2060年“风光”新增装

机规模最小,被选为基准路径。路径2“先快后慢”增长模式使得其后期规模小,2060年的年供应压力也处于较低水平,于是导致部分路径下路径不确定性对年供应压力的影响是负值。铝的路径敏感度相比其他两类金属更高。路径1下的铝受到路径不确定性的影响明显高于其他路径的原因可分为两方面:一方面,是路径1下后期光伏增长速率更快;另一方面,与基准路径下的“先快后慢”增长模式有关。铜与铁的路径敏感度相当,且路径不确定性对铜的影响程度大于对铁的影响程度。

3.4 全球支撑“风光”大规模发展的关键金属稀缺性评估结果对比与循环策略借鉴

由于金属在“风光”大规模发展中的使用具有全球通用性,了解“风光”大规模发展在中国、全球所需关键金属的共性与差异性,将为研究结果的解读分析提供广阔的视野。通过对已有研究聚焦全球或其他国家的“风光”大规模发展的关键金属结果进行梳理,与本文得到的支撑我国“风光”大规模发展的关键金属进行对比,结果如表3所示。支撑我国“风光”大规模发展的关键金属种类与美国、欧盟、德国等发达国家和地区,以及全球整体均存在高度重

表3 全球支撑“风光”大规模发展的关键金属研究结果对比

文献来源	区域	关注的电力技术	关键金属
Gervais 等 ^[36]	全球	“光”	镓、铟、砷、铋、硒
Goldschmidt 等 ^[37]	全球	“光”	银、铟
Li 等 ^[12]	全球	“风”	钨、镉、镨
Carrara 等 ^[38]	欧盟	“风光”	钨、镉、镨、铋、锆、碲
Nassar 等 ^[39]	美国	“风光”	碲、锆、镉、铟、铋
Shammugam 等 ^[40]	德国	“风”	铜、镉
本研究	中国	“风光”	铜、镍、镉、碲、锌、银

合。例如,稀土金属在美国、欧盟、德国,甚至全球都被视为制约“风光”大规模发展的关键金属,而重稀土镨也同样是支撑我国“风光”大规模发展的关键金属。这意味着,伴随未来“风光”在全球层面的加速部署与发展普及,与关键金属相关的资源争夺、竞争将变得更加激烈,更趋于白热化。这也更加凸显了采取循环策略挖掘再生金属资源潜力的重要性。而且,相比已有研究更加重视伴生类稀有金属与稀土金属,并将稀有金属作为主要的关键金属来源,本文评估得到的关键金属涵盖种类更广泛,包括了铜、镍、锌3种大宗金属。这将为我国“风光”大规模发展的金属资源保障策略与政策制定提供更加全面、系统的量化信息。同时,本文得到的支撑我国“风光”大规模发展的关键金属清单并未包含一些出现在全球关键金属清单中的一些金属,如砷、硒等,其中的主要原因是本文对中国光伏子技术发展趋势采用了与已有研究对全球整体光伏子技术发展趋势不同的设定。这也表明关键金属的识别与确定受限于研究对象刻画差异,未来需加强对技术不确定性的关注,在密切关注技术发展动态的基础上定期调整对技术路线的预期认识。

从全球角度看,“风光”设施的循环策略仍处于早期试探性阶段^[41]。通过梳理已有研究对全球和其他国家地区的关键金属的循环经济策略评估,可以发现,尽管大力采取以回收循环利用为核心的循环经济手段是极其必要的,但仅依赖它并不能完全消除金属瓶颈制约与供应风险。缓解关键金属的稀缺性需要金属供需两侧策略同时开展,从而达到“开源节流”的效果^[42]。一方面,从“节流”角度,需提高设施生产环节的物质效率,降低单位“风光”设施的金属使用强度;同时从能源发展规划角度,探

索金属需求最少的“风光”低资源需求发展路径。另一方面,从“开源”角度,需要在不断扩展循环经济内涵的基础上,开展循环利用、服务模式革新^[43]、适度延长设施使用年限等多种类型的循环经济实践活动,取得商业模式、市场机制、技术水平等多维度的循环经济实质性进步。

4 结论与建议

4.1 结论

1) 支撑“风光”大规模发展的关键金属种类多,关键性成因差异大。“风光”大规模发展与设施扩张过程中,考虑金属稀缺程度,可识别得到6种关键金属,包括铜、镍、锌、银、碲、镉。不同金属间的关键性存在差异,锌、银的关键性只体现在累积供应压力,镉的关键性只体现在年供应压力;铜、镍、碲既存在累积供应压力,又存在年供应压力,更加值得重点关注。6种关键金属中有4种(铜、镍、锌、镉)是支撑风电技术发展所必需的,有3种(铜、银、碲)是支撑光伏发电技术发展所必需的,铜则是支撑风电与光伏技术发展都需要的。

