

秦天, 袁哲. 亚硫酸盐预处理强化高含固污泥的自热式高温好氧消化处理工艺[J]. 净水技术, 2023, 42(10):105-110.

QIN T, YUAN Z. ATAD enhanced process of sulfite pretreatment for high solid sludge disposal[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10):105-110.

亚硫酸盐预处理强化高含固污泥的自热式高温好氧消化处理工艺

秦 天^{1,2,*}, 袁 哲³

(1. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北武汉 430062; 2. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉 430070; 3. 武汉三镇实业控股股份有限公司, 湖北武汉 430062)

摘 要 城市污泥成分复杂多变, 除含有大量有机质外, 还可能浓缩重金属、微量有机污染物以及少量病原生物等有毒有害物质。自热式高温好氧消化(ATAD)是一种快速稳定污泥的生物处理技术。为提高消化效率, 缩短稳定时间, 高固体污泥在ATAD前采用亚硫酸盐预处理。在亚硫酸盐(以S计)投加质量浓度为500 mg/L试验条件下, ATAD反应在第9 d挥发性固体的去除率达到40.9%, 实现污泥稳定化, 比未经预处理的污泥ATAD稳定化时间缩减了12 d。预处理后胞内有机物释放和水解增强, R4组蛋白质和多糖释放提升14.2倍和8.3倍。预处理组 and 对照组之间微生物组成的显著差异说明了亚硫酸盐预处理能帮助污泥的加速稳定。研究结果可作为实现高固体污泥的快速稳定提供了一种有效而实用的策略。

关键词 高固体污泥 自热式高温好氧消化(ATAD) 亚硫酸盐预处理 污泥处置 污泥稳定

中图分类号: TQ09 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)10-0105-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.013

ATAD Enhanced Process of Sulfite Pretreatment for High Solid Sludge Disposal

QIN Tian^{1,2,*}, YUAN Zhe³

(1. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430062, China;

2. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China;

3. Wuhan Sanzhen Industrial Holding Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract The composition of municipal sludge is complex and changeable. Besides containing a large amount of organic matter, it may also concentrate heavy metals, trace organic pollutants and a small amount of pathogenic organisms and other toxic and harmful substances. Self-heating high temperature aerobic digestion (ATAD) is a rapid and stable biological treatment of sludge. In order to improve the digestion efficiency and shorten the stabilization time, the high solid sludge was pretreated with sulfite before ATAD. The results showed that sulfite pretreatment could accelerate the stabilization of high solid phase sludge (the stabilization time of ATAD was reduced by 12 d compared with untreated sludge), and the removal rate of volatile solid was 40.9% after 9 days of ATAD treatment at 500 mg/L sulfite (measured in S). The pretreatment was 12 d earlier than the untreated sludge. Intracellular organic matter release and hydrolysis were enhanced, protein and polysaccharide release were increased by 14.2 times and 8.3 times. The significant difference of microbial composition between the pretreatment group and the control group indicated the accelerated stabilization of the sludge under thermal hydrolysis. This work provides an effective and practical strategy for realizing rapid stabilization of high solid sludge.

Keywords high solid sludge self-heating high temperature aerobic digestion (ATAD) sulfite pretreatment sludge disposal sludge stabilization

污泥是废水生物处理过程中不可避免的副产

物, 随着废水排放量的增加, 污泥的产量逐渐增加^[1]。污泥中有机物含量丰富, 易腐烂发臭, 并含有大量致病菌和寄生虫卵, 对人体健康和自然环境产生不利影响^[2]。截至2020年, 我国建成城镇污水处理厂1万多座, 污泥产量突破6 000万t^[3]。稳定化被认为是污泥生物处理的重要步骤, 对环境安全

[收稿日期] 2023-02-17

[基金项目] 长江水利委员会长江科学院开放研究基金项目(CKWV2018490/KY)

[通信作者] 秦天(1980—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水质技术及环保相关工作, E-mail: xuwangwust@163.com。

至关重要^[4]。目前,我国大多污水处理厂主要采取填埋和焚烧两种污泥处置方式。这两种处置方式会造成环境的二次污染,处理过程缓慢且处理成本高。因此,发展一种稳定、节能和绿色的污泥处置方式迫在眉睫。

