

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O₃ 生成潜势 曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)

利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)

沈阳市降水化学成分及来源分析 张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)

秦皇岛大气污染物浓度变化特征 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)

禽类肉鸡生长过程 NH₃、N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放 周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)

碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)

生物滴滤塔净化多组分废气的研究 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)

在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 金圣, 黄立维, 李国平 (2121)

模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)

一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 华祖林, 汪靛 (2134)

HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 李燕, 李兆富, 席庆 (2139)

基于非点源污染的水质监测方案研究 吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)

不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)

春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)

三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)

湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)

刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)

反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)

三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)

UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 张一清, 周玲玲 (2205)

臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)

硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)

炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)

金属离子对 δ-MnO₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 李非里, 牟华倩 (2232)

核壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 刘建明, 李红 (2240)

有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 闫梦玥, 庞志华, 李小明, 赵建宇, 罗隽 (2249)

纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 谷逢宇, 张靖天 (2256)

改性水凝胶的制备及其对 Pb²⁺、Cd²⁺ 吸附性能研究 吴宁梅, 李正魁 (2263)

直接大红 4BE 的磷钨酸均相催化还原脱色 魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)

基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)

Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)

二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)

进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)

接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)

聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)

体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)

我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)

麦穗鱼物种敏感性评价 王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)

不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)

桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)

直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl⁻ 和 Hg²⁺ 的响应 王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)

UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)

7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃 (2361)

溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)

不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)

典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 陈建刚, 曹雪 (2383)

三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)

北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永锋, 田青 (2399)

季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 李晓燕 (2407)

东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)

模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)

甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)

胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 杨榕, 李博文, 刘微 (2436)

长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)

有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)

北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)

氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)

焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛义典 (2473)

富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 李坤权, 李焯, 郑正, 张雨轩 (2479)

生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)

基于物质流分析的钾素流动与循环研究 白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)

《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)

接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究

刘文如¹, 沈耀良^{1,2*}, 丁玲玲¹, 丁敏¹

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 中温(28~30℃)条件下,以自配无机氨氮废水为研究对象,在柱形SBR反应器中接种好氧颗粒污泥,通过逐步提升进水NH₄⁺-N浓度(100~1000 mg·L⁻¹)和缩短水力停留时间(8~4 h),快速启动硝化颗粒污泥工艺. 系统运行约30 d时,进水NH₄⁺-N负荷达3.9 kg·(m³·d)⁻¹,NH₄⁺-N平均去除率在95%以上;后续高负荷运行阶段,氨氧化速率达5.0 kg·(m³·d)⁻¹左右;反应器中出现亚硝酸盐持续积累的现象,25~70 d期间,NO₂⁻-N积累速率达2~4.5 kg·(m³·d)⁻¹;尽管进水组分发生变化(COD/N),且进水负荷波动频繁,但整个运行过程中污泥始终保持良好的颗粒结构,SVI为30~40 mL·g⁻¹,36 d时粒径大于0.21 mm的颗粒污泥约占污泥的93%(质量分数);颗粒污泥由接种时的浅黄色逐渐变为棕黄色,部分变为棕色. 结果表明,以好氧颗粒污泥接种是快速启动硝化工艺和形成硝化颗粒污泥的关键.

关键词: 好氧颗粒污泥; 硝化工艺; 硝化颗粒污泥; 短程硝化; 接种

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2302-07

Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge

LIU Wen-ru¹, SHEN Yao-liang^{1,2}, DING Ling-ling¹, DING Min¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Using synthetic ammonia-rich wastewater as influent, rapid start-up of the nitrification reactor was attained in a laboratory-scale column-type sequencing batch reactor (SBR) inoculated with aerobic granular sludge, by gradually increasing the influent NH₄⁺-N concentration (100-1000 mg·L⁻¹) and decreasing the hydraulic retention time (8-4 h) under mesophilic condition (28-30℃). The influent loading rate of NH₄⁺-N reached 3.9 kg·(m³·d)⁻¹ and the average ammonia removal efficiency was above 95% within one month. Values of ammonia oxidizing rate (AOR) as high as 5.0 kg·(m³·d)⁻¹ was obtained in the following operational stage with extremely high nitrogen loading rate. Nitrite accumulation obviously occurred during the start-up period. The nitrite accumulation rate reached 2-4.5 kg·(m³·d)⁻¹ from day 25 to 70. In spite of the change in the feeding composition (COD/N ratio) and the frequent fluctuations of nitrogen loading rate, the granules maintained their structures, with the SVI of 30-40 mL·g⁻¹. The amount of granules with diameter larger than 0.21 mm was about 93% (mass fraction) of the total on day 36. The granular color changed from yellow to brownish-yellow, and some turned brown in this study. All these results suggested the critical role of aerobic granular sludge as seed sludge for the rapid start-up of nitrifying processes and the formation of nitrifying granules.

