

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.08.007

剩余污泥厌氧发酵过程的新兴水解技术及碳流路径思考

庞鹤亮, 王岩, 丁江博, 刘嘉伟, 秦琪文, 张清美, 卢金锁
(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 目前,活性污泥法广泛应用于城市污水处理,剩余污泥处置问题日益凸显。为此研究人员聚焦于前期预处理水解技术来强化剩余污泥厌氧发酵减量,以期缓解固废处置压力。此外,强化破解剩余污泥中的细胞物质和胞外聚合物,能够释放优质碳源,可代替商业碳源以满足污水处理厂前期工艺碳氮比需求。热处理、离子交换处理及热-碱处理等多种技术已被证实可有效实现剩余污泥减量,但现有研究对预处理强化过程中碳生产与碳消耗角度的碳减排问题关注不足。为此,从碳流路径角度归纳总结了剩余污泥厌氧发酵新兴水解技术的研究进展。横向对比发现,多种预处理方式过程中碳减排量达到49.51~160.22 kgCO₂/t污泥,其中碱-热预处理碳减排效果最佳;厌氧发酵预处理生产的碳源与清洁电能相转换的碳生产量均高于10.29 kW·h/t污泥。通过剩余污泥厌氧发酵预处理回收碳源对商业甲醇的替换应用,可产生131.95~426.93元/t污泥的经济效益,其中具有再生复用性能的离子交换预处理经济效益可达到256.58元/t污泥。

关键词: 剩余污泥; 厌氧发酵; 污泥预处理; 水解; 碳减排

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)08-0048-09

Emerging Hydrolysis Methods and Carbon Flow Pathway Thoughts for Residual Sludge Anaerobic Fermentation Processes

PANG Heliang, WANG Yan, DING Jiangbo, LIU Jiawei, QIN Qiwen,
ZHANG Qingmei, LU Jinsuo

(College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The activated sludge method has been widely used in municipal wastewater treatment, and the problem of residual sludge disposal has become a significant challenge. To alleviate the pressure of solid waste, researchers have focused on pretreatment hydrolysis technology to enhance the reduction of residual sludge by anaerobic fermentation. In addition, the enhanced cracking of cells and extracellular polymers in the residual sludge could release high-quality carbon sources to replace commercial carbon sources to meet the carbon to nitrogen ratio requirements of the pretreatment stage of wastewater treatment plants. A variety of physical, chemical, biological, and physical-chemical coupling techniques, such as heat treatment, cation exchange treatment, and heat-alkali treatment, have been demonstrated to be effective for residual sludge reduction. However, there was a lack of carbon reduction from the perspective of carbon production and carbon consumption in the enhanced pretreatment process. In this

基金项目: 国家自然科学基金项目(52470161); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍项目(2025QCY-KXJ-088); 西安市社会发展科技创新示范项目(24SFSF0004)

通信作者: 卢金锁 E-mail: Lujinsuo@xauat.edu.cn

research, the progress of emerging hydrolysis technologies for anaerobic fermentation of residual sludge was summarized from the perspective of carbon flow pathway. It was found that the carbon reduction of various pretreatment methods ranged from 49.51 to 160.22 kgCO₂ per ton of sludge, with the alkaline-thermal pretreatment showing the best carbon reduction effect. The carbon production from the conversion of the carbon source produced by the anaerobic fermentation pretreatment to clean electricity exceeded 10.29 kW·h per ton of sludge. The carbon recovered through the residual sludge anaerobic fermentation pretreatment for commercial methanol replacement application produced economic benefits of 131.95–426.93 CNY per ton of sludge. Among these, the cation exchange pretreatment method, which exhibits regenerative reusability, achieves economic of 256.58 CNY per ton of sludge.

Keywords: residual sludge; anaerobic fermentation; sludge pretreatment; hydrolysis; carbon reduction

近年来,随着城市规模的快速增长,城市污水处理厂的运行压力不断增加。活性污泥法作为现阶段城市污水处理主要技术,随之而来的污泥处置已经成为不容忽视的环境问题。“十四五”城镇污水发展规划指出,在实现污泥稳定化、无害化前提下,需稳步推进污泥资源化利用^[1]。同时,剩余污泥具有污染和资源的双重属性,在“双碳”政策驱动下,资源化逐渐成为污泥处置的主流方向。污泥中含有大量生物质,能源和碳源回收潜力显著。在此背景下,厌氧发酵逐渐成为污泥资源化的优选技术,此过程不仅能够实现污泥固体减量化和稳定化,而且能够回收甲烷(CH₄)或短链脂肪酸(SCFAs)等资源产物。当前,国内外对于污泥产酸发酵和产甲烷发酵的利用途径仍存在争议,但可以确定产酸发酵具有周期短(4~8 d)、运行控制简单等优势,而且不存在产甲烷发酵普遍面临的过度酸化问题,是污泥资源化的优选途径^[2]。通过增强污泥水解和碳源回收来完成固废资源化的行业发展构想,满足“减量化、稳定化、无害化、资源化”的基本准则。SCFAs可以代替商业碳源来满足现阶段污水处理厂前端面临的碳源需求,也可以制备聚烃基脂肪酸酯等多种化工材料。

