doi. 10. 3724/1005-0566. 20260105

循环经济政策对全球光伏产业原生铟需求和可供性的影响及中国因应

胡雪玥[1],沈　镭[2],胡德胜[3], ELSHKAKI Ayman[2]

(1. 天津大学地球系统科学学院,天津　300072;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京　100101;3. 重庆大学法学院,重庆　400044)

摘　要:全球铟储量过去二十年明显下降,中国在全球铟资源供应链中的优势地位在逐渐减弱,而光伏等战略性新兴产业的铟需求量却在不断增长。基于国际能源署可持续发展能源转型路径,采用动态物质流分析和情景分析方法,测算 12 种循环经济政策情景下 2020—2050 年全球光伏产业原生铟的累计需求量和可供性变化。参考中国地质调查局评估的全球 2022 年铟矿数据,测算 2050 年全球光伏产业原生铟的累计需求量和可供性。建议中国:(1)重视铟的战略性矿产属性,对内提高其开发利用效率和资源储备,对外建立其安全合作关系;(2)制定光伏设备循环经济政策时应充分考虑不同措施之间的协同与冲突效应,重点推动生命周期初始阶段易分类、易拆解、易回收的绿色设计与生命周期末端的规范回收与高价值利用的整合;(3)激励中国光伏企业在内销和出口时遵循"延伸生产者责任原则",依托中国在全球光伏供应链各阶段的市场占比优势,积极引领和推动全球资源循环型光伏产业链的重塑和治理。

关键词:循环经济;战略性矿产;原生铟;光伏产业;中国对策

中图分类号:TG983;F124. 5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005 - 0566(2026)01 - 0052 - 11

Impacts of circular economy policies on global primary indium demand and supply for the photovoltaic industry and countermeasures suggested for China

HU Xueyue[1], SHEN Lei[2], HU Desheng[3], ELSHKAKI Ayman[2]

(1. *School of Earth System Science*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*;
2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*, *CAS*, *Beijing* 100101, *China*;
3. *Law School*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: Global indium reserves saw a significant decrease over the past twenty years, while China's dominance in global indium supply chains is also being challenged. Meanwhile, solar PV and other emerging industries are driving the increase in indium demand. Based on the IEA Sustainable Development scenario, the changes in primary indium demand and supply for the global solar PV industry between 2020 and 2050 was estimated under 12 circular economy scenarios using dynamic material flow analysis and scenario analysis. Taking the China Geological Survey 2022 Data, the primary indium demand and supply for the global solar PV industry by 2050 were estimated. The countermeasures suggested for China as: (i) China should emphasize the importance of indium as a strategic mineral, increase the

基金项目:自然资源部油气资源战略研究中心项目"矿产资源税费制度的比较及我国制度现代化研究"(1A20KYQSP05);国家自然科学基金专项项目 "全球贸易体系中的稀土流向追踪、风险管理与机制设计"(7254100400)。

作者简介:胡雪玥(1993—),女,河南卫辉人,天津大学地球系统科学学院助理研究员,研究方向为区域可持续发展及资源循环利用。通信作者:胡德胜。

resource efficiency of its utilization and build international partnerships for securing its supply security; (ii) when formulating circular economy polices for solar PV equipment, the coordination and conflict between individual circular economy strategies should be considered carefully, green design and end-of-life management should be integrated; (iii) incentivize Chinese solar PV enterprises to adopt "extended producer responsibility" practices at home and abroad, and actively promote the construction and governance of a circular solar PV supply chain globally.

Key words: circular economy; strategic mineral; primary indium; photovoltaic industry; China's countermeasures

为应对气候变化,国际社会达成加快全球能源转型的共识。国际能源署(International Energy Agency, IEA)的可持续发展情景(Sustainable Development Scenario,以下简称"IEA-SD 情景")规划了一个可以实现能源可持续发展目标的综合发展路径,其至2050年的碳排放轨迹与政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)所使用的1.5°C温控情景一致[1]。在此情景中,太阳能利用,特别是光伏发电,被视为全球能源转型和实现《巴黎协定》温控目标的关键力量。作为碳排放的前三大经济体,中国、欧盟和美国均制定了光伏发展政策和目标,其实施显著推动了全球光伏装机的大幅增长。

铜铟镓硒(Copper Indium Gallium Selenide, CIGS)薄膜凭借其卓越的性能,如高光电转化效率、低成本和高稳定性等优点,成为实现光伏大规模普及具有较大潜力的光伏技术之一[2]。2023年CIGS光伏装机超过12 GW,约占全球光伏装机总量的3.5%[3]。稀散金属铟是CIGS的关键原材料。铟与镓的比例直接决定了CIGS对短波光的吸收能力,从而使CIGS能够适应不同的光谱条件,提高光伏的性能。目前,CIGS占铟终端消费约9%,仅次于氧化铟锡(Indium Tin Oxide,ITO)靶材(60%)和焊料(11%)[4]。随着光伏等现代高科技领域的铟需求持续增长,加之铟的伴生矿产属性决定了其难以通过增产实现"弹性供给",铟的可持续供应面临很大风险。

循环经济(circular economy)被视为解决战略性矿产供应安全问题和推动可持续能源转型的有效手段,近年来为许多国家竞相推动。对于早在1990年出现的"循环经济"这一概念,尽管目前缺乏一个广为接受的定义,但对它的下列目标却有着普遍认同:通过减少资源循环规模、减缓资源循环速度及形成资源闭环的路径,避免或者降低经济发展对自然资源开发利用的过度依赖,进而促进经济增长与生态环保之间的协调[5]。一方面,对于铟矿资源匮乏的国家和地区而言,采取循环经济措施(如回收和再利用废弃光伏设备中的铟),可以拓宽铟的再生供应渠道,从而降低对进口铟的依赖,确保铟的供应安全。例如,美西方国家视中国占全球75%铟储量和68%精炼铟产量为具有威胁的地缘政治可供性风险[6],故而推出了循环经济政策和战略以应对该风险。另一方面,循环经济对于铟矿资源丰富的国家和地区同样重要,主要体现在降低矿产资源枯竭风险、减少负面环境影响及调控二次铟资源随终端产品流入他国数量等方面。研究表明,随着中国对铟矿资源的大规模开采,其静态储采比近年来整体呈现下降趋势[7]。采取循环经济措施对推动中国铟产业的可持续发展和维持其在全球供应链中的优势地位势在必行。

