

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓烨, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究

刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术重点实验室, 石家庄 050018)

摘要: 同步硝化反硝化(SND)是废水处理中的新型生物脱氮工艺, 和传统生物脱氮工艺相比具有显著的应用优势. 本研究采用微气泡曝气固定床生物膜反应器, 研究了 SND 过程中污染物去除效果并检测了生物膜功能菌群的变化情况. 结果表明, 在微气泡曝气固定床生物膜反应器内可以实现同步硝化反硝化, 通过提高进水 COD 负荷和 C:N 比, 降低溶解氧(DO)浓度, 同时增加填料床层孔隙率, 可以改善 SND 效果. 当进水 COD 负荷和总氮(TN)负荷为 $0.86 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 且填料床层孔隙率为 81% 时, COD 和 TN 的去除率分别为 97.6% 和 70.2%, 实现了 COD 和 TN 的同步高效去除; 同时, 微气泡曝气对氧传质的强化作用使得氧利用率高达 91.8%. 此外, 生物膜活性和硝化及反硝化功能菌群的变化, 与反应器 COD、氨氮和 TN 去除能力的变化基本一致.

关键词: 同步硝化反硝化(SND); 微气泡曝气; 生物膜反应器; 氧利用率; 功能菌群

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2230-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.06.026

Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor

LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, ZHANG Ming, ZHANG Lei, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, LI Xing
(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Simultaneous nitrification and denitrification (SND) is a new wastewater treatment process for biological nitrogen removal, which shows some significant advantages compared with conventional biological nitrogen removal processes. The SND process in a fixed bed biofilm reactor with microbubble aeration was investigated in this study. The removal efficiencies of COD and nitrogen were determined under different operational conditions and the functional bacterial populations for nitrogen removal in the biofilm were detected. The results showed that efficient SND process could be achieved in the biofilm reactor with microbubble aeration. The SND could be improved at lower dissolved oxygen (DO) concentration and larger porosity of packing bed when the COD loading rate and C/N ratio were increased. The removal efficiencies of COD and total nitrogen (TN) were 97.6% and 70.2%, respectively, at a COD loading rate of $0.86 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, a TN loading rate of $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and a packing bed porosity of 81%, indicating the simultaneous efficient removal of COD and TN. Under these conditions, the oxygen utilization efficiency reached as high as 91.8% due to the enhanced oxygen mass transfer by microbubble aeration. In addition, the biofilm activity and the abundance of nitrifiers and denitrifiers were consistent with the removal capacity of COD, ammonia and TN under different operational conditions.

Key words: simultaneous nitrification and denitrification (SND); microbubble aeration; biofilm reactor; oxygen utilization efficiency; functional bacterial population

同步硝化反硝化(SND)是一种新型的生物脱氮工艺. SND 是将硝化和反硝化过程在同一个反应器中同步进行, 它是由好氧处理系统中微生物絮体或生物膜内部缺氧产生的^[1]. 与传统生物脱氮工艺相比, SND 具有节省空间, 缩短反应时间等优势^[2~4]. 根据 SND 的机制和生物膜法的特点, 在生物膜中更容易实现 SND: 首先, 生物膜中微生物呈固着态, 有利于不同优势菌属的培养生长; 其次, 生物膜的聚集厚度更有利于形成好氧/厌氧微区^[5]. 溶解氧(DO)是 SND 过程中主要影响因素之一, 直接影响到硝化细菌和反硝化细菌的生长和活性^[6]; 而溶解氧主要通过曝气过程来提供, 因而曝气方式也对 SND 工艺运行效能具有重要影响.

