

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.011

# 高铁酸盐氧化剩余污泥溶胞减量研究

张彦平<sup>1</sup>, 呼瑞琪<sup>2</sup>, 李一兵<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 张千<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401; 2. 天津中怡建筑规划设计有限公司, 天津 300193)

**摘要:** 采用高铁酸盐对剩余污泥进行氧化以实现污泥减量化。结果显示:高铁酸盐对污泥的氧化反应迅速,并且在氧化过程中可生成中间态氧化物;反应5 min后,MLVSS和VSS/SS值快速降低,表明EPS及污泥细胞被氧化破解,其内部物质释放出来,导致TPN、SPN、多糖、SCOD、TN和TP值均显著增加;随着反应时间的延长,SCOD和多糖增加缓慢,TPN、SPN、TN和TP最终趋于稳定,这是由于Fe(VI)及其中间态氧化物能继续与胞内溶出物反应,且Fe(VI)随时间延长逐渐被消耗所致。紫外-可见光扫描结果表明,污泥细胞可被进一步氧化为小分子有机物,导致紫外区吸光度值显著增加。显微镜检照片显示,高铁酸盐在氧化污泥的过程中,逐步破坏污泥絮体结构,导致细胞裸露,进而被氧化、破碎。

**关键词:** 高铁酸盐; 剩余污泥; 氧化; 污泥减量

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0059-06

## Lysis and Reduction of Excess Sludge by Ferrate Oxidation

ZHANG Yan-ping<sup>1</sup>, HU Rui-qi<sup>2</sup>, LI Yi-bing<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>

(1. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Zhongyi Architecture and Planning Design Co. Ltd., Tianjin 300193, China)

**Abstract:** Ferrate was used to oxidize excess sludge to realize reduction. The sludge was oxidized quickly by the ferrate, and intermediate oxides were formed during the reaction. After reaction of 5 min, MLVSS and VSS/SS decreased rapidly, which indicated that EPS and sludge cells were oxidized and cracked, and the internal substances were released. This caused the remarkable increase of TPN, SPN, polysaccharide, SCOD, TN and TP. With the increase of reaction time, SCOD and polysaccharide increased slowly, and TPN, SPN, TN and TP eventually tended to be stable. This was due to the fact that Fe(VI) and its intermediate oxides could further react with the intracellular dissolution substances. At the same time, the oxidants were gradually consumed over time. According to UV-visible scanning spectrogram results, the sludge cells could be further oxidized to smaller molecules organic matters, which resulted in the absorbance values significantly increased in the ultraviolet region. Microscopic examination showed that ferrate gradually destroyed the structure of sludge floc during the oxidization

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608166); 河北省自然科学基金资助项目(E2015202354); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2016098); 河北省建设科技研究计划项目(2014-236)

通信作者: 张彦平 E-mail: zyphit@163.com

process. It led to naked cells, which were then oxidized and broken.

**Key words:** ferrate; excess sludge; oxidation; sludge reduction

活性污泥法是污水生物处理的一种重要方法,因其技术成熟、易于管理等优点而被应用于全世界约90%的污水处理厂。但是该技术的最大弊端就是在处理污水的同时会产生大量剩余污泥。剩余污泥体积庞大、处理处置困难、费用较高,可占到污水处理厂污水处理总费用的60%左右<sup>[1-2]</sup>;而且剩余污泥含有大量重金属、病原菌以及持久性有机污染物等,若不妥善处理,将会对环境和人体造成直接或潜在的危害<sup>[3]</sup>。因此,污泥处理处置已经成为污水处理厂亟待解决的关键问题<sup>[4-6]</sup>。针对此问题,Yasui等<sup>[7]</sup>首先提出了污泥减量化技术,该技术主要采用源头治理、清洁生产理念,放弃了脱水浓缩等污泥减容处理手段,采用物理、化学、生物等方法,在保证污水处理效能的前提下,减少污水生化处理单元向外界排放的生物固体量,为剩余污泥的处理处置提供了新思路。目前,污泥减量化技术主要包括:代谢解耦联技术、强化微生物隐性生长技术、生物捕食技术等。其中,基于微生物隐性生长的化学溶胞技术因具有溶胞效果好、操作简单易行、基质被利用充分等优点而备受研究者的关注。目前,国内外已有大量文献证实采用臭氧<sup>[8-9]</sup>、氯<sup>[10-11]</sup>、Fenton试剂<sup>[12-13]</sup>等化学溶胞技术能有效破坏污泥细胞结构,释放出细胞内物质作为重新被微生物代谢的基质,从而减少污泥产量。高铁酸盐作为一种高效、绿色、多功能的强氧化剂,能有效破解污泥细胞壁,释放出胞内物质可供微生物隐性生长,从而实现污泥减量。目前,已有研究表明<sup>[4,6,14]</sup>高铁酸盐能有效破解污泥细胞,导致胞内物质大量溶出,而且Fe(VI)的还原产物Fe(III)有效促进了污泥的沉淀性能<sup>[15]</sup>及脱水性能<sup>[1,16-17]</sup>。但目前高铁酸盐在污泥处理方面的研究偏重于污泥脱水性能方面<sup>[18-19]</sup>,其对污泥溶胞效果及机理方面的研究有待深入。

