

不同来源磷资源利用与回收进展及策略

王彩凤¹, 亢龙飞^{1,2,3}, 艾 锋⁴, 高 琳⁵

(1. 榆林学院 教育学院, 陕西 榆林 719000; 2. 榆林学院 现代农学院/陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000; 3. 科隆大学 陆地生态研究中心/动物所, 德国北莱茵-威斯特法伦州 科隆 50674; 4. 中国科学院 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 5. 榆林环境保护工程有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

[摘要] 为实现农业可持续发展, 应对全球磷危机现状和保障粮食安全, 亟须提高磷的利用效率并构建农业-工业-政策多维视角下的闭环循环体系。系统综述提升农业领域磷资源利用效率的重要措施, 探讨从工业和城市废弃物中提取与回收磷的可行路径, 阐述基于立法、经济激励、公众意识提升和国际合作等多方面政策与系统支持的作用, 旨在有效推动磷资源的高效循环利用, 为构建高效、绿色、可持续的磷管理体系提供科学依据与技术支持。

[关键词] 磷资源; 磷回收; 可持续发展; 高效利用

[中图分类号] X781; TQ442

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-4566 (2025) 09-0091-08

Research progress and strategies of utilization and recovery of phosphorus from different source

WANG Caifeng¹, KANG Longfei^{1,2,3}, AI Feng⁴, GAO Lin⁵

(1. College of Education, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. College of Advanced Agricultural Sciences/Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China; 3. Terrestrial Ecology/Institute of Zoology, University of Cologne, Cologne 50674, Germany; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 5. Yulin Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: To achieve sustainable agricultural development, address the current global phosphorus crisis and ensure food security, it is urgent to enhance the utilization efficiency of phosphorus and establish a closed-loop circulation system from multiple perspectives of agriculture, industry and policy. The important measures to enhance the utilization efficiency of phosphorus fertilizers in the agricultural sector are systematically reviewed, feasible paths for extracting and recovering phosphorus from industrial and urban waste are explored, and the role of multiple policy and system supports such as legislation, economic incentives, public awareness enhancement and international cooperation are elaborated, aiming to promote the efficient and circular utilization of phosphorus resources effectively, provide scientific basis and technical support for building an efficient, green and sustainable phosphorus management system.

Key words: phosphorus resources; phosphorus recovery; sustainable development; efficient utilization

0 引言

磷作为农业生产中不可或缺的一种元素, 对农作物根系发育、能量转运与遗传物质合成具有重要作用^[1-2]。然而, 全球磷资源主要集中于少数国家, 呈现出分布不均、难以再生的特性。此外, 传统施肥方式造成磷肥利用率偏低, 大量磷流失进入水体引发富营养化问题, 威胁生态系统稳定性^[3]。因此, 提升磷肥利用效率、加强磷资源的回收与再利用, 已成为当前农业、工业和环境领域重点关注的研究热点和应用方向。

近年来, 农业工程、土壤科学、植物营养学、污染治理与修复、新材料开发、绿色化学和人工智

[收稿日期] 2025-06-07

[作者简介] 王彩凤(1996-), 女, 陕西榆林人, 助教, 从事区域可持续发展与科学教育研究。

[通信作者] 亢龙飞(1995-), 男, 陕西榆林人, 讲师, 从事资源高效利用与微生物过程研究。

[基金项目] 国家公派访学项目(57678375); 陕西省教育厅项目(24JK0749); 秦创原“揭榜挂帅”科研项目(H2025060010); 榆林学院高层次人才科研项目(2023GK84); 陕西省“校招共用”人才项目(2024XZGY05); 榆林市科协青年人才托举项目(20250710)

能等学科快速发展,以及绿色制造与循环利用、环境监测与修复、自动控制和废弃物资源利用等技术的不断进步,为农业-工业系统中磷的高效利用提供了多元化的解决方案^[4-5]。同时,工业与城市系统中的磷回收技术不断发展。污水处理中的化学沉淀、生物强化除磷与纳米材料吸附等手段,在实现废水净化的同时实现磷的再利用^[6]。城市厨余垃圾与畜禽粪便经厌氧发酵及焚烧灰分处理,亦成为磷回收的重要资源路径。综上所述,多学科的发展和多种先进技术的融合,为农业-工业系统中磷的高效利用和废弃物资源化利用提供了丰富的解决途径。

笔者围绕磷资源的高效利用与回收这一主题,系统梳理农业领域提高磷资源利用率的措施,以及工业废弃物处理领域中磷资源提取与回收相关技术进展与实践路径,旨在基于当代政策视角,为构建高效、可持续的磷管理体系提供理论支撑与应用参考。

