

DOI:10.13205/j.hjgc.202503009

杨武霖,刘名卉,邵岩. 基于代谢优化与电化学调控的厨余垃圾水解酸化制碳源技术进展[J]. 环境工程,2025,43(3):103-113.

YANG W L, LIU M H, SHAO Y. Advanced hydrolysis acidification technology of food waste for producing carbon source: metabolism optimization and electrochemical regulation[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(3): 103-113.

# 基于代谢优化与电化学调控的厨余垃圾水解酸化制碳源技术进展

杨武霖<sup>1</sup> 刘名卉<sup>2</sup> 邵岩<sup>3\*</sup>

(1. 北京大学 环境与工程学院,北京 100871; 2. 天府永兴实验室,成都 610213;  
3. 北京市科学技术研究院 资源环境研究所,北京 100095)

**摘要:**针对污水处理碳源需求量大与厨余垃圾处理成本高的实际需求,发展了利用厨余垃圾发酵液中小分子有机酸制备生物基绿色碳源工艺,创新了“以废治污”的水固协同治理模式,为城市减污降碳、协同增效目标提供可推广的绿色技术范式。从厨余垃圾制碳源工艺、水解酸化核心技术和碳源产品应用等方面总结了近年的研究进展;结合代谢工程、电化学、导电纳米材料、机器学习等研究热点,追踪了厨余垃圾等有机固废的水解酸化技术前沿;简析了我国厨余垃圾碳源行业存在的现实问题,并提出了相关发展建议。研究结果可为了解厨余垃圾制碳源工艺和开发新兴的高效产酸技术提供基础与借鉴。

**关键词:**厌氧发酵;挥发性脂肪酸;厨余垃圾;碳源;脱氮

## Advanced hydrolysis acidification technology of food waste for producing carbon source: metabolism optimization and electrochemical regulation

YANG Wulin<sup>1</sup>, LIU Minghui<sup>2</sup>, SHAO Yan<sup>3\*</sup>

(1. College of Environmental Sciences and Technology, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, China; 3. Institute of Resource and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In view of the substantial demand of carbon sources in wastewater treatment plants and the high cost of food waste disposal, a process for preparing bio-based green carbon sources by the small molecular organic acids in the fermentation liquid of food waste was developed. Volatile organic acids (VFAs), as carbon source, it innovatively provides a synergy treatment pattern of solid waste and municipal sewage in cities, and makes a propagable paradigm of green techniques for achieving the synergistic reducing pollution and carbon and promoting efficiency goals. This paper summarized the research progress in terms of food waste fermentation liquid and bio-based carbon resource. It included three aspects, respectively the whole preparation process from food waste to carbon source product, the key technique during the process on hydrolysis and acidification of food wastes, and the application effect of carbon source product into wastewater for denitrification. Further focusing on the key technology, the frontier development on the hydrolysis and acidification of organic wastes, especially food wastes, were tracked and overviewed. It was integrated with some research hotspots in recent years, for instance of the

收稿日期:2024-12-10; 修改日期:2025-01-20; 接收日期:2025-02-28

基金项目:北京市科学技术研究院北科萌芽人才计划(24CE-BGS-07)

第一作者:杨武霖(1989-),男,博士,研究员,主要研究方向为微生物电化学、电化学膜分离、电化学高级氧化等。wulin.yang@pku.edu.cn

\*通信作者:邵岩(1993-),女,博士,助理研究员,主要研究方向为固体废物处理及资源化。shaoyan93@163.com

metabolic engineering of the fermentation microorganisms, the electrochemistry pretreatment method for promoting substrate biodegradability, the addition of conductive nanomaterial for methanogenesis inhibition in anaerobic system, and the expand application of machine learning on simulating fermentation process. Finally, the practical problems existing in the fermentation industry from food waste to carbon sources in China were briefly analyzed, and the relevant suggestions on the aspects of carbon source preparation, transport and application were put forward. This review can provide a technical basis for understanding the fermentation engineering of food waste for producing carbon sources, as well as upgrading the hydrolysis acidification technology to promote the production yield of small molecular organic acids in fermentation liquid for further.

**Keywords:** anaerobic fermentation; volatile fatty acids; food waste; carbon source; denitrification

## 0 引言

目前,我国城镇污水处理厂普遍存在进水有机物浓度低、反硝化脱氮碳源不足等问题,需要外源添加乙酸钠、甲醇等碳源,增加了污水厂的运行成本和碳排放量<sup>[1]</sup>。随着我国“双碳”目标的提出,使用有机废弃物制备生物基碳源替代商用化学碳源,有助于实现有机固废和污水的协同处理和减污降碳目标。

生物基碳源主要来源于活性污泥、剩余污泥、厨余垃圾、园林废弃物等有机固废的厌氧发酵过程,发酵液中的挥发性脂肪酸(VFAs)是最主要的碳源活性组分,投加至污水处理厂中可有效提高脱氮效率。已有研究以生物基碳源为主题,对碳源产品类型、制备工艺条件、应用效果与机理等方面开展了综述<sup>[2-7]</sup>,但主要围绕活性/剩余污泥发酵制碳源过程展开,对厨余垃圾碳源研究进展的总结报道相对较少。

近年来,随着垃圾分类政策的实施,厨余垃圾产生量急剧增长,数据显示北京、上海、深圳等一线城市厨余垃圾分出量增长了25%~27%,资源化处理需求提升,这在一定程度上推动了厨余垃圾基碳源行业的发展。厨余垃圾有机质含量高,组分主要包括蔬菜(35%~40%)、水果(20%~35%)、肉(5%~10%)、主食(2%~15%)和其他杂质(约10%),干基元素主要由C(40%~50%)、O(25%~45%)、H(6%)、N(3%)、S(<1%)组成<sup>[8]</sup>。从物化特性上看,厨余垃圾与污泥相比可生化性更好,毒副作用更小,较容易通过厌氧发酵作用获得有机酸,可见厨余垃圾比污泥更适合制备反硝化碳源<sup>[2]</sup>。厨余垃圾厌氧发酵产酸过程作为碳源制备工艺的核心,近些年有部分学者开展了不少的研究工作,最新的综述也总结了产酸原理、VFAs产物应用方向、微生物和水解条件对产酸的影响等内容<sup>[9]</sup>,但仍缺乏对厨余垃圾碳源制备技术与污水脱氮应用效果的全过程总结分析,对近几年新兴技术前沿的报道也较少。

因此,本文聚焦厨余垃圾水解酸化制碳源及其污水脱氮利用过程,总结分析工艺流程、碳源产品性能和工程应用情况,并追踪水解酸化核心技术发展前沿,基于微生物代谢和电子流调控凝练了强化厨余垃圾产酸的技术新方向,为推动厨余垃圾资源化利用和生物基碳源行业的发展提供理论基础与创新思路。