本研究采用高铁酸盐氧化破解剩余污泥,研究了其对污泥的溶胞效果,并对污泥的破解过程进行了分析,为其在污泥减量技术中的应用提供了一定的数据支持。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验污泥取自天津市某污水处理厂,并在实验

室采用人工配水于SBR活性污泥系统培养备用。高铁酸盐溶液采用湿式氧化法制得,其中 $K_2FeO_4$ 浓度为0.1 mol/L。其他化学药品均为国产分析纯。

### 1.2 实验方法

取浓度为8 934 mg/L的初始污泥,经清水清洗数次后将其稀释至浓度为6 728 mg/L,洗后污泥的理化性质如下:SCOD为9.47 mg/L、TN为0.75 mg/L、TP为0.11 mg/L、总蛋白质TPN为5.38 mg/L、溶解性蛋白质SPN为2.55 mg/L、多糖为4.73 mg/L、SS为6 728 mg/L、VSS为5 466 mg/L。分别取100 mL上述污泥置于烧杯中,放置在搅拌器上,投加40 mgFe/gSS高铁酸盐溶液,以500 r/min搅拌5 min,再以150 r/min搅拌反应一定时间后,取污泥混合液在转速为4 000 r/min下离心25 min,经过中速定量滤纸过滤后,取其沉淀测定MLSS、MLVSS,滤液测定TN、TP、TPN、多糖等指标,经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液测定SCOD、SPN。另做一组实验,取污泥混合液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后进行紫外-可见光扫描;将污泥原液及处理后的样品搅拌均匀后,进行显微镜观察。

### 1.3 分析项目及方法

实验搅拌采用JJ-4型六联数显电动搅拌器;离心采用TDL-40B型低速台式大容量离心机;SCOD、TN、TP采用5B-1(V8)型智能消解器进行消解,SCOD、TP采用5B-3B(V8)型多参数水质分析仪测定,TN采用5B-3BN(V8)型总氮测定仪测定;TPN、SPN采用考马斯亮蓝G-250法<sup>[20]</sup>测定;多糖采用苯酚-硫酸法<sup>[21]</sup>测定;MLSS、MLVSS采用标准方法测定;紫外-可见光扫描采用UV-5800PC型紫外可见分光光度计联机进行;显微镜观察采用XSP-8CC生物显微镜进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥上清液的紫外-可见光扫描谱图

将污泥经高铁酸盐氧化前后的上清液稀释50倍,测定不同时间下污泥上清液的紫外-可见光扫描谱图,见图1。可见,Fe(VI)在510 nm处有吸收峰,但因其氧化速度很快,吸收峰在5 min内迅速降低至消失,然而后续实验结果表明溶液中的氧化作用仍在持续,表明Fe(VI)在氧化过程中被还原性有