自热式高温好氧消化(ATAD)作为一种先进的好氧稳定工艺,已成功应用于污泥处理,特别是在中小城市和地区^[5]。快速的有机降解率、短的污泥保留时间(SRT)、高效的病原体灭活和低能耗阐明了ATAD的关键优势。ATAD通常应用于总固体(TS)质量分数为4%~6%的低固体污泥处置,很少用于处理TS质量分数高于6%的污泥。高固体污泥因其固体含量增加,其表观黏度随之增加,其流动变化规律发生变化,限制了混合和氧气转移^[6]。但高固体污泥意味着体积和含水量显著降低,有助于提高有机负荷率(OLR),同时减小消化器尺寸和降低能源消耗^[7]。基于当前污泥处理现状,快速稳定高固相污泥具有重要的应用价值和意义。然而,与低固体污泥相比,高固体污泥传质效果差、水解效率低,阻碍了ATAD的应用和发展。

为了提高效率,加速污泥稳定,需要采用预处理技术,如机械、超声、碱和热^[8],来加速污泥降解。在各种预处理中,亚硫酸盐预处理崭露头角,在提高污泥的溶解和生物降解性方面发挥了重要作用。文献研究^[9]表明,对高固体污泥进行亚硫酸盐预处理厌氧消化,改善了有机物降解,缩短了稳定时间。例如亚硫酸盐预处理后,污泥裂解程度提高39%,底物释放增加87%,沼气产量提升25%。然而,与ATAD相比,厌氧消化通常表现出较慢的消化速度和挥发性固体(VS)去除率以及较长的SRT,且厌氧消化过程中挥发性脂肪酸(VFA)和氨的积累不利于有机物降解和污泥稳定^[10]。因此,ATAD在实现亚硫酸盐预处理高固体污泥的快速稳定方面更有前景。本研究主要探究亚硫酸盐预处理对ATAD过程中高固体污泥稳定性的影响,揭示亚硫酸盐预处理后高固体污泥ATAD过程中微生物群落的演化,为我国污泥处置工艺发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验所用的污泥取自湖北武汉某污水处理厂二沉池。新鲜污泥通过40目筛去除大颗粒,然后离

心并储存在4℃冰箱中。通过离心将原污泥的TS质量分数调整为10.1%,以满足高固相污泥(TS质量分数>10%)的要求,作为初始污泥^[11]。种子污泥取自好氧池的好氧污泥,而初始污泥是二沉池取得的废活性污泥,初始污泥是污泥消化的主体,种子污泥用以在ATAD反应器提供好氧微生物。污泥的基本性质如表1所示。

表1 污泥样品性质

Tab. 1 Properties of Sludge Samples

污泥种类	TS/ (g·L ⁻¹)	VS/ (g·L ⁻¹)	SCOD _{Cr} / (g·L ⁻¹)	pH 值
初始污泥	101.1±0.8	65.5±0.2	108±9	6.54
种子污泥	104.2±1.2	67.4±0.4	19 783±707	6.87
预处理污泥	96.4±0.6	59.4±0.4	50 829±1 207	5.85

1.2 试验方法

1.2.1 亚硫酸盐预处理

采用亚硫酸盐对初始污泥进行预处理,根据含亚硫酸盐工业废水的典型特征,选取亚硫酸盐质量浓度(以S计)为100、300、500 mg/L,对污泥进行预处理试验(表2)。将400 mL初始污泥加入到烧杯中,加入对应亚硫酸盐。使用0.1 mol/L HCl和NaOH溶液调节pH值至6.0±0.1,放置于120 r/min的摇床中处理24 h。试验以未添加亚硫酸盐作为对照。

表2 预处理试验控制条件

Tab. 2 Control Conditions of Pretreatment Experiment

试验组	亚硫酸盐质量浓度 (以S计)/(mg·L ⁻¹)	pH 值	温度	转速/ (r·min ⁻¹)
R1	0	6.0±0.1	室温	120
R2	100	6.0±0.1	室温	120
R3	300	6.0±0.1	室温	120
R4	500	6.0±0.1	室温	120