## 1 厨余垃圾制碳源工艺概况

### 1.1 工艺流程

厨余垃圾制碳源流程主要包括厨余垃圾预处理、水解酸化和碳源制备3个技术环节(图1)。预处理系统的接料斗用于接收收运来的厨余垃圾,具体包括居民家庭产生的食材废料、剩菜剩饭、花卉绿植等厨余垃圾,餐饮经营者和单位食堂等生产过程中产生的餐饮垃圾,以及集贸市场产生的瓜皮果核等。厨余垃圾经过破袋闸阀装置、破碎分选等装置,通过剪切、风选、磁选和重力分选等作用去除塑料、金属、砂砾等杂质,剩余有机组分进入制浆机,获得<5 mm粒度的含油浆状物料,再经过离心机将油水分离并提取浮油外运,最终获得厨余垃圾有机浆液。该环节可对收运来的厨余垃圾进行除杂提油后制浆,为水解酸化环节提供易降解的高浓度有机浆液。

水解酸化环节是制备小分子有机酸碳源的核心步骤和关键技术。经过预处理的厨余垃圾有机浆液料进入水解罐和酸化罐,在水解菌或功能酶作用下将淀粉、纤维素、蛋白质等有机大分子底物水解为可溶性糖、氨基酸等小分子物质,进一步在厌氧产酸功能菌作用下代谢转化为乙酸、丙酸、异丁酸、丁酸、异戊酸、戊酸等挥发性脂肪酸(VFAs)<sup>[10]</sup>。通过调控反应器的运行参数,使厨余垃圾有机浆液反复进行水解酸化反应,提高VFAs的生物产率,从而获得高浓度有机酸发酵液。

碳源制备环节是通过浓缩、提取等步骤将厨余

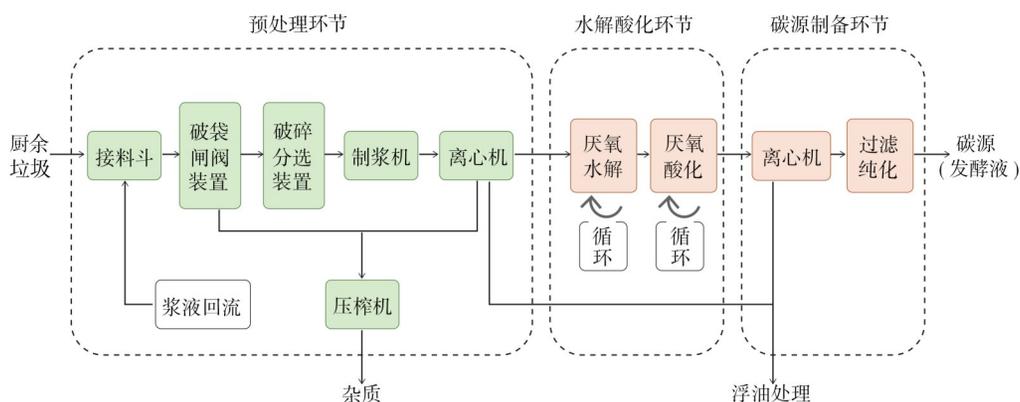


图1 厨余垃圾制碳源工艺流程示意

Figure 1 The schematic process of food waste preparation to carbon source

垃圾发酵液制备碳源产品的过程。厨余垃圾发酵液中除了含有VFAs等活性碳源成分外,还含有部分悬浮物、难降解有机质和氨氮等杂质,这些杂质进入污水系统会影响出水水质,氨氮还会消耗部分VFAs,导致碳源有效COD当量下降。因此,在投用至污水处理厂前需要对发酵液进行除杂提质,一般工程上常采用三相分离和膜过滤法去除发酵沼渣和悬浮物,通过蒸馏、电渗析等方法进一步浓缩发酵液中的VFAs成分,并通过鸟粪石法回收降低发酵液中的氮含量<sup>[1,11,12]</sup>。该环节的除杂浓缩,可使厨余垃圾发酵液达到污水处理厂所需要的碳源产品质量要求,并投用于脱氮单元,实现商业碳源的部分替代,降低污水处理成本。

目前,我国采用上述工艺已在深圳光明区、大鹏新区、宝安区,杭州桐庐县,苏州和常州等地建成了数个厨余垃圾制碳源中试项目和示范工程<sup>[13]</sup>。工程实践证明厨余垃圾高浓度有机酸发酵液制备污水脱氮碳源工艺路线的可行性,该工艺对厨余垃圾和市政污水处理效果良好且经济效益较高,属于负碳排放工艺<sup>[11]</sup>。

## 1.2 核心技术

厨余垃圾制碳源工艺的核心在于水解酸化技术,提高发酵液的VFAs产量是制备高性能碳源产品的关键。水解酸化技术由传统的厌氧消化四阶段理论发展而来,通过抑制产甲烷菌活性,使厌氧消化停留在酸化和产乙酸阶段。将厨余垃圾中蛋白质、淀粉、纤维素、油脂等有机质最终转化为挥发性有机酸(VFAs)、乳酸和小分子醇等小分子发酵产物。

目前部分学者已开展了许多实验性研究,探索

了厨余垃圾水解酸化过程的一系列影响因素,通过运行连续、半连续和批次发酵反应器,获得VFAs浓度为4.4~33.2 g/L<sup>[14-23]</sup>。表1对部分结果进行了总结比较。也有研究报道了影响发酵液VFAs产量的因素包括预处理方法、温度、pH、氧化还原电位、停留时间、有机负荷、垃圾组分、碳氮比、接种物类型及接种率等参数<sup>[9,24]</sup>。本文根据厌氧发酵工艺基本要素,将上述复杂影响因素归为3类,即发酵底物因素、发酵微生物因素和发酵理化环境因素。

在发酵底物方面,厨余垃圾可以单独进行发酵产酸,也可以与初级污泥或剩余污泥协同发酵,通过改善底物C/N获得高浓度有机酸发酵液,VFAs含量高达67.5 g COD/L<sup>[21]</sup>;发酵底物营养组分也会影响产酸情况,有研究发现发酵罐中碳水化合物和蛋白类物质含量相等时产酸量最高,约为0.7 mg COD/mg VS<sup>[25]</sup>;厨余垃圾的进料负荷不仅影响VFAs产率,还会影响其化学组成,有研究发现在1%~10%含固率(质量分数)范围内,底物负荷越高,发酵液VFAs产率越低,并且当含固率上升至10%左右时,发酵液VFAs主成分从乙酸变为丙酸<sup>[26]</sup>。此外,为了提高厨余垃圾底物的可溶性和降解性,需要在水解酸化工艺前端对底物进行预处理,有研究采用酸碱、超声、水热等手段分别对厨余垃圾进行预处理,发现热碱预处理的效果最佳,处理后其发酵液乙酸产量高达27.78 g/L<sup>[27]</sup>。综合上述发酵底物类因素的影响效果可知:厨余垃圾自身或与其他底物混合表现出的营养组成及其在发酵罐中的有效有机负荷是影响产酸结果的主要因素。