污泥厌氧发酵可划分为水解过程、酸化过程和产甲烷过程3个阶段,产酸发酵的碳源在第二阶段产乙酸过程完成后得到回收^[3]。为使产物最大化,需强化水解过程以产生更多的SCFAs。后续面临的产甲烷过程将释放大量的CH₄、CO₂等含碳气体,并从液相逸至外部气相环境,此过程将增加温室效应风险。因此,增强污泥管理,从碳流路径角度评价各

类预处理技术对厌氧发酵产酸过程极有必要。现阶段,以热处理、酸碱处理和溶菌酶处理为代表的多种水解技术受到广泛关注。尽管当前污泥水解技术日趋成熟,但新兴的水解技术缺少碳流角度统一的评价和综述。同时,厌氧产酸发酵面临的效益分析缺少横向分析。现有污泥水解技术多数消耗药品或能源,造成碳消耗。而污泥水解又能够提高产酸发酵效能,提升SCFAs产量和碳回收效率,实现碳生产效益。综上,当前污泥水解技术中产酸强化导致的碳生产与药耗/能耗导致的碳消耗之间存在动态关系,实现碳正效益及以碳中和为目标对污泥水解技术进行评价具有重要意义。

1 剩余污泥厌氧产酸发酵的技术瓶颈

污泥产酸发酵产生的SCFAs被认为是高品质碳源,可通过预处理强化厌氧发酵水解过程,提高污泥碳源的释放和生物转化,实现碳源的高效回收。发酵液中碳源的生物利用度较高,通过替代商业碳源的应用与污泥固废总量的减少,能够创造可观的济效益和碳减排效益。借助CiteSpace软件,以Keywords为网络节点,设定的时间跨度为2010年—2024年,使用寻径网络算法(Pathfinder)得到如图1所示的污泥厌氧发酵关键词共现知识图谱。其中,发酵产酸、水解、影响因素、工艺优化等为厌氧发酵研究高中心性节点,可认为水解强度不仅是污泥产酸发酵过程的研究热点,更是需要克服的重要技术瓶颈。

纵观污泥预处理技术的发展历程,可以发现污泥水解难度与碳回收效益存在动态变化关系。水解技术原理的差异致使各类预处理技术的药剂和能量

需求不同,造成碳生产与碳消耗差别较大。因此,通过污泥水解难度进行正碳收益的动态计算,可为剩

余污泥产酸发酵预处理技术的碳流路径提供评价依据。

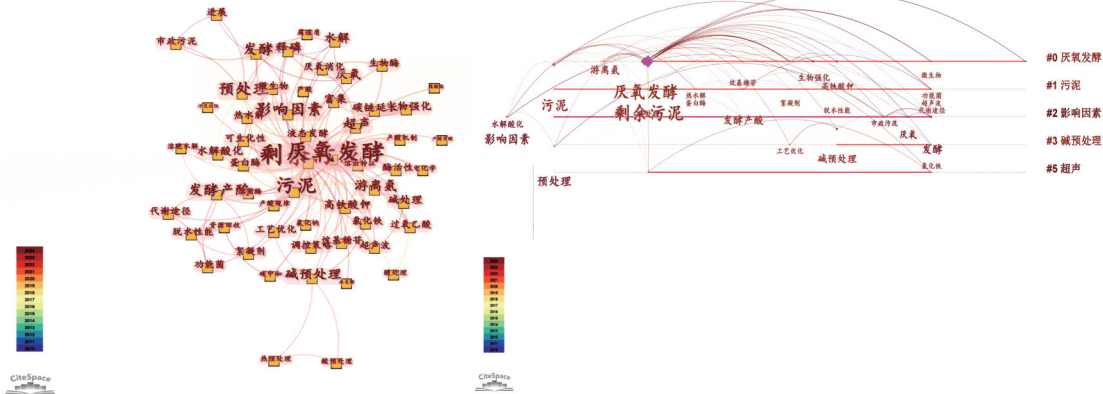


图1 污泥厌氧发酵关键词共现知识图谱

Fig.1 Knowledge graph of keywords co-occurrence for sludge anaerobic fermentation

2 剩余污泥预处理技术研究现状与效能

多种剩余污泥预处理技术作用机理如图 2 所示。可以看出,多种物理、化学、生物及耦合技术对剩余污泥的胞外聚合物(EPS)及内部包裹的生物细胞均可实现强效作用,剩余污泥内部的有机碳源得到高效释放。

