

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                         |                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM <sub>10</sub> 和 PM <sub>2.5</sub> 排放测量 .....                       | 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)              |
| 黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 .....                                                                | 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)         |
| 沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 .....                                                              | 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)                                |
| 南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 .....                                                           | 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)                                 |
| 太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 .....                                                              | 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)                    |
| 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 .....                                                     | 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)               |
| 机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 .....                                                                 | 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)                                |
| DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 .....                                                       | 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)                               |
| 紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 .....                                                             | 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)                       |
| 三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 .....                                                       | 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)                   |
| 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 .....                                                         | 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)                  |
| 高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 .....                                                     | 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093) |
| 不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 .....                                                       | 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)                     |
| 丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 .....                                                        | 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)                      |
| 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 .....                                                  | 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)                      |
| 粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 .....                                                              | 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)          |
| 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 .....                                                       | 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)                               |
| 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 .....                                                              | 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)                    |
| 溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 .....                                                             | 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)                              |
| 微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 .....                                                               | 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)                                     |
| 城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 .....                                                            | 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)              |
| 两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 .....                                                  | 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)                         |
| 巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) .....                                                               | 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)                               |
| 改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 .....                                                               | 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)                           |
| UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 .....                                                            | 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)                            |
| 对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 .....                                                           | 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)                          |
| 高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 .....                                                             | 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)                               |
| 硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 .....                                                                  | 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)                          |
| 单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 .....                                                      | 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)                    |
| 钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 .....                                                          | 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)                         |
| 城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 .....                                                                | 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)                         |
| 低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 .....                                          | 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)                      |
| 微丝菌 ( <i>Microthrix parvicella</i> ) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 .....                      | 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)                     |
| 基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 .....                                                         | 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)                      |
| 1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 .....                                                           | 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)                               |
| 长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 .....                                                            | 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)                               |
| 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 .....                                                                 | 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)                                   |
| 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 .....                                                            | 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)                 |
| 多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 .....                                                       | 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)                         |
| 苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 .....                                                                | 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)                               |
| 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 .....                                                            | 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)                      |
| 杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 .....                                                                  | 龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)                     |
| 土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 .....                                                             | 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)                                |
| 添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 .....                                                             | 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)                 |
| 应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 .....                                               | 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)               |
| 不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 .....                                                            | 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)                                     |
| 苾芴胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 .....                                                   | 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)                  |
| 维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 .....                                             | 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)                     |
| 苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 .....                                                              | 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)                                  |
| g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... | 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)   |
| 海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 .....                                                           | 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)                               |
| 《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)                                     |                                                        |

# 低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析

信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

**摘要:** 本研究在序批式活性污泥反应器(SBR)中接种好氧颗粒污泥(AGS), 构成 AGS-SBR 系统, 研究其在低 DO(0.5 ~ 1.0 mg·L<sup>-1</sup>)条件下, 处理低 COD/N 比(<4.0)生活污水同步脱氮除磷的长期稳定运行特性, 并解析反应器的主要菌群构成。结果表明, 在反应器运行的 180d 里, AGS-SBR 系统表现出了良好且稳定的除污能力, 反应器对水体中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 平均去除率分别达到 87.17%、95.21%、77.05% 和 91.11%。好氧颗粒污泥沉降性能一直很好, 污泥始终保持着完整的颗粒外观和密实紧凑的结构, 并没有出现明显的颗粒污泥解体的现象。同时, 高通量测序结果表明, 变形菌门、厚壁菌门、绿菌门、绿弯菌门和拟杆菌门为 SBR-AGS 反应器中主要优势菌群。Denitratisoma、Planctomycetaceae、Thauera、Comamonas、Nitrosomonas 和 Nitrospira 是反应器中与脱氮有关菌群; Clostridium 和 Anaerolinea 是除磷相关细菌。

**关键词:** 高通量测序; 菌群结构; 同步脱氮除磷; 低 COD/N 比; 低溶解氧

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2259-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.032

## Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition

XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, YANG Yi-jin, GUO Jun-yuan, CHENG Qing-feng

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

**Abstract:** This study utilized the sequencing batch activated sludge reactor (SBR) inoculated aerobic granular sludge (AGS) to treat the low COD/N ratio (<4.0) domestic wastewater under low DO (0.5-1.0 mg·L<sup>-1</sup>) concentration condition. Long-term performance of simultaneous nitrogen and phosphorus removal and bacterial community composition of AGS-SBR were studied. The results showed that the AGS-SBR system had good and stable decontamination abilities in its 180-day operation. The average removal rates of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP were 87.17%, 95.21%, 77.05%, and 91.11%, respectively. At the same time, the AGS showed good settling performance, and always kept its integrated and compact structure. No obvious granular sludge disintegration phenomenon occurred in 180 days. Meanwhile, by using Illumina 16S rRNA gene MiSeq sequencing, we investigated the bacterial abundance in AGS-SBR reactor. Proteobacteria, Firmicutes, Chlorobi, Chloroflex, and Bacteroidetes were the dominant microbial communities in the simultaneous nitrogen and phosphorus removal reactor. Denitratisoma, Planctomycetaceae, Thauera, Comamonas, Nitrosomonas and Nitrospira were suggested to be the primary organisms responsible for the nitrogen removal. Clostridium and Anaerolinea were the main bacterial communities of phosphorus removal.