Key words: aerobic granule; nitrifying process; nitrifying granule; nitrite accumulation; seed

好氧颗粒污泥凭借其密实的颗粒结构、良好的沉降性能和多样的微生物种群等众多优点受到水处理领域研究者的广泛关注^[1-5]. 好氧颗粒污泥作为一类微生物自凝聚而成的特殊生物膜,具有良好的截留微生物能力,较好地解决了传统絮体污泥泥水分离时间长、易生物流失等难题,尤其对生长缓慢、世代时间长的微生物(如硝化细菌)的足量富集具有重要意义^[6,7]. Liu等^[8]认为好氧颗粒污泥适于作为接种污泥用于启动硝化工艺; Kishida等^[9]在CSTR反应器中接种好氧颗粒污泥成功启动硝化系统,39 d氨氮去除负荷达1.8 kg·(m³·d)⁻¹; Cydzik-Kwiatkowska等^[6]和Sun等^[10]在SBR中接种

好氧颗粒污泥处理含氮废水,均取得良好硝化效果. 以上研究都表明好氧颗粒污泥作为种泥启动硝化系统的有效性,但在国内以好氧颗粒污泥接种启动硝化工艺的相关报道还非常有限. 同时,好氧颗粒污泥的稳定性是限制其应用的一大瓶颈^[4,5],而富集硝化菌等缓慢生长型微生物可改善颗粒污泥的稳定性^[8,11].

因此,本研究拟在SBR反应器中接种培养2个

收稿日期: 2012-08-29; 修订日期: 2012-11-24

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA610002); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0857)

作者简介: 刘文如(1987~),男,硕士,主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: LWR888888@gmail.com

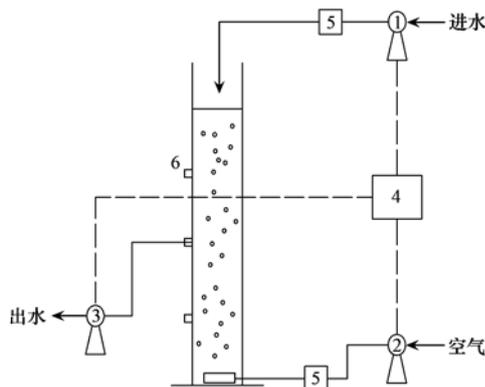
* 通讯联系人, E-mail: ylshenniu@126.com

多月的好氧颗粒污泥快速启动硝化系统,并对启动过程中系统运行性能及颗粒污泥形态变化过程进行分析。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行

本试验所用装置为圆柱形 SBR 反应器(图 1),由有机玻璃制成,有效容积为 2 L($H/D=20$)。反应器底部装有曝气装置,为污泥系统提供溶解氧和剪切力,通过流量计控制曝气量为 $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (表面上升流速 $0.85 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$),排水比为 1/2。SBR 反应器的运行通过时间程序控制器实现对反应过程的自动控制,运行周期分进水、曝气、静置沉淀和排水 4 个阶段,5 min 进水,10 min 沉降,排水和闲置共 3 min,曝气时间根据运行周期调整,具体运行工况见表 1。反应器置于恒温水浴箱中,温度控制在 28°C 左右。



1. 进水泵; 2. 充氧仪; 3. 电磁阀;
4. 时间控制器; 5. 流量计; 6. 排水和取样口

图 1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

表 1 SBR 具体运行状况

编号	运行时间 /d	进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT /h	NLR / $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$
1	1~7	100	8	0.3
2	7~11	150	8	0.45
3	11~14	250	8	0.75
4	14~16	250	6	1.0
5	16~21	350	6	1.4
6	21~25	450	6	1.8
7	25~30	650	6	2.6
8	30~36	650	4	3.9
9	36~48	800	4	4.8
10	48~70	1000	4	6.0

