



磷化工产业降碳增汇的探索与展望

陈鹏^{1,2}, 贺鸿^{1,2}, 唐建楷³, 肖亚楠^{1,2}, 刘婷¹, 罗安荣^{1,2,✉}, 马懿星³

1. 云南磷化集团有限公司, 昆明 650600; 2. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 昆明 650600; 3. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650600

摘要 随着碳达峰、碳中和重大战略目标的提出, 磷化工产业如何实现绿色低碳可持续发展愈加重要。基于磷化工产业发展现状, 通过文献分析、对比分析法, 分析了磷矿山与磷化工在碳减排上面临的困境, 探讨了新型智慧矿山建设和光伏+生态修复模式在磷矿山减排增汇上的作用, 重点综述了固废资源综合利用技术, 突出其在磷化工产业碳减排中的重要性; 深入分析了 CCUS 对磷化工进行碳减排的重要意义和作用, 探讨了微藻固碳技术在磷化工产业应用的可行性和经济性。最后讨论了以磷矿山和磷化工结合形成的“矿化”一体减排增汇模式的未来前景, 以期磷化工企业实现降碳增汇提供参考与借鉴。

关键词 磷矿山; 磷化工; 碳减排; 固废资源化; 微藻固碳

随着城市化、工业化的加速, 经济规模的扩张及人类活动的加剧, 使大气中 CO₂ 体积分数不断攀升, 远超生态环境 CO₂ 承载能力, 导致全球气温升高、冰川消融和极端天气频发等一系列气候环境问题。这些灾难性后果的凸显推动了世界各国踏上环境治理及降碳增汇之旅。2015 年《巴黎协定》提出了将全球平均气温增幅控制在低于 2 °C 的水平, 并将 1.5 °C 温控作为长期努力的目标^[1], 这标志着人类向低碳世界的转型。我国碳排放量在发展中国家中居于首位, 于 2020 年承诺“力争 2030 年前温室气体排放达到峰值, 2060 年前实现碳中和”, 并将此作为国家重大发展战略^[2-3]。在此背景下, 高效碳减排技术、零碳技术、碳捕集封存利用技术、碳汇产品研发等方向不仅是各行各业研究关注的热点, 也是产业结构转型升级向绿色低碳发展的必经之路。

我国磷化工产业得益于丰富的磷矿资源、发展成熟的工业体系以及庞大的国内外市场需求, 不仅在磷化工产品的生产上取得了显著成就, 而且在技术创新和产业规模扩张方面也展现出强劲的竞争力。然而, 伴随着磷化工产业的蓬勃发展, 其生产过程中 CO₂ 排放量同样巨大, 这与实现绿色低碳发展形成了突出的矛盾。因此, 科学规划磷矿山与磷化工发展布局以及推动磷产业绿色低碳转型升级对化肥工业和农业生产具有重要意义, 同时这也是实现“双碳”目标的必然要求^[4]。现有学者从产业结构、资源利用率、环保问题等方面分析了制约我国磷化工发展的主要影响因素, 并对磷化工产业绿色低碳节能减排提出了策略, 但没有提出有针对性的碳减排方案和具体实施路径^[5]; 部分学者从政策和立法的角度提出磷矿资源合理利用与磷化工工艺、设备节能降耗措施的碳中和建议, 但缺乏实际碳减排路径的支撑^[6-7]。基于此, 本研究结合磷化工产业生产实际, 分析磷矿山和磷化工在碳减排上面临的问题, 分别提出具有针对性的碳减排实施路径, 并探索“矿化”一体减排增汇的模式, 以期磷化工企业在“双碳”道路上高质量发展提供参考。

1 “双碳”目标下磷矿山的发展

1.1 磷矿山面临的问题

磷矿山为下游磷化工生产提供了必需的磷资源, 但对其的开采在一定时空范围内会使矿区的碳循环遭到破坏。如在开采过程中, 穿孔、爆破、采装、运输、排土等作业会消耗的大量化石燃料导致直接碳排放, 与

收稿日期: 2024-07-12 录用日期: 2024-09-13

基金项目: 云南磷化集团有限公司研发项目基金资助项目 (130000002472)

第一作者: 陈鹏 (1996—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为磷化工双碳研究, 842818526@qq.com

✉通信作者: 罗安荣 (1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为“双碳”研究及矿山生态修复, 184282861@qq.com

此同时大量土地被开采所形成的露天采场、堆场、塌陷区、尾矿库等会显著改变原有土地结构导致矿山土壤和植被碳汇能力丧失,并且加快死有机质和土壤碳库的分解速率,土壤碳库被重新释放,致使土壤和植被从碳汇转变为碳源^[8-10],此时矿区碳循环系统受到破坏间接产生碳排放(如图1)。

由于开采对矿区生态环境的破坏所造成的水土流失、地面塌陷、边坡失稳、生态退化、生物多样性减少等后果具有滞后性和持久性^[11-12],导致间接碳排放的时间和数量要高于采掘活动直接产生的碳排放,因此对矿山碳循环系统的恢复及减排刻不容缓。

当前,针对矿山开采造成的碳循环破坏主要采取生态修复这一末端治理措施,一方面可以让矿山生态环境得到控制和改善,另一方面可以减少矿区碳排放同时增加碳汇能力^[13]。但传统的矿山生态修复工作在减排增汇上仍然存在以下问题。1)修复模式较为单一。传统修复主要集中在土壤基质修复、植被恢复、地质地貌重塑和景观重建等方面,涉及矿山减排增汇的技术手段和过程是否存在碳排放研究较少,甚至在修复施工中采取了过度人工干预措施(如采用爆破的方式进行边坡治理)^[14-16],增加了碳排放量。2)修复周期长。生态修复需要经历复杂的自然过程,如土壤形成、植被生长等,所需时间较长,短期内难以看到显著成效。英国科学家 BRADSHAW^[17] 研究表明矿山开采后的生态系统恢复至原样所需的时间尺度仍在百年以上,这一过程远远超过了从碳达峰到碳中和的时间。3)修复投资成本高。矿山生态修复需要大量的人力、物力和财力投入,对于许多企业而言,成本压力较大。同时部分矿山生态修复项目缺乏统一的规划和管理,会导致修复工作的重复进行,造成资金浪费。此外一些历史遗留矿山高昂的修复成本也使得生态修复的工作推进缓慢。4)固废资源综合利用率低。矿山开采、磷矿浮选及磷酸生产过程中产生的废石、磷尾矿、磷石膏等固废堆存不仅占用大量的土地资源,还对周围环境造成污染,导致周边土质日益疏松,土壤和植被固碳能力丧失,带来安全隐患。当前我国磷尾矿的利用率仅为7%^[18],磷石膏综合利用率也不足50%^[19],大部分磷尾矿和磷石膏堆积在尾矿库和磷石膏库中,且二者中还有大量的磷、钙、镁等有价值元素未被回收利用。因此,对废石、磷尾矿、磷石膏等固废资源综合利用迫在眉睫。

1.2 磷矿山碳减排路径

在“双碳”目标下,磷矿山碳循环系统修复已经被赋予了更深层次的任务和使命,传统的大兴绿植的片面误导应摒弃^[15],而将重点放在如何加强矿区的减排增汇工作上,从而推动磷矿山向绿色低碳化转型升级。基于当下新能源、大数据高速发展的时代,矿山减排增汇的实施路径也变得多元化,具体表现为以下几方面(如图2)。

