

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能

姚力, 信欣*, 鲁航, 朱辽东, 谢思建

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 研究了连续流系统污泥颗粒化过程中 COD、氨氮和 TN 的去除效果以及成熟好氧颗粒污泥的物理性质和脱氮动力学。结果表明 40 d 内连续流系统内能形成好氧颗粒污泥。随着颗粒化程度的提高, 系统脱氮除碳性能有所增加; 第 41 ~ 60 d 稳定运行期间, 系统对 COD、氨氮和 TN 的平均去除率分别达到 85.54%、95.5% 和 65.56%, 且反应过程中硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的积累不高。成熟颗粒污泥有较多的空隙结构, 含有大量的胞外聚合物, 相比于接种絮状污泥, 其含水率、湿密度、沉降速度、机械强度、SVI 值等都体现出了明显的优势。成熟好氧颗粒污泥同步硝化反硝化效率为 81.69%, 硝化速率(以 NH_4^+ -N 计)和反硝化速率(以 NO_x^- -N 计)分别为 $5.78 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $4.90 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

关键词: 连续流; 好氧颗粒污泥; 培养; 低基质生活污水; 同步硝化反硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2626-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.040

Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow

YAO Li, XIN Xin*, LU Hang, ZHU Liao-dong, XIE Si-jian

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The COD, ammonia and total nitrogen removal efficiency, as well as the physical properties of aerobic granular sludge (AGS) and its denitrification kinetics were studied in the continuous flow reactor. The experimental results showed that the AGS was successfully cultivated in the continuous flow system within 40 days. The nitrogen and carbon removal efficiencies were gradually improved with the improvement of sludge granulation. In the running stage of 41-60 days, the COD, ammonia and TN removal efficiency could reach 85.54%, 95.5% and 65.56%, respectively. And the nitrate and nitrite nitrogen accumulation was not high in the reaction process. Mature AGS had more void structure and a large number of extracellular polymeric substances. It had significant advantages compared with the seed sludge in the aspects of moisture content, wet density, sedimentation rate, mechanical strength, and SVI values. The simultaneous nitrification and denitrification efficiency was 81.69%, the nitrification rate and denitrification rate were $5.78 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ and $4.90 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively.

Key words: continuous flow; aerobic granular sludge; cultivation; low concentration domestic wastewater; simultaneous nitrification and denitrification

好氧颗粒污泥技术是 20 世纪 90 年代开始研究的一种新型污水处理技术,同普通絮状污泥相比,具有除污效果好、密度大、强度高、微生物种类多、结构稳定、耐冲击负荷强以及沉降性能好等优点,成为研究的热点^[1,2]。近年来有研究表明,好氧颗粒污泥的特殊结构有利于提高处理系统的同步脱氮能力^[3,4],并且利用好氧颗粒污泥进行脱氮性能的研究取得了较大的进展。如阮文权等^[5]对好氧颗粒污泥进行了硝化反硝化(SND)功能驯化,反应 6 h 后 COD 的去除率在 90% 以上,氨氮去除率达 100%,污水脱氮效果显著。柏义生等^[6]以厌氧颗粒污泥和少量活性污泥为种泥,进水为人工配水,在 SBR 反应器中培养出了好氧颗粒污泥。成熟的好氧颗粒污泥对 COD、氨氮和 TN 的平均去除率分别为 94%、

97.5% 和 68.6%。王震等^[7]以人工配水模拟味精废水为基质在 SBR 系统内培养出了好氧颗粒污泥,成熟颗粒污泥在典型周期内,对 COD、氨氮和 TN 去除率分别为 96.51%、93.30% 和 73.04%,颗粒污泥具有同步脱氮特性。刘小英等^[8]在厌氧-好氧交替运行 SBR 反应器中,以成熟的好氧颗粒污泥处理人工模拟废水,同步硝化反硝化反应去除 N 约为 $232.5 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,占总氮去除量的 54.3%。而上述研究大多集中于 SBR 运行模式,而 SBR 系统为间歇进

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-02-07

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013GZ0067); 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室开放基金项目(KFKT2014003)

作者简介: 姚力(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 463398005@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xx@cuit.edu.cn

水排水,当处理大规模的城市污水时,会出现进出水时间长,反应器体积大等问题.我国大中型城市污水处理厂以连续流工艺居多,所以在连续流反应系统中培养好氧颗粒污泥更有实际意义.同时,上述接种污泥培养模式的同步硝化反硝化工艺中,很难控制好氧颗粒污泥中硝化细菌和好氧反硝化细菌群的比例和数量,脱氮过程中,难以确保反应系统稳定的脱氮效果.而一些异养硝化-好氧反硝化菌能够独立完成同步硝化反硝化过程.污水实际处理系统中,若接种脱氮菌泥为主要强化污泥,培养高效脱氮功能化好氧颗粒污泥,为实现捷径高效的生物脱氮途径提供了可能.

