

冯洁, 董滨, 王磊. 有机固废厌氧消化沼液特征及其处理和资源化利用方法综述[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 30-40.

FENG J, DONG B, WANG L. Review on characteristics of anaerobic digestion biogas liquid of organic solid wastes and the methods of treatment and resource utilization [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 30-40.

有机固废厌氧消化沼液特征及其处理和资源化利用方法综述

冯洁, 董滨*, 王磊*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 近年来,国内以中温厌氧消化为主的沼气工程发展迅速,产生大量沼液,沼液处理成为沼气工厂亟待解决的问题。文中从沼液的性质出发,系统总结了沼液的处理技术,包括生物处理法、物理化学法和组合工艺,以满足沼液中污染物去除和达标排放的目的。沼液中富含氮、磷等营养元素,沼液处理不能有效利用沼液资源,因此,随后分析了微藻培养、鸟粪石沉淀、氨气提-酸吸收 3 种沼液资源化利用途径,论述了从沼液中回收有价值产品的潜力。文章建议,未来沼气工厂的发展应逐步实现沼液资源循环利用,以减少沼气工程对环境的影响,并提高工厂的经济盈利能力。研究对于创建资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。

关键词 有机固废 沼液特征 沼液处理 营养物去除 资源化利用

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)09-0030-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.09.004

Review on Characteristics of Anaerobic Digestion Biogas Liquid of Organic Solid Wastes and the Methods of Treatment and Resource Utilization

FENG Jie, DONG Bin*, WANG Lei*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In recent years, the rapid development of biogas engineering with mesophilic anaerobic digestion at home has produced a large amount of biogas liquid, and the treatment of biogas liquid has become an urgent problem to be solved in biogas plants. Based on the properties of biogas liquid, a systematic summary of biogas liquid treatment technology, including biological treatment, physical-chemical treatment and combined processes, have been introduced in order to meet the nutrient removal and discharge standards. The biogas liquid is rich in nitrogen and phosphorus, and the biogas liquid treatment cannot effectively recovery the resources, therefore, three resource utilization ways including microalgae culture, struvite precipitation, ammonia stripping-acid absorption have been analyzed to explore the potential of these methods to recover valuable nutrient from biogas liquid. This paper suggests that the future development of biogas plants should gradually realize the recycling of resources from biogas liquid, in order to reduce the impact of biogas engineering on the environment, and improve the economic profitability of the plants, which is of great significance for creating a resource-saving and environment-friendly society.

Keywords organic solid waste characteristics of biogas liquid biogas liquid treatment nutrient removal resource utilization

随着经济水平的提高和城市人口的扩张,我国

有机固废产生量与日俱增。“十三五”末我国餐厨垃圾产生量达到 15 万 t/d,预计“十四五”期间将达到 20 万 t/d^[1]。同时,随着我国集约化、规模化现代农业的大力发展,2019 年我国畜禽粪污产生量达 30.5 亿 t,农作物秸秆产生量达 8.7 亿 t^[2]。这些有机固废产量高、含水率高,并且易腐败发臭、滋生病菌,若管理不当易污染环境,危害人畜健康。厌氧消化技术因其在处理有机固废的同时,能够产生沼气,

[收稿日期] 2023-05-05

[基金项目] 国家重点研发计划课题(2018YFC1900905)

[作者简介] 冯洁(1998—),女,硕士,研究方向为固体废弃物处理,E-mail:18262627199@163.com。

[通信作者] 董滨,男,博士生导师,研究方向为城市有机质低碳资源化处置,E-mail:dongbin@tongji.edu.cn。
王磊,男,博士生导师,研究方向为环境生物技术与微生物固碳,E-mail:celwang@tongji.edu.cn。

具有良好的环境效益和经济效益,得到越来越广泛的应用^[3]。根据《中国沼气行业“双碳”发展报告》,预计到2030年,可用于沼气生产的农业农村有机废弃物、城市有机废弃物、工业废水资源量分别约为53.5亿、5.1亿、84亿 m^3 ^[4]。沼气工程的大规模发展产生了大量的厌氧消化产物,通常,消化产物在处理之前首先经过固/液分离过程,产生沼液和沼渣两种产物^[5]。沼渣富含难生物降解的有机物、钙、镁、磷^[6],经过堆肥或干燥处理后,可用作土壤改良剂或肥料^[7]。沼液占厌氧消化产物总质量的80%~90%^[8],产量大且富含可溶性氮、磷、钾、有机物等,具有资源化利用潜力。但沼液直接土地利用会导致氮素流失,造成水体富营养化^[3]。此外,与商业化肥相比,沼液体积大、营养浓度低、储存和运输成本高^[9]。因此,如何有效处理沼液,减少其对环境的影响,并且提高沼气工厂的经济盈利能力,将是未来沼气工厂需要重点考虑的问题。针对沼液的处理,本文分析了沼液的主要成分,总结了以去除营养物质、达标排放为目的的沼液处理技术,和以回收营养物质为目的的沼液资源化利用技术,指出现有技术存在的不足和今后的发展方向,以期提高沼气工厂从沼液中回收资源 and 有价值产品的能力,从而促进

沼气工厂的可持续发展。

1 有机固废厌氧消化沼液特征

沼液的性质各不相同,这与厌氧消化底物、工艺参数和固液分离方式有关。但是沼液具有一些共同的特征:氨氮浓度高、 $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{BOD}_5$ 高、碳氮比(C/N)低、有机物生物可降解性低^[5]。Akhlar等^[10]发现沼液中60%~96%的 COD_{Cr} 以悬浮颗粒($>1.2\ \mu\text{m}$)的形式存在。Tambone等^[11]计算了凯氏氮(TKN)和 P_2O_5 在沼液和沼渣中的分布,发现87%以上的TKN在沼液中,而近2/3的 P_2O_5 也存在于沼液中,表明固液分离后沼液中仍含有大量干物质。沼液的pH受底物影响,富含氮的底物由于氨积累,pH增加,而富含有机质的底物由于脂肪酸的积累,pH下降^[12]。沼液总固体(TS)、挥发性固体(VS)取决于底物的生物可降解性和固液分离过程^[13]。例如,水果和蔬菜类底物中生物可降解性高使得固体含量降低,离心和混凝的固液分离效果好于螺旋压榨。因此,使用离心和混凝得到的沼液固体含量较低。

表1列举了不同类型有机固废厌氧消化沼液的化学组成。不同的厌氧消化底物、反应条件和固液分离方式均会使沼液性质产生较大的差异。

表1 不同类型有机固废厌氧消化沼液特征

Tab. 1 Characteristics of Anaerobic Digestion Liquid of Different Types of Organic Solid Wastes

