

Pilot Study on Low Temperature Stability of Aerobic Granular Sludge

van Loosdrecht, Mark C.M.; Hao, Xiaodi; Wu, Yuanyuan

DOI

[10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.010](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.010)

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

Zhongguo Geshui Paishui (China Water & Wastewater)

Citation (APA)

van Loosdrecht, M. C. M., Hao, X., & Wu, Y. (2022). Pilot Study on Low Temperature Stability of Aerobic Granular Sludge. *Zhongguo Geshui Paishui (China Water & Wastewater)*, 38(11), 56-61. Article 10. 19853/j.zgjsps. 1000-4602. 2022. 11. 010. <https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.010>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.010

好氧颗粒污泥低温稳定性中试研究

吴远远¹, Mark van Loosdrecht², 郝晓地³, 翟学棚¹, 许雪乔¹,
林甲¹, 江瀚¹

(1. 北京首创股份有限公司中-荷未来污水处理技术研发中心, 北京 100044; 2. 代尔夫特理工大学, 荷兰; 3. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖中心, 北京 100044)

摘要: 好氧颗粒污泥技术具有占地面积小、能耗低、剩余污泥量少、抗冲击性强等优点, 是一种可持续的污水处理技术。以北京某污水处理厂实际生活污水作为基质, 在中试规模(有效容积为 2.5 m³)反应器中进行好氧颗粒污泥培养, 研究了颗粒污泥在低温条件下的稳定性。中试自夏季开始运行到次年春季结束, 共计运行 260 d。结果表明, 采用我国实际低碳源市政污水可以培养出好氧颗粒污泥, 污泥颗粒化程度可达 94%, SVI₅/SVI₃₀ 为 1.1~1.3。冬季低温会造成颗粒污泥的枝状结构增多、丝状菌生长, 进而引起颗粒化比例略有下降, 为 80%~91%, 污泥平均粒径降低, SVI₅/SVI₃₀ 升高至 1.5~1.8。在冬季低温条件下, 通过优化调控进水流量、曝气时长、曝气过程 DO 浓度可提高脱氮效率。中试期间各阶段反应器出水 COD、TP、NH₄⁺-N 以及 TN 均可以满足 GB 18918—2002 的一级 A 排放标准, 但是低温条件下 TN 去除率略有下降(降幅为 6%~9%), 存在一定超标风险。

关键词: 好氧颗粒污泥; 低碳源进水; 颗粒化; 低温; 营养物去除

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0056-06

A Pilot Study on Stability of Aerobic Granular Sludge at Low Temperature

WU Yuan-yuan¹, Mark van Loosdrecht², HAO Xiao-di³, ZHAI Xue-peng¹,
XU Xue-qiao¹, LIN Jia¹, JIANG Han¹

(1. Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Delft University of Technology, the Netherlands; 3. Beijing Advanced Innovation Centre of Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Aerobic granular sludge (AGS) is widely considered as a sustainable technology for wastewater treatment due to the great advantages over conventional activated sludge: low footprint, low energy consumption, low disposed sludge and high tolerance to the fluctuations etc. A pilot reactor (effective volume of 2.5 m³) was operated for 260 days to cultivate the AGS with actual municipal wastewater and investigate the influence of low temperature on the stability of AGS. The reactor was started in summer, and finally a high granulation rate of 94% was realized with a low SVI₅/SVI₃₀ of 1.1-1.3, which indicated a mature granular system. However, granulation rate slightly decreased to 80%-91% with SVI₅/SVI₃₀ increasing to 1.5-1.8 while *Zoogloea ramigera*, filamentous grew at low temperature condition. Under low temperature conditions in winter, nitrogen removal efficiency was improved by

通信作者: 吴远远 E-mail: wuyuan@capitalwater.cn

adjusting influent flow rate, aeration duration and DO concentration. The effluent COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN could meet the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) during the whole experiments, however the TN removal efficiency slightly decreased (almost 6%-9%) which indicated a risk of exceeding the standard.

