

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.015

好氧颗粒污泥处理高浓度及难降解废水研究进展

郑晓英,王兴楠,陈卫,何玉洁,黄希

(淮海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 好氧颗粒污泥以其在反应器中污泥沉降速度快、泥水分离简单、污泥浓度高,能够同时实现脱氮除磷等特点成为目前污(废)水处理领域的研究热点之一。对好氧颗粒污泥在高浓度有机废水及难降解废水(硝基苯废水、苯酚废水、氯酚废水、苯胺和氯苯胺废水、含盐废水、染料废水)处理中的研究现状进行综述,重点探讨了影响好氧颗粒污泥处理该类物质的影响因素、去除机制及其微生物特性等,指出其在难降解废水处理方面具有良好的应用前景。

关键词 好氧颗粒污泥;废水处理;去除机制;微生物特性;综述

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)04-0064-05

Progress in research on treatment of high-strength and refractory wastewater with aerobic granular sludge

ZHENG Xiao-ying, WANG Xing-nan, CHEN Wei, HE Yu-jie, HUANG Xi

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Aerobic granular sludge, with the characteristics of a high settling velocity, simple slurry separation, a high concentration, and a capacity of simultaneous nitrogen and phosphorus removal, has become one of the most popular research issues in the field of wastewater treatment. This paper presents a review of research on the application of aerobic granular sludge to treatment of high-strength organic wastewater and refractory wastewater, including high-concentration nitrobenzene wastewater, phenol wastewater, chlorophenol wastewater, aniline and chloroaniline wastewater, salinity wastewater, and dyeing wastewater. The study focuses on the influencing factors, removal mechanism, and microorganism characteristics of aerobic granular sludge during the treatment of the wastewater. It is pointed out that aerobic granular sludge has favorable application prospects in the treatment of refractory wastewater.

Key words : aerobic granular sludge; wastewater treatment; removal mechanism; microorganism characteristics; review

随着我国经济迅速发展,废水排放量逐年增加,水污染情况日益严重。其中,迅猛发展的化学工业产生的高浓度难降解废水(refractory wastewater)已经成为一种常见的有机废水,而这类废水具有浓度高且可生化性差的特点,对其寻求一种技术可行经济合理的处理方法具有较强的现实意义。好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge)是目前污水处理领域的研究热点之一,在大量好氧颗粒污泥理论研究的基础上,研究者们进行了好氧颗粒污泥处理实际污(废)

水的小试和中试,并取得了较好的处理效果^[1]。

1 国内外研究现状

化工、印刷、制药、染料等工业生产过程中不可避免地释放出对环境造成极大污染的有毒、有害、难降解的有机污染物,如酚类、氯苯酚类、农药、多氯联苯、多环芳烃、硝基芳烃化合物、染料等,这些污染物成分复杂,其中一些有机物具有致癌、致畸、致突变的“三致”等作用^[2]。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2009B18014)苏州科技大学江苏省《环境科学与工程》重点实验室开放课题(Zd091202);淮海大学自然科学基金(2009422711)

作者简介:郑晓英(1976—),女,讲师,研究方向为污水处理及资源化。E-mail:zhxyqq6@hhu.edu.cn

好氧颗粒污泥是微生物在特定环境下自发凝聚、增殖而形成的结构紧密、沉降性能良好、耐冲击能力强、能承受较高有机负荷的生物颗粒^[3-7]。因其结构特殊,能够在—个颗粒内同时保持多种氧环境与营养环境,为各种微生物提供良好的生长环境,因而具有多种代谢活性^[8-12]。好氧颗粒污泥不但具有同步脱氮除磷等优点,同时在处理高浓度有机废水、难降解废水、有毒废水及吸附重金属等有毒物质等方面也具有独特的优势。

