



低温-次氯酸钠对污泥减量化及可生化性研究

刘壮壮¹, 唐玉朝¹, 伍昌年¹, 薛莉婷¹, 陈 园¹, 蔡丽丽¹, 刘 俊²

(1. 安徽建筑大学水污染控制与废水资源化安徽省重点实验室, 安徽合肥 230601;

2. 安徽中环环保科技股份有限公司, 安徽合肥 230051)

[摘要] 以市政污泥为研究对象, 探究了低温耦合次氯酸钠对污泥的破解效果, 以及后续减量化及可生化性的影响。在反应温度为 80 ℃、NaClO 投加量为 166.7 mg/g、反应时间为 60 min 的实验条件下, 破解液中 SCOD 可以达到 13 210 mg/L, COD 破解率达到 42.54%。破解液中的多糖及蛋白质质量浓度可达到 587.3、376.8 mg/L, 说明该方法可有效破解污泥, 药剂投加成本仅为 0.029 元/g。污泥 SS 去除率达到 30.71%, 可有效减少污泥预处理成本, 实现污泥减量化, 并缩减污泥后续处置成本。经加热处理后液相中的余氯在 1.0 h 内可降至 0.37 mg/L, 破解液的碳氮比由 10.04 提高到 28.97, 但 BOD₅/SCOD 仅为 0.282。结合反应过程中 TCOD 和蛋白质的变化, 以及三维荧光光谱表征, 推测可能是 ClO⁻ 与部分易降解有机物发生矿化反应, 导致破解液的可生化性有所降低。研究结果表明该方法对污泥减量化效果显著, 药剂投加成本低, 可生化性可接受, 可为污泥的减量化及资源化利用提供一定参考。

[关键词] 剩余污泥; 污泥减量; 可生化性; 低温; 次氯酸钠

[中图分类号] X52 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0105-08

Study of low temperature-sodium hypochlorite on sludge reduction and biodegradability

LIU Zhuangzhuang¹, TANG Yuchao¹, WU Changnian¹, XUE Liping¹, CHEN Yuan¹, CAI Lili¹, LIU Jun²
(1. Anhui Key Laboratory of Water Pollution Control and Wastewater Recycling, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Zhonghuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: Using municipal sludge as the research object, the effect of low temperature coupled sodium hypochlorite on sludge cracking and the impact on reduction and biodegradability were investigated. Under the experimental conditions of reaction temperature of 80 ℃, NaClO dosage of 166.7 mg/g and reaction time of 60 min, SCOD in the cracking solution could reach 13 210 mg/L, and the COD cracking rate reached 42.54%. The mass concentrations of polysaccharide and protein in the cracking solution could reach 587.3 mg/L and 376.8 mg/L, indicating that the method could effectively crack the sludge, and the cost of reagent was only 0.029 Yuan/g. The SS removal rate of sludge reached 30.71%, which can effectively reduce the cost of sludge pretreatment, realize sludge reduction, and reduce the cost of sludge disposal. The residual chlorine in the liquid decreased to 0.37 mg/L in 1.0 h after heating treatment, and the carbon to nitrogen ratio of cracked solution increased from 10.04 to 28.97, but the BOD₅/SCOD was only 0.282. Combined with the changes of TCOD and protein during the reaction, and the three-dimensional fluorescence spectroscopy characterization, it was speculated that the mineralization reaction of ClO⁻ with some easily degradable organic matter might have led to the reduction of biodegradability of cracked solution. The results showed that the method is effective for sludge reduction, with low cost of reagent and acceptable biodegradability, which can provide some reference for sludge reduction and resource utilization.

Key words: excess sludge; sludge reduction; biodegradability; low temperature; sodium hypochlorite

[基金项目] 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2019ZD54); 国家自然科学基金项目(51978003)

生物处理是世界范围内污水处理厂最常用的技术^[1]。而污泥(主要由过量的生物污泥组成)是废水生物处理不可避免的副产品^[2]。污泥是多种物质的复杂集合体,有研究表明,其中大量微生物的胞内物质是反硝化细菌的合适底物^[3],含有高可溶性有机物、高碳氮比的优质可生物降解物^[4],具有优异的潜在利用价值。利用低能耗的污泥破解技术,实现污泥减量化及资源化利用,具有重要意义。

NaClO是一种高效且价格低廉的氧化剂及消毒剂^[5],国内外学者对其在污水处理中的应用有较多研究。已有研究表明,当次氯酸盐用于污泥破解时,ClO⁻可与细菌细胞壁内N-端氨基发生氧化反应破坏细胞结构,促使胞内物质流出^[6]。C. L. HAWKINS等^[7]研究发现次氯酸可与许多生物靶标发生反应,如蛋白质、DNA、脂质和胆固醇等,对病原微生物、污泥中丝状菌、大肠杆菌及各种细菌有优异的消毒杀菌性能^[8]。在破解方面,H. WEI等^[6]研究发现,单一使用NaClO作为调理剂可以有效破解胞外聚合物(EPS);郭绍东等^[9]采用NaClO结合亚铁破解,发现污泥中紧密结合性胞外聚合物(TB-EPS)和松散附着胞外聚合物(LB-EPS)可转化成溶解性胞外聚合物(S-EPS),明显改善污泥的可生化性能。但大多数研究者仅讨论了次氯酸在破解性方面的影响,忽略了破解液中余氯含量对污水生物处理系统的负面影响。孙健等^[10]研究发现液相中余氯>1.0 mg/L时开始对生物污水处理工艺出现冲击破坏。此前的研究发现,液相中NaClO在加热状态下分解速率明显加快,且对有机氧化的活性显著提高^[11];席兆胜等^[12]研究发现加热状态对水中余氯有显著去除效果。