1.2 试验用水与接种污泥

原水为人工配制无机含氮废水,其中以氯化铵

为氮源(以 N 计 $100 \sim 1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、碳酸氢钠为碳源(同时以此调节进水 pH 约为 8.0),还包括磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、碳酸氢钠、硫酸镁、氯化钙及微量元素。

接种污泥来自于试验室培养 2 个多月的好氧颗粒污泥,其运行状况为:进水中 C:N:P = 100:5:1, COD 为 $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 容积负荷为 $6.0 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 出水中 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均在 90% 左右。接种 MLSS 为 $2800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SVI 为 $40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径为 $0.45 \sim 0.96 \text{ mm}$ 。

1.3 分析方法

$\text{NH}_4^+\text{-N}$: 纳氏试剂比色法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 紫外分光光度法; MLSS: 标准重量法; pH: 雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计; DO: WTW 便携式 Oxi1970i 测量仪; 污泥及颗粒污泥形态观察: OLYMPUS CX41 型显微镜。

颗粒污泥粒径分布采用湿筛分法,以质量分数表示。从反应器中取出部分污泥颗粒,清洗后,分别通过孔径为 0.96、0.64、0.45 和 0.21 mm 的分样筛,测量留在筛网上的颗粒质量,然后将各部分相加得到污泥总重,最终确定每一部分所占比例。

2 结果与讨论

2.1 硝化工艺的启动与运行过程

本研究历时 70 d,以逐步提升进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度(100 ~ 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和缩短水力停留时间(HRT: 8 ~ 4 h)为手段,分为快速启动阶段(1 ~ 30 d)和高负荷运行阶段(30 ~ 70 d)两部分,运行过程如图 2、图 3 所示。

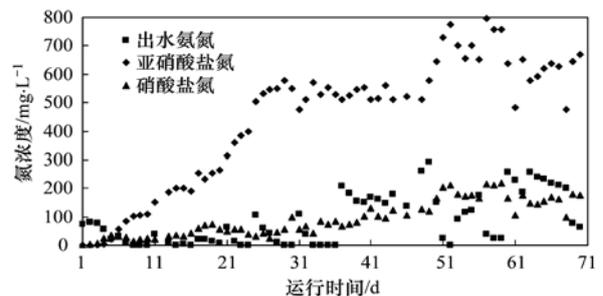


图 2 出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化过程

Fig. 2 Time courses of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the effluent solution

在快速启动阶段,从图 2 和图 3 可以看出,虽然生长环境发生改变,但接种的好氧颗粒污泥并没有经历过长的适应期(第 1 ~ 4 d),在第 5 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率即恢复到 78%,第 7 d 达到 90% 以上,此时

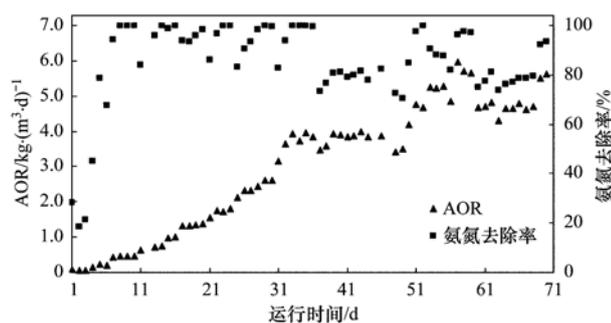


图3 NH_4^+ -N去除率和AOR的变化过程

Fig. 3 Time courses of NH_4^+ -N removal ratio and AOR

SBR 容积负荷为 $0.45 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。随后,随着进水 NH_4^+ -N 负荷的不断提升(图3),仅1个月时间反应器氨氮氧化速率(AOR)高达 $3.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,此阶段出水中 NH_4^+ -N 难以检测到。

金仁村等^[12]建议废水生物处理系统的稳定性应包含2个方面,即抵抗各种干扰的能力(抵抗力)和受影响后恢复原有状态或达到新的适宜稳态的能力(恢复力)。单从氨氮去除效果上看,本反应器在快速启动阶段表现出良好的稳定性。反应器启动运行1周后,改变进水基质浓度(第11、17、21、25 d)和HRT(第14 d、第30 d)时,出水中氨氮浓度仅有轻微的波动,氨氮去除率仍保持在80%以上,表现出良好的抵抗力;同时,在发生变动后工艺可以迅速恢复到新的稳定状态,运行约3~6个周期后氨氮去除率即可稳定在95%以上,表现出较强的恢复力。

