

低碳源污水的好氧颗粒污泥脱氮除磷中试研究

吴远远¹, 郝晓地², 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. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘 要: 我国城镇生活污水具有碳源浓度低、难以满足脱氮除磷需求的特点, 因此往往需要通过投加碳源和除磷药剂才能实现去除营养盐的目的。鉴于此, 采用好氧颗粒污泥技术, 基于北京首创某污水处理厂的低碳源市政污水, 进行颗粒污泥培养及营养物去除中试研究。结果表明, 在进水 COD 平均浓度约为 150 mg/L 的条件下成功培养出了好氧颗粒污泥, 且颗粒污泥比例可达到 42% 左右, 同时可实现对 N、P 的有效去除。中试装置持续运行了 160 d, 除雨季水量波动、进水 COD 浓度下降导致除磷效果波动外, 在旱季稳定运行条件下出水 N、P 浓度均可达到 GB 18918—2002 的一级 A 排放标准。与该污水厂既有的 CAST 工艺相比, 好氧颗粒污泥工艺的容积负荷要高出 2.5 倍, 而且节省投加的除磷药剂可使处理成本降低 0.088 元/m³。

关键词: 好氧颗粒污泥; 低碳源污水; 营养物去除; 污泥沉降比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0012-05

Pilot Study on Nitrogen and Phosphorus Removal from Low Carbon Source Sewage by Aerobic Granular Sludge

WU Yuan-yuan¹, HAO Xiao-di², 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. Beijing Advanced Innovation Centre of Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Urban domestic sewage in China has the characteristics of low biodegradable substrate concentration, which is difficult to meet the demand for nitrogen and phosphorus removal. Therefore, it is often necessary to add carbon source and phosphorus removal agents to achieve the removal of nutrients. In view of this, aerobic granular sludge (AGS) was applied to treat low carbon source sewage in a WWTP, and a pilot study on AGS cultivation and nutrients removal was carried out. AGS could be successfully formed when the average COD concentration of the influent was about 150 mg/L, the proportion of AGS could reach 42%, and nitrogen and phosphorus could be effectively removed. Except for fluctuation of phosphorus removal caused by the fluctuation of sewage volume and the decrease of influent COD concentration in wet season, the effluent nitrogen and phosphorus concentration could meet the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) during the stable operation period in dry season. Compared with the existing CAST process of the WWTP, the volumetric load of AGS process was 2.5 times higher, and the treatment cost could be reduced by 0.088 yuan/m³ by saving the dosage of phosphorus removal agent.

Key words: aerobic granular sludge; low carbon source sewage; nutrient removal; sludge volume index

我国城镇生活污水的有机物浓度普遍较低,在北京首创股份有限公司运营的120多座污水处理厂中,80%以上的污水处理厂进水年平均COD浓度低于200 mg/L且可生化性较差,特别是南方城镇地区,导致了我国市政污水C/N值普遍较低的现象。目前,国家和地方不断提高污水处理排放标准,这就使得许多污水处理厂不得不靠投加大量碳源及除磷药剂来实现出水达标排放,导致运行成本以及碳排放不断攀升^[1]。因此,低碳源或低C/N值污水处理工艺的研究及推广应用迫在眉睫。

好氧颗粒污泥技术因其占地面积小、能耗低、药耗低、出水水质好等优点已得到国内外的广泛研究并认可,在国外亦有数十个工程应用实例^[2-5]。好氧颗粒污泥最大的特点在于它可以在同一反应器内通过特有运行方式同步去除COD、N、P,且无需最终沉淀池而能实现高速沉淀^[2,6]。历经30余年的研发^[7-9],好氧颗粒污泥技术如今在国外已广泛进入工程应用阶段。其中,荷兰Royal Haskoning DHV与代尔夫特大学Mark van Loosdrecht教授联合研究的Nereda[®]技术是目前唯一广泛用于工程的好氧颗粒污泥技术,目前世界范围内的Nereda[®]工程应用案例已有51个(其中市政污水项目45个,工业废水项目6个),主要分布在欧洲、北美、南美及非洲。然而,这些工程应用案例的运行经验表明,进水COD浓度大都在300 mg/L以上。试验研究显示,高的进水COD浓度以及高有机负荷有利于污泥颗粒化^[6]。然而,国内研究大都停留在实验室阶段^[10-12],中试及工程示范应用研究较少^[13-17]。前已述及,我国城镇污水处理厂具有低碳源进水特征,是否可以应用好氧颗粒污泥技术,是否可以培养出具备同时去除COD、N、P功能的颗粒污泥均值得关注和研究。