微气泡曝气技术是一种日益受到关注的新型曝气方式, 在废水处理中具有强化气-液传质及提高污染物去除效率的潜在应用优势^[7~9]. 微气泡通常是指直径为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 的微小气泡^[10]. 在废水物化处理过程中, 微气泡曝气比传统气泡曝气具有更高的气-液传质效率^[11~13]. 由于微气泡曝气过程对活性污泥混合液性质具有不利影响, 因而难以应用于活性污泥生物处理工艺^[14]; 另一方面, 微气泡曝气技术已经成功应用于生物膜反应器, 并且获得显著

收稿日期: 2013-10-24; 修订日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008111); 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(11966726D)

作者简介: 刘春(1976~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: liuchun@hebast.edu.cn

高于传统曝气方式的氧利用率^[15]。同时,研究也发现在高有机负荷下,微气泡曝气生物膜反应器内具有 SND 现象,但 SND 效率较低,总氮去除率不高^[15]。

本研究通过调整 SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器的运行条件,实现高效的同步硝化反硝化,提高总氮去除率,并考察生物膜内功能菌群的变化,以期微气泡曝气生物膜反应器在废水脱氮的应用中提供参考。

1 材料与方法

1.1 SPG 膜微泡曝气系统

SPG 膜(购于 SPG 技术有限公司,日本)微气泡曝气生物膜反应器如图 1 所示,SPG 膜为孔径 0.6 μm 的管式疏水膜,膜面积为 1.57 × 10⁻³ m²。

微气泡产生过程为:SPG 膜内部是流动液体,具有一定压力的气体从膜外侧通过膜孔压入到膜内,通过液体的剪切力形成微气泡。采用屏蔽循环泵为液体输送泵,以反应器内混合液作为流动液体。利用空气压缩机提供 0.6 ~ 0.8 MPa 的压缩空气,通过调节跨膜压差(膜外侧气压与内侧液压之差)控制空气流量约为 35 mL·min⁻¹。

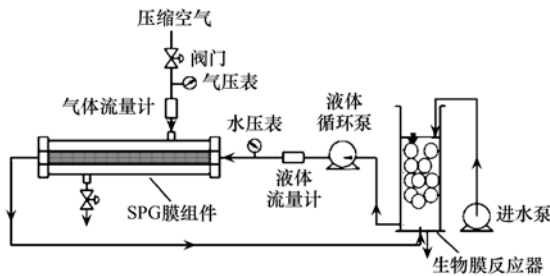


图 1 SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器系统示意
Fig. 1 Microbubble-aerated biofilm reactor using SPG membrane system

1.2 固定床生物膜反应器

反应器为圆柱形结构,底面直径和高分别为 250 mm 和 600mm,有效容积为 15 L。反应器内填充组合填料床层,组合填料为聚丙烯悬浮球中填充聚氨酯多孔填料。悬浮球直径 80 mm,多孔填料平均孔径 0.5 ~ 1 mm。反应器填料的填充比为 11% (体积比)。

1.3 试验过程

向反应器中接种城市污水处理厂二沉池回流污泥,接种初始污泥浓度 (MLSS) 约为 0.6 g·L⁻¹。采用传统气泡曝气,待单个填料上平均生物量达到 1.1 g·L⁻¹ 左右,挂膜完成。挂膜过程及后续运行过

程均采用模拟生活污水^[16],以葡萄糖、淀粉为碳源,以 NH₄Cl、蛋白胨为氮源,同时添加 Fe、Ca 等微量元素。

挂膜完成后采用微气泡曝气连续运行反应器,运行过程分为 3 个阶段。在各阶段逐步提高 C: N (COD: TN) 比以及 COD 负荷;同时,在填料床层体积不变的情况下,通过提高床层高度增加填料床层孔隙率。各阶段运行条件见表 1,反应器运行温度控制在 32 ~ 35℃。

表 1 运行条件
Table 1 Running conditions

项目	Phase1	Phase2	Phase3
运行时间/d	0 ~ 38	39 ~ 72	73 ~ 106
HRT/h	12		
C: N	2.0: 1	4.5: 1	8.6: 1
COD 负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.26	0.58	0.86
氨氮负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.10	0.11	0.09
总氮负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.13	0.13	0.10
床层孔隙率/%	69	69	81

1.4 生物膜活性测定

在各运行阶段末期,从反应器中取一定体积的填料放入三角瓶中,将盛有填料的三角瓶放在漩涡混合器上振荡 10 min,然后超声波振荡 3 min,以将生物膜从填料上分离下来^[17]。通过测定生物膜样品的耗氧速率 (OUR) 来表征生物膜的有机物降解活性和硝化活性^[18,19]。