为了进一步考察本系统的除氨能力,进水 NH_4^+ -N 浓度由 $650 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升逐步至 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 NH_4^+ -N 负荷分别达 $4.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $6.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 此阶段即为高负荷运行阶段。由图2和图3可以看出,在此运行阶段,氨氮去除效果呈现一定范围的波动,但平均去除率仍在85%以上,且AOR保持在 $5.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右。

值得注意的是,试验过程中出现了亚硝酸盐持续大量积累的现象。如图2所示,在4~25 d期间,出水中 NO_2^- -N 浓度随运行时间逐渐升高;在25~48 d阶段, NO_2^- -N 累积率保持在80%~90%之间;而当进水 NH_4^+ -N 浓度进一步升至 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水中 NO_2^- -N 浓度下降, NO_2^- -N 累积率降至80%以下。但在25~70 d期间, NO_2^- -N 积累速率在 $2 \sim 4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间,远远高于一般SHARON工艺中

亚硝化速率 $0.32 \sim 0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[13]。亚硝酸盐生成速率高于消耗速率是其发生积累的直接原因,而更深层次上说是参与硝化过程的两组功能菌活性或数量上的差异^[14,15]。尽管出水中一直有少量的 NO_3^- -N 生成证明有硝酸菌的存在,但其活性或数量较氨氧化细菌呈明显劣势,即本工艺实现高效的短程硝化。

研究表明,颗粒污泥中硝化细菌的数量和活性会随着废水中COD/N值的减小而上升^[8,16-18]。本试验以完全的无机含氮废水(COD/N=0)为原水,接种颗粒中的异养细菌因缺乏基质会受到抑制失去竞争力,自养型硝化细菌活性得以提升并大量繁殖。同时,本试验的整个过程中污泥一直保持颗粒态优势,颗粒污泥的存在是本工艺能够快速成功启动并保持高效、稳定运行的关键因素,具体可以从以下几个方面分析:首先,颗粒污泥沉降性能良好 $40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,可以有效地将硝化细菌截留在反应器内,弥补了硝化细菌生长速率缓慢、细胞产率低的缺陷,使硝化系统在短时间内成功启动并在高负荷下运行。其次,颗粒污泥凭借独特的空间结构,在其边缘及内部存在溶解氧渗透梯度(或生物种群的成层分布),创造出好氧、缺氧(或厌氧)沿梯度方向分布的区域环境^[17,19],而相关报道指出大多数硝化细菌可以在好氧和缺氧环境之间的边缘区域存活并表现出更高的硝化性能^[20]。另外,细菌的群体行为调控机制(quorum sensing, QS)对生物膜的形成和运行性能具有重要影响,近年来,有学者将QS引入用以研究好氧颗粒污泥^[21,22]。颗粒污泥具有较高浓度的生物量,聚集的生长方式使菌群密度升高,不但利于细胞与细胞间的物质、信息传递,而且使细菌的群体行为调控机制得以发挥(如改变代谢方式、分泌EPS),种内和种间的交互作用使颗粒污泥具备特定的动态调控能力,因此相比于游离的个体细胞或絮体活性污泥能够有效保护微生物(如硝化细菌)免受有毒、有害物质或冲击负荷等不利因素的影响,即工艺具有良好的稳定性能^[7,23]。

2.2 颗粒污泥的形态演变过程

反应器在启动初期MLSS有一定程度的下降(第5 d时,MLSS约为 $1800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,见图4)。因为微生物生存环境发生变化,由有机环境转变为无机环境,好氧颗粒污泥中的大量异养微生物因缺乏有机质供给生长受限并逐渐衰减,使颗粒粒径减小且部分颗粒污泥解体而被洗出。但随着运行时间的延长,自养型硝化细菌逐渐成为优势种群,并随着负荷

的提升大量增殖,在不控制 SRT 的情况下 MLSS 不断上升,第 65 d 时达到 $7\ 800\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 值得注意的是,系统运行的过程中,污泥沉降性能良好,SVI 一直维持在 $30\sim 40\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间(图 4),且颗粒污泥一直是系统内优势污泥形态,即形成具有良好硝化性能的颗粒污泥(硝化颗粒污泥),见图 5,6. 另外,本试验对于系统启动过程中颗粒污泥的理化特性变化过程进行了初步研究,对比接种颗粒和试验末期所获得的颗粒污泥,发现外观和颜色均发生了明显变化,如图 5 所示,硝化颗粒污泥具有更加清晰、整齐的边缘,颗粒结构更显密实;颗粒污泥由接种时的浅黄逐渐变为棕黄色,部分甚至变为棕色,这和文献[24]结果类似.