近年来,国内外学者关于铟的研究逐渐增多。国内研究主要集中在铟矿资源的分布、成矿类型和供需形势的概述及分析,涉及不同的空间尺度[8];而铟需求的中长期测算分析和产业链价值分析相对较少。车东等[9]测算了"十四五"期间中国对包括铟在内稀散金属矿产的需求,耿飚等[10]绘制了2019年中国的铟价值流动图谱。在铟的循环利用方面,国内研究多集中在废弃液晶面板中铟的回收利用技术和现状的描述[11]。国外的研究视角相对更为广泛。既有全球铟矿资源量和潜力的评估[12],又有全球和国家层面的静态和动态物质流分析[13]。近年来,还有许多从资源循环利用视角测算未来铟需求和供给趋势的研究[14]。

目前,国内外关于光伏产业铟需求的量化研究差距较大。国内仅有少数论文发表,如周艳晶等[15]对中国2020—2050年不同情景下光伏产业铟需求

趋势、光伏电池报废量及铟潜在回收量进行了测算。相比之下,国际上关于光伏产业铟需求的研究则更为丰富,既有铟供应风险对光伏装机增长可能产生的约束[16],还有对不同能源转型路径下光伏产业铟需求量的测算[17]。Elshkaki 等[18]发现,由于铟的伴生矿产属性,光伏产业的快速发展带来的铟需求量增长可能间接导致锌矿资源的过度开采和过量生产。模拟循环经济情景对光伏产业铟需求量影响的研究也日益增多[19]。研究发现,循环经济措施,如提高铟的资源利用效率和提升废弃光伏设备的回收率,可以有效降低光伏产业的铟需求,并缓解原生铟对光伏产业发展的约束[20]。不过,Redlinger 等[21]指出,尽管技术上可以从废弃光伏设备中回收铟,但再生铟的生产成本远超原生铟。

党的"十五五"规划建议要求"完善资源总量管理和全面节约制度,提高……资源化利用水平,促进循环经济发展"。国内现有关于光伏产业未来铟需求的研究缺少全球尺度的定量分析,且已有的循环经济措施分析主要集中在光伏设备的回收与管理,较少涉及光伏使用阶段的再利用、修复和翻新等延长使用寿命的措施,同时还缺少对作用于不同生命周期阶段的循环经济措施之间协调与冲突效应机理的探索。

为填补研究空白,本文基于 IEA-SD 情景,运用存量—驱动的动态物质流模型和情景分析方法:①测算 2020—2050 年全球光伏产业对原生铟的累计需求量,以及相对于铟储量的可供性;②定量分析作用于 CIGS 光伏设备不同生命周期阶段的"减量化""再利用"和"再循环"三个循环经济政策及其组合对降低原生铟需求量和缓解其供应压力的影响;③深入探讨循环经济政策组合中各项政策之间的协同与冲突效应;④就中国战略性矿产资源循环政策,提出可行性建议,以期为相关部门决策提供科学参考。

一、全球光伏产业现状和主要经济体循环经济政策及铟供需态势

(一)全球光伏产业现状和主要经济体循环经济政策

2024 年,全球新增光伏装机 452 GW,占电力新增装机总量近 28.6%;新增光伏装机排名前五的国家为中国(278 GW)、美国(38.3 GW)、印度(24.5 GW)、巴西(15.2 GW)和德国(15.1 GW)[22]。2000—2024 年,全球累计光伏装机呈指数级增长,从 2000 年的 0.8 GW 大幅攀升至 2024 年的 1 859 GW[22]。尽管光伏技术目前已发展至第三代(如钙钛矿/单晶硅叠层太阳能电池),但实现大规模产业化的技术仍以第一代晶硅太阳能(crystalline silicon, c-Si)为主,其 2024 年产量约占全球光伏总产量的 98%[23]。其次为第二代薄膜太阳能技术,主要包括 CIGS、碲化镉(cadmium-telluride, CdTe)和非晶硅(amorphous silicon, a-Si)等技术。第三代技术的市场化和产业化尚需时日。

中国在全球光伏供应链中具有举足轻重的地位,在原材料供给、材料加工、光伏组件制造及光伏组装这 4 个阶段分别占全球市场的 53%、50%、89% 和 70%。相比之下,欧盟在原材料供给、材料加工和光伏组装这 3 个阶段仅占 6%、5% 和 1%;美国在原材料供给和材料加工阶段分别占 7% 和 6%,但在光伏供应链下游环节的占比几乎为零[24]。自 2012 年美国对中国光伏设备征收高额"双反"税以来,中国大陆生产的光伏设备及组件 10 多年来未再直销美国[25]。不过,这并未妨碍中国依然是全球最大的光伏供应方。2024 年中国共出口 235.93 GW 光伏组件,较 2023 年的 207.99 GW 增加 13%[26]。

中国和欧盟均制定了与循环经济相关的政策或体现此类政策的法律,近年来更是针对光伏产业出台相应的循环经济政策或法律文件。中国于 2008 年就制定了《循环经济促进法》,近年来国家发展改革委先后印发了《"十四五"循环经济发展规划》(2021 年)、《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》(2023 年)和《能源重点领域大规模设备更新实施方案》(2024 年),对推进光伏产业构建循环利用体系予以明确。

欧盟 2003 年实施《废弃电子电气设备指令》(Waste Electrical and Electronic Equipment Directive),成为将废弃光伏设备纳入电子废料管理体系的首个经济体,还适时在 2012 年和 2024 年对该指令进行了修订。欧盟于 2015 年和 2020 年先后出台了循

环经济行动计划(Circular Economy Action Plan)1.0版本和2.0版本,作为欧盟绿色协议(European Green Deal)的核心支柱之一,由最初针对末端废弃物治理转向循环设计等预防性措施。此外,欧盟过去10年间还制定了多项技术标准,进一步对废弃光伏设备处理的细节作出规定。

美国虽无全国性的循环经济专门法律,但1976年制定的《资源保护和回收法》(Resource Conservation and Recovery Act)体现了发展循环经济的政策。为进一步推动资源回收利用,美国环境保护局2021年发布《国家回收战略》(National Recycling Strategy),设定了美国到2030年将回收率提升至50%的目标。然而在废弃光伏终端管理方面,美国缺乏全国性的专项政策或体现相关政策的法律,50个州中仅有华盛顿、加利福尼亚、夏威夷、罗德岛、新泽西和北卡罗来纳这6个州制定了相应法律。

