文章编号:1674-2869(2026)03-0237-09

磷尾矿资源化利用研究进展

王丹妮,黄 敏,柯 璇,包申旭*
武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070

摘 要:磷尾矿作为磷矿浮选过程的主要固体废弃物,蕴含丰富的有价组分,但受限于其物理化学惰性,目前整体综合利用率依然偏低。在“双碳”目标与绿色矿山建设背景下,探索磷尾矿的低碳、高效利用路径是缓解我国磷资源开发压力、实现生态与经济效益统一的关键。磷尾矿的资源化利用主要包括四个层面:有价元素的提取与回收、建筑材料的制备、矿山采空区的充填,以及农业领域土壤改良剂、肥料或保水剂的应用。然而,当前技术仍面临能耗高、成本与材料性能难以协同和附加值低等问题。未来研究应重点发展清洁高值化与多固废协同应用,突破低成本、低能耗的活化与梯级分离技术;同时完善环境安全与生态风险评估机制,保障体系的长期稳定性,促进磷尾矿的规模化消纳与全量化综合利用,实现生态环境保护与资源可持续利用。

关键词:磷尾矿;有价元素;建筑材料;矿山充填;农业应用
中图分类号:TD926.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202603014

Research progress on resource utilization of phosphate tailings

WANG Danni, *HUANG Min*, *KE Xuan*, *BAO Shenxu**
School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: Phosphate tailings are the primary solid waste generated during the phosphate rock flotation process and contain abundant valuable components. Nevertheless, restricted by their physicochemical inertness, the overall comprehensive utilization rate remains relatively low. Against the backdrop of the dual carbon goal and green mine construction, exploring low-carbon and high-efficiency utilization approaches for phosphate tailings is critical to alleviating the pressure of phosphorus resource exploitation in China and balancing ecological and economic benefits. Utilization approaches of phosphate tailings are mainly divided into four categories: extraction and recovery of valuable elements; preparation of building materials; backfilling of mine goafs; and application as soil amendments, fertilizers or water retaining agents in agriculture. However, existing technologies still suffer from high energy consumption, difficulty in balancing cost and material performance, and low added value of products. Future research should prioritize development of clean high-value utilization and collaborative disposal of multiple solid wastes, and make breakthroughs in low-cost and low-energy-consumption activation and cascade separation technologies. Meanwhile, it is necessary to improve the evaluation mechanism of environmental safety and ecological risks, guarantee long-term stability of the utilization system, promote large-scale disposal and comprehensive full-quantity utilization of phosphate tailings, and realize ecological environment protection and sustainable utilization of resources.

Keywords: phosphate tailing; valuable element; building material; mine backfilling; agricultural application

收稿日期:2026-03-27
基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2025ZD1010806);湖北省技术创新专项(2025BCB038);中央高校基本科研业务费(104972025KFYgx0002)
作者简介:王丹妮,硕士研究生。Email:dnwang2025@163.com
***通信作者**:包申旭,博士,教授。Email:sxbao@whut.edu.cn
引文格式:王丹妮,黄敏,柯璇,等.磷尾矿资源化利用研究进展[J].武汉工程大学学报,2026,48(3):237-245.

磷化工作为战略性资源型产业，其产品涵盖磷酸、磷肥、农药、磷酸盐等，广泛应用于农业、食品、电子、新能源等领域，该产业布局高度依赖磷矿资源[1]。我国是世界主要的磷矿生产与消费国。随着高品位优质磷矿资源的逐渐减少，以及下游行业对高附加值产品需求的增加，国内磷矿选矿工艺逐步向以浮选法为主的方向转型[2]。然而，浮选过程会产生大量副产品磷尾矿，据统计，每生产1 t磷精矿会产生0.4~0.6 t磷尾矿[3]。目前全国磷尾矿年排放量高达数千万吨，历史累计堆存量达数亿吨[4]。磷尾矿的长期无序堆放不仅占用大量土地资源，且残留的磷、氟等元素在雨水淋溶作用下易引发水体富营养化和土壤污染，带来较大的环境风险[5]。因此，实现磷尾矿的清洁高值化利用，是磷化工行业可持续发展迫切需要解决的问题。

磷尾矿是磷矿石经破碎、磨矿以及浮选等工序产生的固体废弃物，一般呈棕黄色粉末状，主要矿物成分包括白云石、石英以及少量未回收的氟磷灰石等[6]。鉴于不同矿区以及选矿工艺存在的差异，其化学成分略有不同，表1是国内主要磷矿产区代表性成分的平均值[5,7]。磷尾矿中含有一定量的磷、镁、氟、硅等元素，具有二次富集提取的经济价值，同时具备激活利用的潜力[8]。如图1所示，目前磷尾矿综合运用主要集中在矿山采空区充填、建材制备、农肥生产以及高附加值化工提取等领域[3]，已实现部分消耗。然而，由于其主要矿物晶体结构稳定、反应活性低，导致规模化处理与高附加值转化水平受限。高温煅烧、强酸碱浸出等传统处理工艺，虽然能使磷尾矿反应活性大幅提升，但存在能耗大、成本高及潜在二次污染等问题。因此，当前研究正逐步转向多领域交叉以及多源固废协同利用，通过工艺与材料优势互补活化磷尾矿，从而探索磷尾矿绿色低碳、经济可行的无害化与资源化利用路径。本文梳理了上述主要应用方向的研究现状，分析了相关处理工艺的原理以及组分惰性导致的局限性，同时展望了磷尾矿未来的综合利用发展趋势。