1 农业领域

1.1 提高磷肥利用率

1.1.1 传感器与遥感技术应用

现代精准农业借助先进的传感器与遥感技术,能够精准地监测土壤磷含量的空间分布情况。土壤电导率传感器可以实时探测土壤中的磷含量,通过收集大量的土壤电导率数据,再利用三维制图技术进行分析处理,从而实现对磷肥施用的精准定位。VENKATESAN等的研究表明,基于土壤电导率的三维制图技术可将磷肥施用精度提升30%以上^[7]。这种技术的应用,使得农民能够根据土壤中磷实际含量,合理地分配磷肥用量,避免过度施肥或者施肥不足的情况,提高磷肥利用效率。据报道,多光谱无人机和卫星遥感技术也为精准施肥提供了有力支持。它们可以从高空对农田进行大面积的监测,获取土壤和农作物的多光谱图像。通过对这些图像的分析,可以了解土壤磷含量的分布情况以及农作物对磷的吸收状况。另外,在污水处理厂与农业联动的案例中,利用实时监测系统,将污水处理厂产生的富含磷的污泥经过处理后,精准地施用于农田。RUFÍ-SALÍS等认为,这种联动模式使得磷肥利用率从40%提升至65%^[8]。这不仅提高了磷肥的利用效率,还减少了污水处理厂污泥的处理成本,最终实现了资源的循环利用。

1.1.2 缓释磷肥与包膜技术应用

缓释磷肥和包膜技术是提高磷肥利用效率的另

一种有效手段。工业副产品制备的缓释磷肥具有良好的缓释性能。已有研究证明,利用熔融镁废渣制备的缓释磷肥,可将磷释放周期延长至120 d,减少淋溶损失达50%^[9]。其主要原因是这种缓释磷肥能够根据农作物生长的需求,缓慢地释放磷元素,避免了磷在土壤中的快速流失和固定,提高了磷的利用率。TALBOYS等的研究进一步报道了鸟粪石($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)作为一种天然缓释肥,其磷释放速率比传统过磷酸钙低40%,但农作物吸收效率却提高了22%^[10]。这是因为鸟粪石的结构使得磷元素能够缓慢地释放出来,同时其成分也更易被农作物吸收。这种天然缓释肥的使用,不仅提高了磷肥的利用效率,还减少了对环境的污染。包膜肥料通过聚乳酸-纳米黏土复合材料进行控释,能够更好地控制磷的释放速率。MA等的研究表明,使用这种包膜肥料可以使磷利用率从20%提升至55%^[9]。包膜材料可以根据土壤的湿度、温度等因素,自动调节磷的释放速率,使其与农作物的生长需求相匹配,从而最大限度地提高磷肥的利用效率。

1.1.3 农作物-土壤匹配施肥技术应用

不同的土壤类型对磷肥的吸附和固定能力不同,因此需要根据土壤类型和农作物的需求,进行精准施肥。针对砂质土与黏土的不同吸附特性,动态调整磷肥配方可以显著提高农作物产量。2021年的一项研究指出:针对砂质土与黏土的不同吸附特性,动态调整磷肥配方可使玉米产量提高18%^[11]。在砂质土中,由于其吸附能力较弱,磷肥容易随雨水淋溶流失,聚磷酸铵可逐步水解为易被植物吸收的正磷酸盐,养分缓慢释放,因此采用聚磷酸铵(APP)替代普通磷肥,可将淋溶损失减少35%^[12]。聚磷酸铵具有良好的溶解性和流动性,能够更好地被农作物吸收,同时也减少了磷在土壤中的固定损失。此外,还可以根据不同农作物对磷的需求特点,进行精准施肥。例如,对于需磷量较大的农作物,如小麦、玉米等,可以在关键生长期增加磷肥的施用量;而对于需磷量相对较小的农作物,如豆类等,可以适当减少磷肥的施用量。通过这种农作物-土壤匹配施肥的方式,不仅能够提高磷肥的利用效率,而且能促进农作物的生长和发育,提高农作物的产量和品质。

1.2 改善土壤结构特征

1.2.1 酸性土壤

酸性土壤中的铁铝氧化物对磷的固定作用较强,这使得土壤中的磷难以被农作物吸收利用。研

究表明,施用石灰(CaCO_3)可以有效提高土壤的pH,从而降低铁铝氧化物对磷的固定。TALBOYS进一步强调了当土壤pH从5.0提升至6.5后,铁铝氧化物对磷的固定量降低60%,油菜对磷吸收量增加25%^[10]。这说明通过调节土壤酸碱度,可以显著改善土壤中磷的可利用性,提高农作物对磷的吸收效率。然而,过量施用石灰可能会导致钙-磷沉淀,反而降低磷的有效性。KUMAR等的研究强调在施用石灰时,需要通过螯合剂(如柠檬酸)进行调控^[13]。柠檬酸等螯合剂可以与钙离子结合,防止钙-磷沉淀的形成,从而维持土壤中磷的有效性。这种综合改良措施,既提高了土壤的pH,又避免了因过量石灰而产生的负面效应,实现了酸性土壤中磷的有效利用。