**Key words:** high-throughput sequencing; bacterial community structure; simultaneous denitrification and phosphorus removal; low COD/N ratio; low DO

好氧颗粒污泥具有沉降性能好、污泥浓度高, 易于固液分离, 便于提高污水处理效率, 降低污水处理成本等优点<sup>[1]</sup>而备受关注。由于其特殊的颗粒球状结构导致了污泥内外形成溶解氧(DO)浓度差, 这便为好氧颗粒污泥工艺能够实现同步去除 COD、氮和磷提供了合适的条件<sup>[2]</sup>。据报道, DO 是影响污水生物脱氮除磷的影响的关键因素之一<sup>[3]</sup>, 过低的 DO 会影响其硝化速率, 易导致亚硝态氮积累, 从而影响系统除磷效果; 而过高的 DO 又会致使反应器出水硝态氮含量过高, 并且能耗较大<sup>[4]</sup>。虽然低 DO 有利于污泥系统同步硝化反硝化的形成<sup>[2]</sup>, 但是关

于低 DO 下, 好氧颗粒污泥(AGS)系统处理生活污水同步脱氮除磷的长期运行特征至今报道不多; 关于好氧颗粒污泥中的生物种群构成, 尤其是处理低 COD/N 比生活污水好氧颗粒系统中生物种群结构分析, 更是鲜见报道。一些研究学者采用原位荧光杂交技术(FISH)研究污水处理系统中脱氮除磷菌

收稿日期: 2015-11-18; 修订日期: 2016-01-06

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: 信欣(1976~), 女, 教授, 主要研究方向为水污染控制及资源化, E-mail: xx@cuit.edu.cn

群的构成<sup>[5,6]</sup>; 还有学者采用聚合酶链式反应和变性梯度凝胶电泳技术(PCR-DGGE)分析反应器中的生物种群的演变特征及主要菌群<sup>[7]</sup>等. 然而, 以前的研究由于缺乏高通量技术分析结果, 其结果仅限于氨氧化细菌(AOB)和亚硝化细菌(NO<sub>B</sub>)等个别菌群的分析, 而缺乏相对完整的颗粒污泥系统生物种群构成信息. 了解生物反应器内主要功能菌群的构成有利于了解生化反应和工艺调控<sup>[8]</sup>. 近年来具有低成本、高通量、自动化程度高等特点的高通量测序技术逐渐发展起来, 该技术能一次对多达几百万条 DNA 分子进行序列测定, 同时也可以对一个物种的转录组和基因组进行细致的分析<sup>[9]</sup>. 并且该技术已经开始在污水处理系统中用于种群结构分析<sup>[10]</sup>. 因此, 本实验在序批式活性污泥反应器中(SBR)接种好氧颗粒污泥(AGS), 构建成 AGS-SBR 系统, 主要研究该系统在低 DO 下, 处理低 COD/N 比生活污水的同步脱氮除磷的长期稳定运行特性, 并采用高通量测序技术解析稳定运行期间的主要菌群构成, 以期为该工艺应用于处理低 COD/N 比生活污水的实际工程及工艺调控提供可靠的实验依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与运行方式

实验装置采用序批式活性污泥反应器(SBR)如图 1 所示. 反应器由有机玻璃制成, 高 20 cm, 长 10 cm, 有效容积为 1.5 L. 反应器上部和下部设置了排水口和取样口, 采用空气压力机通过底部的沙盘曝气头进行曝气, 转子流量计控制气体流量. 将反应器置于恒温水浴锅中, 使其反应温度保持在 30℃ 左右. 反应器每天运行两个周期, 每个周期 720 min: 进水 5 min、曝气 360 min、沉淀 5 min、排水 5 min、余下 345 min 为闲置. 每周排水为反应器有效容积的 50%. 通过转子流量计控制反应器的曝气量, 从而控制溶解氧(DO)浓度为 0.5 ~ 1.0 mg·L<sup>-1</sup>. 根据实际情况进行排泥, 使反应器内污泥龄约为 20 d.

### 1.2 接种污泥和实验用水

接种污泥为本课题组前期同步脱氮除磷工艺成功启动后 60 d 的好氧颗粒污泥, 其直径大约为 0.6 ~ 1.5 mm, 颜色为黄色, 污泥体积指数 SVI = 55.22 mL·g<sup>-1</sup>, 实验用水为人工配制的模拟生活污水<sup>[11]</sup>. 葡萄糖、柠檬酸三钠为碳源, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为氮源, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 为磷源, 反应器启动运行期, 加入 40 mg·L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup> 以及微量 Fe<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 等离子, NaHCO<sub>3</sub>