问题^[5]。

冻融预处理技术因特殊的条件要求而在寒地剩余污泥处理方面具有得天独厚的优势,其本身不产生二次污染物,具有绿色可持续性^[6]。冻融技术作用于细胞膜可强化污泥絮体的破解,同时增强厚壁菌属相对丰度,提升 SCFAs 产量。冻融预处理受限于其使用区域和处理时间长等问题,现阶段多与其他预处理技术耦合使用,以获得较优效果。

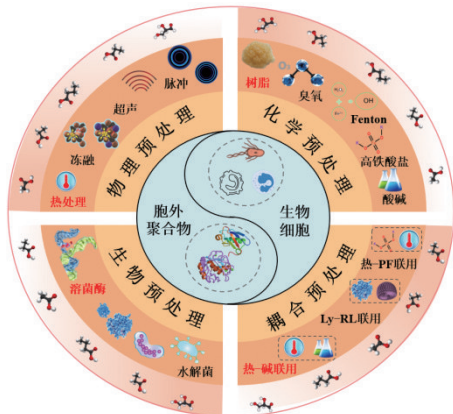


图2 多种预处理技术作用机理

Fig.2 Mechanisms of multiple pretreatment methods

2.1 物理预处理技术

热处理具有污泥水解效果好的优势,是现阶段实际工程中应用最广泛的技术之一。Kim 等^[4]在 40~220 °C 环境下设置 1~3 h 的梯度反应,验证了温和的温度提升可以有效增强污泥的水解效果。热水解虽有诸多优点使其应用广泛,但在温度超过 200 °C 时产生的美拉德反应产物会制约处理效果。在实际生产中,热水解技术还存在占地面积大、电力能源消耗较大、不适宜大规模城市污水处理厂使用等

超声预处理技术简单易行,利用超声作用破坏细胞结构和 EPS 絮体完整性,高水平溶解污泥,达到降碳目的^[7]。关于超声预处理作用的原理,目前还未有清楚阐释,包括空化、加热、动态搅拌、剪切应力、湍流等相关的猜测正在逐渐得到验证^[8]。在实际生产中,超声预处理存在需要连续施加能量、局部高温导致抑制性化合物生成以及在厌氧产酸发酵过程中难以降解等问题。因此,现阶段超声预处理多用于半连续厌氧发酵或耦合处理。

高压脉冲放电技术作为一种新型强有效作用方式近年来被应用于污泥厌氧发酵水解过程中,其处理流程如图 3 所示。该技术将高压电场直接作用于细胞膜和有机物絮体,使复杂有机物分散膨胀转化为简单有机物,更因其温度变化小、时间消耗短等优势备受好评^[9]。快速的高碳物质降解适应现阶段大规模、广范围处理需求,可为工艺下游持续提供足够体量的 SCFAs 商品。但是,现阶段无成型设备满足剩余污泥处理需求,且能耗问题制约了高压脉冲放电技术的工程应用。

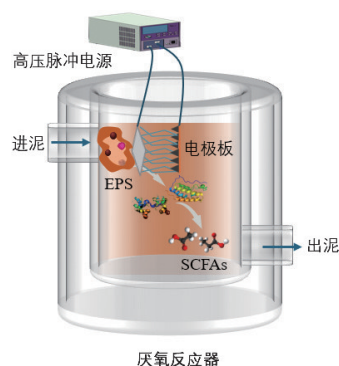


图3 高压脉冲放电预处理流程

Fig.3 Flow chart of high voltage pulsed discharge pretreatment

2.2 化学预处理技术

化学预处理技术凭借能耗低、操作便捷、效果明显等优势而得到广泛研究和应用,常用的化学预处理技术包括酸碱预处理、氧化剂预处理、离子交换预处理等,通过较快速的化学反应来完成细胞的破解和有机物质的分解。

酸、碱预处理通过营造苛刻的pH环境胁迫有机物质发生变化,即在营造的pH环境下有机颗粒发生溶胀现象,蛋白质、糖类物质被水解、剩余污泥中细胞的生物细胞膜被溶解破坏,细胞物质外溢,最终完成EPS和生物细胞的破解^[10]。肖本益等^[11]研究表明,随着pH的变化,可溶性化学需氧量(SCOD)随之增加,证实pH对于污泥水解的重要作用。相较于常规碱预处理(pH=10)效果,先进行1h的强碱预处理(pH=12)再进行常规预处理可以有效增加SCFAs产量。与对照组的SCOD相比,酸、碱预处理均可促进污泥水解,从产酸角度可得出碱预处理优于酸预处理的结论^[12]。酸、碱预处理技术简单效果明显,但是药品成本较高,且外源添加的药品会改变系统环境,造成后期去除困难。

