doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.012

中国退役风电机组与光伏组件再生铜铝供给及其需求替代潜力

苏帅[1]，付玉鹏[2]，王雷[2]

（1. 国网综合能源服务集团有限公司，北京 100052；
2. 深圳大学 物理与光电工程学院，广东 深圳 518060）

摘要：风电与光伏退役装备中的铜铝资源具有回收利用潜力，但其对新增装备材料需求的贡献取决于资源释放时间、回收水平及供需变化。本文基于中国31个省级行政区（不含香港、澳门和台湾）的装机数据，采用动态物质流分析，测算2030—2060年风电机组、光伏组件本体中的铜铝退役资源量和年度再生金属供给潜力，分析不同省级行政区及装备来源之间的供给时序互补性，并评估再生供给对新增投运装备材料需求的理论替代潜力。结果表明：在基准装机情景和寿命参数下，研究期内铜铝累计退役资源量为2 042.97万t。高回收水平情景下，考虑一年回收处理周期，2050年，再生铝、再生铜年供给潜力分别为61.43万t和7.27万t，全国需求替代潜力分别为77.76%和47.00%，至2060年分别升至86.87%和54.93%。2030—2050年，铝替代比例上升76.52个百分点，其中，55.97个百分点来自再生供给增加，20.55个百分点来自新增装备铝需求下降。

关键词：风电与光伏；铜铝退役资源；动态物质流分析；再生金属供给；需求替代潜力

中图分类号：F407.32　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1007-7545(2026)11-2409-16

引用格式：苏帅，付玉鹏，王雷. 中国退役风电机组与光伏组件再生铜铝供给及其需求替代潜力[J]. 有色金属（冶炼部分），2026(11): 2409-2424. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.012.

Su Shuai, Fu Yupeng, Wang Lei. Secondary Copper and Aluminium Supply from End-of-Life Wind Turbines and Photovoltaic Modules in China and Its Demand Substitution Potential[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(11): 2409-2424. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.012.

我国风电和光伏装机规模持续扩大，运行装备所含的铜、铝等有色金属总量也不断增加[1-2]。国家能源局公布的可再生能源并网运行情况显示，风电和光伏已成为新增电源的重要组成部分[3]；中国光伏年度调查表明，集中式与分布式光伏共同推动了装机规模增长[4]。随着这些装备陆续退役，其中的金属经回收处理后可成为再生金属的重要来源。然而，累计退役资源量难以反映不同年份可供回收的资源规模，因而不足以单独作为回收产能规划的依据。退役资源产生的时间和地点、进入回收体系的比例，以及从装备退役到形成再生金属供给所需的时间，都会影响年度供给量及其年际波动。与此同时，风光装机扩张和退役装备替换持续产生新的材料需求，再生资源的增长能否提高需求替代程度，还取决于供需两端的变化。因此，回收规划需要将退役资源的时空分布、回收过程与新增装备材料需求联系起来，评价再生金属的供给规模及其资源替代作用。

已有研究从不同尺度刻画了中国风光退役资源的时空分布。王影等[5]预测了京津冀分布式光伏报废量及可回收资源潜力，周梦婷等[6]分析了沿黄九省份报废光伏组件的时空分布；张天毓等[7]将组件退役情景与伴生金属回收潜力相联系，种珊等[8]评估了我国光伏设备退役规模与资源潜力。冯丽妃等[9]测算了省级风光设备报废资源的时空格局，并分析其与

收稿日期：2026-10-11　　**修回日期：**2026-10-17　　**录用日期：**2026-10-19

作者简介：苏帅（1993— ），男，硕士研究生，工程师；**通信作者：**付玉鹏（1995— ），男，博士，助理研究员

©Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

管理政策的衔接。这些成果为省级资源测算和回收布局提供了基础。在年度供给层面,不同省份以及风电与光伏装备的退役时间差异,可能使再生资源在不同时期集中释放。将不同来源的同种金属供给汇总,有助于识别供给规模及其年际波动,并判断来源之间是否存在时序互补。然而,资源规模较大或供给较为平稳,并不必然意味着能够满足更高比例的材料需求,还需结合新增装备的投运规模及其材料组成进行评价。

风电与光伏退役资源的比较还需考虑装备材料组成与回收工艺的差异。郭慧娟等[10]耦合技术要素与使用寿命,分析了我国退役风电设备的资源化潜力;梁扬扬等[11]将设备退役与新能源关键金属供需相联系。退役风机叶片的生命周期环境与经济效益随回收路径而变化[12],玻璃纤维和碳纤维复合材料的处理要求也与金属不同[13-14]。何朋蔚等[15]及陈立洋等[16]研究了风电稀土金属的需求、回收与二次供给。这些差异意味着,即使属于同一种金属,其所在部件、分离方式及回收产品品质也可能不同。因此,对风电与光伏开展联合分析时,需要分别核算两类装备的材料组成及回收过程,在一致的材料范围和品质假设下汇总同种再生金属供给。相应的需求测算也应采用相同核算范围,避免以局部装备的再生供给与完整系统的材料需求直接比较。

动态物质流分析能够将装机变化、装备寿命和材料组成纳入同一框架。光伏循环经济(Photovoltaics in the Circular Economy, PV ICE)工具按投运年份记录材料组成,用于分析技术更新与可靠性变化对材料流的影响[17];相关研究分别考察了装备寿命变化对退役资源及材料需求的影响[7,10],以及风光技术构成对金属供需的影响[11]。光伏回收政策与技术综述指出,退役数量、处理路径、产品品质和经济性共同影响资源利用结果[18-20]。组件边框拆解、封装胶膜分离及后续解离处理分别具有不同的技术要求[21-23]。回收技术综述也表明,工艺经济性受到材料组成、处理成本和再生产品价值等因素的影响[18,24];中国光伏回收的生命周期研究及碳排放清单分析考虑了处置路径对环境效益的影响[25-27]。因此,年度供给测算需要区分装备退役、材料收集、回收处理与再生产品形成,分别核算材料损耗和回收处理周期。在此基础上,将年度可用供给与新增投运装备的材料需求对应,才能进一步判断再生资源能够替代多少材料投入,以及这一比例如何随时间和区域变化。

本文以中国31个省级行政区(不含香港、澳门和台湾)的风电与光伏装备为对象,采用动态物质流分析,构建装机发展、装备退役、再生金属供给与材料需求相衔接的分析框架。首先,按投运年份追踪装备退役,测算2030—2060年铜铝退役资源的规模与空间分布,区分现有装备和未来新增装备的贡献。其次,结合收集率、材料回收率和回收处理周期,测算年度再生供给;分别汇总六个区域内不同省(区,市)及风电与光伏来源的同种金属供给,评价其时序互补性。最后,根据装机扩张和退役替换所需的新增投运容量计算铜铝需求,分析再生供给的理论需求替代潜力及区域差异,并比较不同回收水平下的变化。通过上述分析,识别资源规模、供给时间与材料需求之间的关系,为风光退役装备回收布局及再生资源利用提供依据。

1 数据与方法

1.1 装机数据与发展情景

研究覆盖中国31个省级行政区(不含香港、澳门和台湾),以装备部署地作为退役资源来源地,按东北、华北、华东、中南、西南和西北六个地理分组开展区域比较。区域划分为:东北(辽宁、吉林、黑龙江)、华北(北京、天津、河北、山西、内蒙古)、华东(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东)、中南(河南、湖北、湖南、广东、广西、海南)、西南(重庆、四川、贵州、云南、西藏)、西北(陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆)。省际合并核算将同一年、同一种金属、同一物质流层级的省级核算量相加;跨装备合并核算则将同一区域风电和光伏来源的同种金属量相加。

历史装机序列采用光伏2014—2025年省级资料,风电2015年中、2016—2019年末、2020年中和2024年末完整省级资料,以及2025年部分省份资料[28-33],并分别结合2026年6月底和8月底的全国装机数据更新(表1)。缺失的省级数据依据全国装机总量及省级装机份额估计。风电容量采用兆瓦(MW)口径,光伏容量统一换算为直流侧峰值功率(MWp)。

装机数据按各统计时点更新。光伏最新全国数据为2026年6月底的1 272 GW,其中,集中式696 GW、分布式576 GW[34];2026年8月1 299 GW的太阳能统计包含光热,不直接作为光伏装机容量使用。风电采用2026年8月约693 GW的全国容量[35]。

表1　风光装机数据与基准情景容量

Table 1　Wind power and photovoltaic capacity data and capacity under the baseline scenario

技术	最新完整省级数据日期	全国数据更新至	全国统计容量/GW	2060年基准容量
风电	2024年末	2026年8月	693.00	2 191.69 GW
光伏	2025年末	2026年6月	1 272.00（AC）	4 373.22 GWp（DC）

注：后续全国数据按省级份额分配。光伏全国统计容量按交流(AC)口径解释，最新时点对应模型容量1 411.20 GWp(DC)；2060年光伏容量为DC口径。2060年容量来自基准装机情景。

PV ICE是用于分析光伏装备及其材料流的开源动态物质流分析工具[17]。本文采用其全球晶硅光伏组件材料组成数据[17,36]，获取不同投运年份组件的铜、铝材料强度，即单位组件额定功率所含的材料质量，单位为t/MWp。该数据以组件直流侧(DC)额定功率为容量基准，因此，需将光伏装机容量换算为一致的DC口径。换算方式如下：

$$K_{p,t}^{\mathrm{DC}} = K_{\mathrm{U}}\ U_{p,t}^{\mathrm{AC}} + D_{p,t}^{\mathrm{AC}} \tag{1}$$