1.2.2 碱性土壤

碱性土壤中磷的有效性也受到限制,主要原因是土壤中碳酸盐和钙离子对磷的固定。通过添加有机质,可以改善土壤结构,提高土壤中微生物的活性,从而促进磷的活化和利用。YUAN等的最新研究表明,添加2%生物炭可使碱性土壤中微生物活性提升3倍,有机磷矿化速率达 $0.8 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ^[14]。生物炭具有良好的孔隙结构和吸附性能,能够为微生物提供良好的栖息环境,同时其表面的官能团可以与磷发生化学反应,促进磷的活化。此外,其他研究强调了长期施用沼渣($10 \text{ t}/\text{hm}^2$)可使土壤 w (有效磷)从 $8 \text{ mg}/\text{kg}$ 升至 $15 \text{ mg}/\text{kg}$ ^[15]。沼渣中含有丰富的有机质和微生物,能够改善土壤的物理和化学性质,提高土壤中磷的有效性。这种添加有机质的措施,不仅能够提高土壤中的磷含量,还能通过微生物的作用,将难溶性磷转化为可溶性磷,从而提高磷的利用率。

1.3 高效吸磷的农作物品种培育

通过基因工程和菌根共生技术,可以培育出高效吸磷的农作物品种,从而提高磷的利用效率。研究表明,过表达拟南芥PHT1-4磷转运蛋白的转基因水稻,在低磷土壤中产量提高30%^[14]。这种基因工程手段通过增强作物自身的磷吸收能力,使其能够在低磷环境中更好地生长。磷转运蛋白PHT1-4在植物根系吸收磷的过程中起着关键作用,通过过表达该基因,可以增加根系对磷的吸收效率,从而提高作物在低磷土壤中的产量。与此同时,菌根真菌与植物根系形成共生关系后,能够扩展根系的吸收范围,增加对土壤中磷的获取能力。菌根真菌的菌丝可以深入土壤微孔隙,

吸收更多的磷,并将其传递给植物根系。这种共生关系不仅提高了磷的吸收效率,还增强了植物对其他养分和水分的吸收能力,从而促进了农作物的生长和发育。YADAV等的研究表明菌根共生品种的根系磷吸收半径扩大2倍,磷利用效率提升40%^[16]。

1.4 轮作与间作模式推广

1.4.1 豆科-禾本科轮作系统

豆科植物具有根瘤菌共生固氮的特性,同时其根系还能分泌有机酸,通过根际酸化作用活化土壤中的难溶性磷。KUMAR等的研究报道了豆科-禾本科轮作系统通过根际酸化作用,活化土壤难溶性磷,使后茬农作物磷吸收量增加25%^[13]。这种轮作模式不仅提高了土壤中磷的有效性,还增加了土壤中的氮含量,促进了后茬农作物的生长。豆科植物在生长过程中,通过根瘤菌的固氮作用,将大气中的氮气转化为可被植物吸收利用的氮素,从而为后茬作物提供了丰富的氮源。同时,豆科植物根系分泌的有机酸可以溶解土壤中的难溶性磷,使其转化为可溶性磷,提高了土壤中磷的有效性。

1.4.2 紫云英与玉米间作系统

紫云英是一种豆科绿肥植物,其根系能够分泌大量的有机酸和磷酸酶。ANDERSON等的研究表明紫云英与玉米间作可使土壤磷酸酶活性提高1.5倍,促进有机磷矿化^[11]。磷酸酶是一种能够水解有机磷化合物的酶,其活性的提高有助于将土壤中的有机磷转化为无机磷,从而提高磷的有效性。紫云英与玉米间作时,紫云英的根系分泌物可以改善土壤的化学性质,提高土壤中微生物的活性,从而加速有机磷的矿化过程。这种间作模式不仅提高了土壤中磷的利用率,还增加了土壤中的有机质含量,改善了土壤的结构和肥力。

1.5 有机农业与再生农业推广

有机资源还田是一种重要的有机农业和再生农业措施,通过将有机废弃物如畜禽粪便、沼液等还田,可以增加土壤中的有机质含量,提高土壤肥力,同时减少对化学磷肥的依赖。SICILIANO的研究表明,猪粪沼液还田可使土壤 w (有效磷)年均增加 $2.4 \text{ mg}/\text{kg}$,且重金属风险低于化学磷肥^[17]。猪粪沼液中含有丰富的有机质和养分,还田后可以改善土壤的物理和化学性质,增加土壤中微生物的活性,从而促进磷的活化和利用。此外,DE BOER等在荷兰的研究表明“种养结合”模式中,奶牛场粪便磷回收率可达75%,减少化肥依赖50%^[18]。这种