(二)全球铟储量及贸易态势

铟属于稀散金属,不仅在地壳中含量极低,而且不存在独立矿床。铟矿通常与硫化矿物共生。原生铟主要作为锌冶炼过程中的副产品而生产,其供应极其依赖于锌的生产,并受锌产量的制约。这种依赖性在一定程度上影响了铟供应的持续性和稳定性,从而可能制约全球范围内CIGS光伏发电的大规模部署。

全球铟矿储量相当有限,且在过去17年中明显下降。美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS)是对全球矿产储量评估相对权威且学术界认可度高的机构之一。根据其最后一次评估数据(2008年),全球铟储量和基础储量分别约为11 kt和16 kt[27]。中国地质调查局《全球矿产资源储量评估报告2024》评估的全球2022年铟储量和资源量分别约为4 kt和44 kt[28]。就全球铟储量而言,2022年相比2008年下降了约63.26%。

同时,全球铟矿储量的分布也极不均衡。2022年,中国的铟储量和资源量分别约为1.8 kt和17.5 kt,占全球总量的比例分别约为44%和40%。就全球铟储量而言,葡萄牙、澳大利亚、玻利维亚和加拿大四国合计占比约为46%,其储量(及占比)分别约为783 t(19%)、501 t(12%)、342 t(8%)和294 t(7%)。在全球铟资源量方面,俄罗斯、玻利维亚、秘鲁和加拿大四国共占约51%,资源量(及占比)分别约为8 kt(19%)、5.5 kt(12%)、4.9 kt(11%)和4 kt(9%)[28]。

2024年,全球精炼铟产量约为1.1 kt。其中,中国贡献约为760 t,约占全球总产量的70%。得益于本国丰富的铟资源天然禀赋,中国的精炼铟产量长期位居全球之首。然而,由于终端产品中铟的浓度较低且终端产品废弃数量尚未达到经济可行的回收规模,目前全球仅有约1%的含铟废料得到了正规的回收再循环[29]。当下,再生铟多来自ITO靶材,回收率约20.3%,而光伏等其他含铟终端产品的回收率趋近于零[4]。

仅凭储量和产量数据,很容易造成"铟是中国优势矿产,因而中国不必过多重视"的误判。必须注意的是,中国在全球铟资源供应链中的优势地位正在不断弱化的同时,国内的可持续供应也存在隐患。首先,其他国家正在陆续发现新的含铟矿床,如加拿大、蒙古、澳大利亚、南非和印度[30]。其次,中国对铟矿资源的大规模开采和出口,不仅导致国内铟资源储量快速消耗,还进一步加剧国内铟资源储备的不足。2000—2022年,中国共出口约3.5 kt精炼铟和2.1 kt含铟终端产品;中国铟的静态储采比从4.6年下降至2年,而在累计生产的7.5 kt精炼铟中,仅有2.2 kt转化为资源储备[30]。再次,中国的再生铟产业发展缓慢且二次金属的循环利用率较低[29]。2000—2019年,中国再生铟产量约630 t,仅占总产量的约9.6%[31]。以2017年为例,再生铟仅占中国精炼铟产量的15%,而日本的再生铟产量占其精炼铟产量的89%[7]。最后,中国需要从其他国家进口大量的含铟矿石、高纯铟甚至是ITO靶材,对进口有一定的依赖度。研究显示,2000—2022年,中国共进口4.6 kt含铟矿石用来生产精炼铟,751 t高纯铟用来生产CIGS等含铟终端产品和2.7 kt的ITO靶材[30]。

美国、英国、欧盟、澳大利亚、日本、韩国和印度等多个国家和地区均将铟列为战略性或关键性矿

产(以下统称“战略性矿产”)。可将这些国家和地区大致分为两类。一类为铟资源劣势国家和地区,如美国和英国对铟的进口依赖度高达 100%[4, 32];另一类为铟资源优势国家和地区,如欧盟、澳大利亚和日本。前一类多基于保障本国或者地区供应链安全而将铟列为战略性矿产;后一类列入的考量则多是凭借自身资源优势,在为本国和盟友稳定铟资源供应的同时,提升其在战略性矿产生产和供应中的控制权,并在必要时制衡立场不同的国家和地区。

中国将铟列入其战略性矿产目录的时间略晚于美国等国家和地区。中国国土资源部《全国矿产资源规划(2016—2020 年)》并未将铟列入战略性矿产目录,但《全国矿产资源规划(2021—2025 年)》已将铟列入战略性矿产目录中的“三稀”矿产类别。自然资源部矿产资源保护监督司时任司长鞠建华等在 2022 年将铟列为中国先进有色金属材料产业、新一代信息技术产业和节能环保产业的核心矿产,并预测“十四五”期间上述产业的铟需求量可分别达到约 300 t、356 t 和 75 t[33]。

2022 年,以美国为首的 12 个国家联合欧盟建立矿产安全伙伴关系(minerals security partnership),以求降低中国在绿色科技所需战略性矿产国际供应链中的重要性[34]。美国在 2018 年和 2024 年对未锻轧铟和铟粉的进口情况清晰地反映了这一政策导向。如表 1 所示,2018 年,美国从中国进口的铟量约 64.29 t,占其进口铟总量的约 51%[35]。2024 年,尽管随其进口总量的增长,美国从中国进口的铟量上升至 89.4 t,但在其进口铟总量中的占比下降至 40.64%;从日本、韩国和加拿大三国进口的合计占比则上升至约 54.78%[36]。

表 1　2018 年和 2024 年美国未锻轧铟和铟粉进口来源国

2018 年				2024 年			
排名	国家	进口量/t	占比/%	排名	国家	进口量/t	占比/%
1	中国(含港澳台)	64.29	51.43	1	中国(含港澳台)	89.40	40.64
2	加拿大	28.20	22.56	2	日本	63.40	28.82
3	韩国	13.60	10.88	3	韩国	36.80	16.73
4	法国	7.71	6.17	4	加拿大	20.30	9.23
5	日本	7.57	6.06	5	德国	4.24	1.93
6	卢森堡	2.12	1.70	6	俄罗斯	2.70	1.23
7	俄罗斯	0.63	0.50	7	法国	2.09	0.95
8	英国	0.53	0.42	8	哈萨克斯坦	0.50	0.23
9	波兰	0.40	0.32	9	马来西亚	0.17	0.08
10	比利时	0.25	0.2	10	其他	0.39	0.18
进口总量		125.00		进口总量		220.00	