化学预处理技术的另一重点领域是氧化剂在污泥预处理中的研究与应用。高铁酸盐(PF)作为一种强氧化剂,其水解产生的 FeO_4^{2-} 通过双电子转移机制参与有机物的反应,直接作用于细胞磷酸二酯层和核糖部分,造成细胞凋亡^[13]。随着PF投量的增加,SCFAs产量逐渐增大,但是PF>0.50 g/gSS时会对SCFAs的生成造成抑制^[14]。由于外加不可循环使用物质进入污泥系统且经济性较差,现阶段关于PF的研究应用多停留在实验室小试阶段。

Fenton预处理是现阶段较为成熟的氧化处理技

术之一,具有操作简单、能耗较低等优势,近年来被越来越多地应用于污泥预处理场景。Wang等^[15]使用Fenton试剂处理高浓度大分子颗粒污泥,近40%的大分子物质被转化为易利用的小分子物质。值得注意的是,Fenton处理过程中过多的Fe或 H_2O_2 投加都会引起羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的消耗,且兼有试剂易爆炸受到管制的问题。

臭氧预处理技术不改变盐浓度,污泥矿化率低,可与多糖、蛋白质、脂质膜反应,将有机、无机复杂大分子化合物转化为简单小分子物质,故成为研究热点^[16]。研究^[17]表明,在臭氧浓度为0.1 g/gTS条件下,SCFAs产量明显增加, CH_4 几乎不产生,可认为臭氧预处理是优秀的液相碳源向气相转换阻断技术,可从促进酸产量与抑制 CH_4 生成两个途径实现碳减排。该研究还表明,在臭氧浓度为0.52 mg/mgCOD下进行预处理,难降解大分子树脂酸物质含量可降低70%,且SCOD产率增加312.5%。因此,臭氧通常被应用在难降解物质含量大或无机化程度高的环境。由于臭氧在空气中极易分解,如何稳定发生臭氧及保持厌氧产酸发酵过程浓度恒定是现阶段臭氧预处理技术研究的重点方向。

树脂材料凭借其高强度、化学性质稳定等优点在多个领域均有作为依附骨架的成功应用。阳离子交换树脂(CER)预处理技术以树脂为载体,将酸性阳离子送入剩余污泥固液介质中,与维持污泥絮体稳定的二价阳离子进行置换反应,营造阳离子缺失环境^[18],使污泥絮体解体为松散小颗粒,从而完成剩余污泥的水解与碳源回收。CER材料促进污泥增溶碳源转化见图4。

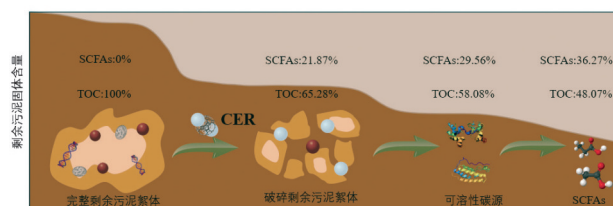


图4 CER材料促进污泥增溶碳源转化示意

Fig.4 Schematic diagram of carbon conversion of sludge solubilization degradation enhanced by CER

CER预处理在其投加量为1.75 g/gSS时,对剩余污泥中结构性阳离子的去除率最佳,且CER可通过再生技术恢复80%的交换能力^[19]。同时,CER可有效吸附污泥中的可溶性氨态氮(NH_4^+-N),利于缓

解 NH_4^+-N 对厌氧发酵过程引起的抑制作用,且满足碳源的高碳氮比要求^[20]。CER在不使用条件苛刻且环境不友好化学物质的情况下,可诱导剩余污泥完成高水平水解降碳,实现更高的SCFAs产量。CER处理过程中无外加药剂进入系统,在经济、环境中都有正向效益,符合低碳、可循环的环境发展理念。

2.3 生物预处理

生物预处理的关键在于酶的产生和使用,生物酶中破解能力强劲的溶菌酶是研究主流。溶菌酶通过破坏细胞肽聚糖来瓦解细胞组织,且可以催化有机物分解,提高大分子有机物的降解率^[21]。随着溶菌酶投加量的增加,污泥的水解效果逐渐增强;Liu等^[5]通过荧光定量法确定溶菌酶处理方式对细菌和古菌的作用效果显著,但对真菌的破解效果并不明显。酶预处理方式具有不使用化学药品、能耗低、对环境无损害等优势,目前研究越来越多。

2.4 耦合预处理

基于物理、化学、生物预处理技术的优势与短板,近年来研究人员采用各类预处理技术耦合处理协同完成污泥水解工作。多种预处理技术的耦合联用增加了污泥水解途径,作用效果更加显著。在耦合处理中可略微降低各技术的作用强度,放宽对条件的苛刻要求。

碱-热联用预处理技术是现阶段研究最广泛的耦合预处理技术之一,其中中低温预处理协同碱性材料,可有效增强污泥水解效果。此外,中低温条件降低了热水解处理对能量的需求,也规避了高温