1)改善能源使用结构,提高能源利用效率。近年来,随着氢能、太阳能、风能等清洁能源的技术突破,极大推动了清洁能源替代化石燃料的步伐,再加上智能化、数字化、网络化矿山理念的提出,绿色低碳的新型智慧矿山建设受到了极大的关注。新型矿山的绿色低碳是通过发展绿色电力和新能源利用来减少矿山开采过程中对煤炭、柴油等高碳能源的依赖:发展绿色电力源于我国矿山开发占地面积较大,且具备较好的太阳光照条件,而光伏、风能发电对矿山场地有良好的适应性,所以因地制宜开发光伏、风电等绿电技术可以充分发挥碳减排的主观能动性,减少化石能源的使用,达到减少CO₂排放的效果^[20]。如矿区办公楼屋顶可灵活铺设太阳能电池板,矿山排土场、采坑边帮、台阶、尾矿库及废弃矿坑回填等场地均可布置风电、光伏发电机组,改善矿山的能源结构降低碳排放。例如DOLJAK等^[21]在塞尔维亚地区进行光伏发电,可实现的CO₂减排量高达 $1.2 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。山西代县矿业公司在排土场完成 $3 \times 10^6 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ 的光伏发电项目,实现自发自用绿电零突破,碳减排量约为 $8.25 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[22]。虽然矿山开展光伏发电的潜力较大、碳减排效果显著,



图1 磷矿山开采碳循环示意图

Fig. 1 Schematic of the carbon cycle in phosphorus mining

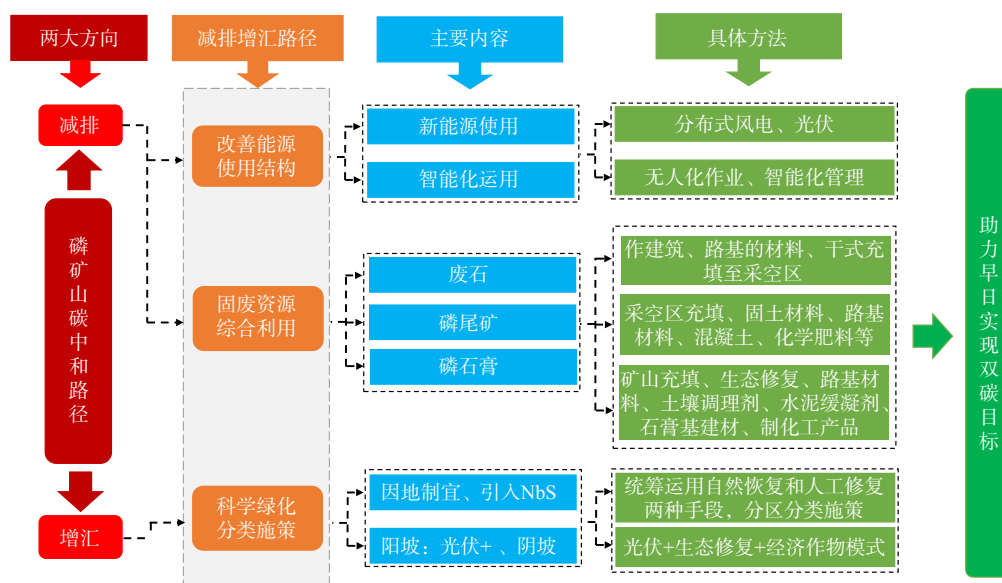


图2 磷矿山碳减排路径

Fig. 2 Phosphorus mine carbon emission reduction pathway

但面临前期电网改造、储能设备、人力等成本投入高、投资回收周期长等困境，在大规模推广运用上还有一定困难，需地方政府给予更多的政策支持与技术引导。在新能源应用方面，主要体现在矿石开采及运输设备的升级迭代，通过新能源替换化石燃料以提供设备所需动力。如奇瑞集团投资 8.5×10^8 元规划新能源矿卡项目，产品主要为纯电动和氢燃料矿内宽体自卸车、重载自卸车、牵引车等，以形成新能源矿用产能；三一重工集团也在积极布局应用纯电、换电、氢燃料等新能源技术的挖掘机、装载机等设备，以实现绿色矿山智能开采。此外，新型矿山的智能化是依托大数据和数字化技术使矿山生产透明化和可视化，通过对矿山开采及运输的各个环节进行数字化规划设计、自动化运行、无人化作业和智能化管理来实现矿山能源的高效利用和资源调度的快速有序^[23]，减少生产过程中的碳排放。综上所述，新能源和智能化的结合能更好的实现矿山碳减排的目标。

2) 固废资源综合利用，促进绿色低碳发展。在矿产资源日益紧缺的今天，固废资源高效利用是磷矿山可持续发展的重要一环，也是推动磷化工产业绿色低碳循环发展的重要途径。通过对废石、磷尾矿和磷石膏的综合利用，不仅可以减少资源的浪费，还可腾出更多的土地用于生态修复，从而为矿山生态系统提供更大的固碳空间^[24]。

传统磷矿山对开采废石处理主要是外排至废石场，但随着环保形势日趋严峻，寻找合适的废石场用于堆放废石逐渐成为磷矿山的难题之一。此外，研究发现磷矿废石在降雨的淋滤作用下，可能会产生一系列的有害物质对周边环境造成污染^[25-27]。根据文献资料，当前对于废石的综合利用方式有制备其他有用材料和废石干式充填至采空区。前者利用废石作为建筑、路基的材料，减少其对矿区土地的占用，同时为传统产业提供原材料，并降低后续处理带来的碳排放。例如沈丹丹等^[28]研究发现利用废石作为砂浆、混凝土等建筑材料的生产原料，实现每平方米 $132.62 \sim 321.30$ kg 的碳减排；郭亚林等^[29]将废石混合其它材料用于铁路隧道铺设的基料，实现每万吨废石的消耗减少 $30 \sim 40$ tCO₂ 的排放；后者采用废石胶结方式充填采空区进行废石处置，鄂西某磷矿实施此方法后，不仅实现年处理废石 2.5×10^4 m³，还有效提高井下顶板的安全系数，减少井下压占矿产资源，盘活部分矿柱，矿山回采率由 75% 提升至约 77%^[30]。随着技术的不断更迭，磷矿废石综合利用途径会越来越广，但依然要考虑突破成本的桎梏以实现废石的规模化综合利用。

根据查阅文献，磷尾矿综合利用在工程上主要用于采空区充填、固土材料和路基材料，这些应用虽然能消耗大量磷尾矿，但未能有效利用其中的 P、Ca、Mg 等有用成分，相反可能导致 F⁻、SO₄²⁻ 等有害物质污染地下水。在建筑领域，磷尾矿可用于制造陶粒、混凝土、胶凝材料、水泥和砖等建材，但存在成分限制、运输成本高和市场发展空间有限的问题^[31]，导致磷、钙、镁等资源浪费。再选提磷技术通过浮选工艺提高磷品

位,但随着技术进步,磷尾矿的品位降低,再选变得不经济^[32]。化学提取方法可以从磷尾矿中提取钙、镁等成分制备化工产品,但这要求使用强酸和大量化学试剂,增加了生产成本和环境风险。其他如制备保温板、微晶玻璃,以及煅烧磷尾矿用于污水处理、有害气体吸收和制备钝化材料的方法虽具前景,但成本和能耗问题仍需解决。为实现磷尾矿资源的绿色、高效、高值和规模化利用,磷尾矿资源化利用已转向开发多养分元素综合的化学肥料,主要包括磷镁肥、钙镁磷肥、含磷有机肥、中微量元素肥料和复合肥料等。如胡宏等^[33]通过使用硫酸和磷酸的混合酸来分解磷尾矿,在反应时间为20 min、反应温度为50℃的条件下,成功制备出了含有28%有效磷和10%有效镁的磷镁肥。郑君花等^[34]研究利用低品位磷尾矿粉、酱油渣和水稻秸秆生产含磷有机肥料的技术,在参数为酱油渣:水稻秸秆:尾矿粉质量比4:5:4.6,发酵温度30℃,时间121.2 h,料水比1:2.56,得到速效磷质量分数为2 500 mg·kg⁻¹的含磷有机肥。利用磷尾矿养分元素进行肥料生产,虽然可以解决磷尾矿的堆积问题,缓解磷矿资源的开发力度,减轻生态环境压力,同时肥料化利用还可补充土壤所需的养分,促进作物品质提升和产量增加,但依然面临磷尾矿难以高效活化、生产成本低、工艺流程复杂等问题。在后续的研究开发中,还需以农业需求为导向,设计开发适合土壤-作物-气候的肥料,以实现磷尾矿的低能耗、低污染、养分全量化利用,最终使科研成果转化为生产力。