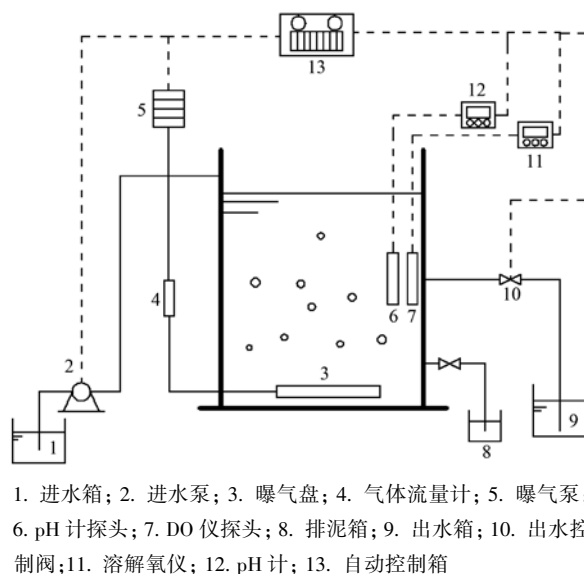


图 1 SBR 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR

调节 pH 至 7.5 ~ 8.0, 主要水质指标  $\rho(\text{COD})$  为 200 ~ 300 mg·L<sup>-1</sup>,  $\rho(\text{TN})$  为 50 ~ 60 mg·L<sup>-1</sup>,  $\rho(\text{TP})$  为 2 ~ 3.5 mg·L<sup>-1</sup>.

### 1.3 实验分析方法

#### 1.3.1 污泥样品采集及测序实验流程

取自 AGS-SBR 稳定运行期的污泥样品, 首先, 采用淤泥基因组 DNA 快速提取试剂盒(离心柱型), 根据说明书提取样品 DNA, 并将 DNA 提取物放在 -20℃ 条件下保存. 然后, 对 16S rRNA 的 V3、V4 区域进行 PCR 扩增, 引物 338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3', 806R: 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'. PCR 条件: 95℃ 预变性 2 min, 然后执行 95℃ 变性 30 s、55℃ 退火 30 s、72℃ 延伸 30 s, 共 30 个循环, 最后再 72℃ 退火 5 min, 扩增产物保持在 4℃ 条件下. 样本按照正式实验条件进行, 样本 3 个重复, 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖电泳检测, 采用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒(AXYGEN 公司)切胶回收 PCR 产物, Tris-HCl 洗脱, 2% 琼脂糖电泳检测; 然后, 参照电泳初步定量结果, 将 PCR 产物用 QuantiFluor<sup>TM</sup>-ST 蓝色荧光定量系统(Promega 公司)进行检测定量, 取合适的浓度进行 EmPCR(平行扩增), 用 Illumina Miseq 系统测序(上海美吉生物医药科技有限公司). 所得结果进行过滤处理, 得到优化序列; 对优化序列在 97% 相似度水平进行 OTU 聚类分析和物种分类学分析, 分析样品的多样性以及群落结构<sup>[10,12]</sup>.

#### 1.3.2 水质和污泥指标分析

实验期间, 水体 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、

$\text{NO}_2^-$ -N 和 TP 以及污泥 MLSS、SVI 指标均按国标法测定<sup>[13]</sup>; 污泥形态观察、DO、pH 值测定均按照参考文献[11]进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 AGS-SBR 除污性能的长期稳定运行特征

在 AGS-SBR 反应器稳定运行的 180d 里, 反应器对污水 COD、氨氮、TN、TP 的去除情况以及出水  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度情况如图 2 所示。进水 COD 浓度在  $178.56 \sim 267.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间波动, 出水 COD 浓度为  $14.97 \sim 46.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均出水浓度为  $29.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。整个运行期间, 反应器对 COD 的去除效果始终保持较高的水平, 平均去除率为 87.17% [图 2(a)]。反应器对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除情况如图 2(b) 所示, 进水的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度波动较大, 为  $49.52 \sim 70.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均进水浓度为  $59.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。运行期间, 由于转子流量计的不稳定, 使得反应器内的 DO 浓度有一定的波动, 因此导致了出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度及其去除率稍微有一些波动, 整个反应器运行期间, 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度最高达  $7.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但其平均出水浓度为  $2.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率为 95.21%。同时, 反应器运行过程中, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 的积累情况见图 2(c)。虽然实验过程中, 由于转子流量计的不稳定, 导致反应器内曝气量的略有波动, 使得出水  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度有一些小的变化, 但通过及时对流量计进行微调, 控制反应器内 DO 浓度的稳定, 整个反应器运行期间, 反应器出水  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度不高, 平均浓度分别为  $3.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。反应器对污水中的 TN 和 TP 的去除效果呈逐步稳定趋势 [图 2(d) 和图 2(e)]。反应器平均进水 TN 浓度为  $60.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均出水浓度为  $13.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率为 77.05% [图 2(d)]。而进水 TP 浓度在  $2.03 \sim 3.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  内波动, 平均进水浓度为  $2.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但出水一直保持稳定。运行过程中, 曝气量的波动对反应器内的除磷菌的活性没有影响, 因此反应器内的除磷效果始终保持在较为稳定的状态, TP 最高出水浓度为  $0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均出水浓度为  $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率为 91.11% [图 2(e)]。本实验的研究表明, 对于 AGS-SBR 同步脱氮除磷工艺来讲, 在工程应用上要严格控制曝气量, 使 DO 浓度在  $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间, 可保证反应器内微生物对氮素和 TP 的最高去除能力。AGS-SBR 系统内,