1.1 处理高浓度有机废水

好氧颗粒污泥可以有效提高反应器内的污泥浓度,增强反应器的处理能力。有研究表明,当进水(α COD)为 800~2 000 mg/L,有机负荷为 2~4 kg/(m³·d)时,好氧颗粒污泥反应器可稳定运行^[13]。该条件下的颗粒能稳定保持在 1~2 mm 左右,不会形成颗粒膨胀造成污泥解体。Schwarzenbeck 等^[14]首次采用乳制品废水在序批式污泥反应器(SBR)中接种絮状污泥培养好氧颗粒污泥,当进水 COD 有机负荷为 3.2 kg/(m³·d),好氧颗粒污泥质量浓度(α MLSS)为 0.95 g/L 时,总 COD 去除率达到 50%。而经过 15—20 周污泥完全颗粒化后,总 COD、TN、TP 去除率分别为 90%、80%、67%,在 21 周后形成表面光滑、结构致密的好氧颗粒污泥。研究发现:COD 去除率受颗粒粒径大小的影响,且随粒径的减小而上升;在颗粒污泥床反应器中,污染物的去除与颗粒污泥表面存在的原生动物有关,单一的污泥容积指数(SVI)值并不能表征颗粒污泥的沉降特性,应由 30 min 内 SVI 值的变化来描述。Su 等^[15]用大豆废水培养好氧颗粒污泥,好氧颗粒污泥形成后污泥比耗氧速率(SOUR)值的上升可能是由于高的水力剪切作用力刺激微生物的呼吸作用,增强了微生物的活性所致。所形成的好氧颗粒污泥粒径为(1.22±0.85)mm,结构紧密,具有优良的沉降性能和高的微生物活性。刘莉莉等^[16]以通过啤酒废水驯化培养出好氧颗粒污泥,实验结果表明,好氧颗粒污泥经驯化后,能够迅速适应这种以糖类有机污染物为主的啤酒废水,驯化前后的污泥形态、生物活性差别不明显,出水(α COD)保持在 45 mg/L 以下。在颗粒污泥具体的耐受负荷方面,Moy 等^[17]做了相当程度的研究,实验总结出了高浓度负荷下颗粒污泥的特性,发现以葡萄糖为碳源的颗粒污泥能承受 15 kg/(m³·d)的 COD 负荷并保持不破碎,而以乙酸盐为碳源的颗粒污泥只能忍受 9 kg/(m³·d)的 COD 负荷,当负荷进一步提高时,颗粒结构将被破坏。文献^[17]通过逐步增加有机负荷研究颗粒污泥对于有机负荷的耐受程度,试验结果表明,当 COD 负荷由 6.0 kg/(m³·d)逐

步提高至 15 kg/(m³·d)时,颗粒污泥依然可以稳定存在并且 COD 去除率达到 92% 以上。

1.2 处理难降解废水

1.2.1 处理含硝基苯废水

由于硝基苯(nitrobenzene)废水可生化性很差,目前国内多采用物理法和化学法进行处理,但硝基苯废水经采用一定的预处理手段提高其可生化性后,可进行生化处理。国内也进行了一些对于其降解途径和机制的研究,但总体来说生物处理还是处于被动的地位^[18]。有研究尝试采用好氧颗粒污泥系统降解硝基苯,例如周立祥等^[19]采用三角瓶在摇床上好氧振荡的方法,用硝基苯废水处理厂的好氧污泥驯化培养能够降解硝基苯的混合菌群,发现在此培养过程中,微生物菌群形成颗粒化(颗粒污泥),采用此颗粒污泥进行降解硝基苯的研究。结果表明,该混合菌群在以硝基苯为唯一碳源和氮源的情况下降解硝基苯的效果最好,该混合菌群降解硝基苯时最适宜的温度为 28℃,能够适宜于 pH=9.0 以下的弱碱性环境,且最佳的 pH 值为 7.0,当硝基苯的起始质量浓度为 600 mg/L 时,混合菌群适应期较短,在 6 h 以下,混合菌群在 24 h 内能够完全降解硝基苯,降解速率最大,达到 28.8 mg/(L·h)。