磷石膏作为湿法磷酸工艺生产过程中的固废,由于含有多种有害物质,导致其利用率低且大量堆积,造成土地资源的大量浪费和一系列环境污染问题,若不能将其安全高效的综合利用将严重制约磷化工产业的绿色低碳可持续发展。针对磷石膏资源化综合利用进行文献检索,其主要利用途径有矿山充填及生态修复材料、路基材料、土壤调理剂、水泥缓凝剂、石膏建材、制化工产品等^[35]。磷石膏无害化预处理后用于矿山生态修复和矿山回填是国内磷石膏大规模利用的关键途径。如铜陵伯乐矿业有限公司利用无害化处理后的磷石膏1.8×10⁶ t对废弃矿坑进行生态修复^[36]。贵州开磷集团股份有限公司把3.23×10⁶ t无害化处理后的磷石膏用于井下充填^[37]。但由于当前缺少明确的环保相关领域的行政许可依据,以及相应政策与保障措施的引导、扶持和支撑,该模式难以实现大规模复制和推广。石灰稳定化磷石膏作为路基材料应用于公路水稳层等技术可行,CHEN等^[38]采用石灰对磷石膏进行稳定化处理,以提高磷石膏的力学性能、水稳定性和对有害物质的溶解性,研究表明,在磷石膏中添加6%~8%的石灰作为公路路基填料可行。磷石膏用于路基材料依然缺乏明确的行政许可依据,且成本有待进一步降低。磷石膏pH值一般在1.9到5.3之间,可改良土壤盐碱性,且其富含的磷、硫、钙等元素对于促进农作物生长具有重要作用,被作为土壤调理剂应用于农业领域。吴洪生等^[39]使用磷石膏对小麦盐(碱)地进行改良,发现土壤pH值有效降低,同时小麦叶片中的磷和钾质量分数得到增加,小麦长势较好。然而由于磷石膏中存在着大量有害物质,土壤调理剂在市场开拓应用还存在较多阻力和障碍。当前,采用磷石膏制造水泥缓凝剂的技术已经成熟,磷石膏可完全替代天然石膏和脱硫石膏,成为生产水泥缓凝剂的原料。这种缓凝剂符合云南省地方标准DB53/T 396—2012《改性磷石膏水泥缓凝剂》的要求,使用量为水泥熟料质量的3%~5%,已成为大规模利用磷石膏的最主要方式。磷石膏在建材的应用较早, β 半水石膏粉、纸面石膏板、无纸面石膏板、石膏线条、石膏砌块、石膏免烧砖、石膏路沿石等石膏建材产品不断进入市场。其中纸面石膏板以北新建材为龙头企业,其产能达到每年2.82×10⁹ m²,生产的纸面石膏板具有质轻、耐火、隔热、保温、隔音、施工成本低等诸多优点,广泛应用于建筑装修装饰^[40]。石膏砌块属于新型墙体建筑材料,在国内山东、河北、贵州等地发展迅速,国内代表性的石膏砌块生产厂家有北京力博特科技有限公司、安徽双特新型建材有限公司等。尽管磷石膏在建筑材料中的应用潜力巨大,但仍面临大众接受度低、产品附加值低、地方政策差异等问题,导致产品市场开拓缓慢。磷石膏除主要组分硫酸钙外,磷石膏中还含有氟化物、磷酸等。因此,磷石膏又用于制备硫酸、硫酸钙、硫酸铵等化工产品,如王辛龙等^[41]利用硫基还原分解磷石膏的工艺制硫酸,不仅降低磷石膏分解温度,还提高烟气中二氧化硫质量浓度。王艾文^[42]以磷石膏为原料,利用常压盐溶液法制备硫酸钙晶须。张兴法等^[43]以磷石膏为原料,采用复分解反应方式高效制备硫酸铵及碳酸钙,产品质量达到有关标准。综上所述,磷石膏综合利用尽管取得了一定的成果,但在技术转化、产品开发、市场推广及政策标准支持等方面还存在诸多挑战。

以上对废石、磷尾矿、磷石膏的综合利用技术的补充见表1。

3) 科学绿化分类施策,优化土地增加碳汇。不同矿区开采后的生态系统受损程度和生态修复需求不一,不可盲目的照搬现成修复方案进行大面积的工程绿化,而应引入NbS(基于自然的解决方案)理念^[63],根据矿区土地条件科学规划,遵循生态优先、系统修复、统一规划、分类施策、防治结合、综合治理的原

表 1 磷化工产业固废资源综合利用技术				
Table 1 Comprehensive utilization technology of solid waste resources in phosphorus chemical industry				
固废类型	综合利用	作者	方法	文献
废石	制备复配团球矿	贵州磷化集团	分采后的低品位a层矿，通过浮选可制备复配团球矿，团球矿能用于生产黄磷。	[44]
	作充填材料	杨馨等	在磷尾矿、水泥、粉煤灰中加入发泡剂来制备发泡充填体，在最佳配比条件下制备出的发泡充填体试块抗压强度为2.48 MPa，达到行业标准的A10、C2级标准，符合一般采矿区充填要求。	[45]
	制备路基材料	罗海兵等	探索磷尾矿砂在道路基（垫）层中应用的可能性，对磷尾矿砂的来源及工程特性进行了分析，研究表明，磷尾矿砂是一种很有应用前景的道路基（垫）层新材料。	[46]
	制备混凝土	赖小莹等	以磷尾矿为原料，加入硫磺和聚苯乙烯等制备出一种新型混凝土。	[47]
	制备免烧砖	陈炜	将磷尾矿、水泥和水混合搅拌均匀，投入模具中压制成型制备免烧砖。	[48]
	制备陶粒	张立等	研究磷尾矿掺量对陶粒性能的影响规律，在尾矿掺量为30%时，陶粒性能最佳，达到900级高强粉煤灰复合陶粒标准。	[49]
	再选回收磷	赵友男	对安徽P ₂ O ₅ 质量分数为14.84%的某低品位胶磷矿进行重浮联合分选工艺研究，得到 P ₂ O ₅ 品位30.50%，回收率为64.88%的磷精矿。	[50]
	化学法提取	孔繁振	利用铵盐选择性浸出的技术，从磷尾矿中提取元素，制得的Mg(OH) ₂ 、MgO和轻质CaCO ₃ 具有较高的附加值和工业应用前景。	[51]
	制备土壤调节剂	倪志强	利用磷尾矿、膨润土、石灰等矿质资源制备土壤调节剂，该调节剂可显著改善酸性土壤的理化性质，从而增加土壤及植被的碳汇能力。	[52]
	制备钙镁磷肥	郑建国等	对磷酸活化磷尾矿制取聚合态钙镁磷肥的工艺条件研究发现，通过高温分子间脱水聚合的方法可以将磷尾矿合成聚合态钙镁磷肥。	[53]
磷尾矿	制备中量元素肥	鲁振亚等	将崩解助剂与磷尾矿粉进行混合造粒，烘干，即可得到颗粒硬度大、崩解迅速的中量元素肥料，能显著提高作物干物重，促进作物对镁等养分的吸收利用。	[54]
	制备复合肥料	汤建伟等	采用硫酸与磷尾矿反应，在反应产物加入其他氮、磷、钾源得到混合料浆，喷浆造粒即可制得复合肥料。	[55]
	用于生态修复	陈谦等	将改性后的磷石膏应用于高羊茅的生长。研究发现与普通化肥相比，改性后的磷石膏有利于促进高羊茅的生长，能够使得牧草更加优质，改善草原环境。	[56]
	用于矿区充填	杨晓攀	通过药剂改性的方法改善磷石膏的性能，并利用改性后的磷石膏充填废弃矿区。	[57]
	制备水泥缓凝剂	单俊鸿等	通过水洗去除磷石膏中的可溶性磷和氟，改性后作为水泥缓凝剂。	[58]
	制备硫酸钾	刘晓红等	将磷石膏与碳酸氢铵、氯化钾、有机溶剂反应得硫酸钾，硫酸钾收率提高到90%。	[59]
	制备吸附剂	LI 等	研究利用磷石膏改性生物炭对水溶液中的Sb（V）进行去除，发现改性生物炭的最大 Sb（V）吸附量为8 123 mg·kg ⁻¹ 。同时，这种改性生物炭还可以用作酸性矿井水的pH缓冲剂。	[60]
	制备复合材料	LU 等	将合成的针铁矿浸渍在磷石膏（PG）表面，开发了一种新型针铁矿改性磷石膏（GPG）复合材料，并将该材料应用于去除水中多西环素。	[61]
磷石膏	制备固化剂	HUANG 等	研究了一种新型改性β-半水石膏胶结材料（MPG），用于固化铅污染土壤，其对污染土中铅的固化效果优于MPG和硅酸盐水泥（PC）。	[62]