式中，$K_{p,t}^{\mathrm{DC}}$ 为省份p在时点t的光伏直流侧装机容量(MWp)；$U_{p,t}^{\mathrm{AC}}$ 和 $D_{p,t}^{\mathrm{AC}}$ 分别为集中式和分布式光伏的交流侧装机容量(MW)；K_{U}为集中式光伏的直流侧与交流侧容量之比，为无量纲参数；t的单位为年；集中式DC/AC比取1.2，参考IEA PVPS中国2024年度调查表2的全国容量换算[4]；Trends报告也区分中国AC统计与组件DC容量[37]。分布式DC/AC比取1。省级历史数据和未来装机节点均采用同一换算口径，并通过敏感性分析考察容量口径假设对结果的影响。

表2　风光装机发展情景

Table 2　Wind power and photovoltaic deployment scenarios

编号	情景名称	情景设置
P0	基准装机情景	采用文献2 ℃基准情景的2060年省级容量，以实际装机、近期预测和政策目标衔接，作为主要分析情景
P1	1.5 ℃装机情景	采用文献1.5 ℃目标下的2060年省级容量，衔接方法同P0
P2	无CCS情景	采用文献2 ℃目标下不使用碳捕集与封存技术的2060年省级容量，衔接方法同P0
P3	热泵应用情景	采用文献2 ℃目标下热泵应用情景的2060年省级容量，衔接方法同P0
P4	分段线性情景	采用与P0相同的2026年、2030年、2035年、2040年、2050年和2060年省级容量，各节点之间线性衔接
P5	直线插值情景	从最新统计时点出发，按恒定年度增量增长至P0的2060年省级容量

注：P0~P3的2060年装机容量来源于文献[38-39]。P4用于考察节点间衔接方法的影响，P5用于考察相同2060年容量下不同装机增长节奏的影响。六种情景采用相同的历史装机数据。

未来省级装机的2060年容量采用Zhang等[38]及其公开数据集[39]，包括2 ℃基准、1.5 ℃、无碳捕集与封存(CCS)和热泵应用四种情景。以最新实际装机为起点，近期光伏新增参考中国光伏行业协会2026—2030年保守与乐观预测的中值[40]，风电参考2023—2025年全国净新增均值；在统计口径下，设置2030年风光合计不低于2 800 GW、2035年不低于3 600 GW的衔接约束[41-42]，保留文献2060年终点。通过同时最小化近期新增参考偏差与相邻年份净新增变化，重构全国年度装机序列；省级份额由最新统计份额平滑过渡至文献2060年份额。中间轨迹及份额过渡规则由本文设定。光伏按集中式与分布式组成换算为DC容量。按此方法，P0路径2030年光伏拟合新增为267.66 GW，低于参考中值295 GW。

本文设置六种装机发展情景(表2)。基准装机情景采用文献2 ℃基准的2060年容量，作为主体分析的装机路径；1.5 ℃、无CCS和热泵应用情景用于比较采用同一文献不同情景终点构建的装机路径。另设置分段线性和直线插值两种对照，分别检验节点间衔接方法和装机增长节奏的影响。

1.2　装备寿命与退役量测算

模型按投运时点划分装备批次，并采用Weibull存活函数追踪各批次随服役时间变化的剩余容量：

$$S(a) = \exp\left[-\left(a/\lambda\right)^{k}\right] \tag{2}$$

$$\lambda = \mu / \Gamma\left(1+1/k\right) \tag{3}$$

式中，$S(a)$为装备服役年龄为a时的存活比例，为无量纲量；a为服役年龄，λ为Weibull尺度参数，μ为平均寿命，三者单位均为年；k为形状参数，为无量纲量；Γ为伽马函数。

风电参考平均寿命为25 a[10]，形状参数假设为3；光伏尺度参数为30 a、形状参数为5.375 9[43]，对应平均寿命约27.66 a。期初存量指首个统计时点仍在用的装备容量，其参考服役年龄假设为5 a。寿命和期初年龄的比较设置见表3。

在每次装机存量更新时，先按装备寿命计算自然退役，再与统计或情景装机容量比较。存活容量高于目标值时，按各批次剩余容量的比例扣除差额，记为额外退出量E；低于目标值时补充新增容量。历史阶段的E用于使存量与统计值一致；未来阶段的E对应省级份额过渡所要求的额外退出。年度容量平衡关系为：

$$K_y - K_{y-1} = I_y - N_y - E_y \tag{4}$$

式中，K为年末在用装机容量，I、N和E分别为当年新增容量、自然退役容量和额外退出量；风电容量

表3 参考参数与敏感性分析设置

Table 3 Reference parameters and sensitivity analysis settings

参数	主体设置	比较设置
装备寿命	风电均值25 a；光伏尺度30 a，形状分别为3和5.375 9	寿命分别取0.8、1、1.2倍，九种组合
期初服役年龄	5 a，作者假设	0 a、10 a、0 a与10 a各半
光伏容量映射	集中式DC/AC=1.2；分布式=1；文献原容量按AC解释	集中式1.0、1.1、1.3；文献容量按DC解释
收集率c	高回收：风电0.80，光伏0.85	低回收：风电0.30，光伏0.15
工艺进入比例θ	高回收：风电及光伏铜铝均为1	低回收：风电铜铝及光伏铝1；光伏铜0.40
材料回收率η	风电铜铝0.90；光伏铜0.95、边框铝0.92	边框铝0.42、0.94，文献启发的参数对照
回收处理周期	1 a，作者假设	3 a
材料强度	JRC风电类型加权；PV ICE投运年份组件数据	两类装备各取0.8、1、1.2倍，九种组合
空间与历史分配	最新省级份额平滑过渡至文献2060份额	保持近期份额至2035年；省级历史估计替代方法
近期新增参考	CPIA保守、乐观中值；风电近三年净新增均值	光伏保守和乐观图示曲线

单位为MW，光伏容量单位为MWp，y为年份；E按各批次剩余容量比例分配，与N共同计入退役资源量R，并按相应批次的材料强度核算。

历史装机批次包括期初存量及截至最新统计时点反推的新增容量，光伏和风电分别截至2026年6月底和8月底；未来投运批次由装机情景生成。每组寿命参数均重新计算批次构成，以保持历史装机与未来存量的平衡。P0路径下，未来额外退出集中于2036—2052年，主要发生在中南和西北。全计算时段的光伏和风电额外退出分别为58.22 GWp(DC)和9.59 GW；2030—2060年额外退出对应的铝、铜资源分别占同期退役资源的1.77%和0.70%。

1.3 材料组成与再生金属供给测算

风电材料强度采用欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre，JRC)公布的不同风电机组技术类型的材料数据[44]，核算范围包括风电机组。材料强度表示单位装机容量所含的材料质量，按各技术类型的装机占比加权计算；技术类型占比为作者情景假设：齿轮箱双馈、直驱永磁、混合传动永磁在2025年及以前分别为0.80、0.10、0.10，2060年分别为0.40、0.30、0.30，其间线性过渡。光伏采用PV ICE提供的全球晶硅光伏组件材料组成数据[17,36]，核算范围仅包括组件本体，其中，铝计组件边框，铜采用组件内封装铜数据，材料用途包括焊带、母线及连接片[45]；组件外线缆、逆变器和支架不纳入核算。根据装备投运年份选取相应的材料强度；对于光伏组件，2006年以前投运的组件采用2006年的材料强度，2050年以后投运的组件采用2050年的材料强度。假设装备服役期间所含的材料质量保持不变。风电材料强度以t/MW表示，光伏材料强度以t/MWp表示，其中，MWp为组件直流侧额定峰值功率。

本文将退役资源转化为再生金属供给的过程分为装备退役、收集、回收处理和再生金属产出四个环节。R为退役金属资源量；C为已收集退役装备所含的铜或铝质量；T为进入相应金属回收工艺的铜或铝质量；Q为再生金属产出潜力；A为考虑从装备退役到形成供给所需时间后的年度再生金属供给潜力。收集率c、进入相应回收工艺的比例θ和材料回收率η分别为$c=C/R$、$\theta=T/C$和$\eta=Q/T$，三者的乘积$c\theta\eta$表示退役金属资源最终转化为再生金属的比例。各环节的计算关系为：

$$C_t = cR_t \tag{5}$$

$$T_t = \theta C_t \tag{6}$$

$$Q_t = \eta T_t \tag{7}$$

$$A_t = Q_{t-l} \tag{8}$$

式中，R_t、C_t、T_t、Q_t和A_t均表示相应年份内的金属质量(t)；按一年核算步长报告的年度供给规模以t/a表示。c、θ和η均为无量纲比例；下标t为年份，l为从装备退役到形成供给的时间间隔(a)。

基准设置取l=1，即某年退役资源经收集和回收处理后形成的再生金属，在下一年计入供给。模型将各环节的材料损耗归属于装备退役年份，再据此确定供给年份。本文设置低回收水平和高回收水平两种情景(表3)。光伏铝边框采用人工拆除工艺，假设已收集组件中的铝边框全部进入该回收工艺，即θ=1；材料回收率取0.92，参考Ardente等[46]的铝边框拆除结果。敏感性分析另取0.42和0.94，分别参考PV ICE基准参数和FRELP工艺的铝回收结果，统一作用于模型中的铝边框质量。0.94的原文献范围包括边框和内部铝件。光伏铜在低回收水平和高回收水平情景下进入相应回收工艺的比例分别为0.4和1.0，材料回收率取0.95。风电装备中已收集的铜铝全部进入相应回收工艺，铜、铝的材料回收率均取0.90。风电和光伏分别处理，在同种再生金属的纯度、合金形态及使用性能等价的假设下，汇总两类装备的供给量。各情景的参数设置见表3。