同样完全依赖进口铟的英国,2018 年和 2024 年从中国进口的铟量分别为 0.76 t 和 1.59 t,在其进口铟总量中的占比分别约 17.3% 和 50.96%;其中,英国来自中国台湾地区的进口占主导地位,进口量分别约 0.74 t 和 1.38 t,约占其来自中国进口的铟总量的 97% 和 87.07%[37]。如表 2 所示,与美国将其进口来源转向亚洲和南美洲不同,英国的进口来源集中于欧洲大陆。2024 年,英国从欧洲国家进口的铟量约 1.21 t,占其进口总量的约 38.75%。

表 2　2018 年和 2024 年英国未锻轧铟和铟粉进口来源国

2018 年				2024 年			
排名	国家	进口量/t	占比/%	排名	国家	进口量/t	占比/%
1	美国	2.97	67.28	1	中国(含港澳台)	1.59	50.96
2	中国(含港澳台)	0.76	17.32	2	德国	0.60	19.16
3	加拿大	0.40	9.05	3	加拿大	0.29	9.26
4	日本	0.26	5.80	4	荷兰	0.22	7.14
				5	波兰	0.11	3.50
				6	瑞士	0.11	3.47
				7	瑞典	0.10	3.22
				8	丹麦	0.07	2.09
				9	美国	0.03	0.96
进口总量		4.41		进口总量		3.11	

二、数据来源与研究方法

(一)数据来源

本文运用存量—驱动的动态物质流模型对 2020—2050 年 IEA-SD 情景下 CIGS 全球大规模部署对原生铟的需求量和可供性进行测算,在此基础上通过情景模拟,定量分析不同循环经济政策及政策组合对 CIGS 的原生铟累计需求量和可供性的影响,探讨不同循环经济政策之间的协同和冲突效应。数据和参数主要取自相关行业报告及国内外研究成果,见表 3。

本研究选取 IEA-SD 情景作为分析背景主要基于以下 3 点考量:①IEA-SD 情景是一个可以实现所有与能源相关的联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goal,SDG)的情景,这些目标包括作为气候行动目标的 SDG13、现代能源目标的 SDG7 及良好健康与福祉目标的 SDG3;②IEA-SD 情景的减排路径可以实现《巴黎协定》

1.5℃的温控目标;③全球累计光伏装机的历史变化趋势与IEA-SD情景规划的光伏装机趋势一致。IEA-SD情景下光伏将在2040年分别占全球发电总量和总装机的17%和29%[1]。为了更准确地评估循环经济政策对CIGS生命周期各阶段的影响并覆盖其较长的产品寿命,本文将时间范围从IEA-SD情景的2000—2040年调整为2020—2050年。2040—2050年全球光伏累计装机基于IEA-SD情景数据进行线性测算得出。

表3　数据说明和来源

数据	说明	文献来源
IEA-SD光伏装机	全球累计光伏装机将在2030年、2040年和2050年分别达到2316 GW、4246 GW和6575 GW	文献[1]
光伏市场份额	CIGS技术的市场份额将在2030年达到16.67%,并维持至2050年	文献[38]
铟资源储量	2022年全球铟储量约4 kt	文献[28]
CIGS的铟使用强度	CIGS铟使用强度由$M_M(t)=\frac{L\times\rho\times W}{\mu\times STC\times PR\times U}(1-R)$计算得出。其中,$L$为吸收层厚度,$\rho$为吸收层密度,$W$为吸收层中铟质量分数,$U$为铟利用率,$R$为铟回收率,$\mu$为光电转换效率,$STC$为辐照度,$PR$为性能比。CIGS铟使用强度在无循环经济的情况下将始终保持在23 kg/MW,在“减量化”政策的情况下将在2030年和2050年分别降至11 kg/MW和6 kg/MW	文献[17, 19]
CIGS的使用寿命	CIGS的使用寿命在无循环经济和“再利用”政策的情况下分别是20年和30年	文献[19]
CIGS中铟的闭环回收率	在模拟不同回收率的“再循环”政策情景时,废弃CIGS中铟的闭环回收率分别设置为0%、50%和90%	文献[5]

(二)研究方法

1. 动态物质流分析

物质流分析(material flow analysis,MFA)作为产业生态学的核心研究方法之一,能够系统地量化社会中物质的流动、存量和损耗情况。通过动态物质流分析,可以评估特定空间和时间范围内物质的流入、流出及其存量变化趋势,并结合情景分析对未来的发展动向进行模拟。物质流分析可为资源的综合管理和循环经济发展提供重要技术支撑,并广泛应用于分析单一物质和/或物质组合的代谢过程、资源利用效率以及产业可持续性研究。

在通过动态物质流分析估算光伏产业铟的年度和累计需求量之前,需先计算年度光伏装机。年度光伏装机($F_T^{in}(t)$)根据方程式(1)进行计算得出。其中,S_T表示IEA-SD情景下累计光伏装机(见表3),$F_{T,D}^{out}$表示年度光伏废弃装机。年度光伏废弃装机($F_{T,D}^{out}$)如方程式(2)所示,由年度光伏装机(F_T^{in})与光伏寿命(LT)的函数得出,其中T指代不同的光伏技术。CIGS的使用寿命参数见表3。

$$F_T^{in}(t)=S_T(t)-S_T(t-1)+F_{T,D}^{out}(t) \quad (1)$$

$$F_{T,D}^{out}(t)=F_T^{in}(t-LT) \quad (2)$$

光伏产业的年度铟需求量($F_{M,ST}^{in}$)及累计铟需求量($CD_{M,ST}$)分别通过方程式(3)和方程式(4)进行计算。其中,M代表铟,ST代表CIGS光伏,δ表示CIGS所占市场份额,MC则表示CIGS中铟的使用强度(即金属含量)。CIGS的市场份额参数及铟的使用强度分别详见表3和表4。原生铟的可供性分析通过对比累计铟需求量与全球2022年铟储量数据得出。

$$F_{M,ST}^{in}=F_T^{in}(t)\times\delta(t)\times MC_M(t) \quad (3)$$

$$CD_{M,ST}(t)=\sum_{i=1}^{n}F_{M,ST}^{in}(t) \quad (4)$$

光伏产业中原生铟的流入量($F_{M,ST,prim}^{in}$)通过方程式(5)计算得出。其中,$F_{M,ST}^{in}$表示CIGS的年度铟需求(流入)量,$F_{M,ST,D}^{out}$表示CIGS的年度废弃铟(流出)量,RR代表废弃CIGS中铟的闭环回收率(见表3)。在回收“再循环”情景下,从废弃CIGS中流出的铟将作为新生产CIGS光伏的延迟流入量,通过方程式(6)计算,该方程式基于CIGS的年度铟需求量($F_{M,ST}^{in}$)与CIGS寿命(LT)的函数关系。CIGS中的铟年度存量(S_M)则根据方程式(7)确定,其中F_M^{in}表示铟的年度流入量、F_M^{out}表示铟的年度流出量。