样品	pH 值	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	水力停留时 间(HRT)/d	反应 条件	固液分离 方式
猪粪 ^[14]	—	1 147.3±25.7	542.5±13.6	787.08±20.50	—	15.60±5.21	—	中温	—
猪粪 ^[15]	7.8±0.2	7 451±31	2 500±200	—	60.0±5	—	—	—	—
鸡粪 ^[16]	—	4 677	2 052.77	1 210.27	60	—	—	—	—
鸡粪 ^[17]	8.38	3 038.00	—	825.51	64.46	—	—	—	—
污泥 ^[18]	7.92±0.21	1 068±164	859±88	998±72	104.21±10.58	68.34±25.7	24	中温	隔膜压滤深度脱水工艺
污泥 ^[19]	8.51	330 ± 20	310	—	—	—	20	中温	—
餐厨 ^[20]	7.96	19 413±564	1 463	2 388±99	—	—	26	中温	气浮
餐厨 ^[20]	8.06	20 080±234	2 017	3 072±22	—	—	26	中温	离心

2 有机固废厌氧消化沼液处理方法

沼液中含有大量的氮、磷元素,排入水体会造成富营养化,威胁鱼类与其他水生生物生存^[21]。因此,营养物去除是有效管理沼液的关键。沼液的处理方法包括生物法、物理化学法和组合工艺。

2.1 生物法

沼液生物处理法可以分为传统生物脱氮工艺和

强化生物脱氮工艺。传统生物脱氮工艺包括缺氧/好氧法(anoxic/oxic, AO)、膜生物反应器法(membrane bioreactor, MBR)、序批式活性污泥法(sequencing batch reactor, SBR)等,均是通过传统生物硝化反硝化进行脱氮的工艺。赵明^[22]采用AO-MBR工艺处理猪场沼液,控制溶解氧(DO)质量浓度为3 mg/L、污泥质量浓度(MLSS)为4~5 g/L时,

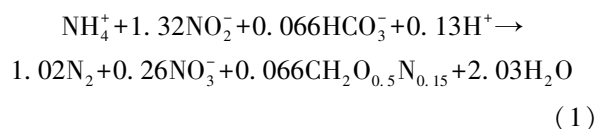
COD_{Cr} 和氨氮的去除效果良好,而 TN 的去除率则不到 30%。方炳南等^[23]采用 SBR 工艺处理猪场沼液,发现系统污染物的去除效果较差,COD_{Cr} 去除率仅 20%左右,氨氮出水质量浓度高达 200 mg/L。由此可见,由于沼液 C/N 和可生化性低,使用传统生物脱氮工艺时存在处理效果不佳、系统脱氮效果不理想的问题,常采取以下调控方式改善传统生物脱氮工艺处理效果:(1)加碱提高 pH;(2)加碳源提升沼液可生化性;(3)提高硝化液回流比强化反硝化。方炳南等^[24]通过加碱提高 SBR 系统的 pH,改善了氨氮去除效果,出水氨氮质量浓度降至 10 mg/L 以下,但 TN 去除效果不佳,通过提高 C/N 到 10 左右,系统 TN 去除率提升至 75.9%。张智等^[25]通过在两级 AO 系统中添加奶牛场集水池废水,提高了沼液 C/N,系统脱氮能力显著提高,氨氮、TN 去除率高达 97.2%、79.1%。潘松青等^[26]将 AO 生物膜-活性污泥复合工艺回流比从 100% 提高至 200%,COD_{Cr} 去除率由 67.67% 增加至 77.89%,TN 去除率由 23.03% 增加至 25.97%。

尽管采用调控手段能够改善传统生物脱氮工艺处理效果,依然存在以下问题。(1)TN 排放量过高。大部分沼液处理厂执行的标准为《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)或《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),这 2 个标准均未给出 TN 排放限值,因此,对 TN 的去除效果关注较少。(2)处理成本高。传统生物处理需要投加大量碳源和氧气,使得运行成本较高。近年来出现了一些针对高氨氮废水处理的强化生物脱氮工艺,如短程硝化反硝化、厌氧氨氧化(ANAMMOX)等,这些工艺具有较低的能量需求,与传统生物脱氮工艺相比更有前景。

短程硝化反硝化是将氨氧化为亚硝酸盐,然后通过异养反亚硝化菌将亚硝酸盐转化为氮气^[27]。与常规脱氮相比,可减少 25% 氧气和 40% 有机碳需求^[27],具有较大的经济优势。维持短程硝化反硝化的关键在于促进氨氧化菌(AOB)生长,同时抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)活性。夏一帆等^[28]采用动态膜生物反应器(DMBR)处理餐厨沼液,通过逐步提高沼液比例,并控制 DO 质量浓度在 0.8~1.2 mg/L、温度为 35℃,在 16 d 实现短程硝化(partial nitrification,PN)的启动并稳定运行,氨氮和 TN 去除

率分别为 92% 和 68%。Scaglione 等^[29]采用 SBR 反应器在活性污泥质量浓度(MLVSS)为 7 g/L、DO 质量浓度为 0.8 mg/L、pH 值为 8.4 时,实现了短程硝化反硝化,亚硝化速率达到 0.5 g N/(L·d),NO₂/NO_x 超过 80%,脱氮效率达到 95%。

ANAMMOX 以亚硝酸盐为电子受体,无机碳为电子供体,利用厌氧氨氧化菌将铵直接转化为氮气^[21]。该工艺不需要外部有机碳源,与传统硝化反硝化相比极大降低了成本。ANAMMOX 需要铵和亚硝酸盐为底物[式(1)],而沼液中亚硝酸盐含量极少,因此,典型工艺设计为首先采用 PN 将氨氮部分氧化为亚硝态氮,然后再通过 ANAMMOX 实现氮的去除^[30]。



王子凌^[31]采用 CANON 工艺处理猪场沼液,利用响应面法优化了试验条件,实现出水氨氮、TN 质量浓度分别为 74.68、108.28 mg/L。宋国梁^[32]采用 SHARON-ANAMMOX 工艺处理猪场沼液,在 PN 阶段实现亚硝态氮/总硝态氮大于 90%,整个联合工艺 TN 去除率达 83.31%。Gao 等^[33]采用 PN-ANAMMOX 处理餐厨沼液,在 PN 阶段实现平均亚硝化率达 95%,ANAMMOX 阶段对氨氮和亚硝态氮的去除率分别达到 88% 和 96% 以上。尽管 PN-ANAMMOX 具有较低的能量和碳源需求,在实际工程中却很少采用 PN-ANAMMOX,主要原因是厌氧氨氧化菌生长速度慢、倍增时间长^[34]、对生长环境要求严格,DO、亚硝酸盐、氨氮、pH 和温度均会影响它们的生长^[5]。但 PN-ANAMMOX 在高氨氮废水中仍然有着巨大的应用潜力。