预处理带来的美拉德反应对厌氧发酵过程的阻碍,使用NaOH和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 组成的混合碱维持环境pH为12,在温度为80℃下进行碱-热联用预处理,协同作用效果明显,热效应促进了碱性能量的发挥^[22]。为避免维持高pH而限制碱的投加量,碱含量一般在80 mg/gTS以下^[23]。目前,关于实际应用中能量效益均衡的工作正在不断进行。

PF-热联用预处理技术充分利用PF的强氧化性对细胞组织的破解和热处理,促使污泥胞外絮体释放^[24]。PF对难降解物质作用效果显著,但较高的药剂成本限制了其发展应用^[25]。热处理的引进可减少PF投加量,获得较好效果。在PF和热处理联用中,按照先进行56 mgPF/gTSS处理、再实施热处理的顺序,可获得最佳效益^[26]。

溶菌酶-表面活性剂联用预处理技术继承了溶菌酶对生物细胞分解的强力作用,辅助以鼠李糖脂、柠檬酸钠等表面活性剂降低液体表面张力的特征,可提高细胞物质外层絮体的溶解,强化污泥水解^[27]。该技术中使用的两种药剂都具有生物降解作用,无化学残留,反应时间短,降碳减量快速,同时生产SCFAs和蛋白质等高附加值产品。受成本限制,菌酶-表面活性剂联用预处理技术未能大规模应用。

3 污泥预处理驱动厌氧产酸发酵的经济效益

总结计算各种技术实施产生的经济效益,可为污泥减量资源化提供指导与工艺可行性验证。表1描述了各类技术水解剩余污泥单位产品的当量产量带来的经济收入及其工程应用条件^[5,13,27-37]。

表1 各类预处理技术SCFAs产量及操作条件对比分析

Tab.1 Comparative analysis of SCFAs yield and operating conditions of various pretreatment methods

预处理技术	甲醇当量产量/ ($\text{tCH}_3\text{OH}/\text{t}$ 污泥)	经济收入/ (元/ t 污泥)	工程应用条件	技术优缺点
热水解	0.098	260.71	140℃	实施条件简单,但能源消耗大
冻融	0.094	249.68	-24℃冻,35℃融	能源消耗少,易实施,但应用范围较小
超声波	0.050	131.95	25 000 kJ/kgTS	处理时间短,易控制,但设备复杂
高压脉冲放电	0.050	132.25	0.12 kW·h/L	处理时间短,效果明显,但设备复杂
酸	0.070	186.36	HCl为3 mol/L	实施简单,效果明显,但设备腐蚀严重
碱	0.094	250.13	NaOH为3 mol/L	实施简单,效果明显,但设备腐蚀严重
PF	0.083	221.51	PF为0.15 g/gTS	处理时间短,效果明显,但成本过高
臭氧	0.062	164.31	O_3 为150 mg/gSS	脱水性能好,效果明显,但稳定性较差
离子交换	0.096	256.58	CER为3 g/gSS	可再生性碳源品质好,但启动成本较高
溶菌酶	0.074	198.07	溶菌酶为20.2 g/gSS	条件温和,无污染,但成本较高
碱-热联用	0.160	426.93	pH为11,温度为90℃	处理时间短,效果明显,但综合成本较高
PF-热联用	0.121	321.65	PF为0.1 g/gTS,温度为55℃	处理时间短,效果明显,但综合成本较高
溶菌酶-表面活性剂	0.089	237.73	溶菌酶为20.2 g/gSS, 表面活性剂为0.3 g/gSS	条件温和,无污染,但综合成本较高

污泥预处理产生的高品质 SCFAs 具有优越的生物亲和性,可作为低碳氮比污水处理过程的外加碳源。甲醇(CH_3OH ,浓度为 1.5 gCOD/g)是污水处理厂的常用商业碳源,将 20 g/L 污泥经各种预处理技术产生的 SCFAs 等量换算为甲醇总量来衡量经济效益。经不同预处理强化水解后产生的 SCFAs 总量转换甲醇总量为 0.050~0.160 t CH_3OH /t 污泥,产生的经济收入超过 131.95 元/t 污泥,最高达到 426.93 元/t 污泥。但是,横向对比其操作条件、高昂的能耗费用及药剂支出限制了多项预处理技术的大规模使用。其中,离子交换预处理中 CER 投加量虽达到 3 g/gSS,但是其拥有可再生恢复能力,通常 CER 可重复使用 20 次以上,降低了处理成本,优势突出。

4 污泥预处理驱动厌氧产酸发酵的减碳效益

对污泥厌氧发酵强化水解过程中碳流路径的关注同样极有必要。药剂和能量在污泥处理过程中的碳消耗与 SCFAs 回收带来的碳生产之间存在碳动态平衡,故从创新角度审视各类预处理技术。通过 SCFAs 生产转化为清洁电能的计算可衡量剩余污泥厌氧发酵预处理中的碳生产量。将 SCFAs 热值/电生产热值定义碳生产系数,通过碳生产系数等量计算厌氧发酵各类预处理方法的碳生产量,以此评价碳生产水平。

