

实际城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究

高永青^{1,2}, 张 帅^{1,2}, 张树军^{1,2}, 程秋音³, 何 馨⁴, 陈刚新^{1,2},
高景峰⁵, 曹 婧³, 马 文³

(1. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100044; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 3. 北京北排水环境发展公司 吴家村再生水厂, 北京 100071; 4. 北京北排水务设计研究院有限公司, 北京 100044; 5. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘 要: 以普通絮体活性污泥为接种污泥, 采用实际城市污水在普通序批式反应器(SBR)中培养好氧颗粒污泥。通过逐渐缩短沉降时间至 5 min, 好氧颗粒污泥在第 27 天形成, 并在第 52 天趋于稳定, 平均粒径达到 0.706 mm。成熟的颗粒污泥 MLSS 在 12.19 g/L 左右, SV 为 0.26, SVI 为 21.31 mL/g, 具有良好的沉降性能。采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对好氧颗粒污泥的结构进行分析, 发现成熟的颗粒污泥内部结构紧密, 表面光滑, 形状规则, 呈褐黄色的球状、椭球状或杆状。在稳定运行阶段, 反应器出水 COD、氨氮、总氮、溶解性总磷浓度分别在 60、0.2、15、1.0 mg/L 以下, 显示出对污染物具有良好的去除效果。

关键词: 实际城市污水; 普通序批式反应器; 好氧颗粒污泥; 中试

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0022-04

Formation of Aerobic Granular in Pilot-scale SBR for Real Wastewater Treatment

GAO Yong-qing^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}, ZHANG Shu-jun^{1,2}, CHENG Qiu-yin³, HE Xin⁴,
CHEN Gang-xin^{1,2}, GAO Jing-feng⁵, CAO Jing³, MA Wen³

(1. Beijing Drainage Group Technology Research and Development Center, Beijing 100044, China;
2. Beijing Wastewater Resourceful Engineering Technology Research Center, Beijing 100124, China;
3. Wujiaocun Recycled Waterworks, Beijing Drainage Environment Development Company, Beijing 100071, China; 4. Beijing Drainage Group Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100044, China; 5. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the common activated sludge floc, aerobic granular sludge were successfully developed in a pilot-scale sequencing batch reactor(SBR) for the treatment of real municipal wastewater. The granular sludge could be formed on the 27th day in SBR by decreasing the settling time to 5 min gradually. The granular sludge became stable on the 52nd day and kept increasing in the average diameter size to 0.706 mm. The MLSS, SV and SVI of the mature granular sludge was 12.19 g/L, 0.26 and 21.31 mL/g, respectively. Examinations with optical microscope(OM) and scanning electron microscope

基金项目: 北京市国有资本经营预算支持企业科技创新能力提升项目; 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103)

(SEM) showed that mature granular kept internal structure closely and surface smoothly, held regular shapes with a brown-yellow including spherical, elliptic ball and rods. During the stable operation phase of the reactor, the effluent COD, ammonia nitrogen, total nitrogen (TN) and soluble phosphorus (SP) concentrations were less than 60 mg/L, 0.2 mg/L, 15 mg/L and 1.0 mg/L, respectively. It was shown that granular sludge had a high removal performance for contaminant.

Key words: real municipal wastewater; sequencing batch reactor (SBR); aerobic granular sludge; pilot-scale test

与传统的活性污泥工艺相比,好氧颗粒污泥具有泥水分离效果好、生物量高以及处理效果良好等优点^[1~3]。但截至目前,有关好氧颗粒污泥的形成过程、形成机制、影响因素及微生物学特性等还缺乏深入的研究,且大多数的研究是采用人工模拟配水在 SBR 中培养的。因此,开展实际城市污水培养颗粒污泥的研究具有重要的意义。笔者基于实际城市污水的水质特点建立中试装置,成功培养出好氧颗粒污泥,并采用高倍光学显微镜、共聚焦激光扫描电子显微镜等现代分析技术研究好氧颗粒污泥的特性,以期为好氧颗粒污泥的工程化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试采用圆柱形 SBR 反应器,其内径为 37 cm,有效高度为 150 cm,有效容积为 160 L。该反应器底部进水、中部出水,容积交换率为 50%,底部为膜片曝气盘,采用空气压缩机供气,通过流量计控制曝气量。进水、搅拌、曝气、沉淀、排水、闲置等工序根据试验需要设定,并通过时间控制器和电动阀实现自动控制。颗粒稳定后,SBR 单周期循环时间为 180 min,其中进水为 2 min,搅拌为 45 min,曝气为 120 min,沉淀为 6 min,排水为 6 min,闲置为 1 min。夏季反应器在室温下运行,冬季通过加热棒控制反应温度在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,系统 pH 值控制在 6.8~8.0。