笔者选择北京首创某污水处理厂作为试验场地,在中试反应器(有效体积为16 m³)中研究采用低碳源污水培养好氧颗粒污泥的可行性,并结合雨季合流制特点考察中试系统的运行稳定性;另外,对比分析了好氧颗粒污泥技术与污水厂既有的CAST工艺的运行效能。

1 材料与方法

1.1 中试装置

中试采用 $\varnothing 2.0\text{ m} \times 5.5\text{ m}$ 的不锈钢圆柱体反应器,采用自动控制系统实现反应器的自动运行。在线仪表包括流量计、液位计、溶氧仪、氧化还原电

位(ORP)仪、浊度计、电导率仪等。其中,通过PID控制器(比例-积分-微分控制器)调控鼓风机频率实现DO精准控制,DO控制在1.0~2.0 mg/L。

1.2 进水水质

试验进水采用北京首创某污水处理厂的实际进水,经原处理工艺中的粗/细格栅、旋流沉砂池处理后抽送至中试蓄水池。试验期间中试反应器的进水水质如下:总化学需氧量(COD_T)为(148.8±43.4) mg/L,溶解性化学需氧量(COD_s)为(85.3±28.9) mg/L,BOD₅为(85.7±26.5) mg/L,TN为(31.6±7.7) mg/L,氨氮为(24.4±7.8) mg/L,TP为(3.0±0.8) mg/L,PO₄³⁻-P为(2.1±0.7) mg/L,BOD₅/TN值为2.7。

1.3 运行方案

中试反应器采用序批式运行方式,单个运行周期时长为180~200 min,包括进水(50~80 min)、曝气(60~120 min)、沉淀(20~45 min)、排水(15 min),HRT为9~11 h。接种污泥为北京首创某污水厂的脱水污泥,含水率为82%,污泥容积指数(SVI₃₀)为160~200 mL/g。中试持续运行160 d。

1.4 分析项目与方法

常规指标如COD_T、COD_s、NH₄⁺-N、TN、TP、PO₄³⁻-P、MLSS等均采用国家标准方法测定。好氧颗粒污泥的形态与微生物相采用扫描电镜与电子显微镜观察。

污泥粒径分布:曝气开始1 min后采用深水取样器,从反应器中部取泥水混合样550 mL,分别经0.2和0.5 mm筛筛分后测定其干质量。参照文献,将粒径>0.2 mm的污泥定义为颗粒污泥^[4]。

2 结果和讨论

2.1 污泥颗粒化过程

中试反应器运行时间为2018年4月—9月,共计运行160 d。根据进水水质特征的不同,试验运行过程可分为3个阶段:①阶段一(1~93 d),此阶段为旱季,进水COD_T平均为(179.3±24.5) mg/L;②阶段二(94~133 d),此阶段为雨季,因雨水混入,导致进水COD_T浓度降低,平均为(85.7±26.5) mg/L;③阶段三(134~160 d),雨季结束,进水COD_T平均为(141.0±18.2) mg/L,此阶段为运行优化阶段,旨在提高脱氮除磷效率,实现出水达标排放。

在阶段一,通过逐渐缩短沉淀时间以增大选择压力,污泥的SVI₃₀值随之降低,污泥的沉淀性能逐

渐提高。运行至第41天时,反应器内开始出现密实、沉降性能较好的颗粒污泥;颗粒污泥大部分呈土黄色、少量为灰色,见图1(a);颗粒污泥的扫描电镜照片见图1(b)。阶段一结束时,反应器内污泥的 SVI_{30} 值与 SVI_5 值分别为50和102 mL/g,MLSS达到4 000 mg/L;另外,第69天时颗粒污泥比例达到了22.3%(见表1)。