则，挑选适宜当地环境的高碳汇树种，并充分依靠自然力量改善矿区生态环境^[64]，从而实现矿区的减排增汇。矿山的生态系统有其自身发展演化的客观规律，具有自我调节、自我净化、自我恢复的能力。在对其的

修复过程中,需按照生态系统的内在规律,统筹运用自然恢复和人工修复两种手段,对矿山实际情况因地制宜、分区分类施策。如对于具备自然恢复条件的,可以直接采用被破坏的矿区本土慢生植物及乡土植物,其较强的适应能力能大幅增加存活率,从而减少工程投入。而对于土壤贫瘠、肥力不足、酸性等受损严重的矿区,仅依靠自然恢复难以达到效果,需要主动采取科学的人工引导修复措施,根据海拔高度的不同和植株碳汇能力的差别,进行碳汇苗木的统筹种植,从而加快生态系统碳循环恢复进程。吴宜珊^[65]针对矿山土壤板结、酸碱度失衡、重金属污染等问题,通过植株筛选、有机物质和微生物引入等人工措施修复后,使土壤肥力、通透性、微生物活性等得到增强,为后期自然恢复提供了可行性。矿山生态修复的因地制宜、分类施策表现在利用矿区优厚土地空间条件在阳坡面发展“光伏+生态修复”模式^[66],如“光伏+果树”“光伏+药材”“光伏+牧草”“光伏+农作物”等多种模式;在阴坡面则采取种植雪松、冬樱花、石楠、火棘等经济作物模式。这种生态环境修复模式能在解决矿山生态环境问题的同时充分利用闲置土地,提升土地价值,具有减碳增汇的效果,且生态效益高、经济价值高、产业延续性好。总而言之,对矿山科学分类修复和科学合理利用土地是决定矿山生态系统碳储量和影响碳循环的一种重要手段。

综上所述,通过实施新能源开发、固废资源综合利用和多元化生态修复等途径,能推动绿色用电、提高固废资源利用效率、增强植株的碳汇及土壤的固碳能力,大幅减少过程碳排放,极大助力磷矿山绿色低碳发展。其中固废综合利用不仅能够缓解资源短缺、减少环境污染,还能通过技术创新和商业模式创新提高废弃物转化的效率与效益,同时对减少碳排放具有显著的协同效应,是磷化工产业实现碳达峰碳中和的关键抓手。

2 “双碳”目标下磷化工的发展

2.1 磷化工面临的问题

磷化工板块利用上游开采的磷矿进行磷系产品的生产,其在现代农业和新能源领域扮演着关键角色,具有重要的经济和战略价值。然而,在其生产链中,磷矿浮选、化石燃料(汽油、柴油、一般烟煤)燃烧、净购入电力消耗、硫酸生产过程辅料碳酸钠分解、硫酸与磷矿石反应碳酸钙分解、磷酸与钙粉反应碳酸钙分解等环节都伴随着大量的碳排放,其中化石燃料燃烧和净购入电力消耗环节所产生的碳排放在整个产业链中占比较大。尽管近年来,磷化工采取了提能增效、清洁能源替代等措施进行,但碳减排效果并不显著。相比于磷矿山,磷化工板块碳排放较为集中,且生产过程中大部分 CO_2 都跟随系统烟囱排放易于收集,但由于烟气中还含有 SO_2 、 NO_x 、硫酸雾、颗粒物、氟化物等组分,普通的技术难以实现对 CO_2 分离处理。因此,磷化工在新时期生态文明与“双碳”战略更高要求的背景下面临着新的挑战,急需寻找新技术以实现生产过程中 CO_2 的分离处理。由于 CCUS (Carbon capture, utilization and storage) 技术能够从发电和工业过程相关的排放源中分离 CO_2 ,或直接从大气中捕集 CO_2 ,并将其转化为有用产品或永久性封存,所以 CCUS 技术对磷化工产业来说,不仅是实现碳减排的重要手段,也是推动产业转型升级、提升竞争力和适应环境政策的关键技术。通过 CCUS 技术的应用,磷化工产业能够在保障经济发展的同时,为实现全社会的碳中和目标做出贡献。

CCUS 技术体系较为复杂,涉及到多技术与多行业的协同合作,涵盖了 CO_2 捕集、 CO_2 运输、 CO_2 利用和 CO_2 封存 4 个环节(如图 3)。其中 CO_2 捕集环节作为 CCUS 技术链条中的前端,是 CO_2 运输、利用与封存的基础,也是 CCUS 技术链条中成本最高的阶段^[67]。在 CO_2 捕集环节,随着技术推陈出新,在 CCUS 技术的内涵和外延不断丰富与拓展下,形成以传统 CCUS 技术为主,负碳技术为辅的完整技术体系。但由于负碳技术、 CO_2 运输、 CO_2 封存及地质利用受技术成本及应用场景限制,只能在部分行业使用。而化工利用和生物利用技术,可将 CO_2 用于制备碳酸饮料、白炭黑、低碳烃、碳纳米材料、生物肥料等附加值较高的产品^[68-69],能提升 CCUS 技术的经济性和实用性,在行业碳减排中经常与 CO_2 捕集技术联用。

目前,由于不同工业装置排放烟气的组分及 CO_2 体积分数存在差异,尚未有任何一种 CO_2 捕集方法可以单独高效解决所有碳捕集问题,每种方法都有优缺点和各自的适用场景^[70]。因此,在特定的烟气场景下选择合适的捕集方法至关重要。根据文献对比分析^[71],燃烧前捕集方法主要运用于整体煤气化联合循环发电系统(IGCC);富氧燃烧捕集在现有或新的发电厂中应用较多;化学链捕集技术成熟度较低,国内尚处于实验研究阶段;燃烧后捕集是目前全球最成熟的工艺技术,被广泛应用于工业和电厂等多种场景。常见的燃烧后