Key words: aerobic granular sludge (AGS); low-carbon source sewage; granulation; low temperature; nutrient removal

好氧颗粒污泥具有占地面积小、能耗低、剩余污泥量少、抗冲击性强等优点,是一种可持续污水处理技术^[1-2]。目前,好氧颗粒污泥在全世界范围内的工程应用案例逐渐增多,但仍旧远远低于厌氧颗粒污泥技术^[3]。经过近30年的研究,好氧颗粒污泥的工艺过程影响因素和快速启动培养方法已有较大突破^[4]。然而,对好氧颗粒污泥技术稳定性的研究仍较少,实为限制其广泛应用的核心问题^[5]。

Franca 等人^[5]曾总结影响好氧颗粒污泥稳定性的因素,认为颗粒稳定性与反应器运行工况有关,主要包括有机负荷(OLR)、食物与污泥比(F/M)、有机底物类型、进水C/N值、充氧速率、毒性物质、底物丰盛-匮乏机制、厌氧历时以及温度等。好氧颗粒污泥为层状结构,各层的微生物菌群共同组成稳定的颗粒污泥微生态系统。保持各层微生物菌群类型及其生长平衡状态是保证颗粒污泥稳定性的根本基础。其中,温度是影响颗粒污泥稳定性的最关键因子,因为它决定着微生物活性和生长速率。

在北方冬季时节,污水厂水温可低至10~13℃。de Kreuk 等^[6]用乙酸钠作为进水碳源进行研究,发现在8℃低温条件下培养得到的颗粒污泥不规则、不稳定、易流失。Xu 等^[7]研究表明,在低温条件下絮状污泥会大量生长而影响污泥颗粒化,筛选并去除絮状污泥是提高颗粒污泥稳定性的关键。此外,低温会导致硝化速率降低,致使氧气在颗粒污泥内部扩散深度加大而导致缺氧环境的有效体积降低,进而引起低温下反硝化脱氮效率降低^[7-10]。

吴远远等^[4]用我国典型低碳源生活污水,在中试反应器中成功培养出好氧颗粒污泥,且出水水质满足一级A排放标准。然而,低碳源污水培养的颗粒污泥相对于中、高碳源浓度污水培养的好氧颗粒污泥,颗粒粒径普遍偏小(<1.0 mm),其密度也不高^[3-4]。低温是否会对此类好氧颗粒污泥的稳定性和处理效果产生更加不利的影响,目前尚未有研

究。基于此,采用中试反应器对上述问题进行研究。首先,夏、秋两季采用低碳源浓度实际生活污水进行好氧颗粒污泥培养和运行优化,再以此为基础,在低温条件下研究低温对颗粒污泥稳定性与处理效果的影响。

1 材料与方法

1.1 中试装置

中试装置为不锈钢圆柱体结构, $D \times H = 0.8 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$,有效体积为2.5 m³。中试反应器示意图1,包含进水泵、鼓风机、溢流口、排水阀、排泥口以及其他电动阀门。反应器采用PLC控制系统实现序批式自动运行,通过PID(比例-积分-微分)控制器调节进水泵以及鼓风机频率,将反应器内的DO浓度精准控制在1.5~3.0 mg/L之间。反应器安装有温度计、流量计、液位计、溶解氧仪、氧化还原电位电极、浊度计、电导率仪、磷酸根检测仪、硝酸根检测仪等在线仪表。

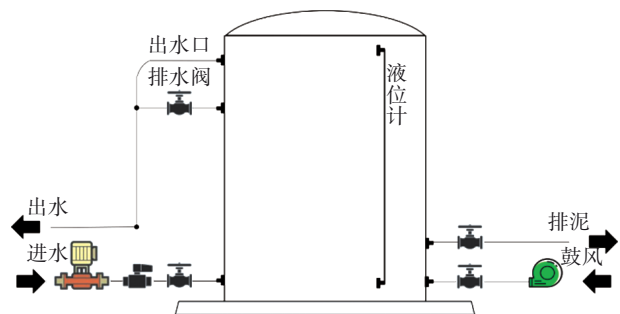


图1 中试反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot reactor

1.2 进水水质

以北京某生活污水处理厂作为中试场地,每日上午08:00从集水井抽取反应器一天所需进水量(平均为6.5 m³/d),存入储水池备用。反应器进水经毛发过滤器过滤后,由进水泵从反应器底部泵入。中试反应器进水水质如下:COD_t为(162.9±48.1) mg/L, COD_s为(78.8±34.4) mg/L, TN(以N