机物或基团进一步还原成具有氧化能力的中间产物<sup>[22-23]</sup>。图1结果显示,在高铁酸盐氧化处理的5 min内,污泥上清液在260 nm附近出现新峰,该处吸收峰主要是由胞内释放的核酸以及一些含有苯环等共轭双键结构的物质引起的<sup>[24]</sup>。但随着反应时间的延长,260 nm处的峰值逐渐变得不明显,表明核酸等物质进一步被氧化成其他物质,造成在该处的峰值减弱甚至消失。UV<sub>254</sub>可反映污泥上清液中含有不饱和键有机物的浓度,经高铁酸盐处理后污泥上清液的UV<sub>254</sub>是原泥的72.29~96.53倍,这表明高铁酸盐可有效破解污泥,将细胞内腐殖类大分子有机物和芳香族化合物(含C=C双键和C=O双键)释放出来。从图1还可以看出,原污泥上清液在180~800 nm范围内均没有明显的吸收峰,而经高铁酸盐处理后,污泥上清液的吸光度值在紫外区较原污泥均显著增强。原污泥上清液在紫外区的最大吸光度值为0.03,而高铁酸盐氧化处理污泥1 min后,经测定上清液最大吸光度值可达到2.75,约是原污泥的91.67倍,这主要是因为细胞溶出的大分子物质被氧化生成的小分子有机物在紫外区有强烈吸收<sup>[25]</sup>。此外,高铁酸盐溶液中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在紫外区也有一定吸收,这会对吸光度产生一定影响<sup>[26]</sup>。

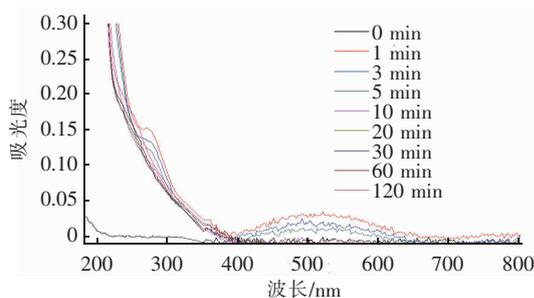


图1 污泥上清液的紫外-可见光扫描谱图

Fig. 1 UV-Vis scanning spectrogram of sludge supernatant

## 2.2 高铁酸盐氧化对蛋白质和多糖的影响

多糖和蛋白质是污泥细胞胞外聚合物EPS的重要组成部分,同时也是胞内物质的主要成分,其含量在上清液中的变化可揭示高铁酸盐氧化污泥的过程。污泥经过高铁酸盐氧化5 min时,多糖和蛋白质均较初始值显著增加,多糖浓度由初始的4.73 mg/L迅速增加到92.91 mg/L,TPN和SPN分别由初始的5.38 mg/L和2.55 mg/L快速增加到37.07 mg/L和20.09 mg/L(见图2)。这是由于包裹在菌胶团最外面的EPS首先遭到破坏,多糖和蛋白质从

絮体结构中释放出来而溶解到上清液中,致使含量增加;进而高铁酸盐氧化微生物的细胞壁和细胞膜,改变细胞的通透性,细胞内部的蛋白质、氨基酸、多糖等物质释放出来,从而使污泥液相中的蛋白质和多糖含量进一步增加。

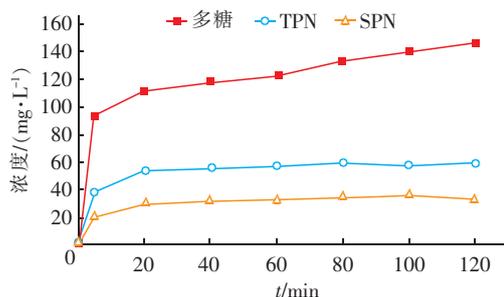


图2 高铁酸盐氧化对蛋白质和多糖溶出的影响

Fig. 2 Effect of ferrate oxidation on protein and polysaccharide dissolution

但图2结果显示,反应20 min后,蛋白质含量增加缓慢直至基本保持不变,这是由于Fe(VI)在氧化细胞释放蛋白质的同时,又可将其大分子进一步氧化为小分子物质,如挥发性脂肪酸、H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>等,使得蛋白质的溶出率与被氧化速率基本持平;同时随着反应时间的延长,Fe(VI)被逐渐消耗,氧化能力逐渐减弱,因而表现出蛋白质含量随时间增加而变化不明显。多糖浓度在5 min后继续上升,但升高趋势逐渐减缓,这表明反应过程中高铁酸盐的还原中间产物继续氧化污泥释放多糖类物质,但随着时间的延长,Fe(VI)及其中间产物被逐渐消耗,溶胞速率逐渐降低。