表1 磷尾矿主要化学成分[7]

Table 1 Main chemical composition of phosphate tailings[7]

$\omega(P_2O_5)$	$\omega(CaO)$	$\omega(SiO_2)$	$\omega(MgO)$	$\omega(Al_2O_3)$	$\omega(Fe_2O_3)$	$\omega(F)$
5.0~10.0	15.0~40.0	10.0~30.0	10.0~19.0	0.3~2.0	0.2~3.0	0.7~1.1



图1 磷尾矿资源化途径[3]

Fig. 1 Resource utilization pathways of phosphate tailings[3]

1 有价元素提取

磷尾矿中包含大量的磷、钙、镁及少量的稀土等有价元素，都具有较高的回收价值。可借助化学或冶金手段打破原有矿物的包裹以及共生关系，以实现上述有价元素的二次富集与提取。近些年，相关研究方向逐渐从单一元素回收向多元素梯级分离及协同提取的综合技术体系转化[9]。

1.1 磷的富集与回收

磷在磷尾矿中主要以氟磷灰石的形式存在。目前，磷的富集与回收技术可分为直接提取法和反向富集法两类。

直接提取法将磷元素溶解到液相中，再通过沉淀法对磷进行回收。有研究采用盐酸进行浸出，调节pH值从浸出液中沉淀得到磷酸钙[10]。此工艺流程简单且反应条件温和，但酸液消耗量大，且产品中残留较多MgO杂质，导致产品纯度低（80%~85%）。为改善该问题，Yu等[11]开发了两段梯级浸出工艺，其工艺流程如图2所示。通过控制pH值与温度，第一段溶解白云石，实现镁的分离回收；第二段溶解氟磷灰石，通过沉淀得到磷酸钙总含量达97.9%的产品，MgO杂质含量仅0.11%，实现了产品品质的提升。该方法提升了磷的提取纯度及效率，并显著降低了酸的消耗量，是目前的主流方向。此外，为了提高工艺选择性，Yu等[12]将炼钢渣和磷尾矿高温重熔，使磷富集在固溶体中，再采用选择性浸出分离富集磷矿相，从混合渣中提取出约80%的磷。该方案将火法与湿法联

合，避开了原有杂质的干扰，实现了极高的选择性，但能源消耗相对较高。

反向富集法将尾矿中的白云石等脉石矿物与磷分离，从而使磷保留并富集在固相中。Zhou等[13]使用甲酸选择性地溶解磷尾矿中的白云石，得到的浸出渣中P_2O_5含量为28.90%，为磷尾矿(7.89%)的3.66倍。该方法流程简洁，可直接产出精矿，但提取效率受限于有机酸高昂的药剂成本。在进一步的研究中，Yin等[14]选用稀磷酸作为浸出剂，选择性地把尾矿中的白云石等杂质脱除进液相(白云石溶出率可达98%以上)，使未反应氟磷灰石以及硅酸盐富集为品位达26.1%(P_2O_5)的磷精矿。但尾矿中部分氟磷灰石和白云石相互交错，且浸出反应生成的不溶性磷酸盐会形成包裹层，限制矿物的彻底分离。

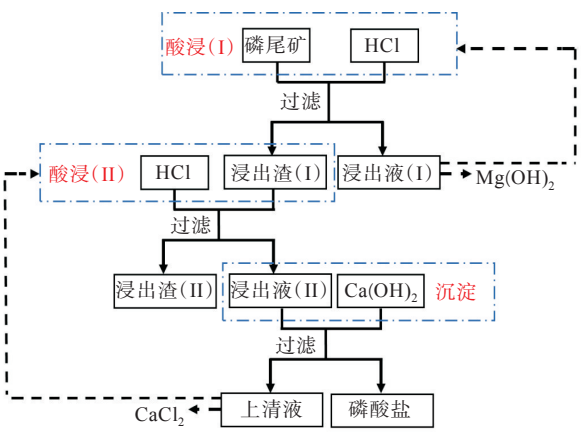

图2　两段浸出工艺流程图[11]

Fig. 2　Flowchart of two-stage leaching process[11]

1.2　钙镁的分离与利用

在磷尾矿中，镁元素绝大多数(超过99.8%)集中于白云石中，钙则主要赋存于白云石和少量残留的磷灰石、方解石中。将钙、镁元素有效分离并转化为高附加值产品，不仅是降低前端提磷工艺成本的手段，也是实现尾矿全量化、高值化利用的关键。目前，利用稀酸(如磷酸)溶解磷尾矿以实现钙、镁的分步分离转化已取得一定进展。Gu等[15]通过磷酸浸出生成磷酸二氢钙后，在特定温度(如80 ℃)下可分解生成磷酸氢钙沉淀；通过进一步阶梯调控浸出液的pH值，可依次获得二水合磷酸氢钙以及三水合磷酸氢镁或磷酸铵镁等化工产品[14,16]，流程如图3所示。

在“双碳”目标背景下，二氧化碳吸收-矿化一体化工艺可协同实现钙镁分离与温室气体减排，展现出良好应用前景。该工艺选用活化后的磷尾矿或其浸出液直接吸收并固定CO_2，实现碳减排的同时，制备得到轻质碳酸钙产品[17]。据统计，每处理1 t磷尾矿，可固定吸收541.8 kg CO_2，制得碳酸钙265.93 kg。此矿化过程促进了残渣中磷酸盐富集，体现出多元素协同提取以及综合利用理念。上述研究表明，磷尾矿中钙镁组分处理正从单纯除杂分级，向绿色低碳的高值化协同转化方向发展。未来在多元素共存复杂体系中，如何实现结晶热力学以及动力学精准调控，从而确保所产出碳酸钙等产品稳定达到商业应用纯度，是该领域亟待攻克的关键问题。

