

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 ..... 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 ..... 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 ..... 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO<sub>2</sub> 数据筛分及浓度特征研究 ..... 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 ..... 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 ..... 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 ..... 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 ..... 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 ..... 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 ..... 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 ..... 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 ..... 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 ..... 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 ..... 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 ..... 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 ..... 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 ..... 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解邻苯二甲酸二甲酯 ..... 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 ..... 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 ..... 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 ..... 鲍国栋, 左剑丞, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 ..... 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 ..... 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 ..... 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 ..... 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 ..... 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 ..... 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 ..... 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 ..... 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 ..... 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 ..... 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 ..... 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 ..... 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 ..... 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 ..... 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的关系 ..... 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N<sub>2</sub>O 产生的不同过程及贡献 ..... 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及其全球增温潜势的影响 ..... 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 ..... 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 ..... 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 ..... 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 ..... 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 ..... 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B<sub>12</sub> 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 ..... 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 ..... 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 ..... 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 ..... 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 ..... 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 ..... 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 ..... 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 ..... 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 ..... 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 ..... 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882, 2927, 3059, 3218)

# 限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究

刘文如<sup>1,3</sup>, 阴方芳<sup>1</sup>, 王建芳<sup>1</sup>, 沈耀良<sup>1,2\*</sup>

(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; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 缺氧-好氧环境的交替循环对氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌具有重要影响. 本研究通过逐渐增加限量曝气进水时间(从 10 min 至 120 min)延长缺氧时段, 考察柱形 SBR 中硝化颗粒污泥对不同缺氧-好氧环境交替循环的响应特性. 整个研究过程中, 硝化颗粒污泥保持着稳定的颗粒特征, 粒径大于 0.8 mm 的颗粒污泥占总污泥量的质量分数始终在 95% 以上, 颗粒平均沉降速率维持在 125 ~ 130 m·h<sup>-1</sup> 之间. 尽管缺氧时段不断延长, 但 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 累积率分别稳定在 (60 ± 5)%、(85 ± 5)%; 此外, 在每个周期的曝气反应时段, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除速率以及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的累积速率分别保持在 90 mg·(L·h)<sup>-1</sup>、70 mg·(L·h)<sup>-1</sup> 和 15 mg·(L·h)<sup>-1</sup> 左右. 以上结果表明, 限量进水时间的延长及其所造成的不同时间跨度的缺氧环境对硝化颗粒污泥没有较为显著的影响.

**关键词:** 硝化颗粒污泥; 亚硝酸盐积累; SBR; 限量曝气进水; 缺氧环境扰动

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3038-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.08.029

## Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular

LIU Wen-ru<sup>1,3</sup>, YIN Fang-fang<sup>1</sup>, WANG Jian-fang<sup>1</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2</sup>

(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; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Alternating anoxic/oxic conditions have profound effects on both ammonium (AOB) and nitrite (NOB) oxidizing bacteria. In this study the influence of alternating anoxic/oxic condition on nitrifying granules was evaluated in a laboratory-scale column-type sequencing batch reactor (SBR). The anoxic phase was extended from 10 min to 120 min by increasing the anaerobic feeding time. Granules maintained their structure and characteristics during the whole study. The amount of granules with diameter larger than 0.8 mm kept above 95% (mass fraction), and the average settling velocity of particles maintained in the range of 125-130 m·h<sup>-1</sup>. Despite the increase in the length of anoxic phases, the values of ammonium removal and nitrite accumulation in effluent still kept at (60 ± 5)% and (85 ± 5)%, respectively. Moreover, in the aeration period per cycle, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal loading rates, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation loading rates retained stably at 90 mg·(L·h)<sup>-1</sup>, 70 mg·(L·h)<sup>-1</sup> and 15 mg·(L·h)<sup>-1</sup>, respectively. All these results suggested the changing anoxic conditions resulted from prolonged anaerobic feeding period had no significant effects on nitrifying granules.