2.2 物理化学法

沼液经生物处理后,仍存在一些难降解有机质未能去除,物理化学法通常作为深度处理工艺进一步去除难降解物质,使出水达标排放。常用的物理化学法有膜分离技术与高级氧化技术。

膜分离技术包括微滤(MF)(0.1~2 μm)、超滤(UF)(0.01~0.1 μm)、纳滤(NF)(0.001~0.01 μm)和反渗透(RO)(<0.001 μm)^[35]。MF 和 UF 用于去除悬浮固体、微生物和大分子物质^[34],NF 和 RO 用于去除较小的有机分子和离

子^[36]。陆佳等^[37]采用 UF 处理牛粪沼液,在 25 ℃、0.1 MPa、浓缩倍数为 4~5 倍的条件下,出水 COD_{Cr}、SS 质量浓度分别为 344.06、186.4 mg/L。岳彩德等^[38]采用 200 nm 陶瓷膜处理猪场沼液,对 TP、氨氮、TN 和总钾的平均去除率分别为 61.2%、3.8%、6.2%和 3.0%,发现陶瓷膜对氨氮、TN 和总钾去除效率低,这是由于沼液中氨氮和钾主要以离子形式存在于水中,进一步去除氮、钾等溶解性物质需要 NF、RO 等更精密的过滤方式。武林等^[39]采用 RO 处理猪场沼液,在 3 500 kPa、35 ℃、pH 值=5.0 时,氨氮、TN 和 TP 的平均截留率达到 90.7%、93.3%和 86.3%。魏欢欢^[40]采用 RO 处理猪场沼液,在 5.5 MPa、pH 值=7.7、二次利用百分比为 76.0%时,氨氮去除率达 96.13%,透过液达到了国家畜禽养殖业污染物排放标准和国家农田灌溉回用标准。

高级氧化技术是近年来水处理领域兴起的新技术,该技术能产生高活性自由基,可与大分子有机物反应,破坏其分子结构使之降解为小分子,进而达到去除有机污染物的目的^[41]。目前常用的高级氧化

技术有 Fenton 法和臭氧氧化法。郭俊灵等^[42]采用 Fenton 法处理沼液,在 pH 值为 3、H₂O₂ 体积分数为 15 mL/L、Fe²⁺ 质量浓度为 130 mg/L、反应时间为 2 h 时,COD_{Cr} 去除率达到 71.5%。张明慧等^[43]采用臭氧+絮凝工艺处理牛粪沼液,COD_{Cr} 去除率最佳可达 82%,COD_{Cr} 质量浓度降低到 4 000 mg/L。曾鑫等^[44]利用臭氧氧化法处理鸟粪石沉淀后的沼液,当臭氧投加量为 6 mg/L、反应时间为 40 min 时,COD_{Cr} 去除率最大达到 21.7%,BOD₅/COD_{Cr} 由 0.24 上升为 0.41,可生化性明显提高。尽管高级氧化法能去除部分 COD_{Cr},提高沼液可生化性,但不能将沼液中的 COD_{Cr} 降到很低的水平,需要采用组合工艺才能更好地将沼液中的污染物去除。

2.3 组合工艺

经过厌氧消化,大部分的易降解有机物被分解,造成沼液中可供微生物利用的有机质较少,C/N 失调,仅靠单一处理工艺处理效果不理想,一般需要经过生物法+物化法组合工艺的处理才能实现有机物与营养物质的去除,达到废水排放标准。表 2 列举了不同组合工艺的处理效果。

表 2 不同组合工艺处理效果
Tab. 2 Treatment Effect of Different Combined Processes

工艺	原料	COD _{Cr} 去除率	出水 COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	TN 去除率	出水 TN/ (mg·L ⁻¹)	氨氮 去除率	出水 氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TP 去除率	出水 TP/ (mg·L ⁻¹)	执行标准
AOAO+UF+Fenton+ 混凝沉淀 ^[45]	餐厨沼液	98.14%	260	98.68%	67	99.49%	19	99.28%	2	GB 8978—1996
两级 AO+UF+ Fenton+曝气生物滤 池(BAF) ^[46]	餐厨沼液	98.70%	220	98.62%	45	99.73%	8	97.12%	1.5	—
MBR+NF+RO ^[47]	厨余垃圾沼液	98.00%	30	—	—	98.00%	5	—	—	《城市污水再生利用 工业用水水质》 (GB/T 19923—2005)
MBR+NF+RO ^[48]	垃圾渗滤液+ 餐厨垃圾沼液	99.70%	50.4	99.80%	39.3	99.63%	6.7	—	—	《生活垃圾填埋场污 染控制标准》(GB 16889—2008)
MBR(AOAO+UF)+ NF ^[49]	餐厨垃圾、市 政污泥、城市 粪便联合厌氧 消化沼液	95.77%	465	97.45%	61	99.08%	18	83.33%	2	GB 8978—1996; 《水污染物综合排放标 准》(DB 11/307— 2013)
AO+MBR+NF+ RO ^[50]	餐厨垃圾渗滤 液沼液	99.65%	≤30	—	—	99.55%	≤7	—	—	《山东省海河流域水污 染物综合排放标准》 (DB 37/675—2007)

由表 2 可知,采用组合工艺处理的沼液,污染物去除率基本能达到 95% 以上。现阶段沼气工厂普遍使用传统生物脱氮工艺+物化法组合工艺处理沼液,存在处理成本较高、占地面积大等缺点。针对传统生物脱氮工艺出现的问题,近年来出现了具有较低能量需求的强化生物脱氮工艺,如短程硝化反硝化、部分硝化-ANAMMOX 工艺。然而,强化生物脱氮工艺对生长环境要求严格,启动困难,运行维护需要高素质管理人员,大部分研究还仅停留在实验室阶段,在实际工程中鲜有报道。因此,今后沼液处理技术的研究应加快开发利用强化生物脱氮工艺,并通过中试试验研究,推进强化生物脱氮工艺在实际工程中应用。

3 有机固废厌氧消化沼液资源化利用方法

以生化法为主的沼液处理技术无法有效利用沼液资源,随着人们对农业可持续发展和矿物性磷等自然资源保护的重视,沼液处理的重点将逐步从养分去除转变为养分回收和循环利用。沼液富含多种大量和微量元素,是一种有价值的肥料。然而,沼液直接土地利用会产生 CH_4 和 NH_3 , 导致全球变暖、水体富营养化^[51]。此外,沼液养分浓度稀薄、体积巨大,还含有大量的杂质,远低于相关农业行业标准^[52]。为达到便捷和安全利用的目的,可以提取沼液中的营养元素生产高附加值产品。下面将介绍一些较为成熟的资源化利用技术,并分析其不足,以期对沼液资源化规模化利用提供解决方案。