在发酵微生物方面,接种活性污泥、功能菌剂可

表1 厨余垃圾厌氧发酵液制碳源工艺参数、VFAs产量及脱氮性能

Table 1 Operation parameter, VFAs production and nitrogen removal performance of food wastes anaerobic fermentation for carbon source

底物	厨余垃圾厌氧发酵					碳源应用		文献
	反应器类型/容积	运行条件			VFAs产量	C/N	脱氮性能	
		温度/°C	pH	SRT/d				
FW	半连续/1 L	22	自然	7	1.3 g COD/L	6	95% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	[14]
FW	连续/1 L	35	4.5~6.5	1~4	260 mg/g COD	7	30.8 mg NO <sub>x</sub> -N/(g VSS·h)	[15]
FW	批次/10 L	25~55	自然	2.5	16.63 g COD/L	8	12.89 mg NO <sub>x</sub> -N/(g VSS·h)	[16]
FW	批次/1.8 L	37	6.7	3	4.5 g COD/L	5	15 mg NO <sub>x</sub> -N/(g VSS·h)	[17]
FW	连续/3.5 L	37	自然	5	4.4 g COD/L	9.5	0.61 mg NO <sub>x</sub> -N/(m <sup>2</sup> ·d)	[18]
FW+PS	半连续/15 L	35±2	自然	7	24.7 g COD/L (富含己酸)	1.5~7.5	9~19.8 mg NO <sub>x</sub> -N/(g VSS·h)	[19]
FW	批次/2 L	室温	自然	7	10 g COD/L	-	68.5% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	[20]
FW+EAS	中试/40 m <sup>3</sup>	25	8	4	67.5 g COD/L	5	81% NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	[21]
FW	批次/2 L	37	5	6	(16.45 VFAs + 54.3 乳酸) g/L	7	5.6 mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(g·L)	
FW	批次/2 L	37	7	6	(33.20 VFAs + 50.6 乳酸) g/L	7	5.9 mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(g·L)	[22]
FW	批次/2 L	37	自然	6	(7.50 VFAs + 8.0 乳酸) g/L	7	5.6 mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(g·L)	
FW	批次	35	7	8	9.8~16 g COD/L	5	92.3% mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(g·L)	[23]

注:FW为厨余垃圾;PS为初级污泥;EAS为剩余活性污泥。

有效提高发酵性能,例如在厨余垃圾发酵系统中接种20% (质量分数,VS)的活性污泥,其产酸率比未接种组高出60%<sup>[28]</sup>;除了采用活性污泥作为接种物的方法外,还可以通过接种酵母菌、醋酸菌等已知功能的发酵菌种强化厨余垃圾降解过程,达到提高VFAs产量的目的<sup>[27]</sup>;此外,在偏碱性的厌氧系统中产甲烷菌的存在会消耗发酵液中的乙酸,因此通过添加甲烷抑制剂、控制pH等方法抑制产甲烷菌的活性,将厌氧发酵控制在产酸阶段,阻断产甲烷过程,从而实现VFA的大量积累<sup>[29]</sup>。

在发酵理化条件方面,温度、pH、停留时间等因素通过影响微生物活性及其与底物的作用间接影响发酵液产酸结果。众多学者开展了工艺参数优化类实验探究,发现升高固体停留时间(SRT)和温度在一定范围内有利于厨余垃圾的水解和VFAs产物积累,在SRT为8 d和37 °C的优化条件下,丙酸的产量达到最高<sup>[30]</sup>;发酵液pH会影响VFAs组分,碱性条件下发酵产物以乙酸为主,酸性条件下则以乙酸和乳酸混合酸为主<sup>[31]</sup>;对比中温发酵、高温发酵和超高温发酵效果,发现厨余垃圾在55 °C条件下发酵产酸效果最佳<sup>[32]</sup>。虽然目前已有研究基本上已经提供了各理化参数的适宜范围,但仍难以得出具有普遍代表性的最优值,还需要根据不同厨余垃圾及发酵系统实际情况开展预实验,形成最优工艺方案。

总结上述影响因素的主要作用机制包括:垃圾预处理、共发酵等手段提高底物可溶性和营养平衡;

接种功能微生物或抑制产甲烷菌活性,将厌氧发酵控制在产酸阶段大量积累VFAs;工艺参数调控通过提高发酵微生物活性,多方面共同作用提高厨余垃圾发酵液中小分子有机酸的生物产率。由此可见,发酵底物和发酵菌种是驱动厌氧水解酸化反应的核心,两者之间的匹配程度基本上决定了发酵产酸效果,在此基础上调控优化工艺参数可在进一步提高VFAs产率。

## 2 水解酸化强化技术新兴方向

为了提高厨余垃圾发酵液小分子有机酸产量,在传统工艺参数优化策略基础上,结合近些年微生物代谢与电子流调控等先进技术的发展,形成了厨余垃圾水解酸化强化技术新兴研究方向,包括电化学预处理、代谢工程改造、导电纳米材料、电渗析去除和机器学习模拟技术等(图2)。虽然这些新兴技术仍未实现大规模应用,但在理论层面上已经验证了发酵过程精准调控和高效产酸的可行性。

### 2.1 电化学预处理技术:提高底物可降解性

微生物电解槽是一种使用外部电源催化将底物转化为副产品的生物电化学系统,常作为一种从有机废物中回收生物氢和甲烷的环保装置<sup>[33-35]</sup>。近年来,随着研究者对水解酸化工艺的关注,微生物电解槽拓展应用到了有机固废的预处理环节,用于提高发酵液VFAs产量。例如,在厌氧发酵之前对污泥进行电化学预处理,碳基电极有效促进了污泥絮凝体的分解和可溶性有机物的释放,并通过下调异二硫

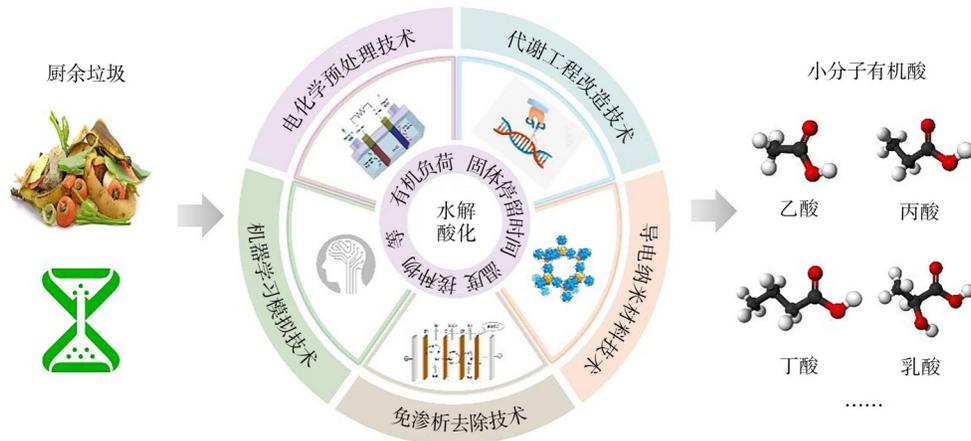


图 2 水解酸化技术新兴方向

Figure 2 The advances in hydrolysis and acidogenesis techniques

还原酶活性,选择性地抑制了甲烷生成,最终乙酸积累量高达 389 mg/g VS<sup>[36]</sup>;在 1.0 A 电流强度、1.0 g/L NaCl 电解液、处理 60 min 的条件下对活性污泥进行预处理,发现活性氯物种(RCS)的存在富集了发酵液中乳酸菌、鞘氨醇单胞菌、普雷沃菌等产酸微生物,从而将 VFAs 产量提高了 51.6%<sup>[37]</sup>。Xi 等<sup>[37]</sup>和 Lin 等<sup>[38]</sup>研究发现,槽电压、化学计量、预处理时间、电极材料等因素均会影响电化学预处理效果。随着更多研究案例的报道,电化学预处理技术正在逐步形成体系。