## 2.3 高铁酸盐氧化对C、N、P的影响

污泥细胞被高铁酸盐氧化破解后会释放出大量的胞内物质,导致C、N、P等指标的变化。实验研究了高铁酸盐氧化污泥过程中上清液SCOD、TN、TP随时间变化的溶出规律,见图3。可见,反应5 min时,SCOD、TN、TP均较初始值显著增加,分别由初始的9.47、0.75和0.11 mg/L增加到了773.52、357.05和29.15 mg/L,该结果与蛋白质和多糖的溶出规律一致,表明在高铁酸盐的强烈氧化作用下,污泥细胞在短时间内破裂并释放出大量有机物、蛋白质、核酸和含磷物质等。此后,在反应5~60 min时间段内,SCOD和TP仍呈快速增加趋势,但增加速率较5 min之前降低,反应60 min时SCOD和TP分别达到1301.02 mg/L和50.86 mg/L;而TN在5~

30 min 时呈缓慢增加趋势,此后随着反应时间的延长基本不变,稳定在 430 mg/L 左右。该结果表明,此时污泥在继续被氧化释放出胞内物质,但随着溶液中有机物的大量增加,高铁酸盐及其中间态氧化产物对有机物的矿化作用逐渐增强<sup>[27]</sup>,且伴随时间的延长,氧化剂逐渐被消耗,使得 SCOD 的上升速率降低,同时磷的释放速率也逐渐降低。此后继续延长反应时间,SCOD 增加趋势进一步减缓,TP 趋于稳定。反应 120 min 时,SCOD 和 TP 分别为 1 374.47 mg/L 和 50.52 mg/L。

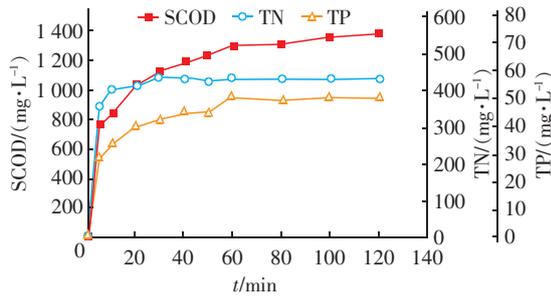


图3 高铁酸盐氧化对 C、N、P 溶出的影响

Fig. 3 Effect of ferrate oxidation on C, N and P dissolution

由于 SCOD 的升高与污泥量的减少密切相关,因此进一步研究了不同时间下高铁酸盐氧化污泥时 MLVSS 减少量和 SCOD 增加量的线性关系(见图 4),并将破解单位质量污泥所产生的 SCOD 的增加量定义为 SCOD 产率  $\gamma$ ,即  $\gamma = \Delta\text{SCOD}/\Delta\text{MLVSS}$ ,单位为 gSCOD/gMLVSS。由图 4 拟合曲线可知,SCOD 产率  $\gamma$  为 1.12 gSCOD/gMLVSS。Lesslie 等人<sup>[28]</sup>的研究表明,剩余污泥的 MLVSS 与 SCOD 经验关系通常为 1.42 gSCOD/gMLVSS。本实验中 SCOD 的产率值略低于理论值,这可能是由于部分胞内溶出物进一步被 Fe(VI) 及其中间态物质氧化生成  $\text{CO}_2$  从水中逸出所致。