模式通过将畜禽粪便中的磷回收利用,实现了资源的循环利用,减少了磷的浪费和流失,同时也降低了农业生产对化学磷肥的依赖,具有重要的环境和经济效益。

1.6 小结

综上所述,通过精准农业技术、土壤改良措施、高效吸磷作物品种培育、轮作与间作系统以及有机农业与再生农业等多种措施的综合应用,可以显著提高磷肥的利用效率,减少磷的流失和固定,促进农业生产的可持续发展。这些措施不仅提高了磷肥的利用效率,还改善了土壤结构和肥力,减少了对环境的负面影响,为实现农业的可持续发展提供了有力支持。

2 废弃物中磷资源提取与回收

2.1 污水处理系统

2.1.1 化学沉淀法

化学沉淀法是目前污水处理系统应用最广泛的磷回收技术之一。通过向污水中投加化学药剂,使磷以沉淀物的形式析出,实现磷的回收。JIA和DARWISH等研究表明,向厌氧消化液中投加 $MgCl_2$ 与 NH_4OH ,可以生成鸟粪石($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$),从而实现磷的高效回收。这种方法可从厌氧消化液中回收85%~95%的磷,且产物纯度大于90%^[19-20]。TALBOYS等优化反应条件,如将pH调节至9.0、 $n(Mg)/n(P)$ 控制在1.3时,结晶效率最高^[10]。这种优化条件下的化学沉淀法不仅提高了磷的回收率,还保证了回收产物的高纯度,使其可以直接作为肥料或工业原料使用。化学沉淀法的优点在于操作简单、成本较低且回收效率高。然而,其缺点是需要使用大量的化学药剂,可能会对环境造成一定的影响。因此,在实际应用中,需要合理控制药剂的用量,并对产生的废渣进行妥善处理,以减少对环境的负面影响。

2.1.2 生物法(EBPR)

生物法(Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR)是一种利用微生物的生物特性来去除污水中磷的方法。聚磷菌(如Candidatus Accumulibacter)在厌氧/好氧交替条件下能够富集磷,从而实现磷的去除和回收。研究表明,采用EBPR技术处理污水时,污泥(干质量)中磷质量分数可达6%~8%^[14]。TAKIGUCHI等的研究表明,这种富含磷的污泥经过处理,如焚烧,灰分中 $w(P)$ 可进一步提升至12%,通过酸浸法提取,磷提取率可达90%以上^[21]。生物法的优点在于其环境友好性,不使用

化学药剂,减少了对环境的污染。此外,该方法还可以同时去除污水中的有机物和氮,具有较高的综合处理效率。然而,生物法的缺点是需要精确控制厌氧/好氧交替条件,对操作条件要求较高,且处理时间相对较长。因此,在实际应用中,需要结合具体的污水处理需求和条件,合理选择和优化生物法的工艺参数,以提高磷的回收效率和质量。

2.1.3 吸附法

吸附法是一种利用吸附材料对污水中的磷进行吸附去除的方法。MEHTA等报道了 $Fe_3O_4@ZrO_2$ 纳米复合材料对低质量浓度磷($<10\text{ mg/L}$)具有较高的吸附容量,可达 45 mg/g ^[12],且强调了这种纳米复合材料具有良好的吸附性能和再生性能,经过5次再生后,吸附效率仍可保持在85%以上。吸附法的优点在于其操作简单、成本较低且对低浓度磷的去除效果较好。然而,其缺点是吸附材料的吸附容量有限,对于高浓度磷的去除效果相对较差,且需要定期更换或再生吸附材料,增加了操作成本。因此,在实际应用中,吸附法通常用于处理低浓度磷污水,或者作为其他磷回收技术的辅助手段,以提高磷的回收效率和质量。

2.2 城市有机废弃物

厨余垃圾是城市有机废弃物的主要来源之一,其厌氧发酵过程中产生大量磷。TROTTA等研究表明,厨余垃圾厌氧发酵后,消化液中的磷质量浓度可达 $200\sim 300\text{ mg/L}$,通过鸟粪石沉淀法回收,回收率可达80%以上^[15]。这种回收方法不仅可以有效去除消化液中的磷,减少对环境的污染,还可以将回收的磷作为肥料或工业原料进行再利用。此外,MA等的研究结果证明了厨余垃圾厌氧发酵后焚烧所得的灰烬中,磷主要以羟基磷灰石($Ca_5(PO_4)_3OH$)的形式存在,通过盐酸浸出法提取,磷的提取率可达95%以上^[9]。这种提取方法不仅可以高效回收磷,还可以同时去除焚烧灰中的重金属,如镉(Cd)的去除率可达98%以上。因此,厨余垃圾厌氧发酵及其后续的磷回收和提取技术,不仅可以实现城市有机废弃物的资源化利用,还可以减少对环境的污染,具有重要的环境和经济效益。

2.3 畜禽粪便与沼渣

猪粪是畜禽粪便的主要来源之一,其磷含量较高。BELARBI等报道了猪粪经过机械脱水后,固体部分的 $w(P)$ 可达2.5%~4.5%^[22]。这种富含磷的固体部分可以直接还田,替代30%的化肥,从而减