1.2.2 污泥接种和ATAD反应器

种子污泥是经过长期驯化(4个月以上)后,从实验室稳定运行的反应器中获得的高固体含量污泥。对于每个反应器,将0.1 L种子污泥与1.0 L预处理污泥混合。预处理后污泥pH值由6.54降至5.85。为了减少低pH对接种微生物的不利影响,在接种前加入NaOH(3 mol/L),将污泥的pH值调至6.85。

反应器主要由玻璃槽、加热、曝气和搅拌设备组成,用于模拟ATAD工艺。启动前加入接种后的混

合污泥 1.0 L。对照组 (R1) 和预处理组 (R2、R3、R4) 的操作参数保持一致,温度、搅拌速率和曝气速率控制在 55 ℃、60 r/min 和 1.8 L/min。整个 ATAD 过程持续 21 d,直到污泥稳定。

1.3 测试方法

COD_{Cr}、TS、VS 等按照《水和废水监测分析方法》中的步骤测定。测定毛细抽吸时间 (CST) 以评价污泥脱水性能,使用 CST 测试设备 (Model 304 M CST, Triton, UK) 测定。蛋白质和多糖分别使用二喹啉甲酸 (BCA) 法和苯酚-硫酸法测定。大肠杆菌使用大肠杆菌/大肠菌群显色培养基 (Hopebio, 中国),在 37 ℃ 下孵育 24 h,蓝紫色菌落计为大肠杆菌。微生物高通量测序选取反应结束当天的样品,并送样至上海美吉生物公司进行,使用引物 338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R (GGACTA CHVGGGTWTCTCATAT) 对 16S rRNA 基因 V3~V5 扩增。

2 试验结果讨论

2.1 高固相污泥在 ATAD 过程中的稳定性能

还原和稳定被认为是污泥处理的关键目标,而 VS 去除率可反映消化系统的污泥减量效果,通常污泥消化工艺稳定运行时 VS 的去除率为 40.0%~70.0%。如图 1 所示,VS 去除效率在 ATAD 过程中呈逐渐增加的趋势。VS 在运行初期的去除率较低,尤其是 R1,因为接种污泥需要适应新的消化系统。而 R2、R3 和 R4 中,VS 去除率在 3 d 后达到了 12.8%、17.5% 和 22.8%,这取决于预处理阶段大量有机物的释放和消化阶段混合的改善。随着消化过程的进行,污泥黏度和 TS 含量逐渐降低,流动性和气液固传质逐渐改善,有利于污泥的稳定。R1、R2、

R3 和 R4 的 VS 去除率在反应结束前均达到了 40.0% 以上,R1、R2、R3 分别在 21、21、13 d 达到,尤其是 R4,在运行 9 d 后达到 40.9%,标志着实现了污泥稳定。在 ATAD 处理前应用亚硫酸盐预处理,加快了污泥的稳定化和无害化处理,以应对当前严峻的污泥处理形势。污泥的快速稳定和无害化处理有利于环境保护和人体健康^[12]。通过对 ATAD 过程的深入研究和广泛应用,有助于构建可持续发展的社会。因此,亚硫酸盐预处理是高固体污泥 ATAD 过程中实现污泥快速稳定的有效而实用的策略。

2.2 ATAD 过程中污泥理化性质

2.2.1 SCOD_{Cr} 的变化

有机质降解情况可以直接反映 ATAD 系统的整体性能和运行稳定性。深入了解预处理和有机质降解之间的相互作用对于稳定运行是必要的。ATAD 过程中 SCOD_{Cr} 的变化如图 2 所示。最初由于预处理,R2、R3、R4 的 SCOD_{Cr} 浓度处于较高的水平,在亚硫酸盐的作用下细胞裂解,大量有机物释放到上清液中,SCOD_{Cr} 浓度显著增加,相对于对照组 R1,R4 提升约 12.5 倍。而由于有机质耗竭,尤其是在 R4 中,SCOD_{Cr} 浓度显著降低,这也反映了 VS 去除率的快速增加。R1 的 SCOD_{Cr} 质量浓度在 0~6 d 从 3 028 mg/L 显著升高至 36 892 mg/L,表明细胞破裂,细胞内有机物释放。然而,与高效的预处理相比,这个过程是缓慢的。考虑到污泥的黏度和混合度,高固体污泥的增溶和水解更加困难。随后,R1 的 SCOD_{Cr} 浓度逐渐降低,但直到消化结束仍高于其他反应器。对于 R1 来说,增溶和水解速率成为限制污泥稳定和消化性能的重要因素。此外,相同条件下 R1 的有机降解缓慢也与较差的混合和传质