不同的关键金属的关键性成因存在差异。首先,由于大宗金属的广泛应用性,以往认为不存在稀缺性的大宗金属铜、镍和锌的供应压力凸显。其他战略性新兴产业,如新一代信息技术产业、高端装备制造产业、新能源汽车产业等或将与新型电力系统在大宗金属矿产方面形成竞争关系。其次,资源的稀缺性导致了伴生金属碲的关键性增高。提高找矿能力、加大矿产投资与金属循环再生水平需要同步推进。作为铜矿、金矿等主金属矿的伴生金属,碲的资源量估计也存在较大不确定性。加强对

碲为代表的伴生金属资源量核算方法体系的构建完善,将对伴生矿产投资规模的优化决策起到精确辅助作用。再次,稀土金属镝的关键性体现在产能不足。一方面,我国作为重稀土金属镝的主产国,需警惕因“一国稀土供全球”造成的优质战略原材料外流,并巩固现有产业链、供应链优势;另一方面,欧洲、美国正在通过提高再生金属回收技术与原生金属开采规模,实现稀土金属原生、再生产能的本质性大幅跃升,相关政策与实践经验值得我国参考借鉴。最后,稀有金属银属于边缘性关键金属矿产。实施回收策略可大幅缓解银的累积供应压力。循环回收策略对边缘性关键金属矿产的供应压力缓解效果最显著。

2) “风光”发展路径的不确定性对关键金属的稀缺性程度有直接影响。能源部署的终点目标状态与中间转型速度2方面决定着“风光”能源发展路径轨迹,而识别并持续关注“风光”发展路径的不确定性是开展金属供应风险量化与风险预警的基础。首先,从“风光”能源发展路径终点状态的相对比例关系看,“风电主导”路径凸显镝的年供应压力,供应风险集中在研究期中后段,且相较于“光伏主导”路径的累积金属供应压力更大,如路径2和路径3。“光伏主导”路径凸显碲的年供应压力和累积供应压力,且供应风险集中在研究期前段,金属累积供应压力较“风电主导”路径低。

从“风光”能源发展路径的中间增长模式看,“先快后慢”型路径较“先慢后快”型路径会导致更大的金属年供应压力。因此,在确定转型路径规划时,需系统考虑资源安全可得与低碳转型快慢之间的复杂权衡关系。考虑到日趋严格的碳约束和不断强化的能源供应安全底线思维,新型电力系统构建时间紧迫、任务艰巨,更需要结合加速转型期、总体形成期、巩固完善期的任务特点有序推进。

其他革命性低碳电力技术对“风光”电力技术的替代值得持续关注。尽管当前能源电力领域主流观点将“风光”电力技术视作未来新型电力系统的骨干电源,但仍不排除革命性低碳电力技术经历技术、成本等多维度大发展后,具备与“风光”电力技术相当的竞争潜力。另外,现有低碳电力技术

中,核能电力的安全可控建设也使得“核电主导”成为另一条潜在的新型电力系统转型路径^[44],可大幅减少对“风光”能源所需金属矿产的依赖,但存在潜在的核燃料所需同位素资源供应短缺风险,造成资源依赖风险转移^[45-46]。

3) 我国现有金属矿产供应能力难以支撑未来“风光”大规模发展要求,对“风光”电力设施开展金属循环再生策略是潜在解决方案。2030、2060年作为我国“双碳”目标的标志性时间节点,也面临巨大的金属供需压力:一方面,凸显了金属供应能力提升的重要性和策略辅助的必要性;另一方面,也表明需考虑金属稀缺性制约开展“风光”发展路径优选,避免因忽视资源约束而使得电力系统建设面临被动局面。

金属供应来源包括原生金属供应与再生金属供应两部分,整体供应结构逐渐呈现“二元化”趋势。这意味着金属矿产供应来源将从当前主要依赖原生金属,逐渐过渡到未来原生金属供应与再生金属供应共同发挥作用。大幅度提高金属回收率是“风光”大规模发展下开展设施大规模循环利用与金属再生供应的关键。随着金属供应来源不再局限于原生金属,也需要通过同时考虑原生金属和再生金属供应,丰富开发金属矿产供应预测模型,辅助理解金属矿产动态供需态势。相关模型方法数据研究将为资源可持续管理领域的学术研究提供新的研究机遇。再生金属矿产供应潜力将在研究期中后段发挥作用,这也给金属循环再生技术发展及相关循环框架规范的健全留出了宝贵窗口期。开展金属再生策略对不同金属矿产供应缓解存在异质性影响,作用效果对某些稀缺程度较小的关键金属(银)最显著,但仅靠金属循环再生策略不能完全解决金属矿产安全问题。金属矿产稀缺性缓解问题的解决需要更多组合性策略协调发力。

