

“双碳”目标下中国光伏产业铟需求预测

周艳晶^{1,2)}, 王高尚^{3)*}

1) 中国电子信息产业发展研究院材料工业研究所, 北京 100846;

2) 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东广州 511458;

3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要: 铟是太阳能光伏薄膜技术的关键原材料, 把握铟的消费变化规律不仅是对铟产业科学管理的前提, 也对实现“双碳”目标具有重要意义。本文基于4种能源转型路径和2种铟使用强度, 采用动态物质流分析方法, 计算了2020—2050年CIGS装机容量和报废量, 进而预测8种情景下光伏领域对铟的需求趋势、报废量和潜在回收量。结果显示: (1) 在4种能源转型路径下, 2050年光伏装机分别是2023年的8.3倍、5.6倍、6倍和5.1倍; (2) 2023—2030年, 铟的累积需求将快速增长, 年均增速平均值为37%, 2031—2050年, 年均增速平均值为7%; (3) 2015—2050年, CIGS中铟的累积报废量为436~788 t, 但技术原因导致报废CIGS对缓解铟供应的作用短期内难以体现; (4) 仅依靠锌精矿冶炼提取原生铟将不足以保障铟的中长期需求。建议加强铟资源调查评价, 摸清资源家底, 加强技术攻关, 提高铟资源利用效率和再生铟回收利用水平, 加强共生伴生矿的开发利用研究, 多途径夯实国内铟资源保障能力。

关键词: 双碳; 铟需求; 动态物质流; 光伏产业

中图分类号: F416.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.011601

Indium Demand in China's Photovoltaic Industry Under the “Dual Carbon” Goal

ZHOU Yanjing^{1, 2)}, WANG Gaoshang^{3)*}

1) Institute of Materials Industry, China Center for Information Industry Development, Beijing 100846;

2) Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources,
Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 511458;

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Indium is a key raw material for solar photovoltaic (PV) thin-film technology. Understanding the patterns of indium consumption is not only a prerequisite for scientifically managing the indium industry but also holds significant importance in realizing the dual carbon goals. Based on four energy transition pathways and two indium use intensities, this study calculates the CIGS installed capacity and scrap volume from 2020 to 2050 using the dynamic material flow analysis method. Subsequently, the indium demand trend, scrap volume, and potential recovery volume in the PV field are predicted under eight scenarios. The results show that (1) under the four aforementioned energy transition pathways, the installed PV capacity in 2050 will increase by factors of 8.3, 5.6, 6, and 5.1 with respect to that of 2023, respectively; (2) the cumulative demand for indium will grow rapidly from 2023 to 2030, with an average annual growth rate of 37%; from 2031 to 2050, the average annual growth rate will be 7%; (3) from 2015 to 2050, the cumulative scrap amount of indium in CIGS will be 436–788 tons; however, owing to technical reasons, the role of scrapped CIGS in alleviating indium supply is difficult to reflect in the short term; (4) relying solely on zinc concentrate smelting to extract primary indium will not be sufficient to meet the medium to long-term indium demand. It is suggested to strengthen the investigation and evaluation of

本文由自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金课题(编号: KLMMR-2022-G01)资助。

收稿日期: 2023-10-15; 改回日期: 2024-01-10; 网络首发日期: 2024-01-17。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 周艳晶, 女, 1990年生。博士, 助理研究员。从事资源产业经济研究。E-mail: yanjingzhou90@163.com。

*通信作者: 王高尚, 男, 1962年生。硕士, 研究员。主要从事矿产资源战略研究。E-mail: pacificw@sina.com。

indium resources, determine the resource background, promote technical research, improve the utilization efficiency of indium resources and the level of indium recycling, strengthen the research on development and utilization of co-associated mines, and consolidate the domestic indium resource guarantee capacity in multiple ways.

Key words: dual carbon; indium demand; dynamic material flow; photovoltaic industry

随着“双碳”目标日趋紧迫,构建以清洁能源为主的新型电力系统、增加清洁能源的发电比例迫在眉睫。太阳能发电是未来新型零碳电力系统的主力,据国家能源局数据,截至2022年底,我国太阳能发电装机容量约3.9亿kW,占总装机容量的15.3%。预计我国太阳能和风电装机到2050年将达到40~60亿kW(黄震等,2021;孔力等,2022;王永利等,2023)。太阳能发电的迅猛增长将带动上游原材料的需求快速增加。钢是太阳能电池铜铟镓硒(CIGS)薄膜的关键原材料,具有较强的不可替代性,它不断增长的需求趋势、供应的地理集中性和伴生属性等因素加剧了世界主要经济体对钢供应安全的担忧,目前已被美国、欧盟、日本、加拿大、澳大利亚列入关键矿产清单(王安建等,2022)。

近年来,学术界针对钢开展的研究日益增多,主要集中在资源类型及分布、供需现状、需求预测、产业发展等方面。李晓峰等(2019,2020)详细介绍了钢的矿床类型和钢富集成矿的关键科学问题,为不同类型钢矿床的资源评价和未来钢的找矿方向提供了参考;Werner et al.(2017)将全球钢的矿床类型分为6类,并根据统计数据对不同类型中钢的资源量进行评估,提出矽卡岩型和VMS矿床是钢资源的主要来源。刘劲松等(2021)讨论了钢消费大国—日本的供需现状,并剖析其产业政策,为我国钢产业发展提供了借鉴。张小陌(2018)、霍文敏等(2020)、李芳琴等(2023)从钢资源、供给、消费和进出口的角度,分析了全球及中国钢供需格局,揭示了国内钢产业发展存在的问题。部分需求预测研究揭示了太阳能发展可能引发的钢资源供应短缺问题,Stamp et al.(2014)、Tokimatsu et al.(2017)、Watari et

al.(2018)、Valero et al.(2018)等针对全球范围内钢的需求趋势展开研究,认为能源转型过程中太阳能发展将引发资源约束问题,未来钢的需求将超过当前储量,面临较高的供应风险;Viebahn et al.(2015)对德国能源转型过程中的钢需求进行预测,结果显示,到2050年,CIGS技术的发展可能会受限于钢的供应;Nassar et al.(2016)对美国太阳能技术所需的伴生金属需求进行预测,提出钢的需求将远超当前供应水平。

