

面向高寒、高固、高稳定性的城镇污泥高效厌氧消化产甲烷技术发展方向

魏亮亮*, 邵朔澄, 冯立魁, 赵维鑫, 李莉莉, 李 丹

(哈尔滨工业大学 环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 城镇污泥的低碳处理及资源化处置是实现污水处理“零碳”甚至“负碳”的重要途径。随着全球对气候变化的关注度不断提高, 以及中国“双碳”目标的提出, 探索和应用新型城镇污泥资源化处置技术已经成为当前行业亟待解决的瓶颈问题。从面向高含固率污泥、适用高寒地区处置、力求高稳定性运行三个维度出发, 系统地探讨了城镇污泥高效厌氧消化(AD)强化技术的研究现状与发展前景。针对高寒地区污泥厌氧消化效能低的问题, 探讨了污泥预处理、导电材料添加和保温加温等强化措施对污泥厌氧消化的影响。总结了运行条件优化和高效传热传质的反应器开发对高含固污泥厌氧消化的促进效果。阐述了厌氧共消化和分子量底物复配技术对缓解系统代谢产物抑制, 维持系统高稳运行的作用机制。基于上述分析, 提出了未来厌氧消化技术的优化方向。最后, 结合我国城镇污泥泥质特征, 重点展望了污泥厌氧消化技术的发展与应用, 以期为后续高固、高稳定性为导向, 且适用于高寒地区城镇污泥高效厌氧消化技术的发展提供参考。

关键词: 高含固; 厌氧消化; 厌氧共消化; 预处理; 城镇污泥; 强化技术

中图分类号: X705

文献标识码: A

Development Directions for High-Efficiency Anaerobic Digestion Technology with High Cold Tolerance, High Solid Content, and High Stability for Sewage Sludge Methane Production

WEI Liangliang*, SHAO Shuocheng, FENG Likui, ZHAO Weixin, LI Lili, LI Dan

(State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Low-carbon treatment and resource disposal of urban sludge is an important way for sewage treatment to achieve "zero-carbon" or even "negative-carbon" treatment. With increasing global attention to climate change and the proposal of China's dual-carbon goal, the exploration and application of new technologies for urban sludge resource treatment and disposal have become a bottleneck issue that needs to be addressed in the current sewage treatment industry. In this study, we systematically review the research status and development directions of efficient anaerobic digestion enhancement technologies of sewage sludge from three aspects: high solid content, cold area treatment, and stable sewage sludge operation. Regarding the low efficiency of anaerobic digestion of sewage sludge in cold areas due to geographic and climatic factors, we discuss the effects of various pretreatment methods, including microwave and ultrasonic pretreatment, acid-alkali pretreatment, oxidation pretreatment, the addition of conductive materials like biochar, and heat preservation, particularly using ground-source heat pump systems on anaerobic digestion of sewage sludge. We emphasize the impacts of calcium peroxide coupling freeze-thaw pretreatment and magnetic oil sludge-

收稿日期: 2024-12-16

修回日期: 2025-01-11

接受日期: 2025-01-14

DOI: 10.20078/j.eep.20250110

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52470144, 52270034); 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3207404)

第一作者: 魏亮亮(1985—), 男, 甘肃天水人, 教授, 主要研究方向为城镇污泥处理处置及资源化。E-mail: weil333@163.com

based biochar addition technologies on anaerobic digestion of sewage sludge in cold areas. We summarize the optimization of operating conditions, such as stirring intensity, organic loading, temperatures, and C/N ratios, as well as the design of a high-efficiency heat and mass transfer anaerobic reactor using computational fluid dynamics simulation to enhance the anaerobic digestion of sewage sludge with high solid content. Furthermore, we deeply analyze the mechanisms of anaerobic co-digestion of sewage sludge and other substrates, including food waste and agricultural wastes (pig manure, wheat straw, and cow dung), along with molecular weight substrate compounding technology to alleviate the inhibition of the system by intermediate products (volatile fatty acid and free ammonia), thereby maintaining the high stability of the anaerobic digestion systems. We describe the applicable technology and index systems facing different directions and clarify the heat and mass transfer mechanism of methane production in anaerobic digestion systems under various dimensions. Additionally, we propose the future optimization directions for anaerobic digestion technology from the perspectives of microbial ecology, innovative reactor design, intelligent control systems, and multi-energy complementary systems. Finally, we prospect the development and application of sewage sludge anaerobic digestion technology based on the characteristics of sewage sludge in China, hoping to provide a reference for the subsequent development of high-efficiency anaerobic digestion of sewage sludge in cold regions, focusing on high solid content and high stability.

Keywords: High solid content; Anaerobic digestion; Anaerobic co-digestion; Pretreatment; Sewage sludge; Enhancing technology

0 引 言

城镇污泥作为污水生物处理过程的副产物,污水处理过程中约 40%~50% 的有机物、85%~95% 的重金属和磷元素、20%~30% 的总氮最终转移至污泥中,使污泥具有了“污染”与“资源”的双重属性^[1]。毫无疑问,污泥若未经妥善的处理处置将会对环境产生严重的污染、造成资源的极大浪费。因此,面向国家绿色发展与“双碳”目标,对污泥进行减量化、无害化、资源化处理处置,是污水处理厂实现碳达峰和碳中和目标的重要一步^[2-3]。

污泥处理处置技术主要包括好氧堆肥、厌氧消化、卫生填埋、土地利用和协同焚烧等^[4]。其中,厌氧消化(AD)在实现污泥减量化的同时,兼具甲烷生产和回收、运行成本低等优势,在世界范围内得到了广泛研究。污泥有机物及其胞外聚合物结构稳定,不充分的水解在一定程度上会成为制约污泥厌氧消化效能提升的“限速”步骤。当前,国内外学者通过运行参数调控、水解强化和外源物质添加等措施,以促进污泥有机物的转化和提高甲烷产率^[5]。例如,CHEN 等^[6]采用水热耦合光催化技术对污泥进行预处理,甲烷产量提高了 66%。WANG 等^[7]则通过碱预处理与固定化电极