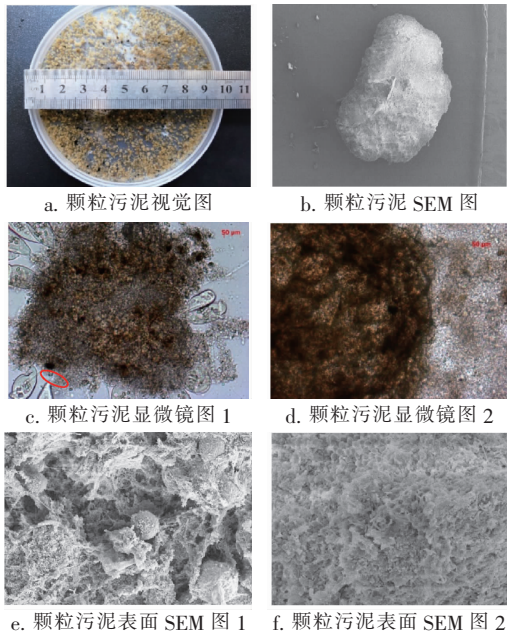


图1 好氧颗粒污泥的形态

Fig. 1 Morphology of aerobic granular sludge

表1 好氧颗粒污泥粒径分布随时间的变化

Tab. 1 Change of particle-size distribution of aerobic granular sludge with time

时间/d	颗粒污泥占比/%		
	粒径 > 0.5 mm	0.2 mm < 粒径 ≤ 0.5 mm	粒径 ≤ 0.2 mm
53	10.5	6.7	82.8
69	14.3	8.0	77.7
138	30.0	9.4	60.6
150	30.0	12.0	58.0

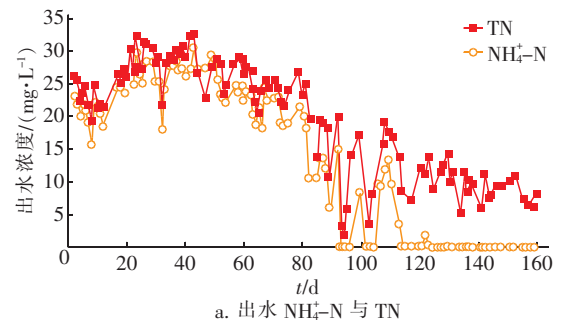
在阶段二,因雨水大量混入,导致反应器进水 COD_i 浓度剧降。然而,形成的颗粒污泥仍然可以保持稳定,反应器内污泥浓度维持在3 500 ~ 3 800 mg/L之间,并未发现有污泥大量流失现象。

在阶段三,雨季结束,进水 COD_i 浓度恢复正常,反应器内的颗粒污泥所占比例持续增加,至第150天时,反应器内污泥浓度达到4 300 mg/L,颗粒污泥比例达到42%, SVI_5/SVI_{30} 值约为2。

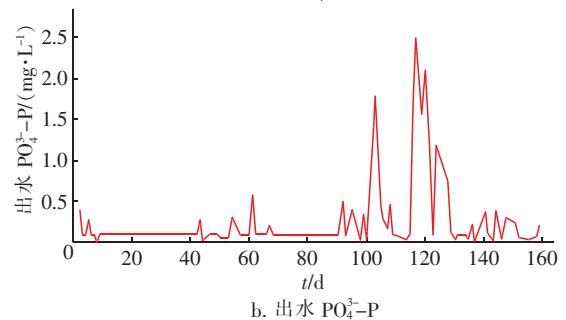
图1(c)显示,好氧颗粒污泥呈明显的分层结构。图1(d)为图1(c)红色标记区域的放大影像,可以看出,颗粒污泥存在明显的菌群分层界面。在部分颗粒污泥表面存在原生动物,如图1(c)显示的累枝虫。显然,原生动物的出现非常有利于游离细菌乃至大颗粒有机物的去除,这也是判别活性污泥系统运行是否稳定的重要标志,类似现象在荷兰的Garmerwolde污水处理厂亦有发现^[7]。图1(e)与(f)的扫描电镜图片进一步显示,好氧颗粒污泥表面存在大量的胞外聚合物(EPS),这对颗粒污泥结构的稳定起着重要作用^[18]。

