

洪猛, 刘素婷, 张静, 等. 连续流好氧颗粒污泥技术处理生活污水的中试[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 98-103.

HONG M, LIU S T, ZHANG J, et al. Pilot on continuous flow aerobic granular sludge technology for treatment of domestic wastewater[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 98-103.

连续流好氧颗粒污泥技术处理生活污水的中试

洪猛¹, 刘素婷¹, 张静², 刘瑞阳^{3,*}, 张凯渊³

(1. 沧州市供水排水集团有限公司, 河北沧州 061000; 2. 河北建投水务投资有限公司, 河北石家庄 050050; 3. 北京华益德环境科技有限责任公司, 北京 100190)

摘要 为了更好地推进连续流好氧颗粒污泥工程化应用, 在河北省某生活污水处理厂进行中试试验, 平均处理水量为 1 743 m³/d, 水力停留时间为 10.80 h。结果表明: 经过 2 个多月的运行, 成功培养出好氧颗粒污泥, 形成的颗粒结构密实, 呈黄褐色, 表面光滑, 污泥有较好的沉降性能; 好氧颗粒污泥在形成过程中可以产生大量的蛋白质(PN)和多糖(PS), PN/PS 由 3.59 增长到 6.88, PN/PS 呈上升趋势, PN 对污泥颗粒化过程起到重要作用; 同时, 好氧颗粒污泥系统对污染物有良好的去除效果, COD_{Cr}、TN、氨氮的平均去除率分别为 89.70%、86.0% 和 98.42%, 有良好的抗冲击能力和脱氮效率。

关键词 连续流 好氧颗粒污泥 生物脱氮 生活污水 中试试验

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)07-0098-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.07.013

Pilot on Continuous Flow Aerobic Granular Sludge Technology for Treatment of Domestic Wastewater

HONG Meng¹, LIU Suting¹, ZHANG Jing², LIU Ruiyang^{3,*}, ZHANG Kaiyuan³

(1. Cangzhou Water Supply and Drainage Group Co., Ltd., Cangzhou 061000, China;

2. Hebei Construction Investment Water Investment Co., Ltd., Shijiazhuang 050050, China;

3. Beijing Huayide Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China)

Abstract In order to promote the engineering application of continuous flow aerobic granular sludge (AGS), a pilot test on AGS was carried out in a WWTP in Hebei Province, the average water treatment volume was 1 743 m³/d, and the hydraulic retention time (HRT) was 10.80 h. The results showed that: after 2 months of operation, the aerobic sludge (AS) could successfully form the AGS with dense structure, yellow brown, smooth surface and good settling performance. AGS could produce more protein (PN) and polysaccharides (PS) during its granulation process, PN/PS increased from 3.59 to 6.88, PN played an important role in sludge granulation process. At the same time, the average removal rates of COD_{Cr}, TN and ammonia nitrogen of the AGS system were 89.70%, 86.0% and 98.42%, respectively, which reflected good impact resistance and nitrogen removal efficiency.

Keywords continuous flow aerobic granular sludge biological denitrification domestic wastewater pilot test

好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)是由微生物自絮凝形成的颗粒状活性污泥, 结构密实, 有良好的沉淀性能, 能大幅度减少反应器容积及占地面积^[1-2]。同时, AGS 独特的结构可实现不同功

能菌共存^[3], 这些功能菌的耦合明显丰富了单级系统内的脱氮途径, 且它们的共生不仅可以提高脱氮效率, 还可降低运行成本^[4]。

目前, 国内外都侧重于将 AGS 与序批式活性污泥法(SBR)反应器结合进行研究^[5], 其中以 Nerada 为代表的工艺已经应用于工程实践中, 但是 SBR 相对适合于小水量废水的处理^[6], 事实上国内大部分水厂为连续流处理系统, 连续流 AGS 技术应用场景更为广泛。贺向峰等^[7]采用沉淀一体式低高径比