联用以强化污泥消化产甲烷效能。相比于空白组,联用系统的甲烷产量提升了 38%~94%。

近年来,污泥厌氧消化“限速”步骤得到广泛研究。例如,有学者针对高寒环境气候场景下(特别是东北地区)厌氧消化系统中功能微生物活性维持,重点开展了有机物转化途径与产甲烷强化的研究^[8]。针对污泥中重金属、抗生素等生物毒性大量富集对厌氧消化效率的不利影响,金翊启等^[9]研究了生物毒素的浓度阈值。此外,传统污泥厌氧消化系统反应容器过大,传热传质效率低下,也是制约污泥厌氧消化产气效能提升的主要因素^[10]。因此,在全球共同应对气候变化、能源资源短缺的背景下,有针对性地开展面向高寒-高固-高稳定性的城镇污泥高效厌氧消化产甲烷技术,对于污染防治攻坚,生态文明建设,实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义^[3]。

本文以“污泥、高含固、厌氧消化、共消化、预处理、高寒、导电材料和传热传质”等为关键词,通过“污泥、厌氧消化”与其他关键词组合,在中国知网和 Web of Science 上检索了近十年国内外的相关研究。通过系统剖析污泥厌氧消化过程面临的突出问题,总结面向不同境况的污泥厌氧消化强化技术,以为污泥厌氧消化技术的深度推广提供基础参考。

1 面向高寒地区的污泥厌氧消化系统优化及效能提升

高寒地区冬季低温会严重限制与厌氧消化相关微生物功能酶的活性,进而影响微生物代谢速率。因此,高寒地区污泥厌氧消化过程往往存在有机物转化慢、甲烷产量低的问题,污泥水解成为高寒地区污泥厌氧消化过程的关键限速步骤。

1.1 污泥预处理技术的研究进展

针对高寒地区消化系统酶活性低,微生物代谢慢的问题,大量学者开展了基于水解强化的污泥高效厌氧消化技术研究,主要包括污泥厌氧消化预处理技术和外源物质添加技术。常见的污泥预处理技术主要有物理法、化学法、生物法以及上述三类方法的组合法(微波-碱、热-碱等)^[11-14]。

微波和超声预处理工艺是典型的物理预处理法,因其出色的处理效果及较短的反应时间而备受青睐。韦新东等^[15]采用超声技术对活性污泥进行预处理(表1),当超声时间为10 min,超声声能密度 $3.5625\text{ W}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,污泥溶解性化学需氧量(sCOD)浓度较空白组提高3.07倍。然而,微波法与超声预处理法属于高能耗工艺,在一定程度上限制了其广泛的应用。热水解法亦是常见的污泥物理预处理方法,CHEN等^[12]研究发现 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的热水解预处理显著提升了活性污泥的厌氧

表1 不同预处理方式对污泥厌氧消化甲烷产量的影响

Table 1 Effects of different pretreatment methods on methane production in sludge anaerobic digestion

预处理技术	底物	效果(较空白组)	参考文献
碱预处理	活性污泥	甲烷产量提升1.98倍	[12]
热水解预处理	活性污泥	甲烷产量提升2.02倍	[12]
游离亚硝酸盐预处理	活性污泥	VFAs产量提升3.14倍	[13]
碱性高铁酸盐预处理	活性污泥	sCOD浓度提高11.00倍	[14]
超声预处理	活性污泥	sCOD浓度提高3.07倍	[15]
超声-碱预处理	活性污泥	sCOD浓度提高9.85倍	[15]
热水解预处理	污泥混合物	甲烷产量约提高2.00倍	[16]
碱渣预处理	剩余污泥	甲烷产量提升3.00倍	[17]
臭氧预处理	剩余污泥	甲烷产量提升4.96倍	[18]
$\text{K}_2\text{FeO}_4\text{-FeCl}_3$ 预处理	剩余污泥	总VFAs产量提升4.45倍	[19]

注: VFAs为挥发酸。

消化效能(1 h预处理可使甲烷产量提升2.02倍)。同样,NGO等^[16]指出,与高温热水解预处理($160\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$)相比, $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热水解可加快污泥有机物的转化,使甲烷产量提高2.00倍。整体而言,高温热水解能耗大,对设备的要求较高,但预处理时间较短^[4]。

酸碱预处理是污泥化学预处理法中最常见的工艺。CHEN等^[12]发现用NaOH对活性污泥进行碱预处理可加速厌氧消化系统有机物的转化和甲烷的生成,最大甲烷产量较空白组提升1.98倍。此外,也有学者通过将酸性及碱性物质与污泥混合进行预处理,如李晋^[17]采用碱渣对剩余污泥进行预处理,结果表明碱渣中的游离氨可以促进细胞壁破裂。剩余污泥经3%碱渣预处理2 h后厌氧消化系统甲烷产率较空白组提升了3.00倍。化学氧化法亦是常用的污泥预处理手段,通过向厌氧消化系统加入强氧化剂,实现污泥细胞的崩解和有机质的释放,从而促进污泥水解。该方法操作简单、成本低、处理效率高。常见的氧化剂主要包括臭氧、高铁酸钾、 H_2O_2 和Fenton等。石璞玉等^[18]研究发现,当臭氧处理时间为10 min时,污泥产甲烷率最高,为 318.39 mL/g VS ,是对照组的4.96倍。此外,两种方法耦合对污泥进行预处理也得到了诸多的关注。田梦佳等^[19]通过 $\text{K}_2\text{FeO}_4\text{-FeCl}_3$ 对污泥进行预处理,使得产酸量提升了4.45倍。然而,氧化剂的使用会增加运行成本,引入新的污染物,进而影响厌氧消化系统中微生物活性。