图 6 所示为试验末期反应系统中颗粒污泥粒径分布状况. 可以看出,此时颗粒污泥粒径较接种时

有明显变化,粒径在 $0.21\sim 0.96\ \text{mm}$ 范围所占质量分数为 92%,其中以粒径 $0.21\sim 0.45\ \text{mm}$ 为主(约占 68%),而 $<0.21\ \text{mm}$ 和 $>0.96\ \text{mm}$ 的分别仅为 6.2%、1.8%. 研究表明,颗粒污泥的粒径对系统的运行性能具有重要影响,包括传质梯度、沉降性能等,鉴于运行性能和经济两方面的考虑,Toh 等^[25]建议最佳粒径为 $1.0\sim 3.0\ \text{mm}$; Gao 等^[4]从传质角度分析,认为好氧颗粒污泥的最佳尺寸应小于 $0.5\ \text{mm}$. 对于硝化颗粒污泥因其缓慢的生长速度,形成的颗粒结构更加致密,传质限制更加强烈,所以最佳粒径范围可能更小. 本试验中,粒径在 $0.21\sim 0.45\ \text{mm}$ 范围内的颗粒污泥约占污泥的 68% (质量分数),较接种时的粒径 ($0.45\sim 0.96\ \text{mm}$) 有明显减小,可能的原因之一即是该粒径范围内的颗粒能够保持微生物生长代谢的动态平衡而在系统中成为优势,而更小粒径的污泥则因选择压的控制而随出水被洗出. 另外,颗粒粒径的大小还和剪切力、选择压等控制参数相关^[3~5].

对于接种絮体污泥培养好氧颗粒污泥的众多研究表明,足够大的剪切力是 SBR 中颗粒污泥形成及其结构维持的重要条件之一. Tay 等^[26]报道好氧颗粒污泥形成要求的最小曝气速率为 $1.2\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; Chen 等^[27]发现在低剪切力 ($0.8\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.6\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 工况下颗粒污泥变得结构疏松、外观不规