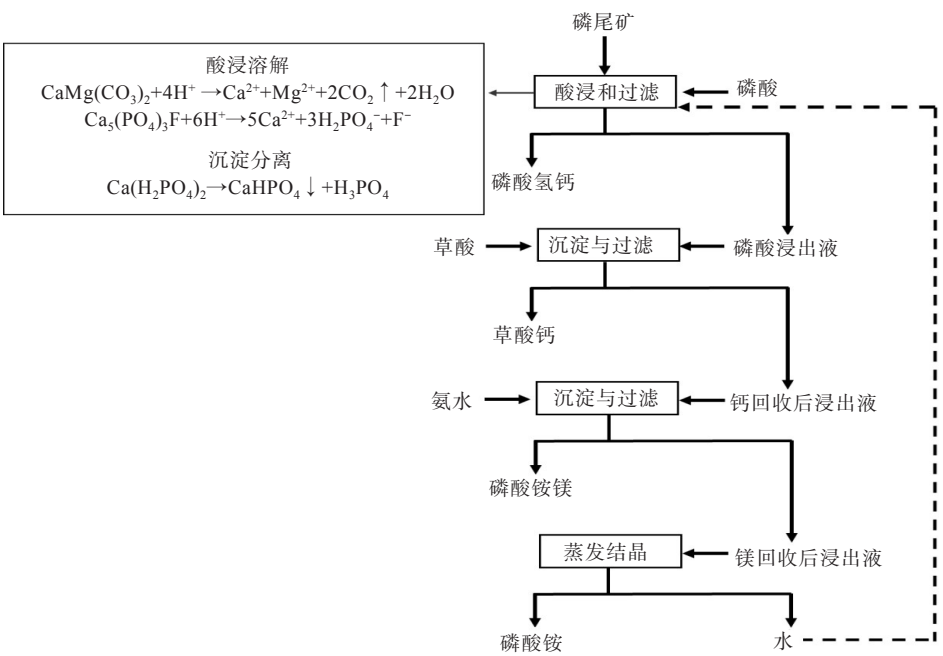

图3　从磷尾矿中回收Ca、Mg流程图[15]

Fig. 3　Flowchart for Ca and Mg recovery from phosphate tailings[15]

1.3 伴生元素的回收

除主量元素外，磷尾矿中伴生稀土元素亦具有较高的回收价值。由于该类元素通常呈微量赋存（质量分数通常在0.02%~0.06%），单独提取成本较高，当前多将其纳入磷的协同回收处理工艺中[18]。Liang等[19]开发了选冶联合工艺（图4），对磷浮选尾矿进行深度解离，先利用摇床重选富集，再通过浮选进一步提纯，此过程稀土总含量从约202 mg/kg提升至1 151 mg/kg，最终浸出后实现了约85%的稀土回收率和93%的P_2O_5回收率。从磷尾矿中提取有价元素的技术正在逐步完善，未来的技术发展将从单一提取率的提升转向构建模块化、低碳化及全元素梯级利用的闭路工业体系。

2 建筑材料制备

将磷尾矿引入建材制备体系，是现阶段实现该类大宗固体废弃物规模化消纳的重要途径。目前，磷尾矿在建材领域的应用主要集中在两个核心分支：一是通过高温烧结制备新型轻质材料（如陶粒与发泡陶瓷）；二是作为辅助胶凝材料或细骨料直接掺入水泥与混凝土体系。

2.1 陶粒与发泡陶瓷

将磷尾矿用于烧制轻质陶粒或发泡陶瓷，是替代传统天然集料、制备建筑保温隔热材料的有效方式，制备流程如图5所示。常规工艺主要依赖于预热与高温焙烧。沈凡等[20]通过正交试验确立了磷尾矿陶粒的最优烧结制度，所制备的陶粒筒压强度达7.2 MPa，吸水率为8.6%，均符合国家轻质骨料标准。采用发泡凝胶注模成型工艺，磷尾矿可转化为发泡陶瓷，具备低体积密度（0.71 g/cm³）、高孔隙率（77.58%）和抗压强度良好（4.73 MPa）等特性[21]。尽管利用磷尾矿制备陶瓷类产品具备可行性，但该类工艺存在以下局限性：一方面，成分的单一性限制产品性能的进一步提升；另一方面，高温焙烧伴随高能耗与碳排放。

为突破上述局限，引入了多源固废协同与功能化改性策略。Zhao等[22]将磷尾矿与盾构渣土混合，调节原料体系中CaO与SiO_2的质量比，改善液相生成以及结晶行为，制备得到可持续轻质陶瓷，抗折强度高达57.88 MPa。同时，凭借磷尾矿高温下碳酸盐分解产气的特性，有研究将其作为高温成孔剂使用[23]：以花岗岩洗砂污泥为主要原料，以磷尾矿为发泡剂，不添加任何化学药剂制备超轻质陶粒，其抗压强度为2.63 MPa，1 h吸水率为1.32%，均优于国家陶粒标准。由于原料中掺入大量固废，存在二次污染风险，Fu等[24]对陶瓷进行了环境安全性的评估。结果证实，高温烧结过程将原料中的有害元素固化在玻璃相或晶体晶格内，浸出毒性远低于标准限值，确保了材料的生态安全性。针对环保附加值低的问题，侯代文等[25]