1.2.2 处理含苯酚废水

苯酚类(phenol)物质存在于采油、焦化、化工和制药等废水中。苯酚可作为微生物利用的碳源,但它对微生物生长具有较强的毒性,较低的苯酚浓度就可能导致微生物死亡。近年来较多的研究已证实,好氧颗粒可大幅度提高污泥处理苯酚的能力^[13]。

在苯酚去除程度方面,Ho 等^[20]通过批量试验研究表明,驯化的好氧颗粒污泥能有效去除 5 000 mg/L 质量浓度的苯酚,而活性污泥降解后的苯酚质量浓度只能达到 3 000 mg/L。并且证实好氧颗粒污泥在经过酸或碱预处理后仍对苯酚有较好的去除效果。Moussavi 等^[21]研究证实了好氧颗粒污泥能有效去除含盐废水中的苯酚,当进水苯酚质量浓度达到 1000 mg/L,循环周期为 17 h 时,好氧颗粒污泥去苯酚的去除率在 99% 以上,同时对 COD 也有很高的去除率。Jiang 等^[22]发现在好氧颗粒污泥工艺中当进水中苯酚的质量浓度为 500 mg/L 时,好氧颗粒污泥反应器的出水中酚的质量浓度可以稳定在不超过 0.2 mg/L。Tay 等^[23]在将苯酚按 0、0.6 kg/(m³·d)、1.2 kg/(m³·d)、2.4 kg/(m³·d)加入到好氧颗粒污泥中,发现,在 0~1.2 kg/(m³·d)时苯酚对好氧颗粒污泥无明显毒性,且对苯酚的去除效率较高。而在微观机理方面,Tay 等^[24]通过使用变性梯度凝胶电

泳(DGGE)技术证实用醋酸盐为基质培养的好氧颗粒污泥中微生物种群能够适应含有苯酚的环境,微生物种群通过改变群落结构适应新的新陈代谢环境,并在一段时间后对苯酚有稳定的去除率。同时Tay还得出一个重要结论,好氧颗粒污泥有助于丝状菌生长,而丝状菌对苯酚的毒性具有良好的耐受作用,这是由于EPS形成的鞘结构保护所致。近些年来,国外很多研究人员提议用EPS的抵抗机制来解释好氧颗粒污泥对于有毒物质的抵制作用。

1.2.3 处理含氯酚废水

氯酚类(chlorophenol)有机污染物是许多工业环节(如造纸、印染、纺织等)的中间产物,也普遍存在于城市自来水中,并被广泛用作杀虫剂、防腐剂、除草剂。对于含五氯酚废水的处理,通常采用厌氧生物处理技术,但都不能获得满意的效果^[25]。近年来研究表明,好氧颗粒污泥技术处理氯酚类废水有着良好的效果。

Wang等^[27]在SBR反应器中逐步增加[2,4-DCP] [2,4-dichlorophenol]的投加浓度,运行39 d之后,在反应器中培养出直径1~2 mm颗粒污泥,当进水[2,4-DCP]质量浓度为4.8 mg/L时,颗粒污泥对其去除率为94%,而当[2,4-DCP]质量浓度达到105 mg/L时,颗粒污泥[2,4-DCP]最高负荷可达39.6 mg/(g·h)。Carucci等^[26]通过对比颗粒污泥反应器GSBR(granular sludge sequencing batch reactor)和膜生物反应器MBR(membrane bioreactor)处理低浓度[4-Chlorophenol] [4-氯酚]废水效果发现,在处理效果相同的条件下,GSBR处理系统具有系统简单、占地面积小和启动时间短的优势。在氯酚对于颗粒污泥的影响方面,李光伟等^[28]研究了五氯酚(PCP)对好氧颗粒污泥处理生活污水的影响,借助末端限制性酶切片长度多态性(T-RFLP)技术考察了PCP存在时好氧颗粒污泥细菌组成的变化。结果表明,PCP对氨氮去除率的影响大于对COD去除率的影响,好氧颗粒污泥中微生物的种群数量随着PCP浓度的增加而逐渐减少,氨氮和COD去除率的变化与微生物种群数量变化相吻合。PCP对好氧颗粒污泥中亚硝酸盐氧化细菌影响不明显,但是对反硝化细菌的影响比较大。颗粒污泥中微生物种群数量随着PCP浓度的增加而逐渐降低,其变化趋势能够与处理生活污水的性能相吻合。