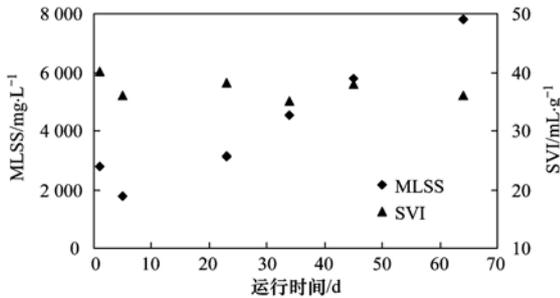


图 4 MLSS 和 SVI 的变化过程
Fig. 4 Time courses of MLSS and SVI

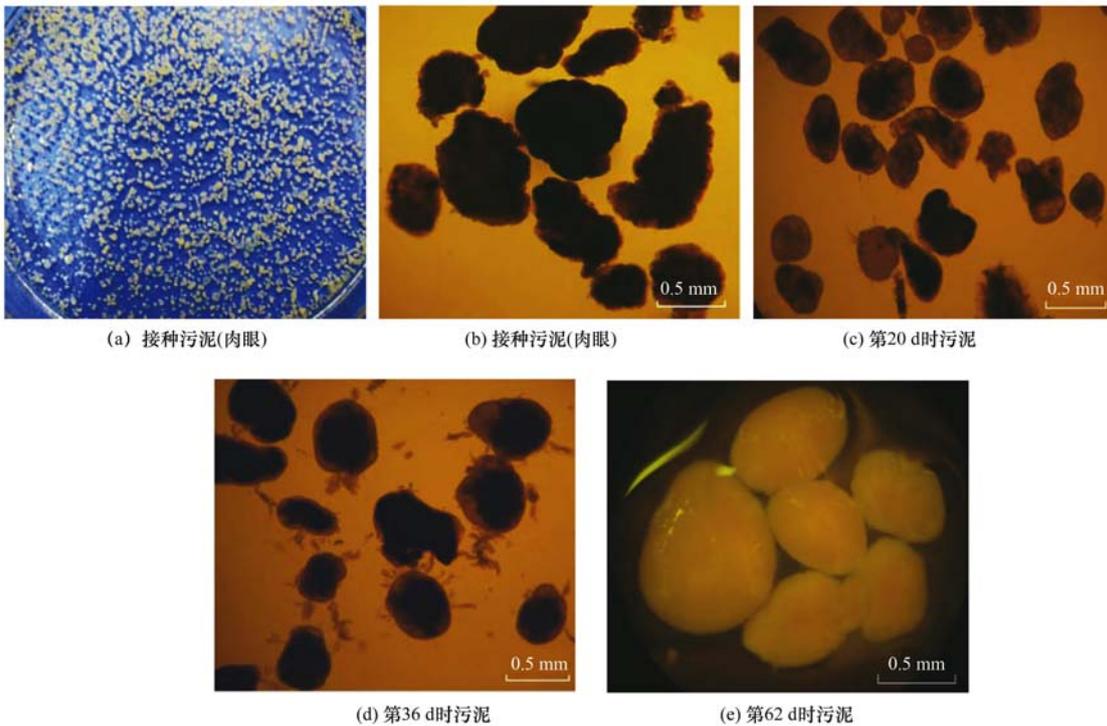


图 5 SBR 中颗粒污泥的形态演变

Fig. 5 Evolution of morphological observation of granular sludge in SBR

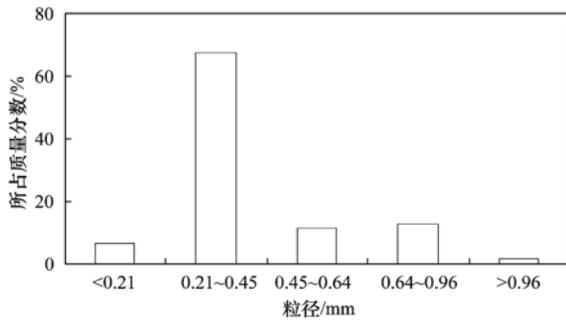


图 6 硝化颗粒污泥的粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution of nitrifying granules

则且运行性能下降. 而本试验在气体表面剪切力仅为 $0.85 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (小于接种颗粒污泥之前的 $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 的条件下污泥始终保持着良好的颗粒状态且边缘清晰、结构致密. 剪切力的大小应根据微生物的最大生长速率合理控制^[28], 过高的剪切力反而会造成能耗的增加, 同时, 过高的剪切力使颗粒间摩擦加剧, 在启动初期造成颗粒表面微生物的剥落^[29], 不利于慢速生长型硝化细菌的富集, 尤其是在启动阶段. SBR 中空气曝气的作用除了提供剪切力外还要满足耗氧微生物对氧气的需求, Sturm 等^[30]发现 DO 对污泥颗粒化的影响比剪切力更加显著, 这对培养具有短程硝化性能的颗粒污泥具有重要意义, 因为短程硝化的实现往往需要创造较低的 DO 环境^[31].

SBR 中选择压 (selection pressure) 主要包括沉降时间、排水时间和容积交换率或排水深度, 被认为是驱动颗粒污泥形成的重要因素, Liu 等^[32]将其综合为最小沉降速率 $(V_s)_{\min}$ [见式(1)], 并指出了为了强化污泥的颗粒化, $(V_s)_{\min}$ 不得低于 $8 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. Chen 等^[27]报道较低的选择压导致颗粒污泥外观不规则、结构疏松且除污性能变差.

$$(V_s)_{\min} = \frac{L}{t_s + \frac{(t_d - t_{d,\min})^2}{t_d}} \quad (1)$$

式中, t_s 为设定的沉降时间; L 为液面与排水口间距离 (即排水深度); t_d 为完成排水所需时间; $t_{d,\min}$ 为最小排水时间 (SBR 内好氧颗粒污泥比例约为 100% 时的 t_d).