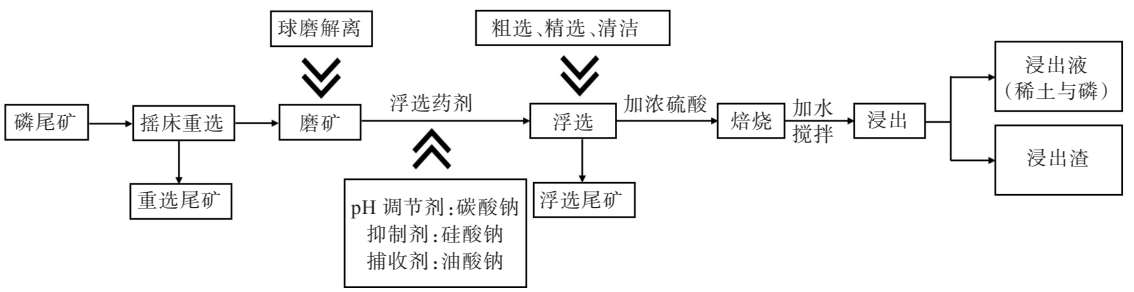

图4 稀土与磷协同回收工艺[19]

Fig. 4 Synergistic recovery process of rare earth and phosphorus [19]

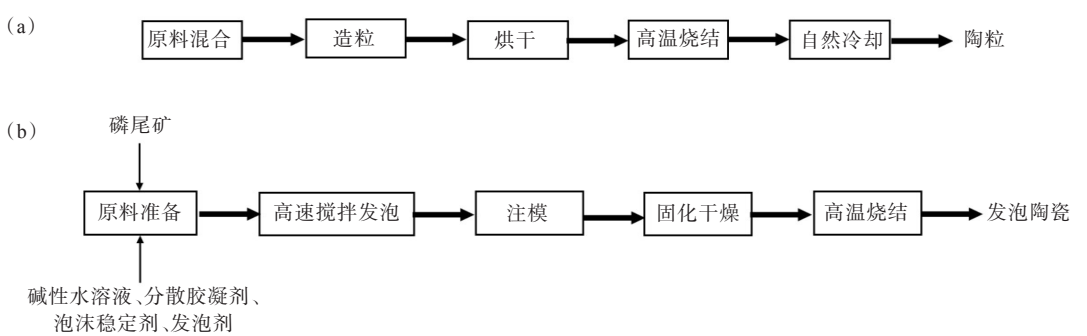

图5 陶粒[20](a)和发泡陶瓷[21](b)的制备流程

Fig. 5 Preparation processes of ceramsite (a)[20] and foamed ceramics (b)[21]

把烧制的磷尾矿陶粒转变为水体除磷的吸附材料，最优条件下的磷吸附率可达99.60%，拓展了其在环境治理层面的功能。

目前，磷尾矿在陶瓷建材领域的应用，已从烧结废渣升级为多源协同造粒以及发泡保温材料。但现阶段性能的提升依然依赖高能耗的焙烧工艺。未来该领域的研究重点在于探索免烧结或低温激发轻质高强材料制备技术，实现工艺源头碳减排。

2.2　胶凝材料与混凝土掺合料

将磷尾矿用作水泥矿物掺合料或细骨料，是目前应用较为广泛的消纳途径。粉磨的磷尾矿不仅能发挥微集料的物理填充效应以优化孔隙结构，还能作为成核基体促进水泥水化反应[26]。基于此，磷尾矿已被应用于配制多种强度等级的常规混凝土[27]。在配制C40混凝土时掺入占细骨料总质量40%的磷尾矿砂，混凝土的28 d抗压强度达到48.2 MPa，相对于基准组提高了16.9%，有效改善了混凝土的力学性能[28]。然而，这种消纳途径在掺入量超过临界值时，易导致胶凝体系后期强度倒缩及水化迟缓。

针对上述问题，领域内主要采取物理复合增强和特种胶凝体系开发两种方法。物理复合增强通过引入外加材料或者改变基体结构，弥补高掺量磷尾矿所导致的强度劣化情况。王杨盛等[29]在体系中加入了钢纤维，通过其三维网络分布抑制内部微裂纹扩展，从而提升基体的力学性能。在最优条件下，C40混凝土抗压强度提高了21.06%。有研究把磷尾矿与发泡剂结合以制备泡沫混凝土，利用高掺量（达到胶凝材料总质量的60%）的磷尾矿构建轻质孔壁骨架，并使材料具有保温隔热的特性[30]。该思路调整了产品的应用场景，材料对抗压强度的要求降低，缓解了高掺量下的强度问题。特种胶凝体系开发的核心在于改变磷尾矿在体系中的惰性状态。例如，针对高镁磷尾矿，研究人员将其进行煅烧转化为活性氧化镁后，引入酸性废水，使其与活性氧化镁发生反应，制备硫氧镁胶凝材料；体系中易导致水泥水化迟缓的磷酸根离子，可诱导促进关键受力相结晶，抗压强度实现了18%~48%的增长，最高可达100 MPa以上[31]。

磷尾矿在胶凝材料体系中的应用正经历从惰性填充向活性激发的转变。未来需聚焦磷尾矿的物理特性（如粉磨细度）对体系离子溶出及早期水化进程的影响[26]，并探讨其与粉煤灰等固废的协同机制及强度演化规律，以开发经济、低碳的常温高效激发利用技术。