计)为 (25.3 ± 5.9) mg/L, NH_4^+-N (以N计)为 (18.2 ± 5.7) mg/L, TP(以P计)为 (2.7 ± 1.1) mg/L, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ (以P计)为 (1.6 ± 0.8) mg/L, $\text{BOD}_5/\text{COD}_t$ 值为0.36。

1.3 运行方案

中试反应器自2019年夏季开始运行,至2020年春季结束,共计260 d。冬季运行时,所有水管、泥管均缠绕伴热带加热,以防止管道结冰。中试反应器采取序批方式运行,每天运行5~7个周期,每个运行周期包含4个步骤:进水/出水→排水→曝气→沉淀。在反应器底部进水的同时,顶部溢流水。在曝气前打开排水阀,进行排水以降低液面约20 cm。每个运行周期内,控制各步骤时间为:进水60 min、排水15~20 s、曝气120~200 min、沉淀12~25 min,总时间195~285 min。反应器水力停留时间(HRT)介于6.2~13.4 h之间,平均为9.5 h;COD容积负荷为0.30~0.66 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,平均为0.42 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;污泥停留时间(SRT)介于15~45 d。接种污泥为试验污水处理厂脱水污泥,含水率为82%, SVI_{30} 为160~200 mL/g。

1.4 分析方法

1.4.1 常规分析

日常分析项目包括水质指标: COD_t 、 COD_s 、 NH_4^+-N 、TN、TP和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$;污泥指标: MLSS、MLVSS、 SVI_5 、 SVI_{30} 。所有指标均根据国家标准方法进行测定。

1.4.2 颗粒污泥比例

曝气步骤开始1 min后,从反应器中部用深水取样器取出550 mL混合液,通过0.2 mm滤筛筛分后测干质量。根据文献,粒径 ≥ 0.2 mm的污泥颗粒便可定义为颗粒污泥^[8],因此颗粒污泥的比例为粒径 ≥ 0.2 mm的污泥干质量与总污泥干质量的比值。

1.4.3 粒径分布

曝气步骤开始1 min后,从反应器中部用深水取样器取混合液,之后采用激光粒度仪测定粒径分布,仪器的测量范围为1~2 000 μm 。采用 $d(0.1)$ 、 $d(0.5)$ 、 $d(0.9)$ 分别表示粒度累积分布(0~100%)中10%、50%和90%所对应的颗粒粒径。

1.4.4 污泥形态观察

从反应器中取新鲜污泥,进行微生物形态显微镜(ZEISS Axio Scope A1)观察,并进行图像计数分析(ZEN 2.3, Carl Zeiss Microscopy GmbH)。采用革兰氏染色法观察丝状菌状态。

2 结果与讨论

2.1 低温对污泥颗粒化的影响

整个中试运行期间反应器内水温随气温的变化而变化,先升高后逐渐降低,变化范围为24.9~12.1 $^{\circ}\text{C}$ 。整个运行过程可分为3个阶段,阶段一:夏季(1~110 d),以促进污泥颗粒化、实现好氧颗粒污泥积累为目标,此阶段反应器内水温为24.9~19.1 $^{\circ}\text{C}$;阶段二:秋季(111~199 d),以优化运行实现稳定一级A出水为目标,此阶段反应器内水温为22.6~14.5 $^{\circ}\text{C}$;阶段三:冬季(200~260 d),研究低温条件下颗粒污泥的性能变化和出水达标控制策略,此阶段反应器内水温为14.9~12.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

整个运行期间颗粒污泥比例与污泥浓度变化情况如图2所示。在运行阶段一,通过降低沉淀时间、增大进水流速的方式来提高选择压力,同时降低周期时间以及增大进水置换比的方式增大容积负荷,促进好氧颗粒污泥形成和积累^[9]。启动运行10 d后,反应器内颗粒污泥比例已达38.8%,但在1~50 d,颗粒污泥比例波动较大,主要是因为此时形成的颗粒污泥粒径较小,难以靠沉淀性能差距与絮状污泥完全区分开来,排泥筛选颗粒时容易造成颗粒流失。50 d以后,颗粒污泥比例逐渐升高,到106 d时已达64%。