好氧颗粒污泥自身的特殊结构, 以及低 DO 的运行方式, 使得反应器内同时存在着好氧菌和厌氧菌, 为 TN 和 TP 的去除起到了良好的促进作用。

### 2.2 AGS-SBR 污泥性能变化分析

AGS-SBR 反应器内 MLSS 及污泥体积指数 (SVI) 的变化如图 3 所示。反应器启动初期接种的好氧颗粒污泥 MLSS 和 SVI 分别为  $3.02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $49.52 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 在以后稳定运行的 180d 里, 污泥的 MLSS 和 SVI 值虽有一定的波动, 但是变化不是很明显, 其 MLSS 和 SVI 值平均分别为  $3.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $41.32 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 较反应器启动初期接种的好氧颗粒污泥, 反应器污泥浓度 MLSS 略有增加, 而 SVI 值略有减少。表明反应器运行整个期间, AGS-SBR 系统内的好氧颗粒污泥沉降性能一直很好, 表现出良好的稳定性。同时, 对第 0、40、60、100、140 和 180 d 的反应器中好氧颗粒污泥形态进行观察, 如图 4 所示。颗粒污泥在整个运行期间, 其外观没有明显变化, 6 个不同运行时间的颗粒污泥均呈现出外形规则、边缘较平整, 颗粒结构紧密等特征, 并没有出现明显的颗粒污泥解体的现象。de Kreuk 等<sup>[14]</sup>曾报道当 DO 小于  $3.0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 能引起颗粒污泥的解体。和以前的研究报道相比<sup>[15]</sup>, 本实验中, 低 DO 条件下, AGS-SBR 系统表现出良好的脱氮除磷及颗粒污泥稳定性。原因在于, 本研究反应器进水属于低基质生活污水, 有利于生长速率较慢的硝化细菌、聚磷菌 PAOs 的富集<sup>[16]</sup>, 从而导致颗粒污泥生长速率变慢, MLSS 增长较低。本实验中, 即使是在较低 DO 下 ( $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), AGS-SBR 系统中好氧颗粒污泥运行 180 d 后仍然保持良好的完整性和沉降性能。同时, 本研究中, 处理低碳氮比生活污水的 AGS-SBR 系统所需要的 DO 浓度比其他的 AGS-SBR 污水处理系统大约低 60% ~ 70%<sup>[17]</sup>。可见, AGS-SBR 是一种低能耗、无需外加碳源、高效处理低 COD/N 比生活污水的脱氮除磷工艺。

### 2.3 AGS-SBR 的主要菌群

本研究中, AGS-SBR 系统对污水 TN 和 TP 的平均去除率分别达到 77.05% 和 91.11%, 污水处理系统表现出的除污性能主要和系统内优势微生物菌群的构成密切相关。为了进一步深入了解低 DO 下, 好氧颗粒污泥工艺表现出良好的脱氮除磷效果的微生物学机理, 因此对 AGS-SBR 反应器内稳定期间的微生物菌群进行解析。AGS-SBR 系统中好氧颗粒污泥中的细菌种群构成如图 5 所示 (门水平)。污泥的主要菌群为: 变形菌门 (Proteobacteria, 相对丰度为