近年来,在连续流反应器中进行好氧颗粒污泥的培养成为研究的热点^[9~13],然而好氧颗粒污泥在连续流传统活性污泥系统内形成较难^[14],且形成的颗粒污泥存在稳定性差以及反硝化脱氮作用不明显^[15,16]等缺点.有研究发现,废水基质添加适量的 Ca^{2+} 离子有助于好氧颗粒污泥的形成^[17,18].同时,在活性污泥处理系统中,人们观察到了活性污泥的自凝聚现象,进而发现了絮凝细菌的存在,这对于微生物的颗粒固定化具有重要意义^[19].但仅仅依靠系统内自身的絮凝细菌形成生物絮体,其启动周期很长.好氧颗粒污泥的培养需 1.5 ~ 3 个月的时间^[20,21],极大地限制了颗粒污泥的应用.近年来,证实投加絮凝细菌是一种促进微生物固定的行之有效的办法^[22~24].但存在定期投加,实际操作不方便等缺点.污泥颗粒化是微生物的一种自凝聚行为,如从微生物的产絮自凝聚特性入手来分析,获得颗粒污泥是更为合理的方法^[25].

因此本实验在合建式连续流混合式反应器内,接种产絮异养硝化-好氧反硝化菌泥 TN-14 并联合外加 Ca^{2+} 促使好氧颗粒污泥的快速形成,研究其颗粒化过程中系统脱氮除碳性能;并在获得成熟的好氧颗粒污泥基础上,对其脱氮动力学方面进行研究,以期为进一步推进好氧颗粒污泥技术在实际工程中的应用提供科学实验依据.

1 材料与方法

1.1 实验废水

实验进水取自成都信息工程学校园生活污水,根据实验需求,添加葡萄糖、 NH_4Cl 以及 KH_2PO_4 调节废水碳、氮、磷的比例.反应器启动运行期,加入少量酵母浸膏、 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 以及微量 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等离子.污水主要指标 $\rho(\text{COD})$ 为

$150 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $25 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN})$ 为 $30 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP})$ 为 $2 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值在 6.5 ~ 7.0 之间.

1.2 实验装置与接种污泥

1.2.1 接种强化菌种及污泥

实验所用的强化脱氮菌剂 TN-14 由本课题组筛选获得^[26],具有异养硝化-好氧反硝化以及产絮功能,通过形态特征观察,生理生化试验和 16S rDNA 分子生物学手段,鉴定菌株 TN-14 为不动杆菌(*Acinetobacter* sp.).普通活性污泥取自西南航空港污水处理厂曝气池活性污泥,污泥为絮状,黑褐色. MLSS 为 $3.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 $122 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

富集培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): (NH_4)₂SO₄ 0.47 g; KH_2PO_4 1 g; $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.8 g; $\text{CaCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1 g; 柠檬酸三钠 2.04 g.

将脱氮菌剂 TN-14 以体积比 1‰ 的接种量接入富集培养基内,在 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 30°C 下培养 18 h 进入对数期后,以 2% 的体积接种量接入到富集培养基内进行扩大培养,自然沉淀后取其菌泥.

1.2.2 反应装置及启动运行方式

本实验采用合建式连续流反应装置,高 0.45 m,边长 0.12 m,有效容积为 4.3 L. 设置了曝气区和沉淀区,中间用隔板隔开,反应区和沉淀区的体积比为 3:1 (图 1). 反应装置中接种富集培养的 13 g (以干重计) TN-14 菌泥以及 3.3 g (以干重计) 普通活性污泥;接种后反应器的实际污泥浓度为 $3.67 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 反应器先闷曝 2 d,后改为连续进水,进水中外加 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ca^{2+} (以 CaCl_2 配制). 启动阶段有机负荷率 (OLR, 以 COD 计) 为 $0.4 \sim 0.6 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,以增加进水流量来增加进水负荷,在第 22 d,提高 OLR 为 $0.9 \sim 1.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 反应器在常温下启动运行 ($15 \sim 30^\circ\text{C}$),曝气量为 $3.6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,污泥回流量为 100%,根据实际运行情况给反应器进行排泥.

1.3 颗粒污泥脱氮动力学

从连续流反应器中取出适量成熟颗粒污泥,经 3 次离心清洗 ($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 5 min),放入 1.5 L 静态序批式反应器中,反应器内颗粒污泥浓度 MLSS 在 $3500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 同步硝化反硝化实验采用 NH_4Cl 作为氮源. 在恒温 (25°C) 下反应 6 ~ 7 h,间隔一定时间取样测定水质.