1.5 功能菌群检测

采用荧光原位杂交 (FISH) 技术检测反应器生物膜硝化菌群和反硝化菌群的平均相对丰度。

1.5.1 特异性探针

FISH 检测中使用 3 种特异性探针,其中通用探针基因序列为:5'-ACGGCGCGTGTGTAC-3'^[20];硝化菌群的特异性探针基因序列为:5'-CCTGTGCTCCATGCTCCG-3'^[21];反硝化菌群特异性探针基因序列为:5'-GACTTGCATGCCTAATCC-3'^[22]。

1.5.2 杂交

取 250 μL 的污泥置于离心管中,加入 3 倍体积的 4% 多聚甲醛固定,10 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,弃去上清液。用 1 × PBS 缓冲液清洗样品 3 次,然后用 50%、80% 和 100% 的梯度乙醇对污泥样品进行脱水。

将 1 μL 探针与 9 μL 杂交缓冲液充分混合,将载玻片放入分子杂交箱中 46℃ 杂交 5 h。

杂交好的污泥样品用杂交清洗液清洗未杂交的探针和杂交缓冲液,再用 ddH₂O 漂洗 3 次后自然

风干.

1.5.3 镜检与图像处理

杂交后的污泥样品置于荧光显微镜 (Motic, BA200, 中国) 下观察, 每个样品取 30 个视野获得 FISH 杂交图像 (Moticam2206). 使用 Motic Fluo 1.0 荧光分析软件对图像进行分析并计算荧光杂交区域面积, 根据公式(1) 计算目标菌群的相对丰度^[23].

$$\text{菌群相对丰度}(\%) = \frac{\text{特异性探针杂交的细胞面积}}{\text{通用探针杂交的细胞面积}} \times 100\% \quad (1)$$

1.6 水质分析方法

COD、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐均采用国标方法测定. 溶解氧通过溶解氧测定仪 (WTW cellOx 325, 德国) 测定. TN 采用 TOC 分析仪 (TOC-VCPN, 岛津, 日本) 测定.

2 结果与讨论

2.1 污染物去除性能

2.1.1 COD 去除性能

图 2 显示了 Phase1 ~ Phase3 阶段 COD 去除性能的变化. Phase1 ~ Phase3 阶段进水 COD 平均浓度分别为 131.1、290.6 和 429.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 平均浓度为 29.2、9.0 和 9.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 的平均去除率为 75.0%、93.5% 和 97.6%. COD 的平均去除负荷分别为 0.20、0.57 和 0.84 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 可见, 反应器运行过程中, 可以得到稳定高效的 COD 去除效果.

Phase1 ~ Phase3 阶段, 随着进水 COD 负荷的增加, 反应器中 DO 浓度逐渐下降, Phase1 阶段 DO 平均浓度为 3.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Phase3 阶段 DO 平均浓度降至 1.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. DO 浓度降低有利于在生物膜内形成缺氧区, 从而促进反硝化过程的进行.

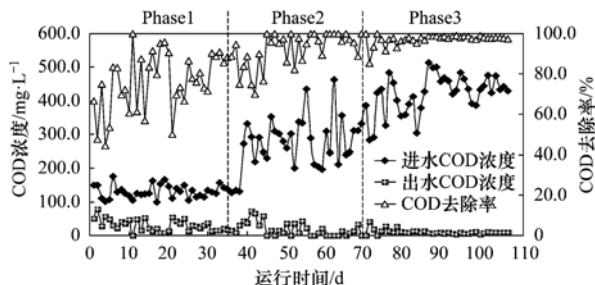


图 2 微气泡曝气生物膜反应器进出水 COD 浓度变化

Fig. 2 Variation of COD concentration in the influent and effluent of the bioreactor with microbubble aeration

2.1.2 氨氮去除性能

图 3 显示了 Phase1 ~ Phase3 氨氮去除性能的变化.