1.2 导电材料添加技术研究进展

生物炭、活性炭、磁铁矿和磁性生物炭等导电材料是广泛应用于强化高寒地区污泥厌氧消化的外源物质^[11,20-26](表2)。ZHANG等^[20]和HAROUN等^[21]探究了生物炭对污泥和厨余垃圾厌氧共消化的影响机制,在生物炭添加量为 $15.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,厌氧消化系统产气效能较空白组提升了2.00倍和1.88倍。TIWARI等^[22]对比了生物炭、活性炭对污泥和麦壳共消化的促进效果,体系中添加 $20.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 生物炭和活性炭时,甲烷产量的提升效果相差不大,分别为对照组的1.27倍和1.22倍。上述的结果表明,在不同的AD反应器中,生物炭/活性炭的最佳投加量波动较大,促进效果也不尽相同,这可能是消化底物、操作温度和生物炭性质的差异造成的。

磁铁矿一方面作为导电体,促进互营微生物

表 2 不同导电材料添加对污泥厌氧消化
甲烷产量的影响

Table 2 Effects of different exogenous substances on
methane production in sludge anaerobic digestion

外源物质	添加量/ (g·L ⁻¹)	底物	甲烷产量较 空白组提升/倍	参考文献
生物炭	15.00	污泥和厨余	2.00	[20]
生物炭	5.33	污泥和厨余	1.88	[21]
生物炭	20.00	污泥和麦壳	1.27	[22]
活性炭	20.00	污泥和麦壳	1.22	[22]
活性炭	30.00	活性污泥	1.29	[23]
磁铁矿	15.00	颗粒污泥	1.13	[24]
磁性生物炭	5.56	活性污泥	2.15	[25]
磁性生物炭	5.00	活性污泥	1.45	[26]

间的直接种间电子传递(DIET)过程,促进有机物转化;另一方面为微生物提供微量元素如铁等,促进系统微生物代谢,加速分解有机物。因此,近些年来,以磁铁矿或磁铁矿改性的生物炭得到了广泛的研究。CHEN等^[24]研究指出,磁铁矿可以富集铁还原菌等功能微生物,强化污泥有机物的降解,提升甲烷产量。ZHANG^[25]和LIU等^[26]通过铁改性制备了磁性生物炭,并将其成功应用于污泥厌氧消化系统,结果表明磁性生物炭存在磁铁矿和生物炭的协同作用,强化了有机物的降解和甲烷的产生,甲烷产量分别提升2.15倍和1.45倍。外源物质的作用效果与其投加量有关,当投加量超过一定浓度时,会对厌氧消化系统产生胁迫作用,影响消化性能。

1.3 面向高寒地区的厌氧消化强化技术

针对厌氧消化系统在高寒地区低温条件下“低温低效”的问题,许多学者通过对反应器进行保温和加温等措施以维持厌氧消化稳定运行。常用的增温保温技术有电热膜技术、太阳能-沼气技术、地源热泵-沼气技术、热电联产技术等。石惠娴等^[27]通过地源热泵技术以地热为热能来源,为地面厌氧消化系统加热,地源热泵使发酵温度保持在(32±2)℃的中温条件,容积产气率最高可达到1.1 m³·m⁻³·d⁻¹。热电联产技术是通过沼气发电余热对消化反应器进行加热。当室外温度为2℃时,通过热电联产技术可以将反应器发酵温度提升至31.8℃^[28]。此外,优化增温策略,降低耗能也是面向高寒地区厌氧消化的研究热点。谭婧

等^[29]采用浓稀分流重点增温的厌氧消化工艺,使得猪粪在低温条件下实现厌氧消化产气率达10.8 m³/t,较传统厌氧消化工艺,容积产气率提升了50%,同时节省了41%的增温能耗。除了增温保温技术,筛选功能微生物也是强化低温厌氧消化产气效能的常用方法。姚利等^[30]在结合增温保温设施的同时,利用现代分子生物学技术筛选和驯化耐低温和具有分解秸秆作用的产甲烷菌,并接种到厌氧消化反应器中,实验表明沼气产量提高了38.2%~45.5%。王昱琛等^[31]为提高低温环境下厌氧消化系统的运行效能,向反应器内加入不同体积的复合菌剂,结果表明反应器内的VFAs和甲烷产量得到明显提升,乙酸型产甲烷过程得到了促进。

在低温条件下对底物进行预处理提升底物增溶和水解,是强化厌氧消化的又一有效途径。MCDERMOTT等^[32]在低温条件下利用超声波预处理水产养殖废水,研究结果表明,超声波预处理可以增强10%的COD去除率,沼气产量从0.2 L/d上升至0.45 L/d,甲烷浓度平均增加了10%。WEI团队^[33]提出了过氧化钙耦合冻融预处理的污泥厌氧消化前处理技术,实现污泥胞外聚合物(EPS)的高效破壁。如图1所示,在CaO₂氧化耦合冻融的协同作用下,细胞膜和EPS基质受到了严重的攻击和破坏,大量大分子有机物(如蛋白质和碳水化合物)进入了系统上清液,致使sCOD浓度达到了2676.2 mg/L,远高于单独CaO₂处理组的1306.5 mg/L、单独冻融组的843.8 mg/L和空白组的411.5 mg/L;耦合系统的可溶性蛋白和多糖含量分别达到了645.4 mg/L和374.6 mg/L,较对照组提高了2.54倍和3.76倍。在此过程中,耦合预处理技术促进了紧密结合型EPS中的有机物向松散结合型EPS和溶解态EPS的转化,加速系

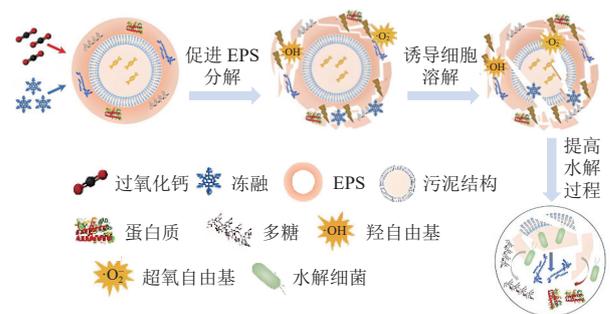


图 1 冻融耦合过氧化钙预处理强化污泥水解机理图^[33]
Fig. 1 Mechanism diagram of sludge hydrolysis enhanced
by freeze-thaw coupled calcium peroxide pretreatment^[33]