3.1 微藻培养

能源危机和气候变化使得人们越来越重视可再生能源的使用,微藻作为生物燃料生产的潜在替代品受到越来越多的关注。微藻具有生长率高、能够减少 CO_2 排放、不与农作物竞争土地等优势^[53],收获的藻类可用于生产生物化学品、生物燃料、动物饲料等^[54]。微藻的培养过程需要添加大量的氮、磷等养分,营养物质成本占总成本的 20%~30%^[55]。沼液中含有丰富的氮、磷,正是微藻生长所需要的,采用沼液替代无机肥料来培养微藻,不仅可以降低培养成本,还可以实现沼液的净化,创造环境效益。Uggetti 等^[56]采用沼液培养栅藻(*Scenedesmus* sp.),生物产量高达 2.6 g TSS/L。乔佳珂等^[57]利用猪沼液培养小球藻(*Chlorella vulgaris*),在沼液质量分数为 30%时,小球藻油脂产量最高达到 110.32 mg/L。

Ji 等^[58]采用沼液培养链带藻(*Desmodesmus* sp.),最高生物产量为 1.039 g/L,最高产脂量为 261.8 mg/L,同时还实现了 TN、氨氮和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的有效去除。

尽管已成功从沼液中培养出富含高价值生物物质的微藻,但有几个问题阻碍了这项技术的发展。一是高浑浊度导致光线透过不足,抑制了微藻的生长^[59]。二是沼液的高氨氮浓度(包括铵和游离氨)抑制了微藻生长^[60]。根据参考文献^[54,56]的不同,氨质量浓度的抑制阈值在 10~500 mg/L。稀释是减轻浑浊度和氨抑制的常用方法。Wang 等^[59]建议将沼液稀释至 TN 质量浓度低于 200 mg/L,以降低铵浓度和浑浊度改善光线透过性。然而,稀释会降低营养物质浓度,导致微藻生物量浓度降低^[60]。此外,稀释还会消耗大量淡水,降低了工艺的经济性和可持续性^[61]。三是生物污染问题,外来藻类、浮游动物、细菌和病毒会抑制目标微藻的生长^[62]。过滤和添加化学药剂是控制生物污染的有效途径,但这 2 种方法均会增加处理成本^[60]。选择对生物污染具有抗性或不敏感性的藻类菌株是较为可行的方法^[62]。另外,控制环境(如光照、温度)和操作参数(如水力和生物停留时间、养分供应、pH)也是减少生物污染的可行性策略^[63]。生物污染的控制对未来微藻大规模养殖具有重要意义,然而到目前为止还没有有效的方法来控制生物污染^[54]。

3.2 鸟粪石沉淀

磷对生物至关重要,是作物生产的必需营养元素。沼液中含有丰富的磷,采用适当的方法回收沼液中的磷并应用于农业生产中,有助于保护磷储量^[64]。鸟粪石沉淀是回收磷的有效方法,其原理是当废水中 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的浓度积达到鸟粪石的溶度积(K_{sp})时^[65],会生成磷酸铵镁沉淀($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, MAP),即鸟粪石,在去除沼液中氮、磷的同时实现营养物质的回收。生成的鸟粪石具有较高的植物营养价值和较低的溶解度,是一种优质的缓释肥料,可代替商业化肥使用。

通过在含有可溶性磷和铵的溶液中加入 Mg^{2+} ,并调节 pH 至碱性可诱导鸟粪石析出^[6]。沼液中含有大量的 NH_4^+ 和部分可溶性磷,而不含溶解镁,因此,添加镁源(MgO/MgCl_2)是必要的^[21]。pH、镁磷比(Mg/P)及氮磷比(N/P)是影响鸟粪石沉淀的主

要因素。黄彬等^[66]发现 pH 值为 9.5~10 时氮和磷去除率最高,进一步提高 pH 会生成 $Mg_3(PO_4)_2$ 和 $Mg(OH)_2$,降低去除率^[67]。pH 还影响生成的鸟粪石纯度。当 pH 值<8.5 时,可以得到纯鸟粪石^[68],当 pH 值由 8.5 升至 9.5 时,废水中存在的 Ca^{2+} 导致生成无定形磷酸钙 $[Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O, ACP]$,鸟粪石纯度降低^[69]。因此,要获得高纯度的鸟粪石,pH 值应控制在 8.0~8.5。 Mg/P 和 N/P 也是影响鸟粪石沉淀的重要参数, Mg/P 和 N/P 增加有利于提高鸟粪石沉淀效率和磷回收率^[70]。大部分研究^[71-72]报道的 Mg/P 最佳物质的量比在 1.3~1.6。继续增大 Mg/P 会降低磷的去除率,这是由于过多的 Mg^{2+} 会生成 $Mg(OH)_2$ 、 $Mg_3(PO_4)_2$ ^[73]。对于 N/P ,郝凌云等^[72]表示,在 N/P 远大于 1 的污水中无需考虑氮的影响。

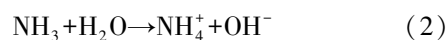
有学者^[74]评估,当以鸟粪石的形式回收氮、磷并替代传统肥料时,相比直接施用沼液,可降低 78% 的富营养化潜力。然而,鸟粪石沉淀法的商业化推广仍面临许多挑战。(1) 化学成本高。镁盐成本是鸟粪石技术的主要成本,一些学者通过寻找镁源的替代品来降低成本。Ye 等^[75]采用卤水作为替代镁源,成功用于鸟粪石沉淀,然而卤水中含有的其他离子会进一步增加沼液的离子强度,需要进一步探究其对沼液中回收鸟粪石的影响。(2) 沼液中杂质离子去除困难。沼液中除了鸟粪石组分离子,还含有 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等杂质离子,杂质离子会形成其他矿物组分影响鸟粪石的品质^[69]。(3) 氨氮去除率低。鸟粪石沉淀法能够去除和回收沼液中 80%~90% 的可溶性磷,但只有 10%~40% 的氨氮可被回收^[6],沼液中剩余氨氮含量依然较高,仍需探索合适的后处理方法以满足排放标准。