我国是钢的资源、生产和贸易大国,在全球钢市场中具有举足轻重的地位。未来钢资源供应能否满足低碳技术发展的需求,不仅关乎钢产业可持续发展,也对实现“双碳”目标至关重要。目前国内聚焦钢需求预测的研究较少,已有研究存在时间尺度短(车东等,2022)、未考虑“双碳”目标的不足(周艳晶,2021)。鉴于此,本研究旨在追踪最新的政策目标和更加符合我国“双碳”目标的能源转型路径,构建存量驱动的动态物质流分析模型对钢在光伏产业的需求进行长尺度预测,研判光伏产业发展是否会受到钢供应的制约,并提出对策建议,为相关部门制定钢资源发展战略和服务中国能源结构转型提供借鉴。

1 钢的分布和消费

1.1 钢矿资源储量及分布特征

1.1.1 全球钢矿资源及分布

地质界尚未发现独立的或以钢为主要矿物的天然钢矿床,已知钢资源主要赋存在锌、铜、铅和锡矿床中,这就导致全球钢资源量存在较大不确定性,已有研究主要根据含钢矿床中钢的品位来评

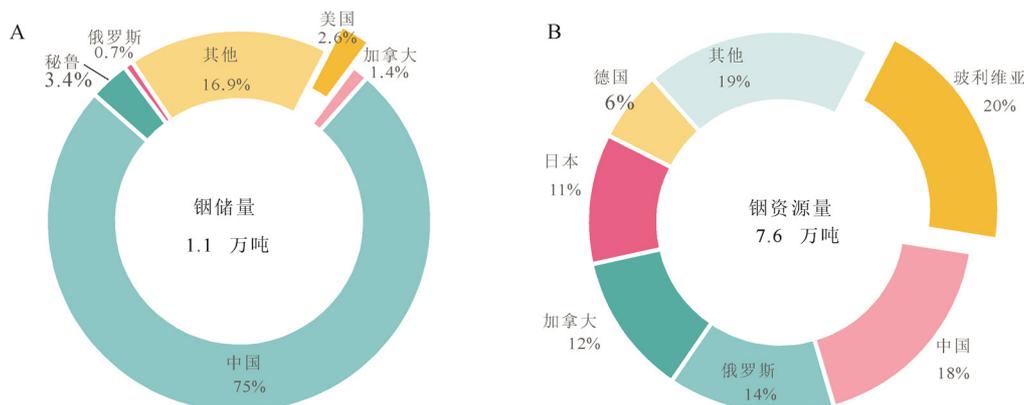


图1 全球钢储量及资源量分布

Fig. 1 Distribution of indium reserves and resources in the world

估。对全球钢储量评估相对权威的机构之一是美国地质调查局。据统计,全球钢矿储量 1.1 万 t, 其中中国 8 000 t, 占全球比例 73%, 其余依次分布在美国(3%)、秘鲁(3%)、俄罗斯(1%)和加拿大(1%)等国(图 1)。该数据是以锌矿石中的平均钢含量为基础进行估算, 但 2008 年以后美国地质调查局取消了钢矿储量数据的公布。另一具有代表性的评估来自 Werner et al.(2017)的研究成果。该研究基于全球 1 512 个含钢矿床推测全球钢矿资源量为 35.6 万 t, 其中根据 101 个具有钢品位数据的矿床, 预测全球钢矿资源量 7.6 万 t, 主要分布在玻利维亚(20%)、中国(18%)、俄罗斯(14%)、加拿大(12%)、日本(11%)和德国(6%)等国(图 1); 此外, 研究对可能含钢的铅锌矿床和铜矿进行评估, 推测潜在的钢矿资源量分别为 26.3 万 t 和 1.7 万 t。

由此可见, 全球钢储量和资源量缺乏准确数据, 不同研究基于不同的评估数据和评估方法, 对全球钢资源总量的评估结果也各不相同, 未来对钢资源的评估有待进一步加强。

1.1.2 中国钢矿类型及分布

含钢矿床类型尚无统一的分类标准。郑义等(2023)将国内 57 个伴生钢矿分为 7 类, 其中矽卡岩型矿床(28 个)、岩浆-热液型矿床(14 个)、海相火山岩型矿床(6 个)、叠加(复合/改造)型矿床(5 个)、陆相火山岩型矿床(2 个)、斑岩型矿床(1 个)、受变质型矿床(1 个)。矽卡岩型矿床中的钢主要赋存于闪锌矿中, 钢平均品位为 761.15×10^{-6} , 这类矿床的典型代表有云南马关都龙锡铅锌矿和广西南丹大厂锡多金属矿。马关都龙锡铅锌矿是迄今国内最大的钢矿山, 钢平均品位是 850×10^{-6} , 钢矿储量占云南省钢矿查明储量的 70%(文山州工业和信息化局, 2021)。广西南丹大厂锡多金属矿钢矿品位达 117×10^{-6} , 钢矿资源量 8 775 t(金属量), 具有“钢都”之称(张伟波等, 2019)。岩浆-热液型伴生钢矿以内蒙古孟恩陶勒盖多金属矿床最具代表性, 钢矿平均品位是 97.3×10^{-6} (袁莹等, 2020)。其余 5 种类型钢矿的研究程度较低, 但现有研究均认为闪锌矿是钢的主要赋存矿物。叠加(复合/改造)型矿床中钢的平均品位是

454.27×10^{-6} , 资源潜力较大, 陆相火山岩型和斑岩型伴生钢矿床中闪锌矿钢含量稍低, 但也具有一定的资源潜力(郑义等, 2023)。

我国钢矿资源丰富, 空间分布较为集中。《中国矿产资源报告 2019》显示, 我国钢矿潜在资源量 7.5 万 t, 查明资源量为 14 550 t, 资源查明率仅 19.4%。国内 57 个伴生钢矿中只有 19 个矿床已知钢储量数据。据《全国矿产资源储量统计表》, 2020 年以来我国钢储量有所增加, 从 1 792.77 t 增长到 1 926.24 t。涉及的省份相对固定, 2022 年全国钢储量的 71% 分布在广西, 15% 分布在内蒙古, 其余依次分布在江西、福建、广东等地(表 1)。