1.2 接种污泥与生活污水水质

接种污泥为北京某污水厂曝气池的絮体活性污泥,呈黄色,TS 为 6 500 mg/L,平均粒径为 90 μm 。种泥经曝气 24 h 后,沉淀 30 min,排出上清液,注入污水至液面高度在 160 L 处,反应器内污泥浓度约为 6 000 mg/L。试验用水为某污水厂初沉池出水,其 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、SS 分别为 200~250、43~52、45~57、0.5~5.0、60~100 mg/L,pH 值为 6.8~7.5。同时配制乙酸钠与丙酸钠(物质的量之比为 10:1)混合碳源,以增加进水 COD,最终达到 300

mg/L。

1.3 分析项目与方法

COD:快速测定法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$:离子色谱法; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$:钼锑抗分光光度法;TN:碱性过硫酸钾消解法;MLSS、SV、SVI:国家标准方法。采用 Olympus BX51 光学显微镜和配套的 Olympus 数码相机进行图像采集;采用马尔文激光粒度分析仪进行粒度分析。

2 结果与分析

2.1 好氧颗粒污泥的培养过程

在絮体污泥颗粒化的过程中,以高倍光学显微镜对其形态变化进行观察,结果见图 1。观察发现,随着培养周期的不断进行,絮体污泥逐渐转化为较规则的小颗粒污泥并不断长大,最终形成球状、椭球状和杆状等边界层清晰的褐黄色好氧颗粒污泥。

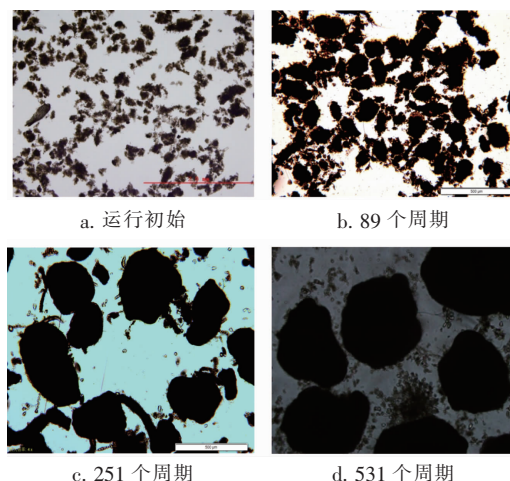


图1 不同周期反应器内好氧颗粒污泥的形态

Fig. 1 Morphology of aerobic granular sludge in different cycles

反应器刚开始运行时污泥呈絮状,平均粒径为 0.1 mm;运行 89 个周期时反应器中 80% 以上的污泥颗粒化(初始阶段每天运行 3~4 个周期),基本成功实现好氧颗粒污泥的培养,平均粒径为 0.443

mm;运行251个周期时其结构趋于稳定,平均粒径为0.706 mm;运行531个周期时颗粒污泥基本稳定,平均粒径为1.269 mm。

2.2 好氧颗粒污泥的SEM分析

利用SEM对SBR反应器运行181个周期的好氧颗粒污泥进行观察,结果见图2。研究中虽然添加了一定量的碳源,但仍然是以城市生活污水为主要底物。分析发现好氧颗粒污泥中存在大量的细菌和原后生动物,如累枝虫、钟虫和纤毛虫等,大量的原后生动物存在于污泥表面,与大量细菌和产生的代谢产物EPS共同构成好氧颗粒污泥。此外,好氧颗粒污泥表面以杆菌为主,含有少量的球菌,较为光滑且结构密实,其中夹杂着大量孔隙,有利于营养物质和溶解氧进入到内部,为保持好氧颗粒污泥的整体活性提供了良好的条件。另外,部分原生动物和丝状菌嵌入颗粒污泥内部,有大量的杆菌和球菌分布在该部位,由此推断原生动物和丝状菌对污泥颗粒化起到了重要的作用。Weber等^[4]发现在异养颗粒污泥中纤毛虫起到类似的作用,高景峰等^[5]在研究同步脱氮除磷好氧颗粒污泥以及张子健等^[6]在研究全自养硝化颗粒污泥时也发现了类似的现象。