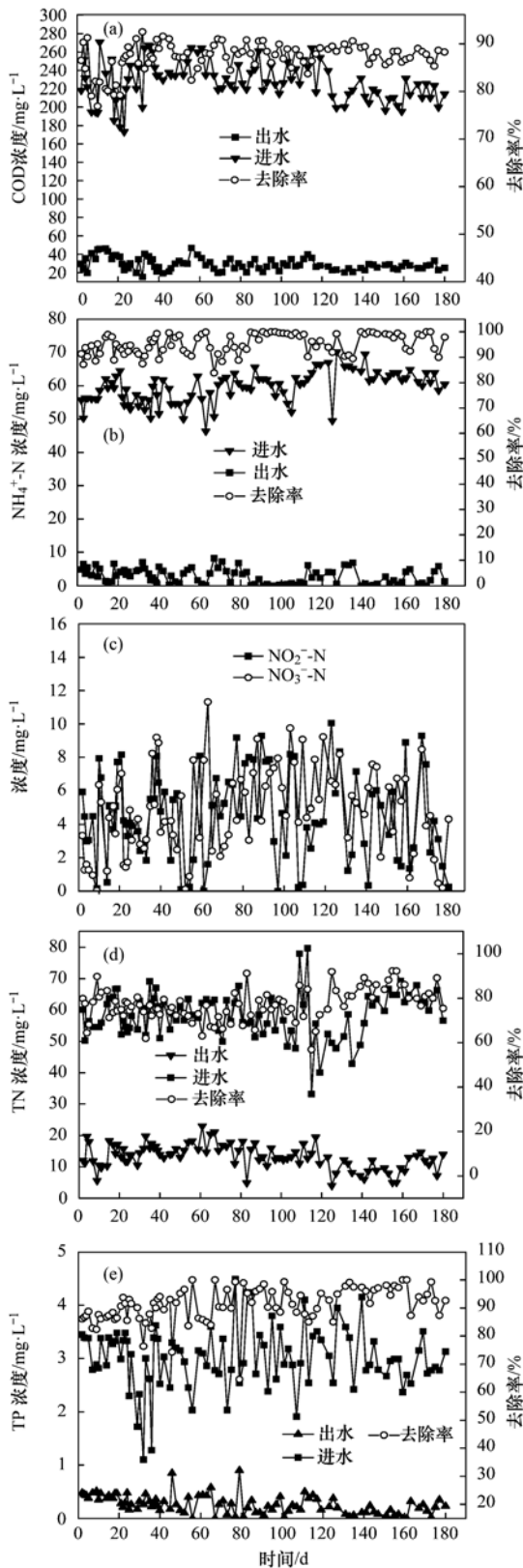


图2 AGS-SBR 反应器对 COD、氨氮、TN 和 TP 的去除情况及出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的变化

Fig. 2 Time course of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN and TP removal efficiencies, together with the changes of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  concentrations in effluent in AGS-SBR system

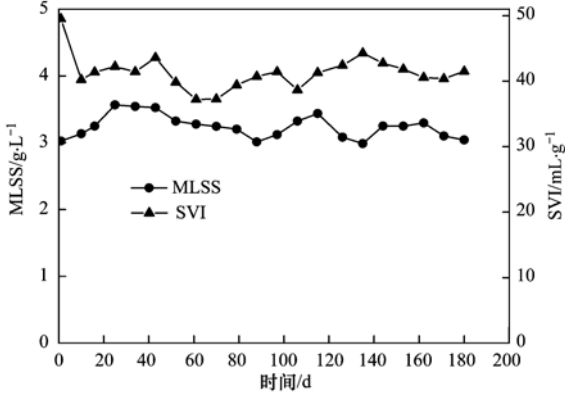
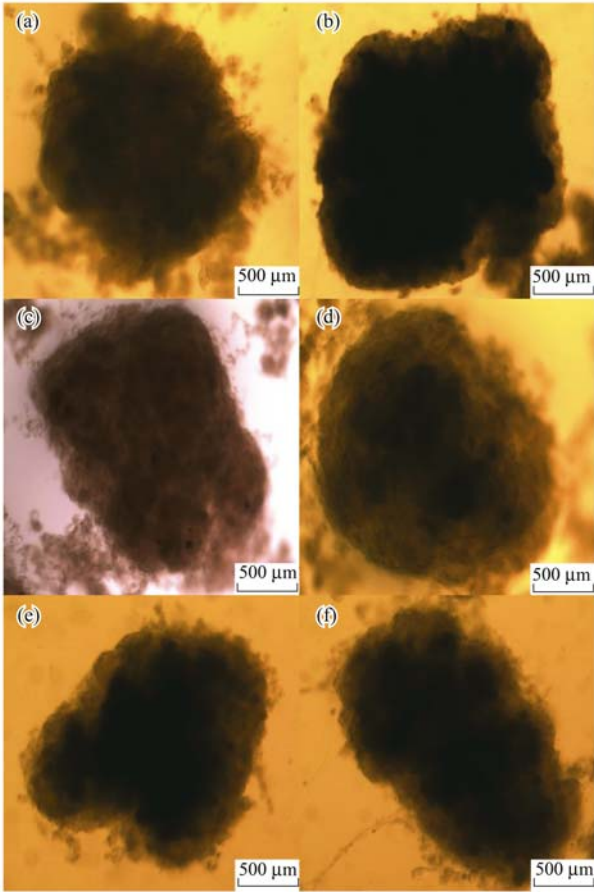


图3 运行阶段反应器中颗粒污泥 MLSS 与 SVI 的变化情况  
Fig. 3 Changes of MLSS and SVI values of AGS during the operation phase of the reactor



(a) 0 d; (b) 40 d; (c) 60 d; (d) 100 d; (e) 140 d; (f) 180 d

图4 运行阶段颗粒污泥的形态变化

Fig. 4 Morphological change of AGS during the operation phase of the reactor

66.91%)、厚壁菌门 (Firmicutes, 相对丰度为 21.64%)、绿菌门 (Chlorobi, 相对丰度为 2.65%)、绿弯菌门 (Chloroflexi, 相对丰度为 2.09%)、拟杆菌门 (Bacteroidetes, 相对丰度为 1.85%)、放线菌门 (Actinobacteria, 相对丰度为 0.7%) 和浮霉菌门

(Planctomycetes, 相对丰度为 0.13%)。其中变形菌门菌群所占比重最大, 其次是厚壁菌门(Firmicutes), 再者是绿菌门(Chlorobi)、绿弯菌门(Chloroflexi)和拟杆菌门(Bacteroidetes)等。同时, 表 1 列出了反应器稳定运行期颗粒污泥样品属水平上, 被鉴定出的氨氧化菌(AOB)、亚硝酸氧化菌(NOB)、反硝化菌和除磷菌。