1.2.4 处理含苯胺和氯苯胺废水

与前面介绍过的几种物质特性类似,苯胺(aniline)和氯苯胺(chloroaniline)废水也具有“三致”效应,难于生物降解。但是相对于硝基苯废水,国内对于好氧颗粒污泥处理该类废水已经有了比较深入

的研究。Zhu等^[29]在序批式气提生物反应器SABR (sequencing airlift bioreactor)平台中用高浓度[4-CIA] (4-Chloroaniline 4-氯苯胺)的好氧污泥颗粒化进行研究,其中的关键步骤是逐步提高[4-CIA]负荷。经过2个月时间好氧颗粒污泥培养成熟,在[4-CIA]质量浓度为400 mg/L时,好氧颗粒污泥表观降解率(specific degradation rates)为0.27g。即使[4-CIA]质量浓度高达(8.18±0.06)g/L [4-CIA]仍能被完全去除,并且好氧颗粒污泥能够保持一定的生物浓度。何丹等^[30]以氯苯胺类混合物为唯一碳源和氮源,活性污泥为接种污泥培养出能高效降解氯苯胺类物质的好氧颗粒污泥。成熟好氧颗粒污泥对间氯苯胺、对氯苯胺和邻氯苯胺的去除率分别趋于100%、100%和85%。不同混合体系的降解模式表明,好氧颗粒污泥体系对氯苯胺类物质降解先后顺序为间氯苯胺、对氯苯胺、邻氯苯胺。PCR-DGGE指纹图表明,对氯苯胺类物质具有高降解性能的好氧颗粒污泥体系具有丰富稳定的微生物种群结构。朱亮等^[31]在SABR中研究了苯胺和氯苯胺类有毒有机废水处理过程好氧污泥颗粒化,并进行了微生物种群结构分析。结果表明,通过缩短污泥沉降时间、逐步提升目标污染物进水负荷,反应器连续运行3个月,最终在苯胺和氯苯胺负荷1 kg/(m³·d)条件下实现污泥颗粒化,苯胺和氯苯胺去除率稳定在99.9%以上,获得的成熟好氧颗粒粒径在0.45~2.50 mm, SOUR稳定在耗氧150 mg/(g·h)以上,颗粒污泥脆外聚合物(EPS)中蛋白质(PN)含量为每克污泥为(28.0±1.9) mg,蛋白质与多糖比值为6.5,苯胺类比降解速率达每克污泥每天0.18 g;应用PCR-DGGE分子指纹图谱技术分析稳定运行的颗粒化反应器内好氧污泥微生物种群结构,结果表明,好氧颗粒内主要细菌分属β-Proteobacteria、γ-Proteobacteria及Flavobacteria等类群,优势菌为Pseudomonas sp.、Flavobacterium sp.;与已获得的降解氯苯胺好氧颗粒相比,苯胺存在下培养获得的好氧颗粒污泥微生物菌群结构更为丰富。曹丹凤^[32]同样采用PCR-DGGE对序批式反应器处理氯苯胺类有机废水好氧污泥颗粒化过程中微生物种群动态变化进行了初步探索,对DGGE图谱密度扫描发现,污泥颗粒化过程中,微生物种群结构发生了较为复杂的变化,接种污泥大部分条带都消失并出现新的特异性条带,带谱的这种变化与污泥颗粒化过程中的微生物种群演替,特别是参与[4-CA]降解的菌群发育有关。3个反应器经长期运行后培养获得可降解[4-CA]的成熟颗粒污泥,其微生物种群多样性排序为R2>R3>R1。