1.2 钢的应用及消费

钢是一种柔软有光泽的银白色金属, 可塑性强、延展性好, 具有良好的抗腐蚀性能。钢的熔点比其他金属低, 为 $156.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 沸点很高, 为 $2 080 \text{ }^\circ\text{C}$ 。它的硬度很低, 比铅软, 能用指甲划痕。钢的导电性比铜低约 4/5, 其热膨胀系数几乎超过铜的一倍。钢独特而优良的物化性能决定了含钢产品以氧化锡钢(ITO)、纯钢锭、半导体化合物、焊料及合金等形式供应市场, 广泛用于太阳能电池、电子计算机、高温超导、光电、航空航天及现代信息产业高科技领域。

全球钢消费格局比较稳定, 主要集中在日本和韩国, 我国成为全球第三大钢消费国且近年来消费占比不断提升。2022 年全球钢消费量 1 794 t, 日本仍然是全球最大的钢消费国, 韩国排名第二, 我国的消费占比从 2020 年的 19.5% 增长到 2022 年的 27.6%, 有逐渐挤占日韩市场的趋势(李芳琴等, 2023)。

2000—2022 年, 我国钢消费量从 12 t 增长到 496 t, 平均每年增加 18%。钢消费量快速增长主要得益于钢靶材制造技术的突破和产量规模的扩大。ITO 靶材领域的钢消费占比已经从 2000 年的 18% 增长到 2022 年的 88%, 成为钢最主要的应用领域。焊料合金和半导体化合物的消费占比则大幅下降, 从 2000 年的 80% 降到 10%, 2022 年两个部门分别仅占 6% 和 4%(图 2)。钢在光伏薄膜领域的用量和消费占比逐年增加, 虽然目前仍然较低(不到 1%), 但随着“双碳”目标的不断推进, 光伏薄膜电池将成为拉动钢消费的一个重要驱动力。

表 1 中国 2020—2022 年钢矿储量统计
Table 1 Statistics on China's indium reserves statistics from 2020 to 2022

年份	省份										
	广西	内蒙古	江西	福建	广东	云南	黑龙江	陕西	湖南	甘肃	全国
2020 年	999.92 t	225.22 t	8.38 t	47.54 t	33.84 t	31 t	—	—	445 t	1.87 t	1 792.77 t
2021 年	1 377.38 t	303.29 t	123.44 t	46.68 t	34.96 t	93 t	10.2 t	0.15 t	9.6 t	—	1 998.70 t
2022 年	1 372.14 t	287.05 t	156.41 t	46.68 t	33.61 t	20 t	10.2 t	0.15 t	—	—	1 926.24 t
2022 年储量占比	71%	15%	8%	2%	2%	1%	1%	—	—	—	100%

注: 数据来源为自然资源部《全国矿产资源储量统计表》; “—”代表无数据。

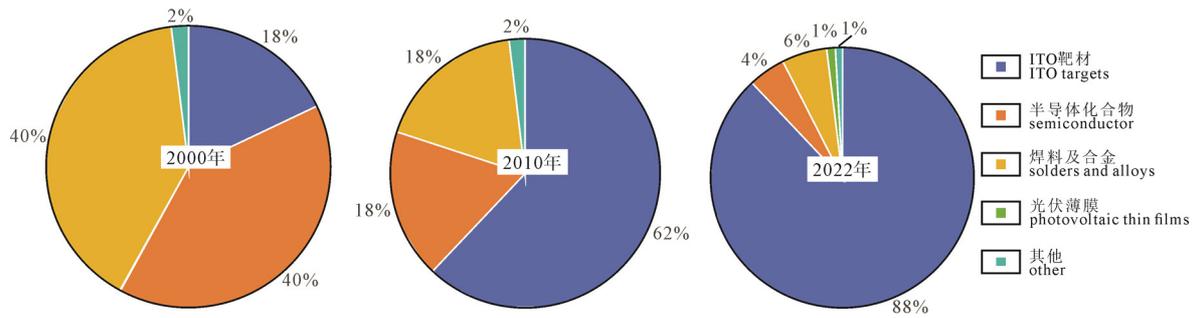


图 2 我国铟消费结构变化
Fig. 2 Changes in the structure of indium consumption in China

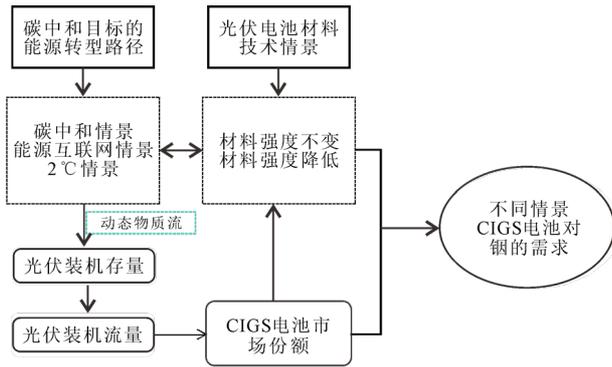


图 3 CIGS 技术对铟需求预测路线
Fig. 3 Indium demand forecast route of CIGS technology

2 研究方法 with 数据

2.1 研究框架

根据气候目标和能源转型路径，确定 4 种不同的光伏装机情景，构建动态物质流模型测算光伏装机的存量和流量，分析不同光伏电池技术的竞争力和发展方向，确定 CIGS 电池的市场份额和装机容量

量，结合考虑技术进步背景下铟的使用强度，综合预测 CIGS 电池对铟的需求。本研究的时间边界为 2020—2050 年，空间边界为不包括港澳台地区在内的中华人民共和国其他地区。铟需求预测技术路线如图 3 所示。

2.2 情景分析

2.2.1 能源转型路径

作为世界第二大经济体和全球最大的发展中国家，中国应对气候变化的行动是全球关注的焦点。自“双碳”目标提出以来，国内外多个研究机构对中国未来能源需求、碳排放和能源转型路径进行了热烈而广泛的探讨。本文详细调研了 8 家机构的研究报告，分析各报告中的清洁能源发展趋势，为设置光伏装机发展情景提供依据(表 2)。

上述 8 份研究报告共预测了 15 种能源转型路径。从时间尺度和预测结果看，光伏行业协会预测了 2020—2030 年光伏太阳能的装机情况；中石油经济技术研究院(碳中和情景)和全球能源互联网发

表 2 不同机构预测能源转型情况统计
Table 2 Predictions on energy transition from different institutions

