

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.002

活性污泥胞外聚合物原位碳源化技术研究进展

王先宝^{1,2}, 张雨笛¹, 张敏婷¹, 谢怡俐¹, 陈甜甜¹, 高楚玥¹,
张安龙^{1,2}

(1. 陕西科技大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 中国轻工业水污染控制
工程技术研究中心, 陕西 西安 710021)

摘要: 我国城镇污水处理厂普遍存在进水碳氮比低的问题,碳源不足直接影响生物系统脱氮除磷效果。随着我国污水处理厂出水排放标准的提高,对生物系统脱氮除磷提出了更高的要求,碳源不足的问题越发突出。胞外聚合物(EPS)是活性污泥的重要组成部分,其中含有大量蛋白质与多糖等有机物。EPS剥离可作为生物脱氮的补充碳源,是解决污水处理厂碳源不足的有效途径。在活性污泥EPS组分与结构解析的基础上,对EPS可生物降解性的研究进行了总结,论述了EPS剥离释碳对污泥生物代谢活性的影响,重点分析了EPS原位释碳模式及原位碳源化对生物脱氮性能的影响,并指出今后的研究方向,以提高EPS碳源在反硝化过程中的利用。

关键词: 活性污泥; 胞外聚合物; EPS可生化性; 原位碳源化; 生物脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0008-06

Research Advance in Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge as In-situ Carbon Source

WANG Xian-bao^{1,2}, ZHANG Yu-di¹, ZHANG Min-ting¹, XIE Yi-li¹,
CHEN Tian-tian¹, GAO Chu-yue¹, ZHANG An-long^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. China Light Industry Water Pollution Control Engineering Research Center, Xi'an 710021, China)

Abstract: Low ratio of carbon to nitrogen in wastewater is a common problem in urban sewage treatment plants in China, which affects the process of nitrogen and phosphorus removal in biological systems. The effluent discharge standards of urban sewage treatment plants in China are becoming stricter, which requires further improvement of nitrogen and phosphorus removal efficiency in biological systems. Therefore, insufficient carbon sources have become a prominent issue. Extracellular polymeric substances (EPS) is the important component of activated sludge, which contains a lot of proteins, polysaccharides and other organic matter. It is an effective way by using EPS exfoliation from activated sludge as the supplementary carbon source for biological nitrogen removal to solve the problem of insufficient carbon sources in sewage treatment plants. Based on the analysis of EPS components and structure in activated sludge, the research on the biodegradability of EPS was summarized. The effect of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52000126)

通信作者: 王先宝 E-mail: wangxianbao@sust.edu.cn

carbon release by EPS exfoliation on the biological metabolic activity of sludge was discussed. The in-situ carbon release mode of EPS and the effect of in-situ carbon source from EPS on biological denitrification performance were analyzed. Moreover, the future research direction was pointed out to improve the utilization of EPS carbon source in the denitrification process.

Key words: activated sludge; extracellular polymeric substances; biodegradability of EPS; in-situ carbon source; biological denitrification

我国城镇污水处理厂主要采用活性污泥处理工艺,生物反硝化脱氮过程需要有机物作为电子供体,污水中碳氮比是影响生物系统脱氮效果的重要因素。有研究对我国785座城镇污水处理厂进行统计,进水 $BOD_5/TKN < 4$ 的污水处理厂高达515座, $BOD_5/TKN < 3$ 的达337座,多数污水处理厂的进水碳源不能满足生物脱氮除磷的需要^[1]。郭泓利等^[2]对我国19个省市的127座污水处理厂进水水质进行了调研,结果显示80%的污水处理厂进水 $BOD_5/TN < 3.6$,进水 $BOD_5/TN > 4$ 的污水处理厂仅占10%。进水碳氮比低对生物系统脱氮效果的影响已经成为我国污水处理厂面临的普遍问题,且南方城市尤为严重。随着我国城市污水处理厂污染物排放标准的逐渐提高,对生物系统脱氮除磷提出了更高的要求,污水中碳源不足的问题越发突出。