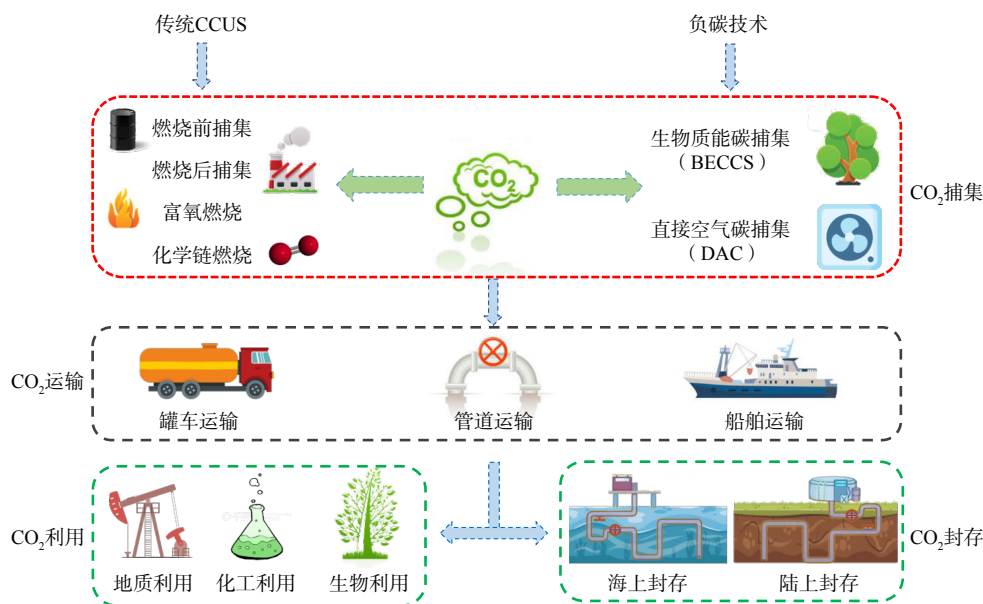


图3 CCUS 技术组成

Fig. 3 Carbon Capture, Utilization and Storage technical components

碳捕集技术主要包括化学吸收法、物理/化学吸附法、膜分离法，但在应用中发现存在吸收剂损耗大、吸附剂容量有限、膜易堵塞以及捕集成本高等问题^[1]。结合磷化工烟气特点，其中含有的颗粒物、氟化物、氨等污染物会对化学吸收、吸附或膜分离所用的溶剂、吸附材料、膜等造成一定损害，从而影响脱碳效率，且对场地建设及吸收溶剂、吸附材料、膜的处理还会进一步增加成本。因此，从CCUS中寻找能在充分利用磷化工烟气特点及现有场地条件的技术，对磷化工实现碳减排至关重要。

2.2 磷化工碳减排路径

燃煤电厂、煤化工、石油化工均是高碳排放行业，其烟气中均含有 SO_2 、 NO_x ，而磷化工排放的 CO_2 体积分数相比高碳排放行业要低，但其烟气组成中除 SO_2 、 NO_x 外，还含有硫酸雾、氟化物等成分，这加大了磷化工分离捕集 CO_2 的难度。微藻，作为最古老的光合生物，能直接利用太阳能进行光合固碳，并将捕获的 CO_2 转化为高价值生物质并用于生产生物化工产品（生物燃料、保健食品、蛋白饲料等），被认为是绿色清洁、可持续的CCUS技术之一^[72-73]。有研究表明，微藻具有独特优势：其环境适应性强，能耐受多种极端环境^[74]；固碳效率高，1 t微藻可以固定1.83 t CO_2 ，且光合固碳效率高于陆生植物的10倍以上^[75-76]；一些培养驯化后的微藻可以直接耐受工业烟气，并直接利用烟气中 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 作为其生长所需的碳源、氮源、硫源，实现在固碳同时减排 NO_x 、 SO_x 污染物^[77-78]。如中国石油化工股份有限公司利用“微藻脱硝组合工艺”将烟气中 NO_x 高效固定转化为 HNO_3 ，然后用 HNO_3 作为氮源直接养殖微藻，脱硝率达到95%^[79]。DU等^[80]采用小球藻*C.pyrenoidosa*XQ-20044处理不同比例的纯 SO_2 、 CO_2 和 NO 时发现，小球藻对 SO_2 、 CO_2 和 NO 的去除率分别达100%、95.9%和84.2%。固碳后的微藻生物质中富含蛋白质、脂质、不饱和脂肪酸、色素等活性物质，可进一步加工生产饲料蛋白、生物能源、保健食品等高价值产品，从而产生经济效益、降低生产成本^[81]。另有研究表明，微藻制成的生物肥料以及藻渣制备的土壤改良剂可以有效改善改良土壤土质及养分，是优良的有机生物肥料。此外，微藻还可以用于处理和净化工业废水。YADAV等^[82]报道利用工业废水和烟气养殖微藻，有效固碳的同时能显著去除水中污染物，小球藻对化学需氧量（COD）、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 的去除率分别达到91.9%、98.8%、95.9%和100%。KAVISRI等^[83]研究发现海洋源杜氏盐藻表面具有的活性官能团和特定的微观结构能够吸附水体中的氟离子，并清楚地揭示了F离子的去除机理，这表明微藻可用于废水中氟化物的生物修复。王月瑶等^[84]研究表明，微藻生物处理废水技术不仅实现资源回收，同时具有脱氮除磷效果及良好的碳减排价值，是实现处理化工废水“碳中和”的重要手段。以上研究表明，利用微藻对工业烟气固碳的研发工作已经基本完成上下游技术覆盖，微藻技术对各行业烟气的耐受性也得到了初步验证，相关产业化的应用也已有开展。

到目前为止,我国已经相继开展了利用微藻规模化固定 CO_2 的项目示范。2016 年浙江大学在鄂尔多斯市鄂托克旗乌兰镇螺旋藻产业园区建立了“二氧化碳烟气微藻减排技术”项目示范工程,固定烟气 CO_2 能力达 $1 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[85]。2021 年深圳华润海丰电厂建设国内首个立柱式微藻光合反应器转化燃煤电厂烟气 CO_2 的工程示范,能实现固定烟气 CO_2 达 $2 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[86]。中石化石油化工科学研究院有限公司历经十余年从微藻选育养殖、烟气减排、采收加工到生物质利用进行了全技术链研发,形成了成套的技术储备^[87]。利用微藻对烟气减排工业示范的成功开展,为其他行业开展微藻技术固碳提供了参考及借鉴。

因此,结合以上对微藻研究及应用可以得出,利用微藻固碳技术解决磷化工产业碳排放问题是可行且有效的减排方法。磷化工采用该技术可以在不调整生产工艺的情况下,直接利用烟气及废水中的碳、氮、磷源作为微藻生长的营养来源,实现减污固碳的目的。固碳后的微藻还能进一步高值化生物利用,为磷化工降低技术使用成本。目前微藻固碳技术实际应用成本还比较高,其在磷化工的经济可行性还需进一步评估。