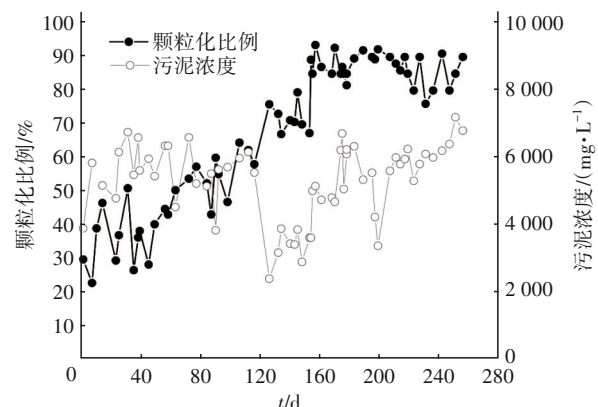


图2 中试期间污泥颗粒化程度与污泥浓度变化

Fig.2 Changes of granular degree and biomass concentration during pilot test

沉淀性能是指示颗粒化程度的重要指标,颗粒污泥沉淀速度远远高于絮状污泥。通常用 SVI_5 以及 $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 值表征颗粒化水平^[5]; $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 值 >1 ,这是由于污泥系统中存在一定量的悬浮物质(如进水中的悬浮颗粒物、脱落的颗粒污泥碎片、在聚合

基质上生长的微生物)所致。 SVI_5/SVI_{30} 越小,说明颗粒的紧密度越高、沉淀性能越好、颗粒化水平越高,且出水SS浓度越低。通常认为 SVI_5/SVI_{30} 值 ≤ 1.2 时^[6],反应器全部实现颗粒化。

整个运行期间污泥沉淀指数变化见图3。阶段一结束时(110 d),反应器内污泥的 SVI_5 与 SVI_{30} 分别为43.3、36.1 mL/g, SVI_5/SVI_{30} 值=1.2,颗粒化比例达64%,说明此时即使是未完全颗粒化的絮状污泥也具有很好的沉淀性能。在阶段二的初期(111~130 d),通过选择性排出污泥的方式筛选颗粒污泥,在污泥浓度降低的同时,颗粒化比例逐渐上升至75%左右;130 d之后,颗粒化比例进一步上升并稳定在85%~94%;至183 d,污泥浓度达到5 672 mg/L;此后(183~199 d),依旧期望通过选择性排出污泥方式进一步提高颗粒化比例,但是颗粒化比例没有明显变化,这可能是因为颗粒化程度已经很高(超过90%),因此选择性排泥方式效果不明显,反而排泥致使污泥浓度大幅下降。整个阶段二运行过程中, SVI_5/SVI_{30} 值极低,一直稳定在1.1~1.3之间,标志着颗粒污泥进入成熟阶段。在阶段三过程中(200~260 d),反应器水温 $<14\text{ }^\circ\text{C}$,颗粒化比例有所下降且波动较大,介于80%~91%之间,颗粒污泥浓度逐渐上升至7 200 mg/L(平均浓度为6 108 mg/L)。相较于阶段二,污泥的 SVI_{30} 基本保持不变,但是 SVI_5 和 SVI_5/SVI_{30} 值不断增大,最终稳定在1.5~1.8。 SVI_5/SVI_{30} 升高的主要原因可能包括:①絮状污泥生长;②颗粒污泥解体-生长循环,致使系统出现污泥碎片;③丝状菌增多,沉淀性能变差;④颗粒污泥形态结构发生变化。