基于此,笔者研究了低温联合NaClO在污泥原有pH下调理污泥,分析破解液中有机物质的释放和迁移转化、污泥破解情况,水浴温度对液相中余氯含量的影响,以及破解液中碳氮比和B/C的变化,探究低温联合NaClO对污泥减量及可生化性的影响,以期污泥的减量化及资源化利用提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 污泥理化特性

污泥取自合肥市某污水处理厂(卡鲁塞尔氧化沟工艺)回流污泥,原始污泥含水率在98.8%~99.5%,先经48 μm(200目)筛网滤掉大颗粒杂质,然后经5.1 μm(3 000目)筛网滤水后使污泥含水率在

(93.8±0.35)%作为实验污泥,置于4℃冰柜中保存,3 d内使用。污泥的理化特性见表1。

表1 污泥理化特性

项目	数值
含水率/%	93.8±0.35
pH	6.71±0.1
总悬浮固体(TSS)/(g·L ⁻¹)	61.19±1.39
挥发性悬浮固体(VSS)/(g·L ⁻¹)	29.63±0.83
TCOD/(g·L ⁻¹)	48.36±0.74
SCOD/(mg·L ⁻¹)	59.40±11.26
蛋白质/(mg·L ⁻¹)	2.206±1.27
多糖/(mg·L ⁻¹)	2.514±1.06
TN/(mg·L ⁻¹)	5.876±0.35
氨氮/(mg·L ⁻¹)	2.063±0.15
硝态氮/(mg·L ⁻¹)	2.618±0.15
TP/(mg·L ⁻¹)	2.154±0.15

1.2 主要试剂及仪器

仪器:三维荧光激发-发射光谱仪,TU 1950紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司),SHJ-6D水浴恒温磁力搅拌器(金坛市美特仪器制造有限公司),LG16-B台式高速离心机(上海安亭科学仪器厂),Smart-Q15实验室纯水系统(上海和泰仪器有限公司)。

试剂:NaClO、考马斯亮蓝-G250、浓硫酸、蒽酮、重铬酸钾、过硫酸钾、浓盐酸等,均为分析纯;实验用水均为去离子水。

1.3 实验方法

低温耦合NaClO破解污泥实验分为2个阶段。

阶段一:取7份过筛浓缩污泥300 mL加入500 mL烧杯中,分别投加0、33.3、55.7、111.1、166.7、222.2、277.8 mg/g(以悬浮固体干重计)的NaClO,置于水浴恒温磁力搅拌器中,以200 r/min转速搅拌1 min;在不同反应时间提取预处理污泥在5 000 r/min转速下离心10 min,取出上清液并经0.45 μm醋酸纤维微滤膜过滤,检测分析SCOD、TN、蛋白质和多糖含量变化,确定药剂投加量。之后改变反应温度,分析破解后污泥液相中余氯、SCOD、TN、蛋白质和多糖含量的变化,确定最优反应温度及反应时间。

阶段二:在以上最佳反应条件下,检测预处理后污泥的TSS、VSS及液相中的碳氮比、B/C和三维荧光光谱图,分析实验方法对污泥减量化及碳源可生化性的影响。(溶解性物质检测均经过0.45 μm醋酸纤维微滤膜过滤)

采用COD破解率衡量污泥破解程度,计算公式见式(1):

$$\text{COD破解率} = \frac{\text{SCOD}}{\text{TCOD}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SCOD——污泥预处理后污泥破解液中溶解性SCOD;

TCOD——污泥悬浮液的总COD。

1.4 检测方法

污泥TCOD及SCOD均采用重铬酸钾法测定;TN采用过硫酸钾紫外分光光度法测定;多糖采用蒽酮-硫酸法测定;蛋白质选用考马斯-亮蓝法测定;BOD₅选用稀释接种法测定;预处理污泥中的溶解性有机物采用三维荧光光谱分析。由于污泥破解期间发生美拉德反应产生类黑素,上清液逐渐变成褐色^[13],会严重影响邻联甲苯胺比色法(OT法)测定余氯,故采用余氯试纸检测;污泥中的TSS采用烘干重量法测定,VSS采用马弗炉灼烧减量法测定。

R. WANG等^[14]提出活性污泥理论化学式可表示为C₁₁₈H₁₇₀O₅₁N₁₇P,且磷只能以液态或固态形式存在,因此破解污泥中的磷含量是恒定的,虽然C、N、P的释放对污泥胞内碳源的有效利用均有影响,但污泥中理论释放物质的量之比仅为C:N:P=122:7.7:1^[15],P的释放量较少,对碳源的有效利用率影响不大,因此后续检测中没有着重检测TP的释放。