1.4 分析项目与方法

水体中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN 和 TP 指标均采用文献[27]的标准方法测定;采用数码相机

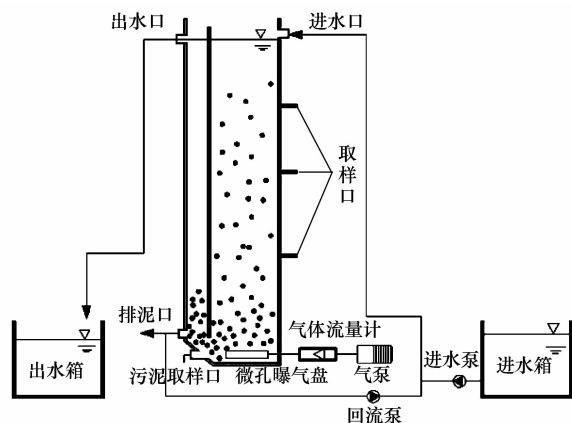


图1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental setup

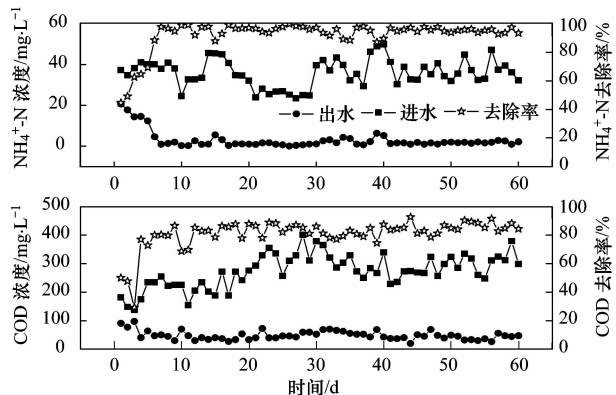
(SONY)以及扫描电镜(JSM-5900LV,日本)观察颗粒污泥的形态;好氧颗粒污泥的机械强度用完整系数(IC)表示,测定方法依据文献[28]进行;好氧颗粒污泥含水率的测定根据称重法测定;颗粒污泥的沉降速率的测定采用单颗粒的自由沉降方法^[29];好氧颗粒污泥的比重采用湿密度表示。

2 结果与讨论

2.1 污泥颗粒化过程中系统对 COD 和氨氮的去除

在好氧颗粒污泥培养过程中定期测定反应器进出水 COD 以及 NH_4^+-N 浓度的变化情况,其结果如图 2 所示。可以看出,实验开始时反应器的进水氨氮浓度为 $37.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,相应的氨氮(以 NH_4^+-N 计,下同)负荷为 $0.096 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,运行初期(1~5 d)反应器对 NH_4^+-N 的去除率均低于 80%,经过逐渐适应,氨氮的去除率趋于稳定。第 6~21 d,反应器对氨氮的平均去除率达到了 95.72%,此时,氨氮的进出水平均浓度分别为 $36.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在第 22 d 增大进水负荷,相应的氨氮负荷也变为 $0.144 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,并且进水的水质波动较大。第 25~40 d 阶段颗粒污泥的大量出现,系统仍保持较高的氨氮去除率,平均进水氨氮浓度为 $33.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水平均浓度为 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮平均去除率为 94.72%;第 41~60 d 颗粒污泥成熟强化阶段,反应器对氨氮的平均去除率达到了 95.50%。同时,反应器刚启动的前 5 d 里,由于新接种的污泥处于对废水的适应期,并且在水流的作用下损失了一部分污泥,导致系统对 COD 的去除效果有些波动,但是,污水处理系统经过前 10 d 的适应,污泥浓度逐渐恢复,对 COD 的去除也逐渐恢复到稳定,基本稳定在 80% 以上。第 22~40 d 提高负荷

后,进水平均 COD 浓度为 $317.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,系统出水平均浓度为 $54.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 82.48%。在第 41~60 d 里,反应器对 COD 的平均去除率上升至 85.54%。本实验结果说明好氧颗粒污泥的形成,能提高反应器对 COD 的去除能力,但是对氨氮的去除并无明显影响。

图2 好氧颗粒污泥形成过程中对 COD 和 NH_4^+-N 的去除情况Fig. 2 Changes of COD and NH_4^+-N removal rate during the formation of AGS