3.3 氨气提-酸吸收工艺

氨气提-酸吸收工艺是氮回收的最有效方法之一。氨气提是当含有 NH_3 的液体与含有少量或不含 NH_3 的空气或蒸汽接触时, NH_3 从水相转移到气相的过程^[6]。酸吸收是将含有 NH_3 的气体转移到空气洗涤器中,通过稀硫酸(H_2SO_4)吸收转化为硫酸铵 $[(NH_4)_2SO_4]$ ^[76]。 $(NH_4)_2SO_4$ 是一种富含氮和硫的无机盐,可以作为肥料加工和出售,是一种有价值的工业化肥替代品^[77]。

pH、温度和气体流速会影响气提过程氨的回收

率。在废水中, NH_4^+ 和 NH_3 存在平衡关系,如式(2)。



pH 升高平衡向左移动,游离氨所占比例增大。Guštin 等^[78]发现当 pH 值从 8.5 提高至 10.5 时,氨氮去除率从 27.4% 提高到 92.8%,pH 的增加促进了氨的去除。通常氨气提的 pH 值在 9~11^[79-80],进一步增加 pH 时对氨去除率的提升效果不大^[81]。温度也会影响氨气提效率。式(2)为放热反应,温度升高平衡向左移动,游离氨的量增加。Zhao 等^[82]发现温度为 35、55、70 °C 时,氨氮去除率分别为 20%、40%、90%,这是由于升高温度增强了分子在液膜和气膜间的扩散,提高了传质速率^[83]。气体流速的增加也会提高氨的回收率。高空气流速增加了界面面积,同时使空气中氨的浓度维持在较低水平,有利于更多的游离氨从液相扩散到气相^[84]。Zou 等^[85]发现在气流量为 20、24、28 m³/h 时,氨氮平均去除率分别为 66.5%、74.9%、68.5%,可见气体流速过大或过小都会降低氨氮去除率。低流速导致液体在塔和填料之间的分布不均匀,减小了气液界面面积,导致传质性能不佳^[79]。而流速过高会导致液温降低、起泡和液相蒸发^[82]。

尽管氨气提-酸吸收工艺能有效去除废水中的氨,但其在沼液中的应用仍存在许多困难:气提塔容易结垢;需要大量的能量(热能和电能);需要大量化学品。为克服上述问题,有学者^[86]采用无填充材料的气泡反应器,以减少沼液中悬浮固体引起的结垢问题;也有学者^[82]采用不加碱、只通过曝气吹脱 CO_2 的方式提高 pH 来回收氨,减少了化学成本。针对昂贵的能源成本,有学者^[87-88]提出了真空热气提氨回收工艺,真空可以降低沸点从而减少加热能耗;也有学者^[89]采用太阳能加热器加热沼液,实现了较高的氨去除率,而氨气提的大规模应用还需要进一步探索低成本的加热方法。

4 结论与展望

本文对有机固废厌氧消化沼液特征、沼液处理及沼液资源化利用技术进行了系统性综述。沼液氨氮浓度高、C/N 低,采用传统生物脱氮工艺处理效果不佳,而采用短程硝化反硝化、ANAMMOX 等强化生物脱氮工艺能够在较低的碳源需求下实现较高的脱氮率。然而,单独采用生物处理工艺沼液中依

然存在一些难降解有机质难以去除,膜分离和高级氧化等物理化学法常作为深度处理工艺和生物脱氮工艺组合使用,进一步去除营养物质,使出水达标排放。

目前,世界范围内沼气工厂的数量正在增加,产生了大量的厌氧消化沼液。沼液中含有大量氮、磷等营养元素,仅将沼液作为污水处理,难以实现资源的循环利用。不同于沼液处理技术,沼液资源化利用技术目的在于回收沼液中的营养物质,同时对沼液进行处理。现阶段具有前景的沼液资源化利用技术包括微藻培养、鸟粪石沉淀、氨气提-酸吸收工艺。微藻培养可以利用沼液中的氮、磷等营养物质生产具有高价值生物质的微藻;鸟粪石沉淀能够将沼液中的氮、磷以鸟粪石的形式回收;氨气提-酸吸收工艺将沼液中的氨转化为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 肥料进行回收。这3种资源化利用工艺均能够在降低沼液中营养物质含量的同时达到资源回收的目的,能够同时实现经济效益和环境效益。但现阶段,沼液资源化产品尚未建立真正的市场,仍然需要制定有利于可再生肥料商业化的统一立法。从技术角度来看,所有技术仍需进一步优化,以最大限度地降低运营成本,特别是在能源和化学品消耗方面,以生产高质量肥料,并经济稳定地回收营养物质。

总的来说,现阶段国内对沼液的资源化方面关注较少,资源化产品的商业化还有较长的路要走。一系列资源化技术的推广还有许多亟待解决的问题:如何保证最终产品的环境安全(如病原体、新污染物、气体排放);如何根据作物需求提高产品性能(如养分平衡、养分有效性、有机物的稳定性);如何提高资源化产品的市场接受度等。因此,针对沼气工厂未来的发展,有必要创新其沼液管理方案,将厌氧消化产物整合到可持续的生物精炼计划中,探讨沼液的综合处理方式,兼顾经济和环境效益,这应该成为未来的主要研究问题。

参考文献

- [1] 常燕青,黄慧敏,赵振振,等.餐厨垃圾资源化处理与高值化利用技术发展展望[J].环境卫生工程,2021,29(1): 44-51.
CHANG Y Q, HUANG H M, ZHAO Z Z, et al. Prospect for the development of recycling treatment and high-value utilization technologies of food waste [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(1): 44-51.
- [2] 中华人民共和国农业农村部.农业农村部关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见[EB/OL]. (2021-08-30)[2023-05-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830_6375173.htm.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Opinions of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on implement Law on the Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Wastes of the People's Republic of China[EB/OL]. (2021-08-30)[2023-05-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830_6375173.htm.
- [3] PENG W, PIVATO A. Sustainable management of digestate from the organic fraction of municipal solid waste and food waste under the concepts of back to earth alternatives and circular economy [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10(2): 465-481.
- [4] 中国沼气学会.中国沼气行业“双碳”发展报告[R].南京:2021年中国沼气学会学术年会暨中德沼气合作论坛,2021.
China Biogas Industry. The china biogas industry development report; Peaking carbon emissions 2030 and carbon neutrality 2060[R]. Nanjing: 2021 Academic Annual Meeting of China Biogas Society and Sino German Biogas Cooperation Forum, 2021.
- [5] MALAMIS S, KATSOU E, FABIO S D, et al. Biological nutrients removal from the supernatant originating from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2014, 34(3): 244-257.
- [6] VANECKHAUTE C, LEBUF V, MICHELS E, et al. Nutrient recovery from digestate: Systematic technology review and product classification [J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, 8(1): 21-40.
- [7] MONLAU F, SAMBUSITI C, FICARA E, et al. New opportunities for agricultural digestate valorization: Current situation and perspectives [J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(9): 2600-2621.
- [8] FULDAUER L I, PARKER B M, YAMAN R, et al. Managing anaerobic digestate from food waste in the urban environment: Evaluating the feasibility from an interdisciplinary perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 929-940. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.045.
- [9] DROSG B, FUCHS W, AISEADI T, et al. Nutrient recovery by biogas digestate processing [M]. Dublin: IEA Bioenergy, 2015.
- [10] AKHIAR A, BATTIMELLI A, TORRIJOS M, et al. Comprehensive characterization of the liquid fraction of digestates from full-scale anaerobic co-digestion [J]. Waste Management, 2017, 59: 118-128. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.11.005.
- [11] TAMBONE F, ORZI V, D'IMPORZANO G, et al. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value [J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 1251-1256. DOI: 10.