**Key words:** nitrifying granules; accumulation of nitrite; sequencing batch reactor; anaerobic feeding; anoxic disturbances

好氧硝化和缺氧反硝化二者在空间或时间上的交替运行是传统活性污泥脱氮工艺的主要实现形式. 好氧颗粒污泥作为新一代废水生物处理技术备受关注<sup>[1,2]</sup>. 目前, 关于 SBR 中好氧颗粒污泥脱氮的研究多是集中在因颗粒污泥传质限制形成的同步硝化反硝化过程<sup>[3,4]</sup>. 从颗粒污泥微观结构分析, 尽管硝化细菌与反硝化细菌并存于同一颗粒污泥中, 两类功能种群却是彼此分离地分布于距离颗粒表面不同深度的区域<sup>[3,4]</sup>. 因此, 好氧颗粒污泥的同步硝化反硝化本质上仍是空间上(沿传质方向)的好氧、缺氧交替硝化反硝化过程. 值得注意的是, 不同于传统活性污泥脱氮工艺的交替硝化反硝化过程, 由于多数好氧颗粒污泥型 SBR 单周期的进水、沉降、排水和闲置等阶段的时间总和远小于曝气反应时间, 因此, 好氧颗

粒污泥脱氮的过程仅是污染物或基质在不同空间上的迁移、转化, 而对应的功能微生物种群并没有经历在好氧、缺氧(或厌氧)不同环境之间的循环. 在好氧、缺氧(或厌氧)交替循环的环境中, 反硝化细菌的酶系统会受到氧气的抑制<sup>[5]</sup>, 而对于生长速率和细胞产率都较慢的硝化细菌, 其受到的影响可能更为显著. Katsogiannis 等<sup>[6]</sup>、Kornaros 等<sup>[7]</sup>都证实了硝化细菌在经历了不同时间跨度的缺氧干扰后呈现的生长速率下降现象, 同时, 还发现亚硝酸盐氧化细菌

收稿日期: 2013-11-19; 修订日期: 2014-03-01

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, 博士研究生, 主要研究方向为废水生物处理理论与技术, E-mail: LW888888@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: ylshenniu@126.com

(NOB)对缺氧环境的影响比氨氧化细菌(AOB)更加敏感,并藉此实现了周期性缺氧干扰下的短程硝化反硝化脱氮过程. 好氧颗粒污泥在很多方面有别于传统活性污泥和游离细菌个体,如较强的传质限制、独特的种群分布等<sup>[8-11]</sup>. 虽然,有研究报道了缺氧(或厌氧)、好氧交替环境对好氧颗粒污泥的影响,但研究者的关注点大多集中在颗粒污泥的形成过程、理化特性以及所表现的 COD、N、P 等的去除性能<sup>[12-14]</sup>,而对于以聚集体状态存在的硝化细菌在承受周期性缺氧环境干扰时是否会呈现与传统活性污泥不同的响应特性尚不明确.

因此,本研究以硝化颗粒污泥为对象,在 SBR 中通过逐步延长限制性曝气(又称限量曝气)进水时间,形成不同时间跨度的缺氧环境,即不同时间比例的缺氧-好氧交替循环运行,考察硝化颗粒污泥的响应特性.

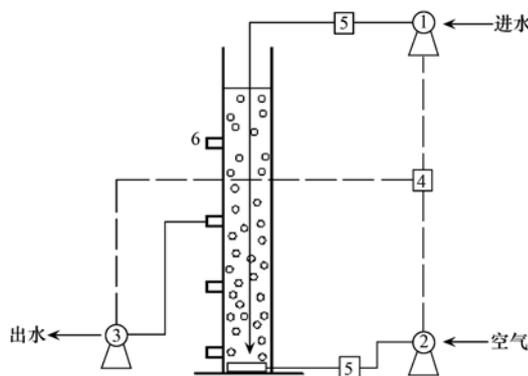
## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置及运行

如图 1 所示,试验所用装置为圆柱形 SBR 反应器,由有机玻璃制成,有效容积为 4 L ( $H/D = 10$ ). 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,控制曝气量为  $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  (表面上升流速  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). 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、沉淀、排水和闲置 4 个阶段,其中,曝气 115 min,沉降 2 min,排水和闲置共 3 min,进水时间根据运行工况调整,具体见表 1.