3　矿山充填材料制备

采用固体废弃物制备充填材料是当前绿色矿山建设的主推手段，不仅能防止地表沉陷，还能大规模处置固废，降低固废地面堆存带来的生态隐患[32-33]。目前，利用磷尾矿制备充填材料一般通过多固废协同的方式进行应用，其28 d抗压强度可达到2.9 MPa，流动度为300 mm，符合矿山的安全充填标准[34]。为了解决磷尾矿易沉降的问题，目前的工艺优化主要集中在两个方面：一方面为物理级配优化，即掺入不同粒径的细粒级材料，改善固体颗粒的级配分布，从而提升浆体的堆积密实度与稳定性。研究证实引入极细尾泥可使体系分层度从4.05%降至1.20%，泌水率从12.86%降至1.74%，28 d抗压强度达2.05 MPa，缓解了管道输送中易发生的固液离析现象[35]。另一方面，利用工业废渣的物理化学特性，通过颗粒间的摩擦与絮凝作用，改变体系的屈服应力与塑性黏度。例如，在料浆中掺加固硫灰，利用其高需水性与多孔结构增大料浆的塑性黏度，维持抗沉降能力[36]。最终塑性黏度可提升30%~50%，流动度大于180 mm。此外，针对深部采空区的高温环境，Han等[33]构建了碱-二水磷石膏-磷尾矿全固废膏体充填系统，在45 ℃的条件下依然能表现出稳定的工作性能与承载力（28 d抗压强度1.81 MPa）。

尽管力学与工作性能达标，但磷尾矿充填仍需面临潜在的地下水环境风险。地下充填淋滤模拟实验表明，在长期承压水淋滤下磷尾矿中残留的氟离子、磷酸盐会缓慢释放[37]。针对该问题，近期研究主要从添加化学药剂和原料调配两方面进行干预。在料浆中添加氯化钙及高分子聚合剂等，诱导化学沉淀与物理包裹，有效截留有害离子，F^-的质量浓度降至1 mg/L以下，达到了国家地下水质量的III类标准[38]；利用磷尾矿、磷石膏等固废协同制备的充填材料，水化反应生成钙矾石和水化硅酸钙凝胶等致密产物，通过晶格取代和微孔封存效应，实现对有害离子的固化，其中可溶性磷固化率可高达99.97%[34]。

磷尾矿充填技术正逐步向全固废方向发展，然而当前短期的淋滤数据不足以全面评估实际应用长期安全性。未来该领域需建立长期耐久性演化模型，并研发低成本离子固化剂以保障地下水系统生态安全。

4 农业领域的应用

磷尾矿富含植物生长必需的营养元素，且呈碱性。将其转化为农用材料，不仅能有效改良酸性土壤，还能补充中微量元素。目前，相关研究集中在土壤调理与修复、新型肥料创制及保水剂开发等三个方向。

4.1 土壤调理剂

破坏原有矿物结构，释放磷尾矿中的难溶性养分，是制备营养型土壤调理剂的关键，传统工艺主要依赖高温（1 000~1 300 ℃）热活化制备多元素复合的钙镁硅调理剂[39]。然而，该工艺能耗较高，且直接施用原矿存在氟素累积和养分释放不可控的风险。为解决上述问题，近期研究提出了生境协同改良与定向脱毒策略。将磷尾矿基土壤调理剂与固氮解磷菌联合，利用微生物生命活动分泌的有机酸等物质，打破尾矿中难溶矿物的晶格限制，实现磷元素的缓慢生物浸提与释放，进而改善土壤微生态环境[40]，其主要工作机制见图6。同时针对氟元素易流失产生毒害的风险，Chen等[41]采用有机肥与铝/铁/钙基复合固氟剂协同处理磷尾矿，通过诱导沉淀与络合作用，使水溶性氟含量降至11.133 mg/kg。

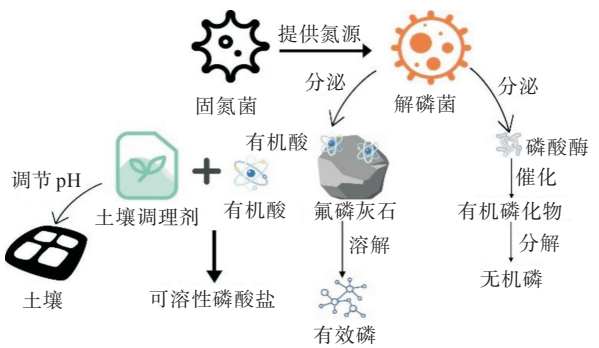

图6 生境协同工作机制[40]

Fig. 6 Collaborative working mechanism of habitats[40]

在重金属污染土壤原位修复方面，磷尾矿可通过离子交换和诱导化学沉淀，降低重金属的水溶性与生物有效性。实地研究证实，直接施用磷尾矿可诱发形成难溶的磷酸铅，从而抑制酸性土壤中铅的迁移[42]。针对修复效率低及难以应对复合污染的问题，研究人员从两个方面对其进行改性：一是热相变重构，利用高温热改性技术使磷尾矿发生矿物相变与微孔结构重构，暴露更多表面活性位点，增强对重金属离子的吸附能力[43]；二是合成具有核壳胶囊结构的新型缓释材料，通过构建外部高分子包膜等物理屏障，实现内部尾矿可溶性磷的缓慢释放，降低传统工艺引发的面源污染风险，促进重金属形成稳定磷酸盐沉淀[44-46]。此外，利用磷尾矿提取制备的羟基磷灰石钝化材料，在多金属复合污染土壤体系中亦表现出较好的修复性能，其中残渣态Pb的质量占比增加了6%[47]。