1.4　年度供给特征与来源互补性评价

年度供给特征采用均值、最小年度量、变异系数(*CV*)及最小年度量与均值之比表征，*CV*使用总体标准差计算。窗口内的*CV*同时反映趋势变化和年际起伏。评价窗口为2030—2039、2040—2049和2050—2060年，另采用10 a和11 a滚动窗口分析序列离散程度随时间的变化。为评价不同来源的时序互补性，将窗口内每个来源的年度供给量升序排列，再按相同位置求和，构造最大波动参照。该参照保留各来源的年度值集合，使合并序列的方差和*CV*达到给定年度值集合允许的最大值。以实际年份顺序下的*CV*与参照*CV*比较，计算*CV*绝对降幅和相对波动平滑指标(*D*)：

$$\Delta CV = CV_{\max} - CV_{\text{actual}} \tag{9}$$

$$D = 1 - CV_{\text{actual}} / CV_{\max} \tag{10}$$

式中，CV_{actual}和$CV_{\max}$分别为实际年度供给序列与最大波动参照的变异系数，均为总体标准差与均值之比；ΔCV为两者的绝对差，*D*为相对波动平滑指标，均为无量纲量，*D*的结果以百分数表示。

相对波动平滑指标表示合并供给序列相对于最大波动参照的*CV*降幅。采用同一参照时，取值越大，实际合计供给的离散程度相对于该参照越低。来源间保持正相关时，也可出现正的相对波动平滑指标；各来源完全同序变化时，指标为0。省际参照以各省为来源，跨装备参照以区域风电和光伏为来源，分别计算。

1.5　新增装备材料需求与再生金属需求替代潜力

新增装备的材料需求包括装机扩张和退役替换所需的材料投入。本文采用动态物质流模型计算的年度新增投运容量，结合相应投运年份的材料强度，分别测算铜、铝需求。区域材料需求按装备投运所在地汇总，计算式为：

$$M_{r,m,t} = \sum_{p \in r} \sum_{k} I_{p,k,t} \mu_{k,m,t} \tag{11}$$

式中，$M_{r,m,t}$为区域*r*在年份*t*新增投运装备对金属*m*的需求量(t)；$I_{p,k,t}$为省份*p*中类型*k*装备的年度新增投运容量，包括装机扩张和退役替换，风电、光伏容量单位分别为MW和MWp；$\mu_{k,m,t}$为对应装备、金属及投运年份的材料强度，风电、光伏的单位分别为t/MW和t/MWp；下标*r*为区域索引，*p*为省份索引，*k*为装备类型索引，*m*为金属种类索引，*t*为年份。装备类型包括风电与光伏，金属种类包括铜和铝。需求侧与供给侧采用一致的材料核算范围，风电包括机组，光伏包括组件本体。

以各区域同年可用再生金属供给能够满足的材料需求比例，表征区域需求替代潜力：

$$P_{r,m,t} = \frac{\min\left(A_{r,m,t}, M_{r,m,t}\right)}{M_{r,m,t}} \times 100\% \tag{12}$$

式中，$A_{r,m,t}$为考虑回收损耗及回收处理周期后的年度再生金属供给量(t)；$P_{r,m,t}$为需求替代潜力(%)，当再生供给超过需求时，该指标取100%，超出部分单独计为供给富余，需求为零时不计算该比例。区域内部匹配时，允许同种金属在不同省份及风电与光伏来源之间充分调配。该指标反映按装备投运所在地归属的理论需求替代潜力；回收料投入率(EOL-RIR)统计生产原料需求中来自报废产品回收材料的实际投入贡献[47]。

研究期内的需求替代潜力按逐年匹配量累计计算：

$$P_{r,m}^{\text{period}} = \frac{\sum_{t=2030}^{2060} \min\left(A_{r,m,t}, M_{r,m,t}\right)}{\sum_{t=2030}^{2060} M_{r,m,t}} \times 100\% \tag{13}$$

式中，上标period表示2030—2060年的累计核算，研究期需求替代潜力以百分数表示。各年的供给用于匹配同年需求，累计指标为年度匹配量之和占研究期材料需求总量的比例。全国统筹口径下，以全国同年供给总量与需求总量中较小者占需求总量的比例计算年度替代潜力，研究期指标采用逐年匹配后累计的方法。全国结果采用全国统筹口径，区域结果采用区域内部匹配口径。

为比较区域内部匹配与全国统筹的差异，进一步计算跨区域统筹可增加的需求匹配量：

$$\Delta U_{m,t} = \min\left(\sum_{r} A_{r,m,t}, \sum_{r} M_{r,m,t}\right) - \sum_{r} \min\left(A_{r,m,t}, M_{r,m,t}\right) \tag{14}$$

式中，$\Delta U_{m,t}$为在区域内部充分匹配基础上，通过全国统筹可额外满足的同种金属需求量(t)；下标*m*为金属种类，*t*为年份，求和下标*r*遍历六个区域。该计算假设各区域供给可自由调配，用于识别区域供需余缺是否存在互补空间。供需变化对需求替代比例的作用采用对称分解，分别取两种替换顺序下供给贡献与需求贡献的平均值。

2 结果与分析

2.1 风光装机规模与退役铜铝资源量

基准装机情景下，2060年，全国风电和光伏装机容量分别达到2 191.69 GW和4 373.22 GWp(DC)(图1、表1)。采用基准寿命参数时，2030—2060年，风光退役装备中的铜铝资源总量为2 042.97万t，其中，铝为1 803.72万t、铜为239.25万t，铝构成了本研究核算范围内退役金属资源的主体。按装备投运时间划分，48.43%的累计资源量来自已有装备，其余来自未来新增装备。年度退役资源量在2057年达到研究期内最大值131.89万 t；2052年起，未来新增装备的年度贡献超过已有装备(图2(a))。

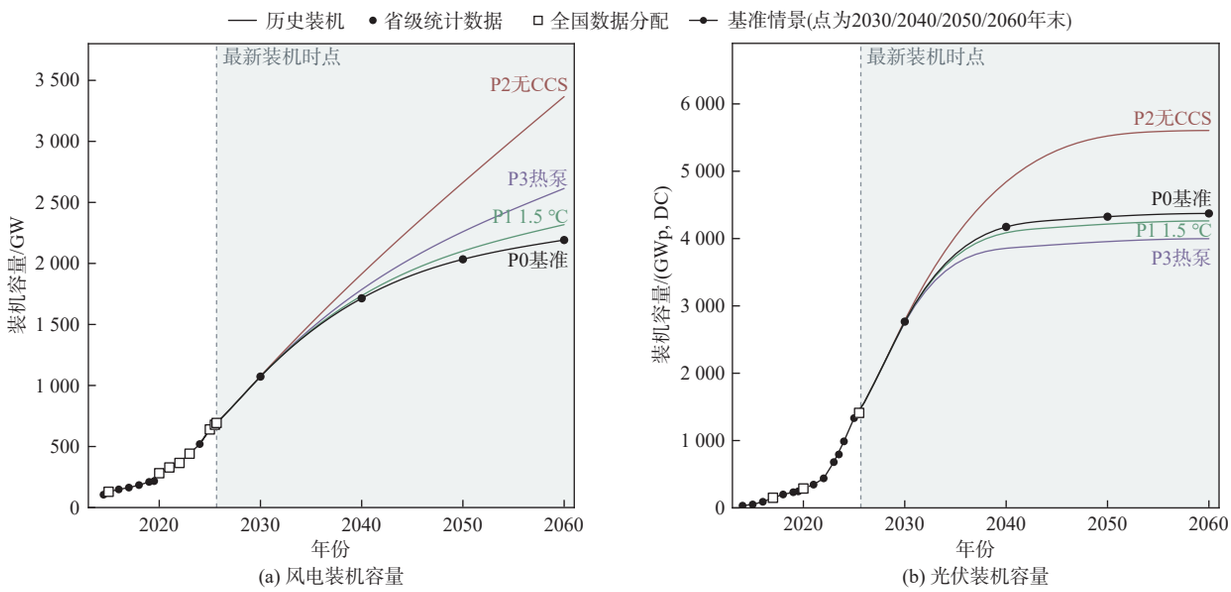


图1 不同装机情景下风光容量变化

Fig. 1 Changes in wind power and photovoltaic capacity under different deployment scenarios

注：风光曲线对应表2的P0~P3情景，P4、P5未在图中显示。光伏容量为GWp(DC)，风电为GW。

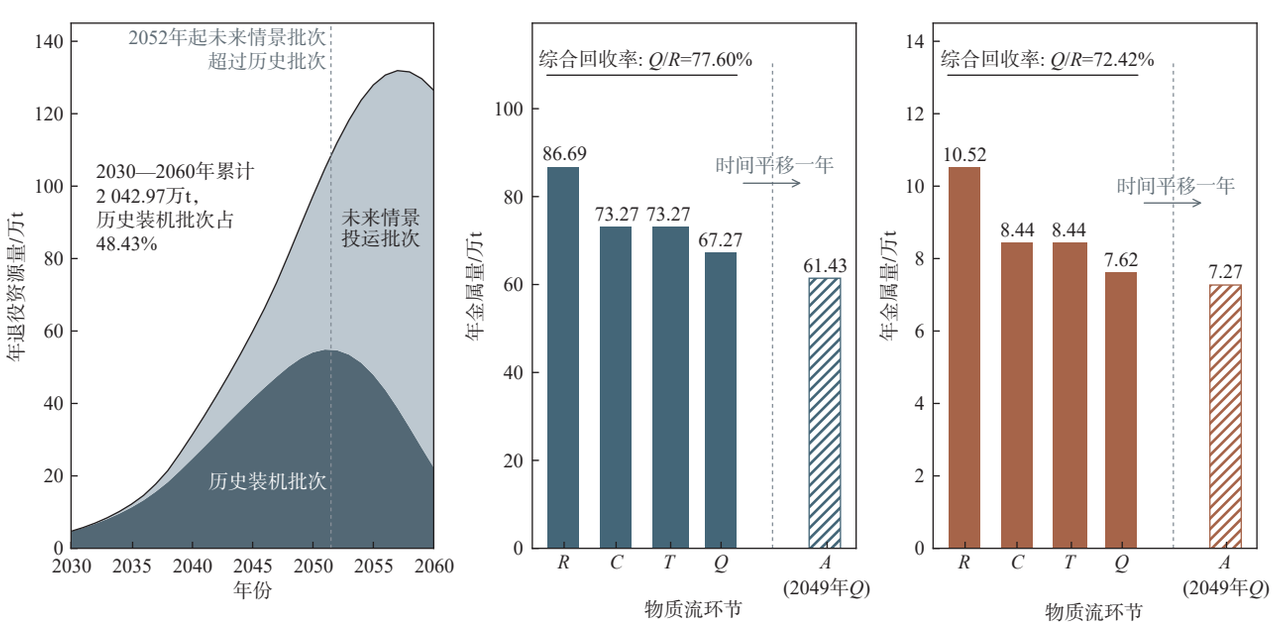


图2 铜铝年度退役来源与回收供给过程

Fig. 2 Annual end-of-life copper and aluminium resources and their conversion to secondary metal supply