2 结果与讨论

2.1 低温联合NaClO破解污泥

2.1.1 NaClO投加量的影响

次氯酸盐用于污泥破解时,ClO⁻可与细菌细胞壁内N-端氨基发生氧化反应,破坏细胞结构,促使污泥胞内物质流入液相。污泥初始pH为6.73时,有研究表明次氯酸盐在投加5 min内迅速反应,且在10 min内基本反应完全^[16],故反应时间选择15 min,研究NaClO投加量对污泥溶解性营养物质释放的影响,如图1所示。

由图1可知,当NaClO投加量为166.7 mg/g时,相比于原始污泥,破解液中的SCOD、TN、多糖和蛋白质增量分别达到11 420、631.29、583.42、363.12 mg/L,表明NaClO可有效破解污泥,使其胞内物质流出,污泥液相中溶解性有机物的浓度急剧增加。随着NaClO投加量继续增加,破解液中的SCOD、TN、多糖含量变化趋于平缓,说明单一化学药剂破解污泥在达到某种

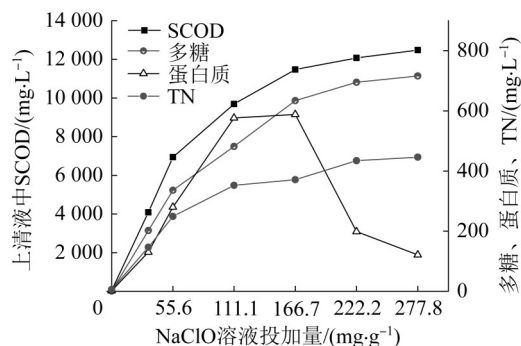


图1 NaClO投加量对污泥的有机物和TN溶出的影响

Fig. 1 Effect of NaClO dosage on organic matter and TN dissolution of sludge

阈值后,会和胞内某些有机物发生反应,增加后续破解的难度,M. SUDHA等^[17]的研究发现了相似结果。但蛋白质与其他有机物的变化趋势存在明显差异,NaClO投加量超过166.7 mg/g时蛋白质含量迅速下降,推测原因在于胞内有机物质大量流入液相,残留ClO⁻开始与液相中的蛋白质、酶、核酸等易降解有机物发生矿化反应^[18],导致污泥液相中蛋白质含量急剧下降。相比之下,多糖比蛋白质有更好的稳定性,且此前研究中也发现类似的有机物质释放现象^[19]。据此确定优化的NaClO投加量为166.7 mg/g。

2.1.2 水浴温度和反应时间的影响

有研究发现当污水中余氯达到1.0 mg/L时,将开始冲击污水生物处理系统^[10]。污泥破解液中的余氯含量是实现污泥内源性碳源再次利用的主要限制因素。刘丽君等^[5]的研究发现ClO⁻会随液相温度的升高而迅速水解。由此采取低温联合NaClO破解污泥,以减少破解液中的余氯含量。考察了水浴温度和反应时间对液相中余氯的影响,如图2所示。

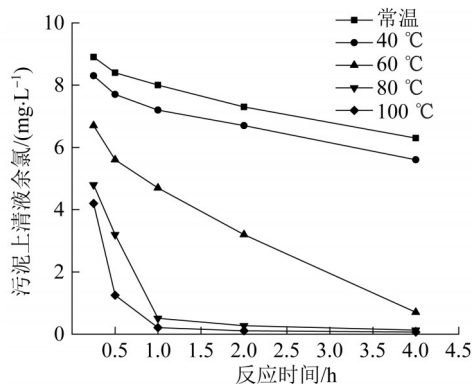


图2 水浴温度及反应时间对液相中余氯的影响

Fig. 2 Effect of water bath temperature and reaction time on residual chlorine in liquid phase

由图2可见,NaClO投加量为166.7 mg/g条件下,破解液中的余氯随水浴温度的增加而急剧降低,尤其当水浴温度达到80、100℃时,破解液中的余氯在1 h内降到0.37、0.17 mg/L,此时液相中的余氯含