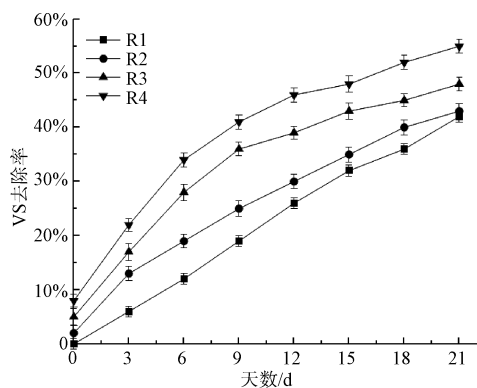


图 1 VS 去除率的变化

Fig. 1 Changes of VS Removal Rate

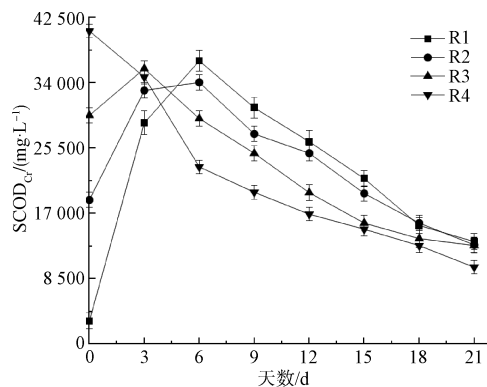


图 2 SCOD_{Cr} 浓度变化

Fig. 2 Changes of SCOD_{Cr} Concentration

有关,特别是在运行之初,其污泥胞外聚合物的阻碍导致传质和混合慢。

R1、R2、R3 的 $SCOD_{Cr}$ 都经历了先升后降的趋势,与 R4 的趋势不同。可能是因为 R4 中亚硫酸盐浓度高,使其中的污泥水解程度高,开始反应后有机物消耗速率大于生产速率,所以 $SCOD_{Cr}$ 呈下降趋势。而其他几组中,污泥的水解程度没有 R4 高,反应开始后,有机物产生速率还是高于消耗速率,所以 $SCOD_{Cr}$ 有升高的趋势。

2.2.2 蛋白质和多糖变化

蛋白质和多糖是污泥的两种主要有机组分,对污泥的性质和结构有很大影响。污泥增溶能促进溶解性蛋白和溶解性多糖的释放,通过分析溶解性蛋白质和溶解性多糖的浓度,可以进一步明确亚硫酸

盐预处理在污泥增溶中的作用。如表 3 和表 4 所示,在 R1 中,未加入亚硫酸盐预处理,仅依靠生物水解酶进行水解,水解速率缓慢,所以在 ATAD 过程中仍在进行水解,最终导致蛋白质及多糖的降解率为负值;预处理后加速了水解过程,污泥快速解体,使反应器中溶解性蛋白、溶解性多糖质量浓度分别由 65、309 mg/L 最高提高到 987、2 865 mg/L。显然,亚硫酸盐的应用增强了溶解性蛋白和溶解性多糖的释放,R4 中蛋白质和多糖分别增加约 14.2 和 8.3 倍,促进了有机物的释放和水解,从而提高了后续 ATAD 过程中的消化效率。消化结束后,预处理后的反应器,尤其是 R4 中的溶解性蛋白和溶解性多糖快速减少,蛋白质、多糖降解率最高分别为 60.7%、61.7%,这证明了有机物的高效降解。

表 3 预处理后污泥中蛋白质变化

Tab. 3 Changes of Protein in Sludge after Pretreatment

反应器	预处理前/($mg \cdot L^{-1}$)	预处理后/($mg \cdot L^{-1}$)	ATAD 结束后/($mg \cdot L^{-1}$)	蛋白质降解率
R1	65	70	136	-94.3%
R2	65	246	138	43.9%
R3	65	567	278	51.0%
R4	65	987	387	60.8%