本试验中 $(V_s)_{\min}$ 小于 $2.4 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ (L 为 40 cm , t_s 为 10 min , t_d 和 $t_{d,\min}$ 未知且相对 t_s 较小), 小于 Liu 等^[32]所报道结果. 即使在如此低的选择压条件下, 粒径大于 0.21 mm 范围的颗粒污泥约占总体污泥的 93.8% (质量分数), 即系统中颗粒污泥仍为绝

对优势 (图 6), 且颗粒外观规则、结构密实. Liu 等^[33]分析由于硝化细菌较低的生长速率, 硝化颗粒污泥启动时过短的沉降时间将会造成生物体流失, 延长硝化颗粒污泥形成和达到稳定状态的时间. 因此, 本试验中即使接种的颗粒污泥具有良好的沉降性能 ($\text{SVI} = 40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$), 仍然选取 10 min 的沉降时间, 保证硝化细菌的低流失率, 这和 De Clippeleir 等^[34]快速启动 OLAND-SBR 的策略是一致的. 另外, 低选择压可能也是系统内存有 6.8% 粒径 $< 0.21 \text{ mm}$ (图 6) 污泥的原因.

由于硝化细菌极低的生长速率、细胞产率和有限的 EPS 产量, 硝化颗粒污泥的形成一般需要较长的时间^[10,18,35]. 而本试验却在不利条件 (低剪切力、低选择压) 下快速形成具有高活性的硝化颗粒污泥. 沈祥信等^[36]报道预先加入 15% 成熟好氧颗粒污泥, 能加速好氧颗粒污泥在反应器内形成; Xu 等^[37]发现以小颗粒污泥接种培养得到的好氧颗粒污泥粒径大、COD 去除率高、疏水性好, 且启动时间短. 本试验接种好氧颗粒污泥启动, 试验中虽然发现有颗粒裂解、粒径变小等现象, 但至试验结束时反应器内污泥一直维持了颗粒结构优势 (图 6), 说明接种的好氧颗粒污泥及其裂解后的小粒子作为硝化颗粒污泥的前身, 从而大大缩短硝化颗粒污泥的形成时间. Yang 等^[14]在以厌氧产甲烷颗粒污泥接种培养氨氧化颗粒污泥的研究中也得出类似的结论.

以上分析表明, 硝化颗粒污泥的培养或启动与以异养微生物为主的好氧颗粒污泥的培养在相关参数 (如气体上升流速、选择压等) 的控制上有所不同, 目标微生物的特性 (如生长速率、EPS 产率等) 对剪切力、选择压等参数的选择有重要影响, 从而也在一定程度上决定反应器的构型和特征 (高径比、运行模式等). 同时, 相比于絮体活性污泥, 接种好颗粒污泥为硝化细菌的生长载体, 可以快速获得硝化颗粒污泥. 从另一个方面来说, 本试验也证明富集生长速率较为缓慢的硝化细菌可以改善颗粒污泥的稳定性, 即使在较低的选择压、较低的剪切力等不利条件下.

3 结论

(1) 以好氧颗粒污泥接种 SBR 反应器, 在中温 (28°C) 条件下通过逐步提升进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷成功启动硝化工艺, 氨氧化速率 (AOR) 达 $5.0 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右.

(2) 反应器呈现良好的短程硝化性能, NO_2^- -N 积累速率达 $2 \sim 4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(3) 整个启动过程中, 好氧颗粒污泥始终保持良好的颗粒状态, 硝化细菌的富集有利于改善好氧颗粒污泥的稳定性.

(4) 接种好氧颗粒污泥, 在剪切力为 $0.85 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 选择压 $(V_s)_{\min}$ 小于 $2.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下, 快速获得硝化颗粒污泥, 36 d 时粒径大于 0.21 mm 的颗粒污泥约占污泥的 93% (质量分数). 以好氧颗粒污泥接种是硝化颗粒污泥快速形成的关键因素.

参考文献:

- [1] 郝晓地, 陈新华, 戴吉, 等. 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.
- [2] 朱亮, 徐向阳, 罗伟国, 等. 废水生物处理好氧污泥颗粒化研究进展[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2657-2664.
- [3] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 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.
- [4] Gao D W, Liu L, Liang H, *et al.* Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, **31**(2): 137-152.
- [5] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [6] Cydzik-Kwiatkowska A, Wojnowska-Baryła I. Nitrifying granules cultivation in a sequencing batch reactor at a low organics-to-total nitrogen ratio in wastewater[J]. *Folia Microbiologica*, 2011, **56**(3): 201-208.
- [7] Ahmad S A I, Bari S M N, Mohiuddin M. Biofilm; multicellular living of the unicellular bacteria [J]. *International Journal of Biosciences*, 2012, **2**(6): 59-71.
- [8] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Improved stability of aerobic granules by selecting slow-growing nitrifying bacteria [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **108**(2): 161-169.
- [9] Kishida N, Saeki G, Tsuneda S, *et al.* Rapid start-up of a nitrifying reactor using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2012, **65**(3): 581-588.
- [10] Sun F Y, Yang Y J, Dong W Y, *et al.* Granulation of nitrifying bacteria in a sequencing batch reactor for biological stabilisation of source-separated urine [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **166**(8): 2114-2126.
- [11] De Kreuk M K, van Loosdrecht M C M. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11-12): 9-17.
- [12] 金仁村, 郑平, 黄可谈, 等. 环境和水质条件冲击下厌氧生物反应器的稳定性研究进展[J]. 现代化工, 2006, **26**(5): 13-17.
- [13] Jaroszynski L W, Oleszkiewicz J A. Autotrophic ammonium removal from reject water: partial nitrification and anammox in one-reactor versus two-reactor systems [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(3): 289-294.
- [14] Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, *et al.* Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environment Science and Technology*, 2007, **41**(23): 8159-8164.
- [15] 杨洋, 左剑恶, 孙寓姣, 等. 好氧亚硝化颗粒污泥特性的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2710-2711.
- [16] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(1): 86-92.
- [17] Ni B J, Yu H Q, Sun Y J. Modeling simultaneous autotrophic and heterotrophic growth in aerobic granules [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1583-1594.
- [18] Wu L, Peng C Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(2): 234-241.
- [19] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [20] Sliemers A O, Haaijer S C M, Stafsnes M H, *et al.* Competition and coexistence of aerobic ammonium- and nitrite-oxidizing bacteria at low oxygen concentrations [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **68**(6): 808-817.
- [21] Ren T T, Yu H Q, Li X Y. The quorum-sensing effect of aerobic granules on bacterial adhesion, biofilm formation, and sludge granulation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **88**(3): 789-797.
- [22] Zhang S H, Yu X, Guo F, *et al.* Effect of interspecies quorum sensing on the formation of aerobic granular sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **64**(6): 1284-90.
- [23] Xavier J B, De Kreuk M K, Picioreanu C, *et al.* Multi-scale individual-based model of microbial and bioconversion dynamics in aerobic granular sludge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(18): 6410-6417.
- [24] 杨洋, 左剑恶, 卜德华, 等. 好氧颗粒污泥亚硝化工艺的启动与运行特性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2462-2466.
- [25] Toh S K, Tay J H, Moy B Y P, *et al.* Size-effect on the physical characteristics of the aerobic granule in a SBR [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **60**(6): 687-695.
- [26] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **57**(1-2): 227-233.
- [27] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al.* Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **76**(5): 1199-1208.

- [28] Van Loosdrecht M C M, De Kreuk M K, Heijnen J J. The unity of biofilm structures[A]. In: Bathe S (Ed.). Aerobic granular sludge[C]. London: IWA Publishing, 2005. 1-5.
- [29] Turan M. Mechanisms of biofilm detachment in anaerobic fluidized bed reactors[J]. Environmental Technology, 2000, **21** (2): 177-183.
- [30] Sturm B S M S, Irvine R L. Dissolved oxygen as a key parameter to aerobic granule formation[J]. Water Science and Technology, 2008, **58**(4): 781-787.
- [31] Wang J L, Yang N. Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions[J]. Process Biochemistry, 2004, **39** (10): 1223-1229.
- [32] Liu Y, Wang Z W, Tay J H. A unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. Biotechnology Advances, 2005, **23**(5): 335-344.
- [33] Liu Y Q, Wu W W, Tay J H, *et al.* Formation and long-term stability of nitrifying granules in a sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(9): 3919-3922.
- [34] De Clippeleir H, Vlaeminck S E, Carballa M, *et al.* A low volumetric exchange ratio allows high autotrophic nitrogen removal in a sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(21): 5010-5015.
- [35] Tsuneda S, Park S, Hayashi H, *et al.* Enhancement of nitrifying biofilm formation using selected EPS produced by heterotrophic bacteria [J]. Water Science and Technology, 2001, **43** (6): 197-204.
- [36] 沈祥信, 李小明, 杨麒, 等. 预加好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28** (11): 2467-2472.
- [37] Xu H C, He P J, Wang G J, *et al.* Effects of activated sludge flocs and pellets seeds on aerobic granule properties[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(4): 537-544.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Hui-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Hui-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxial Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行