### 1.2 试验用水与接种污泥

试验用水为人工配制无机含氮废水(以 N 计,



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

约  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),用碳酸氢钠调节进水 pH 值在 8.0 左右,同时配水中还包括磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、硫酸镁、氯化钙及微量元素;接种污泥来自于实验室培养的亚硝化颗粒污泥(图 2),MLSS 和 SVI 分别约为  $8.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $33 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ,亚硝化率为 80% 左右.

表 1 SBR 具体运行状况

Table 1 Detailed operational conditions in the sequencing batch reactor

编号	运行时间 /d	进水时间 /min	HRT /h	NLR / $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$
1	1 ~ 40	10	4.3	2.8
2	41 ~ 60	60	6.0	2.0
3	61 ~ 120	120	8.0	1.5

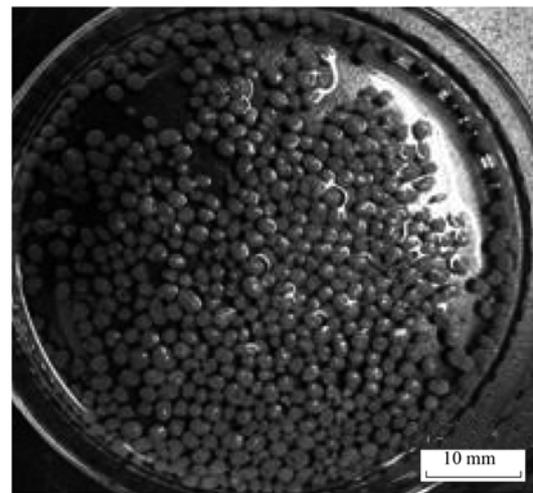


图 2 硝化颗粒污泥形态

Fig. 2 Morphology of nitrifying granules

### 1.3 分析方法

MLSS、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 分别采用标准重量法、纳氏试剂比色法、 $\text{N}$ -(1-萘基)-乙二胺光度法、紫外分光光度法测定;污泥及颗粒污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜及数码相机观察;颗粒污泥沉降速率:清水静沉测速法.

## 2 结果与讨论

### 2.1 进水时间对颗粒污泥的影响

本研究采用了限制性曝气进水模式,根据运行阶段的不同分别设定不同的进水时间,从 10 min 逐渐延长至 120 min(表 1). 进水时间的延长,会导致 HRT、容积负荷、富-贫环境机制等的变化. 因此,可能会对颗粒污泥造成影响. 然而,整个研究过程中并没有发现颗粒污泥的理化特性发生明显变化,包括颜色、边缘整齐度、粒径分布以及沉降速率等. 图 3 和图 4 所示分别为不同进水

时间下硝化颗粒污泥的粒径分布和沉积速率分布状况,从中可见,反应器中粒径大于 0.8 mm 的颗粒污泥占总污泥量的质量分数始终保持在 95% 以上,而第 20 d 和第 100 d 时颗粒的平均沉降速率也变化不大,分别为  $126.3 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $129.7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ . 因此,整体看来,限制性曝气进水时间的变化对硝化颗粒污泥的结构特征和理化特性没有显著影响.

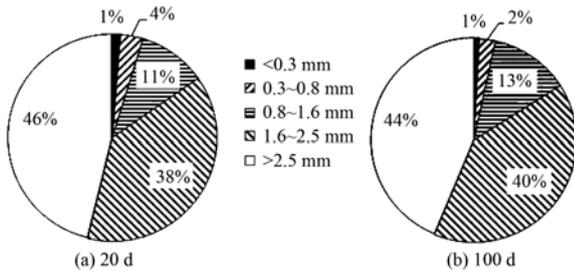


图 3 第 20 d 和第 100 d 时硝化颗粒污泥的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of granules on day 20 and 100