注：(a)为按投运来源拆分的全国铜铝年度退役量；(b)、(c)中，高回收水平情景下$R\rightarrow C\rightarrow T\rightarrow Q$为同年物质流层级，分别表示退役金属资源量、收集金属量、进入目标处理路径的金属量和再生金属产出潜力。A为2049年再生金属产出潜力经一年回收处理周期后计入的2050年供给。

P0路径下，光伏毛新增装机在2030、2040和2050年分别为300.94、80.33和150.54 GWp。近期新增规模较大而2060年存量终点固定，2035年后净增逐年减少。光伏交流容量约在2044年达到3 709.76 GW的远期终点，此后保持不变。2045年毛新增为87.38 GWp，其中，退役替换为76.48 GWp，新增装机以退役替换为主。铝需求先随净增减少而下降，随后因退役替换增加而回升(具体详细分析见后文2.5节)。

2.2　铜铝再生供给潜力与回收损耗

关键年份的铜铝退役资源量及再生金属供给潜力见表4。高回收水平情景下，2050年退役装备中的铝、铜资源量分别为86.69万t和10.52万t，经收集与回收处理后，可形成再生铝67.27万t、再生铜7.62万t，分别占资源量的77.60%和72.42%(图2(b)、2(c))。未被收集的铝、铜分别为13.42万t和2.08万t，均高于材料回收过程中的损耗量。由于已收集的铜铝均进入相应回收工艺，收集后的损耗全部发生在材料回收环节，铝、铜分别损耗5.99万t和0.82万t。低回收水平情景下，2050年再生铝供给潜力仅为11.99万t/a，约为高回收水平情景的五分之一。两种情景中铝边框的工艺进入比例和材料回收率相同，这一差异来自收集率。

表4　基准装机情景下铜铝退役资源与供给潜力

Table 4　End-of-life copper and aluminium resources and supply potential under the baseline deployment scenario /(kt·a^{-1})

年份	Al退役资源	Cu退役资源	低回收水平Al供给潜力	低回收水平Cu供给潜力	高回收水平Al供给潜力	高回收水平Cu供给潜力
2030	3.31	1.39	0.50	0.32	2.01	0.86
2040	26.14	5.07	3.49	1.22	16.65	3.30
2050	86.69	10.52	11.99	2.62	61.43	7.27
2060	112.82	13.64	17.38	3.49	90.25	9.76

注：收集率与路径进入比例见2.3节；铝边框材料回收率为0.92；供给时滞为一年。各分项和损耗差值均按未取整数据计算后分别取整。

假设从装备退役到形成供给需要一年时间，2050年，再生铝、再生铜年供给潜力分别为61.43万t和7.27万t，来源于2049年退役资源的回收产出。由于退役量逐年增加，滞后一年计入的供给低于当年产出。2050年，铝退役资源中，78.34万t来自光伏组件；铜退役资源中，10.02万t来自风电装备。光伏铝主要集中于组件边框，因而再生铝供给更受光伏组件退役规模和收集水平影响；本研究中的铜资源则主要来自风电机组，其供给变化更多取决于风电装备的退役过程。

2.3　退役铜铝资源的空间分布

基准装机情景下，2030—2060年风光退役装备中的铜铝资源呈现明显的空间集聚特征(图3)。累计资源量居前五位的省(区)依次为内蒙古、新疆、河北、山东和江苏，分别为166.43万t、159.83万t、142.08万t、137.45万t和136.97万t。从区域分布看，华东累计资源量最大，达到534.28万t，占全国的26.15%；西北和华北分别为462.83万t和419.37万t，三地合计占全国约七成，是研究期内铜铝退役资源的主要来源区域。光伏对31个省级行政区铜铝累计资源量的贡献均超过风电，其中，辽宁和吉林两类装备的贡献较为接近，风电占比分别为49.03%和48.06%。

2.4　区域再生金属供给变化与来源互补性

高回收水平情景和基准寿命参数下，P0路径中华东、中南、西南和西北的光伏再生铝供给潜力在2057—2058年达到峰值，华北在2059年达到峰值，东北在研究期内持续增长(图4)。风电来源的再生铜铝供给潜力随区域而异，华东、东北持续增加，西北后期略有回落。2030—2039年，各来源的供给量均逐年增加，较低和较高供给量分别集中在时段的前期和后期。汇总后，实际供给的变异系数与最大波动参照相同，相对波动平滑指标为0。2040—2049年，省际汇总的指标最高为0.41%，风光汇总仍为0。进入2050—2060年后，部分光伏供给由增长转为下降，不同来源的变化方向开始分化；风光汇总的指标最高为1.19%，两类装备供给仍以共同增长为主。

2050—2060年，P0路径下不同省份之间的再生铜供给互补性总体强于再生铝(表5、图5(a1)和图5(a2))。汇总区域内各省供给后，西南地区再生铜的相对波动平滑指标达到70.62%，西北和华北分别为40.00%和17.98%；再生铝的省际指标最高为9.16%。西南指标较高，主要因为该路径中四川、重庆的风电存量在2036年后下降，而云南、贵州继续增长。四川风电存量由2036年的19.42 GW降至2060年

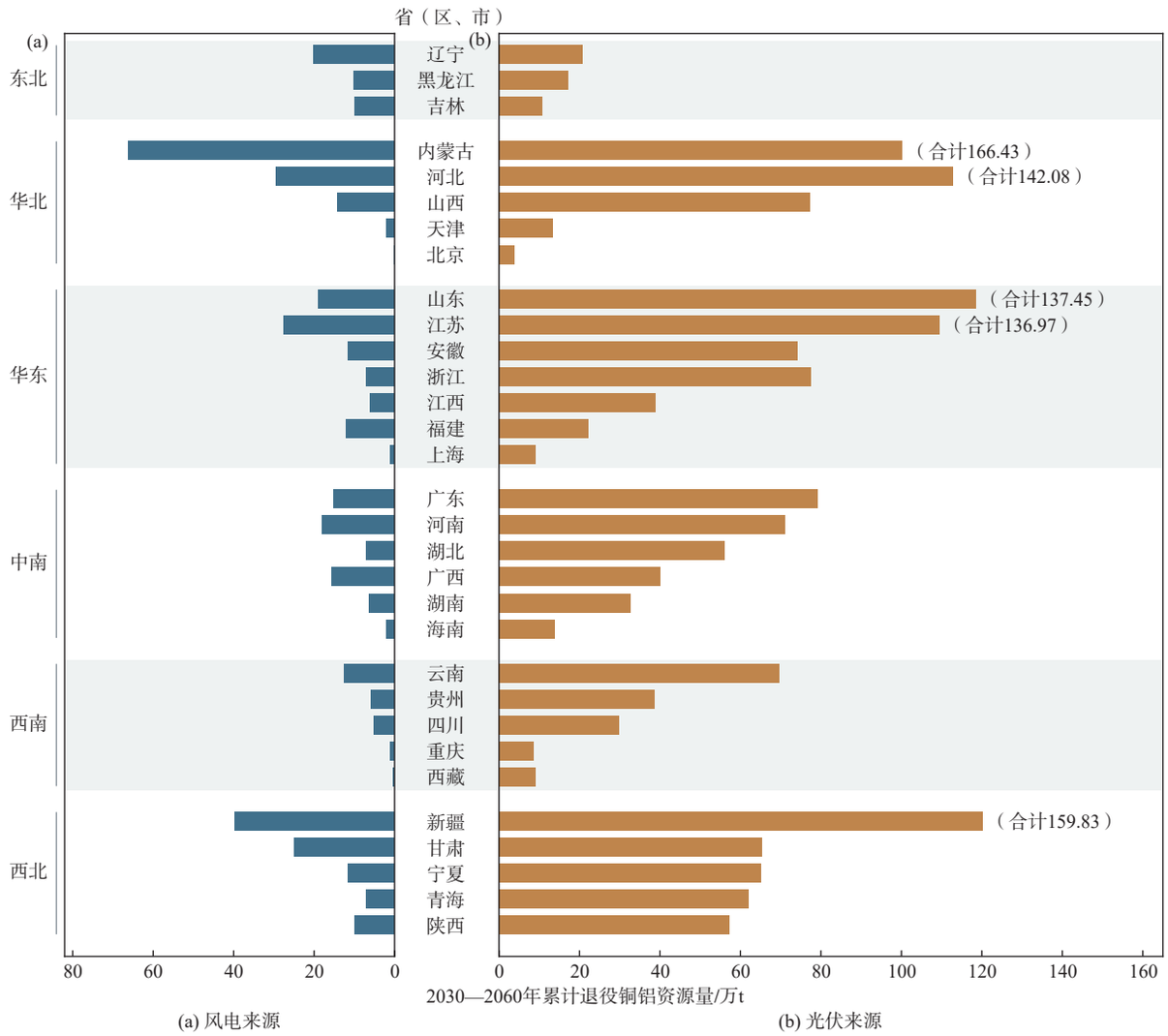


图3 中国31个省级行政区(不含香港、澳门和台湾)风光装备累计退役铜铝资源量

Fig. 3 The cumulative end-of-life copper and aluminium resources from wind power and photovoltaic equipment in 31 provincial-level administrative regions in China (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan)