各类预处理技术产酸碳生产量及碳减排量如图 5 所示。

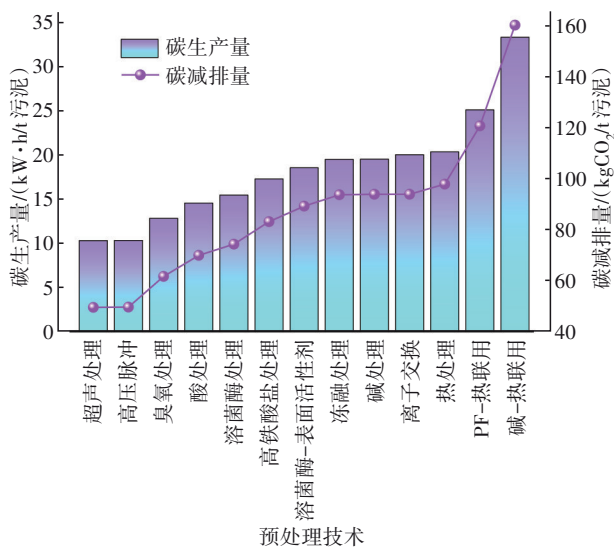


图5 各类预处理技术产酸碳生产量及碳减排量

Fig.5 Carbon production and carbon reduction of various pretreatment methods

由图 5 可以看出,多数预处理技术碳生产量都可以达到 10 kW·h/t 污泥以上(10.29~33.29 kW·h/t 污泥),表明污泥预处理技术的碳生产效益显著。通过碳元素等量计算碳减排水平在现有研究中已有举证^[38]。碳摩尔质量的计算更加科学规范,有效规避了不含碳气体排放的无效计算。将 SCFAs(乙酸、丙酸等)的碳物质含量等量换算为 CO_2 含量,以 CO_2 换算量评价剩余污泥厌氧发酵预处理中有机物碳元素由固相向气相转换的减排水平。各类预处理技术的碳减排量达到 49.51~160.22 kg CO_2 /t 污泥,其中碱处理、离子交换处理、热处理和碱-热耦合处理均具有较好的碳减排效益。特别是耦合技术在预处理过程中显示出明显优势,但是耦合处理中的高碳消耗水平也不容忽视。从碳生产与碳减排角度进行评价,可为剩余污泥预处理水解技术的选择提供支撑。

现阶段,厌氧发酵产酸技术在剩余污泥处理中展现出较大优势,作为前置的水解预处理技术将成为未来研究的热点领域之一。各类新兴预处理技术都能有效实现对剩余污泥水解的减量,但产酸效率差异较大。结合使用的具体环境,对预处理技术的选择应多方面考量,兼顾经济效益、工程实用性及碳减排效能,以实现正向收获。

水解预处理过程在增强剩余污泥破解的同时,应兼顾低能耗、低碳消耗,提升“碳正”效益。同时,从以 SCFAs 产出为代表的碳源回收技术出发,强化经济效益获得,通过末端产品推动预处理技术的发展研究。此外,应减少外界药剂进入污泥系统,避免后续降解回收问题,加强对离子交换预处理等具有低碳、可循环再生技术的研究,关注剩余污泥预处理过程中的碳流路径,优化碳迁移模型,避免过多碳源进入气相,更好地利用液相碳源。

5 结论

本文综合调研了各类新兴污泥水解预处理技术的 SCFAs 生产量与技术实施难度,从碳流路径角度评价了多类技术产生的经济效益与碳减排能力,验证了预处理技术的“碳正”效益。将不同预处理强化水解后产生的 SCFAs 等量替换为商业甲醇,产生的经济效益达到 131.95~426.93 元/t 污泥,其中,离子交换处理技术经济效益可以达到 256.58 元/t 污泥。同时,各类预处理过程中产生的碳生产量十分