[收稿日期] 2022-12-04

[作者简介] 洪猛(1987—), 男, 工程师, 主要从事污水处理相关工作, E-mail: 919064203@qq.com。

[通信作者] 刘瑞阳(1994—), 女, 工程师, 主要从事好氧颗粒污泥相关研究工作, E-mail: liuruiyang0903@163.com。

反应器(UOSB)耦合二沉池的连续流系统(UOSB-ST),在表观气体流速为0.31 cm/s时,通过施加选择作用就可以实现絮状污泥的好氧颗粒化;鲁磊等^[8]在连续流合建式反应器中接种成熟AGS,处理低碳氮比(C/N)的实际生活污水,反应器对COD、TN和TP去除率分别为76.34%、51.23%和53.70%。然而,连续流AGS的研究大都停留在实验室阶段,多采用人工模拟废水进行处理,将连续流AGS应用于实际生产的实例还未见报道,在工程应用上仍面临挑战^[8]。

本研究选择河北省某生活污水处理厂为试验场地,采用连续流AGS工艺,研究在连续进水条件下,颗粒形成的可行性,以及AGS在水质波动、水量冲击等因素下的系统稳定性,为连续流AGS在工程上的应用提供理论和实践支撑。

1 材料与方法

1.1 中试工程概况

试验场地为河北省某生活污水处理厂,该水厂的现

有处理工艺为AAO,水力停留时间(HRT)为17.72 h。生物池主要去除COD_{Cr}、TN、氨氮,除磷在后续的絮凝沉淀池完成,出水排放标准执行河北省《黑龙港及运东流域水污染物排放标准》(DB 13/2797—2018)中对重点控制区排放限值的相关要求。

本中试工程在原生物池内隔出部分池容做反应器,进行连续流AGS培养,反应池容积为780 m³,平均处理水量为1743 m³/d,HRT为10.8 h。中试工程接种污泥为该水厂原AAO生物池内的絮状活性污泥,污泥质量浓度(MLSS)为3~4 g/L,污泥体积指数(sludge volume index, SVI)为100~150 mL/g。

该污水处理厂收集的污水类型以生活污水为主,含辖区内部分工业污水,BOD₅/COD_{Cr}为0.5,且进水水质浓度波动较大。实际进水水质浓度及参数如表1所示。进水TN浓度较高,COD_{Cr}/TN平均值约为2.81,进水水质属于低C/N水质^[9]。碳源为25%乙酸钠溶液,投加碳源后COD_{Cr}/TN在2.95~5.89,平均值为4.11。

表1 污水厂实际进水及设计出水水质

Tab. 1 Actual Influent and Design Effluent Water Quality of WWTP

项目	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} /TN	投加碳源后 COD _{Cr} /TN
实际进水	78.4~280.8	26.1~81.0	36.2~90.0	2.17~3.73	2.95~5.89
实际进水平均值	191.3	58.7	68.6	2.81	4.11
设计出水	40	2	15	-	-

1.2 检测分析项目与方法

COD_{Cr}采用重铬酸钾消解法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法,TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,MLSS和SVI均采用标准方法测定^[10-11]。蛋白质测定采用Folin-酚试剂法,多糖测定采用苯酚-硫酸法^[12]。采用激光粒度仪(LS13320, Beckman)测定AGS的粒径分布,采用扫描电子显微镜(SEM, SU8010, Hitachi)分析AGS表观结构。

2 结果与讨论

2.1 污泥颗粒化过程分析

根据AGS的定义,一般认为污泥粒径大于200 μm为颗粒污泥,否则为絮状污泥^[12]。与絮状污泥相比,AGS结构紧凑,SVI比较低,具有明显的沉降优势^[13]。SVI是衡量污泥颗粒化的重要指标,一般来说,AGS的污泥体积分数为15%~30%,SVI值为30~50 mL/g^[14],明显低于絮状污泥的SVI(100~200 mL/g)。