4.2 政策建议

1) 大规模“风光”发展背景下,在构建金属稀缺度缓解措施时应注重策略的针对性,区分产能和资源限制等不同关键性成因开展精准施策。为缓解“风光”发展的金属制约问题,宏观层面上,远期规划制定需考虑不同类金属在不同风光电力技术中的稀

缺失差异,采用“开源节流”的系统性观点,既重视电力系统外部金属矿产的可持续供应,又注重通过电力系统内部转型路径的优化调整达成“自救”。微观层面上,针对受到产能不足限制的关键金属,大中小型采矿企业需及时开展金属产能扩张的投资效益-风险评价并提早规划,实现产能稳步提升;针对资源处于劣势的关键金属,政府相关部门及企业需积极寻求国外国际金属进口合作机遇,提早布局并巩固关键金属的海外稳定可靠来源。

2) 为支撑大规模“风光”发展,需要从原生金属矿产来源丰富性提升角度保障原生金属矿产供应。一方面,聚焦关键金属开展针对性的国内增储上产工作,除对传统矿产来源加强投入保障常规性矿产供应稳步提升外,还需要关注海底采矿、太空采矿等潜在新兴矿产来源,强化对远景战略金属矿产来源的技术储备,依托我国深海、太空技术优势,力争做新兴矿产资源技术领域的引领者、领跑者;另一方面,注重开展国际金属矿产合作,不断拓宽、加深金属矿产合作伙伴关系,同时提高风险防范意识,并加强金属矿产国际运输通道安全监管。

3) 发挥政府、企业、研究者多层次力量,制定再生金属矿产发展的近、中、远期路线图与时间表,从技术和政策2个维度保障再生金属矿产供应规模稳步提升。在技术方面,以大幅提升金属末端回收率为目标,构建设施金属循环利用策略需要积极开展电力设施废弃物管理,并重视金属提取、再造等循环再生技术发展,形成足够的技术储备以更好应对未来风光电力设施大规模退役潮;在政策方面,形成健全的金属矿产再生循环政策支撑体系,并在形成可持续、可推广的金属再生流程规范的基础上积极示范推广。同时,从政府制度设计完善、企业参与积极性提升、研究者提供科学数据与科学认识贡献角度,筑牢再生金属循环的应用、技术与科学基础。考虑再生金属资源可得性,结合“风光”设施退役规模与金属可回用资源量“近期较少,中期快速激增,远期保持高位”的特点,在再生金属矿产发展路线图设计时设定适当的规划目标,并在近期采用“激励为主”、中期采用“激励与约束相结合”,远期采用“约束为主”的循环再生金属政策设计思路。

参考文献(References)

- [1] 清华大学. 中国碳中和目标下的风光技术展望[EB/OL]. [2024-01-31]. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-snp-20240131-zh>.
- [2] 国家能源局. 2023年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2024-01-26]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_131-0762246.htm.
- [3] The World Bank. The growing role of minerals and metals for a low carbon future[R]. Washington DC: The World Bank Group, 2017.
- [4] Hund K, La Porta D, Fabregas T P, et al. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition[M]. Washington DC: World Bank, 2023.
- [5] IEA. World Energy Outlook 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [6] IEA. Energy Technology Perspective 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [7] Kleijn R, Van der Voet E, Kramer G J, et al. Metal requirements of low-carbon power generation[J]. Energy, 2011, 36(9): 5640-5648.
- [8] IEA. The role of critical minerals in clean energy transitions[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [9] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [10] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 1063-1070.
- [11] 汤林彬,陈伟强. 基于物质流视角的中国能源金属供应风险评估研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(1): 153-161.
- [12] 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.
- [13] Helbig C, Bradshaw A M, Kolotzek C, et al. Supply risks associated with CdTe and CIGS thin-film photovoltaics[J]. Applied Energy, 2016, 178: 422-433.
- [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] 国务院. 推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案[EB/OL]. [2024-03-13]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6939232.htm.
- [16] Geng Y, Sarkis J, Bleischwitz R. How to globalize the