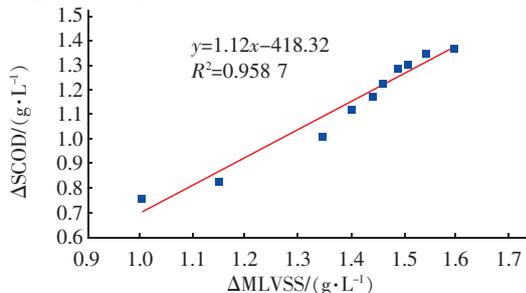


图4 MLVSS 减少量与 SCOD 增加量线性拟合

Fig. 4 Linear fitting of reduction of MLVSS and increase of SCOD

## 2.4 高铁酸盐氧化对污泥固体物质的影响

实验研究了不同反应时间下高铁酸盐对 MLVSS 变化规律的影响,结果表明,MLVSS 和 VSS/SS 值在 5 min 内急剧下降,分别由初始的 5 496 mg/L 和 0.81 降低到了 4 492 mg/L 和 0.62,这与前面的实验结果相吻合,证实此时部分污泥细胞已经被 Fe(VI) 快速氧化破解进入污泥液相中;此后,在高铁酸盐及其中间态氧化物的作用下 MLVSS 仍快速下降,反应 20 min 时,MLVSS、VSS/SS 值分别降低到 4 152 mg/L 和 0.58,较初始值分别减少了 24.5% 和 28.4%,此后随着反应时间的进一步延长,MLVSS 逐渐趋于稳定。

## 2.5 高铁酸盐氧化对污泥絮体结构的影响

显微镜检可直观表征污泥经高铁酸盐氧化前后絮体结构的变化,图 5 是处理前后污泥絮体放大 100 倍的显微镜照片。

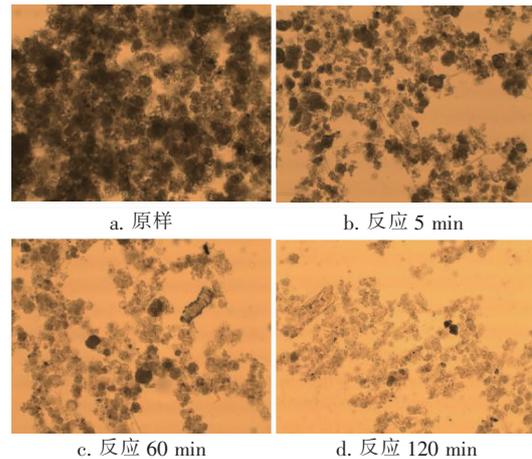


图5 高铁酸盐氧化前后污泥絮体显微镜照片

Fig. 5 Microscope photographs of sludge floc before and after oxidization by ferrate

污泥絮体结构经过高铁酸盐处理后,受到了不同程度的破坏。原污泥颗粒较大,菌胶团呈致密紧凑的网状结构,中间可以观察到活动的微型动物,主要为纤毛虫、钟虫等。当污泥经过高铁酸盐氧化 5 min 后,丝状菌开始出现断裂,紧密絮体结构被破坏,但丝状菌的密度仍然较高。随着反应时间的延长,污泥颗粒间相互缠绕的现象已观察不到,絮体结构逐渐分散解体,部分细胞呈游离状态分布。反应 120 min 后,污泥絮体结构完全被破坏,在显微镜下基本看不出来,只能观察到零散的污泥小颗粒。

显微镜检结果表明,高铁酸盐能有效破坏作为污泥絮体结构骨架之一的丝状菌,进而破坏污泥絮

体结构,使污泥结构松散,菌胶团分散呈小团,尺寸变小至破碎,包裹在污泥絮体内部的细胞由于丧失了保护的屏障,完全暴露出来,进而在高铁酸盐的氧化作用下,细胞失活、死亡并溶解,呈现碎片状态。这一结果与前述 SCOD、多糖等变化结果一致。

### 3 结论

① 紫外-可见光扫描结果显示,Fe(VI)氧化污泥的速度很快且能被还原为中间态氧化物;污泥经 Fe(VI)氧化后胞内物质释放,产生不饱和键有机物及小分子有机物,导致在 260 nm 附近出现峰值且在紫外区的吸光度值迅速升高。

② 高铁酸盐能有效破坏 EPS 和污泥细胞,释放出蛋白质和多糖,致使污泥上清液中蛋白质含量随时间延长呈现先快速增加而后基本保持不变,多糖浓度则呈现先快速升高后缓慢升高的趋势。