中试反应器采用连续进水的形式,反应器底部布置曝气器,分为反应区和好氧区,控制反应区DO质量浓度为0.2~1.0 mg/L,好氧区DO质量浓度为2.0 mg/L,接种污泥为污水厂原AAO生物池内絮状活性污泥,MLSS为3~4 g/L,SVI值为100~150 mL/g,粒径分布如表2所示。在反应器运行过程中,MLSS、SVI值、污泥外观形态及污泥微观结构也不断变化,本研究MLSS、SVI随运行时间变化如图1所示,系统启动运行25 d,MLSS基本没有增加,SVI呈逐步降低趋势,至第25 d,系统SVI降低到80 mL/g;系统启动运行第25~45 d,SVI值降低速度减缓,稳定在60~80 mL/g,表明污泥已逐渐形成颗粒。通过粒度分析仪对污泥的粒径进行分析,污泥平均粒径为98.1 μm,其中粒径在100~200 μm的占38.60%,粒径大于200 μm的占9.78%,颗粒污泥粒径显著大于絮状污泥。系统启动运行40~60 d后,SVI持续降低,在50 mL/g上下波动,与国内外其他

相关研究的 SVI 基本一致^[14],污泥有较好的沉降性能,此时粒径在 100~200 μm 的占 36.59%,粒径大于 200 μm 的占 10.92%,表明颗粒化比例达到 10.92%。系统启动运行 60~80 d 后,SVI 持续降低,达到一个较低水平,在 50 mL/g 上下波动,污泥有较好的沉降性能,此时粒径在 100~200 μm 的占 43.60%,粒径大于 200 μm 的占 15.27%,粒径小于 100 μm 的污泥占比逐渐减少。

表 2 AGS 粒径分布

Tab. 2 Granular Size Distribution of AGS

时间/d	<100 μm 颗粒占比	100~200 μm 颗粒占比	$\geq 200 \mu\text{m}$ 颗粒占比
0(接种絮状污泥)	96.05%	3.28%	0.64%
40	51.62%	38.60%	9.78%
60	52.48%	36.59%	10.92%
80	41.43%	43.60%	15.27%

运行期间系统内的 AGS 所占比例持续增加,颗粒化比例最高达 15.27%。虽然本研究整体颗粒化比例,低于实验室基于连续流人工配水小试研究的颗粒化比例^[7],但本研究作为实际生产的中试研究,在连续进水的条件下,成功培养出 AGS,实现颗

粒化,为连续流 AGS 在工程上的应用提供了理论和实践支撑,后续研究需进一步提升工程应用的颗粒化比例,优化处理工艺提升处理效率。

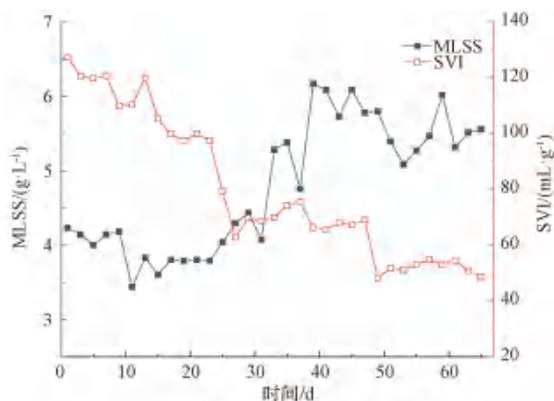


图 1 系统内 MLSS、SVI 随运行时间变化

Fig. 1 Changes of MLSS and SVI in the System with Running Time

2.2 微观结构分析

为了探究中试连续流 AGS 的形态和结构,系统启动运行 60 d,从反应器中获取污泥样品并采用 SEM 进行观察,结果如图 2 所示,AGS 整体呈黄褐色,大多是球形或椭圆形,表面光滑。