电化学处理技术的关键原理在于在发酵液中产

生单线态氧(<sup>1</sup>O<sub>2</sub>)和活性氯(RCS)等强氧化活性物种,破坏有机高聚物大分子的结构和化学键<sup>[39]</sup>,从而提高发酵底物的可溶性和水解性,达到有机固废预处理的目标,如图 3 所示。此外,电场的存在还会影响发酵液中的微生物群落结构,通过富集产酸功能微生物、抑制产甲烷活性等作用方式实现发酵液 VFAs 的累积。然而现有电化学预处理的对象多为污水污泥,还需要针对厨余垃圾的高有机质、高油、高盐等物化性质进一步探索,设计与之相适配的电化学预处理装置,并优化出成套技术参数。

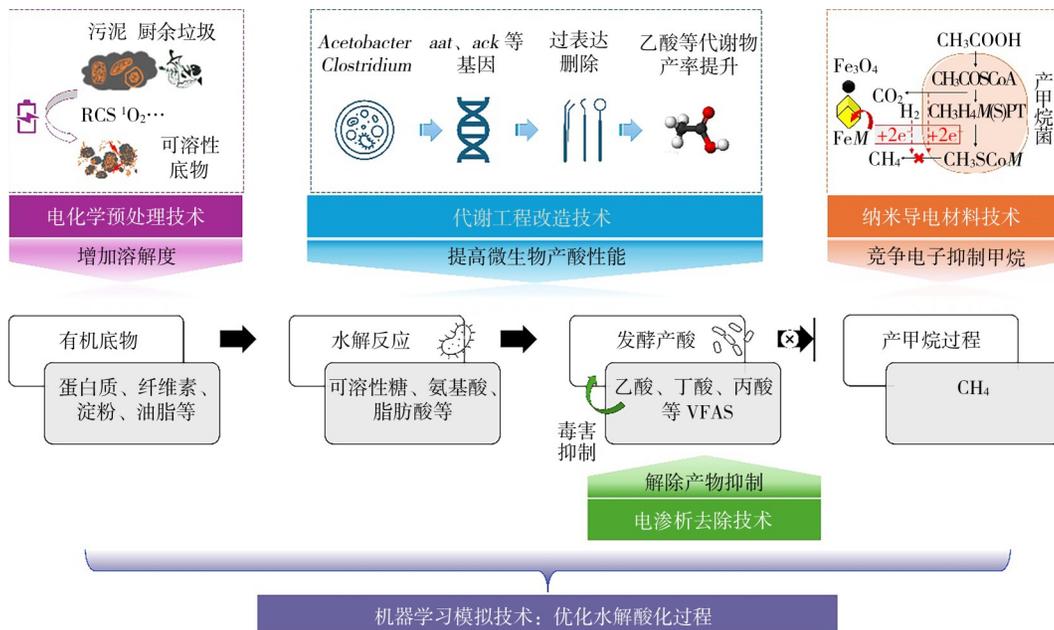


图 3 电化学预处理、代谢工程改造、纳米导电材料、电渗析及机器学习强化有机底物水解酸化过程

Figure 3 The enhancement effect on organic waste hydrolysis and acidification by electrochemical pretreatment, metabolic engineering, conductive nanomaterial, electro dialysis, and machine learning techniques

## 2.2 代谢工程改造技术:提高微生物产酸性能

厨余垃圾制碳源工艺的核心过程为微生物代谢作用下的水解酸化反应过程,因此对产酸功能菌进行代谢工程改造,有助于提高厨余垃圾发酵液中VFAs产量。相关改造策略包括微生物耐受能力改造、竞争途径删除、关键功能酶过表达等手段(图3)。对产酸菌负责运输产物的基因进行修饰,可以提高其对发酵液强酸性环境的耐受力,并提高目标产物的产率。例如,在醋酸菌 *Acetobacter aceti* 中过表达控制乙酸产物运输的 *aat* 基因,可以提高微生物的乙酸产率<sup>[40]</sup>;过表达酪丁酸梭菌 *Clostridium tyrobutyricum* 中的 GroESL 分子伴侣系统,可使突变菌株中的丁酸积累量比野生型菌株增加 28.2%<sup>[41]</sup>。删除与目标产物共享同一代谢前体物的竞争途径,驱动代谢通量更多流向目标产物,是提高发酵液 VFAs 产量的另一策略。例如,删除酪丁酸梭菌 *Clostridium tyrobutyricum* 中的乙酸激酶基因(*ack*)可以将丁酸产量从 19.98 g/L 提高至 41.7 g/L<sup>[42]</sup>;使用 CRISPR Cas12a 和 CRISPRi 系统删除并抑制永达尔梭菌 *Clostridium ljungdahlii* 与乙醇合成相关基因(*adhE1*, *pyre*, *ctf* 和 *pta*),可使得乙醇产量减少 20%~40%,目标产物丁酸含量随之增加<sup>[43]</sup>。

上述生物技术虽然较早早在实验室水平得到了验证,也为厨余垃圾高效发酵的发展提供了新的技术方向,但目前仍缺乏实际应用。未来应关注厨余垃圾发酵液中的核心功能菌种,在解读基因组信息的基础上进行代谢工程改造,提高菌种定向转化产生乙酸等碳源活性组分的能力,最终通过生物强化技术将工程菌种应用于厨余垃圾水解酸化反应器中,提高发酵效率。

## 2.3 导电纳米材料技术:竞争电子抑制甲烷产生

在厨余垃圾厌氧消化产甲烷体系中,添加活性炭、石墨烯、磁铁矿和生物炭等导电材料,可以有效提高甲烷产量,其主要机制是刺激了产甲烷菌和发酵菌之间的直接种间电子转移(DIET)过程,促进多种有机物向甲烷的转化<sup>[44]</sup>。基于此,近些年来开始初步探索导电材料在厌氧发酵产酸系统中的应用,以提高发酵液中的VFAs产量。例如,Chen等<sup>[45]</sup>研究合成了具有大量缺陷的  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MOF}-808$  (FeM) 纳米材料,并将其用于增强污泥厌氧发酵过程,发现发酵液的VFAs产量提高了约8倍,效果显著。但与促甲烷生成的DIET机制不同,纳米铁基材料强化产酸的