2.2 好氧颗粒污泥形成过程中脱氮能力的变化

图 3 是反应器在运行过程中的硝酸盐和亚硝酸盐的积累情况以及对 TN 的去除情况。从中数据可知,刚接种后系统对 TN 的去除率较低,约为 20.43%,此时硝酸盐和亚硝酸盐的浓度也较低,而未被氧化的氨氮含量较高。随着反应器的运行,污泥的适应性增强,对 TN 的利用率逐渐增大,在 22 d 提升负荷前,对 TN 的平均去除率为 44.89%,这一阶段硝酸盐的浓度也逐渐上升。这是因为反应器中污泥主体呈絮体状,溶解氧的传质效果好,水体中的氨氮被氧化成硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,平均积累量分别为 $12.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水中氨氮减少量是远高于出水中各氮素的总和,可判定系统中发生了同步硝化反硝化作用(SND)。而在颗粒污泥形成前主要由反硝化菌 TN-14 产生 SND 作用,它能在好氧的条件下利用硝酸盐进行反硝化降低其含量,增强系统的脱氮效果(普通活性污泥系统为 20%~30%)。颗粒污泥逐步形成期(22~40 d),系统的硝酸盐逐渐降低,反硝化效果进一步加强, TN 的去除率达到了 53.32%。随着反应器的继续运行(41~60 d),颗粒污泥逐步成熟稳定,粒径也逐渐增大,因此增加了缺氧区域,颗粒污泥特殊结构使脱氮效率有了较大幅度的提高,对总氮平均去除率达到 65.56%。沈耀良等^[10]在连续流完全混合反应器中以乙酸钠作为碳源培养的好氧颗粒污泥对 TN 的去

除率达到 60%,展示了良好的脱氮性能,但是本研究以实际生活污水为进水基质,稳定后也能达到 65.56% 的去除效果,可见在连续流系统内,采用接种产絮脱氮菌剂的方式有利于促进好氧颗粒污泥的快速启动,同时增强其对污水 TN 的去除效果.

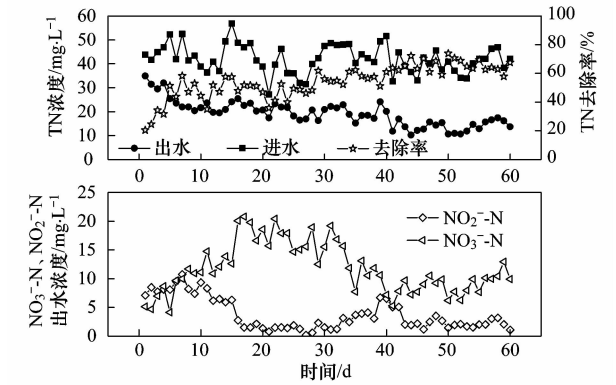


图3 好氧颗粒污泥形成过程中脱氮能力的变化

Fig. 3 Changes of denitrification ability during the formation of AGS

2.3 成熟好氧颗粒污泥的特性

2.3.1 颗粒污泥的物理性质

取反应器中成熟好氧颗粒污泥,对其物理性质进行了综合分析,结果见表 1. 从中可以看出,相比于接种污泥,形成的好氧颗粒污泥显示出明显的优势. 污泥的含水率是污泥的一项重要特征,污泥的含水率越低则相同体积的生物量越高,并且同样体积的污泥所需要的构筑物的体积就越小,产生的剩余污泥也就少. 本实验培养的好氧颗粒污泥的含水率为 96.3%,低于普通的活性污泥. 同样,污泥的密度(用湿密度来表达)也是用来表征污泥性状的又一指标,密度越大,截留在反应器中的机会也越大,也能从侧面反映污泥的沉降性能,湿密度越大,污泥的沉降性能越好. 在本实验中,测得好氧颗粒污泥的湿密度为 $1.052 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,是高于接种污泥 $1.005 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的,说明培养的颗粒污泥沉降性能好,活性高. 沉降速度则直接显示颗粒污泥的沉降性能,数

表 1 好氧颗粒污泥的物理特性

分析项目	接种污泥	颗粒污泥
MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.67	3.68
MLVSS/MLSS/%	66.46	60.72
SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	122.61	42.19 ~ 46.61
含水率/%	>99	96.3
湿密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.005	1.052
沉降速度/ $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$	4 ~ 10	22 ~ 46
机械强度/%	— ¹⁾	96.8

1) “—”表示文章中没有相关数据

据显示出颗粒污泥的沉降速度达到了 $22 \sim 46 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$,比初期的接种污泥高了数倍. 而机械强度则表征污泥抗剪切力作用能力的大小,颗粒污泥的机械强度越高则抗剪切力的能力强,污泥不易破碎. 本文测得该好氧颗粒污泥的机械强度为 96.8%,强度较高,能抵抗较强的水流剪切作用力,保持其颗粒完整性.