表 4 预处理后污泥中多糖变化

Tab. 4 Changes of Polysaccharides in Sludge after Pretreatment

反应器	预处理前/($mg \cdot L^{-1}$)	预处理后/($mg \cdot L^{-1}$)	ATAD 结束后/($mg \cdot L^{-1}$)	多糖降解率
R1	309	318	1 870	-488.1%
R2	309	1 245	1 457	-17.0%
R3	309	2 098	1 367	34.8%
R4	309	2 865	1 098	61.7%

2.2.3 pH 和 ORP 的变化

通过跟踪 pH 和 ORP 的波动来监测 ATAD 系统

的运行性能和稳定性(图 3)。pH 在反应初期都呈上升的趋势,随着消化过程的继续,R2、R3 和 R4 在

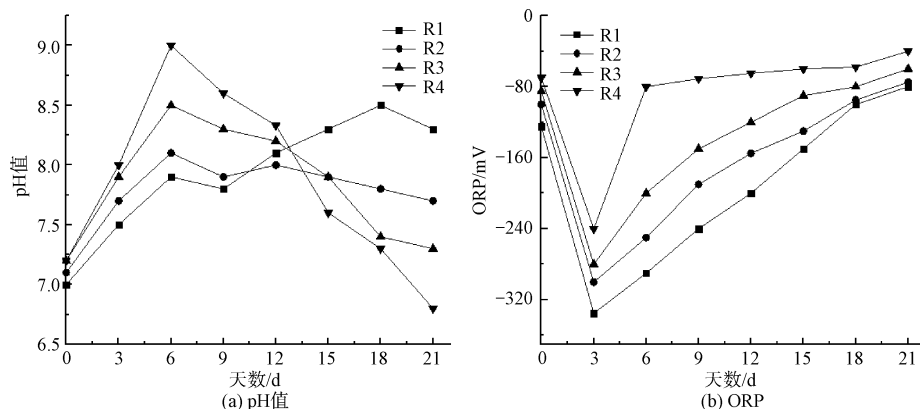


图 3 pH 值和 ORP 的变化

Fig. 3 Changes of pH Value and ORP

连续曝气剥离条件下, pH 逐渐降低。而 R1 整体呈上升趋势, 在 18 d 后 pH 值达到 8.5, 随后, R1 的 pH 略有下降, 直至消化结束。与 R2 相比, R1 的 pH 上升速度较慢, 原因可能是增溶和有机质降解速度较慢。事实上, 污泥的 pH 受多种因素的影响, 包括 VFA、氮化合物、消化温度和有机物水解^[6]。

R1、R2、R3、R4 的 ORP 在消化 3 d 后分别下降到 -335、-300、-280、-240 mV。ORP 明显下降是由于快速生长的嗜热微生物对溶解氧的需求较高^[13]。在高温和高固相浓度下氧溶解度的降低也会对 ATAD 过程中的溶解氧产生负面影响。随后, ORP 随着传质和有机质消耗的改善而逐渐增大。在 ATAD 过程中, ORP 的增加意味着溶解氧的增加, 这有利于微生物的增殖和有机质的降解。即便如此, 在随后的消化阶段仍然观察到显著的差异。R1 的 ORP 在 ATAD 结束时增加到 -80 mV, 其他 3 组分别增加到 -75、-60 mV 和 -40 mV。较高的 ORP 反映了有机质的快速降解和较高的溶解氧。嗜热好氧菌消化后期需氧量下降, ORP 逐渐升高。连续曝气条件下消化结束时 ORP 小于 0, 说明微生物耗氧量高于供氧量。

2.3 大肠杆菌的变化

污泥中含有丰富的微生物, 若处理不当, 对环境和人类都会造成伤害。表 5 中阐述了 ATAD 前后大肠杆菌的变化情况。在 ATAD 前, 大肠杆菌数量为 $(8.84 \pm 5.89) \text{ CFU}/(\text{g TS})$, 而经过 ATAD 后, 反应器中的大肠杆菌数量分别下降了约 33.9% (R1)、43.0% (R2)、48.2% (R3) 和 63.3% (R4)。与 R1 相比, R4 中大肠杆菌数量显著下降, 说明亚硫酸盐预处理能提高 ATAD 中致病菌的灭活。