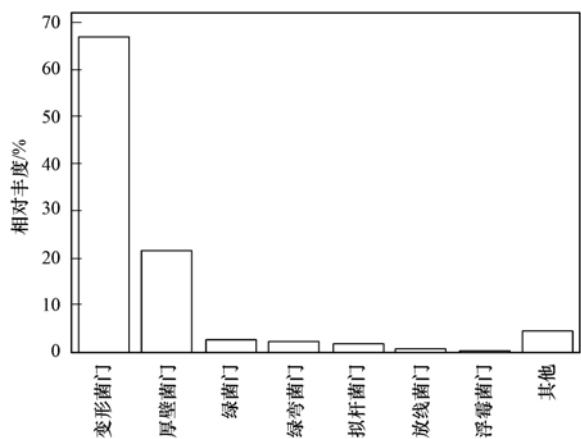


图 5 污泥样品微生物菌群的相对丰度(门水平)  
Fig. 5 Relative abundance of bacterial community of sludge samples at phylum levels

表 1 属水平上, 被鉴定出的氨氧化菌(AOB)、亚硝酸氧化菌(NOB)、反硝化菌和除磷菌及其丰度

Table 1 Relative abundance of AOB, NOB, denitrifiers and phosphorus removal bacteria at genus levels

| 细菌                                | 丰度/%  |
|-----------------------------------|-------|
| <i>Clostridium</i> (除磷菌)          | 21.24 |
| <i>Anaerolinea</i> (除磷菌)          | 1.07  |
| <i>Denitratisoma</i> (反硝化菌)       | 0.89  |
| <i>Planctomycetaceae</i> (厌氧氨氧化菌) | 0.13  |
| <i>Thauera</i> (反硝化菌)             | 0.11  |
| <i>Comamonas</i> (反硝化菌)           | 0.09  |
| <i>Nitrosomonas</i> (AOB)         | 0.08  |
| <i>Nitrospira</i> (NOB)           | 0.05  |

2.4 AGS-SBR 脱氮除磷机制讨论

有研究报道, 变形菌门菌群(Proteobacteria)是城镇污水处理厂活性污泥系统和废水生物反应系统的主要种群, 包含多种代谢种类, 在降解有机物的同时完成脱氮除磷的功能<sup>[18]</sup>。厚壁菌门(Firmicutes)中的芽孢杆菌纲(Clostridia)可能与 COD 及难以分解的大分子有机物的降解有关<sup>[19]</sup>。绿弯菌门(Chloroflexi)常存在于污泥菌胶团絮状体内部, 并以絮体骨架的形式存在, 这为好氧颗粒污泥的结构提供了骨架支撑<sup>[20]</sup>。Kragelund 等<sup>[21]</sup>在对活性污泥中绿弯菌门(Chloroflexi)的种类、丰度和生态生理学

的研究中也发现, 绿弯菌门(Chloroflexi)具有较好的生物除磷作用。Hill 等<sup>[22]</sup>发现拟杆菌门(Bacteroidetes)具有非常强的营养物质代谢能力, 如复杂有机物、蛋白质和脂类等。Li 等<sup>[23]</sup>在污水处理系统剩余污泥减量化及微生物菌群演变的研究中发现, 拟杆菌门(Bacteroidetes)具有水解污泥絮体的作用。本研究中, 上述生物种群构成了 AGS-SBR 系统好氧颗粒污泥的主要生物种群, 它们对废水中的 COD、氨氮、TN 和 TP 的去除起着重要作用, 这和反应器表现出良好的同步脱氮除磷性能密切相关。另外, 本研究中, 颗粒污泥样品中也检测到了少量的浮霉菌门(Planctomycetes)。在浮霉菌门(Planctomycetes)存有一些菌属具有厌氧氨氧化功能<sup>[24]</sup>, 但环境中仍存在未鉴定的新菌种。该类菌群能在厌氧的条件下, 以  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  分别为电子供体和受体, 反应生成气态氮, 从而达到生物脱氮的目的。本实验中, 由于进水 COD/N 比较低, 并且反应器在较低 DO 条件下运行, 检测出来的浮霉菌门(Planctomycetes)种群中有可能存在着厌氧氨氧化功能的菌群。

再者, 通过对反应器内主要脱氮除磷功能菌群的分析(表 1)可以看出, 颗粒污泥样品中梭菌属(*Clostridium*)相对丰度最高, 高达 21.24%。曾有文献报道, *Clostridium* 是一类具有反硝化除磷功能的菌群<sup>[25]</sup>。黄荣新等<sup>[26]</sup>在 SBR 反应器中进行反硝化聚磷菌(DPB)强化富集, 也分离得到了高效反硝化除磷菌属 *Clostridium*。这类反硝化聚磷菌(DPB), 可以在缺氧环境下以  $\text{NO}_x^-$  为电子受体, 利用内碳源, 通过“一碳两用”方式实现反硝化脱氮的同时过量聚磷。目前报道最多的聚磷菌(PAOs)按其菌属可划分为不动杆菌属(*Acinetobacter*)、气单胞菌属(*Aeromonas*)、棒杆菌属(*Corynebacterium*)、肠球菌属(*Enterococcus*)等<sup>[27]</sup>。但是本实验结果中并没有监测出已经报道的这四类聚磷菌。而是检测出具有反硝化除磷功能的一类菌群梭菌属(*Clostridium*)。同时, 反应器中存在厌氧绳菌属(*Anaerolinea*)细菌, 属于绿弯菌门(Chloroflexi)中的一类, 是和除磷性能有关的一类菌群<sup>[21]</sup>。