外加甲醇等碳源虽然可显著提高生物系统的脱氮效果,但成本较高且会产生大量剩余污泥,增加污泥处置费用,因此污水处理厂污泥内碳源开发利用受到关注。目前,从剩余污泥中回收有机物作为反硝化电子供体主要有污泥发酵产酸^[3-5]与污泥破碎快速释碳^[6-8]两种方式。其中,污泥发酵产酸效率低、投资成本高,污泥破碎需要较高的能量输入,同时两种方式均存在固液分离困难、伴随大量氮磷污染物释放等问题^[3,9]。

EPS是活性污泥絮体内处于细胞外部的聚合物,其组分复杂多变,但以蛋白质与多糖为主。由于EPS具有较高的生物利用潜力,近年来活性污泥EPS中有机成分的回收利用成为研究热点。因此,总结了国内外相关报道,对活性污泥EPS的可生化性、剥离释碳特性及原位碳源化的研究进展进行综述,并指出今后的研究方向,从而促进EPS碳源化技术的推广应用。

1 EPS的组成和结构

活性污泥中的EPS主要来源于细菌的自然分泌

物、细胞裂解和水解产物。碳水化合物和蛋白质通常是EPS的主要成分,此外还存在脂类、核酸、醛酸和一些无机成分。EPS组分受污泥来源及提取方法的影响,以有机成分为主,其中蛋白质和多糖占EPS总量的70%~80%,这为从活性污泥中剥离EPS作为反硝化碳源提供了可能。

活性污泥EPS可分为溶解型EPS(soluble EPS, SEPS)和结合型EPS(bound EPS, BEPS),其中BEPS具有双层结构,又可分为松散附着型EPS(LB-EPS)和紧密黏附型EPS(TB-EPS),逐层提取EPS后,残留的细胞形成了细胞相^[10]。EPS的各组分含量及各组分的功能特点如表1所示。EPS是活性污泥的重要组成部分,其直接影响活性污泥絮体的传质、絮凝、沉降、脱水、稳定性、金属离子吸附和颗粒化等理化特性。

表1 EPS的组分及各组分的功能

Tab.1 Components and properties of EPS

| 组分 | 含量/% | 作用 |
|-----|---------|---|
| 多糖 | 40 ~ 95 | 细菌细胞的黏附、聚集,水的保留,有机和无机化合物的吸附,酶的结合,营养源和对细胞的保护屏障 |
| 蛋白质 | 1 ~ 60 | 细菌细胞的黏附、聚集,水的保留,有机和无机化合物的吸附,酶的结合,营养源和对细胞的保护屏障 |
| 核酸 | 1 ~ 10 | 黏附、细菌细胞聚集、营养源、细胞成分输出、遗传信息交换 |
| 磷脂 | 1 ~ 10 | 污泥絮凝和生物吸附 |
| 腐殖质 | | 污泥吸附,电子供体或受体 |

2 EPS的可生化性

EPS主要由碳水化合物、蛋白质、脂类、核酸和各种复杂聚合物等物质组成,虽然在废水生物处理过程中,降解这些聚合物的酶非常丰富,然而学术界关于EPS可生化性的探讨却经历了漫长的历程。

早期的研究认为EPS的生产菌不能利用其自身的EPS,即EPS不能被其自身的生产者所降解。随

后相关研究提出EPS内存在特定的裂解酶(多聚糖酶或多糖裂解酶),这些酶通常与胞外多糖本身的生物合成有关,这种酶目前已经在许多合成胞外多糖的细菌中被发现,但不允许微生物利用自身的EPS作为碳源。

然而,目前越来越多的研究表明,EPS可以被自己的生产菌所利用。在饥饿状态下,部分EPS可作为碳源或能源被自己的生产菌和其他微生物所利用。不同方法提取的EPS在组分及含量上存在差异,这点在学术界已经达成共识。目前研究发现,提取方法同样会影响活性污泥EPS的可生化性^[11]。Wei等^[11]研究发现,超声法、离子交换树脂法、加热法、氢氧化铵法、甲醛-NaOH法提取的活性污泥EPS的BDOC/DOC比值分别为60.7%、50.7%、49.2%、35.2%和27.6%,与碱提取方法相比,超声法、加热法和离子交换树脂法提取的EPS具有更高的生物降解性。