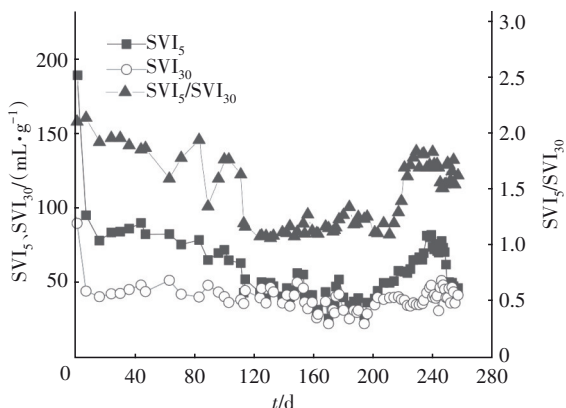


图3 中试期间污泥沉淀性能的变化

Fig.3 Changes of sludge settling indexes during pilot test

整个运行过程中,反应器内混合污泥的粒径分布及污泥性质变化如表1所示。在运行初期(5 d),反应器内污泥平均粒径为0.15 mm,颗粒化比例为22.5%。在阶段二末期(198 d),反应器内污泥平均粒径约为0.3 mm,颗粒化比例为93%。进入阶段三(冬季低温阶段),初期未出现颗粒污泥的大量流失,颗粒污泥粒径仍在不断增大,至234 d,污泥平均粒径约为0.36 mm,然而250 d和260 d时污泥平均粒径由0.36 mm降为0.31 mm和0.26 mm, $d(0.1)$ 较234 d时亦有所降低,这是由于颗粒化比例降低、絮状污泥比例增大所致,与污泥的沉淀性能变差相吻合。因此,长时间低温运行会导致絮状污泥生长、颗粒化比例降低以及污泥沉淀性能降低。

表1 中试期间污泥粒径与污泥性质变化

Tab.1 Changes of particle size and sludge characteristics during pilot test

时间/d	颗粒污泥粒径/ μm			MLVSS/ MLSS
	$d(0.1)$	$d(0.5)$	$d(0.9)$	
7	44.0	150.0	330.9	0.48
198	93.7	302.8	571.8	0.76
234	155.2	359.8	598.5	—
250	87.9	313.2	577.2	0.77
260	41.9	261.1	562.1	0.76

综上,本研究在夏季条件下进行好氧颗粒污泥培养,能形成成熟的好氧颗粒污泥。在冬季低温条件下,虽然颗粒污泥粒径和沉淀性能有所降低,但仍维持了较好的沉淀能力和颗粒化程度。

2.2 低温对颗粒污泥形态的影响

中试培养的好氧颗粒污泥呈土黄色熟小米粒状,如图4(a)所示。采用显微镜对反应器内污泥的变化过程进行观察,第7天反应器内污泥以絮状污泥为主,但是已经出现了明显的大菌胶团,见图4(b)。在进入低温阶段前的第198天,对颗粒污泥进行显微镜观察,颗粒十分紧实,枝状结构与丝状菌极少,且颗粒污泥表面存在少量原生动(主要为累枝虫),见图4(c)、(d)。进入低温阶段后的第253天,取污泥床表层污泥进行显微镜观察,发现存在很多小的菌胶团,颗粒污泥表层的枝状结构增多,且颗粒污泥出现破碎现象,见图4(e)、(f)。此外,单独针对颗粒污泥进行镜检,发现78%的颗粒污泥依然密实,而22%的颗粒污泥外层明显出现枝状结构,且丝状菌增多。对第253天的污泥混合液进行

革兰氏染色镜检观察,发现颗粒污泥表层的枝状结构、小的菌群团或者污泥碎片里面,存在较多丝状菌且以微丝菌为主,见图4(g)、(h)。因此,颗粒污泥表层枝状结构、小菌胶团以及丝状菌均增多,是导致冬季污泥沉淀性能变差的主要原因。