机制具体表现为2个方面:一是FeM纳米材料的结构特性和氧化活性发挥了催化作用,FeM诱导的过二硫酸盐活性物种催化了污泥的预氧化过程,同时Zr位点催化了蛋白质的水解,使发酵液中可溶性有机物增加了2.54倍,为VFAs提供了充足的降解底物;二是FeM材料自身电子得失过程影响了产甲烷过程,Fe(III)和Fe(II)的转化通过与产甲烷菌争夺VFAs提供的电子,抑制了甲烷的产生从而有利于VFAs的积累(图3)。

总的来说,在水解酸化系统中添加活性炭、石墨烯、磁铁矿和生物炭等导电材料,可以强化底物水解、抑制甲烷合成等作用机制,提高发酵液VFAs产率。该技术可应用于厨余垃圾领域,基于过渡金属MOF材料,设计合成既有催化活性位点,又可与产甲烷过程竞争电子的双功能导电纳米材料,应用于厨余垃圾水解酸化系统中提高VFAs产量。

## 2.4 电渗析去除技术:解除发酵产物抑制

发酵液中VFAs的过度累积会导致产物抑制、水解酸化反应速率减慢,原位分离去除发酵液中的VFAs在动力学上有利于发酵率的提升。与化学沉淀、吸附、膜过滤、萃取、蒸馏等传统的VFAs分离技术相比,电渗析具有低能耗、无需药剂、后处理简单的技术优势。基于电解和透析技术,电渗析的技术原理是在2个电极之间产生电压差,使用离子选择性膜分离溶液中的带电离子,从而快速有效地原位分离发酵液中的VFAs产物<sup>[12]</sup>。电渗析最初应用于海水淡化,近些年来已拓展应用到了厨余垃圾和食品发酵液中的营养物质和VFAs回收。例如,将双极膜电渗析与发酵耦合,从配制的发酵培养基中成功分离了乳酸,其单步回收率可达86.05%<sup>[46]</sup>;通过搭建电渗析膜反应器,从果蔬垃圾发酵液中成功回收了63.8%~82.9%的VFAs<sup>[47]</sup>;Jones等<sup>[48]</sup>在100L连续进料的厨余垃圾反应器系统上,搭建了过滤和电透析新型组合装置,通过抑制甲烷生成和减缓VFAs抑制,将发酵液中VFAs的日产量从4 mg/g VS提高到35 mg/g VS。此外,研究还发现pH值、流速、进料浓度和外加电压等因素均会影响电渗析效果<sup>[49,50]</sup>,因此需要优化电渗析条件提高发酵液VFAs的分离效果。

需要注意的是,目前电渗析技术多应用于溶液介质,而在含固率较高、含有颗粒态物料的厨余垃圾厌氧发酵体系中的应用仍然受限。但电渗析技术在

厨余垃圾制碳源方面具有一定优势,其不仅可以解除产物抑制提高发酵产率,还可以从复杂的发酵液中分离出VFAs活性碳源成分,有利于后续碳源产品的制备。因此,需要进一步探索构建厨余垃圾发酵-电渗析耦合系统,实现水解酸化过程VFAs的同步产生与分离回收。

## 2.5 机器学习模拟技术:优化水解酸化过程

针对厌氧水解酸化过程进行数学建模有利于更好地了解其动力学过程,为VFAs产率提升提供理论基础<sup>[51]</sup>。在过去的几十年中,研究者们已经开发了多种模型来描述厌氧消化/发酵过程,但主要是用于预测沼气生产,其中厌氧消化模型1号(ADM No. 1)是理论模型中的重要里程碑<sup>[52]</sup>。然而,理论模型在实践方面存在局限性,随着大数据与人工智能发展,机器学习成为了重要模拟工具。电化学预处理、代谢工程改造、纳米导电材料、电渗析及机器学习强化有机底物水解酸化过程如图3所示。2003年以来,已有机器学习相关研究将人工神经网络(ANN)和遗传算法(GA)等算法应用到了有机固废处理领域,用于预测沼气的产生<sup>[53-56]</sup>,而预测在VFAs等高价值产物方面的研究还非常有限,例如采用深度置信网络(DBN)模型,通过输入平均流速、含固率、pH、挥发分、甲烷产量等参数,预测了厨余垃圾厌氧发酵中VFAs的浓度,预测精度较高<sup>[57]</sup>;使用3种不同的机器学习算法预测了核黄素介导的污泥发酵VFAs产生过程,输入pH值和可溶性蛋白质2个输入特征变量,预测的VFAs最大产量为650 mg COD/g VSS<sup>[58]</sup>;另有一项研究基于机器学习比较了4种算法,模拟的VFAs产量与实测值呈正相关,算法优化后的VFAs浓度提高了45.2%,研究为预测和优化污泥厌氧发酵产酸提供了见解<sup>[59]</sup>。

上述研究证明了机器学习在解决厌氧发酵产酸领域挑战和优化系统提高VFAs产量的可行性,但仍处于研究的起步阶段,存在数据稀缺、模型解释度低、不明确性高等问题。需要针对厨余垃圾等有机固废的水解酸化过程,全面了解复杂生物过程的环境因素、微生物群落、底物组成等信息,增加输入数据的复杂度,建立数据共享平台,积极推动机器学习深入到厌氧产酸领域,为厨余垃圾制碳源工艺的动态反馈和智慧调控提供理论基础。

## 3 碳源脱氮效果评价

### 3.1 发酵液碳源指标

厨余垃圾水解酸化后的发酵液经过过滤、浓缩或提纯后制备成碳源产品,一般采用物化性质、生物脱氮试验评价碳源产品的质量与效果。需要对碳源产品的悬浮物含量(SS)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、挥发性有机酸含量(VFAs)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)、矿物油以及重金属含量等物化指标进行测定,并根据情况提出 $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{PO}_4^{3-})/\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{VFAs})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 等评价指标的下限值,以及SS、TP、矿物油和重金属含量的上限值,来评判水解酸化液是否符合碳源产品的基本条件<sup>[60,61]</sup>。此外,本文认为可以补充关注VFAs/COD比值指标,当水解酸化液的COD含量略低于标准,但VFAs活性脱氮组分的浓度在COD中的占比较高时,发酵液同样会具有较高的可生化性,有条件作为较佳的碳源产品。