3 EPS剥离释碳对絮体代谢活性的影响

EPS是活性污泥的主要组成部分,EPS剥离会影响污泥絮体的生物代谢活性。研究表明,在超声处理污泥过程中,污泥破碎程度较低时,污泥比耗氧速率(SOUR)有所增加,破碎程度较高时,污泥代谢活性才明显受到抑制^[12]。Ebenezer等^[13]在研究超声破碎剩余污泥过程中发现,当污泥破碎程度较低时,活性污泥释放的有机物主要来自于EPS剥离而非细菌破壁溶胞作用,Kavitha等^[14]的研究也证实了这一现象。因此通过某种方式可实现活性污泥EPS的剥离,同时又有利于提高活性污泥絮体代谢活性。Zubrowska-Sudol等^[15]研究了污泥破解过程对污泥中硝化菌和反硝化菌活性的影响,当污泥破碎程度较低时,氨氧化速率和反硝化速率分别提高20.2%~41.7%和9.98%~36.3%,该研究指出适量的EPS剥离并不会破坏污泥生物代谢活性,验证了EPS原位剥离释碳的可行性。Liu等^[16-17]利用水力旋流器剥离活性污泥EPS,发现活性污泥SOUR提高了7.17%,当污泥的破碎程度为6.66%~12.25%时,活性污泥的平均反硝化速率提高了14.43%。这主要是由于EPS剥离释放可减少基质向细胞传递的阻力,增大了絮体中基质的传质速率^[18]。

4 EPS剥离原位碳源化研究

4.1 EPS原位释碳利用模式

活性污泥EPS剥离释碳为污水处理厂污泥有机成分的回收利用提供了一种新模式,即在污泥生物代谢活性不受破坏的前提下,将EPS从污泥表面剥离作为碳源用于生物脱氮过程,实现活性污泥EPS原位碳源化。Zubrowska-Sudol等^[15]根据其研究结果提出了两种EPS碳源释放与利用模式,具体如图1所示。具体工艺为:将污泥释碳工艺(作用于部分或全部二沉池回流污泥)直接引入生化处理系统,释放的EPS与污泥直接回流至生化反应池进行利用,该模式适用于各类有二沉池的活性污泥工艺。

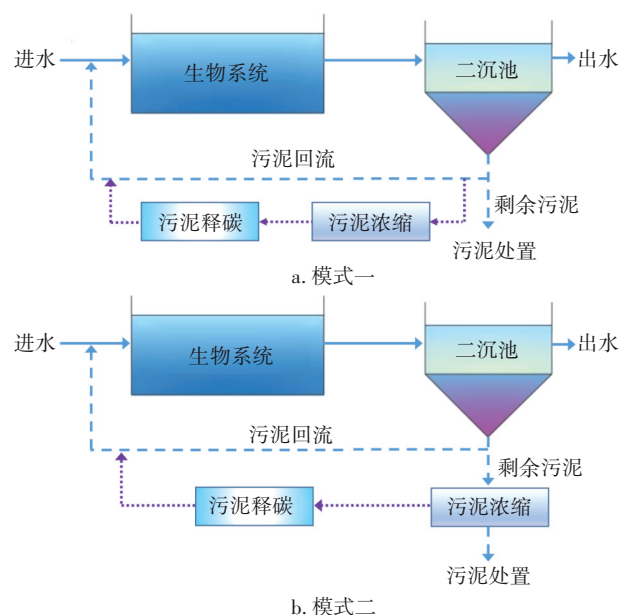


图1 剩余污泥EPS释碳模式

Fig.1 Carbon release mode from EPS of excess sludge

刘毅^[18]研发了适用于活性污泥释碳的旋流器,利用流层间速度差异产生的剪切力与自转离心力剥离絮体EPS释放碳源,并提出了硝化液回流系统污泥旋流释碳强化脱氮新方法,具体模式如图2所示。在A/O工艺好氧池到缺氧池的硝化液回流系统中,利用水力旋流器剥离污泥EPS释放有机物,有机物与代谢活性未受到破坏的污泥一同进入缺氧池,反硝化细菌利用EPS释放的有机物作为电子供体进行生物脱氮反应,实现主流工艺的污泥EPS原位释碳与在线利用^[18]。硝化液回流系统污泥旋流释碳模式只适用于有硝化液回流系统的活性污泥工艺,如A/O或A²/O工艺,而对于无硝化液回流系统的氧