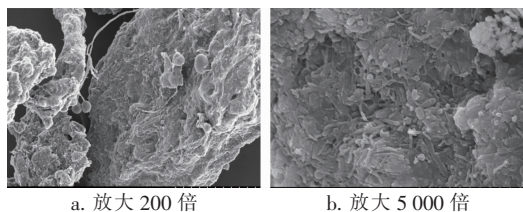


图2 反应器内好氧颗粒污泥在第181个周期的电镜照片

Fig.2 SEM images of aerobic granular sludge on cycle 181 in reactor

2.3 污泥的生物量和活性变化

在好氧颗粒污泥培养过程中,反应器的沉降时间从20 min逐步压缩到5 min。在运行的初始阶段,由于沉降时间较短,大量沉降性能较差的活性污泥被排出反应器,沉降性能较好的活性污泥被保留下来,反应器内MLSS从6.0 g/L降到2.5 g/L(见图3)。随着SBR的运行,好氧颗粒污泥获得了更多的营养物质,同时逐渐适应了短沉降时间的条件,反应器内的MLSS随着颗粒化进程逐渐增加,并表现出较好的活性和沉降性能。本研究中SV以100 mL活性污泥静沉8 min计,SVI值逐渐下降而MLSS和SV值逐渐升高。运行至89个周期絮体污泥基本颗粒化,而运行至211个周期时MLSS继续下降,是因

为继续缩短沉降时间至5 min,大量新生絮体污泥被排出反应器。通过调控沉降时间,运行211个周期之后好氧颗粒污泥的MLSS逐渐增加,稳定后的MLSS在12.19 g/L左右,粒径约为1.269 mm,SV为0.26,SVI约为21.31 mL/g。

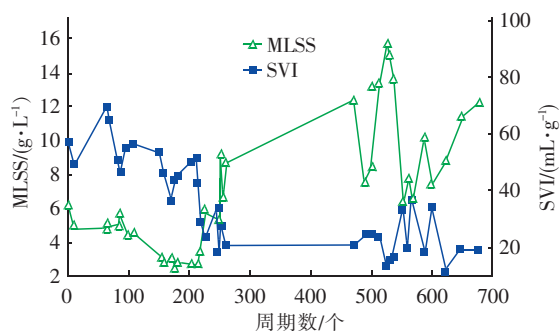


图3 好氧颗粒污泥培养过程中生物量和污泥沉降性能的变化

Fig.3 Variation of MLSS and SVI during culture of aerobic granular sludge

2.4 对污染物的去除效能

污水厂初沉池出水COD为200 mg/L左右,增加200 mg/L碳源至反应器中,由于排水比为50%,因此实际进水浓度为300 mg/L左右,结果见图4。反应器运行前期,由于压缩沉降时间,大量污泥被排出反应器,导致生物量减少,对COD的去除率处于较低的水平,出水COD在90 mg/L左右。随着反应器的运行,活性污泥逐渐颗粒化且生物量显著增加,对COD的去除效能逐渐升高,颗粒污泥稳定后,出水COD基本维持在60 mg/L左右,去除率在72%左右。反应器进水后COD浓度快速下降,推断与吸附作用有关,需做进一步的研究。

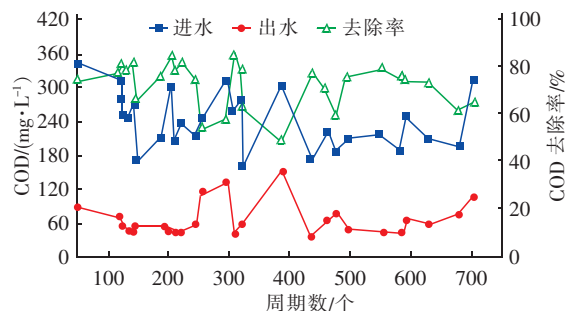


图4 好氧颗粒污泥培养过程中对COD去除效果的变化

Fig.4 Variation of COD removal during culture of aerobic granular sludge

同理,在反应器运行初期对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率较低。随着运行周期的增加,反应器中污泥颗粒化,