量不足以对污水处理系统产生破坏,且在不同水浴温度下对NaClO破解污泥能力也有一定促进效果。

在NaClO投加量为166.7 mg/g条件下,污泥溶解性有机物质的释放情况如图3所示。

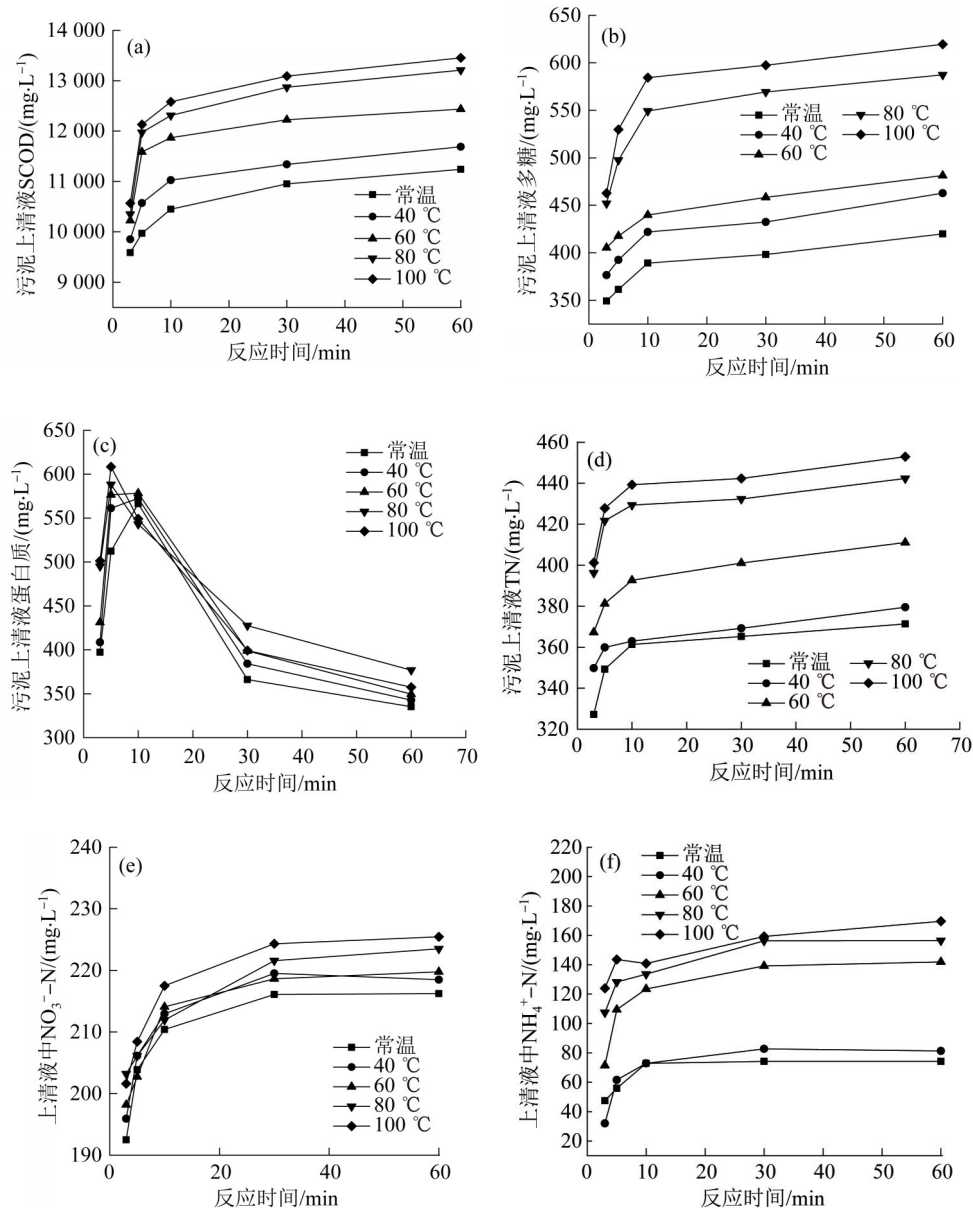


图3 水浴温度和反应时间对污泥溶解性有机物释放效果的影响

Fig. 3 Effects of water bath temperature and reaction time on the release of dissolved organic matter from sludge

由图3可知,随着反应温度的升高,液相中溶解性有机物的浓度随之增加,一定程度上促进了污泥破解的效果。且NaClO作为强氧化剂,投加到污泥中5 min内迅速反应,破坏污泥结构释放胞内有机质,10 min反应基本结束,此时液相中各溶解性有机

物质释放基本达到极限,考虑到液相中余氯的影响,延缓反应时间至60 min。当反应温度高于80℃,液相中的SCOD提升不明显,100℃时较80℃时仅增加245 mg/L,由此水浴温度选取80℃最具经济性。

水浴温度为80℃,液相中的SCOD、TN、

NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、多糖在 10 min 时浓度基本达到阈值,反应 60 min 后最终可分别稳定在 13 210、476.82、223.51、156.45、619.51 mg/L。然而蛋白质含量相较于其他有机物含量变化有明显不同,推测在反应前 5 min NaClO 迅速破坏细胞结构,胞内的蛋白质、多糖、核酸及脂质大量溶出,导致液相中蛋白质含量迅速增加,之后随着 NaClO 分解细胞速率减缓,部分蛋白质的氧化及水解速率超过其释放速率,导致其含量下降。同时随着蛋白质的水解,破解液中 NH_4^+ -N 浓度上升,但相比于破解液中的 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 浓度较低。理论上污泥胞内不含有较多的 NO_3^- -N,分析认为随着污泥细胞的破解,细胞中氧化 NH_4^+ -N 的相关酶(氨单加氧酶 AMO、丙酮肟双加氧酶 POD、亚硝酸盐氧化还原酶 NXR 等^[20])释放到液相中,同时次氯酸钠分解产生氧气,将 NH_4^+ -N 氧化为 NO_3^- -N,导致破解液中 NO_3^- -N 浓度上升。张彦平等^[21]采用 Fenton 氧化破解污泥时也存在液相中的 NH_4^+ -N 被氧化成 NO_3^- -N 的现象,说明强氧化剂破解污泥后,破解液中的 TN 以 NO_3^- -N 占据主导。