- 1016/j. biortech. 2017. 07. 130.
- [12] AKHIAR A, GUILAYN F, TORRIJOS M, et al. Correlations between the composition of liquid fraction of full-scale digestates and process conditions[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1-24.
- [13] AKHIAR A, ZAMRI M, TORRIJOS M, et al. Anaerobic digestion industries progress throughout the world [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 476: 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/476/1/012074.
- [14] 郭佳豪, 胡宝娥, 肖雅, 等. 猪场沼液本土微生物富集的氮磷回收特性[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(4): 79-86.
- GUO J H, HU B E, XIAO Y, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus recovery from biogas slurry enriched by indigenous microflora in pig farms [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(4): 79-86.
- [15] HE Q, TU T, YAN S P, et al. Relating water vapor transfer to ammonia recovery from biogas slurry by vacuum membrane distillation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 191: 182-191. DOI: 10.1016/j. seppur. 2017. 09. 030.
- [16] 刘永霞, 李裕荣, 杨梅, 等. 水培空心菜净化和资源化利用鸡粪沼液研究[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(8): 1297-1302.
- LIU Y X, LI Y R, YANG M, et al. Purification and resource utilization of chicken manure biogas slurry by using hydroponic water spinach [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(8): 1297-1302.
- [17] 辛格, 高亚茹, 陈国松, 等. 沼液成分与重金属含量分析[J]. *化工时刊*, 2018, 32(1): 9-16.
- XIN G, GAO Y R, CHEN G S, et al. Analysis of biogas slurry composition and heavy metal content [J]. *Chemical Industry Times*, 2018, 32(1): 9-16.
- [18] 谭学军, 王磊, 王逸贤, 等. 城市污水处理厂污泥厌氧消化沼液特性研究[J]. *给水排水*, 2020, 56(s2): 237-241.
- TAN X J, WANG L, WANG Y X, et al. Characteristics of sludge anaerobic digestion effluent in municipal sewage plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(s2): 237-241.
- [19] AZIZ N, HANAFIAH M M, ALI M. Sustainable biogas production from agrowaste and effluents-A promising step for small-scale industry income[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 363-369. DOI: 10.1016/j. renene. 2018. 07. 149.
- [20] 黄玉龙, 吕凡, 仇俊杰, 等. 易腐垃圾厌氧消化沼液理化性质及 VOCs 分子特征[J]. *化工学报*, 2023, 74(3): 1275-1285.
- HUANG Y L, LÜ F, QIU J J, et al. Physicochemical properties and VOCs molecular characteristics of liquid digestate from anaerobic digestion of putrescible waste [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(3): 1275-1285.
- [21] SHEETS J P, YANG L, GE X, et al. Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste [J]. *Waste Management*, 2015, 44(10): 94-115.
- [22] 赵明. A/O-MBR 工艺处理养猪沼液的研究[J]. *工业水处理*, 2012, 32(8): 27-29.
- ZHAO M. A/O-MBR process for treating digested piggery wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(8): 27-29.
- [23] 方炳南, 顾欣欣, 朱亮. 常规 SBR 工艺对猪场沼液的处理性能研究[J]. *中国沼气*, 2012, 30(1): 27-30.
- FANG B N, GU X X, ZHU L. Performance of SBR process treating biogas slurry[J]. *China Biogas*, 2012, 30(1): 27-30.
- [24] 方炳南, 王志荣, 黄武, 等. SBR 处理猪场沼液运行工况优化研究[J]. *中国沼气*, 2011, 29(5): 47-50.
- FANG B N, WANG Z R, HUANG W, et al. Optimization of operation conditions treating biogas slurry with SBR reactor[J]. *China Biogas*, 2011, 29(5): 47-50.
- [25] 张智, 毕生兰, 余薇薇. 两级 A/O 工艺处理奶牛养殖低 C/N 沼液试验研究[J]. *给水排水*, 2012, 48(1): 134-137.
- ZHANG Z, BI S L, YU W W. Experimental study on the treatment of low C/N biogas slurry by two-stage A/O process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 48(1): 134-137.
- [26] 潘松青, 徐颖, 吴杰, 等. A/O 生物膜-活性污泥复合工艺处理养猪场沼液研究[J]. *中国沼气*, 2016, 34(4): 19-24.
- PAN S Q, XU Y, WU J, et al. A lab-experiment on treatment of piggery biogas slurry by combined biofilm and activated sludge A/O process[J]. *China Biogas*, 2016, 34(4): 19-24.
- [27] MONFET E, AUBRY G, RAMIREZ A A. Nutrient removal and recovery from digestate: A review of the technology [J]. *Biofuels*, 2018, 9(2): 247-262.
- [28] 夏一帆, 王冰洁, 涂凌波, 等. DMBR 短程硝化反硝化处理餐厨垃圾厌氧沼液[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7): 27-33.
- XIA Y F, WANG B J, TU L B, et al. Treatment of food waste digestate by DMBR with partial nitrification and denitrification [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 27-33.
- [29] SCAGLIONE D, TORNOTTI G, TELI A, et al. Nitrification denitrification via nitrite in a pilot-scale SBR treating the liquid fraction of co-digested piggery/poultry manure and agro-wastes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 228: 935-943. DOI: 10.1016/j. cej. 2013. 05. 075.
- [30] MAGRI A, BELINE F, DABERT P. Feasibility and interest of the anammox process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing-An overview [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 131(15): 170-184.
- [31] 王子凌. CANON 工艺处理猪场沼液的脱氮性能优化及其机理研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.
- WANG Z. Optimization of denitrification performance and mechanism of CANON process for treating digested piggery