少对化学磷肥的依赖,降低农业生产成本,同时还可以改善土壤结构和肥力。此外,猪粪厌氧发酵产生的沼液中也含有一定量的磷。SOUSA等的研究通过电化学沉淀法,可以在电流密度为 10 mA/cm^2 的条件下,从沼液中回收鸟粪石,回收 1 kg 能耗仅为 $1.2\text{ kW}\cdot\text{h}$ ^[23]。这种回收方法不仅可以高效回收沼液中的磷,还可以减少沼液对环境的污染,具有较高的经济和环境效益。

2.4 工业灰渣磷资源回收

2.4.1 污泥焚烧灰

污泥焚烧灰是污水处理过程中产生的固体废弃物,其中含有较高浓度的磷。HAFIZ等的研究表明,污泥焚烧灰中 $w(\text{磷})$ 可达 $8\% \sim 12\%$ ^[24]。通过硝酸浸出法,可以实现磷的高效回收,回收率可达 90% 以上。同时,硝酸浸出法还可以分离污泥焚烧灰中的重金属,如镉(Cd)的去除率可达 98% 以上。这种提磷方法不仅可以实现污泥焚烧灰中磷的资源化利用,还可以减少重金属对环境的污染,具有重要的环境和经济效益。

2.4.2 钢铁厂含磷炉渣

钢铁厂含磷炉渣是钢铁生产过程中产生的固体废弃物,其中含有一定量的磷。MIROSLAV等的研究成果强调了采用碱熔法(NaOH熔融)处理钢铁厂含磷炉渣,磷的提取率可达 85% ^[25]。这种提取方法不仅可以高效回收炉渣中的磷,还可以同时去除炉渣中的杂质,提高磷的纯度。因此,工业灰渣提磷技术不仅可以实现工业废弃物的资源化利用,还可以减少对环境的污染,具有重要的经济和环境意义。

2.5 小结

综上所述,通过污水处理系统磷回收、城市有机废弃物处理、畜禽粪便与沼渣处理以及工业灰渣提磷等多种技术手段,可以实现磷的高效回收和资源化利用。这些技术的应用不仅可以减少磷的浪费和流失,还可以降低对环境的污染,具有重要的经济和环境效益。在未来的发展中,应进一步优化和推广这些磷回收技术,提高磷的回收效率和质量,为实现可持续发展做出贡献。

3 政策与系统支持

3.1 磷循环管理系统

截至目前,荷兰在磷循环管理方面走在世界前列,通过立法和市场机制的结合,实现了高效磷回收和再利用。资料显示,荷兰通过立法要求污水处理厂的磷回收率必须大于 50% ,这一强制性要求促使污水处理厂积极采用先进的磷回收技术,从而

大幅度提高了磷的回收效率^[18]。除此之外,荷兰还建立了“磷银行”交易平台,主要通过市场机制优化磷资源的分配和利用。该平台不仅促进了磷回收企业与农业用户之间的交易,还通过价格机制激励企业提高磷回收的效率和质量。荷兰每年通过“磷银行”交易平台回收的磷量可达 2.1 万 t ,具有显著的经济和环境效益。

另外,美国亚利桑那州通过污水处理厂与农场的合作,实现了磷回收与农业应用的有效结合。可以认为,这种合作模式不仅降低了磷回收的处理成本,还提高了磷在农业中的应用效率。VENKATESAN等的研究表明,通过这种合作模式,回收磷的农业应用成本降低了 30% ^[7]。这种成本降低主要得益于污水处理厂与农场之间的直接合作,减少了中间环节的费用,并且通过优化运输和施用方式,进一步降低了使用成本。这种模式不仅提高了磷的回收率,还促进了磷在农业中的可持续利用,减少了对环境的污染。

3.2 经济激励机制

德国通过经济激励机制,鼓励企业从废水中回收磷,并将回收的鸟粪石制备成有机肥料。德国政府对废水中回收磷(鸟粪石)制备肥料这一过程实行增值税减免政策,近年来将税率从 19% 降至 7% ^[18]。这一政策显著降低了这类肥料的市场成本,提高了其在市场上的竞争力。研究表明,这一政策实施后,农民选用该类肥类的比例提升了 40% 。由此可见,这种经济激励措施不仅提高了该类肥料的市场需求,还促进了磷回收产业的发展,推动了磷资源的循环利用。

目前,我国通过投资补贴政策推动工业磷回收项目的发展。MEHTA等的研究报道了我国政府对工业磷回收项目提供一定的投资补贴,这一政策有效降低了企业的投资成本,提高了企业参与磷回收项目的积极性^[12]。最新的研究表明,以上这一补贴政策推动了工业磷回收项目的年产能增长 15% 。这种政策支持不仅促进了磷回收产业的发展,还减少了工业废弃物对环境的污染,推动了磷资源的可持续利用。