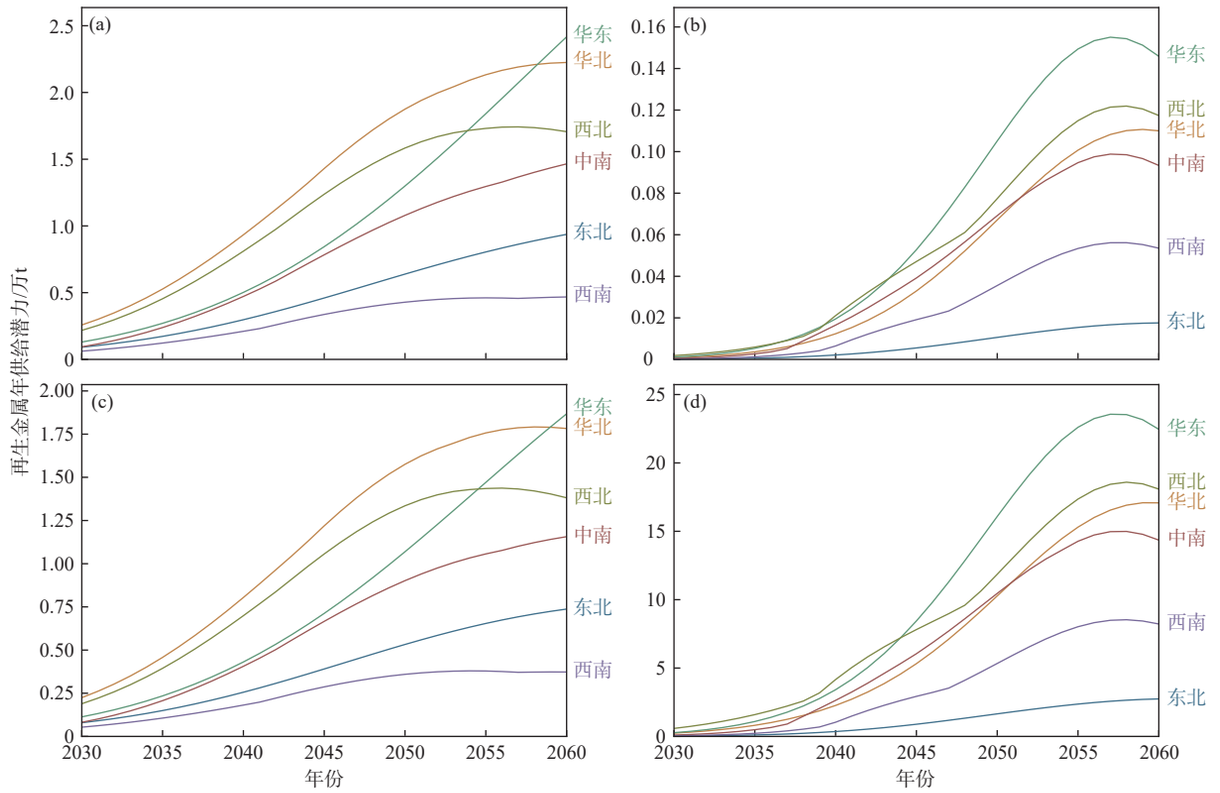
注:资源量未扣除收集、路径分配和材料回收损耗;光伏覆盖组件,风电覆盖机组。

的4.26 GW,装机变化方向的差异通过自然退役和额外退出影响再生供给。从供给规模看,华东地区再生铝年均供给潜力为22.71万t,居六个区域首位,其最低年度供给量约为均值的76%;西南再生铜的年均供给潜力为0.50万t,最低年度供给量约为均值的92%。

从图5(b1)和图5(b2)可以看出,风电与光伏两类装备之间的供给互补也存在区域差异。P0和基准寿命参数下,2050—2060年,各区域同种金属的风光供给相关系数均为正,相对波动平滑指标最高为1.19%,两类来源的年度变化较为同步。以华东地区再生铝为例,风光供给相关系数为0.877,相对波动平滑指标为0.47%。采用不同省级布局过渡方式时,来源之间的趋势关系随之变化:保持最新省级份额至2035年末再向文献终点过渡,跨装备指标最高为21.08%,对应西南再生铜。参考容量口径下,36组寿命与期初年龄组合中,华东再生铝的风光相关系数为–0.949~1.000,相对波动平滑指标为0~15.46%;采用不同文献终点重构的P0~P3路径下,西南再生铜的省际指标为2.36%~70.62%。

2.5 再生铜铝的需求替代潜力及区域差异

在P0装机路径和基准寿命参数下,再生铜铝对新增风光装备材料需求的替代潜力总体上升(图6)。高回收水平、一年回收处理周期下,再生铝的需求替代潜力由2030年的1.24%升至2050年的77.76%,再生铜则由5.35%升至47.00%。同期,再生铝年供给



(a)风电再生铜;(b)光伏再生铜;(c)风电再生铝;(d)光伏再生铝

图 4　中国六区风电、光伏铜铝年度再生金属供给潜力

Fig. 4　Annual secondary copper and aluminium supply potential from wind power and photovoltaic equipment in China's six Regions

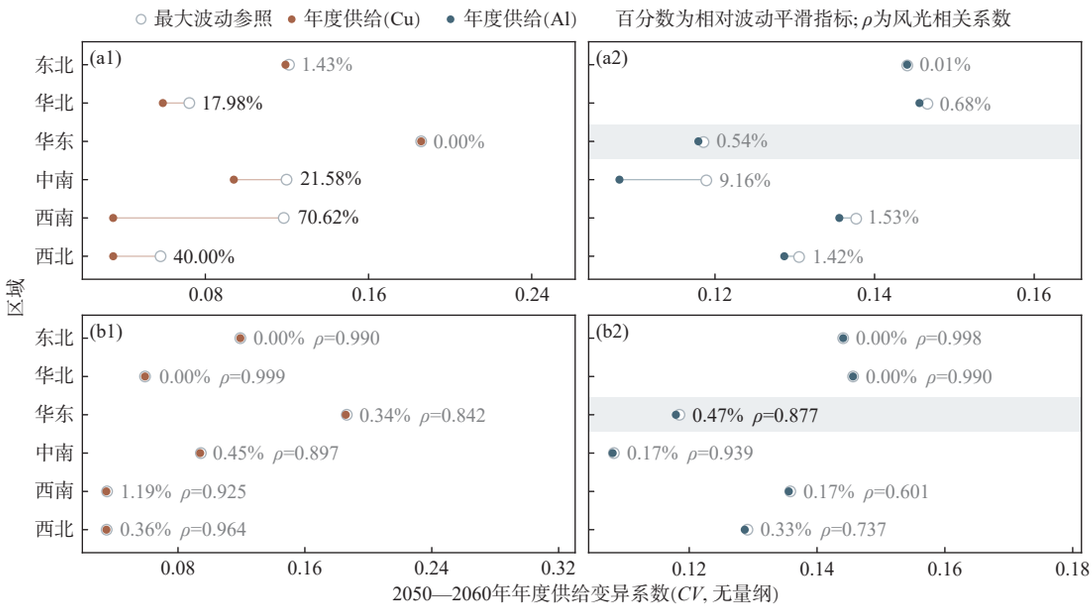
注:高回收水平情景,采用表3参考寿命、期初年龄和一年回收处理周期。

表 5　2050—2060 年中国六区铜铝再生金属供给潜力与相对波动平滑指标

Table 5　Secondary copper and aluminium supply potential and relative variability reduction index in China's six Regions from 2050 to 2060

区域	金属种类	年均供给潜力/万 t	最低年度供给量与均值之比	年度供给变异系数(*CV*)	省际汇总的相对波动平滑指标/%	风光汇总的相对波动平滑指标/%	风电与光伏供给相关系数
东北	Al	2.94	0.741	0.144	0.01	0.00	0.998
东北	Cu	0.81	0.799	0.119	1.43	0.00	0.990
华北	Al	16.36	0.724	0.146	0.68	0.00	0.990
华北	Cu	2.19	0.885	0.059	17.98	0.00	0.999
华东	Al	22.71	0.755	0.118	0.54	0.47	0.877
华东	Cu	1.99	0.707	0.186	0.00	0.34	0.842
中南	Al	14.57	0.780	0.108	9.16	0.17	0.939
中南	Cu	1.38	0.834	0.094	21.58	0.45	0.897
西南	Al	7.88	0.722	0.136	1.53	0.17	0.601
西南	Cu	0.50	0.919	0.035	70.62	1.19	0.925
西北	Al	17.78	0.742	0.129	1.42	0.33	0.737
西北	Cu	1.81	0.920	0.035	40.00	0.36	0.964