2.3.2 好氧颗粒污泥的外观及微观结构

图 4 是采用数码相机拍摄的平板上的好氧颗粒污泥,颗粒为黄色,形状规则、结构密实. 对反应器内形成的好氧颗粒污泥进行扫描电镜分析,结果照片如图 5 所示. 颗粒污泥整个外观结构密实,表面未见明显的丝状菌缠绕[图 5(a)]. 从图 5(b)只观察到少量的丝状菌,并且可清晰地看到污泥表面存在的空隙,空隙的间隙约为 $10 \sim 60 \mu\text{m}$,这些空隙可以作为颗粒污泥外部营养物质以及溶解氧进入颗粒内部的通道,同时也是颗粒内部微生物代谢物质逸出通道. 颗粒污泥的表面还可观察到大量的胞外多聚物的缠绕,并且有较高的黏性[图 5(c)]. 图 5(d)显示了颗粒污泥表面细菌的组成,主要以短杆菌、球菌为主. 这样的颗粒污泥结构和丰富的微生物相使颗粒污泥相比于絮状污泥具有更高强度、沉降性能和良好的生物活性.

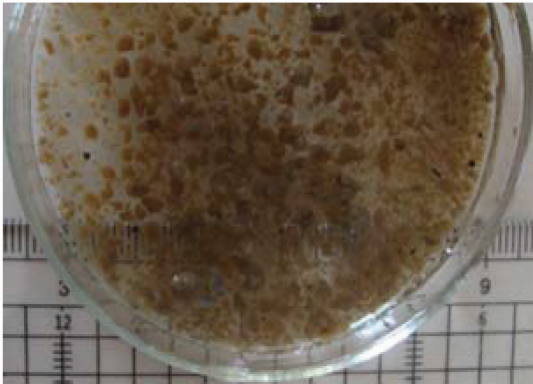
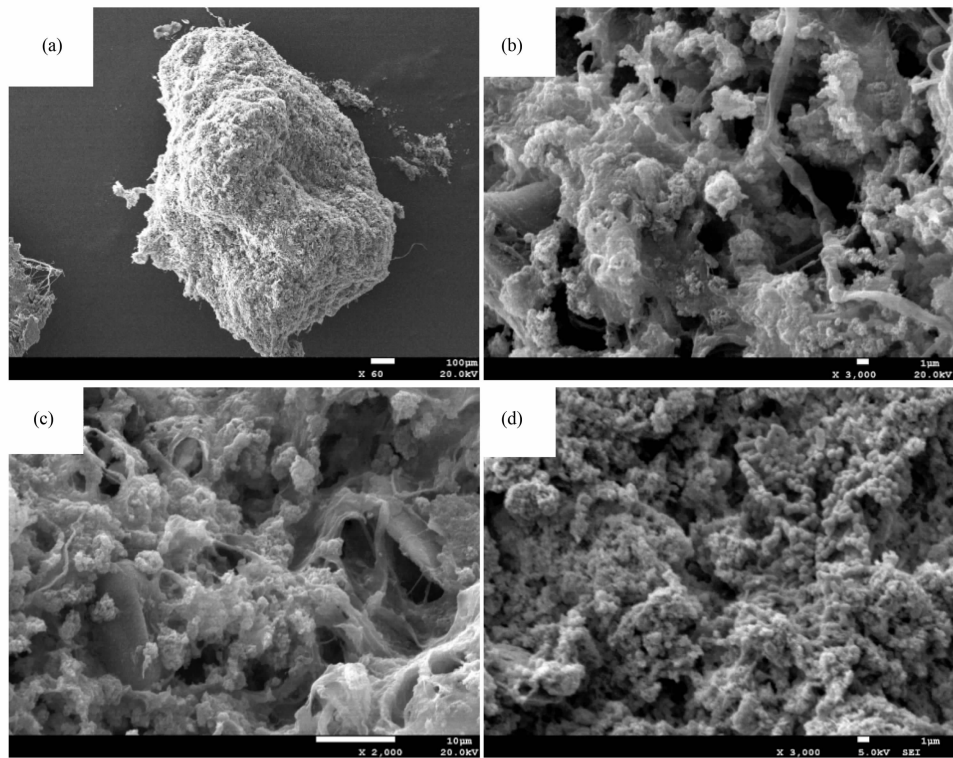


图 4 颗粒污泥照片

Fig. 4 Photo of Aerobic granular sludge (AGS)

3 好氧颗粒污泥的同步硝化反硝化动力学分析

好氧颗粒污泥具有特殊结构,由于溶解氧传质的限制存在好氧-缺氧-厌氧的微环境,在不同的区域存在的不同微生物可以同时发生硝化、反硝化作用. 本实验采用 NH_4Cl 作为氮源,考察成熟的好氧颗粒污泥在好氧的条件下同步硝化反硝化的能力,其结果如图 6 所示. 从中可以看出,氨氮在前 210 min 内迅速降低,同时 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度有一定