3.3 公众意识

日本通过“磷足迹”标签制度,提高了公众对磷回收产品的认知度和认可度。日本政府开展的“磷足迹”标签制度,通过在产品包装上标注磷的回收信息,让消费者能够直观地了解产品的磷回收情况。RUFÍ-SALÍS等发现这一制度实施后,消费

者对回收磷肥的认可度达到了68%，推动了回收磷肥市场占有率从5%升至22%^[8]。这种公众意识的提升不仅促进了回收磷肥的市场销售，还推动了整个磷回收产业的发展，提高了磷资源的循环利用率。

除了“磷足迹”标签制度，日本还通过广泛的公众教育和宣传活动，进一步提高了公众对磷回收重要性的认识。政府和非政府组织通过举办讲座、展览、宣传活动等方式，向公众普及磷资源的稀缺性、磷回收的环境效益以及回收磷产品的安全性。这种全面的公众教育策略不仅提高了公众的环保意识，还提高了消费者对回收磷产品的接受度，为磷回收产业的可持续发展奠定了坚实的社会基础。

3.4 政策与系统支持的综合效应

3.4.1 政策协同效应

通过立法、经济激励和公众意识提升等多方面的政策支持，可以形成协同效应，推动磷资源的高效循环利用。如上述提到荷兰的立法要求和“磷银行”交易平台的建立，为磷回收提供了法律保障和市场机制；德国的增值税减免政策和中国的投资补贴政策，通过经济手段激励企业和农民参与磷回收；日本的“磷足迹”标签制度和公众教育活动，通过提高公众意识，促进了磷回收产品的市场接受度。这些政策的协同作用，不仅提高了磷回收的效率和质量，还推动了磷资源的可持续利用，减少了对环境的污染。

3.4.2 系统整合的重要性

磷资源的循环利用需要一个完整的系统支持，包括技术研发、市场机制、政策法规和公众参与等多个方面。通过整合这些要素，可以构建一个高效的磷循环管理系统。例如，污水处理厂与农场的合作模式，不仅提高了磷回收的效率，还促进了磷在农业中的可持续利用；“磷银行”交易平台的建立，通过市场机制优化了磷资源的分配和利用；“磷足迹”标签制度和公众教育活动，通过提高公众意识，提高了磷回收产品的市场接受度。这种系统的整合，不仅提高了磷资源的循环利用率，还推动了整个社会的可持续发展。

3.4.3 国际合作与经验分享

目前，各国在磷资源循环利用方面积累了丰富的经验，通过国际合作和经验分享，可以进一步推动全球磷资源的可持续利用。例如，荷兰的“磷银行”模式、美国亚利桑那州的污水厂与农场合作模式、德国的增值税减免政策、中国的投资补贴政策以及日本的“磷足迹”标签制度等，都可以为其他

国家提供有益的借鉴和参考。通过国际合作，各国可以共享技术、经验和资源，共同推动磷资源的高效循环利用，为全球可持续发展做出贡献。

3.5 小结

综上所述，通过立法、经济激励、公众意识提升和国际合作等多方面的政策与系统支持，可以有效推动磷资源的高效循环利用。这些政策和措施不仅提高了磷回收的效率和质量，还减少了对环境的污染，促进了社会的可持续发展。在未来的发展中，应进一步加强政策协同和系统整合，推动磷资源的高效循环利用，为实现全球可持续发展目标做出贡献。

4 未来发展方向及展望

4.1 电化学磷回收技术

电化学技术在磷回收领域具有广阔的应用前景，尤其是双极膜电渗析系统。电化学磷回收主要是双极膜电渗析系统通过高效的选择性分离和低能耗运行，实现磷回收。其在养猪场废水处理中的成功应用，展示了该技术在处理高浓度含磷废水方面的巨大潜力。该系统通过施加电场，利用双极膜的选择性透过性，能够高效地从废水中分离和回收磷。BELARBI等的研究表明，双极膜电渗析系统可以从养猪场废水中选择性地回收磷，选择性系数超过100，表明该系统对磷的分离效果极为显著^[22]。此外，该系统的能耗极低，仅为 $0.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，这使得其在大规模应用中具有显著的经济优势。与传统的化学沉淀法相比，电化学方法不仅提高了磷的回收效率，还减少了化学药剂的使用，降低了对环境的潜在影响。凭借高效性和低能耗特点，电化学法将成为未来磷回收领域的重要发展方向之一。

4.2 微生物矿化技术

微生物矿化技术是一种利用微生物的代谢活动来促进磷的溶解和回收的方法。近年来，基因编辑技术的发展为微生物矿化技术带来了新的突破。YADAV等的研究强调了通过基因编辑技术改造的*Pseudomonas putida*工程菌能够分泌草酸，这种草酸可以显著提高土壤中难溶性磷酸盐（如 FePO_4 ）的溶解率，溶解率提高了4倍^[16]。这种技术不仅提高了磷的可利用性，还减少了对化学溶剂的依赖，具有显著的环境友好性。此外，这种基因编辑的工程菌在实际应用中可以通过生物修复的方式，改善土壤结构，提高土壤肥力，从而促进植物生长。微生物矿化技术的进一步发展，有望为磷资源的可持