2.1.3 低温联合 NaClO 对剩余污泥的减量化

考察了低温耦合次氯酸钠对剩余污泥的减量化情况,如图 4 所示。

由图 4 可见,当 NaClO 投加量为 166.7 mg/g,水浴温度为 80 ℃时,COD 破解率在前 5 min 迅速增加,说明前 5 min 破解污泥的主要机理是 ClO^- 氧化破解细胞结构,且此时段 TCOD 急剧减少,也验证了强氧化剂在破解污泥的同时会使部分有机物发生矿化反应。5 min 后破解率增加缓慢,直到 15 min 后逐渐增加,1 h 后破解率再次变缓,2 h 时的破解率与 1 h 的相比(42.54%)仅提高 1.6%。同时由图 2 可知,在 80 ℃水浴中反应 15 min 后,液相中的有效氯降到 5.0 mg/L 以下,不足以进一步破解污泥,说明此时破解污泥以低温热解为主;TCOD 开始缓慢下降,可能是由于部分挥发性有机物挥发到气相中^[18]。图(b)中,随着投加量的增加,污泥的 TCOD 下降,说明污泥有机物的矿化程度与药剂投加量呈正比例关系,验证了强氧化剂破解污泥时易与有机质发生矿化反应。

在原始污泥 SS 为 63.19 g/L、80 ℃、反应 60 min 条件下,次氯酸钠投加量对污泥 SS 去除率的影响情况如表 2 所示。

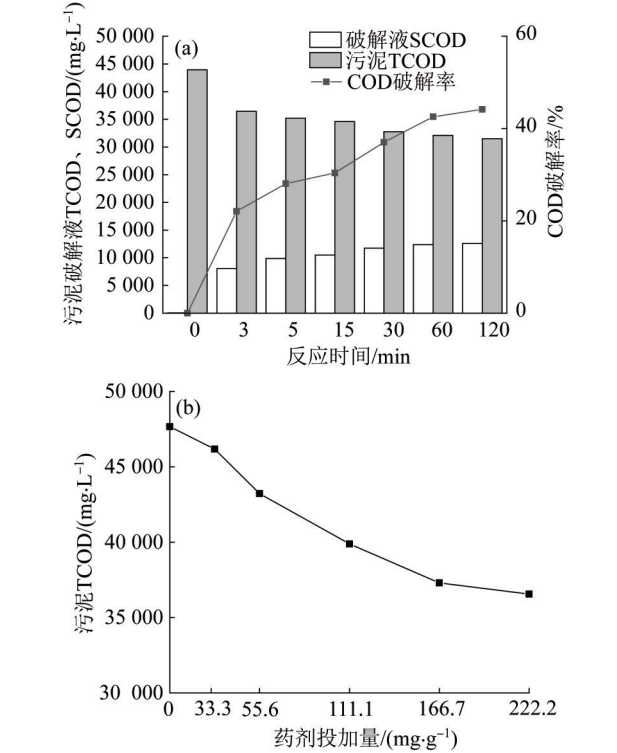


图 4 不同反应条件下,低温耦合次氯酸钠对剩余污泥减量化的影响

Fig. 4 Effect of low temperature coupled sodium hypochlorite on reduction of residual sludge under different reaction conditions

表 2 80 ℃下次氯酸钠投加量对 SS 去除率的影响		
Table 2 Effect of sodium hypochlorite dosage on SS removal rate at 80 ℃		
NaClO/(mg·g ⁻¹)	105 ℃烘干污泥/(g·L ⁻¹)	SS 去除率/%
0	60.087	4.91
33.3	57.56	8.91
55.6	53.206	15.80
111.1	48.241	23.66
166.7	43.784	30.71
222.2	42.313	33.04

由表 2 可见,NaClO 投加量为 166.7 mg/g 时,污泥固相残渣中的 SS 去除率达到 30.71%,相比其他污泥预处理方法,污泥减量化效率显著提高^[22]。

2.1.4 成本比较分析

在最佳反应条件下,分析经济支出。恒温水浴锅的能耗计算见式(2):

W=P×t (2)

式中:W——耗电量;
P——水浴锅加热功率(500 W);
t——加热时间,由试验可知该水浴锅将 1 L 污泥从常温加热到 80 ℃需 0.5 h(水浴锅保

持恒温 1 h,耗电量可忽略不计)。

以张彦平等^[22]采用高铁酸钾氧化破解法和陈英文等^[23]采用 Fenton 氧化破解法作对比,最佳反应条件下的经济费用如表 3 所示(其中药剂单价依据

实验室采买计算:AR 级 H_2O_2 18 元/瓶,AR 级次氯酸钠 8 元/瓶,AR 级高铁酸钾 129 元/瓶,AR 级硫酸亚铁 28 元/瓶,药剂均为 500 g(或 mL)/瓶;电价收费标准参照合肥市生活电价,为 0.565 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)。

表 3 不同预处理方法破解污泥的费用比较

Table 3 Comparison of the cost of different pretreatment methods to crack sludge

预处理方法	药剂投加量	药剂费用	耗电量	SCOD	SS 去除率/%
低温耦合次氯酸钠	NaClO 166.7 mg/g	0.026 7 元/g	0.140 8 元/L(0.002 3 元/g)	13 210.0 mg/L(213.06 mg/g)	30.71
高铁酸盐氧化法 ^[21]	Fe^{6+} 40 mg/g	0.036 5 元/g	—	1 374.5 mg/L(204.23 mg/g)	20.38
Fenton 氧化法 ^[22]	H_2O_2 1.1 mL/g+ Fe^{2+} 64 mg/g	0.059 6 元/g	0.093 9 元/L(0.011 5 元/g)	1 726.8 mg/L(212.14 mg/g)	38.57