1.2.5 处理含盐废水

含盐(salinity)有机废水会产生较大的浮力导致污泥上浮和流失,而这一点恰恰是好氧颗粒污泥形成的基本条件^[33]。Figueroa 等^[34]在 SBR 反应器中用 $\rho(\text{NaCl}) = 30 \text{ g/L}$ 的废水培养好氧颗粒污泥,系统在运行 75 d 后取得预期效果。当进水 COD 负荷达到 $1.72 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,系统对有机物去除率几乎为 100%。由于含盐废水中大多同时含有其他难降解有机物,因此在高含盐情况下颗粒污泥对废水中有机物的去除能力的研究就显得很有必要。汪善全等^[35]采用序批式摇床反应器(SSBR)在高含盐废水中利用不同类型接种污泥培养出了好氧颗粒。结果表明,好氧颗粒污泥能够有效处理高含盐废水并且具有很好的抗盐度冲击能力。当废水 $\rho(\text{NaCl}) < 10 \text{ g/L}$ 并且进水基质为葡萄糖时,利用好氧颗粒污泥处理该废水可以取得 70.3% ~ 97.6% 的总有机碳(TOC)去除率。当进水 $\rho(\text{NaCl})$ 达到 35 g/L 并且进水基质为难降解 V_c 废水时,利用好氧颗粒污泥处理该含盐废水能够取得与相同基质相同运行条件下淡水废水中相似的 70% 的 TOC 去除率。试验在含盐废水中得到了粒径为 $0.5 \sim 3.0 \text{ mm}$ 的好氧颗粒污泥,其沉降速度大大高于淡水对照组中得到的好氧颗粒污泥沉降速度。李志华等^[36]探索了好氧颗粒污泥法处理含盐有机废水的颗粒污泥形成特性。研究发现,高含盐量有助于提高颗粒的沉降性能和密实性,但含盐量越高,出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 SS 的浓度也较高。通过驯化,好氧颗粒污泥中的微生物在含盐量为 2.5% 时仍能保持较高的生物活性,并维持较长时期的稳定性,但当含盐量增加到 5% 时开始有丝状菌出现并逐渐成为优势菌群。

1.2.6 染料废水

染料废水结构复杂,以高分子络合物为多,结构很难被打破,生物降解性较低,大多都具有潜在毒性^[37]。目前,染料废水的生物处理方式已形成一定体系,但是由于大部分工艺投资成本高,运行费用贵,亟需一种新技术更新。如前所述,好氧颗粒污泥作为一种新兴的废水处理技术,有着良好的技术优势和应用前景,但是其在去除染料废水方面还鲜有报道,待进一步开发研究。詹婧等^[38]研究好氧颗粒污泥对孔雀绿染料的吸附作用,结果表明,好氧颗粒污泥对孔雀绿染料的吸附为颗粒污泥表面的单分子层吸附,最大吸附量为每克污泥吸附 52.63 mg ,且在 pH 值为 6 时,吸附效果较好。刘贤伟^[39]研究证实在孔雀绿染料初始质量浓度在 80 mg/L 时,好氧颗粒污泥的最大吸附容量为每克污泥吸附 82 mg 。Zheng 等^[40]研究表明,采用好氧颗粒污泥吸附阳离

子及罗丹明 B 染料时,吸附模式符合 Langmuir 吸附等温线。

2 结 语

好氧颗粒污泥作为一种新型的生物处理技术,近些年来日益成为研究人员关注的热点。诸多试验已表明,好氧颗粒污泥系统对难降解废水有良好的处理效果,同时好氧颗粒污泥自身具有的特点,如具有很强的抗冲击负荷能力、污泥沉淀效果好、泥水分离简单、缩短污泥沉降时间、减小占地面积、降低工程造价、剩余污泥量少等。使得好氧颗粒污泥技术有希望成为处理高强度难降解或有毒废水的有效方法。