Phase ~ Phase3 进水氨氮平均浓度分别为 49.9、55.6 和 44.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮平均出水浓度分别为 13.3、20.6 和 4.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮的平均去除率分别为 63.0%、62.9% 和 90.2%, 氨氮的平均去除负荷分别为 0.073、0.070 和 0.081 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

可以看到, Phase1 阶段到 Phase2 阶段提高进水 COD 负荷, DO 浓度下降, 氨氮去除负荷也随之略有降低. 高有机负荷和低 DO 浓度对促进生物膜内的反硝化作用是必要的, 在此条件下, 强化 DO 在生物膜内的扩散传质可能是改善硝化效果的可行途径. 因而, 在 Phase3 阶段提高填料床层孔隙率, 以强化填料床层内水流与生物膜的接触, 改善 DO 向生物膜内的扩散传质. 在此条件下, 尽管进水 COD 负荷继续增加且液相主体的 DO 浓度有所下降, 但氨氮去除率和去除负荷仍显著提高, 表明增加床层孔隙率可有效强化生物膜内的扩散传质, 从而提高硝化过程的效率. 可见, 相对于液相主体的 DO 浓度, DO 向生物膜内的扩散传质对硝化作用的影响更为显著.

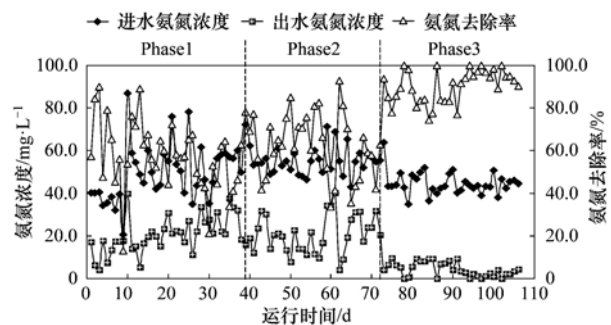


图 3 微气泡曝气生物膜反应器进出水氨氮浓度变化

Fig. 3 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in the influent and effluent of the bioreactor with microbubble aeration

2.1.3 硝酸盐浓度变化

图 4 显示了 Phase1 ~ Phase3 硝酸盐浓度变化. Phase1 ~ Phase3 进水硝酸盐平均浓度 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水硝酸盐平均浓度分别为 32.4、3.5 和 9.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

由图 4 可以看出, Phase1 阶段存在显著的硝酸盐累积现象, 说明硝化作用明显, 反硝化作用较差, 主要的原因: 一方面 Phase1 进水有机负荷较低, 反应器内 DO 浓度较高, 不利于在生物膜内提供反硝化作用所需要的缺氧环境; 另一方面 Phase1 进水 C:N 比低于反硝化的理论最低量 2.86:1, 有机碳浓度过低难以为反硝化过程提供所需的电子供体, 使得反硝化作用受到影响.

Phase2 增加进水有机负荷和 C: N 比,硝酸盐积累显著下降. 可见,通过增加有机负荷,使得反应器内 DO 浓度降低,有利于在生物膜内部为反硝化菌群提供缺氧环境,并满足反硝化菌群对有机碳源的需求,从而增强了反硝化作用.

Phase3 阶段进一步提高进水有机负荷和 C: N 比,同时增加填料床层孔隙率,此时硝酸盐积累略有增加,此结果反映了硝化作用的增强. 但考虑到 Phase3 氨氮去除率高达 90.2% 而出水硝酸盐浓度仅增加至 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此 Phase3 阶段的反硝化效率也得到提高,整体同步硝化反硝化效果更为显著. 可见,Phase3 阶段硝化效率提高可为反硝化过程提供足够的电子受体硝酸盐;同时 C: N 提高至 9.7:1,接近同步硝化反硝化作用较优的 C: N 比^[24, 25],为反硝化过程提供充足的电子供体,因而增强反硝化作用,实现了同步硝化反硝化过程整体效率的提高.

根据氨氮的去除量和硝酸盐的积累量计算 SND 效率^[24],Phase1 ~ Phase3 阶段分别为 73.3%、97.8% 和 93.5%. SND 效率反映了反硝化效率与硝化效率的同步平衡关系,Phase1 阶段 SND 效率较低,表明此时硝化效率显著高于反硝化效率;Phase2 阶段反硝化效率显著提高,基本接近硝化效率,因而 SND 效率趋近 100%;Phase3 阶段反硝化效率和硝化效率均有所提高,但 SND 效率却略有降低,可见此时硝化效率和反硝化效率并非同步提高,硝化效率提高幅度更大.