由表 3 可知,相比于高铁酸盐氧化法,在相似的投加成本下低温耦合次氯酸钠法的 SS 去除率可提高 10.33%;与 Fenton 氧化法相比,仅需 40% 的成本,污泥 SS 去除率仅相差 7.86%;同时,次氯酸钠预处理后 SCOD 的溶出效果最好,以胞内碳源代替反硝化外加碳源,以污治污,产生部分经济效益,减少污水处理成本。次氯酸钠的使用缩减了污泥预处理成本,同时保证较高的污泥减量化效果和碳源的回收率,具有较高的实际应用价值。

2.2 低温联合 NaClO 破解污泥的可生化性

2.2.1 污泥破解液的碳氮比

有研究发现进水中的碳源及总氮含量是影响生物脱氮除磷的关键因素,然而大多数研究集中在碳源的释放,忽略了污泥破解液中碳氮比和生物降解性对污泥碳源回收的影响。Y. ZHANG 等^[24]研究发现,进水中碳氮比对生物去除 TN 的理论需求为 6.0,而实际生物脱氮除磷工艺中的碳氮比要大于理论值^[25]。污泥破解液中碳氮比变化情况如图 5 所示。在 80 °C 水浴温度下反应 60 min,不同 NaClO 投加量(0、33.3、55.6、111.1、166.7、222.2、277.8 mg/g,以 SS 计)下破解液中的 SCOD/TN 分别为 17.16、27.84、27.87、27.55、28.97、28.72、31.19,远高于生物去除 TN 的理论需求,说明该反应条件下破解液中释放的 TN 不足以对反硝化产生负面影响。

2.2.2 污泥水解液中溶解性有机物(DOM)成分

在好氧条件下,污泥上清液的生物降解性评估项目为 BOD_5/SCOD ^[26],当达到良好的生物降解性时 BOD_5/SCOD 超过 0.3。在 NaClO 投加量为 166.7 mg/g、反应时间为 60 min 的条件下,分析污泥水解液中 DOM 成分的可生化性,如图 6(a)所示。

由图 6(a)可知,反应温度升高对破解液的可生

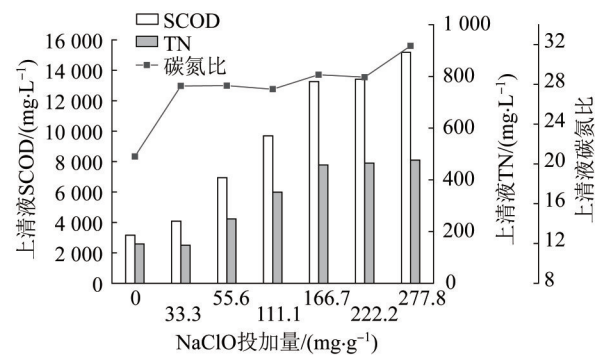


图 5 污泥破解液中碳氮比

Fig. 5 Carbon to nitrogen ratio in sludge cracking solution

化性有一定促进效果,结合图 2、图 3 分析:首先,温度偏低时上清液余氯含量较高,对生物活性有抑制作用,从而导致低温处理时破解液的可生化性较差,随着反应温度的增加,破解液中余氯含量下降,其对微生物细胞活性的影响显著降低,可生化性随之增加。其次,温度增加对污泥破解有促进作用,尤其当温度高于 60 °C 时,可促进污泥胞内溶解性有机物释放到液相中,使生物降解性增加。但在 80 °C 时破解液中 BOD_5/SCOD 仅能达到 0.282,说明预处理对污泥上清液的生物降解性有一定促进效果,但效果不太理想,结合图 3、图 4,分析其原因为破解液中部分易降解有机物与 NaClO 发生矿化反应,从而导致破解液中碳源的生物降解性相对较低。

采用三维荧光光谱分析低温耦合 NaClO 处理对污泥 DOM 组成的影响,结果如图 6(b)、(c)所示。由图 6(b)可见,三维荧光图中存在 3 个峰:色氨酸类物质($\lambda_{\text{Ex}}=225 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Em}}=330 \text{ nm}$)(A 峰),微生物副产物类物质($\lambda_{\text{Ex}}=275 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Em}}=325 \text{ nm}$)(B 峰)和胡敏酸类物质($\lambda_{\text{Ex}}=325 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Em}}=400 \text{ nm}$)(C 峰),其中胡敏酸类物质较其他 2 个峰不明显。这说明初始污泥的