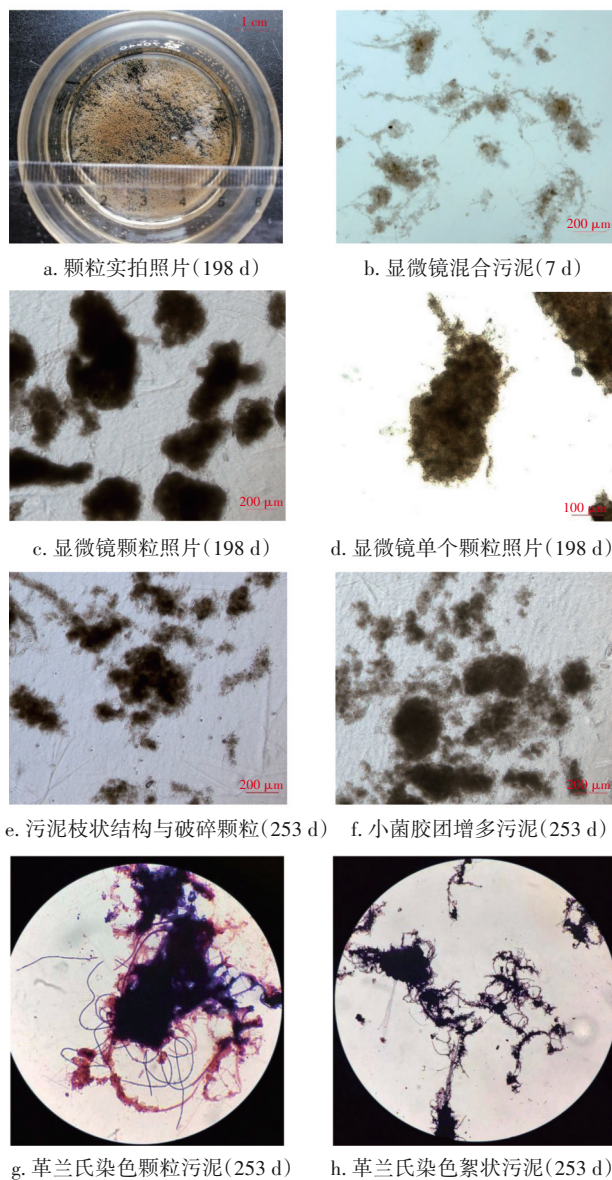


图 4 颗粒污泥微生物观察影像

Fig.4 Images of granular sludge under microscope

2.3 低温对营养物去除的影响

受颗粒污泥构型影响,在曝气时氧气在颗粒污泥内部的传质过程会受到颗粒厚度的限制,在颗粒内部形成缺氧区从而进行脱氮,因此颗粒污泥的粒径是影响反硝化效果的关键因素。de Kreuk 等^[8]研究发现,脱氮效果最优的颗粒粒径为 1.3 mm。此

外,低温会导致硝化速率降低,致使氧气在颗粒污泥内部扩散深度增加,导致缺氧区体积降低,最终导致低温条件下反硝化脱氮效率降低。

低碳源污水培养的颗粒污泥相对于中、高碳源浓度污水培养的好氧颗粒污泥,颗粒粒径普遍偏小 (<1.0 mm),其密度也不高^[3-4]。中试培养的好氧颗粒污泥平均粒径仅为 0.30~0.36 mm,因此如何提高反硝化效率也是研究重点。但也有其他学者认为,可通过 DO 精确调控的方式弥补颗粒污泥粒径较小造成的缺陷^[11]。本研究通过优化调控反应器内 DO 浓度、周期时间以及其他过程参数提高反硝化效率。

如表 2 所示,在阶段一和阶段二,反应器出水 COD、TP、NH₄⁺-N 及 TN 均可满足一级 A 标准。进入阶段三,为应对低温对污染物去除效率造成的负面影响,首先通过减少排泥量的方式增大反应器中污泥的 SRT,以提高反应器内污泥浓度,以此提高反应效率。在阶段一与阶段二 SRT 分别为 15~25 d 和 20~25 d 的基础上,阶段三延长 SRT 至 40~45 d,至反应器内平均 MLSS 最高达 6 108 mg/L。

表 2 中试期间各阶段出水水质与去除率

Tab.2 Effluent quality and removal efficiency during pilot test

项 目	出水浓度/(mg·L ⁻¹)			去除率/%		
	阶段一	阶段二	阶段三	阶段一	阶段二	阶段三
COD _t	38.9±5.6	33.1±9.4	40.6±3.9	75.1	82.1	78.3
COD _s	31.0±6.1	25.7±7.3	27.6±6.3	67.4	71.2	72.5
BOD ₅	2.1±0.2	1.9±0.1	2.3±0.2	97.4	97.7	97.3
TN	12.0±1.9	11.7±1.3	12.7±2.1	56.2	53.4	49.4
TP	0.15±0.2	0.10±0.2	0.15±0.2	94.8	95.8	94.4
NH ₄ ⁺ -N	0.1±0.2	0.1±0.2	0.1±0.2	99.6	99.5	99.5

注: 表中数据为各阶段通过参数调节使出水水质持续稳定达标后的平均值,其中阶段一为 50 d 的平均值、阶段二为 70 d 的平均值、阶段三为 40 d 的平均值。

其次,进一步采取以下措施来提高脱氮效果:

- ①将曝气周期时间延长 30 min。
- ②在曝气步骤,对反应器内 DO 值进行两阶段控制,即第一阶段控制反应器内 DO 为 0.8~1.5 mg/L,持续时间为曝气开始至 100 min,维持在合理的 DO 浓度范围以保证硝化效果,在去除氨氮的同时促进颗粒污泥内部发生反硝化除磷;第二阶段控制反应器内 DO 为 0.5 mg/L,自曝气 100 min 至曝气结束,维持低 DO 状态促进反硝化脱氮。调整运行工况之后,阶段三过程中

COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等去除率并未受到明显影响,只是TN去除效果较前两个阶段仍略有下降(降幅为6%~9%)。对此,建议实际运行中在低DO(0.5 mg/L)曝气时投加一定量碳源,以提高反硝化速率。

3 结论

① 以国内实际的低碳源生活污水作为基质,在夏季启动反应器,可以成功实现好氧颗粒污泥培养,颗粒化程度可以达到94%,颗粒污泥成熟以后, $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 为1.1~1.3。

② 冬季低温会造成颗粒污泥的枝状结构增多,丝状菌生长,进而引起颗粒化比例略有下降,为80%~91%,污泥平均粒径降低, $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 升高至1.5~1.8。

③ 尽管冬季低温运行导致污泥颗粒化有所下降,但整个中试过程出水COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN均可满足一级A标准,只在低温条件下TN去除率略有下降(降幅为6%~9%),存在一定超标风险。

参考文献:

- [1] 郝晓地,孙晓明,Mark van Loosdrecht. 好氧颗粒污泥技术工程化进展一瞥[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20):9-12.
HAO Xiaodi, SUN Xiaoming, Mark van Loosdrecht. A glance at progress of engineered aerobic granular sludge technology [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(20):9-12(in Chinese).
- [2] VAN LOOSDRECHT M C M, BRDJANOVIC D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. Science, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [3] WE A C E, ARIS A, ZAIN N A M. A review of the treatment of low-medium strength domestic wastewater using aerobic granulation technology [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 6(7): 464-490.
- [4] 吴远远,郝晓地,许雪乔,等. 低碳源污水的好氧颗粒污泥脱氮除磷中试研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 12-16.
WU Yuanyuan, HAO Xiaodi, XU Xueqiao, et al. Pilot-scale experiment on granular sludge with low carbon influent for nutrient removal [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23): 12-16(in Chinese).

- [5] FRANCA R D G, PINHEIROH M, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(1): 228-246.
- [6] DE KREUK M K, PRONK M, VAN LOOSDRECHT M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures [J]. Water Research, 2005, 39(18): 4476-4484.
- [7] XU J, HE J G, WANG M F, et al. Cultivation and stable operation of aerobic granular sludge at low temperature by sieving out the batt-like sludge [J]. Chemosphere, 2018, 211: 1219-1227.
- [8] DE KREUK M K. Aerobic Granular Sludge Scaling up a New Technology [D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2006.
- [9] 郭安,彭永臻,王然登,等. 低温好氧颗粒污泥的培养及处理生活污水研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(19): 38-42.
GUO An, PENG Yongzhen, WANG Randeng, et al. Cultivation of aerobic granular sludge under low temperature and its application to treatment of municipal domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19): 38-42(in Chinese).
- [10] 王硕,阮智宇,王燕,等. 低温好氧颗粒污泥反应器的启动特性研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(23): 1-5.
WANG Shuo, RUAN Zhiyu, WANG Yan, et al. Start-up characteristics of aerobic granular sludge bioreactor at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(23): 1-5(in Chinese).
- [11] CETIN D, KARAKAS E, DULEKGURGEN E, et al. Effect of high-concentration influent suspended solids on aerobic granulation in pilot-scale sequencing batch reactors treating real domestic wastewater [J]. Water Research, 2018, 131: 74-89.

作者简介:吴远远(1986-),女,山东济南人,博士,工程师,主要研究方向为好氧颗粒污泥技术、污水处理厂生物建模技术以及智慧水务等。

E-mail:wuyuanyuan@capitalwater.cn

收稿日期:2020-04-11

修回日期:2020-07-01

(编辑:任莹莹)