生物量大幅提高且污泥活性显著增加。稳定运行后的去除率在98%以上,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 0.2 \text{ mg/L}$,基本实现对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的完全转化。反应器运行211个周期后,污泥颗粒化基本完成并运行稳定,出水TN浓度 $< 15 \text{ mg/L}$,见图5。

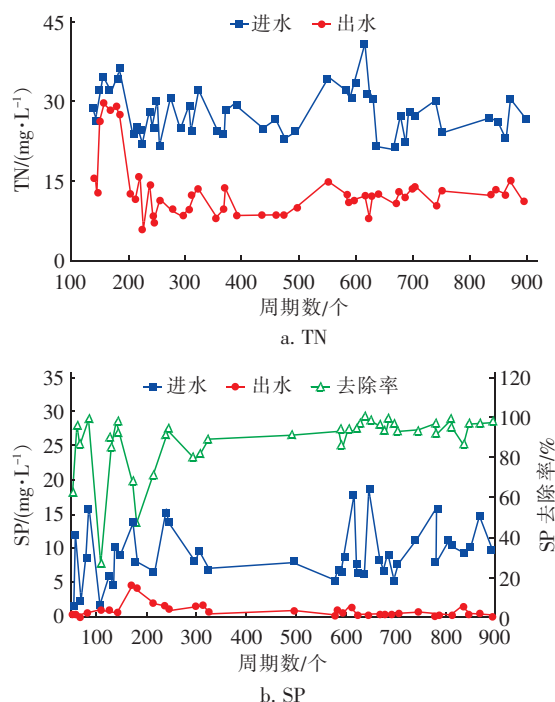


图5 好氧颗粒污泥培养过程中对TN和SP去除效果的变化

Fig. 5 Variation of TN and SP removal during culture of aerobic granular sludge

由于运行过程中反应器pH值维持在6.8~8.0之间,故反应器以生物除磷为主,少量磷在颗粒污泥内部通过化学沉淀作用被去除^[7]。由于污水厂初沉池出水进入反应器的调节池进行二次沉淀,故进入反应器中的磷以溶解性 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ (SP)为主。在反应器运行初期,压缩沉降时间使大量活性污泥被排出反应器,生物量显著降低,聚磷菌活性较差,出水SP浓度较高,SP去除率较低。随着反应器中污泥颗粒化,生物量显著增加,聚磷菌活性逐渐提高,至稳定运行阶段出水SP浓度保持在 1.0 mg/L 以下,去除率在90%左右。

3 结论

用实际城市污水在SBR中成功培养出沉降性能良好的好氧颗粒污泥。反应器运行89个周期(约27 d)后实现颗粒化,粒径为 0.443 mm 。在稳定运行阶段,成熟的颗粒污泥内部以杆菌为主,结构紧密,表面则较光滑,外观为褐黄色,呈球状、椭球状

以及杆状,粒径在 1.269 mm 左右,MLSS约为 12.19 g/L ,SV为0.26,SVI在 21.31 mL/g 左右。

成熟的好氧颗粒污泥对污染物具有良好的去除效能,SBR反应器出水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、SP浓度分别在 60 、 0.2 、 15 、 1.0 mg/L 以下,去除率分别约为72%、98%、51.9%和90%。

参考文献:

- [1] Peng D C, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Aerobic granular sludge—a case report[J]. *Water Res*, 1999, 33(3): 890–893.
- [2] 彭永臻, 吴蕾, 马勇. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 273–281.
- [3] 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.
- [4] Weber S D, Ludwig W, Schleifer K H, *et al.* Microbial composition and structure of aerobic granular sewage biofilms[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2007, 73: 6233–6240.
- [5] 高景峰, 陈冉妮, 苏凯, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥形成与反应机制的研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 1021–1029.
- [6] 张子健, 吴伟伟, 王建龙. 全自养硝化污泥的颗粒化过程研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(1): 140–146.
- [7] 郝晓地, 陈新华, 戴吉. 极具工程化潜力的好氧颗粒污泥技术[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(8): 1–7.



作者简介:高永青(1982–),女,河北石家庄人,博士,高级工程师,主要研究方向为城市污水深度脱氮除磷及系统智能化精确控制、好氧颗粒污泥技术与开发等。

E-mail: gaoyongqing@bdc.cn

收稿日期:2016–11–19