续利用提供一种全新的解决方案。

4.3 人工湿地植物筛选技术

在众多湿地植物中,香蒲因其磷吸收能力强而受到广泛关注,每年其对磷的吸收量和灰分磷含量均达到了较高水平。这种植物的强磷吸收能力和强适应性,使其在湿地系统中具有重要的应用价值。MEHTA等的研究报道了香蒲在湿地系统中的年磷吸收量可达 35 kg/hm^2 ,收割后其灰分中的磷含量可达8%^[12]。这种高效的磷吸收能力使得香蒲成为人工湿地系统中理想的植物选择。香蒲通过其根系的吸收和积累作用,能够有效地去除水体中的磷,从而减少磷的流失和水体富营养化问题。此外,香蒲的生长速度快,适应性强,能够在多种环境条件下生长,这进一步增强了其在人工湿地系统中的应用潜力。通过优化湿地设计和植物配置,可以进一步提高香蒲对磷的吸收效率,使其在磷回收和水质净化方面发挥更大的作用。

4.4 小结

总之,电化学磷回收、微生物矿化技术和人工湿地植物筛选等前沿技术,在磷资源的高效回收和可持续利用方面展现出巨大潜力。这些技术不仅提升了磷的回收效率,减少了对化学药剂的依赖,降低了环境风险,还带来了显著的经济和环境效益。随着这些前沿技术的不断发展和应用,它们将为磷资源的可持续利用提供有力支持,进而推动农业和环境的可持续发展。未来的研究应致力于进一步优化这些技术的工艺参数,降低成本,提高效率,以实现其大规模应用和推广。

5 结论

磷的可持续管理需要从农业革新、工业回收与政策驱动3个维度协同发力。磷是不可再生资源,其供应集中于少数国家,全球食品安全对磷的依赖性极高(从农作物生长所需磷肥到畜牧业饲料添加剂),而当前磷利用效率低下、损失率高,已造成严重的水体富营养化问题。因此,实现磷资源的闭环管理不仅是资源保障问题,更关乎生态环境与人类健康。

首先,农业系统是磷消耗的主要领域。传统施肥方式造成大量磷流失,需通过农业革新提升磷利用效率。例如,通过开发高磷利用率作物品种、采用精确施肥技术以及推广生物基肥料等方式,实现从“过量投入”向“精准高效”的转变。其次,工业回收在磷循环中起到关键补充作用。磷广泛存在于城市污水、畜禽粪便及有机固废中,具备再生潜

力。然而,当前回收技术受限于磷浓度低、杂质复杂和经济成本高等因素,需加速突破低浓度磷分离和提纯技术瓶颈。新兴技术如厌氧膜生物反应器、结晶法回收及电驱动富集技术显示出良好前景,但仍需产业化验证与政策激励机制。再者,政策驱动是系统性变革的核心支柱。目前欧盟“循环经济行动计划”已将磷列为关键战略原料,设定磷回收目标并鼓励再生磷产品认证;中国、日本等国家亦启动城市矿产战略,推动有机废弃物资源化。建议构建全球磷资源数据库,实现供应链透明化与动态监测,为科学决策提供依据。此外,应引导生产者责任延伸机制,激励农业与工业领域将回收磷纳入生产全生命周期设计。

通过跨学科协作整合工程技术、环境科学、农业生态、经济政策和民众参与等多元力量,有望在未来将人类磷循环闭合率进一步提升。此目标虽具有挑战性,但通过全球协同治理与区域差异化路径设计,有望推动磷从“线性消耗”向“循环再生”转型,实现资源环境双重安全和粮食保障的可持续未来。

[参考文献]

- [1] BI B, LI G C, GOLL D S, et al. Enhanced rock weathering increased soil phosphorus availability and altered root phosphorus-acquisition strategies [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(5): e17310.
- [2] ISLAM M, SIDDIQUE K H M, PADHYE L P, et al. Chapter four—A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves [J]. *Advances in Agronomy*, 2024, 185:153-249.
- [3] SICA P, SITZMANN T J, MÜLLER-STÖVER D, et al. Strategic placement of mineral and biobased fertilizers for optimizing phosphorus use efficiency: A comprehensive review [J]. *Soil Use and Management*, 2025, 41(1):e70039.
- [4] ZHANG X R, SUN S, HAN X M, et al. Phosphorus recovery from urban wastewater treatment in China: Current status, future potential and a roadmap for sustainable development [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69:106806.
- [5] KOMINKO H, GORAZDA K, WZOREK Z. Evaluation of the potential use of sewage sludge ash in phosphoric acid production and phosphorus recovery technologies [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 70:107054.
- [6] REN L H, LI Y, SHI W, et al. Efficient removal of phosphonate and phosphorus recovery from reverse osmosis concentrate using electroactive membrane reactor [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2025, 215:108148.
- [7] VENKATESAN A K, HAMDAN A H M, CHAVEZ V M, et al. Mass Balance Model for Sustainable Phosphorus Recovery in a US Wastewater Treatment Plant [J]. *Journal of Environmental*