- circular economy[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 153–155.
- [17] Geng Y, Sarkis J, Bleischwitz R. How to build a circular economy for rare-earth elements[J]. *Nature*, 2023, 619(7969): 248–251.
- [18] Fu X K, Ueland S M, Olivetti E. Econometric modeling of recycled copper supply[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 219–226.
- [19] Dai T, Liu Y F, Wang P, et al. Unlocking dysprosium constraints for China's 1.5°C climate target[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(38): 14113–14126.
- [20] Nakamura S, Kondo Y, Kagawa S, et al. MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(13): 7207–7214.
- [21] Della B S, Sen B, Cimpan C, et al. Exploring the impact of recycling on demand-supply balance of critical materials in green transition: A dynamic multi-regional waste input-output analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(28): 10221–10230.
- [22] Liu B C, Wang H Y, Liang X Q, et al. Recycling to alleviate the gap between supply and demand of raw materials in China's photovoltaic industry[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 201: 107324.
- [23] Zhang S, Chen W Y. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 87.
- [24] Wang C, Feng K S, Liu X, et al. Looming challenge of photovoltaic waste under China's solar ambition: A spatial-temporal assessment[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118186.
- [25] Chen W Q. Recycling rates of aluminum in the United States[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(6): 926–938.
- [26] 任凯鹏. 考虑金属可得性的中国风光能源发展路径研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [27] 中国煤控项目 1.5 度能源情景课题组. 中国实现全球 1.5°C 目标下的能源排放情景研究[R]. 北京: 中国煤控项目 1.5 度能源情景课题组, 2018.
- [28] 项目综合报告编写组, 何建坤, 解振华, 等. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1–25.
- [29] 国家发改委能源研究所. 中国可再生能源展望 2018 [R]. 北京: 国家发改委能源研究所, 2019.
- [30] 王金南. 攻克十大关键技术 实现碳达峰碳中和[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
- [31] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [32] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
- [33] 唐旭, 任凯鹏, 李明, 等. 双碳目标下中国能源中长期走势评估[R]. 北京: 中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院, 2021.
- [34] USGS. Mineral Commodity Summaries 2021[R]. Virginia: U.S. Geological Survey, 2021.
- [35] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告—2020[R]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [36] Gervais E, Shammugam S, Friedrich L, et al. Raw material needs for the large-scale deployments of photovoltaics—Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2021, 137: 110589.
- [37] Goldschmidt J C, Wagner L, Pietzcker R, et al. Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics[J]. *Energy and Environmental Science*, 2021, 14: 5147–5160.
- [38] Carrara S, Alves D P, Plazzotta B, et al. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonized energy system[R]. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2020.
- [39] 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.
- [40] Shammugam S, Gervais E, Schlegl T, et al. Raw metal needs and supply risks for the development of wind energy in Germany until 2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 221: 738–752.
- [41] Nyffenegger R, Boukhatmi A, Radavicius T, et al. How circular is the European photovoltaic industry? Practical insights on current circular economy barriers, enablers, and goals[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 448: 141376.
- [42] Wang P, Yang Y Y, Heidrich O, et al. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(1): 94–102.
- [43] Takimoto H, Kosai S, Watari T, et al. Circular economy can mitigate rising mining demand from global vehicle electrification[J]. *Resources, Conservation and Recy-*

- cling, 2024, 209: 107748.
- [44] 倪思洁. 先进核能技术: 向更安全、更可靠努力[EB/OL]. [2024-04-02]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2022/8/483828.shtml>.
- [45] Hill D J. Nuclear energy for the future[J]. *Nature Materials*, 2008, 7: 680-682.
- [46] Tokimatsu K, Höök, M, McLellan B C, et al. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: Exploring metal requirements and the well-below 2° C target with 100 percent renewable energy[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 1158-1175.

Identification of critical metals and simulation of circular strategies under China's large-scale development in wind-power and solar-power sectors

REN Kaipeng^{1,2,3,4}, TANG Xu^{2*}

1. College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
2. College of Economics and Management, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
4. Basic Research center for Energy Interdisciplinary, College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Systematically assessing the scarcity of metals required by large-scale development in wind-power and solar power sectors and conducting recycling simulation are the basis of tackling the metal constraint challenge. We argue that 6 types of metal minerals (copper, nickel, dysprosium, tellurium, zinc, silver) have greater supply pressures during the wind-power and solar photovoltaics development while tellurium, copper and nickel have relatively higher criticality. The uncertainties of wind-power and solar photovoltaics development have impacts on the supply pressure of metal minerals. "Wind-dominate" pathways generally have a greater metal mineral supply pressure than "solar photovoltaics dominate" pathways. The metal recycling and reuse strategies will play an important role in the mid to long-term future. The coping strategies have greater impacts on dysprosium and silver than other metals. The 20%~30% increase of metal recycling rate will lead to 5%~16% decline of cumulative metal pressure. We also show that the current metal availability of China cannot fully meet the metal mineral demand during China's large-scale development in wind-power and solar-power, nor can the adaptation of single strategies. We suggest that policy makers should consider the heterogeneity of different metal minerals, the uncertainty of energy development pathways, and the characteristics of metal supply when constructing the integrated coping strategies portfolio in the future.

Keywords wind-power and solar power; critical metals; recycling and reuse; energy development pathways ●



(责任编辑 王微)