注:采用高回收水平情景、基准寿命参数和一年供给时间间隔,评价时段为2050—2060年。年均供给潜力、最低年度供给量与均值之比,以及年度供给变异系数,均根据各区域风电与光伏同种再生金属的合计供给计算。省际汇总以区域内各省(区、市)为来源,风光汇总以区域内风电和光伏两类装备为来源。相对波动平滑指标为实际供给变异系数相对于最大波动参照的降幅,以百分数表示;两种汇总方式的参照不同,指标分别计算。相关系数反映风电与光伏来源的同种再生金属年度供给之间的相关关系。 各区域最低年度供给量均出现在2050年。



(a1)省际供给汇总(铜);(a2)省际供给汇总(铝);(b1)风电与光伏来源的供给汇总(铜);(b2)风电与光伏来源的供给汇总(铝)

图5 2050—2060年中国六区不同来源汇总后的再生铜铝供给变异系数与最大波动参照

Fig. 5 Coefficients of variation of aggregated secondary copper and aluminium supply and the maximum-variability reference in China's six Regions from 2050 to 2060

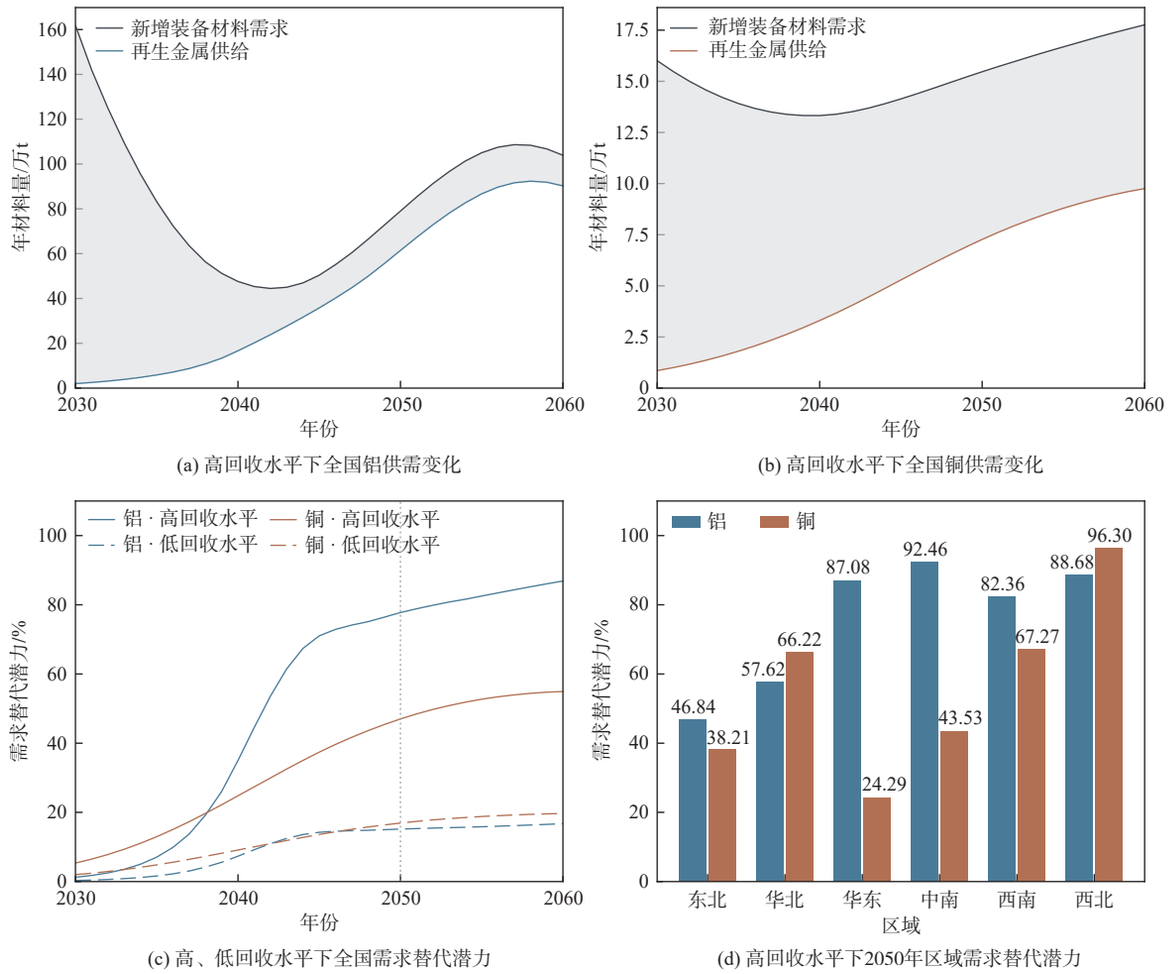
注:两者均按同一种金属分别计算。图中比较实际年度供给与最大波动参照的变异系数,百分数表示相对波动平滑指标,ρ表示风电与光伏供给的相关系数。采用高回收水平情景、基准寿命参数和一年回收处理周期。

由2.01万t增至61.43万t,而新增装备的铝年需求由161.81万t降至79.00万t。对称分解显示,铝替代比例提高的76.52个百分点中,供给增加贡献55.97个百分点,需求下降贡献20.55个百分点。2050年铝需求约为2030年的48.82%;若维持2030年需求水平,2050年比例为37.97%。同期,铜年需求由16.01万t降至15.47万t,变化较小,其替代比例的提高主要来自再生供给增长。

2050—2058年,再生铝年供给继续增加至92.34万t,年需求由79.00万t回升至108.36万t,替代比例升至85.21%。2058—2060年,年供给回落至90.25万t,年需求降至103.89万t,替代比例提高至86.87%;该阶段供给减少贡献–1.97个百分点,需求下降贡献3.63个百分点。铜至2060年的年供给为9.76万t,年需求为17.76万t,替代比例为54.93%。在2030—2060年研究期内,两种金属的替代比例均以2060年最高;铝供给量的最大值则出现在2058年。

2050年,P0路径下,华东地区再生铝年供给为17.15万t,居六个区域首位,需求替代潜力为87.08%;中南地区再生铝年供给为11.36万t,需求替代潜力为92.46%。差异来自华东新增装备的铝需求更大,华东和中南分别为每年19.70万t、12.28万t。中南2049年铝退役资源中,额外退出贡献5.28%,相应回收产出经一年处理周期计入2050年供给。再生铜的区域排序又有所不同,西北需求替代潜力为96.30%,华东则为24.29%。同一区域不同金属之间也存在差异,华东的再生铝需求替代比例高于再生铜,华北则相反。

2050年,低回收水平情景下,再生铝、再生铜的需求替代潜力分别为15.17%和16.91%,提高回收水平后,分别达到77.76%和47.00%,分别增加62.59和30.09个百分点。按2030—2060年逐年的供需匹配量累计计算,高回收水平情景下,再生铝和再生铜分别可替代研究期内50.74%和35.11%的新增装备材料需求,低回收水平下则分别为9.95%和12.67%。P0路径的两种回收水平下,六个区域的年度再生供给均在区内完成需求匹配。敏感性分析中,采用不同文献终点重构的P0~P3路径下,2050年,全国统筹口径的铝、铜替代比例分别为65.71%~77.76%和30.81%~47.00%,两种金属均以P0最高;36组寿命与期初年龄组合下分别为74.58%~81.26%和42.40%~51.72%。P4和P5采用与P0相同的2060年终点,2050年,铝、铜替代比例在P4下分别为73.97%和41.98%,在P5下分别为48.33%和33.62%;



(a) 高回收水平下全国铝供需变化　(b) 高回收水平下全国铜供需变化

(c) 高、低回收水平下全国需求替代潜力　(d) 高回收水平下2050年区域需求替代潜力

图 6　再生铜铝供需变化及需求替代潜力

Fig. 6　Secondary copper and aluminium supply, material demand and demand substitution potential

注：均采用基准装机情景、基准寿命及一年回收处理周期。需求包括装机扩张与退役替换，按装备投运所在地归属，核算范围与前文材料组成一致。

匀速增长的P5中，2050年铝需求高于P0，比例相应较低。将风电技术权重在全期分别固定为2.3节所列的2025年结构和2060年结构时，2050年全国铜替代比例分别为52.63%和52.44%，高于基准的47.00%。基准设置中，新增与退役批次的技术组成不同，对应的单位容量铜需求与退役铜含量也不同。

3　讨论

3.1　回收体系完善与再生金属供给

退役装备中的铜铝资源能否转化为有效供给，取决于收集覆盖程度、进入回收工艺的比例和材料回收效率。在P0路径下，高回收水平情景的2050年再生铝供给潜力约为低回收水平情景的5倍。由于两种回收水平情景采用相同的铝边框材料回收率和工艺进入比例，再生铝供给差异来自收集率。收集率决定进入处理环节的资源量，材料回收率决定其中转化为再生金属的比例；退役铝资源量乘以这两项比率得到最终产出。

回收处理周期决定再生金属何时形成供给。在退役资源持续增长的阶段，从装备退役到形成供给的时间间隔，会使某年的可用供给低于该年退役资源对应的回收产出。延长装备寿命及采用不同退役模式会改变资源释放时间[7,10]。产品纯度、杂质和规格还会影响再生金属的实际用途[18-19,23,27]。回收产能规划可结合进入处理环节的资源量、处理周期和产品品质，确定处理规模与下游利用安排。

3.2　供给时序互补与材料需求替代

不同来源之间的供给互补具有时间和区域差异。基准参数下，P0路径中，2030—2039年各来源的供给均持续增长，较高供给量集中于时段后期。进入研究后期后，部分光伏供给在达到峰值后回落，不同来源的变化方向开始分化，部分区域的相对波动平滑指