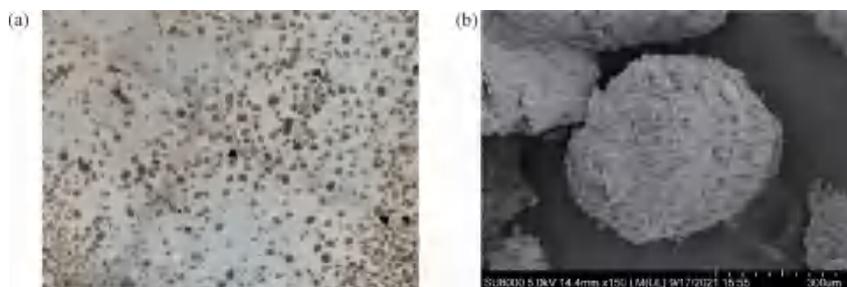


图 2 形成的(a) AGS 照片及(b)SEM 照片

Fig. 2 Photos of (a) Formed AGS and (b) SEM Photos

SEM 进一步揭示了本研究培养的 AGS 的微观形貌,可以看出 AGS 为椭圆形结构,粒径约为 500 μm ,生物量大,颗粒表面附着大量的杆状菌、丝状菌、球状菌,具有明确的物质传输通道^[15]。

研究^[8]表明,AGS 中蛋白质 (protein, PN) 与多糖 (polysaccharide, PS) 的含量及比值对 AGS 的形态及稳定起重要作用。本研究进一步测定了絮状污泥及 AGS 中 PN 和 PS 的含量,其中接种的絮状污泥,PN 和 PS 的质量分数分别为 25.5 mg/g 和 7.10 mg/g,经过 60 d 的运行,PN 和 PS 分别达到了 50.08 mg/g 和 7.41 mg/g,可见颗粒化过程中,PN 增长较多,而 PS 增长缓慢,因此,PN 对污泥颗粒化

过程起到重要作用。

颗粒污泥在形成的过程中,分泌大量的 PN 来改善污泥疏水性能,提高结构的稳定性^[8,16],本研究絮状污泥 PN/PS 为 3.59,AGS 中 PN/PS 为 6.88,随着颗粒的形成,PN/PS 呈上升趋势,有利于颗粒污泥的稳定。

2.3 污染物去除结果分析

本研究进水为生活污水,平均进水量为 1 743 m^3/d ,HRT 为 10.80 h。实际进水量、停留时间变化曲线如图 3 所示,系统启动运行 10 d 后逐渐增加处理水量至 1 800 m^3/d ,最大处理水量为 1 965 m^3/d ,最小 HRT 为 9.51 h,出水水质始终满足排放标准的

要求。污水厂现有的 Bardenpho+移动床生物膜反应器(MBBR)生物池停留时间为 17.72 h,在同一进出水水质条件下,中试研究的容积负荷是传统工艺的 1.64 倍,表明 AGS 工艺处理效率高干传统活性工艺,可以大幅缩短停留时间,节约占地。