统 VFAs 的产生,为高效产甲烷过程提供充足的底物。经过耦合预处理的污泥,每吨可实现 0.116~0.291 t CO₂ 的碳减排效益。

针对污泥厌氧消化系统中因高寒因素限制微生物活性,进而降低种间电子传递效率而导致甲烷产量低的问题,WEI 团队^[34]利用大庆地区油泥制备开发了油泥基磁性生物炭,有效提升厌氧消化系统产甲烷效能。添加 2.0 g Fe²⁺改性的油泥基磁性生物炭厌氧消化系统的甲烷产量达 144.44 mL/g VS,远高于空白组的 79.72 mL/g VS^[34]。油泥基磁性生物炭促进甲烷产量的潜在机理如图 2 所示,其可促进污泥中大分子有机物特别是蛋白质的分解。具体而言,油泥基磁性生物炭中 Fe₃O₄ 可以通过氢键与蛋白中的氨基酸连接,使得蛋白结构由 α 螺旋、β 折叠向无规则卷曲变化,增加蛋白的松散性,有利于后续污泥水解。油泥基磁性生物炭还可以为微生物提供微量元素,加速微生物的代谢活动,进而增强系统导电性,有利于 DIET 过程。此外,油泥基磁性生物炭丰富的含氧官能团和较强的电子转移能力进一步促进污泥厌氧消化过程的 DIET 过程,加速了甲烷的生成。

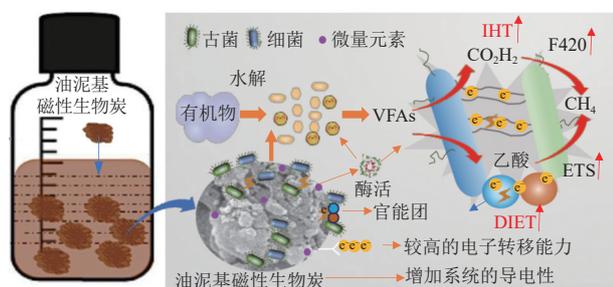


图 2 油泥基磁性生物炭促进污泥厌氧消化的潜在机理^[34]

Fig. 2 Potential mechanism of magnetic oil sludge-based biochar to promote sludge anaerobic digestion^[34]

2 面向高含固底物的厌氧消化系统构建及传热传质强化

传统的污泥厌氧消化系统存在水力停留时间长、反应强容积大、单位容积产气率低等问题,且传统污泥处理成本约占污水处理厂运营成本的 40%~50%。因此开发高效、低能耗处理技术成为污泥处理的迫切需求^[35]。污泥高含固厌氧消化技术相对于传统污泥厌氧消化具有单位容积处理量大、处理周期短、有效容积沼气产率高、沼液排放少等优点^[36],近些年来受到了诸多关注。需要指出的是,高含固污泥自身黏度较高、流动性较差,

会造成系统传热传质不均匀。因此,有必要对其运行参数、消化性能进行全方位优化,以期高含固厌氧消化技术的推广提供理论与技术支撑。

2.1 面向高含固厌氧消化的强化技术

针对高含固污泥流动性差的问题,国内外学者的研究多侧重于探究厌氧消化性能影响因素及污泥流态变化等。华飞虎等^[37]探讨了影响高含固厌氧消化性能的因素,结果表明温度、含固率、碳氮比(C/N)及有机负荷率(OLR)对其消化效能影响较大。例如,当污泥 VS/TS 为 55%~60%、OLR 由 3.1~3.3 g VS·L⁻¹·d⁻¹ 增加到 4.1~4.3 g VS·L⁻¹·d⁻¹ 时,系统甲烷产率由 0.16 L·g⁻¹ VS_{add} 下降到 0.11 L·g⁻¹ VS_{add}^[38]。杨梦^[39]进一步研究了搅拌强度对高含固污泥厌氧消化性能和流态的影响,发现扩大反应器内高速搅拌区域能促进系统产气,高剪切速率有利于 *Methanosarcina* 生长。此外,底物的 C/N 比也是影响高含固污泥高效厌氧消化的重要因素之一,过高的 C/N 比会使得系统有机酸含量升高,容易发生酸抑制;当污泥 C/N 比过低时,系统对氨氮的缓冲能力不足,容易造成氨抑制。有研究表明,当底物的 C/N 比在 27 : 1~32 : 1 范围内,高含固厌氧消化系统的产气效能不受抑制^[40]。TS 浓度在一定程度上会严重影响高含固厌氧消化的效能,戴晓虎等^[40]探究了游离氨浓度对 TS 为 15% 的污泥高含固厌氧消化的影响,结果表明当游离氨从 400 mg/L 增加到 526 mg/L 时,消化系统的日产气量和 VS 降解率较对照组分别降低了 14.2% 和 33.7%。

2.2 面向高含固厌氧消化的传热传质强化技术

针对高含固厌氧消化系统含固率高,传热传质不均匀而造成系统产气量低的问题,WEI 团队^[41]以高含固水平流厌氧反应器为研究对象,以提升非均相高含固有机固废的传质、传热为目标,通过计算流体力学(CFD)模拟研究高含固有机固废在水平流厌氧反应器中的流变特征,对比反应器的桨型、桨径、螺距直径比、搅拌速度以及轴偏心设置对消化性能的影响,进而优化反应器设计。如图 3 所示,以水平流圆柱状(直径为 D m)为研究对象,通过合理设置搅拌桨型、桨叶直径、螺距直径、搅拌轴、安装位置、搅拌速率显著优化反应器的消化性能,最终确定水平流厌氧消化反应器选用螺杆式搅拌桨、桨径 0.6 D m、螺距 0.75 D m、搅拌向下偏心 0.15 D m 等运行参数。为节省耗能,采用低搅拌转速(不超过 10 r/min 为宜);