- wastewater[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2019.
- [32] 宋国梁. SHARON-ANAMMOX 工艺处理高氨氮猪场废水厌氧消化液[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- SONG G L. Treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater contained high strength ammonia-nitrogen by SHARON-ANAMMOX process[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [33] GAO S, SU Y Y, XU J, et al. Treatment of anaerobically digested effluent from kitchen waste using combined processes of anaerobic digestion-complete nitrification-ANAMMOX based on reflux dilution[J]. Water Environment Research, 2019, 92(2): 202-210.
- [34] GAO D W, TAO Y. Versatility and application of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 91(4): 887-894.
- [35] GUILAYN F, ROUEZ M, CREST M, et al. Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: A critical review [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2020, 19(2): 419-462.
- [36] WAEGER F, DELHAYE T, FUCHS W. The use of ceramic microfiltration and ultrafiltration membranes for particle removal from anaerobic digester effluents[J]. Separation and Purification Technology, 2010, 73(2): 271-278.
- [37] 陆佳, 刘伟, 王欣, 等. 超滤膜浓缩处理沼液实验研究[J]. 应用能源技术, 2016(8): 49-53.
- LU J, LIU W, WANG X, et al. Research on biogas slurry concentration by ultrafiltration membrane [J]. Applied Energy Technology, 2016(8): 49-53.
- [38] 岳彩德, 董红敏, 张万钦, 等. 陶瓷膜净化猪场沼液的效果试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 212-218.
- YUE C D, DONG H M, ZHANG W Q, et al. Experiment on purified effect of ceramic membrane for digested slurry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 212-218.
- [39] 武林, 迟翔, 周文兵, 等. 猪场沼液的卷式反渗透膜浓缩试验研究[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 87-91, 141.
- WU L, CHI X, ZHOU W B, et al. Experiment study on piggery biogas slurry concentration process by reverse osmosis membrane [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3): 87-91, 141.
- [40] 魏欢欢. 基于反渗透法浓缩分离沼液试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- WEI H H. Research for reverse osmosis membrane concentration separation technology of biogas slurry[J]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [41] 赵少欣. 废水处理中高级氧化技术的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(8): 7-10.
- ZHAO S X. Research on the application of advanced oxidation technology in waste water treatment[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2022, 3(8): 7-10.
- [42] 郭俊灵, 李沛莲, 黄菲, 等. Fenton 法处理沼液的研究[J]. 广东化工, 2022, 49(15): 48-49, 17.
- GUO J L, LI P L, HUANG F, et al. Study on the treatment of biogas slurry by Fenton process [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(15): 48-49, 17.
- [43] 张明慧, 高大文. 臭氧组合絮凝工艺处理牛粪沼液的研究[J]. 中国沼气, 2020, 38(1): 37-44.
- ZHANG M H, GAO D W. Ozonation and flocculation combination treating biogas slurry of cow dung [J]. China Biogas, 2020, 38(1): 37-44.
- [44] 曾鑫, 呼世斌, 屈广周, 等. 臭氧氧化处理养猪场厌氧沼液[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3332-3338.
- ZENG X, HU S B, QU G Z, et al. Treatment of swine farm anaerobic biogas slurry by ozone oxidation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3332-3338.
- [45] 曹猛. 预处理-AOAO-UF-Fenton-混凝沉淀处理餐厨废水[J]. 工业水处理, 2022, 42(12): 165-169.
- CAO M. Treatment of kitchen wastewater by process of pretreatment pretreatment-AOAO-UF-Fenton [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(12): 165-169.
- [46] 宋欣欣, 闵海华, 丁西明. 预处理+两级 A/O+UF+Fenton+BAF 处理餐厨沼液[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 143-148.
- SONG X X, MIN H H, DING X M. Treatment of food waste biogas slurry by process of pretreatment, two-stage A/O, UF, Fenton advanced oxidation and BAF [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 143-148.
- [47] 杨耀达. MBR+NF+RO 用于处理厨余垃圾厌氧沼液工艺设计[J]. 广东化工, 2022, 49(24): 196-198.
- YANG Y D. The process design of treatment for waste water of biogas fermentation by MBR+NF+RO[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(24): 196-198.
- [48] 刘文蓉, 董飞, 王玉军, 等. UASB-MBR-NF-RO 处理垃圾渗滤液与餐厨垃圾厌氧消化液[J]. 水处理技术, 2021, 47(9): 77-80.
- LIU W R, DONG F, WANG Y J, et al. UASB-MBR-NF-RO for landfill leachate and kitchen waste anaerobic digestion liquid treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(9): 77-80.
- [49] 李义烁, 梁远, 颜莹莹, 等. 餐厨垃圾/市政污泥/城市粪便联合厌氧消化沼液处理设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 56-62.
- LI Y S, LIANG Y, YAN Y Y, et al. Design of treatment process of biogas slurry from anaerobic co-digestion of kitchen waste/municipal sludge/urban excrement [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 56-62.
- [50] 杨曦, 李亚峰, 陈昱奇, 等. 厌氧+A/O-MBR+NF+RO 工艺在餐厨垃圾渗沥液处理中的应用[J]. 现代化工, 2018, 38