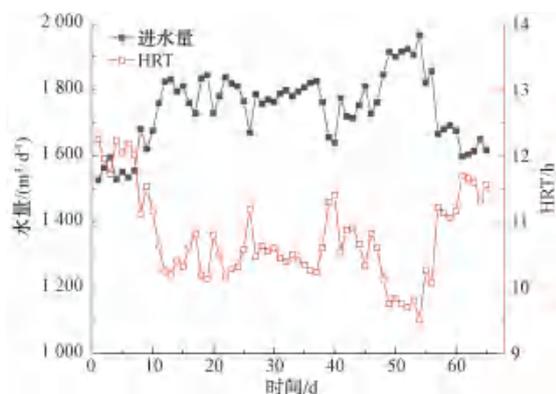


图3 中试试验进水量及 HRT 变化

Fig. 3 Changes of Influent Quantity and HRT in Pilot Test

为研究中试运行过程中的各污染物去除情况,测定了进出水中的 COD_{Cr}、氨氮及 TN 浓度。COD_{Cr} 进出水浓度及去除率如图 4 所示,试验期间,进水 COD_{Cr} 水质波动较大,质量浓度在 78.4~280.8 mg/L,平均进水 COD_{Cr} 质量浓度约为 191.3 mg/L,加碳源后实际进水平均 COD_{Cr} 质量浓度为 281.8 mg/L。系统启动 45 d 后进入雨季,COD_{Cr} 浓度大幅度降低,进水质量浓度为 150 mg/L 左右。可以看出,AGS 对 COD_{Cr} 有很好的去除效果,出水 COD_{Cr} 平均质量浓度为 27 mg/L,整体出水质量浓度稳定在 40 mg/L 以下,达到排放要求,平均去除率为 89.70%。

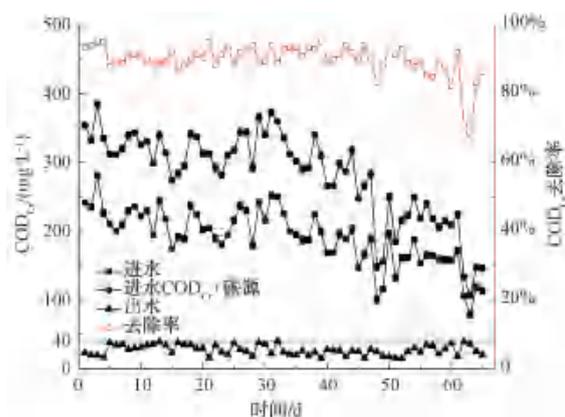


图4 中试 COD_{Cr} 进出水浓度变化

Fig. 4 Changes of Influent and Effluent COD_{Cr} in Pilot Test

氨氮、TN 进出水浓度及其去除率如图 5 所示。进水氨氮质量浓度波动较大,为 26.1~81.0 mg/L,平均进水质量浓度约为 58.7 mg/L,经处理后,出水质量浓度稳定在 2 mg/L 以下,平均出水氨氮质量浓度为 0.89 mg/L,平均去除率为 98.42%,表明该系统对氨氮有较好的去除效率。进水 TN 质量浓度波动较大,为 36.2~90.0 mg/L,平均进水质量浓度约为 68.6 mg/L,虽然进水 TN 浓度波动较大,但是出水曲线相对平稳,出水平均质量浓度为 9.13 mg/L,平均去除率为 86.0%。

由图 6 可知,进水 COD_{Cr}/TN 平均值为 2.81,投加碳源后 COD_{Cr}/TN 在 2.95~5.89,平均值为 4.11,仍属于低 COD_{Cr}/TN 水质^[9]。本研究进水 TN 波动较大,平均去除率为 86.0%,表明即使在进水低 COD_{Cr}/TN 条件下,AGS 依旧对 TN 有较好的去除效率,可能是由于其特殊的分层结构,为各种不同类型

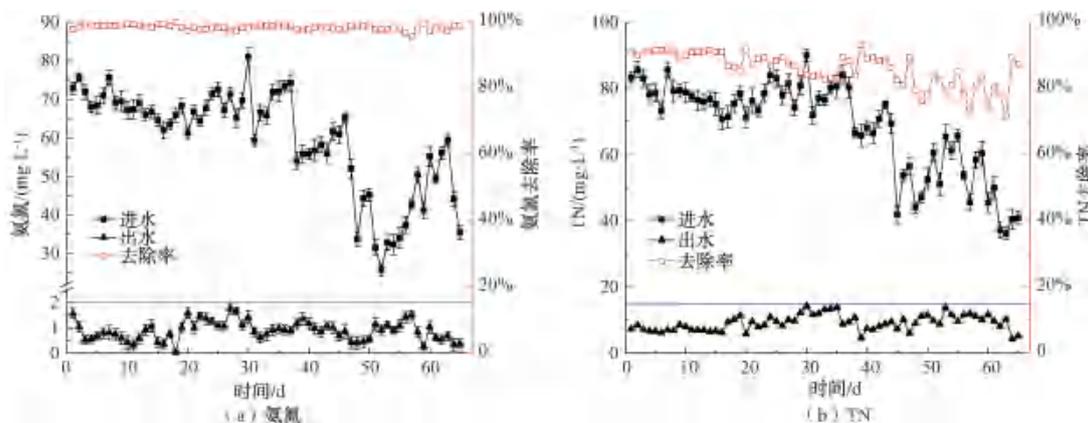


图5 中试氨氮、TN 进出水浓度及其去除率变化

Fig. 5 Changes of Influent and Effluent and Removal Rate of Ammonia Nitrogen and TN in Pilot Test