标随之提高。西南再生铜较高的省际指标主要对应四川、重庆与云南、贵州不同的装机变化方向。装备寿命与装机发展情景也会改变退役资源释放的时间,使同一区域的互补关系发生变化。区域协同回收可结合逐年资源比较、运输、库存及产品要求,判断可利用的供给组合。已有区域错配与回收选址研究将运输距离、成本和处理规模纳入分析[9,48]。

高回收水平和P0装机路径下,2030—2050年,铝替代比例的提高以再生供给增加为主,新增装备铝需求下降也提高了该比例。2058—2060年,铝供给回落而需求下降更快,替代比例继续提高。

未来可结合省级逐年投运台账、容量口径及风机技术结构统计,改进历史装备年龄和省级装机估计,结合项目建设与更新计划细化省级份额过渡及批次退出规则;通过中国退役装备拆解、处理周期与再生产品品质调查,校正材料强度和回收参数。将研究时段延伸至2060年以后,并结合制造地点、其他材料需求、库存、运输及回收网络分析,可进一步连接资源供给与产业利用。

4 结论

1)基准装机情景和基准寿命参数下,2030—2060年,风光退役装备中的铜铝退役资源总量为2 042.97万t,其中,铝为1 803.72万t、铜为239.25万t,48.43%来自现有装备。年度资源量在2057年达到研究期内最大值131.89万t,2052年起,未来新增装备贡献的年度资源量超过现有装备。

2)收集与回收处理决定再生金属的产出规模,回收处理周期决定其供给时间。高回收水平情景下,2050年退役资源可形成再生铝67.27万t、再生铜7.62万t;考虑一年供给时间间隔后,该年可用供给分别为61.43万t和7.27万t,来源于上一年退役资源的回收产出。未被收集的资源量高于材料回收环节的损耗量,且高回收水平下的再生铝供给约为低回收水平的5倍。

3)2030—2050年,P0路径下,铝需求替代比例提高76.52个百分点,其中,供给增加贡献55.97个百分点,需求下降贡献20.55个百分点。2050年新增装备铝需求为2030年的48.82%,保持2030年需求水平时,2050年替代比例为37.97%。2058—2060年,铝年供给由92.34万t回落至90.25万t,年需求由108.36万t降至103.89万t,替代比例由85.21%升至86.87%,供给和需求变化分别贡献–1.97、3.63个百分点。

4)基准(P0)装机与寿命设置、高回收水平及一年回收处理周期下,全国再生铝、再生铜需求替代潜力在2050年分别为77.76%和47.00%,至2060年分别升至研究期内最大值86.87%和54.93%。按研究期内各年匹配量累计,再生铝和再生铜分别可替代50.74%和35.11%的新增装备材料需求。

参考文献

[1] 郝敏, 汪鹏, 陈伟强. 中国电力系统低碳转型的铜资源需求预测[J]. 资源科学, 2025, 47(7): 1449-1461.
Hao Min, Wang Peng, Chen Weiqiang. Copper resource demand prediction for low-carbon transition of China's power system[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1449-1461.

[2] 汪鹏, 王翘楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669-681.
Wang Peng, Wang Qiaochu, Han Ruru, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669-681.

[3] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html.
National Energy Administration. The grid connection and operation of renewable energy in 2024[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html.

[4] Lyu Fang, Xie Tian, Dai Jinhong, et al. National Survey Report of PV Power Applications in China 2024: IEA PVPS Task1[R/OL]. [2026-10-03]. https: //iea-pvps.org/national_survey/nsr-china-2024/.

[5] 王影, 陈利顶, 施晓清. 京津冀分布式光伏发电设备报废量与可回收资源潜力预测[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 2076-2088.
Wang Ying, Chen Liding, Shi Xiaoqing. Prediction of scrap volume and recyclable resource potential of distributed photovoltaic power generation equipment in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 2076-2088.

[6] 周梦婷, 朱宏飞, 林民松, 等. “双碳”战略背景下沿黄九省份报废光伏组件产生量及其时空分布预测[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 171-179.
Zhou Mengting, Zhu Hongfei, Lin Minsong, et al. Generation and spatiotemporal distribution prediction of waste PV modules in the nine provinces along the Yellow River Basin under the background of 'Dual Carbon' strategy[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 171-179.

[7] 张天毓, 魏珂欣, 董会娟. 碳中和路径下中国光伏固废量及伴生金属资源回收潜力预测[J]. 资源科学, 2025, 47(5): 1002-1015.

Zhang Tianyu, Wei Kexin, Dong Huijuan. Prediction of China's photovoltaic waste volume and associated by-product metals recycling potential under carbon neutrality pathway[J]. Resources Science, 2025, 47(5): 1002-1015.

[8] 种珊, 熊华文. 我国光伏设备2030—2060年退役规模预测与资源潜力评估[J]. 生态经济, 2026, 42(10): 186-194.
Zhong Shan, Xiong Huawen. Prediction of decommissioning scale and resource potential assessment of photovoltaic equipment in China from 2030 to 2060[J]. Ecological Economy, 2026, 42(10): 186-194.

[9] 冯丽妃, 陈蕴颖, 董迪, 等. 中国风光发电设备报废资源时空格局、回收潜力及管理政策[J]. 资源科学, 2026, 48(9): 2161-2173.
Feng Lifei, Chen Yunying, Dong Di, et al. Spatiotemporal distribution, recycling potential, and management policies of waste resources from decommissioned wind and photovoltaic power equipment in China[J]. Resources Science, 2026, 48(9): 2161-2173.

[10] 郭慧娟, 唐守娟, 孔令强, 等. 技术要素耦合作用下我国退役风电设备资源化潜力研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(4): 2358-2368.
Guo Huijuan, Tang Shoujuan, Kong Lingqiang, et al. The resource utilization potential of decommissioned wind power equipment under the coupling of technical elements in China[J]. China Environmental Science, 2025, 45(4): 2358-2368.

[11] 梁扬扬, 刘丽丽, 贺克斌, 等. “双碳”目标下我国新能源行业关键金属供应分析[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 131-141.
Liang Yangyang, Liu Lili, He Kebin, et al. Supply of key metals for China's new energy industries under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 131-141.

[12] 吴玉锋, 郁亮, 邬伟, 等. 退役风机叶片回收利用的生命周期环境-经济效益评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2026(2): 352-363.
Wu Yufeng, Yu Liang, Huan Wei, et al. Life cycle environmental and economic benefits assessment of end-of-life wind turbine blade recycling[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(2): 352-363.

[13] 张效林, 杨梦豪, 曹靖, 等. 退役风电叶片资源化利用技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1192-1203.
Zhang Xiaolin, Yang Menghao, Cao Jing, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1192-1203.

[14] 陈吉朋, 王计安, 张雨秋, 等. 废弃风电叶片材料回收与再制造技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 328-335.
Chen Jipeng, Wang Ji'an, Zhang Yuqiu, et al. Progress on recycling methods and remanufacturing technology of waste wind turbine blades[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 328-335.

[15] 何朋蔚, 余泉龙, 刘振宇, 等. 中国废旧风电设备关键金属循环利用潜力评估[J]. 资源科学, 2025, 47(12): 2593-2606.
He Pengwei, Yu Quanlong, Liu Zhenyu, et al. Assessment of recycling potential of critical metals from discarded wind power equipment in China[J]. Resources Science, 2025, 47(12): 2593-2606.

[16] 陈立洋, 杨宇瑶, 汪鹏, 等. 碳中和驱动下的全球风电发展稀土需求[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 31-43.
Chen Liyang, Yang Yuyao, Wang Peng, et al. Analysis of rare earth demand for global wind power development under carbon neutrality[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 31-43.

[17] Ovaitt S, Mirletz H, Seetharaman S, et al. PV in the circular economy, a dynamic framework analyzing technology evolution and reliability impacts[J]. iScience, 2022, 25(1): 103488. DOI: 10.1016/j.isci.2021.103488.

[18] 郭月月, 胡玉龙, 刘艺安, 等. 退役晶硅光伏组件回收研究进展[J]. 过程工程学报, 2026, 26(2): 109-124.
Guo Yueyue, Hu Yulong, Liu Yi'an, et al. Research progress in recycling of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2026, 26(2): 109-124.

[19] 任常在, 张丛浩, 蒋甲丁, 等. 退役晶硅光伏组件回收与资源化利用研究进展[J]. 电源技术, 2026, 50(5): 773-786.
Ren Changzai, Zhang Conghao, Jiang Jiading, et al. Research progress on recycling and resource utilization of decommissioned crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(5): 773-786.

[20] 杨若婷, 张嘉宸, 牛力同, 等. 退役光伏组件回收技术进展及环境影响分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(10): 1586-1599.
Yang Ruoting, Zhang Jiachen, Niu Litong, et al. Progress in recycling technology and environmental impact analysis of decommissioned photovoltaic modules[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(10): 1586-1599.

[21] 张晟郅, 张承龙, 王瑞雪, 等. 退役晶硅光伏组件接线盒和边框自动化拆解设备设计[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(1): 98-105.
Zhang Shengzhi, Zhang Chenglong, Wang Ruixue, et al. Design of automated dismantling equipment for junction boxes and frames of decommissioned crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(1): 98-105.

[22] 何世豪, 张凯, 覃丹堰, 等. 溶剂热法分离退役光伏组件中EVA封装胶膜[J]. 化工进展, 2025, 44(11): 6730-6736.

He Shihao, Zhang Kai, Qin Danyan, et al. Solvothermal separation of EVA encapsulation film from end-of-life photovoltaic modules[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(11): 6730-6736.

[23] 王敏, 胡中发, 白冰, 等. 退役晶硅光伏组件解离与资源化研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(10): 4188-4202.
Wang Min, Hu Zhongfa, Bai Bing, et al. A review on dissociation and resource utilization of decommissioned crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(10): 4188-4202.