2.2 运行效果

整个试验运行过程中,反应器出水中的氮和磷浓度变化情况如图2所示。



a. 出水 NH_4^+-N 与TN



b. 出水 $PO_4^{3-}-P$

图2 试验期间出水 NH_4^+-N 、TN和 $PO_4^{3-}-P$ 浓度变化

Fig. 2 Variation of NH_4^+-N , TN and $PO_4^{3-}-P$ concentrations in effluent of pilot-scale reactor

在阶段一,单个周期的曝气时间控制为60 min、DO浓度控制在1.0 ~ 1.5 mg/L之间,对 COD_i 、TN、 NH_4^+-N 和TP的去除率分别为79.0%、31.3%、25.7%和90.6%,反应器具有良好的生物除磷效果。为了提高生物除磷菌群数量,此阶段控制在低DO浓度状态且曝气时间较短,但导致了 NH_4^+-N 和TN的去除率较低,两者的平均出水浓度分别为22.4、25.4 mg/L。

在阶段二,进入雨季,反应器经历了几次降雨带

来的低负荷冲击,出水 TP 浓度出现波动升高现象,平均浓度为 0.7 mg/L,最高浓度超过了 2.0 mg/L,由此可知,低负荷冲击会对生物除磷菌群活性造成负面影响,导致 TP 去除率降低。反应器对 COD_I 、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别为 68.1%、51.9%、83.9% 和 70.8%,平均出水浓度分别为 27.3、11.4、2.8 和 0.7 mg/L。由于阶段一和阶段二的运行参数未发生任何变化,因此 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率升高可能是由于进水浓度降低所致。

在阶段三的运行优化期间,曝气过程分两段运行,前期控制 DO 为 2.0 mg/L、时长为 60 min,后期控制 DO 为 0.5 mg/L、时长为 60 min。此阶段对 COD_I 、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别为 83.3%、71.3%、99.5% 和 87.5%,平均出水浓度分别为 23.6、8.6、0.1 和 0.4 mg/L,达到了国家一级 A 排放标准。氨氮去除率升高,主要是 DO 浓度升高且曝气时间变长所致;此外,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 0.8、8.9 mg/L。TP 去除率再次升高,出水浓度降低到 0.5 mg/L 以下,表明雨季结束后生物除磷菌群活性得以恢复。

2.3 与污水厂既有工艺的运行效能对比

将好氧颗粒污泥中试反应器与污水厂既有的 CAST 工艺生化池的运行效能进行对比发现,在相同进水水质条件下,颗粒污泥工艺和 CAST 工艺的运行周期分别为 3~3.5 h 和 4.3~6 h,而且好氧颗粒污泥反应器每周期进水体积比高达 35%~50%,因此,容积负荷约为 CAST 工艺的 3.5 倍。可见,在相同处理水量条件下,颗粒污泥工艺较 CAST 工艺占地面积更小。此外,颗粒污泥的 SVI_{30} 为 46 mL/g,仅为 CAST 工艺污泥(87.4 mL/g)的一半,表明颗粒污泥工艺确实具有很好的污泥沉淀性能;并且,颗粒污泥工艺的污泥浓度更高,MLSS 为 3 700~5 000 mg/L,而 CAST 工艺的 MLSS 为 2 000~3 500 mg/L。再者,CAST 工艺需要靠投加聚合氯化铝(PAC,投加量为 0.028~0.09 kg/ m^3)与聚丙烯酰胺(PAM,投加量为 0.2~0.8 g/ m^3)才能实现出水磷浓度达到国家一级 A 排放标准,而颗粒污泥工艺仅靠生物除磷便可实现出水磷浓度的达标,仅此一项颗粒污泥工艺便可节省运行成本 0.088 元/ m^3 (该数据根据该污水厂 2018 年全年平均药剂消耗核算所得)。