可观,达到10.29~33.29 kW·h/t污泥。结合技术实施难度,碳减排量可达49.51~160.22 kgCO₂/t污泥。其中,碱处理、热处理、离子交换处理及多项耦合处理技术均展现出碳减排优越性。特别是,离子交换预处理凭借可再生重复使用的特性在剩余污泥水解预处理技术的碳流路径中展现出较好的发展前景,是值得选择的优势方案。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 2024年中国环境生态统计年报[EB/OL]. (2025-11-28)[2025-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202511/W020251128751529122742.pdf>. Ministry of Ecology and Environment. China Environmental Ecology Annual Report 2024 [EB/OL]. (2025-11-28) [2025-12-19]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202511/W020251128751529122742.pdf> (in Chinese).
- [2] 郝晓地,刘斌,曹兴坤,等. 污泥预处理强化厌氧水解与产甲烷实验研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 335-340.
HAO X D, LIU B, CAO X K, et al. Experimental study on enhancing anaerobic hydrolysis and methane production by sludge pretreatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 335-340 (in Chinese).
- [3] WANG X, JIANG C C, WANG H C, et al. Strategies for energy conversion from sludge to methane through pretreatment coupled anaerobic digestion: potential energy loss or gain [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 330: 117033.
- [4] KIM G B, CAYETANO R D A, PARK J, et al. Impact of thermal pretreatment on anaerobic digestion of dewatered sludge from municipal and industrial wastewaters and its economic feasibility [J]. Energy, 2022, 254: 124345.
- [5] LIU G G, LI X K, ZHANG R J, et al. Enhancing the decomposition and volatile fatty acids production of excess sludge: synergistic pretreatment by endogenous lysozyme and rhamnolipid [J]. Fuel, 2022, 323: 124233.
- [6] 高彬,刘茜. 冻融法对剩余污泥脱水性能的研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(11): 113-114.
GAO B, LIU Q. Study on dewatering performance of excess sludge by freeze + thaw method [J]. Environment & Development, 2018, 30(11): 113-114 (in Chinese).
- [7] WANG Q, XU Q Y, WANG H D, et al. Molecular mechanisms of interaction between enzymes and Maillard reaction products formed from thermal hydrolysis pretreatment of waste activated sludge [J]. Water Research, 2021, 206: 117777.
- [8] ESPINOZA J E R, LIZAMA A C, PALMA R Y, et al. 8-Ultrasonic pretreatment of sewage sludge, an effective tool to improve the anaerobic digestion: current challenges, recent developments, and perspectives [M]// SHAHM P, RODRIGUEZ-COUTO S. Development in Wastewater Treatment Research and Processes Treatment and Reuse of Sewage Sludge: An Innovative Approach for Wastewater Treatment. USA: Elsevier, 2022: 119-138.
- [9] MA X, LIU J Y, HU P, et al. Combining ethylene diamine tetra acetic acid and high voltage pulsed discharge pretreatment to enhance short-chain fatty acids and phosphorus release from waste activated sludge via anaerobic fermentation [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118252.
- [10] HU D X, ZHU N, LI Y, et al. Acid/alkali pretreatment enhances the formation of vivianite during anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115760.
- [11] 肖本益,刘俊新. 不同预处理方法对剩余污泥性质的影响研究[J]. 环境科学, 2008(2): 2327-2331.
XIAO B Y, LIU J X. Impacts of different pretreatments on characteristics of excess sludge [J]. Environmental Science, 2008(2): 2327-2331 (in Chinese).
- [12] 彭永臻,邢立群,金宝丹,等. 强碱预处理和碱性强度对剩余污泥发酵的影响[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(2): 277-284.
PENG Y Z, XING L Q, JIN B D, et al. Effect of strong alkaline pretreatment and alkaline strength on fermentation of residual sludge [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(2): 277-284 (in Chinese).
- [13] 钮劲涛,金宝丹,马三贵,等. 高铁酸钾对剩余污泥厌氧发酵性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(8): 986-992.
NIU J T, JIN B D, MA S G, et al. Effect of potassium ferrate on anaerobic fermentation performance of waste activated sludge [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(8): 986-992 (in Chinese).
- [14] 王文海,李梅,王宁,等. 高铁酸盐预处理剩余污泥强化厌氧发酵研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(9): 51-58.