### 3.2 脱氮效果评价

除了物化评价指标外,还需要将发酵液碳源投加至模拟的污水处理系统中,测定出水硝酸盐含量以评价其脱氮效果。例如,Sapmaz等<sup>[18]</sup>对厨余垃圾发酵液碳源的理化性质进行分析,发现 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TN}) > 38$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/\rho(\text{TN}) > 0.9$ 、 $\rho(\text{VFAs})$ 约4.37 g/L的发酵液可作为替代性碳源应用到MBBR反应器中,脱氮速率为0.61 mg NO<sub>x</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d),可达到甲醇碳源脱氮速率的1/2<sup>[18]</sup>。Mahmoud等<sup>[17]</sup>对比了初级污泥、浓缩活性污泥、厨余垃圾、烘焙加工废物、脂肪、油脂和乳清粉等有机底物发酵液碳源的脱氮性能,发现乳清粉的反硝化速率最高,厨余垃圾发酵液反硝化速率高于其他类有机固废,更具制碳源优势。在中试水平也开展了少数应用研究,发现发酵液碳源 $\rho(\text{TCOD})$ 为6.9~12.8 g/L、 $\rho(\text{TCOD})/\rho(\text{无机氮})$ 为200:1~500:1,投加至污水处理系统,其氮去除率从52.1%提高到了94.2%<sup>[32]</sup>。

为进一步探明发酵液碳源的主要脱氮成分,有研究针对单一有机酸开展了脱氮性能评价实验,其中乙酸的脱氮速率最快,为0.44 g NO<sub>x</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d);丙酸、丁酸、戊酸和己酸脱氮性能相当,分别为0.28、0.25、0.32、0.24 g NO<sub>x</sub>-N/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[18]</sup>;其他研究也同样发现乙酸是发酵液混合酸中的首选碳源成分<sup>[62,63]</sup>。但也有研究在长期运行(315 d)条件下,发现厨余垃圾发酵反应器中的毛螺菌科微生物产生了

大量的己酸,将富含己酸的发酵液应用于真实废水中,硝酸盐去除率最高可达98%,且己酸的比脱硝速率比甲醇和乙酸盐更高<sup>[19]</sup>。可见,一般认为乙酸是厨余垃圾发酵液碳源产品的主要脱氮成分,但在特殊工况下,由于微生物菌群的差异,可能存在对其他有机酸偏好利用的现象。因此,后续可以综合考虑碳源应用水体中脱氮菌群结构,设计与其碳源利用模式相适应的小分子有机酸组分,指导厨余垃圾定向转化产酸制备高性能污水碳源。

#### 4 问题与展望

厨余垃圾制备污水碳源工艺在理论上具有可行性,也初步建立了示范工程进行实践应用,但从市场发展整体情况来看,该行业仍处于起步阶段,在碳源产品制备、储运和应用等环节仍存在着诸多问题,需要进一步思考与解决。

在碳源产品的制备方面,存在着工艺不稳定、VFAs等有效脱氮成分含量偏低的问题。由于厨余垃圾存在明显的地域性特征且来源不稳定,因此应充分考虑厨余垃圾的处理规模和理化特性,采取适当的预处理方式以增强有机物溶解,并优化设备选型和工艺参数取值。同时,需要加强对各影响因素的精准控制研究,应用先进的传感技术和自动控制系统,提高工艺稳定性和可靠性。在水解酸化核心技术方面,需要进一步注重与微生物代谢工程、电化学技术、导电纳米材料及机器学习等新兴领域交叉发展,强化厨余垃圾高效产酸,提高厨余垃圾碳源产品质量。

在碳源产品的储运方面,由于发酵液碳源属于液态产品,其体积较大、有机质含量较高且易变质,因此存在储存时间短、空间需求大、运输成本较高的现实问题。未来,厨余垃圾碳源产品可以考虑向低含水率、固态碳源方向发展,制备成类似于天然生物基材料的固态缓释碳源,为污水反硝化过程提供电子供体的同时,为脱氮微生物提供固定化载体。厨余垃圾碳源产品形式固态化发展将有利于降低其储运成本。

在碳源产品的应用方面,存在着销售渠道有限、工程经验不足的现实问题。由于发酵液碳源性质不如乙酸等商品碳源性质稳定,在污水处理厂应用时容易出现有效电子供体投量不足、引入 $\text{NH}_3\text{-N}$ 杂质等一系列问题,导致出水水质不达标并影响污水厂的正常运行。因此,需要在提高发酵液碳源品质的

同时,开展更多更大规模的工程应用示范,根据实际应用场景的复杂性和水质变化动态调整发酵液碳源的投加模式,形成可靠的碳源产品使用指南,实现精准投加,为拓宽产品销售和应用渠道提供基础。

#### 5 结束语

针对污水处理碳源需求量大和厨余垃圾处理成本高的实际需求,近些年发展了利用厨余垃圾发酵液中小分子有机酸制备生物基绿色碳源工艺。厨余垃圾制碳源工艺包括垃圾预处理、水解酸化和碳源制备3个主要环节,其技术核心在于调控并强化水解酸化生物过程,提高发酵液中VFAs等活性碳源成分产量。通过前期大量实验研究,目前已识别出了诸多影响厨余垃圾VFAs产量的因素,包括发酵底物、发酵微生物、发酵理化环境等。根据厨余垃圾特点优化调整上述影响因素,并结合代谢工程、电化学、导电纳米材料、机器学习等研究热点,发展先进的高效水解酸化技术,能够有效提高厨余垃圾发酵液中的VFAs产量。发酵液经过滤、浓缩或提纯后制备的碳源产品,应用于污水处理厂,部分替代商品碳源,可提高污水反硝化速率,形成“以废治污”的水固协同治理模式。但目前我国厨余垃圾制碳源行业在碳源制备、储运和应用等环节仍存在工艺不稳定、脱氮成分含量偏低、储运成本高、销售渠道不畅等现实问题,故需进一步开展科学研究,升级厨余垃圾水解酸化技术工艺,提升发酵液碳源品质,为城市减污降碳、协同增效目标提供可推广的绿色技术范式。

#### 参考文献

- [1] 刘德兰,封莉,韩琦,等. 碳排放视角下剩余污泥作为污水脱氮碳源的可行性分析[J]. 环境工程学报, 2024, 18(8): 2089-2098.  
LIU D L, FENG L, HAN Q, et al. Feasibility analysis of excess sludge as carbon source for wastewater denitrification from the perspective of carbon emissions [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(8): 2089-2098.
- [2] 熊子康,郑怀礼,尚娟芳,等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 168-181.  
XIONG Z K, ZHENG H L, SHANG J F, et al. State-of-the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 168-181.
- [3] LIU W, YANG H, YE J, et al. Short-chain fatty acids recovery from sewage sludge via acidogenic fermentation as a carbon source for denitrification: a review [J]. Bioresour Technol, 2020, 311:

- 123446.
- [4] YIN Z, WANG J, WANG M, et al. Application and improvement methods of sludge alkaline fermentation liquid as a carbon source for biological nutrient removal: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162341.
- [5] AHMED S M, ALI N, RIAZ S, et al. A review on application of external carbon sources for denitrification for wastewater treatment [J]. *Global Nest Journal*, 2022, 24(1):105-118.
- [6] 潘元, 孙睿哲, 俞汉青. 外源电子供体驱动生物反硝化技术研究进展[J]. *环境工程*, 2024, 42(9):1-12.  
PAN Y, SUN R, YU H Q. Research advances in biological denitrification technology driven by exogenous electron donors [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(9):1-12.
- [7] 韩金峰, 张书廷. 部分固体废弃物作外加碳源的研究进展[J]. *环境工程*, 2015, 33(4):108-111.  
HAN J F, ZHANG S T. Research advances on waste solid as external carbon source [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(4): 108-111.
- [8] 张彤, 张立秋, 封莉, 等. 北京市垃圾分类后厨余垃圾与分类前生活垃圾性质变化分析[J]. *环境工程*, 2022, 40(12): 22-28.  
ZHANG T, ZHANG L Q, FENG L, et al. Analysis of changes in characteristics of kitchen waste after sorting and domestic waste before sorting in Beijing [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(12): 22-28.
- [9] 孙文瑾, 王雪梅, 李子富. 厨余垃圾厌氧发酵定向产酸的影响因素[J]. *化工进展*, 2024, 43(10): 5778-5790.  
SUN W J, WANG X M, LI Z F. Influencing factors of directional acid production by anaerobic fermentation of food waste [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(10): 5778-5790.
- [10] BHATIA S K, YANG Y H. Microbial production of volatile fatty acids: current status and future perspectives [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2017, 16(2): 327-345.
- [11] 吕伟, 冯凯. 污水厂协同处理有机固体废弃物方案研究[J]. *环境工程*, 2024, 42(11):99-105.  
LV W, FENG K. Comparison of collaborative treatment of kitchen waste in sewage plants [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(11):99-105.
- [12] 鄢凌, 傅宏鑫, 王旭东, 等. 生物基有机酸提取分离技术研究进展[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(1):1-10.  
YAN L, FU H X, WANG X D, et al. Recent advances on recovery and separation of biomass-based organic acids [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(1):1-10.
- [13] 张昊巍. 餐厨垃圾水解酸化液用作渗滤液脱氮碳源及中试研究[D]. 北京:清华大学, 2016.  
ZHANG H W. Research on Kitchen Waste Hydrolysis Products as Alternative Carbon Source in Treatment of Percolate Denitrification and Pilot-scale Study [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [14] QI S, LIN J, WANG Y, et al. Fermentation liquid production of food wastes as carbon source for denitrification: Laboratory and full-scale investigation [J]. *Chemosphere*, 2021, 270: 129460.
- [15] KIM H, KIM J, SHIN S G, et al. Continuous fermentation of food waste leachate for the production of volatile fatty acids and potential as a denitrification carbon source [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 207:440-445.
- [16] ZHANG Y, WANG X C, CHENG Z, et al. Effect of fermentation liquid from food waste as a carbon source for enhancing denitrification in wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2016, 144:689-696.
- [17] MAHMOUD A, HAMZA R A, ELBESHBIHY E. Enhancement of denitrification efficiency using municipal and industrial waste fermentation liquids as external carbon sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816:151578.
- [18] SAPMAZ T, MANAFI R, MAHBOUBI A, et al. Potential of food waste-derived volatile fatty acids as alternative carbon source for denitrifying moving bed biofilm reactors [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 364:128046.
- [19] OWUSU-AGYEMAN I, BEDASO B, LAUMEYER C, et al. Volatile fatty acids production from municipal waste streams and use as a carbon source for denitrification: the journey towards full-scale application and revealing key microbial players [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 175:113163.
- [20] 王英, 姚宏. 餐厨垃圾水解液强化低C/N废水生物除磷的探究 [J]. *水处理技术*, 2024, 50(2):99-104.  
WANG Y, YAO H. Study on enhanced biological phosphorus removal from low C/N wastewater by food waste hydrolysate [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(2):99-104.
- [21] 丁飞, 张红春, 郭洁, 等. 餐厨垃圾与剩余污泥协同发酵提升低C/N污水脱氮效能的中试研究 [J]. *环境工程学报*, 2023, 17(11):3681-3688.  
DING F, ZHANG H C, GUO J, et al. Pilot study on co-digestion of food waste and waste activated sludge to improve nitrogen removal efficiency of low C/N sewage [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(11):3681-3688.
- [22] 梁曼丽, 袁维波, 敖冬, 等. 餐厨垃圾制备高性能反硝化碳源的厌氧发酵条件优化 [J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(5):60-66.  
LIANG M L, YUAN W B, AO D, et al. Optimization of anaerobic fermentation conditions for the preparation of high-performance denitrified carbon sources with food waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(5):60-66.
- [23] 危海涛, 邱小燕. 厨余垃圾水解液作碳源强化低C/N污水处理效率的探究 [J]. *水处理技术*, 2022, 48(12):125-129.  
WEI H T, QIU X Y. Study on kitchenwaste hydrolysate As carbon source to enhance the efficiency of low C/N sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(12): 125-129.
- [24] VARGHESE V K, PODDAR B J, SHAH M P, et al. A comprehensive review on current status and future perspectives of microbial volatile fatty acids production as platform chemicals [J].