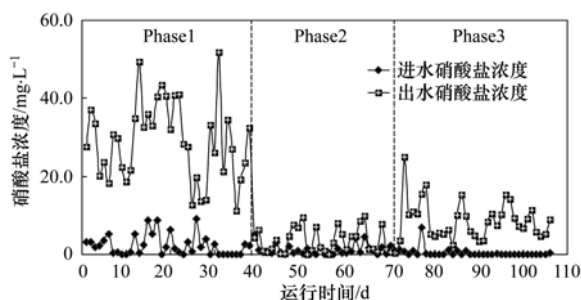


图4 微气泡生物膜反应器进出水硝酸盐浓度变化

Fig. 4 Variation of nitrite concentration in the influent and effluent of the bioreactor with microbubble aeration

2.1.4 总氮(TN)去除性能

图5显示了Phase1 ~ Phase3 TN 去除性能变化,Phase1 ~ Phase3 进水 TN 平均浓度分别为 64.1、66.7 和 $49.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 TN 平均浓度分别为 51.9、33.6 和 $14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 平均去除率分别为 19.1%、46.4% 和 70.2%,总氮平均去除负荷分别为 0.018、0.066 和 $0.070 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

反应器中 TN 的去除依赖于同步硝化反硝化效果,而反硝化作用是影响同步硝化反硝化效果的主要因素. Phase1 阶段低有机负荷和高 DO 浓度使反硝化作用受到抑制,同步硝化反硝化效果不显著,因而 TN 的去除负荷较低. Phase2 通过提高有机负荷降低 DO 浓度,增强了反硝化作用,同步硝化反硝化效率得到提高,TN 的去除负荷显著增加. Phase3 通过进一步增加进水 C: N 并提高床层孔隙率,同时增强了硝化作用和反硝化作用,因此同步硝化反硝化效果进一步提高,TN 去除负荷也随之提高.

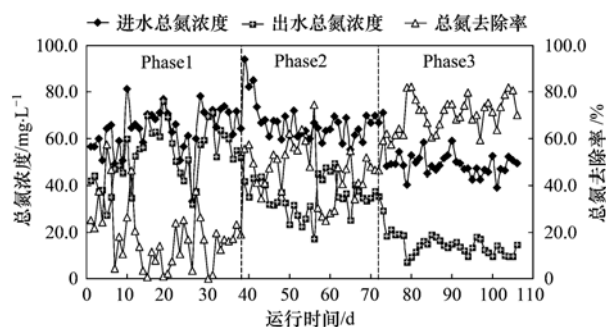


图5 微气泡曝气生物膜反应器进出水总氮浓度变化

Fig. 5 Variation of TN concentration in the influent and effluent of the bioreactor with microbubble aeration

2.1.5 氧利用率

在氧利用率估算中,考虑有机物好氧降解对氧的利用、硝化过程对氧的利用以及反硝化作用以硝酸盐为电子受体的有机物消耗,从而得到 C、N 同步去除过程中氧的利用量;同时根据微气泡曝气的空气流量计算理论供氧量,在此基础上估算氧利用率. 氧利用率的估算依据包括:①空气流量为 $35 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的理论供氧量为 $0.93 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$;②去除 1 mol 氨氮需要消耗 2 mol 溶解氧,并产生 1 mol 硝酸盐用于后续反硝化;③反硝化过程中去除 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸盐需要消耗 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ COD}$ ^[26];④总的 COD 去除量减去反硝化过程中 COD 消耗量,即为 COD 好氧降解中溶解氧的消耗量. 估算结果表明,Phase1 ~ Phase3 阶段平均氧利用率分别为 31.2%、63.2% 和 91.8%.

可见,在 Phase3 阶段高有机负荷、高 C: N 比和高填料床层孔隙率的运行条件下,不仅可以实现高效的 COD 和 TN 的去除,而且可以获得远高于传统曝气条件下的氧利用率,体现出微气泡曝气在生物膜反应器同步硝化反硝化工艺中的应用优势.

2.2 生物膜活性变化

在各个阶段运行结束时取生物膜样品,测定其

耗氧速率,以耗氧速率表征生物膜生物活性,如图 6 所示.