如反应器在转速为 10 r/min 下运行, 达到反应器均化的能耗为 48.20 KJ/m³。

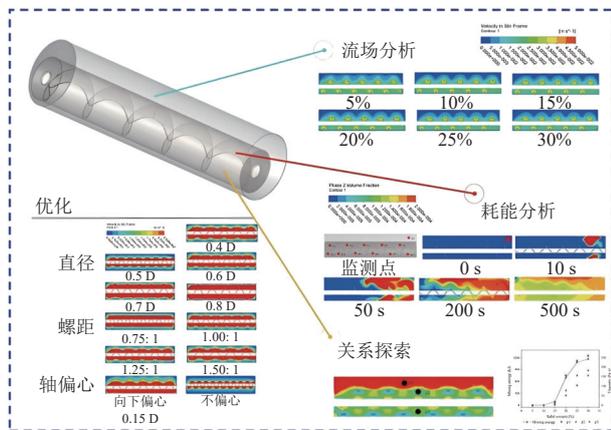


图 3 高含固有机物卧式反应器优化机理图^[41]

Fig. 3 Optimization mechanism diagram of horizontal reactor with high solid organic matter content^[41]

基于最佳的反应器设计, 进一步探究了混合时间对污泥和厨余垃圾高固相厌氧共消化系统的影响机理^[42]。通过 CFD 模拟确定了最佳间歇搅拌时间, 即每小时搅拌 15 min (15 min·h⁻¹)。实验结果表明, 与连续混合和不混合组相比, 最佳间歇搅拌可以缩短消化时间, 显著加速底物的水解酸化和产甲烷过程, 最大累计甲烷产量可达 366.8 mL/g VS, 较对照组提升 26.87%。连续混合搅拌会诱导细胞凋亡, 间断性混合搅拌则促进了互营微生物 *Syntrophomonas* 和 *Methanobacterium* 之间的代谢活动, 提高产酸和产甲烷相关基因的丰度。

3 面向高稳定性的厌氧消化系统优化与效能提升

我国城镇污泥中有机物含量相对较低 (<50%), 是造成污泥厌氧消化系统运行不佳的主要原因。近年来, 许多学者通过将厨余垃圾/农业废弃物和污泥构建厌氧共消化系统来均衡底物的营养元素, 以期强化厌氧消化的产气效能。厨余垃圾/农业废弃物组成复杂, 致使蛋白质和碳水化合物的比例及其化学分子量分布差异较大, 在一定程度上严重影响了厌氧共消化系统的产气效能^[43]。例如, 分子量较高的厨余垃圾可能需要更复杂的生物降解过程才能达到最大的甲烷产量, 影响甲烷产率的提升。

3.1 污泥厌氧共消化的研究进展

污泥作单独底物的厌氧消化, 会受到污泥 C/N 比失衡、有机物难降解等因素的影响, 在一定

程度上限制消化系统的产气效能。共消化技术不仅可以克服单一底物厌氧消化时产生的弊端, 还可以稀释有毒化合物、协同促进微生物生长、平衡营养元素、增加有机负荷率、改变系统缓冲能力和提高甲烷产量^[44]。因此, 污泥协同厨余垃圾/农业废弃物进行厌氧共消化受到了广泛的关注。表 3 整理了近年来污泥与厨余垃圾/农业秸秆共消化的相关研究^[44-50]。值得指出的是, 所有的共消化实验研究在累计甲烷产量上都展现出了协同效果。XIE 等^[44]研究发现, 当污泥与厨余垃圾按照体积比 1 : 1 进行厌氧共消化时, 最大累积甲烷产量较污泥单独厌氧消化提升了 5.03 倍。类似地, 以污泥和厨余垃圾为共消化底物也在其他研究中被证实可以显著提高甲烷产量, 甲烷产量提升率达 1.50~2.64 倍^[45-47]。

表 3 污泥和厨余垃圾/农业废弃物厌氧共消化研究总结
Table 3 Summary of research on anaerobic co-digestion of sludge and food waste/agricultural waste

底物	混合比例	负荷/ (g VS·L ⁻¹)	甲烷产量提升 (较空白组)/倍	参考文献
W+F	1 : 1 (v : v)	—	5.03	[44]
W+F	50 : 50 (v : v)	—	1.50	[45]
W+F	1 : 1 (TS : TS)	34.66	2.08	[46]
W+F	10 : 1 (w : w)	8.17	2.64	[47]
W+Z	2 : 1 (VS : VS)	40.00	1.82	[48]
W+Z	1 : 4 (VS : VS)	—	1.83	[49]
W+D	5 : 95 (w : w)	—	5.69	[50]
W+D	5 : 95 (w : w)	—	6.92	[50]

注: W为污泥, F为厨余垃圾, Z为猪粪, D为秸秆。

污泥和厨余垃圾为共消化底物在促进厌氧消化产气效能方面差异较大, 这主要是底物的混合比例、有机负荷、运行方式等差异造成的。ZHANG 等^[48]通过批次实验探究了污泥与猪粪不同混合比例对厌氧共消化的影响, 发现当猪粪与污泥按照 TS 比为 2 : 1 的比例进行混合共消化时, 累计产甲烷量最高, 达到 315.8 mL/g, 较污泥单独厌氧消化提高 1.82 倍。ZHANG 等^[49]对比了 2 种共消化底物不同配比对厌氧消化的影响, 结果表明当污泥和猪粪按照 VS 比为 1 : 4 的比例混合进行实验时, 可获得最大的累计甲烷产量 (155.94 mL/g VS), 远高于污泥与猪粪 VS 比为 1 : 2、1 : 1 和 2 : 1 的共消化系统 (120.65~132.59 mL/g VS)。此

外, PRAJAPATI 和 SINGH^[50] 还探究了温度对污泥和稻秆共消化产气效能的影响, 结果表明, 在中温和嗜热条件下, 共消化系统累积产气量分别较空白组提高 6.92 倍和 5.69 倍。然而, 当共消化底物的 C/N 比较低时, 会导致氨基酸降解过程中氨过量积累, 抑制产甲烷过程。因此, 针对厌氧共消化的研究大多停留在通过平衡 C/N 比、优化运行参数等方式强化共消化的产气效能, 较少关注共消化过程分子量特征对共消化性能的影响。