$$F_{M,ST,prim}^{in}(t)=F_{M,ST}^{in}(t)-(F_{M,ST,D}^{out}(t)\times RR) \quad (5)$$

$$F_{M,ST,D}^{out}(t)=F_{M,ST}^{in}(t-LT) \quad (6)$$

$$S_M(t)=S_M(t-1)+F_M^{in}(t)-F_M^{out}(t) \quad (7)$$

2. 循环经济政策情景分析

本研究选取在光伏不同生命周期阶段发挥作用的 3 项循环经济政策:①在产品设计和生产阶段的“减量化”政策,即降低光伏的铟使用强度;②在产品使用阶段的“再利用”政策,即延长光伏的使用寿命;③在产品废弃阶段的“再循环”政策,即对废弃光伏产品中的铟进行闭环回收和再循环。这 3 项循环经济政策分别对应上文提到的减少资源循环规模、减缓资源循环速度及形成资源循环闭环的路径。

表 4 列出了 12 种不同循环经济情景下,CIGS 的铟使用强度、使用寿命和闭环回收率参数。在未实施循环经济政策的情景下,假设 2020—2050 年 CIGS 的铟使用强度保持不变,产品使用寿命为 20 年,铟的闭环回收率为 0%。在“减量化”政策的情景下,假设 CIGS 技术将随时间变化和技术进步,显著降低铟的使用强度[17, 19]。在实施“再利用”政策的情景下,假设通过再利用、维修和翻新等措施,CIGS 的使用寿命延长至 30 年[19]。在“再循环”政策的情景下,随着废弃 CIGS 收集率的提升和回收技术的进步,铟的闭环回收率从 0% 提升至 50%[5]。为评估回收率变化对循环经济政策间协同和冲突效应的影响并增强结果的稳健性,在 50% 回收率情景外,增设了 90% 回收率的敏感性分析。

表 4　不同情景下 CIGS 中铟的使用强度、使用寿命和回收率

政策情景	铟使用强度/(kg/MW)			使用寿命/年	回收率/%
	2020 年	2030 年	2050 年		
无循环经济	23	23	23	20	0
减量化	23	11	6	20	0
再利用	23	23	23	30	0
50% 再循环	23	23	23	20	50
减量化和再利用	23	11	6	30	0
减量化和 50% 再循环	23	11	6	20	50
再利用和 50% 再循环	23	23	23	30	50
减量化、再利用和 50% 再循环	23	11	6	30	50
90% 再循环	23	23	23	20	90
减量化和 90% 再循环	23	11	6	20	90
再利用和 90% 再循环	23	23	23	30	90
减量化、再利用和 90% 再循环	23	11	6	30	90

三、结果与分析

(一)无循环经济政策下全球光伏产业的原生铟需求量和可供性

原生铟的适足供应对于满足铟的短期和中期需求至关重要。然而,如果不采取循环经济政策,全球光伏产业的累计原生铟需求量将在 2028 年超过全球铟储量,并在 2050 年超过 30 kt,高达全球铟储量的 742%(图 1),CIGS 的原生铟需求在短期内便面临供应风险。因此,原生铟将无法单独满足全球光伏产业的铟需求量。

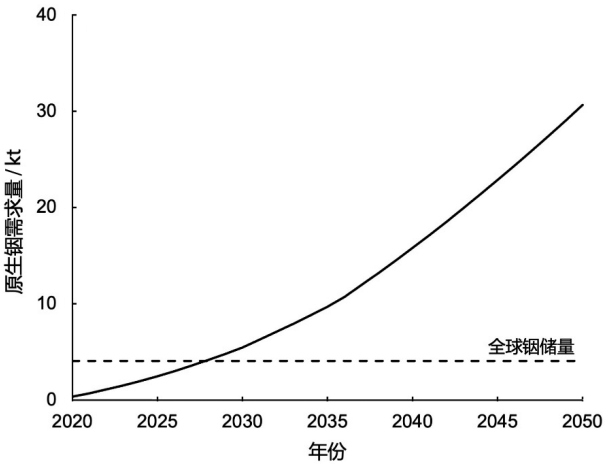


图 1　2020—2050 年无循环经济政策情景下全球光伏产业原生铟累计需求量和可供性

同时,ITO 靶材、焊料、热界面材料、电池、合金和半导体等其他铟相关产业的铟需求量也在显著增加,这无疑会进一步加剧原生铟的短缺。有研究测算原生铟在 10 年后可能将无法满足所有相关产业的需求[39]。采取针对 CIGS 光伏不同生命周期阶段的循环经济政策,或许能够缓解原生铟的供应短缺问题,并满足全球光伏产业的铟需求。

(二)单一循环经济政策对全球光伏产业原生铟需求量和可供性的影响

如果分别采取“减量化”“再利用”及“50% 再循环”和“90% 再循环”这 4 种循环经济政策,2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量将分别减少 65%、19% 及 11% 和 20%。如图 2 所示,“减量化”政策下,CIGS 的累计原生铟需求量将在 2034 年超过原生铟储量,并在 2050 年达到全球铟储量的 265%。“再利用”“50% 再循环”和“90% 再循环”政策下,CIGS 的累计原生铟需求量降幅远低于“减量化”政策。2050 年光伏产业的累计原生铟需求量分别降至 25 kt、27 kt 和 24 kt,分别约为全球铟储量的 619%、668% 和 594%。