(a) 整体外观；(b) 颗粒污泥空隙；(c) 表面胞外分泌物；(d) 丰富的种群

图 5 好氧颗粒污泥微观结构扫描电镜照片

Fig. 5 Scanning electron microscope photograph of AGS

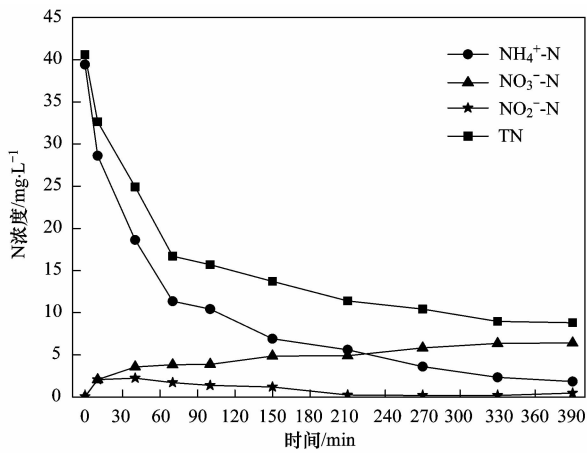


图 6 好氧颗粒污泥同步硝化反硝化特性

Fig. 6 SND characteristics of aerobic granular sludge

的积累,但在 150 min 时 NO_2^- -N 浓度逐渐降低,基本为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随着反应的继续, NO_3^- -N 的浓度逐渐升高,到反应 390 min 时达到了 $6.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但 TN 的浓度随着反应的进行仍逐渐下降,这说明氨氮转化生成的 NO_3^- -N 被转化了一部分,反应器中存在反硝化作用,并且反硝化作用较明显,这主要是因为 TN-14 作为具有反硝化能力的强化菌,在好氧颗粒污泥表面进行反硝化消耗了一部分 NO_3^- -N,在颗粒

污泥内部缺氧的环境下厌氧反硝化菌也进行了反硝化作用,使系统中的 NO_3^- -N 浓度较低.

假设,系统内的 NH_4^+-N 都是经过全程硝化反硝化进行脱氮的,即氨氮氧化为 NO_2^- -N 再氧化为 NO_3^- -N,再经过反硝化作用变为气态氮溢出反应器外. 通过计算可以得出好氧颗粒污泥在单个周期内的硝化速率、反硝化速率以及同步硝化反硝化速率(SND 效率),结果如表 2.

表 2 好氧同步硝化反硝化效率

Table 2 Aerobic simultaneous nitrification denitrification efficiency	
项目	颗粒污泥
TN 去除率/%	78.24
硝化速率(以 NH_4^+-N 计)/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	5.78
反硝化速率(以 NO_x^--N 计)/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	4.90
硝化效率/%	95.33
SND 效率 ¹⁾ /%	81.69

1) $\text{SND 效率} = (\text{NH}_4^+-\text{N 去除量} - \text{末期 NO}_x^--\text{N 积累量}) / \text{NH}_4^+-\text{N 去除量}$

可以看出好氧颗粒污泥的硝化作用很强,硝化速率达到了 $5.78\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,在 6.5 h 时硝化效率为 95.33%. 在反应过程中反硝化速率为 $4.90\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,SND 效率达到了 81.69%,采用好氧反硝化菌 TN-14 强化培养的好氧颗粒污泥体现了

较强的脱氮能力. 为了对同步硝化反硝化反应动力学进行很好地拟合,假设反应在理想状态下进行,硝化反应和反硝化反应各不干扰,二者都符合 Monod 模型,并且忽略亚硝酸盐的生成、反硝化、同化和氨化作用.

硝化反应在溶解氧充足的反应器中进行,不考虑其他因素,动力学采用 Monod 模型进行拟合,公式为:

$$Q_d = \frac{dD}{dt} = Q_{d,\max} \cdot \frac{D}{K_D + D} \tag{1}$$

对公式(1)进行积分整理得:

$$\frac{1}{t} \ln \frac{D_0}{D_t} = \frac{Q_{N,\max}}{K_D} + \frac{1}{K_D} \cdot \frac{D_0 - D_t}{t} \tag{2}$$

式中, $Q_{N,\max}$ 为 NH_4^+ -N 的最大比硝化速率, $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$; D_0 为初始时刻 NH_4^+ -N 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; D_t 为 t 时刻 NH_4^+ -N 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_D 为 NH_4^+ -N 饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

以 $(D_0 - D_t)/t$ 为横坐标,以 $\ln(D_0/D_t)/t$ 为纵坐标进行拟合,得到如图 7 的硝化动力学拟合曲线. 拟合方程为 $y = 0.3582 + 0.1232x$, 相关系数 $R^2 = 0.9882$. 通过计算可得到 $K_D = 8.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q_{N,\max} = 2.91 \text{ h}^{-1}$.