- Science of the Total Environment, 2022, 815: 152500.
- [25] WANG L, HAO J, WANG C, et al. Carbohydrate-to-protein ratio regulates hydrolysis and acidogenesis processes during volatile fatty acids production [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 355: 127266.
- [26] POSSENTE S, BERTASINI D, RIZZIOLI F, et al. Volatile fatty acids production from waste rich in carbohydrates: Optimization of dark fermentation of pasta by products [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2022, 189: 108710.
- [27] 李阳,邓悦,周涛,等. 预处理对菌接种餐厨垃圾发酵产乙酸的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5):1838-1843.  
LI Y, DENG Y, ZHOU T, et al. Effects of pretreatments on the production of acetic acid from food wastes by yeast and acetic acid bacteria during micro-aerobic fermentation [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5):1838-1843.
- [28] WU Q L, GUO W Q, ZHENG H S, et al. Enhancement of volatile fatty acid production by co-fermentation of food waste and excess sludge without pH control: The mechanism and microbial community analyses [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 216: 653-660.
- [29] 陈思远,肖向哲,滕俊,等. 剩余污泥厌氧消化过程产甲烷抑制技术研究进展[J]. *环境工程*, 2021, 39(6): 137-143.  
CHEN S Y, XIAO X Z, TENG J, et al. Research progress on methanogenic inhibition technology during anaerobic digestion of excess sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(6): 137-143.
- [30] LUO J, FENG L, ZHANG W, et al. Improved production of short-chain fatty acids from waste activated sludge driven by carbohydrate addition in continuous-flow reactors: Influence of SRT and temperature[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 51-58.
- [31] KHATAMI K, ATASOY M, LUDTKE M, et al. Bioconversion of food waste to volatile fatty acids: Impact of microbial community, pH and retention time[J]. *Chemosphere*, 2021, 275: 129981.
- [32] ARRAS W, HUSSAIN A, HAUSLER R, et al. Mesophilic, thermophilic and hyperthermophilic acidogenic fermentation of food waste in batch: Effect of inoculum source [J]. *Waste Management*, 2019, 87: 279-287.
- [33] BIAN C, CHEN X, WANG J, et al. Simultaneous biohydrogen and volatile fatty acids production from food waste in microbial electrolysis cell-assisted acidogenic reactor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420: 138370.
- [34] GAUTAM R, NAYAK J K, RESS N V, et al. Bio-hydrogen production through microbial electrolysis cell: Structural components and influencing factors[J]. *Chem Eng J*, 2023, 455: 140535.
- [35] WANG X T, ZHANG Y F, WANG B, et al. Enhancement of methane production from waste activated sludge using hybrid microbial electrolysis cells-anaerobic digestion (MEC-AD) process - a review[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 346: 126641.
- [36] ZENG Q, ZAN F, HAO T, et al. Sewage sludge digestion beyond biogas: Electrochemical pretreatment for biochemicals[J]. *Water Research*, 2022, 208: 117839.
- [37] XI S, DONG X, LIN Q, et al. Enhancing anaerobic fermentation of waste activated sludge by investigating multiple electrochemical pretreatment conditions: Performance, modeling and microbial dynamics[J]. *Bioresour Technol*, 2023, 368: 128364.
- [38] LIN Q, XI S, CHENG B, et al. Electrogenic singlet oxygen and reactive chlorine species enhancing volatile fatty acids production from co-fermentation of waste activated sludge and food waste: The key role of metal oxide coated electrodes [J]. *Water Research*, 2024, 260: 121953.
- [39] HUANG H, ZENG Q, HEYNDERICKX P M, et al. Electrochemical pretreatment (EPT) of waste activated sludge: Extracellular polymeric substances matrix destruction, sludge solubilisation and overall digestibility [J]. *Bioresour Technol*, 2021, 330: 125000.
- [40] NAKANO S, FUKAYA M, HORINOCHI S. Putative ABC transporter responsible for acetic acid resistance in acetobacter acetii[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2006, 72(1): 497-505.
- [41] SUO Y, LUO S, ZHANG Y, et al. Enhanced butyric acid tolerance and production by Class I heat shock protein-overproducing *Clostridium tyrobutyricum* ATCC 25755 [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2017, 44(8): 1145-1156.
- [42] LIU X, ZHU Y, YANG S T. Construction and characterization of ack deleted mutant of *clostridium tyrobutyricum* for enhanced butyric acid and hydrogen production [J]. *Biotechnology Progress*, 2006, 22(5): 1265-1275.
- [43] ZHAO R, LIU Y, ZHANG H, et al. CRISPR-Cas12a-mediated gene deletion and regulation in *clostridium ljungdahlii* and its application in carbon flux redirection in synthesis gas fermentation [J]. *ACS Synthetic Biology*, 2019, 8(10): 2270-2279.
- [44] 杨杰,李蕾,叶文杰,等. 有机垃圾厌氧消化性能强化技术研究现状及进展[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(8):2076-2088.  
YANG J, LI L, YE W J, et al. Research status and progress in technology for enhancing anaerobic digestion performance of organic waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(8):2076-2088.
- [45] CHEN L, ZHANG X, ZHU J, et al. Peroxydisulfate activation and versatility of defective Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MOF-808 for enhanced carbon and phosphorus recovery from sludge anaerobic fermentation[J]. *Water Res*, 2024, 254: 121401.
- [46] WANG X, WANG Y, ZHANG X, et al. In-situ combination of fermentation and electro dialysis with bipolar membranes for the production of lactic acid: Continuous operation [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 147: 442-448.
- [47] KOTOKA F, GUTIERREZ L, VERLIEFDE A, et al. Selective separation of nutrients and volatile fatty acids from food wastes using electro dialysis and membrane contactor for resource valorization [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 354: 120290.
- [48] JONES R J, FERNÁNDEZ-FEITO R, MASSANET-NICOLAU

- J, et al. Continuous recovery and enhanced yields of volatile fatty acids from a continually-fed 100 L food waste bioreactor by filtration and electrodialysis [J]. *Waste Management*, 2021, 122: 81–88.
- [49] NIKBAKHT R, SADRZADEH M, MOHAMMADI T. Effect of operating parameters on concentration of citric acid using electrodialysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(4): 596–604.
- [50] BAK C, YUN Y M, KIM J H, et al. Electrodialytic separation of volatile fatty acids from hydrogen fermented food wastes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(6): 3356–3362.
- [51] XU R Z, CAO J S, WU Y, et al. An integrated approach based on virtual data augmentation and deep neural networks modeling for VFA production prediction in anaerobic fermentation process [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116103.
- [52] BATSTONE D J, KELLER J, ANGELIDAKI I, et al. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)[J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45(10): 65–73.
- [53] GUO H N, WU S B, TIAN Y J, et al. Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: a review [J]. *Bioresour Technol*, 2021, 319: 124114.
- [54] DONG C, JIN B, LI D. Predicting the heating value of MSW with a feed forward neural network[J]. *Waste Management*, 2003, 23(2): 103–106.
- [55] BARIK D, MURUGAN S. An artificial neural network and genetic algorithm optimized model for biogas production from co-digestion of seed cake of karanja and cattle dung[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2015, 6(6): 1015–1027.
- [56] ABU Q H, BANI H K, SHATNAWI N. Modeling and optimization of biogas production from a waste digester using artificial neural network and genetic algorithm [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(6): 359–363.
- [57] ZHAI S, CHEN K, YANG L, et al. Applying machine learning to anaerobic fermentation of waste sludge using two targeted modeling strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 916: 170232.
- [58] LI W, HUANG J, SHI Z, et al. Machine learning enabled prediction and process optimization of VFA production from riboflavin-mediated sludge fermentation [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023, 17(11): 135.
- [59] ZHAI S, CHEN K, YANG L, et al. Applying machine learning to anaerobic fermentation of waste sludge using two targeted modeling strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 916: 170232.
- [60] 中华人民共和国工业和信息化部. 废(污)水处理用复合碳源: HG/T 5960—2021[S]. 2021. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. *Composite Carbon Source for Sewage and Wastewater Treatment: HG/T 5960—2021[S]*. 2021.
- [61] 中国国际科技促进会. 厨余垃圾发酵制备污(废)水处理用碳源: TCI 303—2024[S]. 2024. China International Association for Promotion of Science and Technology. *Carbon Source from Food Waste Fermentation for Wastewater Treatment: TCI 303—2024[S]*. 2024.
- [62] PELAZ L, GÓMEZ A, LETONA A, et al. Nitrogen removal in domestic wastewater. Effect of nitrate recycling and COD/N ratio [J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 8–14.
- [63] TORRESI E, ESCOLÀ CASAS M, POLESEL F, et al. Impact of external carbon dose on the removal of micropollutants using methanol and ethanol in post-denitrifying Moving Bed Biofilm Reactors[J]. *Water Research*, 2017, 108: 95–105.