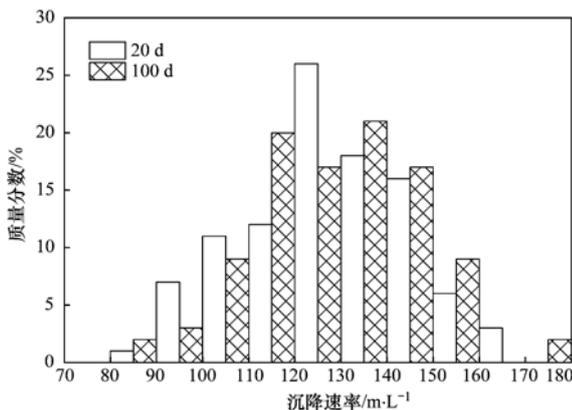


图 4 第 20 d 和第 100 d 时硝化颗粒污泥的沉降速率分布

Fig. 4 Evolution of setting velocity distribution of nitrifying granules on day 20 and 100

Liu 等<sup>[15]</sup>指出 SBR 的周期时间或 HRT 可能不是污泥颗粒化的关键因素,容积负荷对颗粒污泥的确切影响尚不明晰,进水时间变化引起的富-贫环境交替机制的变化对颗粒污泥的影响似乎更加重要. McSwain 等<sup>[16]</sup>发现随着厌氧/好氧进水时间比例的下降,富-贫环境机制的强度逐渐减弱,颗粒污泥结构变得疏松且污泥相中絮体和丝状菌比例增加. 对

于本研究,虽然进水时间发生变化,但每周富-贫环境机制的强度基本不变,变化的仅是富-贫环境交替的频度,而本研究的结果证实,富-贫交替频度的变化对颗粒污泥的影响并不明显. 富-贫环境交替对颗粒污泥主要的作用机制包括以下两个方面:①促使胞外聚合物(EPS)的产生<sup>[17,18]</sup>;②促使易降解型有机物转化为细胞内贮存性物质并筛选具有该功能的微生物<sup>[16,19,20]</sup>. 无疑富-贫交替机制对于异养好氧颗粒污泥具有重要影响,需要注意的是,对于以硝化细菌为主的硝化颗粒污泥该机制是否仍发挥着如此重要的作用还有待研究,因为硝化细菌本身作为生长速率缓慢型微生物且 EPS 产率极低<sup>[21]</sup>,其处理的目标污染物也并非易降解性有机物. 况且,研究已经证实,硝化颗粒污泥不仅在连续流环境中较异养颗粒污泥容易形成,而且其稳定性也优于异养好氧颗粒污泥<sup>[22-25]</sup>.

另外,限制性进水时间的延长,最直接的结果是 SBR 周期内缺氧时段的增加(通过对进水时段反应器中 DO 的随机测定,结果均在  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,基本保证为缺氧环境). 但根据文献报道,缺氧时间对好氧颗粒污泥的形成和稳定维持具有促进作用(见 2.3 节),此处需要指出的是,缺氧时段作用的对象主要是异养微生物,如降低好氧异养微生物的生长速率、减弱异养微生物与硝化细菌对氧气和空间的竞争以及改善反硝化效果等. 虽然在无机进水培养的硝化颗粒污泥中发现有异养型微生物的存在,但其数量远低于自养硝化细菌<sup>[8,26]</sup>,这可能正是延长进水时间对硝化颗粒污泥无显著影响的原因之一.

## 2.2 缺氧环境对硝化颗粒污泥的影响

图 5 所示为硝化颗粒污泥反应器的整体运行状况,从中可以看出,虽然硝化颗粒污泥经历了不同时间跨度的缺氧环境干扰,但反应器整体运行效果并没有受到较大影响,氨氮去除率和亚硝化率分别保持在  $(60 \pm 5)\%$ 、 $(85 \pm 5)\%$  的范围. 尽管缺氧时段的延长造成了 SBR 容积负荷的下降(表 1),但如图 6 和表 2 所示,在好氧反应阶段,也即含 N 物质的有效转化阶段,氨氮、亚硝酸盐氮以及硝态氮等物质

表 2 硝化颗粒污泥反应器在不同运行阶段含 N 物质的好氧转化速率

Table 2 Aerobic conversion rate of N-substances in different feeding time conditions of nitrifying granular reactor