综上所述，目前磷尾矿在土壤调理剂中的应用正从直接施用和高温焙烧向生物-化学协同微生态调控与缓释材料方向发展。复杂的根际环境对钝化材料的长期稳定性要求更高，未来研究需结合田间长期定位观测，系统评估材料老化对土壤微生态的影响。

4.2 农业用肥

由于磷尾矿中磷的植物有效性较低，需通过活化将其转化为农用肥料。在主肥应用中，常规工艺利用酸液对其进行活化并辅以脱水聚合，合成出具有多孔隙球状结构、磷聚合率达80%以上的聚合态钙镁磷肥[48]。杨大润等[49]利用湿法磷酸淤渣与磷尾矿混合造粒，制备出成粒率达84.23%且抗压强度（18.64 N）满足机械施肥标准的钙镁颗粒肥，体现了两种磷化工固废的协同肥料化。在实际土壤应用中，往往会出现肥料释放过快而导致营养流失和土壤污染的情况。目前研究人员主要开发了两种技术应对以上问题：(1)机械-化学法协同制备缓释肥。采用球磨-废酸联合工艺并协同腐殖酸制备缓释肥，能控制钙、镁养分的释放周期达90 d，与商品肥料相比，其养分损失率分别降低了60%和70%。同时腐殖酸的表面活性基团促进作物根系发育与养分吸收，提升了肥料的效能[50]。(2)高温热转化技术。将磷尾矿与含营养元素的助熔剂高温熔融，制备出具有非晶态网络结构的高活性玻璃肥，利用其玻璃体网络将钙、镁等离子固定在骨架中，实现了养分的控释，并提高了养分的有效转化，其活化率达92%以上[51]。

除用作主肥原料外，磷尾矿亦可作为填料应用于常规复合肥生产体系中。研究表明，在特定配方复合肥中，使用磷尾矿粉替代传统磷石膏填料，能维持原有造粒强度，并提高肥料颗粒在土壤中的崩解速率，促进了玉米等作物在苗期对磷、钙、镁等营养元素的吸收[52]。田间应用试验分析证实，将含有磷尾矿的肥料与有机肥配合，可提高作物产量，并驱动根际土壤中微生物群落发生演替，改善土壤微生态环境[53-55]。

综上，当前工艺展现了磷尾矿用作肥料的技术可行性。在工业应用层面，寻找活化成本与肥料品位之间的经济平衡点，是该领域未来亟待解

决的问题。

4.3　农用保水剂

面对干旱及半干旱地区水资源短缺与农业生态保护压力，施用保水剂是改善土壤理化性质、调节植物根系水势的有效手段[56]。然而，传统保水剂功能较为单一，通常缺乏对作物养分的持续供给能力。王雪郦等[57-58]将磷尾矿粉作为无机功能性填料，引入丙烯酸或丙烯酰胺的聚合物三维网络中，制备兼具蓄水与供肥功能的复合保水剂，其吸蒸馏水量为621 g/g，吸盐水量为52 g/g，且磷释放率基本符合植物生长规律。在此基础上，后续研究赋予了该体系环境响应特性。通过引入双丙酮丙烯酰胺等环境响应性单体，制备了含磷温敏保水剂。该保水剂的溶胀率表现出负温度敏感性（即高温释水，低温吸水），能够响应农田昼夜的温湿度变化。同时，聚合物网络的渗透压调控作用使尾矿中的磷得以长期缓慢释放，改善了干旱区作物的根际水肥微环境[58]。目前该方向多集中于高分子合成与实验室性能表征阶段，在荒漠化治理与旱区农业中具备一定的应用潜力。

5　总结与展望

我国磷尾矿历史堆存量极大，且新增排放量高，开展磷尾矿清洁高值化及综合利用的相关工作，是缓解磷资源枯竭以及生态环境双重压力、实现磷化工产业可持续发展的关键。针对当前我国磷尾矿资源化利用现状以及领域协同发展趋势，总结并展望如下：

（1）在元素提取方面，研究重点正从单一提磷向多组分梯级分离与协同提取转变。未来的工程挑战在于如何保障体系在放大生产中的稳定性，并实现化学试剂的闭路循环。

（2）在建材化和矿山充填等大宗消纳途径中，存在水化活性激发能耗与环境安全性难以平衡的问题。未来需进一步加强多源固废协同效应研究，以开发常温高效激发的低碳胶凝新体系，并建立对有害离子长期浸出的环境安全评估机制。

（3）对于农业领域，仍需深入开展新型农用材料在实际土壤环境中的长效稳定性与养分释放规律的评估。长期施用对土壤微生态产生的潜在风险，需依靠长周期的田间定位观测进行系统研究。

参考文献

[1] 任飞，刘禹辰，刘佳，等. 我国磷化工产业现状与发展趋势：从资源驱动到创新引领[J]. 生态产业科学与磷氟工程，2026，41(2)：6-12.

[2] 李睿，李智力，何东升，等. 磷尾矿土壤化应用研究现状及展望[J/OL]. 无机盐工业，2026-01-07.https://doi.org/10.19964/j.issn.1006-4990.2025-0335.

[3] LI X P，SHU J C，ZHAO H Y，et al. A critical review on approaches for phosphorus ore flotation tailings treatment and disposal technology：environment properties，comprehensive utilization，and resource utilization [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2024，63(3)：1191-1199.