机构	报告名称	预测时间范围/a	备注	参考文献
壳牌	中国能源体系 2060 碳中和	2020—2060	提供了一条整体脱碳路径，未对光伏等可再生能源的具体发展做出规划	壳牌, 2020
IEA	中国能源体系碳中和路线图	2020—2060	分承诺目标和加速转型 2 种情景，未提供详细的发展路径	IEA, 2021
BP	BP energy outlook 2022	2020—2050	未对中国情况进行分析	BP, 2022
GE	2022 GE 中国能源转型白皮书	2020—2051	引用清华大学的研究结果	GE, 2021
中国光伏行业协会	中国光伏产业发展路线图	2020—2030	分保守情景、乐观情景预测了到 2030 年每年新增光伏装机情况	王世江等, 2021
清华大学	中国长期低碳发展战略与转型路径研究	2020—2050	设置政策情景、强化政策情景、2℃情景和 1.5℃情景共 4 种，提供了 2050 年不同情景下的电力装机结构	项目综合报告编写组, 2020
全球能源互联网发展合作组织	中国 2060 年前碳中和研究报告	2020—2060	提供了详细的电力装机结构	全球能源互联网发展合作组织, 2021
中石油经济技术研究院	2050 年世界与中国能源展望	2020—2050	分参考情景、氢能社会情景和碳中和 3 种情景，其中碳中和情景提供了不同可再生能源的装机结构	中国石油经济技术研究院, 2020

表3 不同情景下2022—2050年累计光伏装机容量

Table 3 Cumulative installed capacity of photovoltaics from 2022 to 2050 under different scenarios

机构	情景	2022年/GW	2030年/GW	2050年/GW	2022—2030增速	2030—2050增速
中国光伏行业协会	保守情景		1 103.5	—	13.79%	
	乐观情景		1 265.5	—	15.76%	
中石油经济技术研究院	参考情景		—	—		
	氢能社会情景		—	—		
	碳中和情景	392.5	733	2 004	8.12%	5.16%
全球能源互联网发展合作组织	能源互联网		1 000	3 270	12.40%	6.10%
清华大学	政策情景		—	893		
	强化政策情景		—	1 380		
	2 °C情景		1 126	2 205	14.08%	3.42%
	1.5 °C情景		1 126	2 367	14.08%	3.78%

注：“—”代表无数据。

展合作组织给出了2030年和2050年不同时间节点的光伏装机数据；清华大学预测了2050年4种情景的累计装机情况(表3)。通过比较分析，综合考虑数据可得性和我国光伏产业发展实际情况，本文选择其中4种情景，即中石油经济技术研究院的碳中和情景、全球能源互联网发展合作组织预测的能源互联网情景、清华大学的2 °C情景和1.5 °C情景，对未来我国光伏产业发展情况进行对比分析。

2.2.2 太阳能电池技术类型及变化趋势

太阳能电池技术可分为三代(王庆, 2020; 况杰, 2022): 第一代是以单晶硅和多晶硅为代表的晶硅(C-Si)太阳能电池, 第二代材料以薄膜技术为代表, 包括非晶硅(α -Si)、碲化镉(CdTe)和铜铟镓硒(CIGS), 第三代新型太阳能电池, 包括有机太阳能电池、高倍聚光电池、钙钛矿和柔性太阳能电池等。目前已经实现产业化的太阳能电池主要有晶硅太阳能电池(C-Si)和薄膜电池(α -Si、CdTe和CIGS)。晶硅电池仍然是主导产品, 市场化程度较高, 但也存在一定缺点, 由于合成原料要求太高和生产工艺过高, 导致这类电池的成本较高。第二代薄膜电池的制作过程比较简单, 在成本方面具有一定优势, 发电效率也在逐步提高, 未来可为全球电力供应做出重要贡献。

不同太阳能电池技术的发展存在较大不确定性, CIGS电池未来的发展前景及市场份额直接影响未来CIGS电池的产量。通过文献调研(Stamp et al., 2014; Watari et al., 2018; 郭慧等, 2018; Elshkaki et al., 2019; Zhou et al., 2020), 本文假设未来薄膜技术在光伏市场中的份额将逐步提高, 到2030年与晶硅电池平分秋色, 到2050年薄膜技术的市场份额进一步提高到75%, 届时C-Si、 α -Si、CdTe和CIGS四种技术的市场份额均为25%。不同光伏电池技术的市场份额变化趋势见表4。

2.2.3 CIGS电池中钢的使用强度

材料使用强度是影响钢需求的一个重要指标, 是指单位发电装机容量所需的金属量。就薄膜太阳

表4 不同光伏电池技术市场份额变化

Table 4 Market share changes in terms of PV cell technology

年份	C-Si 技术	薄膜技术		
		α -Si	CdTe	CIGS
2017	95.4%	0.3%	2.4%	1.9%
2020	70%	12%	12%	6%
2025	60%	14%	14%	12%
2030	50%	16.7%	16.7%	16.7%
2040	40%	20%	20%	20%
2050	25%	25%	25%	25%

能光伏技术而言, 使用强度取决于太阳能电池的转换效率、吸收层厚度、材料利用率(太阳能组件中金属量/初始投入量)和材料回收率(金属回收利用量/初始投入量)。金属使用强度的计算公式如下(Nassar et al., 2016):

$$I = \frac{L \times \rho \times \chi}{10^{-3} \times \eta \times STC \times U} \times (1 - R) \quad (1)$$

式中 I 代表使用强度; L 是吸收层厚度(μm); ρ 是吸收层密度(g/cm^3); χ 是吸收层中金属的质量分数; η 是转换效率; STC 代表标准条件下的辐照($1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$); U 和 R 分别是材料利用率和回收率, 可按以下公式计算(Nassar et al., 2016; 周艳晶, 2021):

$$U = DE \times \gamma \quad (2)$$

$$R = (1 - DE) \times PR \times RE + DE \times (1 - \gamma) \times CR \times MR \times RE \quad (3)$$

其中 DE 代表沉积效率, 即沉积在基板上的初始材料的比例; γ 是电池和组件的生产率; PR 指生产废料回收率; CR 是废弃组件的回收率; MR 是废弃组件中金属的回收率; RE 是金属的冶炼效率。

已有研究对未来钢使用强度的变化有两种观点, 一种认为当前材料技术进步空间有限, 未来钢的使用强度将保持当前水平; 另一种观点相信未来技术进步会不断优化上述各项参数, 钢的使用强度会逐渐降低。本研究将讨论钢使用强度不变(CMC)