编号	进水时间 /min	$\text{NH}_4^+$ -N 去除速率 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	$\text{NO}_2^-$ -N 累积速率 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	$\text{NO}_3^-$ -N 产生速率 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$
1	10	95.16	71.16	17.76
2	60	89.16	68.28	12.18
3	120	94.44	74.28	14.28

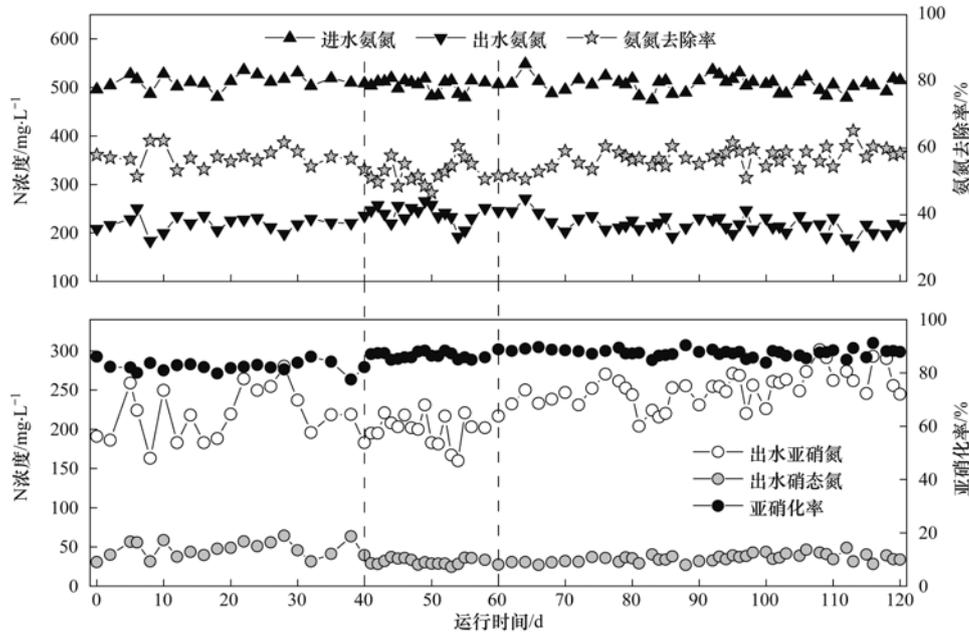


图5 硝化颗粒污泥反应器运行概况

Fig. 5 General behavior of nitrifying granular reactor

的转化速率和变化规律均基本保持不变。可见,本研究中的缺氧环境对硝化颗粒污泥中氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO<sub>B</sub>)的影响不大。

近来, Komaros 等<sup>[7]</sup>通过试验和数学模拟较为准确地描述了缺氧环境对硝化细菌的抑制过程,发现随着缺氧环境时间的延长, AOB 和 NO<sub>B</sub> 二者的生长速率均呈持续下降趋势,其中对 NO<sub>B</sub> 的抑制效果更为显著,作者认为缺氧环境下硝化细菌部分胞内酶的失活是导致生长速率下降的主要原因。Liu 等<sup>[27]</sup>也发现当反应器中 DO 从 2.0 mg·L<sup>-1</sup> 以上降至 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 以下时,出水中氨氮和亚硝酸盐均出现上升趋势;但经过长期低 DO 条件下的运行,活性污泥中 AOB 和 NO<sub>B</sub> 的数量均大幅度增加,并将其归因于低 DO 条件下硝化细菌自身衰亡速率的下降; Munz 等<sup>[28]</sup>也指出正是由于硝化细菌在缺氧环境中较低的衰亡系数(缺氧时为 0.04 ~ 0.16 d<sup>-1</sup>,好氧时为 0.22 ~ 0.28 d<sup>-1</sup>),使得缺氧-好氧交替运行的反应器具有更高的硝化速率。可见,缺氧环境对于活性污泥或游离性细菌个体有重要影响,短期影响以抑制为主,长期来看反而利于硝化细菌的增殖。然而,本研究中的硝化颗粒污泥面对逐渐增强的缺氧环境影响,却保持了基本不变的硝化特性和除污效果。原因论述如下。