- Quality, 2016, 45(1):84–89.
- [8] RUFÍ-SALÍS M, PETIT-BOIX A, LEIPOLD S, et al. Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838(P3):156422.
- [9] MA Z, ZHANG M Y, HE G Z, et al. Multiple element approach to P recovery and recycling: A green and sustainable strategy by using fused magnesia waste ash [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499:156263.
- [10] TALBOYS P J, HEPPELL J, ROOSE T, et al. Struvite: A slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? [J]. *Plant and Soil*, 2015, 401(1–2):109–123.
- [11] ANDERSON R, BRYE K R, KEKEDY-NAGY L, et al. Total extractable phosphorus in flooded soil as affected by struvite and other fertilizer-phosphorus Sources [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(4):1157–1173.
- [12] MEHTA C M, KHUNJAR W O, NGUYEN V, et al. Technologies to Recover Nutrients from Waste Streams: A Critical Review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, 45(4):385–427.
- [13] KUMAR R, PAL P. Assessing the feasibility of N and P recovery by struvite precipitation from Nutrient-rich wastewater: A Review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(22):17453–17464.
- [14] YUAN Z G, PRATT S, BATSTONE D J. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6):878–883.
- [15] TROTTA S, ADANI F, FEDELE M, et al. Nitrogen and phosphorus recovery from cow digestate by struvite precipitation: Process optimization to maximize phosphorus Recovery [J]. *Results in Engineering*, 2023, 20:101478.
- [16] YADAV D, SINGH N K, PRUTHI V, et al. Ensuring sustainability of conventional aerobic wastewater treatment system via Bio-augmentation of aerobic bacterial consortium: An enhanced biological phosphorus removal Approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262:121328.
- [17] SICILIANO A. Assessment of fertilizer potential of the struvite produced from the treatment of methanogenic landfill leachate using Low-cost Reagents [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 23(6):5949–5959.
- [18] DE BOER M A, ROMEO-HALL A G, ROOIMANS T M, et al. An Assessment of the Drivers and Barriers for the Deployment of Urban Phosphorus Recovery Technologies: A Case Study of The Netherlands [J]. *Sustainability*, 2018, 10(6):1790.
- [19] JIA G G, ZHANG H, KRAMPE J, et al. Applying a chemical equilibrium model for optimizing struvite precipitation for ammonium recovery from anaerobic digester effluent [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147:297–305.
- [20] DARWISH M, ARIS A, PUTEH M H. Ammonium-Nitrogen Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization Technology [J]. *Separation and Purification Reviews*, 2015, 45(4):261–274.
- [21] TAKIGUCHI N, KISHINO M, KURODA A, et al. A Laboratory-scale test of anaerobic digestion and methane production after phosphorus recovery from waste activated sludge [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2004, 97(6):365–368.
- [22] BELARBI Z, DARAMOLA D A, TREMBLY J P. Bench-Scale Demonstration and Thermodynamic Simulations of Electrochemical Nutrient Reduction in Wastewater via Recovery as Struvite [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(15):155524.
- [23] SOUSA C Y, FERNANDES A, AMARO A, et al. Electrochemical Recovery of Phosphorus from Simulated and Real Wastewater: Effect of Investigational Conditions on the Process Efficiency [J]. *Sustainability*, 2023, 15(24):16556.
- [24] HAFIZ N F H, RAHMAN M A, OTHMAN M H D, et al. Review on Phosphorus Recovery as Struvite from Wastewater [J]. *Key Engineering Materials*, 2024, 1002:103–118.
- [25] MIROSLAV H, PAVEL H, JOSEF B, et al. Arsenic as a contaminant of struvite when recovering phosphorus from phosphogypsum Wastewater [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 129:91–96.

《生态产业科学与磷氟工程》征稿、征订、广告启事

为强化科技创新，推动行业绿色低碳发展，热诚欢迎以磷氟等元素为代表的资源加工产业的相关专家、管理及技术人员踊跃投稿。欢迎企业、个人订阅2025年《生态产业科学与磷氟工程》杂志。欢迎相关企业刊登广告，宣传、展示新技术、新产品和新设备！

投稿方式：请登录<http://lfyf.cbpt.cnki.net>，注册作者用户并投稿。

联系电话：0371-6388 7309（征文、征订），6778 1992（广告）

E-mail: espfe2024@123.com

《生态产业科学与磷氟工程》编辑部