下面以云南磷化集团磷化工版块为例,对微藻固碳技术应用的经济性进行探讨。近五年云南磷化集团磷化工版块年平均碳排放量为 $16.36 \times 10^4 \text{ t}$,假设 CO_2 能完全被微藻固定,需要微藻量为 $8.94 \times 10^4 \text{ t}$,此处微藻养殖选用磷化工现有的露天污水收集池改造成露天跑道池。BANERJEE 等^[88]指出露天跑道池中微藻生产成本约为 $540 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$,其中成本包含场地建设及水、碳源等微藻所需营养物。JUDD 等^[89]报道了利用烟气/污水作为营养源养殖微藻并生产生物质产品,成本可降低 35%~86%。因此,采用磷化工烟气、废水及现有场地进行微藻养殖,其成本约为 $270 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ (以 50% 计算),则生产 $8.94 \times 10^4 \text{ t}$ 微藻成本约为 2.41×10^7 美元。至于对微藻的采收干燥过程的成本,由于可直接利用磷化工烟气余压、蒸汽余热用于养殖过程的温度控制、后期采收及生物质干燥,在此进行忽略。微藻中的螺旋藻蛋白质质量分数可达 60%~70%,而我国是螺旋藻商业化生产规模最大的国家之一^[81],因此利用微藻作为饲用蛋白或添加剂应用市场可观。假设以 1 t 螺旋藻经过适当的加工和提取可得 0.70 t 饲用蛋白,其售价参考豆粕 $3\ 026 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, $8.94 \times 10^4 \text{ t}$ 微藻制成饲用蛋白可销售得 1.89×10^8 元,约 2.64×10^7 美元。通过经济性估算可以看出,微藻生物质利用带来的经济效益能极大降低磷化工利用微藻固碳的成本,但以上数据均为理想条件下的估算,实际运行过程中微藻藻种的选择、产量、固碳效率、微藻转化率、市场需求及价格波动都会极大影响成本,所以实际成本评估还需根据实际运行情况进行分析。目前,迫切需要微藻 CCUS 技术工业示范的经济性、可行性验证,从而不断提高经济效益,助力产业化发展。不过可以预见,微藻生物质利用在未来会具有很好的市场前景。

3 “矿化”一体减排增汇模式的探索

根据以上对磷矿山和磷化工碳减排路径的探索,可以发现碳减排已经贯穿于磷矿山与磷化工的各方面和全过程,无论是磷矿采选还是磷石膏、磷尾矿资源化利用等环节都在共同发力,但二者并未形成一个互补互惠的整体,资源利用还不够全面。为此,为使磷化工产业能在减排增汇道路上打造核心竞争力,可将上游磷矿山与下游磷化工碳减排路径链接在一起,形成“矿化”一体减排增汇模式(如图 4)。这种模式能更好的统筹磷矿山与磷化工低碳转型关系,能在保持生产平稳增长的同时控制碳排放量,在处理好与上下游的关系同时实现本行业与相关行业的协调发展。

“矿化”一体减排增汇模式是通过利用矿区内优越的太阳能和风能资源,发展分布式光伏发电、分散式风力发电等多能互补的新能源供电模式,并将发电、输配电、负荷、储能聚合,从而打造磷矿山新能源绿色新型“源网荷储一体化”的电力系统,以实现可再生能源并网后电网运行的稳定性及灵活性,为矿区开采及磷化工生产提供更安全更经济的绿电,但在使用绿电之前,还需大力提高电气化设备比例,有序推进“以电代煤、以电代油”,从而实现生产的绿电替代。其中对“源网荷储一体化”智能电力系统的建设,既是深化能源绿色低碳转型、加快构建新型能源体系的必由之路,又是推进磷化工全产业链控能降本减碳增绿提效、实现全面可持续发展的必然选择^[90]。磷化工在使用绿电的同时,应大力推进微藻固碳技术,通过培育驯化稳定、高效且适应磷化工烟气特点的微藻以及构建微藻生物质资源化利用产业链,实现降本创收。对于生产过程中产生的磷尾矿及磷石膏,还需大力攻关大宗固废资源综合利用关键技术,将磷尾矿和磷石膏结合新材料、新工艺制备生态修复材料、土壤调理剂、建筑材料以及生产低碳矿物肥料,其中土壤调理剂、生态修复材料与微藻制成的生物肥料、土壤改良剂可回用于矿山的生态修复,在提升固废资源化利用效率的同时实现了减排增汇的效果。最后,依托已有的矿区光伏条件,建立“光伏+”矿山生态修复模式,形成多元化产业体系,构建完善的产业链条,在优化土地利用的同时创造矿区的生态效益和经济价值。

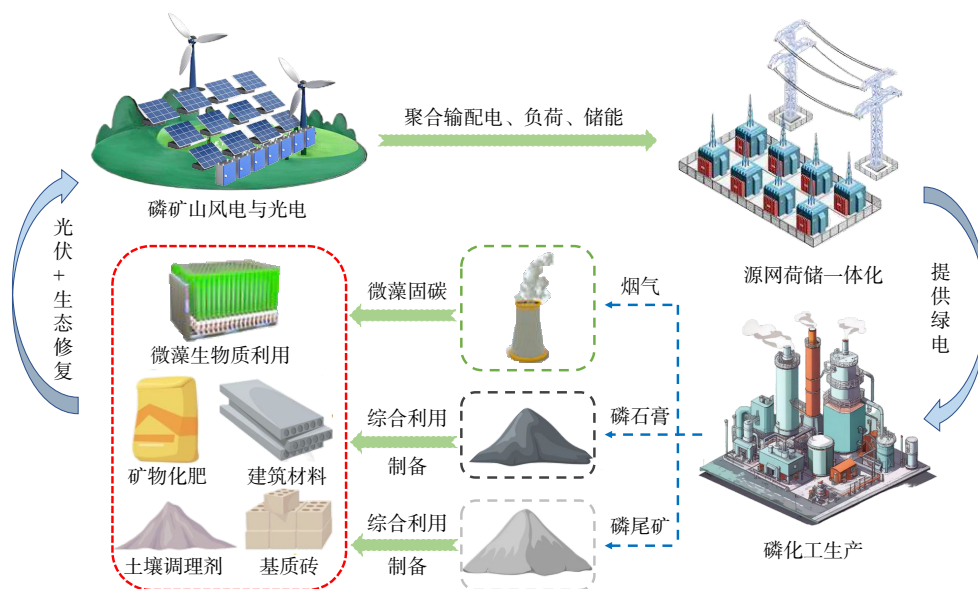


图4 “矿化”一体减排增汇模式

Fig. 4 "Mineralization" model for emission reduction and sink enhancement

“矿化”一体减排增汇模式的构建，是在充分考虑生态性和可持续性发展的基础上，打造“源网荷储一体化”新能源电力系统，从根本上解决煤炭、柴油等化石能源使用带来的高能耗、高排放的难题。围绕矿山和化工生产过程中的碳排放，通过固废资源化利用、光伏+生态修复、清洁能源开发、微藻固碳等措施，解决固体废弃物大量堆置，生态修复模式单一、烟气固碳成本高等问题。进而形成磷矿山与磷化工减碳增汇的绿色生产方式，推动磷化产业实现从低碳、近零碳到零碳的转变。随着技术的不断进步和政策的推动，“矿化”一体减排增汇模式在实现“碳中和”方面具有极大的潜力与发展前景。

4 结论

1) 新能源开发、固废资源综合利用和多元化生态修复等措施是磷矿山实现碳减排的有效途径，其中废石、磷尾矿、磷石膏的综合利用是磷化工产业高效绿色低碳发展的重要环节，但由于许多综合利用技术缺乏明确的行政许可导致难以大规模的复制推广。因此，还需相关行业主管部门制定磷尾矿、磷石膏资源化综合利用落地的政策体系，并完善标准规范，使磷尾矿、磷石膏资源化综合利用有章可循。在新能源开发方面，矿山光伏、风电发展过程中面临经济成本、电网改造技术、储能技术等方面的挑战，在资金补贴、技术创新等方面还需政府给予更多支持。

2) 微藻固碳技术能很好地解决磷化工碳排放问题，但由于磷化工烟气的特点，微藻的选择还需进一步研究，驯化适合磷化工烟气特点的微藻将是磷化工能否高效固碳的关键。此外，因经济成本原因，要大力发展微藻下游市场，确保经济可行性仍是微藻生物技术商业化应用的主要障碍，顶层设计、政策激励、技术开发、生物质综合利用及市场发展等将成为优化成本效益的关键因素。

3) “矿化”一体减排增汇模式将上下游减排措施连接，形成了碳减排产业链的循环，大幅降低了生产上对化石能源的依赖，在降低磷化工对净购入电力消耗的同时依靠固废资源化利用反哺矿山生态修复，创造一定生态效益。随着全国碳市场逐渐成熟并结合碳价长期看涨的趋势，“矿化”一体减排增汇模式在未来有可能被纳入 CCER 等交易市场并获取额外收益。

参考文献

- [1] 胡道成, 王睿, 赵瑞, 等. 二氧化碳捕集技术及适用场景分析[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 502-513.
- [2] 郝俊华, 史庆元. 碳中和目标下绿色矿山发展路径研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 256-259.
- [3] 樊大磊, 李富兵, 王宗礼, 等. 碳达峰、碳中和目标下中国能源矿产发展现状及前景展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 1-8.
- [4] 袁俊宏. 我国磷资源现状及资源保障程度分析[J]. 中国矿业, 2003(4): 6-11.