化沟工艺则不适用。

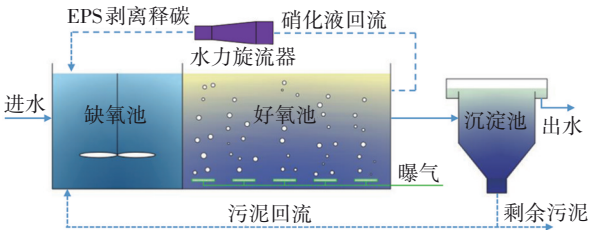


图2 A/O工艺硝化液回流系统污泥水力旋流释碳示意
Fig.2 Schematic diagram of carbon release from return sludge in A/O process by hydrocyclone

4.2 EPS原位碳源化强化脱氮效果

回流污泥水力旋流释碳是EPS原位碳源化的典型模式,表2总结了有关EPS释碳强化生物脱氮的研究进展^[16-23]。

研究^[17]表明,旋流释碳技术使A/O工艺硝化回流液中溶解性COD(SCOD)增加了87.7~244.6 mg/L,缺氧池上清液中SCOD/TN由3.0提高至4.7~5.8,

经过旋流释碳作用,污泥SOUR提高了7.17%,硝酸盐还原酶和亚硝酸盐酶活性则分别提高了15.4%和17.6%,与传统A/O工艺相比,硝酸盐去除率提高了13.6%,TN去除率提高了15.56%。Xu等^[19]通过中试系统考察了旋流释碳A/O工艺对实际污水的处理效果,经过旋流器的释碳作用,回流硝化液中SCOD浓度增加了36.36%,与传统A/O工艺相比,系统出水TN浓度降低了21.5%。同时研究还发现,活性污泥EPS剥离不会增加出水有机物浓度,系统出水SCOD浓度降低12.0 mg/L^[19]。许佳平等^[20-21]设计了装有旋流器的SBR工艺侧流实验,在旋流释碳作用下,活性污泥的SOUR和反硝化速率分别提高了11.1%和6.4%,SBR新工艺对SCOD、氨氮和TN的去除率分别提高6.9%、8.4%和8.9%。方元元^[22]对水力旋流释碳器进行了改进,提出了两种优化方案,旋流器释碳效果有所提高,TN平均去除效率比A/O工艺分别提高了21%和15%。

表2 水力旋流剥离活性污泥EPS强化脱氮研究进展

Tab.2 EPS exfoliation from activated sludge by hydrocyclone to enhance nitrogen removal

| 处理工艺 | 释碳作用 | 运行效果 |
|------------------------|---------------------------------------|---|
| A/O工艺 ^[16] | SCOD增加162.3~298.5 mg/L | 活性污泥反硝化速率提高14.43%,TN去除率由82.7%提高至97.1% |
| A/O工艺 ^[17] | SCOD增加87.7~244.6 mg/L | 活性污泥SOUR提高7.17%,硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶活性分别提高15.4%和17.6%,TN去除率提高15.56% |
| A/O工艺 ^[18] | | 提出回流污泥水力旋流释碳模式 |
| A/O工艺 ^[19] | 回流硝化液中SCOD增加36.36% | 出水TN降低21.5%,出水SCOD减少12.0 mg/L,工艺污泥产量减少35.92% |
| SBR工艺 ^[20] | | 污泥SOUR和反硝化速率分别提高11.1%和6.4%,TN去除率提高8.9% |
| SBR工艺 ^[21] | SCOD增加100 mg/L,多糖和蛋白质分别增加5.0和3.4 mg/L | 污泥SVI降低6.1%,SCOD和TN去除率分别提高6.9%和8.9% |
| A/O工艺 ^[22] | SCOD、多糖和蛋白质分别增加12.5、7.6和2.9 mg/L | TN去除率提高21%,污泥表观产率系数减小0.11 mgMLSS/mgCOD |
| 序批式反应器 ^[23] | SCOD增加4.74~11.67 mg/gMLSS | SV ₃₀ 降低4.48%~5.17%,SVI减小4.48%~8.36%,反硝化速率提高45.5% |