表 5 电池中不同参数及钢使用强度的变化情况
Table 5 Changes in different parameters and indium use intensity in the battery

年份	$L/\mu\text{m}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\chi/\%$	$\eta/\%$	$DE/\%$	$\gamma/\%$	$PR/\%$	$CR/\%$	$MR/\%$	$RE/\%$	$I/(\text{kg}/\text{MW})$
2020	1.2	5.75	24.90	14	45	87	58	83	92	82	22
2030	1.1	5.75	24.90	15	50	88	66	86	94	84	16
2040	1.0	5.75	24.90	16	55	90	75	90	95	85	12
2050	1.0	5.75	24.90	16	55	90	75	90	95	85	12

和钢使用强度下降(DMC)两种情景。

表 5 总结了不同参数未来的变化情况(Zhou et al., 2020; 周艳晶, 2021), 据此可计算不同时间节点钢的使用强度, 各节点之间的数据可按线性变化计算。到 2040 年钢的使用强度有望降低到 12 kg/MW, 比当前的 22 kg/MW 减少 45%。

2.3 方法与模型

2.3.1 CIGS 装机量与报废量

基于存量驱动的动态物质流分析模型, 计算 CIGS 电池每年的报废量和新增装机量。CIGS 电池每年的新增装机量与当年总的新增光伏装机容量、CIGS 市场份额和 CIGS 电池报废量有关。

计算公式如下:

$$\text{inf } low_t^{CIGS} = (CM_t^{PV} - CM_{t-1}^{PV}) \times MS_{CIGS} + \text{outflow}_t^{CIGS} \quad (4)$$

$$\text{outflow}_t^{CIGS} = \sum_{m < t} \text{inf } low_m \times L(t - m) \quad (5)$$

式中, CM_{t-1}^{PV} 代表 t 年累计光伏装机容量; MS_{CIGS} 是 t 年 CIGS 技术的市场份额; outflow_t^{CIGS} 是 t 年 CIGS 的报废量; $L(t - m)$ 是 CIGS 电池寿命概率分布函数, 为 m 年安装的风机在 t 年退役的概率, 本研究假设其服从形状参数为 5.38、规模参数为 30.37 的韦伯分布, CIGS 电池的平均使用年限为 28 年(Stamp et al., 2014)。

2.3.2 钢需求量与报废量

光伏领域对钢的需求量取决于当年 CIGS 电池新增装机和钢的使用强度, 具体计算公式如下:

$$D_{PV}(t) = \text{inf } low_t^{CIGS} \times I \quad (6)$$

其中 $D_{PV}(t)$ 是 t 年光伏领域对钢的需求; $\text{inf } low_t^{CIGS}$ 代表 t 年 CIGS 的新增装机量; I 是 CIGS 中钢的使用强度。

报废 CIGS 电池中的含钢量即为当年钢的报废量, 计算模型如下:

$$\text{outflow}_t^{CIGS, In} = \sum_{m < t} \text{inf } low_m^{CIGS, In} \times L(t - m) \quad (7)$$

$$\text{inf } low_m^{CIGS, In} = \text{inf } low_m^{CIGS} \times I \quad (8)$$

式中, $\text{outflow}_t^{CIGS, In}$ 是 t 年报废 CIGS 电池中的含钢量; $L(t - m)$ 是 CIGS 电池寿命概率分布函数, 为 m 年安装的风机在 t 年退役的概率; $\text{inf } low_m^{CIGS, In}$ 是 m 年新增 CIGS 电池中的含钢量, 取决于当年新增 CIGS 装机和钢的使用强度。

3 研究结果与讨论

3.1 光伏太阳能和 CIGS 装机容量

2022 年我国光伏新增装机 86 GW, 累计装机 392.5 GW, 为达到 2030 年“碳达峰”的目标, 预计“十四五”期间, 我国光伏年均新增装机将超过 75 GW(王世江等, 2021)。根据本文选定的 4 种能源转型路径下光伏装机发展趋势和 CIGS 市场份额, 可以推算到 2050 年我国光伏装机容量和 CIGS 装机容量, 如图 4 所示。

其中, 全球能源互联网发展合作组织提出以中国能源互联网为基础平台的全社会、各领域、能源系统和电力系统碳中和实现路径, 预测到 2050 年仅光伏装机容量即可达到 3 270 GW, CIGS 电池装

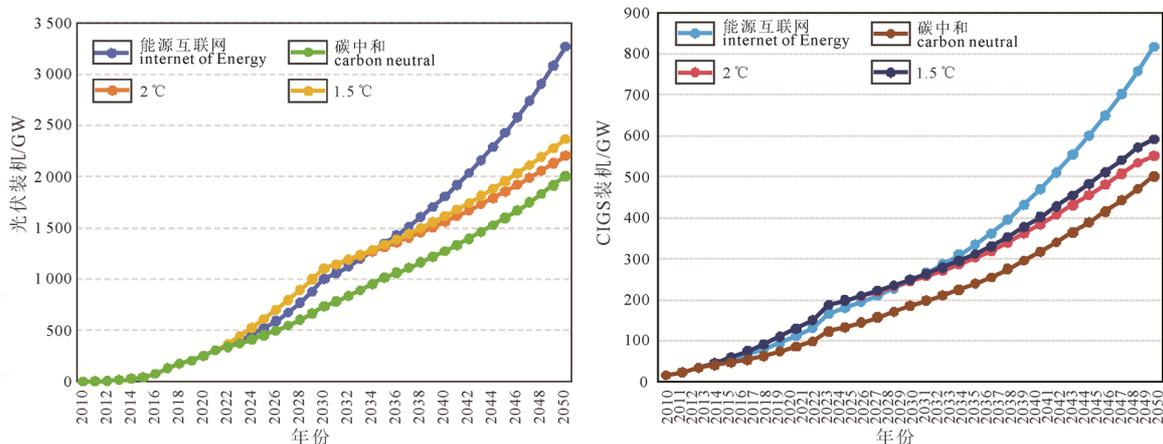


图 4 不同情景下光伏装机和 CIGS 装机容量
Fig. 4 PV and CIGS installed capacities under different scenarios