3 结论

① 采用低碳源、低 C/N 值市政污水可以培养

出性能稳定的好氧颗粒污泥,污泥颗粒化程度可达到 42% 左右。

② 好氧颗粒污泥中试反应器在旱季稳定运行情况下出水水质可以达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准,在雨季时受进水低 COD 浓度的影响,出水 TP 浓度会出现波动。

③ 好氧颗粒污泥工艺的容积负荷为 CAST 工艺的 3.5 倍,而且在正常情况下无需投加化学药剂仅通过生物除磷即可使出水磷浓度达到国家一级 A 排放标准。

参考文献:

- [1] 郝晓地,王向阳,江瀚,等. 污水处理环境综合效益评价方法及案例应用[J]. 中国给水排水,2019,35(6): 6-15.
Hao Xiaodi, Wang Xiangyang, Jiang Han, et al. Evaluation method of the environmental comprehensive benefit for wastewater treatment and a case study[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 6-15 (in Chinese).
- [2] de Kreuk M K, Kishida N, van Loosdrecht M C M. Aerobic granular sludge—state of the art[J]. Water Sci Technol, 2007, 55(8/9): 75-81.
- [3] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors[J]. Environ Technol, 2002, 23(8): 931-936.
- [4] Coma M, Verawaty M, Pijuan M, et al. Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater[J]. Bioresour Technol, 2012, 103(1): 101-108.
- [5] 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).
- [6] de Kreuk M K. Aerobic Granular Sludge: Scaling Up a New Technology [D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.
- [7] Pronk M, de Kreuk M K, de Bruin B, et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment[J]. Water Res, 2015, 84: 207-217.
- [8] Morgenroth E, Sherden T, van Loosdrecht M C M, et al.

- Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *Water Res*, 1997, 31(12): 3191–3194.
- [9] Pishgar R, Dominic J A, Sheng Z, *et al.* Influence of operation mode and wastewater strength on aerobic granulation at pilot scale: startup period, granular sludge characteristics, and effluent quality [J]. *Water Res*, 2019, 160: 81–96.
- [10] 梁东博, 卞伟, 王文啸, 等. 低温条件下好氧颗粒污泥培养及其脱氮性能研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 634–640.
- Liang Dongbo, Bian Wei, Wang Wenxiao, *et al.* Aerobic granular sludge formation and nutrients removal characteristics under low temperature [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 634–640 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 苑泉, 吴远远, 金正宇, 等. 水解酸化对好氧颗粒污泥形成及脱氮除磷的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 360–368.
- Yuan Quan, Wu Yuanyuan, Jin Zhengyu, *et al.* Impacts of hydrolysis and acidification on the formation of aerobic granular sludge and its nitrogen and phosphorus removal [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2): 360–368 (in Chinese).
- [13] 涂响, 苏本生, 孔云华, 等. 城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(9): 2118–2123.
- Tu Xiang, Su Bensheng, Kong Yunhua, *et al.* Cultivation of aerobic granules in a large pilot SBR with domestic sewage [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(9): 2118–2123 (in Chinese).
- [14] Li J, Ding L B, Cai A, *et al.* Aerobic sludge granulation in a full-scale sequencing batch reactor [J]. *Biomed Res Int*, 2014. DOI: 10.1155/2014/268789.
- [15] Su B, Cui X, Zhu J. Optimal cultivation and characteristics of aerobic granules with typical domestic sewage in an alternating anaerobic/aerobic sequencing batch reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 110: 125–129.
- [16] Ni B, Xie W, Liu S, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Res*, 2009, 43(3): 751–761.
- [17] 李志华, 付进芳, 李胜, 等. 好氧颗粒污泥处理综合城市污水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(15): 4–8.
- Li Zhihua, Fu Jinfang, Li Sheng, *et al.* Pilot study on aerobic granular sludge for treating comprehensive municipal wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(15): 4–8 (in Chinese).
- [18] Zhu L, Lü M, Dai X, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 107: 46–54.



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: 2019-06-05