参考文献:

- [1] 季民,魏燕杰,李超,等.好氧颗粒污泥处理实际污(废)水的研究与工程化应用进展[J].中国给水排水,2010,26(4):10-14.
- [2] 尹玉玲,肖羽棠,朱莹佳.电 Fenton 法处理难降解废水的研究进展[J].水处理技术,2009,35(3):5-9.
- [3] LIU Y, YANG S F, XU H, et al. Biosorption kinetics of cadmium(II) on aerobic granular sludge[J]. Process Biochemistry, 2003, 38: 997-1001.
- [4] 蔡建波,李小明,曾光明,等.好氧颗粒污泥的性质及在污水处理中的应用[J].净水技术,2005,24(6):34-37.
- [5] 竺建荣,刘纯新.好氧颗粒污泥的培养及理化特征[J].环境科学,1999,20(2):38-41.
- [6] MORGENROTH E, SHERDENT T, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 1997, 31(12):3191-3194.
- [7] 杨麒,李小明,曾光明,等.SBR 系统中同步硝化反硝化好氧颗粒污泥的培养[J].环境科学,2003,24(4):94-98.
- [8] 卢超然,张晓建,张悦,等.SBR 工艺污泥颗粒化和脱氮除磷特性的研究[J].环境科学学报,2001,21(5):99-104.
- [9] TAY J H, LIU Q S, LIU Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequence aerobic sludge reactor[J]. Appl Microbiol, 2001, 91: 168-175.
- [10] LI X, LI Y, LIU H, HUAA Z, et al. Characteristics of aerobic biogranules from membrane bioreactor system[J]. Membr Sci, 2007, 287: 294-299.
- [11] TAY J H, YANG P, ZHUANG W Q, et al. Reactor performance and membrane filtration in aerobic granular sludge membrane bioreactor[J]. Membr Sci, 2008, 304: 24-32.
- [12] LIU Y Q, TAY J H. Characteristics and stability of aerobic granules cultivated with different starvation time[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2007, 75(1): 205-210.
- [13] 王建龙,张子健,吴伟伟.好氧颗粒污泥的研究进展[J].环境科学学报,2009,29(3):449-473.
- [14] SCHWARZENBECK N, BORGES J M, WILDERER P A.

Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor[J]. Appl Microbiol ,2005 ,66 :711-718.

[15] SU K Z ,YU H Q. Formation and characterization of aerobic granular in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. Environ Sci Technol ,2005 ,39(8) :2818-2828.

[16] 刘莉莉 ,王志平 ,蔡伟民 . 好氧颗粒污泥处理啤酒废水的研究 [J]. 工业用水与废水 ,2006 ,37(4) :27-30.

[17] MOY B Y P ,TAY J H ,TOH S K ,et al. High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules[J]. Lett Appl Microbiol 2002 ,34 :407-412.

[18] 唐萍 ,周集体 ,王竞 ,等 . 硝基苯废水治理的研究进展 [J]. 工业水处理 ,2003 ,23(3) :16-19.

[19] 周立祥 ,王电站 . 好氧颗粒污泥的培养及其降解硝基苯的活性 [J]. 环境科学 ,2010 ,31(1) :147-152.

[20] HO Kuo-Ling ,CHEN Yu-You ,LIN Bin. Degrading high-strength phenol using aerobic granular sludge[J]. Appl Microbiol Biotechnol 2010 ,85 :2009-2015.

[21] MOUSSAVI G , BARIKBIN B. The removal of high concentrations of phenol from saline wastewater using aerobic granular SBR[J]. Chemical Engineering Journal ,2010 ,158 :498-504.

[22] JIANG H L ,TAY J H ,TAY S T. Changes in structure activity and metabolism of aerobic granules as a microbial response to high phenol loading [J]. Appl Microbiol Biotechnol ,2004 ,63 :602-608.