机量为 818 GW; 清华大学的“2 °C”和“1.5 °C”情景, 分别以实现全球控制温升 2 °C和 1.5 °C目标为导向, 2050 年两种情景下太阳能装机量比较接近, 分别为 2 205 GW 和 2 367 GW, CIGS 电池装机量分别为 551 GW 和 591 GW; 中石油“碳中和”情景下, 预计 2050 年光伏装机量达 2 004 GW, CIGS 电池装机量为 500 GW。

3.2 光伏产业钢需求量

8 种情景下 2020—2050 年光伏产业对钢的累积需求如图 5 所示, 结果显示:

(1)从需求增速来看, 光伏领域对钢的需求可大致划分为两个阶段: 第一阶段是 2023—2030 年, 8 种情景下钢的需求均呈快速增长趋势, 年均增速平均值为 37%, 这与我国设定的“2030 年碳达峰”的目标相一致, 该阶段需加快可再生能源尤其是光伏太阳能的装机容量和发电比例, 导致该期间钢的需求增速较快。第二阶段是 2031—2050 年, 钢的累积需求低于第一阶段, 年均增速平均值为 7%, 这是由于 2030 年碳达峰之后光伏装机增速短期趋缓, 之后为实现碳中和目标, 钢的累积需求稳定增长。

(2)能源互联网情景对钢的需求显著高于其他情景, 钢强度不变和钢强度下降两种情况下, 到 2035 年的累积需求分别是 3 176 t 和 2 614 t, 到 2050 年的累积需求分别是 13 144 t 和 8 324 t; 碳中和情景对钢的需求最低, 钢强度不变和钢强度下降两种情况下, 到 2035 年的累积需求分别是 2 180 t 和 1 691 t, 到 2050 年的累积需求分别是 7 378 t 和 4 673 t。

(3)CIGS 电池技术进步能大幅降低钢的需求, 到 2035 年, 不同能源转型路径下钢强度下降可减少 18%~22%的钢需求, 到 2050 年, 钢强度下降可减少 33%~37%的钢需求。

3.3 CIGS 中钢的回收潜力分析

钢的回收潜力是指 CIGS 电池报废后能够从中回收的钢含量, 它取决于报废电池中钢的实际含量和当前经济技术条件下可真正提取出来的钢含量。

国内 CIGS 电池技术从 2015 年开始投入市场, 由于 CIGS 的平均使用寿命为 28 年, 因此 CIGS 电池的规模报废将在 2030 年后集中体现, 在此之前报废电池中钢的回收潜力不足 1 t, 2035 年以后钢报废量快速增长。如表 6 所示, 8 种需求情景下, 2050 年钢的年度报废量可达 69~130 t, 2015—2050 年钢的累积报废量为 436~788 t。

从报废 CIGS 电池中回收钢是增加钢供应的有效途径, 但目前该项技术还停留在理论阶段(Li et al., 2023; 李芳琴等, 2023; 曾现来等, 2023), 距离真正实现产业化还有一段差距, 短期内对缓解钢供应压力的作用难以体现。未来随着含钢报废产品回收技术的不断进步, 钢的回收潜力会进一步加大。

3.4 钢的伴生性分析

钢是稀有分散元素, 没有独立矿物, 约 95% 的原生钢供应来自锌精矿(Elshkaki et al., 2019), 所以钢的生产不能完全由其自身的需求所决定, 而是受矿山锌生产活动的制约。从历史数据来看, 全球及中国原生钢产量与锌的矿山产量均呈明显的相关关系(周艳晶, 2021)。按照当前全球生产 1 t 锌约生产 74 g 钢的比例计算(Elshkaki et al., 2019; USGS, 2021, 2022, 2023), 到 2050 年需生产 6 314~17 762 万 t

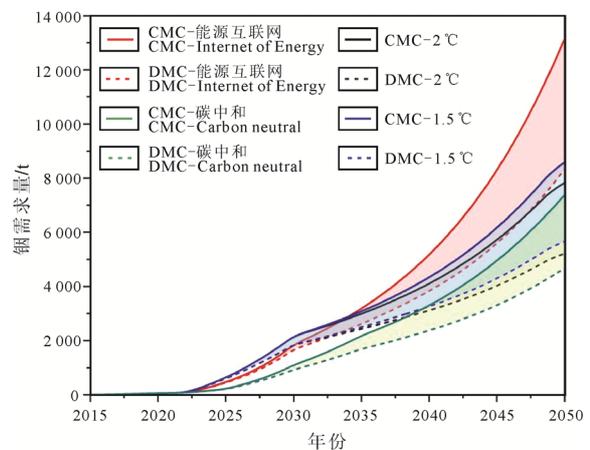


图 5 2015—2050 年光伏产业钢累积需求
Fig. 5 Cumulative demand for indium in photovoltaic industry from 2015 to 2050

表 6 2025—2050 年不同情景下 CIGS 中钢的报废量
Table 6 Indium scrap in CIGS under different scenarios from 2025 to 2050 t

年份	钢强度不变				钢强度下降			
	能源互联网	2 °C	1.5 °C	碳中和	能源互联网	2 °C	1.5 °C	碳中和
2025	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
2030	0.61	0.58	0.58	0.48	0.60	0.57	0.57	0.48
2035	4.29	4.44	4.45	3.08	4.14	4.25	4.25	3.00
2040	18.64	20.01	20.06	12.70	17.35	18.55	18.58	11.94
2045	56.36	60.28	60.69	37.34	50.32	54.12	54.40	33.53
2050	125.60	128.29	130.29	81.93	105.88	110.57	111.93	69.13
2015—2050 年累积报废	743.04	781.24	788.38	492.48	654.58	695.18	700.14	436.12

的锌来满足光伏产业钢的供应,是当前锌矿山产量的150~420倍左右,当前锌消费量的95~269倍。已有研究表明,国内锌需求逐渐进入平台期(文博杰等,2019;李芳琴等,2023),未来锌矿山产量较难出现大幅增加,这也导致原生钢的原料供应增长空间有限,在当前通过锌精矿冶炼提取原生钢的生产路径下,未来原生钢产量增长受到制约。

4 结论及建议

4.1 结论

(1)“双碳”背景下太阳能发电逐渐成为新型能源系统中的主要能源结构,若按照本文选定的四种能源转型路径,到2050年光伏装机容量将分别增长到3 270 GW、2 205 GW、2 367 GW和2 004 GW,是2023年装机容量的8.3倍、5.6倍、6倍和5.1倍。