3.2 面向高稳定性的厌氧共消化系统优化研究

针对污泥与厨余垃圾厌氧共消化过程中, 蛋白质和碳水化合物等大分子有机物的百分比分布不均, 影响厌氧共消化系统的沼气产量和产率的问题。WEI 团队^[51] 通过选取淀粉(STA)、蔗糖(SUC)为典型碳水化合物, 明胶(GEL)、牛血清蛋白(BSA)和β-乳清蛋白(WPI)为代表性蛋白质, 研究了不同底物分子量的对产甲烷的影响。如图 4 所示, 典型碳水化合物和代表性蛋白质在产甲烷性能、累积甲烷产量, 产甲烷滞后时间和最大甲烷产率方面分别表现为蔗糖<淀粉, β-乳清蛋白<牛血清蛋白<明胶。该结果表明底物分子量越大, 越有助于甲烷产率的提升。对于底物水解速率, sCOD、VFA 和氨氮浓度表现出蔗糖>淀粉, β-乳清蛋白>牛血清蛋白>明胶, 表明低分子量有机物可以加速污泥共消化水解速率。此外, 高分子量的共底物增加了微生物多样性, 丰富了 *Longilinea*、*Anaerolineaceae*、*Syner-01*、*Methanothrix* 等特定微生物, 促进了产酸和乙酸型产甲烷途径。低分子量的共底物有利于 *JGI-000079-D21*、*Armatimonadota*、*Methanosarcina*、*Methanolinea* 的生长, 促进了氢营养产甲烷途径。该研究首次揭示了共底物分子量与微生物群落之间的复杂相互作用, 并证明了调节共消化底物分子量改善甲烷生产过程的可行性。

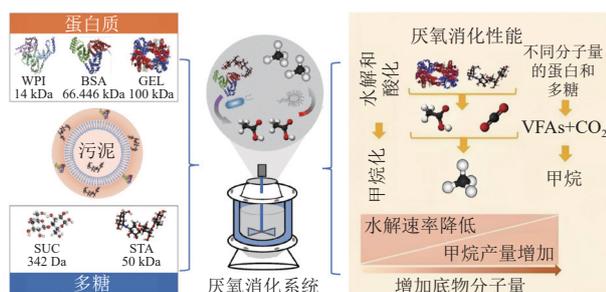


图 4 不同分子量底物对污泥厌氧共消化的影响^[51]

Fig. 4 Effects of different molecular weight substrates on sludge anaerobic co-digestion^[51]

污泥与秸秆、牛粪共消化可以提高反应系统有机质含量, 改善碳氮营养不均衡, 减缓抑制现象, 提高厌氧消化效率及甲烷产量。WEI 团队^[52] 通过逐渐改变污泥(SS)、牛粪(CM)和玉米秸秆(MS)的混合比例, 评估不同操作参数下共消化系统的甲烷产率、有机物组成特征和微生物群落变化, 研究发现 CM/MS 系统具有较高的亲水性、高生物降解性和较高的 C/N 比, CM-MS 系统的产甲烷速率和累积甲烷产量等指标均优于 CM-SS 和 SS-MS 系统。在有机负荷为 15 g VS/L、CM 与 MS 混合比为 1 : 1(C/N 比为 28.3)的条件下, CM-MS 共消化系统的平均甲烷产量达 613.8 mL/g VS。由于 C/N 比平衡和碳供应充足, SS-CM-MS 共消化比上述底物单独消化效果更好。在 SS : CM : MS 比为 30 : 35 : 35(C/N 比为 12.7), 有机负荷为 15.0 g VS/L 的条件下, 最大甲烷产量可达 8 047.31 mL。

4 结论与展望

面向高寒、高固、高稳定性的城镇污泥高效厌氧消化产甲烷技术, 是实现资源循环利用和环境保护的重要手段。在寒冷地区, 低温显著限制了传统厌氧消化的效率, 而高固体含量则增加了处理难度。为了克服这些挑战, 近年来的研究已经取得了一定进展, 特别是在微生物群落优化、预处理技术和反应器设计方面。然而, 为真正实现高寒、高固系统运行的稳定性、连续性和可靠性, 还需要在以下研究方向开展进一步研究。

(1) 微生物生态学: 深入研究适应高寒条件下的特殊微生物群落结构及其代谢机制, 开发针对性的生物增强剂, 以提高有机物的低温降解速率。

(2) 反应器创新设计: 设计适用于高寒地区的高效厌氧反应器, 结合优良的隔热材料和热交换系统, 确保即使在极低温度下也能保持稳定的内部环境。

(3) 智能控制系统: 集成先进的传感技术和数据分析平台, 实现实时监测和自动化控制厌氧消化过程, 包括温度、pH 和其他关键参数的精准调控, 以保证最佳性能。

(4) 多能互补体系: 探索太阳能、地热能等多种清洁能源的联合应用模式, 构建自给自足的能量供应网络, 保障系统的长期稳定运行, 并尽可能减少外部能源依赖。

参考文献 (References) :