同时, AGS-SBR 反应器内存在着多种与脱氮有关的菌群。*Denitratisoma* 是红环菌科(Rhodocyclaceae)的一个新属, 是 Fahrbach 等<sup>[28]</sup>从城市污水处理厂的活性污泥中分离得到的, 是一类新型的具有好氧反硝化能力的菌群, 能直接将亚硝态氮转化为气态氮<sup>[8]</sup>; 陶厄氏菌属(*Thauera*)是近

年来才被定义的一个属,广泛分布于污水处理系统中,在污水处理系统、污泥和土壤环境中生长良好<sup>[29]</sup>,大都为杆状且具有好氧反硝化能力<sup>[30]</sup>.此外,反应系统中存在少量的毛球菌属(*Comamonas*)和亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*),这些菌群是和好氧反硝化能力有关的脱氮菌群<sup>[31]</sup>.由于 AGS-SBR 系统长期在低 DO 条件下进行,反应器中存在着好氧、缺氧和厌氧的微环境,反应器内可能存在自养反硝化、好氧反硝化、厌氧氨氧化等多种脱氮途径.但从表 1 可知,*Denitratisoma* 的相对丰度较高,表明反应器内以好氧反硝化为主的方式进行脱氮;而氨氧化菌(AOB)、亚硝酸氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)和 *Planctomycetaceae* 等含量较低,说明反应器中存在自养反硝化、短程脱氮、厌氧氨氧化等多种脱氮途径,但不在反应器中占据主导地位.综上,从实验结果分析初步判断,低 DO 条件,AGS-SBR 反应器中 *Clostridium*、*Anaerolinea* 和 *Denitratisoma* 相对丰度较高,导致了反应系统具有良好的脱氮除磷性能.

### 3 结论

(1)在反应器运行的 180 d 里,AGS-SBR 系统表现出了良好的稳定运行特征,对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 的平均去除率分别为 87.17%、95.21%、77.05% 和 91.11%,平均出水浓度稳定在 29.08、2.83、13.26 和 0.26 mg·L<sup>-1</sup>; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的平均积累量分别为 3.48 mg·L<sup>-1</sup> 和 3.24 mg·L<sup>-1</sup>.

(2)AGS-SBR 反应器运行期间,系统平均污泥浓度 MLSS 为 3.24 g·L<sup>-1</sup>,SVI 值平均为 41.32 mL·g<sup>-1</sup>,好氧颗粒污泥始终保持着完整的外观和密实紧凑的结构,并没有出现明显的颗粒污泥解体的现象. AGS-SBR 系统是一种低能耗、无需外加碳源、高效处理低 COD/N 比生活污水的脱氮除磷工艺.

(3)高通量测序结果表明,变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿菌门(Chlorobi)、绿弯菌门(Chloroflexi)和拟杆菌门(Bacteroidetes)为 SBR-AGS 反应器中主要优势菌群.好氧颗粒污泥中,*Denitratisoma*、*Planctomycetaceae*、*Thauera*、*Comamonas*、*Nitrosomonas* 和 *Nitrospira* 是反应器中与脱氮有关菌群,而 *Clostridium* 和 *Anaerolinea* 是和除磷相关的菌群.