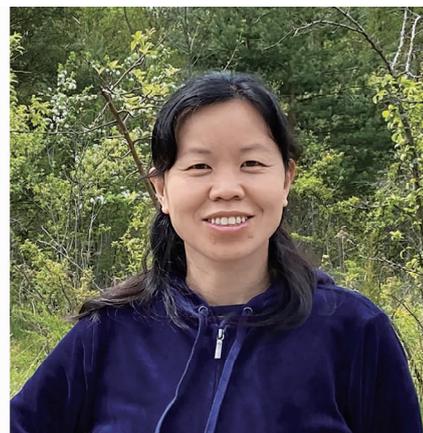
③ 高铁酸盐在氧化污泥的过程中,初始阶段以释放胞内物质为主,导致 SCOD、TN、TP 含量剧增;随着时间的延长,高铁酸盐与溶出物质反应,致使 SCOD 增加缓慢, TN、TP 最终基本保持不变。SCOD 产率为 1.12 gSCOD/gMLVSS,略小于理论值。从各项指标变化规律来看,高铁酸盐氧化污泥的最佳时间在 60 min 左右。

④ MLVSS 和 VSS/SS 在 5 min 内迅速降低,表明高铁酸盐能在短时间内迅速破解污泥,释放出大量有机物,降低污泥浓度。显微镜检结果进一步表明高铁酸盐在氧化污泥过程中,可有效破坏污泥絮体结构,使污泥絮体松散、尺寸变小。

### 参考文献:

- [1] Zhang X H, Lei H Y, Chen K, *et al.* Effect of potassium ferrate ( $K_2FeO_4$ ) on sludge dewaterability under different pH conditions [J]. *Chem Eng J*, 2012, 210: 467-474.
- [2] Pilli S, Bhunia P, Yan S, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: a review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2011, 18: 1-18.
- [3] Wei Y, van Houten R T, Borger A R, *et al.* Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment [J]. *Water Res*, 2003, 37(18): 4453-4467.
- [4] Ye F X, Ji H Z, Ye Y F. Effect of potassium ferrate on disintegration of waste activated sludge (WAS) [J]. *J Hazard Mater*, 2012, 219/220: 164-168.
- [5] Wu C, Zhang G M, Zhang P Y, *et al.* Disintegration of excess activated sludge with potassium permanganate: Feasibility, mechanisms and parameter optimization [J]. *Chem Eng J*, 2014, 240: 420-425.
- [6] Wu C, Jin L Y, Zhang P Y, *et al.* Effects of potassium ferrate oxidation on sludge disintegration, dewaterability and anaerobic biodegradation [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 102: 137-142.
- [7] Yasui H, Shibata M. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process [J]. *Water Sci Technol*, 1994, 30(9): 11-20.
- [8] Yang S S, Guo W Q, Meng Z H, *et al.* Characterizing the fluorescent products of waste activated sludge in dissolved organic matter following ultrasound assisted ozone pretreatments [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 131: 560-563.
- [9] 孟宪荣, 刘东方, 刘范嘉, 等. 臭氧氧化污泥减量和碳源回收利用研究 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(1): 18-21.
- Meng Xianrong, Liu Dongfang, Liu Fanjia, *et al.* Study on ozonation for sludge reduction and carbon source recovery [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(1): 18-21 (in Chinese).
- [10] Lin J T, Hu Y Y, Wang G H, *et al.* Sludge reduction in an activated sludge sewage treatment process by lysis-cryptic growth using  $ClO_2$ -ultrasonication disruption [J]. *Biochem Eng J*, 2012, 68: 54-60.
- [11] Zuriaga-Agustí E, Garrido-Mauri G, Mendoza-Roca J A, *et al.* Reduction of the sludge production in a sequencing batch reactor by addition of chlorine dioxide: Influence on the process performance [J]. *Chem Eng J*, 2012, 209: 318-324.
- [12] Liu C G, Zhang P Y, Zeng C H, *et al.* Feasibility of bioleaching combined with Fenton oxidation to improve sewage sludge dewaterability [J]. *J Environ Sci*, 2015, 28: 37-42.
- [13] Zhu Y, Zeng G M, Zhang P Y, *et al.* Feasibility of bioleaching combined with Fenton-like reaction to remove heavy metals from sewage sludge [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 142: 530-534.
- [14] 曹秉帝, 张伟军, 王东升, 等. 高铁酸钾调理改善活性污泥脱水性能的反应机制研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 3805-3814.
- Cao Bingdi, Zhang Weijun, Wang Dongsheng, *et al.* Insights into the mechanism of sludge conditioning with potassium ferrate for improving dewatering property of