表 5 大肠杆菌变化
Tab. 5 Changes of *E. coli*

反应器	初始/ [CFU·(g TS) ⁻¹]	ATAD 结束后/ [CFU·(g TS) ⁻¹]
R1	8.84±5.89lg	5.84±1.89lg
R2	8.84±5.89lg	5.04±1.24lg
R3	8.84±5.89lg	4.58±0.87lg
R4	8.84±5.89lg	3.24±0.77lg

2.4 微生物群落结构分析

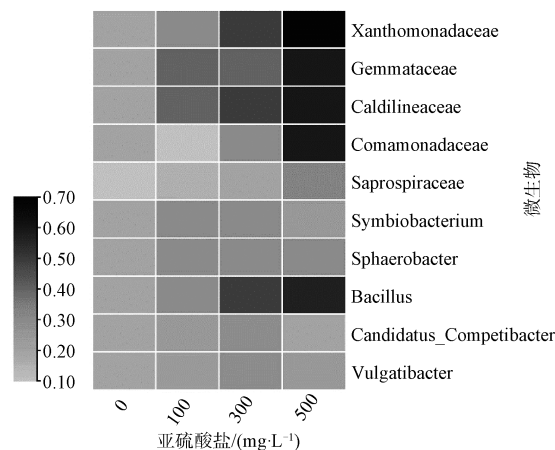
利用 Alpha 多样性对细菌微生物群落的丰度和多样性进行鉴定, 其中 Chao1 代表了群落丰富度, Shannon 和 Simpson 指数代表了群落多样性。如表

6 所示, R1、R2、R3 和 R4 样品的可操作分类单元 (operational taxonomic units, OTUs) 数量分别为 133、163、165 和 187。值得注意的是, 与 R1 相比, 其他反应器中污泥的微生物群落多样性均显著降低。微生物的减少表明 ATAD 对微生物具有强大的筛选作用, 而 R2、R3 和 R4 由于预处理作用而得到强化。虽然从 Shannon 指数来看, R4 的物种丰富度略高于 R1, 但存在明显差异。

表 6 微生物群落的丰度和多样性
Tab. 6 Abundance and Diversity of Microbial Communities

反应器	Chao 1	OTU	Shannon	Simpson
R1	154.244 3	133	0.264 45	1.976 55
R2	207.123 4	163	0.235 56	2.123 56
R3	219.648 3	165	0.213 45	2.213 45
R4	287.083 6	187	0.207 64	2.344 57

批次试验结束之后, 污泥中占比最高的前 10 种功能性微生物群落分布如图 4 所示, 分别是黄单胞菌科 (Xanthomonadaceae)、出芽菌科 (Gemmataceae)、暖绳菌科 (Caldilineaceae)、丛毛单胞菌科 (Comamonadaceae) 和腐败螺旋菌科 (Saprospiraceae) 等。



注: 对相对丰度进行归一化处理作图。

图 4 功能性微生物群落分布热图

Fig. 4 Heat Map of Functional Microbial Community Distribution

黄单胞菌科含量最高。黄单胞菌科是所有消化反应共有的优势科, 与污泥的降解程度有关^[14]。它们的相对丰度由 R1 的 2.1% 增加到 R4 的 6.3%。其次是出芽菌科和暖绳菌科。在有氧条件下, 它们具有降解有机化合物的能力^[15], 其丰度从 1.9% (R1) 增加到 5.6% (R4)。腐败螺旋菌科具有降解

复杂有机物的能力^[16]。

3 结论

(1)亚硫酸盐预处理可加速高含固污泥的稳定化,添加 500 mg/L 亚硫酸盐(以 S 计)在 ATAD 反应第 9 d 时 VS 去除率达到 40.9%,比未经任何预处理的污泥 ATAD 稳定化反应时间大大缩减,有助于后续工艺应用减少停留时间、减小反应器容积。