硝化颗粒污泥与活性污泥或游离性细菌个体相比,最突出的生物生态学特性在于微生物的生长方式和种群空间分布规律<sup>[29]</sup>。硝化颗粒污泥中硝化

细菌一般以聚集生长的方式分布于颗粒污泥表层的好氧区域, AOB 更是成团或成簇聚集,因此,颗粒污泥具有较高的硝化菌群密度<sup>[8,9]</sup>;同时,研究证实, *Nitrosomonas*、*Nitrobacter* 等硝化细菌具有群体行为调控机制(quorum sensing, QS)<sup>[30]</sup>,颗粒污泥作为一类特殊的生物膜,聚集的微生物生长方式和较高的菌群密度,为 QS 功能的发挥奠定了条件<sup>[31]</sup>,成就硝化颗粒污泥独特的动态调控能力,具有较传统活性污泥或游离性细菌个体更佳的应对或适应不利因素影响的性能。另外,关于 NO<sub>B</sub> 和 AOB 对缺氧环境具有不同敏感特性的现象报道<sup>[7]</sup>,在本研究中并没有得到体现,其原因也可以从硝化颗粒污泥中硝化细菌的种群分布规律上得到解释:NO<sub>B</sub> 较 AOB 分布于颗粒污泥的更深层区域<sup>[8-11]</sup>,由于颗粒内部较强的氧传质限制,使得 NO<sub>B</sub> 长期处于较低的 DO 环境中,Liu 等<sup>[27]</sup>证实对于长期处于低 DO 环境中生长的硝化细菌,NO<sub>B</sub> 较 AOB 更能抵抗低 DO 的影响。

### 2.3 延长限制性进水时间的必要性分析

进水模式是影响好氧颗粒污泥形成和稳定的一个重要因素。研究证实,短暂性脉冲进水创造的较高基质浓度梯度,不仅可以形成抑制丝状菌增值、促进污泥颗粒化的富-贫交替机制<sup>[32]</sup>,而且利于进水中易降解有机物转化为胞内贮存性物质(如 PHB),达到筛选慢速生长型微生物且改善好氧颗粒污泥稳定性的目的<sup>[33]</sup>。同时,高基质浓度梯度驱使更多的基质进入颗粒内部,减缓因饥饿、衰亡造成

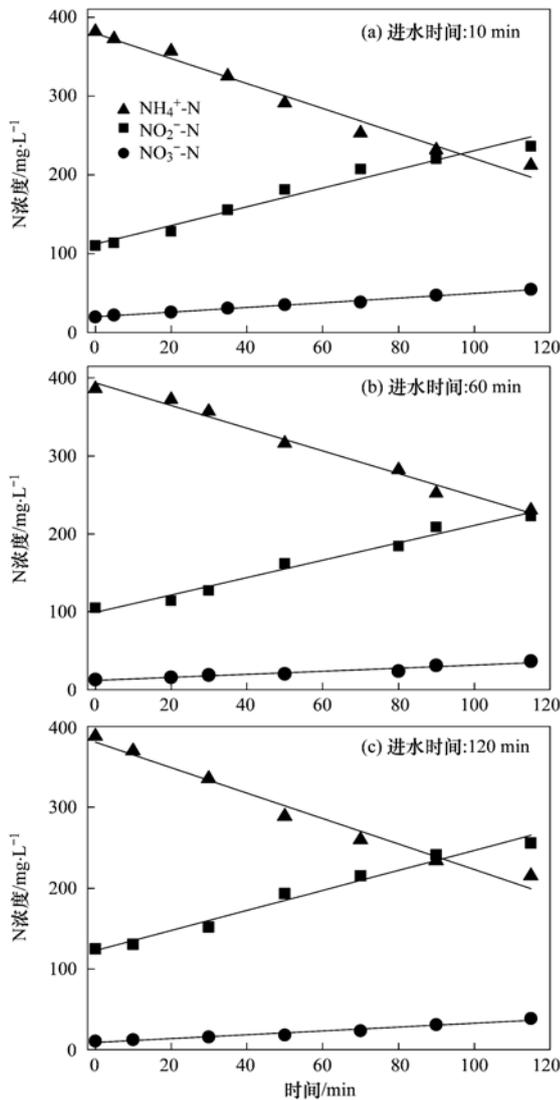


图6 不同进水时间条件下硝化颗粒污泥反应器单周期内物质的好氧转化过程

Fig. 6 Aerobic conversion of N-substances in one cycle of nitrifying granular reactor under different feeding time conditions