- activated sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 3805–3814 (in Chinese).
- [15] Liu Y L, Wang L, Ma J, *et al.* Improvement of settleability and dewaterability of sludge by newly prepared alkaline ferrate solution [J]. *Chem Eng J*, 2016, 287: 1–18.
- [16] Ye F X, Liu X W, Li Y. Effects of potassium ferrate on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of excess activate sludge [J]. *J Hazard Mater*, 2012, 199/200: 158–163.
- [17] 郭宇衡. 高铁酸钾对污泥的减量脱水研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
Guo Yuheng. The Study on Dewatered Sludge Volume Reduction Using Potassium Ferrate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [18] 张彦平, 李芬, 樊伟, 等. 高铁酸盐溶液破解剩余污泥效能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(6): 65–69.  
Zhang Yanping, Li Fen, Fan Wei, *et al.* Study on performance of ferrate solution disintegration for excess sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(6): 65–69 (in Chinese).
- [19] Ning X A, Feng Y F, Wu J J, *et al.* Effect of  $K_2FeO_4$ /US treatment on textile dyeing sludge disintegration and dewaterability [J]. *J Environ Manage*, 2015, 162: 81–86.
- [20] 陈茂霞, 周后珍, 朱晓华, 等. 考马斯亮蓝法检测活性污泥中蛋白质含量优化 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(4): 1–5.  
Chen Maoxia, Zhou Houzhen, Zhu Xiaohua, *et al.* Optimization of determination of protein in activated sludge by Bradford method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(4): 1–5 (in Chinese).
- [21] 马敏, 刘嘉宝, 陈兰兰. 苯酚—硫酸法测定多糖含量显色条件的优化与改进 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(12): 323–324.  
Ma Min, Liu Jiabao, Chen Lanlan. Optimization and improvement of color developing conditions for the determination of polysaccharide content by phenol sulfuric acid method [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(12): 323–324 (in Chinese).
- [22] 孙旭辉, 李文超, 李冰, 等. 高铁酸盐的制备、性质及在水处理中的应用 [J]. *东北电力大学学报*, 2015, 35(4): 33–39.  
Sun Xuhui, Li Wenchao, Li Bing, *et al.* Preparation, properties and applicatin of ferrate in water treatment [J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2015, 35(4): 33–39 (in Chinese).
- [23] Sharma V K. Ferrate (V) oxidation of pollutants: A premix pulse radiolysis study [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, 65(4): 349–355.
- [24] 焦明龙. 碱与臭氧预处理剩余污泥厌氧产气的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Jiao Minglong. The Anaerobic Gas Production of Sludge Treated Byalkali and Ozone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [25] 彭丽, 刘洁玲, 杨志山. 臭氧处理饮用水腐殖酸效果的光谱检测比较研究 [J]. *绿色科技*, 2013(3): 131–133.  
Peng Li, Liu Jieling, Yang Zhishan. Comparative study on the spectral detection of humic acid in drinking water treated by ozone [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2013(3): 131–133 (in Chinese).
- [26] 李超, 张玉琴, 牛康康, 等. 基于紫外吸收光谱法的废硝酸回收工艺研究 [J]. *安徽师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 37(5): 458–461.  
Li Chao, Zhang Yuqin, Niu Kangkang, *et al.* The technical research on waste nitric acid recycling by ultraviolet spectrum [J]. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 2014, 37(5): 458–461 (in Chinese).
- [27] Ahn K H, Park K Y, Maeng S K, *et al.* Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling [J]. *Water Sci Technol*, 2002, 46(10): 71–77.
- [28] Lesslie C P, Grady J R. *Biological Wastewater Treatment* [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1999.



作者简介: 张彦平 (1978 – ), 女, 河北任县人, 博士, 副教授, 主要从事污泥处置与资源化研究。

E-mail: zyphit@163.com

收稿日期: 2019-11-27