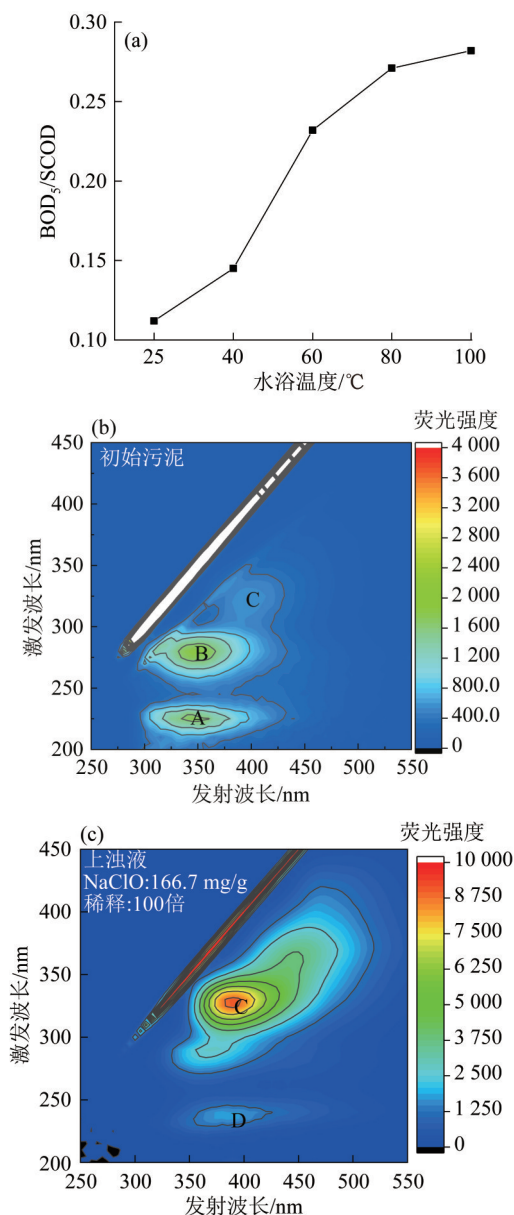


图6 污泥水解液中DOM成分的可生化性分析

Fig. 6 Biodegradability analysis of DOM components in sludge hydrolysate

DOM构成以易生物降解的色氨酸类物质、微生物副产物为主,胡敏酸类物质较少。经过低温耦合 $NaClO$ 预处理后,污泥DOM的三维荧光光谱特征发生明显变化,色氨酸类物质和微生物副产物发生猝灭现象,胡敏酸类物质(C峰)及富里酸类物质(D峰)显著增强。污泥溶解性有机物荧光光谱特征发生变化的原因可能在于, ClO^- 破解污泥的同时,与污泥胞内物质释放到液相中的易降解的色氨酸类物质和微生物副产物类物质发生矿化反应。分析认为,

$NaClO$ 在有效破解污泥的同时,与DOM中部分易降解物质发生矿化反应,导致破解液中碳源的生物降解性下降。

3 结论

(1)低温耦合 $NaClO$ 处理污泥过程中,在一定范围内,SCOD随 $NaClO$ 投加量的增加而上升,但 $NaClO$ 投加量超过166.7 mg/g后破解效果提升不明显。低温耦合 $NaClO$ 处理污泥的最优条件:温度为 $80^{\circ}C$ 、 $NaClO$ 投加量为166.7 mg/g、反应时间60 min。

(2) $NaClO$ 的投加对污泥减量化过程有重要影响,在最优反应条件下,COD破解率达到42.54%,药剂成本仅需0.029元/g,污泥TSS由63.19 g/L降为43.78 g/L,去除率达到30.71%。次氯酸钠预处理污泥后,每克SS可溶出213.06 mg SCOD,对于后续碳源回收及代替外加碳源可产生部分经济效益,极大程度减少污泥预处理成本,改善污泥减量化。

(3)结合反应过程中TCOD和蛋白质的变化,以及三维荧光图谱分析,可推断 $NaClO$ 在破解污泥的同时,易与液相中的易降解有机物发生矿化反应,导致破解液中碳源的可生化性恶化,最终B/C仅能达到0.282。

参考文献

- [1] BOUABIDI Z B, EL-NAAS M H, ZHANG Z. Immobilization of microbial cells for the biotreatment of wastewater: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(1): 241-257.
- [2] KELESSIDIS A, STASINAKIS A S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries[J]. Waste Management, 2012, 32(6): 1186-1195.
- [3] 谢昆,尹静,陈星.中国城市污水处理工程污泥处置技术研究进展[J].工业水处理,2020,40(7):18-23.
- XIE Kun, YIN Jing, CHEN Xing. Research progress on sludge treatment technology of urban sewage treatment project in China[J]. Industrial Water Treatment, 2020,40(7):18-23.
- [4] WALCZAK J, ZUBROWSKA-SUDOL M. The rate of denitrification using hydrodynamically disintegrated excess sludge as an organic carbon source[J]. Water Science and Technology, 2018, 77(9): 2165-2173.
- [5] 刘丽君,周娅琳,阮建明,等.次氯酸钠消毒剂的分解特性及氯酸盐副产物形成规律探讨[J].给水排水,2019,45(6):54-58.
- LIU Lijun, ZHOU Yalin, RUAN Jianming, et al. Decomposition characteristics and chlorate formation rules of sodium hypochlorite disinfectant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(6): 54-58.
- [6] WEI H, TANG Y, SHOEIB T, et al. Evaluating the effects of the