(2)亚硫酸盐预处理显著提高了污泥的增溶程度,在 R4 中,相对于对照组,SCOD_{Cr} 提升约 12.5 倍,蛋白质和多糖分别增加约 14.2 倍和 8.3 倍,促进了有机物的释放和水解,从而提高了后续 ATAD 过程中的消化效率。且由于污泥中的有机物得到了有效降解,易于后续处理与处置。

(3)亚硫酸盐预处理后,ATAD 中 SCOD_{Cr} 的降解速率显著增加,有助于减少处理时间,降低运行成本。

(4)通过高通量测序分析,发现亚硫酸盐预处理有利于好氧消化相关的功能性微生物的富集,其中黄单孢菌科和出芽菌科为优势菌种,该发现能为后续工艺投入实际工程时提供理论指导。

参考文献

- [1] VAHID T, MATTHIAS B, TINA U, et al. Effect of temperature on biogas yield increase and formation of refractory COD during thermal hydrolysis of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2020, 171: 115383. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115383.
- [2] CAO B D, ZHANG T, ZHANG W J, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review [J]. *Water Research*, 2021, 189: 116650. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116650.
- [3] 李玉双, 杨嘉鑫, 魏建兵, 等. 城市污泥资源化利用技术研究进展 [J]. *工业水处理*, 2022, 42(12): 41-46.
LI Y S, YANG J X, WEI J B, et al. Research progress of municipal sludge resource utilization technology [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(12): 41-46.
- [4] ZENG Q, ZAN F Z, HAO T W, et al. Electrochemical pretreatment for stabilization of waste activated sludge: Simultaneously enhancing dewaterability, inactivating pathogens and mitigating hydrogen sulfide [J]. *Water Research*, 2019, 166: 115035. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115035.
- [5] MARTÍN M A, GUTIÉRREZ M C, DIOS M, et al. Application of ATAD technology for digesting sewage sludge in small towns: Operation and costs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 215: 185-194. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.062.
- [6] ZHANG M, TASHIRO Y, ISHIDA N, et al. Application of autothermal thermophilic aerobic digestion as a sustainable recycling process of organic liquid waste: Recent advances and prospects [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154187.
- [7] WANG T, ZHANG D, DAI L L, et al. Magnetite triggering enhanced direct interspecies electron transfer: A scavenger for the blockage of electron transfer in anaerobic digestion of high-solids sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(12). DOI: 10.1021/acs.est.8b00891.
- [8] NGUYEN V K, CHAUDHARY D K, DAHAL R H, et al. Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Fuel*, 2021, 285: 119105. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119105.
- [9] ZAN F X, ZENG Q, HAO T W, et al. Achieving methane production enhancement from waste activated sludge with sulfite pretreatment: Feasibility, kinetics and mechanism study [J]. *Water Research*, 2019, 158: 438-448. DOI: 10.1016/j.watres.2019.04.048.
- [10] FRANCESCO D C, DANILO S, ANDREA G, et al. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Challenges and opportunities [J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115608. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115608.
- [11] WU L L, LI X X, LIU Y X, et al. Optimization of hydrothermal pretreatment conditions for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of high-solid sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 321: 124454. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124454.
- [12] JIN N B, JIN B, ZHU N W, et al. Disinhibition of excessive volatile fatty acids to improve the efficiency of autothermal thermophilic aerobic sludge digestion by chemical approach [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 120-127. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.073.
- [13] CHENG J H, KONG F, ZHU J, et al. Characteristics of oxidation-reduction potential, VFAs, SCOD, N, and P in an ATAD system under different thermophilic temperatures [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2015, 175: 166-181. DOI: 10.1007/s12010-014-1241-3.
- [14] WEI W, CHEN X M, LIU Y W, et al. Aerobic sludge digestion is distinguishingly affected by the different entering pathways of zinc oxide nanoparticles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125799. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.125799.
- [15] INCI K, STANLEY B S, ENDER C, et al. Resource recovery from an aerobic granular sludge process treating domestic wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 34: 101148. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101148.
- [16] 刘树根, 朱南文, 楼紫阳, 等. 污泥高温好氧消化过程的生物多样性分析 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 990-995.
LIU S G, ZHU N W, LOU Z Y, et al. Analysis of microbial diversity in thermophilic aerobic digestion of sewage sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 990-995.