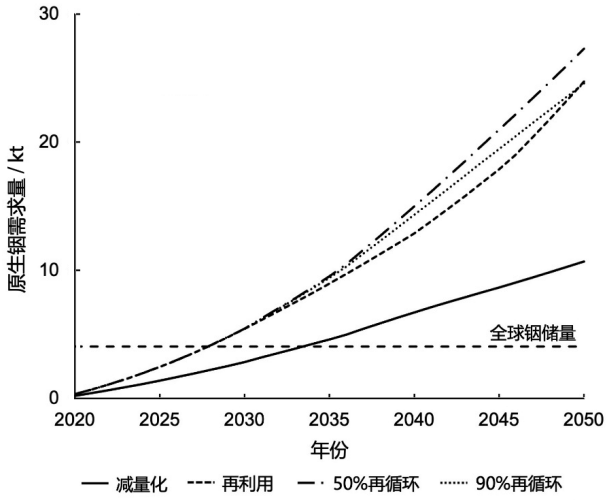


图 2　2020—2050 年单一循环经济政策情景下全球光伏产业原生铟累计需求量和可供性

结果表明,在产品生命周期早期阶段实施的循环经济政策,比在后期阶段的更为有效。“减量化”政策的优势在于它能够在原生铟使用之前发挥作用,从而产生即时且直接的降低矿产资源需求的效果。产品设计阶段的决策不仅可以影响资源的使用种类和强度,还影响产品的结构组成;这些因素都将对未来废弃产品和资源的再利用及再循环潜力产生重要影响。与“减量化”政策相比,“再利用”和“再循环”政策均发生在原生铟使用之后,因而在缓解资源供应压力方面的效果存在一定的滞后性。

图 2 显示,“再利用”政策在降低累计原生铟需求量和缓解其供应风险的成效上略胜“再循环”政策一筹。CIGS 每年的流入量由当年的新增装机和废弃装机构成。“再利用”政策通过再利用、修复和翻新等措施,延长 CIGS 光伏设备及部件的使用寿命,进而有效延迟其报废时间,从而降低每年的废弃装机。这就减少了因替换旧光伏设备而产生的新铟的流入量,从而降低了年度铟需求量。相比之下,“再循环”的作用原理与“减量化”和“再利用”政策不同,它并非直接降低 CIGS 的铟需求量,而是通过使用从废弃光伏设备中回收的再生铟来替代原生铟。由于这一过程依赖于废弃设备的回收,因此“再循环”政策仅能在光伏设备达到其生命终期后才能发挥作用,相较于“再利用”政策更具有滞后性。

(三)50% 回收率下循环经济政策组合对全球光伏产业原生铟需求量和可供性的影响

含“减量化”的循环经济政策组合在降低全球光伏产业累计原生铟需求量和缓解其可供性的成效显著优于不含“减量化”的循环经济政策组合。如图 3 所示,“减量化和再利用”“减量化和再循环”和“减量化、再利用和再循环”组合可将 2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量分别降至约 9 kt、8.6 kt 和 8 kt,分别约为全球铟储量的 223%、213% 和 198%。其中,同时含有“再循环”政策的组合在降低累计原生铟需求量的成效上也略优于其他政策组合。

“减量化”与“再循环”政策之间存在互补性。“减量化”政策从源头上降低铟的使用强度,可有效缓解光伏大规模部署所导致的迫切铟需求,产生立竿见影的效果。“再循环”政策则是通过回收废弃光伏设备中的铟,使再生铟重新进入光伏系统的资源循环,从而在中长期内降低光伏产业对原生铟的依赖程度。随着铟资源规模的逐渐缩小和再生铟流入量的逐步增加,这两种政策的结合运用将有助于构建光伏产业中铟的资源闭环利用模式,进而显著降低原生铟需求。

相较于上述 3 个含“减量化”政策的组合,“再利用和再循环”组合在降低原生铟需求和缓解其供应压力的成效并不理想。如图 3 所示,该政策组合仅能将 2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量降至 24 kt,约为全球铟储量的 594%。“再利用”和“再循环”政策虽然在减少原生铟需求方面的目标一致,但它们的作用原理之间存在一定冲突。“再利用”政策侧重于通过减缓资源循环速度

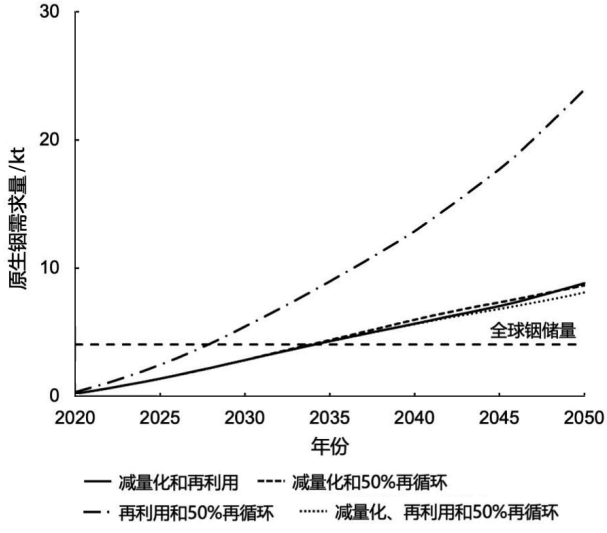


图 3　2020—2050 年 50% 回收率循环经济政策组合情景下全球光伏产业累计原生铟需求量和可供性

减少 CIGS 的铟需求总量;而“再循环”政策则依赖于形成铟的资源闭环来减少原生铟需求量。“再利用”延长铟在 CIGS 光伏设备中停留的时间,从而延迟“再循环”将铟从旧 CIGS 光伏设备到新 CIGS 光伏设备的转移,使“再循环”无法充分发挥其降低光伏产业对原生铟依赖的作用。

(四)90% 回收率下循环经济政策组合对全球光伏产业原生铟需求量和可供性的影响

在铟回收率提高至 90% 的情景下,“减量化和再循环”“再利用和再循环”和“减量化、再利用和再循环”循环经济政策组合可分别将 2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量降至 7 kt、23 kt 和 7.5 kt。如图 4 所示,分别约为全球铟储量的 173%、576% 和 186%。同铟回收率为 50% 的情景相似,含“减量化”的循环经济政策组合在降低全球光伏产业累计原生铟需求量和缓解其可供性压力的成效显著优于不含“减量化”的循环经济政策组合。与铟回收率为 50% 的情景不同的是,90% 的回收率放大了“再利用”政策与“再循环”政策之间的冲突,使“减量化、再利用和再循环”组合在降低原生铟需求量方面的效果略逊于仅包括“减量化和再循环”的循环经济政策组合。