4.3 EPS碳源化对污泥沉降性能的影响

在活性污泥处理系统中,固液分离效果是系统运行过程中的关键问题之一,直接影响出水水质与回流污泥浓度,进而影响活性污泥系统的稳定性。EPS是活性污泥絮体的重要组成部分,直接影响污泥的表面性质与絮凝沉降性能^[24]。刘毅^[18]研究发现,EPS剥离不会破坏污泥絮体的沉降性能,回流污泥经过旋流释碳作用,生物系统污泥容积指数(SVI)及系统出水悬浮物浓度(SS)未发生明显变化。也有研究表明,旋流释碳工艺将EPS剥离后活性污泥絮体粒径减小,但密实度增加,SVI降低6%,系统出水SS减少6.1%^[21]。徐银香^[25]研究发现,与

A/O工艺相比,旋流释碳AO工艺活性污泥沉降比(SV₃₀)降低了19.72%,SVI降低了3.05%。可见,污泥经旋流释碳处理后,不仅可提高生物系统的脱氮效果,还能使污泥沉降性能略有改善。

5 结语

EPS是活性污泥的重要组成部分,其组分复杂多变,但以蛋白质与多糖为主,具有较高的生物利用潜力。通过适当的水力或机械作用,可在污泥生物代谢活性不受破坏的前提下,将EPS从污泥表面剥离释放有机碳源,从而为活性污泥EPS原位碳源化提供可能。水力旋流释碳是EPS原位碳源化的典

型模式, EPS从污泥表面剥离, 不仅通过释放有机碳源、促进污泥代谢活性强化了生物系统脱氮效果, 同时还可提高污泥沉降性能。

EPS原位碳源化可有效解决污水处理厂生物脱氮过程碳源不足的问题, 是污水处理厂污泥内碳源开发利用的一种新模式。目前此方面的研究仍存在以下几个问题: 首先, 活性污泥EPS会吸附一部分磷酸盐, 有利于提高生物除磷效率, 而EPS剥离释放是否会影响生物除磷过程尚不清楚; 其次, 不同类型EPS组分、含量及其在污泥絮体中的作用存在差异, EPS剥离程度会影响释碳效果及污泥代谢活性, 因此EPS剥离程度、释碳效果及生物代谢活性的耦联机制是一个值得研究的课题; 最后, EPS剥离释碳模式是否会影响活性污泥系统微生物群落结构, 尤其是脱氮功能菌群的变化, 有待深入探索。

参考文献:

- [1] 孙永利, 许光明, 游佳, 等. 城镇污水处理厂外加商业碳源的选择[J]. 中国给水排水, 2010, 26(19): 84-86.
SUN Yongli, XU Guangming, YOU Jia, *et al.* Selection of external carbon source for municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(19): 84-86 (in Chinese).
- [2] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, *et al.* Analysis of inlet water quality characteristics of typical urban sewage treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 12-15 (in Chinese).
- [3] FANG W, ZHANG X D, ZHANG P Y, *et al.* Overview of key operation factors and strategies for improving fermentative volatile fatty acid production and product regulation from sewage sludge [J]. Journal of Environmental Science, 2019, 87: 93-111.
- [4] 王先宝, 张雨笛, 马明华, 等. 机械搅拌切割预处理强化污泥发酵产酸性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2020, 38(5): 33-38.
WANG Xianbao, ZHANG Yudi, MA Minghua, *et al.* Improving volatile fatty acids production in sludge fermentation by mechanical cutting pretreatment [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2020, 38(5): 33-38 (in Chinese).
- [5] 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 等. 污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1000-1005.
LUO Zhe, ZHOU Guangjie, LIU Hongbo, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal of wastewater by using sludge anaerobic fermentation liquid as carbon source in a pilot-scale system [J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1000-1005 (in Chinese).
- [6] ZHENG G Y, LU X Q, KATO H, *et al.* Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: current advances, full-scale application and future perspectives [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 559-577.
- [7] ZUBROWSKA-SUDOL M. Carbon source recovery from excess sludge by mechanical disintegration for biological denitrification[J]. Water Science & Technology, 2018, 77: 1942-1950.
- [8] 王先宝, 亓雪菲, 费骄, 等. 剩余污泥机械破碎碳源快速释放与回收技术[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 12-16, 22.
WANG Xianbao, QI Xuefei, FEI Jiao, *et al.* Carbon source release and recovery rapidly from excess sludge by mechanical disintegration [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 12-16, 22 (in Chinese).
- [9] 亓雪菲, 王杰峰, 张雨笛, 等. 微波-机械联合破碎剩余污泥的机制研究[J]. 陕西科技大学学报, 2020, 38(1): 18-24.
QI Xuefei, WANG Jiefeng, ZHANG Yudi, *et al.* Study on the mechanism of microwave-mechanical combination in crushing excess sludge [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2020, 38(1): 18-24 (in Chinese).
- [10] SHI Y H, HUANG J H, ZENG G M, *et al.* Exploiting extracellular polymeric substances (EPS) controlling strategies for performance enhancement of biological wastewater treatments: an overview [J]. Chemosphere, 2017, 180: 396-411.
- [11] WEI L L, WANG K, ZHAO Q L, *et al.* Fractional, biodegradable and spectral characteristics of extracted and fractionated sludge extracellular polymeric substances [J]. Water Research, 2012, 46(14): 4387-4396.
- [12] VAN DE MOORTELE N, VAN DEN BROECK R, DEGREVE J, *et al.* Comparing glow discharge plasma