- [1] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 145-153.
DAI Xiaohu, HOU Li'an, ZHANG Linwei, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 145-153.
- [2] 雷旭阳, 张志华, 崔广宇, 等. 蚯蚓对城镇污泥堆肥过程稳定化路径的影响 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(21): 13-20.
LEI Xuyang, ZHANG Zhihua, CUI Guangyu, et al. Effect of earthworms on stabilization path of the composting process for municipal sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(21): 13-20.
- [3] 赵发敏, 李兴杰, 冯楠, 等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展 [J]. *有色冶金节能*, 2021, 37(6): 50-54.
ZHAO Famin, LI Xingjie, FENG Nan, et al. Research and progress on application of sludge treatment & disposal technology[J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2021, 37(6): 50-54.
- [4] 赵子升. MEC 及铁材料强化剩余污泥厌氧消化及其机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 2-4.
ZHAO Zisheng. MEC and iron materials enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge and its mechanisms [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 2-4.
- [5] XU Ying, LU Yiqing, ZHENG Linke, et al. Perspective on enhancing the anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121847.
- [6] CHEN Jian, SUN Yihu, CHEN Hongbo. Enhancing methane production in anaerobic digestion of waste activated sludge by combined thermal hydrolysis and photocatalysis pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 411: 131353.
- [7] WANG Ling, LIU Chang, SANGEETHA T, et al. Performance and interaction mechanism of integrating alkali pretreatment and immobilized electrodes on enhanced sludge digestion for methane production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149530.
- [8] 卢玢宇, 裴占江, 刘娣, 等. 低温胁迫下微量重金属元素对厌氧消化工艺的影响 [J]. *中国沼气*, 2021, 39(5): 17-22.
LU Binyu, PEI Zhanjiang, LIU Di, et al. Effect of trace heavy metals on anaerobic digestion process under low temperature stress[J]. *China Biogas*, 2021, 39(5): 17-22.
- [9] 金翹启, 姜荣杰, 王子睿, 等. 典型抗生素对污泥厌氧消化效能的影响及调控策略研究进展 [J]. *环境工程*, 2024, 42(7): 49-59.
JIN Hongqi, JIANG Rongjie, WANG Zirui, et al. Research progress on impact and regulation strategies of typical antibiotics on anaerobic digestion efficiency of sludge: A review[J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(7): 49-59.
- [10] 周程. 市政污泥“热水解+高含固厌氧消化”处理工艺设计浅析 [J]. *净水技术*, 2024, 43(S1): 177-183.
ZHOU Cheng. Design analysis of "thermal hydrolysis+ anaerobic digestion with high-solid content" process in municipal sludge treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(S1): 177-183.
- [11] 姜谦. 生物质炭材料对剩余污泥厌氧消化的影响机制研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2022: 7-10.
JIANG Qian. Mechanism study of biomass carbon material on anaerobic digestion of waste activated sludge[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 7-10.
- [12] CHEN Yifeng, PING Qian, LI Dunjie, et al. Comprehensive insights into the impact of pretreatment on anaerobic digestion of waste active sludge from perspectives of organic matter composition, thermodynamics, and multi-omics[J]. *Water Research*, 2022, 226: 119240.
- [13] LIU Huan, LI Xuan, ZHOU Ting, et al. Long-term effect of free ammonia pretreatment on the semi-continuous anaerobic primary sludge digester for enhancing performance: Towards sustainable sludge treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142780.
- [14] XIAO Huihuang, LIANG Jinsong, ZHANG Yuxuan, et al. Conversion of materials and energy in anaerobic digestion of sewage sludge with high-pressure homogenization pretreatment[J]. *Processes*, 2023, 11(8): 2467.
- [15] 韦新东, 刘丞轩, 崔玉波, 等. 超声与碱对污泥水解酸化效率的研究 [J]. *吉林建筑大学学报*, 2022, 39(3): 52-56.
WEI Xindong, LIU Chengxuan, CUI Yubo, et al. Study on ultrasonic hydrolysis and acidification efficiency of sludge[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2022, 39(3): 52-56.
- [16] NGO P L, YOUNG B R, BRIAN K, et al. Thermal hydrolysis of primary sludge and waste activated sludge mixture: Biogas production and formation of inhibitors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139354.
- [17] 李晋. 碱渣预处理强化炼厂剩余活性污泥厌氧消化机理及效能研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023: 22-34.
LI Jin. Enhanced anaerobic digestion of refinery waste activated sludge by refinery spend caustic: Mechanism and efficiency[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023: 22-34.
- [18] 石璞玉, 孙力平, 谢春雨, 等. 臭氧预处理对剩余污泥特性及厌氧消化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3740-3746.
SHI Puyu, SUN Liping, XIE Chunyu, et al. Effects of ozone pretreatment on sludge characteristics and anaerobic digestion[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6): 3740-3746.
- [19] 田梦佳, 刘锋, 李祥, 等. K_2FeO_4 - $FeCl_3$ 联合强化剩余污泥厌氧消化产酸 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 4089-4098.
TIAN Mengjia, LIU Feng, LI Xiang, et al. Study on