- [5] 徐莹. 基于碳达峰和碳中和背景下的磷化工产业绿色低碳节能减排研究[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(1): 156-158.
- [6] 梅毅, 聂云祥, 谢德龙, 等. 磷化工行业高质量发展是“双碳”目标的必然要求[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(7): 3-3.
- [7] 孙志立, 黄平, 牛仁杰, 等. 碳达峰、碳中和背景下磷化工产业绿色低碳节能减排的研究与探讨[J]. 肥料与健康, 2022, 49(2): 8-12.
- [8] 杨金中, 许文佳, 姚维岭, 等. 全国采矿损毁土地分布与治理现状及存在问题[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 83-89.
- [9] 王根锁, 刘宏磊, 武强, 等. 碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 321-328.
- [10] 杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 1-9.
- [11] 武强, 李松营. 闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 21-32.
- [12] 刘宏磊. 矿山环境修复治理和开发利用模式的理论与实践研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [13] 郭冬艳, 杨繁, 高兵, 等. 矿山生态修复助力碳中和的政策建议[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(10): 50-54.
- [14] 周文亮, 白俞. 矿山生态环境修复方法探究[J]. 世界有色金属, 2019, 21: 220-221.
- [15] 于昊辰, 卞正富, 陈浮, 等. 矿山土地生态系统退化诊断及调控研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 214-223.
- [16] 毛喆, 杨涛涛, 黄丽颖, 等. “双碳”目标下的矿山生态修复技术研究进展[J]. 能源与节能, 2023(6): 119-122.
- [17] BRADSHAW A. Restoration of mined lands - using natural processes. Ecol Eng 8: 255-269[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [18] 王保明, 王兴龙, 杨英, 等. 磷尾矿综合利用现状及研究进展[J]. 无机盐工业, 2024: 1-17.
- [19] 祝国亮. 磷石膏的综合利用及其在环境领域的应用研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2024, 39(7): 65-70.
- [20] 牟初夫, 王礼茂, 屈秋实, 等. 主要新能源发电替代减排的研究综述[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2323-2334.
- [21] DOLJAK D, POPOVIC D, KUZMANOVIC D. Photovoltaic potential of the city of Poarevac[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73(6): 460-467.
- [22] 马迅, 张爱伟, 黄磊, 等. “双碳”目标下矿山生态修复减排增汇措施研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 109-115.
- [23] 张松波. 我国金属矿山碳排放现状及降碳路径探讨[J]. 冶金经济与管理, 2022(4): 8-11.
- [24] 尹岩, 郝凤明, 王娇月, 等. “碳中和”背景下我国矿山生态环境修复研究现状及发展趋势[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(11): 7-12.
- [25] 李沛, 刘泳佚, 张茹星. 不同 pH 值条件下高岚河流域磷矿废石中磷素的浸出试验研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 210-219+229.
- [26] 姜利国, 梁冰, 张梦舟, 等. 持续淋溶对磷矿废石磷素浸出特性影响的研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(6): 53-55+68.
- [27] 张梦舟, 徐曾和, 梁冰. 三峡库区香溪河流域磷矿废石磷素释放特性研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 840-848.
- [28] 沈丹丹. 建筑全生命周期碳排放量计算模型[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2162-2166.
- [29] 郭亚林, 郭春. 铁路隧道施工期碳排放计算模型研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(6): 5-9.
- [30] 裴明松, 刘林, 李小伟, 等. 中低品位磷矿废石处置方案优选[J]. 采矿技术, 2023, 23(1): 205-209.
- [31] 周倩倩, 周克清. 磷尾矿资源综合利用现状研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(9): 67-70.
- [32] 刘润哲, 刘丽芬, 欧志兵, 等. 磷尾矿资源化利用研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(2): 52-56.
- [33] 胡宏, 李艳. 高镁磷尾矿渣制取磷镁复合肥料的试验研究[J]. 贵州化工, 2009, 34(2): 20-21+25.
- [34] 郑君花, 王修俊, 冯廷萃, 等. 利用磷尾矿生产含磷有机肥料的固体发酵研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(14): 61-65+79.
- [35] 周云刚, 何寅寅. 我国磷石膏综合利用现状与建议[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(5): 11-16.
- [36] 马健, 沈浩, 郑之银. 安徽六国化工股份有限公司磷石膏生态环境整治与绿色发展之路[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(7): 30-34.
- [37] 王怡洁. 磷石膏资源化利用必须走价值化产业化市场化之路[N]. 中国建材报, 2021-03-11(1).
- [38] CHEN Y, JI X P, CUI Z F, et al. Investigation on engineering characteristics of lime-stabilized phosphogypsum subgrade filler[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(4): 4020-4028.
- [39] 吴洪生, 陈小青, 马文舟, 等. 磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1077-1087.
- [40] 黄得杨, 陈永超, 崔江华, 等. 不同环境条件对纸面石膏板物理性能影响试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(9): 100-102.
- [41] 王辛龙, 张志业, 杨守明, 等. 硫黄分解磷石膏制硫酸关键技术及工程进展[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(12): 24-28.
- [42] 王艾文. 磷石膏常压无氯盐溶液法制备硫酸钙晶须[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [43] 张兴法, 刘守强, 陈敏. 用磷石膏制备硫酸铵和氯化钙的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002(1): 67-70.
- [44] 贵州省人民政府. 瓮福磷矿白岩矿区穿岩洞矿段年产优质磷矿石超 360 万吨[EB/OL]. [2024-04-07]. https://www.guizhou.gov.cn/ztzl/ssgybzxdflsxgydtp/zxdt/202404/t0240407_84151037.html, 2024.
- [45] 杨馨. 磷尾矿基发泡充填体制备及性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [46] 罗海兵, 闫红民. 磷尾矿砂在道路基(垫)层中的应用[J]. 公路, 2005(5): 146-148.
- [47] 赖小莹, 何寅寅, 张晖, 等. 磷矿浮选尾矿在硫黄混凝土制备中的应用研究[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(5): 47-49.
- [48] 陈伟. 一种免烧砌块的生产方法: CN00133264.3[P]. 2003-06-11.
- [49] 张立, 尤大海, 胡修权, 等. 磷尾矿与粉煤灰制备高强陶粒试验研究[J]. 非金属矿, 2023, 46(4): 13-17.
- [50] 赵友男. 低品位胶磷矿重浮联合分选工艺研究[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2020.
- [51] 孔繁振. 磷矿浮选尾矿煅烧铵盐法综合回收镁、磷试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [52] 倪志强, 邵斌斌, 石伟琦等. 供磷型土壤调理剂在酸性土壤应用效果研究[J]. 热带作物学报, 2018, 39(4): 809-815.
- [53] 郑建国, 于南树, 刘永秀, 等. 磷活化磷尾矿制聚态钙镁磷肥的工艺条件研究[J]. 无机盐工业, 2020, 52(2): 43-46.
- [54] 鲁振亚, 余赞, 吴静等. 一种基于磷矿浮选尾矿的粒状中量元素肥及其制备方法: CN113387744B[P]. 2022-12-02.
- [55] 汤建伟, 王保明, 刘咏, 等. 一种由磷尾矿直接生产复合肥料的方法: CN201610809513.6[P]. 2017-02-01.
- [56] 陈谦, 陈利轩. 磷石膏的改性及生态修复应用实验研究[J]. 高原农业, 2023, 7(6): 658-669.
- [57] 杨晓攀. 磷石膏作为矿坑新型生态修复填充材料的研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(6): 108-110.
- [58] 单俊鸿, 宋旸, 周明凯, 等. 改性磷石膏作水泥缓凝剂的研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(1): 119-123.
- [59] 刘晓红. 磷石膏制硫酸钾的新工艺[J]. 中小企业科技, 2001(9): 16-17.
- [60] LI L, LIAO L, WANG B, et al. Effective Sb(V) removal from aqueous solution using phosphogypsum-modified biochar. [J]. Environmental pollution, 2022, 301: 119032.1-119032.8.