[23] TAY S T L ,MOY B Y P ,JIANG He-long ,et al. Rapid cultivation of stable aerobic phenol-degrading granules using acetate-fed granules as microbial seed [J]. Journal of Biotechnology 2005 ,115 :387-395.

[24] TAY S T L ,MOY B Y P ,MASZENN A M ,et al. Comparing activated sludge aerobic granules as microbial inocula phenol biodegradation[J]. Appl Microbiol Biotechnol ,2005 ,67(5) :708-713.

[25] 陈竹 ,陈元彩 ,蓝惠霞 ,等 . 降解五氯酚的微生物颗粒污泥的培养及其微生物种群分析 [J]. 应用与环境生物学报 ,2008 ,14(3) :416-421.

[26] CARUCCI A ,MILLA S ,CAPPAI G ,et al. A direct comparison amongst different technologies (aerobic granular sludge ,SBR and MBR) for the treatment of wastewater contaminated by 4-chloropheno[J]. Journal of Hazardous Materials ,2010 ,177 :1119-1125.

[27] WANG S G ,LIU X W ,ZHANG H Y ,et al. Aerobic granulation for 2 ,4 - dichlorophenol biodegradation in a sequencing batch reactor[J]. Chemosphere ,2007 ,69 :769-775.

[28] 李光伟 ,刘和 ,云娇 ,等 . 应用 TRFLP 技术研究五氯酚对好氧颗粒污泥中细菌组成的影响 [J]. 环境科学 ,2006 ,27(4) :794-798.

[29] ZHU Liang ,YU Yan-wen ,XU Xiang-yang ,et al. High-rate

biodegradation and metabolic pathways of 4-chloroaniline by aerobic granules[J]. Process Biochemistry ,2011 ,46(4) :894-899.

[30] 何丹 ,张丽丽 ,杨卫兵 ,等 . 好氧颗粒污泥降解氯苯胺类污染物的试验研究 [J]. 环境科学与技术 ,2010 ,33(8) :65-69.

[31] 朱亮 ,徐向阳 ,曹丹凤 ,等 . 降解苯胺和氯苯胺类污染物好氧污泥颗粒化及微生物种群结构分析 [J]. 微生物学报 ,2007 ,47(4) :654-661.

[32] 曹丹凤 . 降解氯苯胺类化合物好氧污泥颗粒化过程微生物种群演替的研究 [D]. 杭州 :浙江大学 ,2006.

[33] LIU Y ,WANG Z ,TAY J H ,et al. Unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. Biotechnology Advances 2005 ,23(5) :335-344.

[34] FIGUEROA M ,MOSQUERA-CORRALA A ,CAMPOS J L ,et al. Treatment of saline wastewater in SBR aerobic granular reactor[J]. Water Science and Technology ,2008 ,58(2) :479-485.

[35] 汪善全 ,原媛 ,孔云华 ,等 . 好氧颗粒污泥处理高含盐废水研究 [J]. 环境科学 ,2008 ,29(1) :145-151.

[36] 李志华 ,王立冬 ,王晓昌 ,等 . 好氧颗粒污泥处理含盐有机废水 [J]. 工业水处理 ,2008 ,28(11) :18-20.

[37] 樊毓新 ,周增炎 . 染料废水的处理方法现状与发展前景 [J]. 工程与技术 ,2009(9) :22-26.

[38] 詹婧 ,孙庆业 ,石先阳 ,等 . 好氧颗粒污泥吸附孔雀绿研究 [J]. 安徽大学学报 :自然科学版 ,2009 ,33(6) :78-82.

[39] 刘贤伟 . 好氧颗粒污泥的培养及其在工业废水处理中的应用研究 [D]. 济南 :山东大学 ,2007.

[40] ZHENG Y M ,YU H Q ,LIU S J ,et al. Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions[J]. Chemosphere 2006 ,63 :1791-1800.

(收稿日期 2011-05-25 编辑 :高渭文)