的功能菌提供良好的生长环境,在这些功能菌的联合作用下,发生同步硝化反硝化反应,提高 TN 的去除率^[4]。因此,相比于传统工艺,AGS 能够进行同步硝化反硝化反应,体现出 AGS 系统良好的抗冲击能力和脱氮效果。

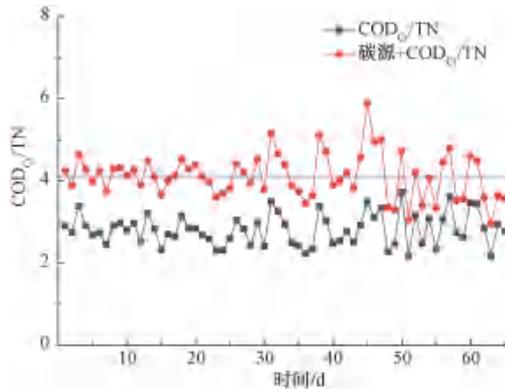


图 6 中试进水 COD_{Cr}/TN 变化

Fig. 6 Changes of Influent COD_{Cr}/TN in Pilot Test

3 结论

(1)中试在连续流进水的条件下,接种普通絮状活性污泥,经过 2 个多月的运行,成功培养出 AGS,颗粒化比例达到 15.27%。形成的颗粒结构密实,呈黄褐色,表面光滑。颗粒污泥有较好的沉降性能,MLSS 为 6 g/L,SVI 为 40~50 mL/g。

(2)运行期间,随着 AGS 的形成,PN 和 PS 质量分数分别由 25.5 mg/g 和 7.10 mg/g 增长到 50.08 mg/g 和 7.41 mg/g,PN/PS 由 3.59 增长到 6.88,PN/PS 呈上升趋势,PN 对污泥颗粒化过程起到重要作用。

(3)本研究采用实际生活污水进行中试试验,平均处理水量为 1 743 m^3/d ,HRT 为 10.80 h,实际处理最大处理水量为 1 965 m^3/d ,最小 HRT 为 9.51 h。AGS 系统对污染物去除效果较好, COD_{Cr} 、TN、氨氮的平均去除率分别为 89.70%、86.0%和 98.42%。进水水质波动较大,系统有较强的抗冲击负荷能力。

参考文献

[1] JAHN L, SVARDAL K, KRAMPE J. Comparison of aerobic granulation in SBR and continuous-flow plants[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 953 - 961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.101.
[2] BASSIN J P, KLEEREBEZEM R, DEZOTTI M, et al. Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular

sludge reactors operated at different temperatures [J]. Water Research, 2012, 46(12): 3805-3816.
[3] NANCHARAI AH Y V, REDDY G K K. Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications [J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1128 - 1143. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.131.
[4] KISHIDA N, KIM J, TSUNEDA S, et al. Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. Water Research, 2006, 40(12): 2303-2310.
[5] HE Q L, CHEN i L, ZHANG S J, et al. Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2018, 271: 48-58. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.102.
[6] 闻香兰,但昭和. 好氧颗粒污泥的连续化研究进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(11): 4059-4064.
WEN X L, DAN Z H. Advances in continuity of aerobic granular sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(11): 4059-4064.
[7] 贺向峰,袁林江,陈希,等. 新型好氧连续流反应器对活性污泥颗粒化的研究 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 112-120.
HE X F, YUAN L J, CHEN X, et al. Study on granulation of activated sludge with a novel aerobic continuous flow reactor [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7): 112-120.
[8] 鲁磊,信欣,鲁航,等. 连续流好氧颗粒污泥系统处理低 COD/N 实际生活污水的工艺优化 [J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3778-3785.
LU L, XIN X, LU H, et al. Process optimization of continuous aerobic granular sludge system for treatment of low COD/N actual domestic sewage [J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3778-3785.
[9] 宋响达,张丽丽,苏本生,等. 好氧颗粒污泥处理低碳氮比实际生活污水的运行效能 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 2999-3006.
SONG Y D, ZHANG L L, SU B S, et al. Performance and analysis of aerobic granular sludge treating actual domestic sewage with low C/N ratios [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 2999-3006.
[10] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration, State Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plants: GB 18918—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
[11] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污泥检验方法:

- CJ/T 221—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Determination method for municipal in wastewater treatment plants: CJ/T 221—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [12] LIU H, FANG H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 95(3): 249-256.
- [13] COMA M, VERAWATY M, PIJUAN M, et al. Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 103(1): 101-108.
- [14] REGMI P, STURM B, HIRIPITIYAGE D, et al. Combining continuous flow aerobic granulation using an external selector and carbon-efficient nutrient removal with AvN control in a full-scale simultaneous nitrification-denitrification process [J]. *Water Research*, 2022, 210(15): 117991. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117991.
- [15] 宋昀达. 好氧颗粒污泥处理低碳氮比实际市政污水脱氮除磷性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
SONG Y D. Study on nitrogen and phosphorus removal performance of aerobic granular sludge treating municipal sewage with low C/N ratios [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [16] 王玉莹, 支丽玲, 马鑫欣, 等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物组分特征分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 153-160.
WANG Y Y, ZHI L L, MA X X, et al. Characterization of extracellular polymeric substances from aerobic granular sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 153-160.

(上接第 39 页)

- SUN R R. Remediation of organic contaminated sites by electrokinetic-enhanced groundwater circulation well [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [33] 王战强. 地下水曝气(As)及生物曝气(Bs)处理有机污染物的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
WANG Z Q. Study on organic contaminants removal using air sparging and biosparging [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [34] 刘晓娜, 程莉蓉. 地下水曝气技术(AS)的国内外研究进展[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(5): 56-62.
LIU X N, CHENG L R. Development of air sparging at home and abroad[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(5): 56-62.
- [35] 孟庆玲. 空气曝气和生物曝气技术修复石油类污染地下水的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
MENG Q L. Study on remediation of petroleum contaminated groundwater using air-sparging and bio-sparging [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [36] 武倩倩. 土壤中多氯联苯的洗脱-曝气修复及数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
WU Q Q. Study on elution-as remediation and numerical simulation of PCBs in soil [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [37] 刘亚敏, 孙翠珍. 纳米气泡的特性及其在水处理中的应用[J]. *净水技术*, 2020, 39(5): 160-163.
LIU Y M, SUN C Z. Characteristics of nanobubbles and the application in water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(5): 160-163.
- [38] CHOI Y J, KIM Y J, NAM K. Enhancement of aerobic biodegradation in an oxygen-limiting environment using a saponin-based microbubble suspension [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8): 2197-2202.
- [39] 李恒震. 微纳米气泡特性及其在地下水修复中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
LI H Z. Micro-nano bubbles characteristics for potential application in groundwater remediation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [40] 刘铨. 铁系物 PRB 处理地下水污染性能及其影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
LIU Q. Removal efficiency and influence factor of iron series PRB for the treatment of groundwater pollution [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [41] 覃海富, 张卫民, 马文洁, 等. PRB 技术修复地下水硝酸盐污染研究进展[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(8): 65-68.
QIN H F, ZHANG W M, MA W J, et al. A review of research on nitrate contamination of groundwater by PRB [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(8): 65-68.