[4] 杨效家，漆增连，李志兵，等. 磷尾矿资源肥料化利用途径研究进展[J]. 应用化工，2024，53(8)：1932-1936.

[5] 赵鑫明，陈路路，柴佳琪，等. 磷化工副产物农业全量利用技术途径及研究进展[J]. 中国土壤与肥料，2025(9)：239-247.

[6] 张晋，尤大海，李国栋，等. 磷尾矿基建筑材料研究进展与展望[J]. 非金属矿，2025，48(4)：108-112.

[7] 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，2024，56(10)：1-11.

[8] 朱秀雯，唐远，裴丰，等. 磷尾矿在农业领域的应用研究现状及展望[J]. 化学与生物工程，2024，41(1)：1-7.

[9] JUN J D，HUANG X P，LIANG L L，et al. Research hotspot and trend of resource utilization of phosphorus tailings-based on Citespace and VOSviewer visualization [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing，2024，60 (4)：192132.

[10] YU Y H，DU C M. Leaching of phosphorus from phosphate tailings and extraction of calcium phosphates：toward comprehensive utilization of tailing resources [J]. Journal of Environmental Management，2023，347：119159.

[11] YU Y H，DU C M，ZHANG Y T，et al. Phosphorus recovery from phosphate tailings through a two-stage leaching-precipitation process：toward the harmless and reduction treatment of P-bearing wastes [J]. Environmental Research，2024，248：118328.

[12] YU Y H，DU C M，YANG X. Recovery of phosphorus from steelmaking slag and phosphate tailings by a collaborative processing method [J]. Separation and Purification Technology，2023，313：123499.

[13] ZHOU G Y，WANG N，GU H N，et al. Obtaining phosphorus concentrate from phosphate ore flotation tailings after Ca and Mg recovery using formic acid leaching [J]. Minerals Engineering，2025，232：109541.

[14] YIN L，DING S Y，ZHANG T，et al. Resource

utilization of phosphate tailings through a novel strategy of sequential multi-separation processes [J]. Minerals Engineering, 2026, 237: 110002.

[15] GU H N, ZHOU G Y, WEN H J, et al. Using of phosphoric acid to dissolve phosphate ore flotation tailings for stepwise separation of calcium and magnesium values [J]. Chemical Engineering Science, 2025, 307: 121356.

[16] DING S Y, YIN L, ZHANG T, et al. Resource utilization of phosphate tailings by calcination and leaching with dilute H_3PO_4 solution [J]. Minerals Engineering, 2025, 222: 109172.

[17] MA Z L, LI D K, YUE S W, et al. Separation of calcium and magnesium from phosphorus tailings by the integrated CO_2 absorption-mineralization process [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 364(Part 3): 132534.

[18] 金会心, 王华, 李军旗, 等. 新华含稀土磷矿浮选实验研究[J]. 过程工程学报, 2008(3): 453-459.

[19] LIANG H J, ZHANG P, JIN Z, et al. Processing of a phosphate flotation tails for recovery of rare earths and phosphate [J]. Minerals, 2025, 15(9): 900.

[20] 沈凡, 韦国苏, 谯理格, 等. 磷尾矿陶粒烧结工艺优化及其轻质超高强混凝土配制[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(3): 717-724.

[21] FU F H, HU N Y, YANG S W, et al. Influence of different factors on phase evolution, pore morphology and properties of phosphate tailings foamed ceramics prepared by foaming gel casting [J]. Ceramics International, 2025, 51(1): 165-178.

[22] ZHAO H, MAO Y S, JIANG M T, et al. Sustainable production of lightweight ceramics from shield tunnel muck and phosphorus tailings enhanced by CaO/SiO_2 ratios [J]. Construction and Building Materials, 2025, 482: 141738.

[23] XIAO T T, FAN X Y, ZHOU C Y, et al. Preparation of ultra-lightweight ceramsite from waste materials: using phosphate tailings as pore-forming agent [J]. Ceramics International, 2024, 50(9): 15218-15229.

[24] FU F H, HU N Y, YANG S W, et al. Conversion of recovered phosphorus tailings into high-value lightweight ceramic materials and evaluation of environmental safety [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 1356-1366.

[25] 侯代文, 梁欢, 邢丽静, 等. 响应面优化浮选磷尾矿制备陶粒及其对磷的吸附研究[J]. 无机盐工业, 2025, 57(11): 74-82.

[26] JIANG L L, LI J Q, ZHANG Q G, et al. Influence of phosphorus tailings fineness on the hydration process and physical properties of ordinary Portland cement [J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135349.

[27] 姜立龙, 李剑秋, 杨林, 等. 高镁磷尾矿作为矿物掺合料应用于混凝土性能研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(1): 90-95.

[28] 卜娜蕊, 江伟, 吕浩璋, 等. 掺磷尾矿配制C40混凝土的力学性能试验研究[J]. 新乡学院学报, 2024, 41(6): 55-59.

[29] 王杨盛, 周晗, 庄心善, 等. 磷尾矿粉-钢纤维混凝土抗渗与力学性能[J]. 混凝土, 2026(1): 11-15.

[30] LIU Y J, HU N Y, YANG S W, et al. The hydration behavior and foaming mechanism of foamed concrete prepared by substantial amounts of phosphate tailings [J]. Construction and Building Materials, 2025, 472: 140799.