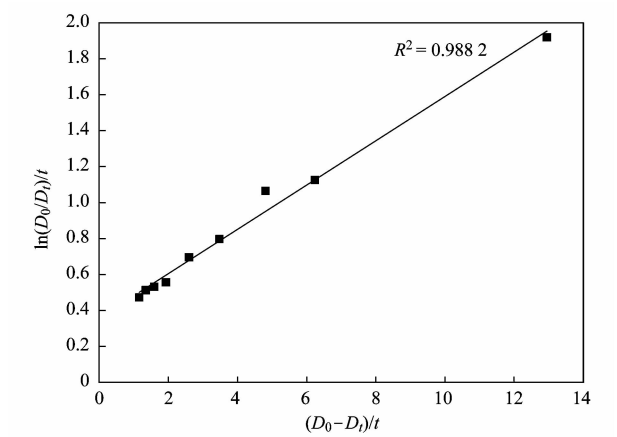


图 7 同步硝化反硝化中硝化动力学拟合曲线
Fig. 7 Kinetic fitting curve of nitrification in SND

同时,在反应过程中反硝化作用的动力学也采用 Monod 方程拟合,即:

$$P_d = \frac{dN}{dt} = P_{d,\max} \cdot \frac{N}{K_N + N} \tag{3}$$

NH_4^+ -N 的转化量 (ΔW) 与 NO_3^- -N 的生成量 (ΔN) 之差即为好氧颗粒污泥反硝化作用消耗的 NO_3^- -N,对式(3)进行积分整理得到:

$$\frac{\Delta t}{\Delta W - \Delta N} = \frac{P_{d,\max}}{K_N} \cdot (-\Delta N) + P_{d,\max} \tag{4}$$

式中, $P_{d,\max}$ 为 NO_3^- -N 的最大比反硝化速率, $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$; N_0 为初始时刻 NH_4^+ -N 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

D_t 为 t 时刻 NH_4^+ -N 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_N 为 NO_3^- -N 饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

以 ΔN 为横坐标, $\frac{\Delta t}{\Delta W - \Delta N}$ 为纵坐标,拟合在好氧情况下的反硝化动力学方程,得到如图 8 的曲线. 拟合方程为: $y = -1.0857x + 1.90062$, 相关系数 $R^2 = 0.8233$, 可计算出 $K_N = 0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P_{d,\max} = 1.90 \text{ h}^{-1}$.

因此,同步硝化反硝化速率(SND)可看作是硝化反应速率与反硝化反应速率的差值,即:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\text{SND}} = \left(\frac{dW}{dt}\right)_{\text{硝化}} - \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{反硝化}} \tag{5}$$

好氧颗粒污泥反应器内的 SND 动力学方程式为:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\text{SND}} = 2.91 \times \frac{W}{W + 8.12} - 1.90 \times \frac{N}{N + 0.57} \tag{6}$$

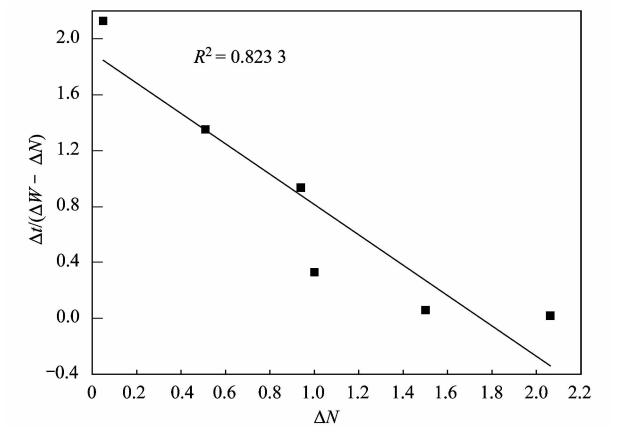


图 8 同步硝化反硝化中反硝化动力学拟合曲线
Fig. 8 Kinetic fitting curve of denitrification in SND

4 结论

(1)在连续流混合式反应器内,以实际生活污水为进水基质,接种产絮异养硝化-好氧反硝化菌泥 TN-14 并联合外加 Ca^{2+} 的方式,40 d 内能形成好氧颗粒污泥. 随着颗粒化程度的提高,系统脱氮除碳性能逐步提高,第 41 ~ 60 d,系统对 COD 的去除率、氨氮和 TN 的平均去除率分别达到 85.54%、95.5% 和 65.56%.