- enhanced anaerobic digestion of excess sludge with K_2FeO_4 and $FeCl_3$ for organic acid production[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(8): 4089-4098.
- [20] ZHANG Rong, ZHANG Min, MOU Huaqian, et al. Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge driven by biochar derived from kitchen waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 408: 137123.
- [21] HAROUN B, EL QELISH M, ABDULAZEEZ M, et al. Overcoming ammonia inhibition via biochar-assisted anaerobic co-digestion of thermally-treated thickened waste activated sludge and food waste[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123909.
- [22] TIWARI S B, DUBEY M, AHMED B, et al. Carbon-based conductive materials facilitated anaerobic co-digestion of agro waste under thermophilic conditions[J]. *Waste Management*, 2021, 124: 17-25.
- [23] DELIGIANNIS M, GKALIPIDOU E, GATIDOU G, et al. Study on the fate of per- and polyfluoroalkyl substances during thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and the role of granular activated carbon addition[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 406: 131013.
- [24] CHEN Linlin, YUAN Ruoxuan, XU Xiangyang, et al. Magnetite alleviating calcification of anaerobic granular sludge (AnGS): Electron transfer enhancement and ion competition[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 920: 170981.
- [25] ZHANG Min, LI Jianhua, WANG Yuncai. Impact of biochar-supported zerovalent iron nanocomposite on the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(10): 10292-10305.
- [26] LIU Haoyu, XU Ying, LI Lei, et al. A novel green composite conductive material enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge *via* improving electron transfer and metabolic activity[J]. *Water Research*, 2022, 220: 118687.
- [27] 石惠娴, 王韬, 朱洪光, 等. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 268-273.
SHI Huixian, WANG Tao, ZHU Hongguang, et al. Heating system of biogas digester by ground-source heat pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 268-273.
- [28] 王兰, 邓良伟, 王霜, 等. 畜禽粪污沼气发电工程中的加热能量平衡分析[J]. *中国沼气*, 2016, 34(6): 65-71.
WANG Lan, DENG Liangwei, WANG Shuang, et al. Energy balance analysis of power generation fueled by biogas from anaerobic livestock manure fermentation[J]. *China Biogas*, 2016, 34(6): 65-71.
- [29] 谭婧, 宋波. 浓稀分流-重点增温模式在猪粪沼气工程中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(5): 211-214.
TAN Jing, SONG Bo. Application of gravitational settling-selective heating model in biogas engineering of swine manure[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(5): 211-214.
- [30] 姚利, 王艳芹, 袁长波, 等. 高效沼气微生物菌剂的冬季产气试验[J]. *山东农业科学*, 2010, 42(8): 57-60.
YAO Li, WANG Yanqin, YUAN Changbo, et al. Experiment on biogas production with efficient microbial inoculum in winter[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2010, 42(8): 57-60.
- [31] 王昱琛, 宿程远, 王晴, 等. 低温下复合菌剂对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 1724-1734.
WANG Yuchen, SU Chengyuan, WANG Qing, et al. Effects of compound microbial agents on anaerobic treatment of food waste at low temperature[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(4): 1724-1734.
- [32] MCDERMOTT B L, CHALMERS A D, GOODWIN J A. Ultrasonication as a pre-treatment method for the enhancement of the psychrophilic anaerobic digestion of aquaculture effluents[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(7): 823-830.
- [33] ZHAO Weixin, YOU Jia, YIN Shilei, et al. Calcium peroxide and freezing co-pretreatment enhancing short-chain fatty acids production from waste activated sludge towards carbon-neutral sludge treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 367: 128273.
- [34] FENG Likui, MU Huizhi, GAO Zhelu, et al. Comprehensive insights into the impact of magnetic biochar on protein hydrolysis in sludge anaerobic digestion: Protein structures, microbial activities and syntrophic metabolisms[J]. *Water Research*, 2024, 260: 121963.
- [35] 韩芸, 文天祥, 卓杨, 等. 高含固污泥厌氧消化中甲硫氨酸分解抑制特性[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(4): 1587-1595.
HAN Yun, WEN Tianxiang, ZHUO Yang, et al. Characterization of methionine decomposition during high solid sludge anaerobic digestion[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(4): 1587-1595.
- [36] 卓杨. 高含固污泥热水解-厌氧消化过程中氮硫转化控制及沼气脱硫研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 7-12.
ZHUO Yang. Transformation characteristic and treatment of nitrogen and sulfur during thermal hydrolysis pretreatment followed by high solid anaerobic digestion of wasted activated sludge and biogas desulfurization[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 7-12.
- [37] 华飞虎, 韩芸, 卓杨, 等. 温度及有机负荷对高温高含固污泥厌氧消化启动期产甲烷特性影响研究[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(9): 2020-2029.
HUA Feihu, HAN Yun, ZHUO Yang, et al. Effect of temperature and organic loading rate on the methanogenic characteristics during start-up stage of thermophilic high solid sludge anaerobic digestion[J]. *Research of Environmental*

- Sciences, 2024, 37(9): 2020-2029.
- [38] 齐利格娃, 李伟, 高金华, 等. 污泥高含固厌氧消化研究进展 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 14-19.
 QI Ligewa, LI Wei, GAO Jinhua, et al. Research progress on high-solids anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 14-19.
- [39] 杨梦. 搅拌对高含固污泥厌氧消化性能及流态的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2018: 40-46.
 YANG Meng. Effect of agitation on performance and flow-patterns of high-solid sludge anaerobic digestion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 40-46.
- [40] 戴晓虎, 何进, 严寒, 等. 游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 [J]. 环境科学, 2017, 38(2): 679-687.
 DAI Xiaohu, HE Jin, YAN Han, et al. Effects of free ammonia regulation on the performance of high solid anaerobic digesters with dewatered sludge[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 679-687.
- [41] WEI Liangliang, REN Yimin, ZHU Fengyi, et al. Horizontal flow reactor optimization for biogas recovery during high solid organics fermentation: Rheological characteristic analyses[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101776.
- [42] LI Lili, WANG Kun, SUN Zhijian, et al. Effect of optimized intermittent mixing during high-solids anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge: Simulation, performance, and mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842: 156882.
- [43] SONG Yunpeng, LIU Jibao, CHEN Meixue, et al. Application of mixture design to optimize organic composition of carbohydrate, protein, and lipid on dry anaerobic digestion of OFMSW: Aiming stability and efficiency[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 172: 108037.
- [44] XIE Sihuang, WICKHAM R, NGHIEM L D. Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 116: 191-197.
- [45] BERMÚDEZ PENABAD N, RODRÍGUEZ MONTES A, ALVES M, et al. Optimization of methane production from solid tuna waste: Thermal pretreatment and co-digestion[J]. *Waste Management*, 2024, 177: 203-210.
- [46] ZHANG Junya, LYU Chen, TONG Juan, et al. Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 253-261.
- [47] XIE Tian, XIE Sihuang, SIVAKUMAR M, et al. Relationship between the synergistic/antagonistic effect of anaerobic co-digestion and organic loading[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 155-161.
- [48] ZHANG Wanqin, WEI Quanyuan, WU Shubiao, et al. Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions[J]. *Applied Energy*, 2014, 128: 175-183.
- [49] ZHANG Qingfang, ZENG Liyuan, FU Xin, et al. Comparison of anaerobic co-digestion of pig manure and sludge at different mixing ratios at thermophilic and mesophilic temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125425.
- [50] PRAJAPATI K B, SINGH R. Co-digestion of sewage sludge and wheat straw in presence of iron scraps in mesophilic and thermophilic conditions for generating methane[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(3): 3319-3330.
- [51] ZHAO Weixin, CHEN Xinwei, MA Hao, et al. Impact of co-substrate molecular weight on methane production potential, microbial community dynamics, and metabolic pathways in waste activated sludge anaerobic co-digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 400: 130678.
- [52] WEI Liangliang, QIN Kena, DING Jing, et al. Optimization of the co-digestion of sewage sludge, maize straw and cow manure: Microbial responses and effect of fractional organic characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2374.