[31] GU K, CHEN B, YAN P, et al. Recycling of phosphate tailings and acid wastewater from phosphorus chemical industrial chain to prepare a high value-added magnesium oxysulfate cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 369: 133343.

[32] CHEN Q S, ZHANG Q L, FOURIE A, et al. Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for cemented paste backfill [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 201: 19-27.

[33] HAN Y D, LIU L, RUAN S S, et al. Study on processability, hydration characteristics and solidification mechanism of hazardous elements of high-phosphorus solid waste paste backfill materials [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 117816.

[34] YANG J, LIU S Y, HE X Y, et al. Fluid-related performances and compressive strength of clinker-free cementitious backfill material based on phosphate tailings [J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2024, 20(9): 2077-2090.

[35] 叶峰, 李延杰, 张文龙, 等. 尾泥对高浓度磷尾矿胶结充填材料性能影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3): 69-72.

[36] 刘冬梅, 卢希, 高德军. 掺固硫灰水泥胶结磷尾矿充填料浆流变性能[J]. 中国矿业, 2020, 29(5): 126-130, 148.

[37] 王昊, 邱跃琴, 龙文江, 等. 磷尾矿充填中有害元素地下迁移规律研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(5): 87-91.

[38] 黄远来, 邱跃琴, 高贺然. 磷尾矿充填料浆有害离子固化试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(12): 93-96.

[39] 郑宗雨, 李智力, 何东升, 等. 热活化磷尾矿制备钙镁硅土壤调理剂实验研究[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2026, 41(1): 26-32.

[40] 吕继良, 王振, 李智力, 等. 磷尾矿基土壤调理剂与

固氮解磷菌配施对土壤改良效果的影响[J]. 化学与生物工程，2026，43(4)：62-70.

[41] CHEN B J, JIN C Y, YANG J Q, et al. Synergistic organic manure treatment with Al/Fe/Ca-based fluoride-fixing agents promote soil formation and utilization of phosphate flotation tailings [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 495-509.

[42] VENÄLÄINEN S H, NOUSIAINEN A, KANERVA S. The potential of phosphate mine tailings in the remediation of acidic Pb-contaminated soil [J]. Soil & Environmental Health, 2024, 2(4): 100112.

[43] DENG S N, HOU Y W, LIU Z, et al. Novel thermal modification of phosphate tailings for enhanced heavy metals immobilization in soil [J]. Environmental Research, 2025, 286(Part 1): 122796.

[44] DAI L M, LI J H, ZHANG J X, et al. Development and mechanistic study of phosphate tailings based soil heavy metal prophylactic agents with encapsulated structure for lead stabilization and phosphorus speciation in soils [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123578.

[45] DAI L M, LI J H, ZHANG J X, et al. The Pb capture mechanism of soil prophylactic agents prepared from phosphorus tailings and the influence of phosphorus speciation on its slow-release mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2024, 955: 176996.

[46] ZHANG J X, DAI L M, LI J H, et al. Phosphate tailings-based slow-release heavy metal passivation materials: mechanism, environmental risk, and microbial community evolution [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139931.

[47] 吴珊珊，刘意章，周旺旺，等. 磷尾矿钝化材料研制及其对土壤重金属的修复机制[J]. 矿物学报，2024，44(3)：326-334.

[48] 郑建国，于南树，刘永秀，等. 磷酸活化磷尾矿制取聚合态钙镁磷肥的工艺条件研究[J]. 无机盐工业，2020，52(2)：43-46.

[49] 杨大润，孙玉翠，李莹莹，等. 基于磷尾矿和湿法磷酸淤渣的钙镁颗粒肥料制备[J]. 化工矿物与加工，2025，54(10)：52-58.

[50] XIE Y X, ZHANG Q, YUAN D Y, et al. Development and characterization of phosphate tailings-based humic acid slow-release fertilizer using ball milling sludge acid activation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 202 (Part A): 107665.

[51] CHEN Z Q, WANG F, NIU G Q, et al. Design and process regulation of CaO-SiO_2-MgO-P_2O_5 based glass fertilizer from direct thermal activation of low-grade phosphate ore and phosphate tailings [J]. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements, 2025, 200(1): 77-89.

[52] 孙鹏，余赟，张汉卿，等. 磷尾矿在复合肥中的应用研究[J]. 磷肥与复肥，2024，39(2)：20-22.

[53] GENG C X, MA X L, HOU X F, et al. Regulatory mechanism of phosphorus tailings and organic fertilizer jointly driving the succession of acidic soil microbial functional groups and enhancing corn yield [J]. Agriculture, 2025, 15(19): 2011.

[54] GENG C X, SHI H E, WANG J H, et al. Research on utilizing phosphorus tailoring recycling to improve acidic soil: the synergistic effect on crop yield, soil quality, and microbial communities [J]. Plants, 2025, 14(22): 3475.

[55] 王景文，杨效家，张琦，等. 磷尾矿基钙镁缓释肥料对小白菜的应用效果研究[J]. 西南农业学报，2025，38(8)：1616-1623.

[56] 龚雯茜，李萍，魏骊达，等. 保水剂改良黄土与植物根系的水势响应机制研究[J]. 水文地质工程地质，2026，53(1)：277-284.

[57] 王雪鄙，邱树毅. 含磷农用保水剂的制备及性能研究[J]. 中国农学通报，2011，27(7)：284-289.

[58] 王毓，王身玉，陈洪事，等. 新型含磷温敏智能保水剂的制备及性能[J]. 江苏农业科学，2015，43(6)：353-355，443.

本文编辑：苗　变