- [61] LU M, WANG Y, JIAO W, et al. Eliminating waste with waste: Removal of doxycycline in water by goethite modified phosphogypsum[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 63: 105411.
- [62] HUANG X Q, WANG R T, ZHAO X R, et al. The curing performances of lead-contaminated soil conditioned with modified phosphorus β -hemihydrate gypsum cemented materials[J]. *Discover Environment*, 2024, 2(1): 29-35.
- [63] 安岩, 顾佰和, 王毅, 等. 基于自然的解决方案: 中国应对气候变化领域的政策进展, 问题与对策[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(2): 184-194.
- [64] 杨崇曜, 周妍, 陈妍, 等. 基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索[J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 25-34.
- [65] 吴宜珊. 露天废弃矿山生态修复技术的优化[J]. *石材*, 2023(11): 7-9.
- [66] 全师渺, 郝凤明, 王娇月, 等. 在矿山废弃地上发展可再生能源的潜力——以辽宁省为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2803-2812.
- [67] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H D, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[J]. *Economics & Politics of Climate Change*, 2005.
- [68] 王栋. CO₂ 捕集与资源化利用技术研究进展[J]. *化工环保*, 2021, 41(4): 481-484.
- [69] SAMEERA W, JINGXIN W, BADIE M, et al. Carbon dioxide conversion to nanomaterials: methods, Applications, and Challenges[J]. *ENERGY & FUELS*, 2021, 35(15): 11820-11834.
- [70] 温磊, 韩伟, 车春霞, 等. 燃烧后二氧化碳捕集技术与应用进展[J]. *精细化工*, 2022, 39(8): 1584-1595+1632.
- [71] 程剑峰, 白秀佳, 徐强. 双碳目标下我国碳捕集技术研究进展[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(8): 26-31.
- [72] NGUYEN L N, VU M T, VU H P, et al. Microalgae-based carbon capture and utilization: A critical review on current system developments and biomass utilization[J]. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2023, 53(2): 216-238.
- [73] 莫壮洪, 朱俊英, 李煦, 等. 微藻生物固定 CO₂ 耦合污染物减排技术应用及展望[J]. *石油学报*, 2024, 40(5): 1430-1445.
- [74] HU Q, SOMMERFELD M, JARVIS E, et al. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances[J]. *Plant Journal*, 2010, 54(4): 621-639.
- [75] CUI H, YANG Z, LU Z, et al. Combination of utilization of CO₂ from flue gas of biomass power plant and medium recycling to enhance cost-effective Spirulina production[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31: 2175-2185.
- [76] WANG B, LI Y, WU N, et al. CO₂ bio-mitigation using microalgae[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 79(5): 707-718.
- [77] 张虎, 谭英南, 朱瑞鸿, 等. 微藻生物固碳技术在“双碳”目标中的应用前景[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(4): 390-400.
- [78] 张效铭. 耐高浓度 CO₂ 小球藻的鉴定及固碳性能强化研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- [79] 苏士焜, 郭宝文, 宗保宁, 等. HNO₃/H₂O₂ 烟气脱硝兼微藻养殖组合工艺[J]. *石油炼制与化工*, 2022, 53(1): 105-111.
- [80] DU K, WEN X, WANG Z, et al. Integrated lipid production, CO₂ fixation, and removal of SO₂ and NO from simulated flue gas by oleaginous *Chlorella pyrenoidosa*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(16): 16195-16209.
- [81] 莫壮洪, 朱俊英, 荣峻峰, 等. 微藻生物固碳技术在碳中和中的应用及潜在价值[J]. *石油炼制与化工*, 2024, 55(1): 98-111+4.
- [82] YADAV G, DASH S K, SEN R. A biorefinery for valorization of industrial waste-water and flue gas by microalgae for waste mitigation, carbon-dioxide sequestration and algal biomass production[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 688: 129-135.
- [83] KAVISRI M, ABRAHAM M, MOOVENDHAN M. Effective removal of fluoride ions from aqueous solution by marine microalgae as natural biosorbent[J]. *Chemosphere*, 2022, 313: 137312.
- [84] 王月瑶, 徐永洞, 刘思宇, 等. 石油化工废水生化转化技术与碳减排潜力研究进展[J]. *石油学报*, 2023, 39(6): 1423-1433.
- [85] 龙菲平, 迟庆雷. 微藻生物固碳技术研究和应用情况[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2022(4): 126-129.
- [86] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国 CCUS 路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
- [87] 郭宝文, 李煦, 宗保宁, 等. 微藻固碳实现 CO₂ 减排与生物质增值[J]. *石油学报*, 2023, 39(3): 668-678.
- [88] BANERJEE S, RAMASWAMY S. Comparison of productivity and economic analysis of microalgae cultivation in open raceways and flat panel photobioreactor[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 8: 100328.
- [89] JUDD S, MOMANI A F, ZNAD H, et al. The cost benefit of algal technology for combined CO₂ mitigation and nutrient abatement[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 71: 379-387.
- [90] 马玲. 源网荷储一体化助力构建新型能源体系[N]. *中国石化报*, 2023-11-20(8).

(责任编辑: 陶雪)

Exploration and prospect of carbon reduction and sink increase in phosphorus chemical industry

CHEN Peng^{1,2}, HE Hong^{1,2}, TANG Jiankai³, XIAO Yanan^{1,2}, LIU Ping¹, LUO Anrong^{1,2,*}, MA Yixing³

1. Yunnan Phosphate Chemical Group Co. Ltd., Kunming 650600, China; 2. National Engineering Research Center of Phosphorus Resources Development and Utilization, Kunming 650600, China; 3. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650600, China

*Corresponding author, E-mail: 184282861@qq.com

Abstract In light of major strategic goals such as carbon peaking and carbon neutrality, achieving green, low-carbon, and sustainable development in the phosphorus chemical industry has become increasingly vital. This study, based on the current status of the phosphorus chemical industry, employed literature analysis and comparative analysis methods to examine the challenges faced by phosphorus mining and phosphorus chemical industries in carbon emission reduction. It explored the roles of new smart mining construction and the photovoltaic+ecological restoration model in enhancing carbon emission reduction and sink in phosphorus mining. Emphasis was placed on reviewing integrated solid waste utilization technologies, highlighting their significance in carbon emission reduction within the phosphorus chemical industry. Furthermore, it provided in-depth analysis on the significance and role of Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) in carbon emission reduction for the phosphorus chemical industry, and discussed the feasibility and economic viability of microalgae carbon fixation technology in its application. Finally, the future prospects of an integrated carbon emission reduction and sink model termed "mineralization" which combined phosphorus mining and phosphorus chemical industries were discussed, aiming to provide reference and guidance for phosphorus chemical enterprises in achieving carbon reduction and sink goals.

Keywords phosphorus mine; phosphorus chemical; carbon emission reduction; solid waste resource utilization; carbon sequestration by microalgae