的颗粒污泥解体<sup>[33]</sup>。因此,目前关于SBR中好氧颗粒污泥的研究也多是采用此种限制性曝气短时间进水模式。

然而,对于大规模工程应用,该进水模式从经济上和技术上都存在很多限制<sup>[36]</sup>。首先,短时性脉冲进水导致污水处理厂(站)需要加设缓冲池或调节池来贮存来自于污水排放源的连续性排水,致使颗粒污泥工艺节省占地面积的优越性大打折扣;其次,短时快速进水要求进水装置具有极高的抽水能力,在工程化应用中是难以实现的;再者,对于如硝化颗粒污泥、厌氧氨氧化颗粒污泥以及全自养脱氮颗粒污泥等自养型脱氮微生物聚集体,当处理高浓度含氮废水时,短时脉冲进水还容易造成如游离氨

(FA)、游离亚硝酸(FNA)等基质性抑制现象<sup>[34]</sup>。因此,基于工程化应用的考虑,延长限制性曝气进水时间至一定长度是必要的。根据本研究结果,限制性曝气进水时间从10 min延长至120 min,不会对硝化颗粒污泥造成明显的影响;Su等<sup>[35]</sup>、Wan等<sup>[14]</sup>均发现SBR的周期时间内加入缺氧或厌氧时段不但利于颗粒污泥的形成,而且可以改善好氧颗粒污泥的密实度以及生物丰度,而限制性曝气时间的延长正好可以提供所需的缺氧或厌氧环境<sup>[20]</sup>,同时无需将SBR的控制因增设新时段而进一步复杂化。另外,Erşan等<sup>[36]</sup>更进一步证明,前置缺氧运行模式(AO-SBR)较后置缺氧模式(OA-SBR)获得的好氧颗粒污泥具有更大的粒径和更好的稳定性。

### 3 结论

(1) 限量曝气进水时间从10 min逐渐延长至120 min的变化过程对硝化颗粒污泥没有明显影响,颗粒污泥保持着完好的结构特征和理化特性。

(2) 硝化颗粒污泥工艺可以有效应对不同时间跨度的缺氧环境或不同时间比例的缺氧-好氧环境交替循环的影响。整个研究过程中,硝化颗粒污泥反应器氨氮去除率和亚硝化率分别保持在(60 ± 5)%、(85 ± 5)%;好氧反应时段,氨氮的去除、亚硝酸盐的累积和硝酸盐的产生这3个过程的变化规律和速率均基本保持不变。

#### 参考文献:

- [1] de Kreuk M K, Kishida N, Van Loosdrecht M. Aerobic granular sludge-state of the art [J]. Water Science and Technology, 2007, 55(8-9): 75-81.
- [2] 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.
- [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] Yilmaz G, Lemaire R, Keller J, et al. Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 100(3): 529-541.
- [5] Grady C P L Jr, Daigger G T, Love N G, et al. Biological wastewater treatment [M]. Marcel Dekker: New York, IWA Publishing, 1999. 84-85.
- [6] Katsogiannis A, Kornaros M, Lyberatos G. Enhanced nitrogen removal in SBRs bypassing nitrate generation accomplished by multiple aerobic/anoxic phase pairs [J]. Water Science and Technology, 2003, 47(11): 53-59.
- [7] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/

- denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(19): 7245-7253.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Wilén B M, Gapes D, Keller J. Determination of external and internal mass transfer limitation in nitrifying microbial aggregates [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **86** ( 4 ): 445-457.
- [ 11 ] 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): 2710-2715.
- [ 12 ] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究 [ J ]. *环境科学*, 1999, **20**(2): 38-41.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Wan J F, Bessière Y, Spérandio M. Alternating anoxic feast/aerobic famine condition for improving granular sludge formation in sequencing batch airlift reactor at reduced aeration rate [ J ]. *Water Research*, 2009, **43**(20): 5097-5108.
- [ 15 ] Liu Y, Wang Z W, Qin L, *et al.* Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor [ J ]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **67**(1): 26-32.
- [ 16 ] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. The effect of intermittent feeding on aerobic granule structure [ J ]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11-12): 19-25.
- [ 17 ] 王浩宇, 苏本生, 黄丹, 等. 好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性 [ J ]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1614-1620.
- [ 18 ] Ni B J, Fang F, Rittmann B E, *et al.* Modeling microbial products in activated sludge under feast-famine conditions [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43** ( 7 ): 2489-2497.
- [ 19 ] Beun J J, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. N-Removal in a granular sludge sequencing batch airlift reactor [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **75**(1): 82-92.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] Tsuneda S, Hayashi H, Jung J, *et al.* Enhancement of nitrifying biofilm formation using selected EPS produced by heterotrophic bacteria [ J ]. *Water Science and Technology*, 2001, **43** ( 6 ): 197-204.
- [ 22 ] 牛妹, 段百川, 张祚冀, 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.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] Wang X H, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Improved stability and performance of aerobic granules under stepwise increased selection pressure [ J ]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **41**(3): 205-211.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] Ni B J, Xie W M, Chen Y P, *et al.* Heterotrophs grown on the soluble microbial products (SMP) released by autotrophs are responsible for the nitrogen loss in nitrifying granular sludge [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2011, **108** ( 12 ): 2844-2852.
- [ 27 ] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [ 28 ] Munz G, Lubello C, Oleszkiewicz J A. Factors affecting the growth rates of ammonium and nitrite oxidizing bacteria [ J ]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 720-725.
- [ 29 ] Winkler M K H. Magic granules: Microbial diversity in aerobic granular sludge [ D ]. Netherlands: Delft University of Technology, 2012. 2-3.
- [ 30 ] Shrouf J D, Nerenberg R. Monitoring bacterial twitter: Does quorum sensing determine the behavior of water and wastewater treatment biofilms? [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(4): 1995-2005.
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] Martins A M P, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions [ J ]. *Water Research*, 2003, **37**(11): 2555-2570.
- [ 33 ] de Bruin L M, de Kreuk M K, van der Roest H F, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [ J ]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(11-12): 1-7.
- [ 34 ] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z. Free ammonia and free nitrous acid inhibition on the anabolic and catabolic processes of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* [ J ]. *Water Science and Technology*, 2007, **56**(7): 89-97.
- [ 35 ] Su B S, Cui X J, Zhu J R. Optimal cultivation and characteristics of aerobic granules with typical domestic sewage in an alternating anaerobic/aerobic sequencing batch reactor [ J ]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 125-129.
- [ 36 ] Erşan Y Ç, Erguder T H. The effects of aerobic/anoxic period sequence on aerobic granulation and COD/N treatment efficiency [ J ]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 149-156.

## CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM <sub>10</sub> ) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China .....	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou .....	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou .....	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO <sub>2</sub> Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China .....	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China .....	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin .....	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter .....	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency .....	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management .....	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period .....	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing .....	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet .....	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China .....	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China .....	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures .....	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Under Acidic Conditions .....	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron .....	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution .....	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor .....	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration .....	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies .....	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor .....	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane .....	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling .....	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular .....	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB .....	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application .....	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing .....	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks .....	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China .....	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil .....	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil .....	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil .....	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emission .....	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N <sub>2</sub> O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China .....	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping .....	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China .....	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize .....	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings .....	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice .....	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI) .....	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B <sub>12</sub> on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2 .....	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp. ....	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake .....	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol .....	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 .....	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon .....	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment .....	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD .....	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China .....	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH <sub>4</sub> Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak .....	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

# 《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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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