[24] 吴智朋, 高德东, 王珊, 等. 废旧晶体硅光伏组件回收技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 307-329.
Wu Zhipeng, Gao Dedong, Wang Shan, et al. A review on recycling technology of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 307-329.

[25] 赵若楠, 董莉, 乔琦, 等. 考虑处置阶段的光伏组件生命周期评价[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 807-813.
Zhao Ruonan, Dong Li, Qiao Qi, et al. Life cycle assessment of photovoltaic module considering disposal stage[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 807-813.

[26] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
Zhao Ruonan, Dong Li, Bai Lu, et al. Inventoryanalysis on carbon emissions of photovoltaicindustry[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2751-2757.

[27] 翟梦瑜, 黄蕾旭, 魏先理, 等. 基于生命周期评价的晶硅光伏组件“物理拆解-热化学处理-湿法”一体回收工艺环境影响研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2026(2): 364-373.
Zhai Mengyu, Huang Leixu, Wei Xianli, et al. Environmental impacts of an integrated recycling process for crystalline silicon photovoltaic modules based on life cycle accessment: physical dismantling-thermochemical-hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(2): 364-373.

[28] 国家能源局. 2025年光伏发电建设情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260305/4216fa1274bd4b7f8da92090ba3999aa/c.html.
National Energy Administration. Construction situation of photovoltaic power generation in 2025[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260305/4216fa1274bd4b7f8da92090ba3999aa/c.html.

[29] 国家能源局. 2020年上半年光伏发电并网运行情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2020-07/31/c_139254346.htm.
National Energy Administration. The grid connection and operation situation of photovoltaic power generation in the first half of 2020[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2020-07/31/c_139254346.htm.

[30] 国家能源局. 2021年光伏发电建设运行情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm.
National Energy Administration. Construction and operation of photovoltaic power generation in 2021[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm.

[31] 国家能源局. 2022年光伏发电建设运行情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm.
National Energy Administration. Construction and operation of photovoltaic power generation in 2022[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm.

[32] 李喜喜. 截至2024年底, 全国累计并网风电装机容量达52068万千瓦[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //m.sohu.com/a/882691157_121433015/.
Li Xixi. By the end of 2024, the cumulative installed capacity of grid-connected wind power across the country reached 520.68 million kilowatts[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //m.sohu.com/a/882691157_121433015/.

[33] 国家能源局. 国家能源局发布2025年全国电力统计数据[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html.
National Energy Administration. The National Energy Administration has released the national power statistics for 2025[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html.

[34] 国家能源局. 国家能源局举行新闻发布会 介绍2026年上半年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260730/bb571bc20d7445e5ae7d9dc51c3f700d/c.html.
National Energy Administration. The National Energy Administration held a press conference to introduce the grid connection and operation of renewable energy in the first half of 2026[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.nea.gov.cn/20260730/bb571bc20d7445e5ae7d9dc51c3f700d/c.html.

[35] 新华网. 截至8月底全国累计发电装机容量达41.03亿千瓦[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.xinhuanet.com/20260924/f7e59b5f4a5b43f2857eb440837ff216/c.html.
Xinhua News Agency. As of the end of August, the cumulative installed power generation capacity across the country reached 4.103 billion kilowatts[EB/OL]. [2026-10-03]. https: //www.xinhuanet.com/20260924/f7e59b5f4a5b43f2857eb440837ff216/c.html.

[36] National Renewable Energy Laboratory. PV ICE (Photovoltaics in the Circular Economy): baseline material and module data[DB/OL]. [2026-10-03]. https: //github.com/NatLabRockies/PV_ICE/tree/main/PV_ICE/baselines.

[37] Masson G, De L'epine M, Kaizuka I, et al. Trends in photovoltaic applications 2025[R]. [2026-10-03]. DOI: 10.69766/NCNN2417.

[38] Zhang Zhenhua, Zhu Ziheng, Gordon J A, et al. Reaching carbon neutrality in China: temporal and subnational limitations of renewable energy scale-up[J]. Advances in Applied Energy, 2025, 20: 100238. DOI: 10.1016/j.adapen.2025.100238.

[39] Zhang Zhenhua, Zhu Ziheng, Gordon J A, et al. AdvAppliedEnergy_Pathways_2025[DB/OL]. [2026-10-03]. Zenodo, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.14907700.

[40] 中国光伏行业协会, 赛迪智库集成电路研究所. 中国光伏产业发展路线图(2025—2026年)[EB/OL]. [2026-10-03]. https://www.chinapv.org.cn/html/uploads/files/20260213213747175.pdf.
China Photovoltaic Industry Association, Integrated Circuit Research Institute of CCID Consulting. China's photovoltaic industry development roadmap (2025—2026)[EB/OL]. [2026-10-03]. https://www.chinapv.org.cn/html/uploads/files/20260213213747175.pdf.

[41] 中华人民共和国商务部. 国务院关于印发《“十五五”碳达峰行动方案》的通知: 国发〔2026〕22号[EB/OL]. [2026-10-03]. https://policy.mofcom.gov.cn/claw/clawContent.shtml?id=106294.
Ministry of Commerce People's Republic of China. Notice of The State Council on printing and distributing the "Action Plan for Carbon Peaking during the 15th Five-Year Plan Period": Guo Fa〔2026〕No. 22[EB/OL]. [2026-10-03]. https://policy.mofcom.gov.cn/claw/clawContent.shtml?id=106294.

[42] 国家能源局. 张星: “十五五”时期加快推动新能源“立起来”“靠得住”[EB/OL]. [2026-10-03]. https://www.nea.gov.cn/20251031/1702618e09c04cbaadd24a61b2a33928/c.html.
National Energy Administration. Zhang Xing: during the 15th Five-Year Plan period, efforts will be accelerated to promote the establishment and reliability of new energy[EB/OL]. [2026-10-03]. https://www.nea.gov.cn/20251031/1702618e09c04cbaadd24a61b2a33928/c.html.

[43] Weckend S, Wade A, Heath G, et al. End-of-life management: solar photovoltaic panels[R/OL]. [2026-10-03]. https://www.irena.org/Publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels.

[44] European Commission Joint Research Centre. Material requirements for wind turbines[EB/OL]. [2026-10-03]. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC139701.

[45] PV ICE. Data: mass, copper (encapsulated)[EB/OL]. [2026-10-03]. https://pv-ice.readthedocs.io/en/latest/data.html.

[46] Ardente F, Latunussa C E L, Blengini G A. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling[J]. Waste Management, 2019, 91: 156-167.

[47] Eurostat. Contribution of recycled materials to raw materials demand: end-of-life recycling input rate[EB/OL]. [2026-10-03]. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_srm010_esmsip2.htm.

[48] Yu Haofan, Tong Xin. Producer vs. local government: the locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang Province[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105484. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105484.

Secondary Copper and Aluminium Supply from End-of-Life Wind Turbines and Photovoltaic Modules in China and Its Demand Substitution Potential

Su Shuai[1], Fu Yupeng[2], Wang Lei[2]

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100052, China;
2. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: Copper and aluminium in end-of-life wind turbines and photovoltaic (PV) modules can contribute to secondary metal supply, but their contribution to new equipment depends on retirement timing, recovery performance and changes in material demand. Using installed-capacity data for 31 provincial-level administrative regions in China (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan), this study applies dynamic material flow analysis to estimate end-of-life copper and aluminium resources and annual secondary metal supply potential during 2030—2060. It examines temporal complementarity among provinces and between wind and PV equipment and assesses the potential of secondary supply to meet the material demand of newly commissioned equipment. Historical capacity

data are combined with reconstructed deployment paths that retain the 2060 capacity endpoints of published scenarios. Near-term additions refer to industry forecasts and recent national statistics, and provincial shares move smoothly from the latest observed distribution to the literature endpoints. Equipment is tracked by commissioning cohort using lifetime distributions and installation-year-specific material intensities. The material boundary covers wind turbines and their foundations and PV modules, including module aluminium frames and encapsulated copper. Annual retired resources, collected material, recovered products and supply after a processing interval are accounted for separately. Collection and material recovery are represented by separate scenario parameters. Provincial supply is aggregated within six regions, and temporal complementarity is assessed against a maximum-variability reference that preserves the annual values of each source. Material demand includes both capacity expansion and equipment replacement and uses the same accounting boundary as secondary supply. Under the baseline deployment path and baseline lifetime parameters, cumulative end-of-life copper and aluminium resources reach 20.43 million tonnes. Under the high-recovery scenario and a one-year interval between retirement and supply availability, secondary aluminium and copper supply potential in 2050 reaches 614.30 and 72.70 thousand tonnes per year, respectively. Under these conditions, national demand substitution potential reaches 77.76% for aluminium and 47.00% for copper in 2050, and 86.87% and 54.93% in 2060. During 2030—2050, the aluminium substitution ratio increases by 76.52 percentage points: increased secondary supply contributes 55.97 percentage points, and lower aluminium demand from newly commissioned equipment contributes 20.55 percentage points. In 2050—2058, secondary aluminium supply and demand both increase. During 2058—2060, supply declines, while a faster decline in demand raises the substitution ratio from 85.21% to 86.87%. Copper demand changes are relatively limited between 2030 and 2050, and its substitution ratio increases mainly through growth in secondary supply.

Key words: wind power and photovoltaics; end-of-life copper and aluminium resources; dynamic material flow analysis; secondary metal supply; demand substitution potential

Received date: 2026-10-11 **Revised date:** 2026-10-17 **Accepted date:** 2026-10-19

First author: Su Shuai; Tel: +86-18810803173E; E-mail: 18810803173@163.com

Corresponding author: Fu Yupeng; Tel: +86-15522857610; E-mail: fypbsh@szu.edu.cn