(2)实现“双碳”目标将带动钢在光伏领域的需求大幅增长。CIGS薄膜电池是具有较大发展潜力的技术之一,随着市场份额不断提高,势必会拉动钢的需求快速增长。当前国内光伏领域每年的耗钢量约为10 t,按照本文设定的8种需求情景,到2050年,光伏领域对钢的年度需求量可达168~1 141 t,对钢的累积需求可达4 673~13 144 t。

(3)2020—2050年钢的累积需求大致可分为两个阶段:2023—2030年,年均增速平均值为37%,表明为实现2030年碳达峰目标需加快光伏装机的部署;2031—2050年,年均增速平均值为7%,钢需求随着光伏产业稳步发展而稳定增长。

(4)钢是CIGS薄膜不可或缺的原材料,到2050年薄膜技术进步可减少33%~37%的钢需求,通过技术改进降低钢的使用强度是降低光伏领域钢需求的重要途径。

(5)钢矿是伴生资源,钢矿产品的供应受制于锌精矿生产,未来随着国内锌需求进入平台期,原生钢的原料供应增长空间有限,仅依靠锌精矿冶炼提取原生钢矿产品将难以保障钢的中长期需求。

4.2 建议

(1)加强钢资源调查和潜力评价。全面评价不同含钢矿床类型中钢的资源潜力,摸清资源家底。已发现的钢储量主要来自于矽卡岩型和岩浆-热液型矿床,应加强对海相火山岩型、叠加(复合/改造)型、陆相火山岩型、斑岩型和受变质型矿床中含钢矿物的精细研究,加快对未知钢储量的含钢矿床开展技术经济评价和综合利用研究,增加储量规模。

(2)加强技术攻关,提高钢资源利用效率和再生钢回收利用水平。一方面鼓励锌冶炼企业引进钢的回收设备和技术,减少生产过程中含钢原料的损失,

加强采选冶技术和提取技术的研发,提高产业链各环节中钢的回收效率。另一方面,建立钢产品回收体系,包括ITO靶材废料和报废CIGS等含钢终端产品,突破钢回收关键技术,研发关键回收设备,提高再生钢供应占比。

(3)加强共伴生矿开发利用耦合研究。目前钢的提取主要来自锌冶炼过程,锌矿山生产活动与钢供应密切相关,应加强研究建立锌矿产品产量与钢产量耦合动态分析模型,根据锌矿未来供需趋势及时制定调整钢生产计划,保障钢下游产业需求。

Acknowledgements:

This study was supported by Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources (No. KLMMR-2022-G01).

参考文献:

- GE, 2022. GE 中国能源转型白皮书[R]. 上海:通用电气(中国)有限公司.
- 曾现来,李金惠,耿涌,等,2023.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,38(8):1099-1109.
- 车东,张照志,潘昭帅,等,2022. 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,42(12):208-217.
- 郭慧,李亚萍,王学明,2018. 钢、镓、硒成为新能源材料新宠应加强地质找矿与综合利用[J]. 中国地质,45(1):205-206.
- 黄震,谢晓敏,2021. 碳中和愿景下的能源变革[J]. 中国科学院院刊,36(9):1010-1018.
- 霍文敏,陈甲斌,2020. 全球钢矿资源供需形势分析[J]. 国土资源情报,(10):34-38.
- 壳牌,2020. 中国能源体系 2060 碳中和[R]. 北京:壳牌(中国)有限公司.
- 孔力,裴玮,饶建业,等,2022. 建设新型电力系统促进实现碳中和[J]. 中国科学院院刊,37(4):522-528.
- 况杰,2022. 太阳能光伏电池的新材料路线演进[J]. 科技与金融,(8):53-54.
- 李芳琴,黄莉,李杰,等,2023. 钢资源供给与消费格局分析[J]. 地球学报,44(2):297-304.
- 李晓峰,徐净,朱艺婷,等,2019. 关键矿产资源钢:主要成矿类型及关键科学问题[J]. 岩石学报,35(11):3292-3302.
- 李晓峰,朱艺婷,徐净,2020. 关键矿产资源钢研究进展[J]. 科学通报,65(33):3678-3687.
- 刘劲松,高丽丽,2021. 日本钢资源供需格局及其矿业政策分析[J]. 矿业研究与开发,41(5):188-194.
- 全球能源互联网发展合作组织,2021. 中国 2060 年前碳中和研究报告[M]. 北京:中国电力出版社.
- 王安建,袁小晶,2022. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. 中国科学院院刊,37(11):1550-1559.
- 王庆,2020. 薄膜太阳能电池的进展和展望[J]. 化工管理,(3):100-101.

王世江, 江华, 王青, 等, 2021. 中国光伏产业发展路线图[R]. 北京: 中国光伏行业协会.

王永利, 张吉林, 逢博, 等, 2023. “双碳”目标下的分布式光伏发展前景[J]. 科技与创新, (15): 59-61.

文博杰, 陈毓川, 王高尚, 等, 2019. 2035年中国能源与矿产资源需求展望[J]. 中国工程科学, 21(1): 68-73.

文山州工业和信息化局, 2021. 文山州铜全产业链发展规划(2021-2030)[R]. 文山壮族苗族自治州: 文山州工业和信息化局.

项目综合报告编写组, 2020. 《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, 30(11): 1-25.

袁莹, 薛培, 李顺庭, 等, 2020. 我国稀散金属元素铜在铅锌矿山中的分布规律与金属资源量初步估算[J]. 矿产与地质, 34(2): 203-209.

张伟波, 陈秀法, 陈玉明, 等, 2019. 全球铜矿资源供需现状与中国开发利用建议[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 1-8.

张小陌, 2018. 中国铜资源产业发展分析及储备研究[J]. 中国矿业, 27(7): 7-10.

郑义, 郭春丽, 王登红, 等, 2023. 中国伴生铜(镉镓锗)矿床的时空分布、成因类型及成矿机制: 总结与展望[J]. 地质学报, 97(11): 3569-3618.

中国石油经济技术研究院, 2020. 2050年世界与中国能源展望[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院.

周艳晶, 2021. 中国铜资源动态物质流研究[D]. 武汉: 中国地质大学.