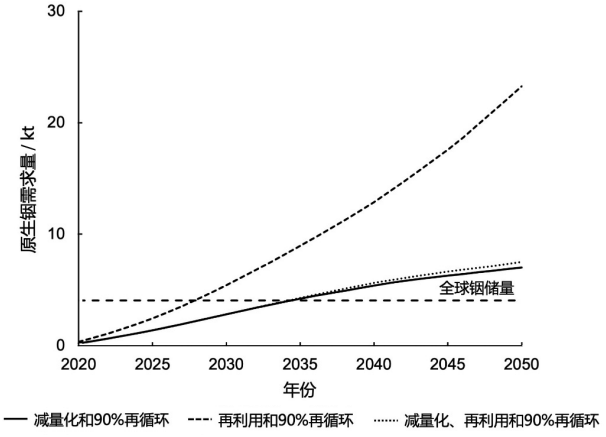


图 4　2020—2050 年 90% 回收率循环经济政策组合情景下全球光伏产业累计原生铟需求量和可供性

尽管铟在报废终端产品中的含量高于在矿物中的含量,从光伏中闭环回收铟仍面临不小的挑战。首先,近几年退役的早期光伏设备多数并未遵循易分类、易拆解和易回收的绿色设计方案,导致光伏组件的拆解和处理难度较大。其次,现有回收技术难以从光伏部件中回收同品质的金属,多数情况下回收的金属仅可用于对金属品质要求较低的产品。最后,回收铟的经济成本高而收益低,尤其是市场占比较低的 CIGS 二代薄膜技术,其废弃量还未达到经济的回收规模。一条年回收数十兆瓦的生产线需要前期投入 7 000 万 ~8 000 万元,投资回收期长达 6 ~7 年[40]。更有研究发现,从废弃 CIGS 光伏设备中回收铟和银的成本,在减去铟和银本身价值后,有高达 4.3 ~5.7 美元/m^2 的亏损[41]。这些经济和技术障碍共同导致从 CIGS 中闭环回收铟的可行性面临严重挑战。

四、结论与政策建议

(一)结论

本文首先对全球光伏装机变化趋势、重点国家和地区的循环经济政策、全球铟储量和资源分布以及铟贸易态势进行梳理。后又基于 IEA-SD 情景,以 2020—2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量和可供性为研究对象,采用动态物质流分析和情景分析方法,从循环经济政策视角,对“无循环经济”“减量化”“再利用”“50% 再循环”“90% 再循环”5 种单一政策及“减量化”“再利用”“50% 再循环”“90% 再循环”的 7 种政策组合情景下全球光伏发电大规模部署导致的原生铟需求量变化进行测算,参考中国地质调查局评估的全球 2022 年铟储量和资源量数据,定量分析了原生铟的可供性,探讨了循环经济政策组合中政策之间的协同与冲突效应,得到以下 4 点有价值的发现。

(1)在没有循环经济政策的情景下,全球光伏产业的累计原生铟需求量预计在 2028 年超过全球 2022 年铟储量,并在 2050 年超过 30 kt,高达全球铟储量的 742%。全球光伏产业发展所需的铟需求量无法单独由原生铟满足,进而可能阻碍全球能源转型的顺利推进。

(2)在采用单一循环经济政策的情景下,“减量化”“再利用”及“50% 再循环”和“90% 再循环”政策分别将 2050 年全球光伏产业的累计原生铟需求量降至 10 kt、25 kt、27 kt 和 24 kt。“减量化”政策在降低原生铟需求和缓解原生铟供应压力方面的成效最为显著,可将 CIGS 的累计原生铟需求量降至全球铟储量的 247%。其余 3 种情景下全球光伏发电大规模部署导致的原生铟需求量则约为全球铟储量的 594% ~668%。

(3)当铟的回收率为 50% 时,“减量化和再利

用”“减量化和再循环”“再利用和再循环”及“减量化、再利用和再循环”循环经济政策组合分别将2050年全球光伏产业的累计原生铟需求量降至9 kt、8.6 kt、24 kt和8 kt,分别约为全球铟储量的223%、213%、594%和198%。同时,含“减量化”和“再循环”的循环经济政策组合在降低原生铟需求和缓解原生铟供应压力方面的成效更为显著。

(4)当铟的回收率提高至90%时,“减量化和再循环”“再利用和再循环”及“减量化、再利用和再循环”循环经济政策组合分别将2050年全球光伏产业的累计原生铟需求量降至7 kt、23 kt和7.5 kt,分别约为全球铟储量的173%、569%和186%。在回收率显著提升的情况下,“减量化和再循环”组合可以加速形成铟在光伏产业的资源闭环,是降低原生铟需求和缓解原生铟供应压力的最佳循环经济政策组合。

(二)对策建议

“十五五”规划建议要求“促进循环经济发展”。2024年《中华人民共和国矿产资源法(修订)》第8条规定:“国家完善政策措施,加大对战略性矿产资源勘查、开采、贸易、储备等的支持力度,推动战略性矿产资源增加储量和提高产能,推进战略性矿产资源产业优化升级,提升矿产资源安全保障水平。”为落实这些要求和规定,基于铟的全球供需态势以及中国日渐减弱的铟资源优势,为保障中国铟矿资源安全并提升中国在全球光伏和铟产业链中的话语权和影响力,推动关于光伏和铟的循环经济政策科学合理的制定与实施,提出以下政策建议。

(1)强化铟的战略性矿产属性,对内提高铟的开发利用效率和资源储备,对外建立铟矿资源安全合作关系。通过提高原生铟提炼和再生铟回收技术增加铟从含铟矿石和含铟报废产品中的可得性,减少铟的资源损耗。根据中国光伏等战略性新兴科技产业的中长期铟需求,对含铟矿石、精炼铟和高纯铟的出口与国内储备比例严格把控。加强与俄罗斯、玻利维亚和秘鲁等铟矿储量和资源丰富的“一带一路”国家之间的铟矿资源开发合作关系。

(2)在制定针对光伏设备的循环经济措施时,充分考虑不同措施之间协同的正向效应与冲突的负向效应,重点推动生命周期初始阶段易分类、易拆解易回收的绿色设计与生命周期末端的规范回收与高值利用的结合。新的光伏设备应遵循系统观的绿色设计,从源头系统性地降低铟的资源损耗,缩小铟的资源循环规模。大力发展光伏设备回收产业,提高光伏设备含铟金属的循环利用水平,尽可能形成铟的资源循环闭环。

(3)激励中国光伏企业在内销和出口时遵循“延伸生产者责任原则”,促进对其生产的光伏设备进行终端收集和回收。依托中国在全球光伏供应链各阶段的市场占比优势,积极引领和推动全球资源循环型光伏产业链的重塑和治理。此举在达成铟二次资源回流的同时,还可以缓解中国原生铟的开采生产压力,实现铟产业和光伏产业的可持续发展。

参考文献:

[1]IEA. World energy outlook 2018[R]. Paris: International Energy Agency, 2018: 84, 529.