- preoxidation of H_2O_2 , NaClO , and KMnO_4 and reflocculation on the dewaterability of sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 942-952.
- [7] HAWKINS C L, PATTISON D I, DAVIES M J. Hypochlorite-induced oxidation of amino acids, peptides and proteins[J]. *Amino acids*, 2003, 25(3): 259-274.
- [8] ISHIHARA M, MURAKAMI K, FUKUDA K, et al. Stability of weakly acidic hypochlorous acid solution with microbicidal activity [J]. *Bio-control science*, 2017, 22(4): 223-227.
- [9] 郭绍东, 李晨曦, 黄兴虎, 等. 次氯酸钠与亚铁对污泥破解及脱水效果的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3130-3137.
- GUO Shaocong, LI Chenxi, HUANG Xinghu, et al. Effects of sodium hypochlorite and ferrous iron on sludge disintegration and dewatering[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(8): 3130-3137.
- [10] 孙健, 李露, 刘海燕, 等. 余氯对城市污水处理厂生化系统的影响研究[J]. *给水排水*, 2021, 57(4): 45-52.
- SUN Jian, LI Lu, LIU Haiyan, et al. Study on the effect of residual chlorine on biochemical system of municipal wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(4): 45-52.
- [11] AHN Y Y, CHOI J, KIM M, et al. Chloride-mediated enhancement in heat-induced activation of peroxymonosulfate: New reaction pathways for oxidizing radical production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 5382-5392.
- [12] 席兆胜, 孙井梅, 李湘中. 煮沸对自来水中氯仿含量的影响[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(15): 47-49.
- XI Zhaosheng, SUN Jingmei, LI Xiangzhong. Effects of boiling on concentration of chloroform in tap water[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(15): 47-49.
- [13] BARBER W P F. Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review[J]. *Water Research*, 2016, 104: 53-71.
- [14] WANG R, TANG A P. Influence of the dissolution laws of N, P on the activated sludge by ozone oxidation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 295: 1215-1221.
- [15] LI Y, HU Y, WANG G, et al. Screening pretreatment methods for sludge disintegration to selectively reclaim carbon source from surplus activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 255: 365-371.
- [16] YU W, WEN Q, YANG J, et al. Unraveling oxidation behaviors for intracellular and extracellular from different oxidants (HOCl vs. H_2O_2) catalyzed by ferrous iron in waste activated sludge dewatering[J]. *Water Research*, 2019, 148: 60-69.
- [17] SUDHA M, RENU G, SANGEETA G. Mineralization and degradation of 4-nitrophenol using homogeneous Fenton oxidation process [J]. *Environmental Engineering Research*, 2021, 26(3): 190145.
- [18] 宫常修, 蒋建国, 杨世辉. 超声波耦合 Fenton 氧化对污泥破解效果的研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 293-297.
- GONG Changxiu, JIANG Jianguo, YANG Shihui. Effects of Fenton oxidation with ultrasonic coupling on sludge particle size and soluble substances [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 293-297.
- [19] WU Y, JIANG Y, SONG K. Carbon source recovery from waste activated sludge by low-temperature thermal hydrolysis process[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(1): 04019098.
- [20] 张明霞, 李安章, 陈猛, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌脱氮相关酶系及其编码基因的研究进展[J]. *生物技术进展*, 2020, 10(1): 40-45.
- ZHANG Mingxia, LI Anzhang, CHEN Meng, et al. Progress on nitrogen removal related enzymes and their coding genes in heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacteria[J]. *Current Biotechnology*, 2020, 10(1): 40-45.
- [21] 张彦平, 张千, 李一兵, 等. Fenton 氧化对剩余污泥的溶胞效果[J]. *工业水处理*, 2018, 38(1): 20-22.
- ZHANG Yanping, ZHANG Qian, LI Yibing, et al. Lysis effect of Fenton oxidation on residual sludge [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(1): 20-22.
- [21] 张彦平, 呼瑞琪, 李一兵, 等. 高铁酸盐氧化剩余污泥溶胞减量研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 59-64.
- ZHANG Yanping, HU Ruiqi, LI Yibing, et al. Lysis and reduction of excess sludge by ferrate oxidation [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(15): 59-64.
- [23] 陈英文, 刘明庆, 惠祖刚, 等. Fenton 氧化破解剩余污泥的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(2): 409-413.
- CHEN Yingwen, LIU Mingqing, HUI Zugang, et al. Experimental study on excess sludge disintegration by Fenton oxidation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(2): 409-413.
- [24] ZHANG Y, LU G, ZHANG H, et al. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal, sludge reduction and microbial community structure in an anaerobic/anoxic/oxic process coupled with composite ferrate solution disintegration [J]. *Environmental Research*, 2020, 190: 110006.
- [25] ZHANG L, HUANG Y, LI S, et al. Optimization of nitrogen removal in solid carbon source SND for treatment of low-carbon municipal wastewater with RSM method[J]. *Water*, 2018, 10(7): 827.
- [26] ZHANG Y, ZHANG P, GUO J, et al. Spectroscopic analysis and biodegradation potential study of dissolved organic matters in sewage sludge treated with high-pressure homogenization [J]. *Biore-source Technology*, 2013, 135: 616-621.
- [作者简介] 刘壮壮(1997—), 硕士研究生。E-mail: 1039195319@qq.com。
- [收稿日期] 2023-02-21(修改稿)