(2)成熟好氧颗粒污泥表现出较强的物理特性,相比于接种污泥,其含水率、湿密度、沉降速度、机械强度、SVI 值等都体现出了明显的优势.

颗粒污泥有较多的空隙结构,并且含有大量的胞外聚合物,微生物主要由球菌和杆菌组成。

(3)成熟的好氧颗粒污泥在好氧条件下同步硝化反硝化效率为 81.69%,硝化速率达到了 5.78 mg·(L·h)⁻¹,反硝化速率达到了 4.90 mg·(L·h)⁻¹;其同步硝化反硝化拟合动力学方程式为:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\text{SND}} = 2.91 \times \frac{W}{W + 8.12} - 1.90 \times \frac{N}{N + 0.57}$$

参考文献:

[1] 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.

[2] Wang Z W, Li Y, Zhou J Q, *et al.* The influence of short-term starvation on aerobic granules[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(12): 2373-2378.

[3] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **90**(6): 761-769.

[4] 张朝升, 章文菁, 方茜, 等. DO 对好氧颗粒污泥短程同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(3): 413-416.

[5] 阮文权, 陈坚. 同步硝化与反硝 SND 好氧颗粒污泥脱氮过程初步研究[J]. 安全与环境学报, 2003, **3**(5): 3-7.

[6] 柏义生, 于鲁冀, 王震. 好氧颗粒污泥同步脱氮特性[J]. 环境化学, 2013, **32**(11): 2186-2192.

[7] 王震, 柏义生, 孔德芳, 等. 好氧颗粒污泥的培养及实现同步脱氮[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(7): 66-70.

[8] 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 等. 同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 214-220.

[9] Wang J F, Wang X, Zhao Z G, *et al.* Organics and nitrogen removal and sludge stability in aerobic granular sludge membrane bioreactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **79**(4): 679-685.

[10] 沈耀良, 李媛, 孙立柱. 连续流反应器中培养好氧颗粒污泥的运行效能研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(1): 1-4.

[11] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: precipitating calcium and iron salts in granular interiors[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8051-8057.

[12] Gao J F, Su K, Chen R N, *et al.* The effect of continuous feeding on the stability of aerobic granular sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(7): 1377-1383.

[13] Liu H B, Li Y J, Yang C Z. *et al.* Stable aerobic granules in continuous-flow bioreactor with self-forming dynamic membrane[J]. Bioresource Technology, 2012, **121**: 111-118.

[14] Wan C L, Sun S P, Lee D J. *et al.* Partial nitrification using

aerobic granules in continuous-flow reactor: rapid startup[J]. Bioresource Technology. 2013; **142**: 517-522.

[15] Wan C L, Yang X, Lee D J, *et al.* Influence of hydraulic retention time on partial nitrification of continuous-flow aerobic granular-sludge reactor[J]. Environmental Technology, 2014, **35**(14): 1760-1765.

[16] 牛姝, 段百川, 张祚薰, 等. 连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 986-992.

[17] Ren T T, Liu L, Sheng G P, *et al.* Calcium spatial distribution in aerobic granules and its effects on granule structure, strength and bioactivity[J]. Water Research, 2008, **42**(13): 3343-3352.

[18] 杨新萍, 韩娇, 周立祥. Ca²⁺ 在好氧颗粒污泥形成中的作用[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1269-1273.

[19] Schmidt J E E, Ahring B K. Extracellular polymers in granular sludge from different upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1994, **42**(2-3): 457-462.

[20] 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**(10): 1791-1800.

[21] Xiao F, Yang S F, Li X Y. Physical and hydrodynamic properties of aerobic granules produced in sequencing batch reactors[J]. Separation and Purification Technology, 2008, **63**(3): 634-641.

[22] Lvaoa V, Wang X H, Tay S T L, *et al.* Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **70**(3): 374-381.

[23] 宋志伟, 童龙燕, 潘月军, 等. 絮凝细菌投加量对好氧颗粒污泥性能影响的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1263-1268.

[24] 宋志伟, 宁婷婷. 生物絮凝剂对好氧污泥颗粒化性能及其种群结构的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012, **22**(3): 241-246.

[25] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1237-1243.

[26] 信欣, 姚力, 鲁磊, 等. 耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3926-3932.

[27] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 105-218.

[28] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors[J]. Environmental Technology, 2002, **23**(8): 931-936.

[29] Dulekgurgen E, Ovez S, Artan N, *et al.* Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Biotechnology Letters, 2003, **25**(9): 687-693.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行