[2]王甜甜, 王凯, 李辉. 铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳电池研究进展[J]. 稀有金属, 2024(10):1475-1501.

[3]Fraunhofer institute of solar energy systems. Photovoltaics report[R]. Freiburg: Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems, 2024: 5.

[4]British Geological Survey. UK 2024 criticality assessment[R]. Nottingham: British Geological Survey, 2024: 194,145.

[5]GAUSTAD G, KRYSTOFIK M, BUSTAMANTE M, et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues[J]. Resources, conservation and recycling, 2018(135): 24-33.

[6]USGS. Mineral commodity summaries[R]. Reston: USGS, 2025: 90.

[7]张伟波,陈秀法,陈玉明,等. 全球铟矿资源供需现状与我国开发利用建议[J]. 矿产保护与利用,2019(5):1-8.

[8]余金杰,陈其慎,陈绍聪,等. 我国铟资源的矿床类型划分、空间分布和开发利用现状[J/OL]. 中国地质,1-19[2025-12-02]. https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240709.0952.006.

[9]车东, 张照志, 潘昭帅, 等. 稀散元素矿产在战略性新兴产业的地位及消费需求预测分析[J]. 矿业研究与开发, 2022(12): 208-217.

[10]耿飚, 陈健, 李泽红, 等. 中国铟资源全产业链价值分析[J]. 资源科学, 2024(3): 647-656.

[11]孟金伟, 陈高洁, 徐亮, 等. 废弃LCD中铟的回收[J]. 稀有金属, 2023(6): 883-894.

[12]WERNER T T, MUDD G M, JOWITT S M. The world's by-product and critical metal resources part III: a global assessment

of indium[J]. Ore geology reviews, 2017(86): 939-956.
[13] LIN J, LI X, LUO F, et al. Security evaluation of China's indium industrial chain: perspective on substance flow throughout the whole life cycle[J]. Sustainable production and consumption, 2024(47): 557-569.
[14] CIACCI L, WERNER T T, VASSURA I, et al. Backlighting the European indium recycling potentials[J]. Journal of industrial ecology, 2019, 23(2): 426-437.
[15]周艳晶, 王高尚. "双碳"目标下中国光伏产业铟需求预测[J]. 地球学报, 2024(6): 1033-1042.
[16] 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.
[17] VALERO A, VALERO A, CALVO G, et al. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018(93): 178-200.
[18] ELSHKAKI A, GRAEDEL T E. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply[J]. Applied energy, 2015(158): 167-177.
[19] ELSHKAKI A. Materials, energy, water, and emissions nexus impacts on the future contribution of PV solar technologies to global energy scenarios[J]. Scientific report, 2019, 9(1): 19238.
[20] REN K, TANG X, HÖÖK M. Evaluating metal constraints for photovoltaics: perspectives from China's PV development[J]. Applied energy, 2021(282): 116148.
[21] REDLINGER M, EGGERT R, WOODHOUSE M. Evaluating the availability of gallium, indium, and tellurium from recycled photovoltaic modules[J]. Solar energy materials and solar cells, 2015(138): 58-71.
[22] IRENA. Renewable capacity statistics 2025[DB/OL]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025. (2025-03)[2025-11-27]. https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2025.
[23] Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems. Photovoltaics report[R]. Freiburg: Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems, 2025: 4.
[24] European Commission. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020: 39.
[25]董梓童, 姚美娇, 杨梓. "关税战"美国受拖累"新能源"中国有底气[N]. 中国能源报, 2025-04-14(5).
[26] InfoLink Consulting. 2024 年中国共出口约 236 GW 光伏组件 除欧洲外的区域市场 同比 2023 年呈现上升[EB/OL]. (2025-02-04)[2025-11-14]. https://www.infolink-group.com/energy-article/cn/solar-topic-china-pv-module-exports-yoy-growth-all-regions-except-europe.
[27] USGS. 2008 Mineral commodity summaries[R]. Reston: USGS, 2008: 81.
[28]中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心. 全球矿产资源储量评估报告 2024[R]. 北京: 地质出版社, 2024: 140-142.
[29]曾现来, 李金惠, 耿涌, 等. 碳中和背景下我国典型战略性金属中长期可持续供给路径[J]. 中国科学院院刊, 2023(8): 1099-1109.
[30] LIN J, LI X, LUO F, et al. Security evaluation of China's indium industrial chain: perspective on substance flow throughout the whole life cycle[J]. Sustainable production and consumption, 2024, 47: 557-569.
[31] LIN J, LI X, WANG M X, et al. How can China's indium resources have a sustainable future? research based on the industry chain perspective[J]. Sustainability, 2021, 13(21): 12042.
[32] USGS. Mineral commodity summaries 2025[R]. Reston: USGS, 2025: 7, 90.
[33]鞠建华, 张照志, 潘昭帅, 等. 我国战略性新兴产业矿产厘定与"十四五"需求分析[J]. 中国矿业, 2022(9): 1-11.
[34] Financial Times. US-led minerals partnership shortlists projects for green energy shift[N/OL]. (2023-06-14)[2025-11-18]. https://www.ft.com/content/16927ddd-3cb9-4516-9934-eb94b032aea8.
[35] USGS. 2018 Minerals yearbook[R]. Reston: USGS, 2019: 35.2.
[36] USGS. Indium in 2024, tables-only release[EB/OL]. (2025-07-18)[2025-11-27]. https://www.usgs.gov/media/files/indium-2024-tables-only-release.
[37] HM Revenue & Customs. OTS custom table[EB/OL]. [2025-11-27]. https://www.uktradeinfo.com/trade-data/ots-custom-table/.
[38] HU X, ELSHKAKI A, SHEN L. The implications of circular economy strategies on the future energy transition technologies and their impacts: solar PV as a case study[J]. Energy, 2024, 313: 133972.
[39] GÓMEZ M, XU G, LI J, et al. Securing indium utilization for high-tech and renewable energy industries[J]. Environmental science & technology, 2023, 57(6): 2611-2624.
[40]潘俊田. 光伏回收产业堵在哪里[N]. 经济观察报, 2025-03-03(14).
[41] RAVILLA A, GULLICKSON E, TOMES A, et al. Economic and environmental sustainability of copper indium gallium selenide (CIGS) solar panels recycling[J]. Science of the total environment, 2024, 951:175670.