- WANG W H, LI M, WANG N, et al. Research progress on enhanced anaerobic digestion of excess sludge by ferrate pretreatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(9):51-58(in Chinese).
- [15] WANG Y, WANG H, JIN H, et al. Application of Fenton sludge coupled hydrolysis acidification in pretreatment of wastewater containing PVA: performance and mechanisms[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114305.
- [16] 王晨,施素丽. 剩余污泥预处理技术研究进展[J]. *河北环境工程学院学报*, 2021, 31(4):62-66.
- WANG C, SHI S L. Review of activated sludge pretreatment technologies[J]. *Journal of Hebei University of Environmental Engineering*, 2021, 31(4): 62-66 (in Chinese).
- [17] HODAEI M, GHASEMI S, KHOSRAVI A, et al. Effect of the ozonation pretreatment on biogas production from waste activated sludge of Tehran wastewater treatment plant[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2021, 152: 106198.
- [18] HE J G, ZHANG P F, ZOU X, et al. Impact of divalent cations on lysozyme-induced solubilisation of waste-activated sludge: perspectives of extracellular polymeric substances and surface electronegativity[J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134841.
- [19] 庞鹤亮. 基于阳离子调控的剩余污泥产酸发酵强化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- PANG H L. Enhanced Research on Acid-producing Fermentation of Residual Sludge Based on Cation Regulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).
- [20] PAN X L, LI J F, HE R N, et al. Reconsidering operation pattern for cation-exchange resin assistant anaerobic fermentation of waste activated sludge: shorting residence period towards dosage-reduction and anti-fouling[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135920.
- [21] ZHANG P F, ZHOU Y, PAN X L, et al. Enhanced acidogenic fermentation from Al-rich waste activated sludge by combining lysozyme and sodium citrate pretreatment: perspectives of Al stabilization and enzyme activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 864: 161108.
- [22] ZOU X M, YANG R J, ZHOU X, et al. Effects of mixed alkali-thermal pretreatment on anaerobic digestion performance of waste activated sludge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120940.
- [23] TOUTIAN V, BARJENBRUCH M, LODERER C, et al. Impact of process parameters of thermal alkaline pretreatment on biogas yield and dewaterability of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2021, 202: 117465.
- [24] 杨文静. 高铁酸钾促进剩余污泥厌氧发酵产酸的调控策略及机制[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
- YANG W J. Regulatory Strategies and Mechanisms of Potassium Perchnetate to Promote Acid Production by Anaerobic Fermentation of Residual Sludge[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022 (in Chinese).
- [25] WANG X M, WANG Y F, ZHENG K X, et al. Enhancing methane production from waste activated sludge with heat-assisted potassium ferrate (PF) pretreatment: reaction kinetics and mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160441.
- [26] YANG W J, HE Z W, REN Y X, et al. Low temperature assisting potassium ferrate treatment to enhance short-chain fatty acids production from waste activated sludge[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107821.
- [27] XIANG Z Z, HUANG X, CHEN H F, et al. Insights into thermal hydrolysis pretreatment temperature for enhancing volatile fatty acids production from sludge fermentation: performance and mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 379: 129032.
- [28] SHE Y C, HONG J M, ZHANG Q, et al. Revealing microbial mechanism associated with volatile fatty acids production in anaerobic acidogenesis of waste activated sludge enhanced by freezing/thawing pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122869.
- [29] LIZAMA A C, FIGUEIRAS C C, PEDREGUERA A Z, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the semicontinuous anaerobic digestion of waste activated sludge with increasing loading rates [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 130: 32-39.
- [30] HU P S, LIU J Y, BAO H X, et al. Enhancing phosphorus release from waste activated sludge by combining high-voltage pulsed discharge pretreatment with anaerobic fermentation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1044-1051.
- [31] WU L, ZHANG C, HU H, et al. Phosphorus and short-chain fatty acids recovery from waste activated sludge by anaerobic fermentation: effect of acid or alkali pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 240: 192-196.

- [32] WANG Y F, WANG X M, WANG D B, et al. Ferrate pretreatment-anaerobic fermentation enhances medium-chain fatty acids production from waste activated sludge: performance and mechanisms [J]. *Water Research*, 2023, 229: 119457.
- [33] 李斯施, 刘东方, 赵乐军, 等. 臭氧预处理促进剩余污泥的水解酸化[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(7): 3426-3430.
LI S S, LIU D F, ZHAO L J, et al. Ozone pretreatment for improving hydrolysis and acidification of excess sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(7): 3426-3430 (in Chinese).
- [34] PANG H L, LI L, HE J G, et al. New insight into enhanced production of short-chain fatty acids from waste activated sludge by cation exchange resin-induced hydrolysis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 388: 124235.
- [35] 侯银萍, 蔡斌斌, 张安龙, 等. 不同预处理方法促进剩余污泥破胞及厌氧发酵产气效率的研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, 40(2): 13-19, 27.
HOU Y P, CAI B B, ZHANG A L, et al. Research on promoting sludge cracking and the biogas production efficiency of anaerobic digestion by different pretreatment methods [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2022, 40(2): 13-19, 27 (in Chinese).
- [36] WANG X M, WANG Y F, TANG L, et al. Heat-assisted potassium ferrate pretreatment enhancing short-chain fatty acids production from waste activated sludge: performance and mechanisms [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134989.
- [37] LI X K, XIE H W, LIU G G, et al. Optimizing temperature for enhancing waste activated sludge decomposition in lysozyme and rhamnolipid pretreatment system [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341: 125868.
- [38] PANG H L, WANG Y, QIN Q W, et al. New insights into the cation exchange resin-driven carbon migration and recovery from waste activated sludge: mass transfer environment and cation exchange force [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 66: 105970.

作者简介: 庞鹤亮(1990—), 男, 江苏东海人, 博士, 教授, 研究方向为电子介体驱动污泥水解原理及固废资源化。

E-mail: pangheliang00007@163.com

收稿日期: 2024-08-03

修回日期: 2025-12-20

(编辑: 丁彩娟)

坚持山水林田湖草沙一体化和系统治理,
构建从山顶到海洋的保护治理大格局