- (5): 112–115.
- YANG X, LI Y F, CHEN Y Q, et al. Application of anaerobic+ A/O-MBR+NF+RO in treating with kitchen waste leachate[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(5): 112–115.
- [51] REHL T, MULLER J. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 56(1): 92–104.
- [52] 中华人民共和国农业农村部. 含腐植酸水溶肥料: NY 1106—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Water-soluble fertilizers containing humic-acids: NY 1106—2010[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [53] YUAN J, KENDALL A, ZHANG Y. Mass balance and life cycle assessment of biodiesel from microalgae incorporated with nutrient recycling options and technology uncertainties [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2015, 7(6): 1245–1259.
- [54] SFETAS T, PATSATZIS S, CHIOTI A, et al. A review of advances in valorization and post-treatment of anaerobic digestion liquid fraction effluent [J]. Waste Management & Research, 2022, 40(8): 1093–1109.
- [55] ZIELINSKI M, DBOWSKI M, SZWAJA S, et al. Anaerobic digestion effluents (ADEs) treatment coupling with *Chlorella* sp. microalgae production[J]. Water Environment Research, 2018, 90(2): 155–163.
- [56] UGGETTI E, SIALVE B, LATRILLE E, et al. Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture; The role of ammonium concentration on the microalgae productivity [J]. Bioresource Technology, 2014, 152(1): 437–443.
- [57] 乔佳珂, 邱洪臣, 程金凤, 等. 小球藻在沼液中的油脂累积及净化效应[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 87–91, 24.
- QIAO J K, QIU H C, CHENG J F, et al. Lipid accumulation of *Chlorella vulgaris* and pollutants removal effect in biogas slurry [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 87–91, 24.
- [58] JI F, ZHOU Y G, PANG A P, et al. Fed-batch cultivation of *Desmodesmus* sp. in anaerobic digestion wastewater for improved nutrient removal and biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2015, 184: 116–122. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.144.
- [59] WANG L, LI Y C, CHEN P, et al. Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(8): 2623–2628.
- [60] XIA A, MURPHY J D. Microalgal cultivation in treating liquid digestate from biogas systems [J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(4): 264–275.
- [61] FORTIER M O P, STURM B S M. Geographic analysis of the feasibility of collocating algal biomass production with wastewater treatment plants [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(20): 11426–34.
- [62] WANG H, ZHANG W, CHEN L, et al. The contamination and control of biological pollutants in mass cultivation of microalgae [J]. Bioresource Technology, 2013, 128: 745–750. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.158.
- [63] PARK J, CRAGGS R J, SHILTON A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 35–42.
- [64] SHU L, SCHNEIDER P, JEGATHEESAN V, et al. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(17): 2211–2216.
- [65] 杨德坤, 颜成, 邬振江, 等. 鸟粪石结晶法去除餐厨沼液中氨氮的研究[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(2): 300–307.
- YANG D K, YAN C, WU Z J, et al. Removal of ammonia nitrogen in anaerobically digested food-waste slurry by struvite crystallization approach [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(2): 300–307.
- [66] 黄彬, 郭惠娟, 毛林强, 等. 磷酸铵镁(MAP)结晶法回收粪污/秸秆混合发酵沼液中氮磷的特性研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 72–77.
- HUANG B, GUO H J, MAO L Q, et al. Recovery of nitrogen and phosphorus from biogas slurry of pig manure-straw mixed fermentation[J]. China Biogas, 2018, 36(3): 72–77.
- [67] 林亲铁, 刘国光, 尹光彩, 等. 磷酸铵镁法回收污泥浓缩液中氮磷的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2029–2032.
- LIN Q T, LIU G G, YIN G C, et al. Nitrogen and phosphorus recovery via magnesium ammonium phosphate sedimentation from sludge concentrated liquor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(9): 2029–2032.
- [68] ZHANG H, GONG W, LUO X, et al. Obtaining high-purity struvite from anaerobically digested wastewater: Effects of pH, Mg/P, and Ca²⁺ interactions [J]. Environmental Engineering Science, 2019, 36(1): 102–113.
- [69] 沈颖, 叶志隆, 叶欣, 等. 鸟粪石法回收养猪废水中氮磷时产物的组分与性质研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 92–97.
- SHEN Y, YE Z L, YE X, et al. Components and particle properties of products recovered from swine wastewater by struvite recovery[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 92–97.
- [70] 刘小雨, 蔡超, 祝凡平, 等. 鸟粪石结晶法回收沼液中氨氮[J]. 山东化工, 2018, 47(14): 199–202, 206.
- LIU X Y, CAI C, ZHU F P, et al. Recovery of ammonia from biogas slurry by the crystallization of struvite [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(14): 199–202, 206.
- [71] GONG W J, LI Y, LUO L N, et al. Application of struvite-MAP crystallization reactor for treating cattle manure anaerobic digested

- slurry: Nitrogen and phosphorus recovery and crystal fertilizer efficiency in plant trials [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2018, 15(7). DOI: 10.3390/ijerph15071397.
- [72] 郝凌云, 周荣敏, 周芳, 等. 磷酸铵镁沉淀法回收污水中磷的反应条件优化[J]. *工业用水与废水*, 2008, 39(1): 58-61.
- HAO L Y, ZHOU R M, ZHOU F, et al. A reaction condition optimization for phosphorus removal from wastewater by magnesium ammonium phosphate sedimentation [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2008, 39(1): 58-61.
- [73] 韩秀茹, 邹华, 朱荣, 等. 鸟粪石结晶法去除某粮食发酵废水中磷的研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(4): 1436-1441.
- HAN X R, ZOU H, ZHU R, et al. On the phosphorus removal from a food fermentation sewage by struvite crystallization [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4): 1436-1441.
- [74] TEMIZEL-SEKERYAN S, WU F, HICKS A L. Life cycle assessment of struvite precipitation from anaerobically digested dairy manure: A wisconsin perspective [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2020, 17(1): 292-304.
- [75] YE Z L, CHEN S H, LU M, et al. Recovering phosphorus as struvite from the digested swine wastewater with bittern as a magnesium source[J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(2): 334-340.
- [76] JIANG A, ZHANG T, ZHAO Q B, et al. Evaluation of an integrated ammonia stripping, recovery, and biogas scrubbing system for use with anaerobically digested dairy manure [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 119: 117-126. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2013.10.008.
- [77] VANECKHAUTE C, GHEKIERE G, MICHELS E, et al. Assessing nutrient use efficiency and environmental pressure of macro-nutrients in bio-based mineral fertilizers: A review of recent advances and best practices at field scale[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 128: 137-180. DOI: 10.1016/B978-0-12-802139-2.00004-4.
- [78] GUŠTIN S, MARINSEK-LOGAR R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent[J]. *Process Safety & Environmental Protection*, 2011, 89(1): 61-66.
- [79] ALHELAL I I, LOETSCHER L H, SHARVELLE S, et al. Nitrogen recovery from anaerobic digestate via ammonia stripping and absorbing with a nitrified solution [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107826. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107826.
- [80] FOLINO A, ZEMA D A, CALABRO P S. Environmental and economic sustainability of swine wastewater treatments using ammonia stripping and anaerobic digestion: A short review[J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 4971. DOI: 10.3390/su12124971.
- [81] HIDALGO D, CORONA F, MARTIN-MARROQUIN J M, et al. Resource recovery from anaerobic digestate: Struvite crystallisation versus ammonia stripping [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(6): 2626-2632.
- [82] ZHAO Q B, MA J, ZEB I, et al. Ammonia recovery from anaerobic digester effluent through direct aeration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 279: 31-37. DOI: 10.1016/j.cej.2015.04.113.
- [83] PROVOLO G, PERAZZOLO F, MATTACHINI G, et al. Nitrogen removal from digested slurries using a simplified ammonia stripping technique [J]. *Waste Management*, 2017, 69: 154-161. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.047.
- [84] LEI X, SUGIURA N, FENG C, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145(3): 391-397.
- [85] ZOU M Y, DONG H M, ZHU Z P, et al. Optimization of ammonia stripping of piggery biogas slurry by response surface methodology [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3819. DOI: 10.3390/ijerph16203819.
- [86] BALDI M, COLLIVIGNARELLI M, ABBA A, et al. The valorization of ammonia in manure digestate by means of alternative stripping reactors[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3073. DOI: 10.3390/su10093073.
- [87] TAO W, UKWUANI A T, AGYEMAN F. Recovery of ammonia in anaerobic digestate using vacuum thermal stripping-acid absorption process: Scale-up considerations[J]. *Water Science & Technology*, 2018, 78(4): 878-885.
- [88] REZA A, CHEN L D. Optimization and modeling of ammonia nitrogen removal from anaerobically digested liquid dairy manure using vacuum thermal stripping process[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158321.
- [89] MELGACO L, MEERS E, MOTA C R. Ammonia recovery from food waste digestate using solar heat-assisted stripping-absorption [J]. *Waste Management*, 2020, 113: 244-250. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.047.