- and ultrasound treatment for improving aerobic respiration of activated sludge [J]. *Water Research*, 2017, 122: 207–215.
- [13] EBENEZER A V, KALIAPPAN S, KUMAR S A, *et al.* Influence of deflocculation on microwave disintegration and anaerobic biodegradability of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 185: 194–201.
- [14] KAVITHA S, BANU J R, KUMAR J V, *et al.* Improving the biogas production performance of municipal waste activated sludge via disperser induced microwave disintegration [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 21–27.
- [15] ZUBROWSKA-SUDOL M, WALCZAK J. Effects of mechanical disintegration of activated sludge on the activity of nitrifying and denitrifying bacteria and phosphorus accumulating organisms [J]. *Water Research*, 2014, 61: 200–209.
- [16] LIU Y, WANG H L, XU Y X, *et al.* Sludge disintegration using a hydrocyclone to improve biological nutrient removal and reduce excess sludge [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 177: 192–199.
- [17] LIU Y, WANG H L, XU Y X, *et al.* Achieving enhanced denitrification via hydrocyclone treatment on mixed liquor recirculation in the anoxic/aerobic process [J]. *Chemosphere*, 2017, 189: 206–212.
- [18] 刘毅. AOH中碳源释放利用机制及应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- LIU Yi. Experimental Investigation on Sludge Disruption for Organics Release in AOH Process Using a Hydrocyclone and Its Industrial Application [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [19] XU Y X, FANG Y Y, WANG Z H, *et al.* In-situ sludge reduction and carbon reuse in an anoxic/oxic process coupled with hydrocyclone breakage [J]. *Water Research*, 2018, 141: 135–144.
- [20] 许佳平. 剩余污泥旋流分选及利用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- XU Jiaping. Excess Sludge Sorting and Utilization by a Mini-hydrocyclone [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [21] XU J P, SUN Y X, LIU Y, *et al.* In-situ sludge settleability improvement and carbon reuse in SBR process coupled with hydrocyclone [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133825.
- [22] 方元元. 缺氧/好氧工艺回流液旋流释碳机制及应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- FANG Yuanyuan. Study on Carbon-release Mechanism and Application of Recycled Liquid in Anoxic/oxic Process [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [23] XU Y X, WANG H L, WANG Z H, *et al.* Hydrocyclone breakage of activated sludge to exploit internal carbon sources and simultaneously enhance microbial activity [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 651–659.
- [24] CHEN W, GAO X H, XU H, *et al.* Influence of extracellular polymeric substances (EPS) treated by combined ultrasound pretreatment and chemical re-flocculation on water treatment sludge settling performance [J]. *Chemosphere*, 2017, 170: 196–206.
- [25] 徐银香. 活性污泥旋流释碳工艺研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- XU Yinxang. Process Study on the Release of Carbon Sources in the Activated Sludge by a Carbon-release Hydrocyclone [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).

作者简介:王先宝(1986–),男,黑龙江五大连池人,博士,副教授,主要从事污水处理理论与技术研究。

E-mail:wangxianbao@sust.edu.cn

收稿日期:2021-05-14

修回日期:2021-07-14

(编辑:丁彩娟)