References:

- BP, 2022. BP energy outlook[R]. London: BP.
- CHE Dong, ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, et al., 2022. The Position of Rare and Dispersed Element Minerals in Strategic Emerging Industries and the Prediction of Consumption Demand[J]. Mining Research and Development, 42(12): 208-217(in Chinese with English abstract).
- ELSHKAKI A, SHEN Lei, 2019. 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, 180: 903-917.
- GE, 2022. GE White Paper on China's Energy Transition[R]. Shanghai: GE (China) Co., Ltd(in Chinese).
- Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2021. China Carbon Neutrality Before 2060[M]. Beijing: China Electric Power Press(in Chinese).
- GUO Hui, LI Yaping, WANG Xueming, 2018. Indium, gallium and selenium receive considerable attention from industrial circles and hence deserves much more geological and prospecting efforts[J]. Geology in China, 45(1): 205-206(in Chinese).
- HUANG Zhen, XIE Xiaomin, 2021. Energy Revolution under Vision of Carbon Neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(9): 1010-1018(in Chinese with English abstract).
- HUO Wenmin, CHEN Jiabin, 2020. Analysis of Supply and Demand Situation of Indium Resources in the World[J]. Land and Resources Information, (10): 34-38(in Chinese with English abstract).
- IEA, 2021. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency.
- KONG Li, PEI Wei, RAO Jianye, et al., 2022. Build new power system to promote carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 37(4): 522-528(in Chinese with English abstract).
- KUANG Jie, 2022. Evolution of New Material Route for Solar Photovoltaic Cells[J]. Sci-tech Finance Monthly, (8): 53-54(in Chinese).
- LI Fangqin, HUANG Li, LI Jie, et al., 2023. Analysis of Indium Resource Supply and Consumption Pattern[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(2): 297-304(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, MA Baozhong, WANG Chengyan, et al., 2023. Recycling and recovery of spent copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells: A review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 30(6): 989-1002.
- LI Xiaofeng, XU Jing, ZHU Yiting, et al., 2019. Critical minerals of indium: Major ore types and scientific issues[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3292-3302(in Chinese with English abstract).
- LI Xiaofeng, ZHU Yiting, XU Jing, 2020. Indium as a critical mineral: A research progress report[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3678-3687(in Chinese with English abstract).
- LIU Jinsong, GAO Lili, 2021. Analysis on Supply and Demand Situation of Indium Resources and Mining Policy in Japan[J]. Mining Research and Development, 41(5): 188-194(in Chinese with English abstract).
- NASSAR N T, WIBURN D R, GOONAN T G, 2016. 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, 183: 1209-1226.
- Petrochina Economic and Technical Research Institute, 2020. World and China Energy Outlook 2050[R]. Beijing: PetroChina Economic and Technical Research Institute(in Chinese).
- Project Synthesis Report Preparation Team, 2020. Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transition path[J]. China Population, Resources and Environment, 30(11): 1-25(in Chinese).
- SHELL, 2020. China's energy system will be carbon neutral by 2060[R]. Beijing: Shell China Ltd(in Chinese).
- STAMP A, WÄGER P A, HELLWEG S, 2014. Linking energy scenarios with metal demand modeling—The case of indium in CIGS solar cells[J]. Resources, Conservation and Recycling, 93: 156-167.
- TOKIMATSU K, WACHTMEISTER H, MCLELLAN B, et al., 2017. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2 degrees C target[J]. Applied Energy, 207: 494-509.

- USGS, 2021. Mineral Commodity Summaries 2021[R]. New York: USGS.
- USGS, 2022. Mineral Commodity Summaries 2022[R]. New York: USGS.
- USGS, 2023. Mineral Commodity Summaries 2023[R]. New York: USGS.
- VALERO A, VALERO A, CALVO G, et al., 2018. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93: 178-200.
- VIEBAHN P, SOUKUP O, SAMADI S, et al., 2015. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 655-671.
- WANG Anjian, YUAN Xiaojing, 2022. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(11): 1550-1559(in Chinese with English abstract).
- WANG Qing, 2020. Progress and Prospects of Thin Film Solar Cells[J]. *Chemical Engineering Management*, (3): 100-101(in Chinese).
- WANG Shijiang, JIANG Hua, WANG Qing, et al., 2021. Roadmap for the Development of China's Photovoltaic Industry[R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association(in Chinese).
- WANG Yongli, ZHANG Jilin, PANG Bo, et al., 2023. The Development Prospects of Distributed Photovoltaics under the "Dual Carbon" Goal[J]. *Science and Technology & Innovation*, (15): 59-61(in Chinese).
- WATARI T, MCLELLAN B C, OGATA S, et al., 2018. Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency's Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios[J]. *Minerals*, 8(4): 156.
- WEN Bojie, CHEN Yuchuan, WANG Gaoshang, et al., 2019. China's Demand for Energy and Mineral Resources by 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 21(1): 68-73(in Chinese with English abstract).
- Wenshan Prefecture Bureau of Industry and Information Technology, 2021. Wenshan Prefecture indium whole industry chain development plan(2021-2030)[R]. Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture: Wenshan Prefecture Bureau of Industry and Information Technology(in Chinese).
- WERNER T T, MUDD G M, JOWITT S M, 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 939-956.
- YUAN Ying, XUE Pei, LI Shunting, et al., 2020. The distribution regularity of rare metal indium and preliminary estimation of metal resources in the lead-zinc deposits in China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 34(2): 203-209(in Chinese with English abstract).
- ZENG Xianlai, LI Jinhui, GENG Yong, et al., 2023. Pathways for medium-and long-term sustainable supply of typical strategic metals in China in context of carbon neutrality[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(8): 1099-1109(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Weibo, CHEN Xiufa, CHEN Yuming, et al., 2019. Current Status of Supply and Demand of Global Indium Mineral Resources and Suggestions for Development and Utilization in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 1-8(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiaomo, 2018. Analysis of the development and the reserve of indium resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 27(7): 7-10(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yi, GUO Chunli, WANG Denghong, et al., 2023. Temporal and spatial distribution, genetic type, and metallogenic mechanism of indium(gallium, germanium, cadmium) associated deposits in China: Overview and expectation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(11): 3569-3618(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yanjing, 2021. Dynamic material flow analysis of indium in China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yanjing, LI Jianwu, RECHBERGER H, et al., 2020. Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 263: 121599.