#### 参考文献:

- [1] Lotito A M, Frattino U, Mancini A, et al. Effective aerobic granular sludge treatment of a real dyeing textile wastewater[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012, **69**: 62-68.
- [2] 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.
- [3] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. Water Research, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [4] Yang S A, Yang F L. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **195**: 318-323.
- [5] Zhang C Y, Zhang H M, Yang F L. Diameter control and stability maintenance of aerobic granular sludge in an A/O/A SBR[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **149**: 362-369.
- [6] Zou J T, Li Y M, Zhang L L, et al. Understanding the impact of influent nitrogen concentration on granule size and microbial community in a granule-based enhanced biological phosphorus removal system[J]. Bioresource Technology, 2015, **177**: 209-216.
- [7] Li Y M, Zou J T, Zhang L L, et al. Aerobic granular sludge for simultaneous accumulation of mineral phosphorus and removal of nitrogen via nitrite in wastewater[J]. Bioresource Technology, 2014, **154**: 178-184.
- [8] 常玉梅,杨琦,郝春博.等.城市污水厂活性污泥强化自养反硝化菌研究[J].环境科学,2011,**32**(4):1210-1216.
- [9] Quigley L, O'Sullivan O, Beresford T P, et al. High-throughput sequencing for detection of subpopulations of bacteria not previously associated with artisanal cheeses[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(16): 5717-5723.
- [10] Guo F, Zhang T. Biases during DNA extraction of activated sludge samples revealed by high throughput sequencing[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(10): 4607-4616.
- [11] 冷璐,信欣,鲁航,等.同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征[J].环境科学,2015,**36**(11):4180-4188.
- [12] 张楠,初里冰,丁鹏元,等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J].中国环境科学,2015,**35**(1):80-86.
- [13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 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.
- [15] Zhang H M, Dong F, Jiang T, et al. Aerobic granulation with low strength wastewater at low aeration rate in A/O/A SBR reactor[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, **49**(2): 215-222.
- [16] 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.
- [17] Bassin J P, Kleerbezem R, Dezotti M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures[J]. *Water Research*, 2012, **46**(12): 3805-3816.
- [18] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants[J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(6): 1137-1147.
- [19] Wang X H, Hu M, Xia Y, *et al.* Pyrosequencing analysis of bacterial diversity in 14 wastewater treatment systems in China [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(19): 7042-7047.
- [20] Larsen P, Nielsen J L, Otzen D, *et al.* Amyloid-like adhesins produced by floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(5): 1517-1526.
- [21] Kragelund C, Levantesi C, Borger A. Identity, abundance and ecophysiology of filamentous *Chloroflexi* species present in activated sludge treatment plants [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **59**(3): 671-682.
- [22] Hill V R, Kahler A M, Jothikumar N, *et al.* Multistate evaluation of an ultrafiltration-based procedure for simultaneous recovery of enteric microbes in 100-liter tap water samples[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(13): 4218-4225.
- [23] Li J, Gao X, Chen Y P, *et al.* Studies on excess sludge reduction and microbial community growing in a novel A + OSA reactor [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, **12**(11): 2097-2105.
- [24] 刘冬英, 邱艳玲, 袁宪正, 等. 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3208-3213.
- [25] Maszenan A M, Seviour R J, Patel B K C, *et al.* *Quadricoccus australiensis* gen. nov., sp. nov., a  $\beta$ -proteobacterium from activated sludge biomass[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2002, **52**(1): 223-228.
- [26] 黄荣新, 陈泽涛, 刘钢, 等. 反硝化聚磷菌的驯化富集及其分子生物学特性[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 43-48.
- [27] 陈燕, 杨小龙, 曹郁生. 1 株高效聚磷节杆菌的分离鉴定及其聚磷特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(1): 447-450.
- [28] Fahrbach M, Kuever J, Meinke R, *et al.* *Denitratisoma oestradiolicum* gen. nov., sp. nov., a 17 $\beta$ -oestradiol-degrading, denitrifying betaproteobacterium [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, **56**(7): 1547-1552.
- [29] Heider J, Fuchs G. *Bergey's manual<sup>®</sup> of systematic bacteriology: Volume 2: The proteobacteria, Part B: The gammaproteobacteria* (2nd ed.) [M]. New York: Springer, 2005. 907-913.
- [30] 杨华, 黄钧, 赵永贵, 等. 陶厄氏菌 *Thauera* sp. strain TN9 的鉴定及特性[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, **19**(2): 318-323.
- [31] 许晓毅, 罗固源, 汤丽娟, 等. 活动导流墙同心圆工艺处理生活污水的试验研究[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(8): 40-43.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....                                                         | JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)            |
| Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....                                                                                                    | CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)                |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....                                                                                                          | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)              |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....                                                                         | QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)                    |
| Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....                                                                                         | CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)              |
| Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....                                                                          | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)       |
| Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....                                                                                                                         | YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)                |
| Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....                                                                                                 | LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)                 |
| Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....                                                                                                | LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)                  |
| Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters ..... | JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)                   |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....                                                       | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)                |
| High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....                                                   | SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)                     |
| Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....                                                                          | JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)                 |
| Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....                                                         | ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)                  |
| Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....                                | WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)           |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....                                                         | YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)           |
| Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....                                                                                                          | LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)                 |
| Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....                                                                                                 | GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)            |
| Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                                                              | WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)        |
| Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....                                                                                                               | LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)                                   |
| Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....                                                                                | TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)                   |
| Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....                                                                                             | MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)          |
| Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....                                                                                                                               | XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)       |
| Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....                                                                                                    | TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195) |
| Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....                                                                                                                                | REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)               |
| Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....                                                               | WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)             |
| Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....                                                                                                | NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)               |
| Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....                                                                                       | ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)             |
| Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....                                                               | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)                     |
| Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs .....                                                     | WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)      |
| Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....                                                                                                                            | SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)           |
| Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....                                                | XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)                     |
| Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....                                                                    | WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)               |
| Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....                                              | WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)              |
| Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....                                                                    | HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)            |
| Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....                                                                     | HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)                 |
| Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....                                                                                                         | ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)                          |
| Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....                                                                                                               | ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)           |
| Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....                                                                       | SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)            |
| Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....                                                                                               | CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)             |
| Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....                                                                                    | LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)               |
| Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....                                                                                                   | GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)           |
| Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....                                                                         | TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)             |
| Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....                                                                                                  | CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)    |
| Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....                                                                                                  | YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)             |
| Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....                                                                                       | XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)                               |
| Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....                                                                            | PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)                 |
| N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....       | XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)              |
| Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....                                                           | XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)                        |
| Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....                           | ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)             |
| Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....                                                                 | GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)             |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行