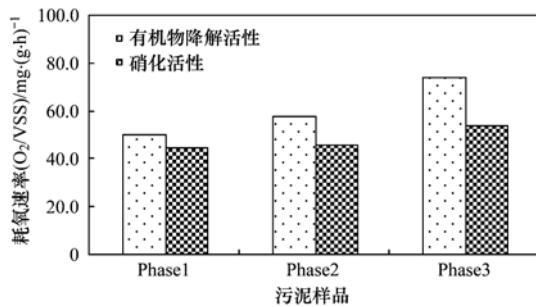


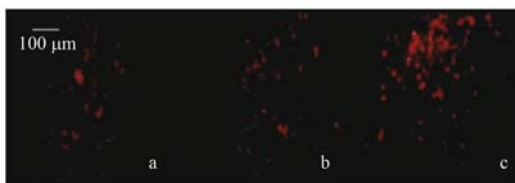
图 6 微气泡曝气生物膜反应器生物膜活性变化

Fig. 6 Variation of biofilm activity in the bioreactor with microbubble aeration

可以看到,Phase1 阶段到 Phase2 阶段,有机物好氧降解活性有所提高,分别为 $50.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $58.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 而硝化活性基本相当,分别为 $44.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $45.9 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 可见,Phase1 和 Phase2 阶段的生物膜活性可以反映各阶段 COD 及氨氮的去除能力. Phase3 阶段,有机物好氧降解活性和硝化活性分别提高到 $74.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $54.1 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 同样与此阶段 COD 去除能力和硝化作用的进一步提高基本一致.

2.3 生物膜功能菌群变化

采用荧光原位杂交 (FISH) 对 3 个阶段生物膜内的硝化菌群和反硝化菌群进行检测, FISH 杂交图像如图 7 和图 8 所示. 通过图像分析, 计算了硝化菌群和反硝化菌群的平均相对丰度, 结果如图 9 所示.

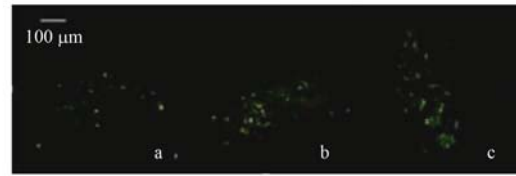


(a) Phase1; (b) Phase2; (c) Phase3

图 7 运行不同阶段生物膜硝化菌群 FISH 检测

Fig. 7 Detection of nitrifiers in the biofilm at different operation stage by fluorescence *in situ* hybridization (FISH)

Phase1 ~ Phase3 阶段硝化细菌平均相对丰度分别为 24.2%、25.1% 和 35.5%, 反硝化菌群的平均相对丰度为 4.9%、8.8% 和 10.5%. 各阶段硝化菌群和反硝化菌群相对丰度的变化与其硝化作用和反硝化作用变化基本一致. Phase3 阶段生物膜内硝化菌群和反硝化菌群的平均相对丰度最大, 因而同步硝化反硝化效果最好. 同时, 各阶段反硝化菌群的



(a) Phase1; (b) Phase2; (c) Phase3

图 8 运行不同阶段生物膜反硝化菌群 FISH 检测

Fig. 8 Detection of denitrifiers in the biofilm at different operation stage by fluorescence *in situ* hybridization (FISH)

相对丰度均显著低于硝化菌群相对丰度, 反映了反硝化过程是实现反应器内同步硝化反硝化作用的限制步骤.

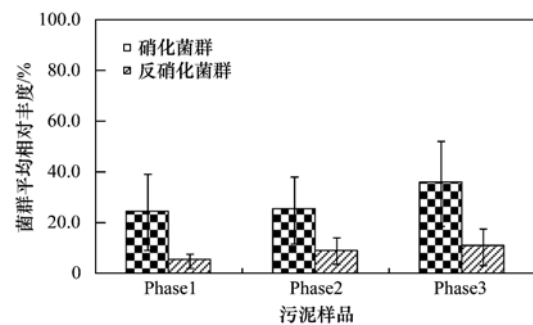


图 9 运行不同阶段生物膜脱氮功能菌群平均相对丰度

Fig. 9 Relative abundances of functional bacterial populations for nitrogen removal in the biofilm at different operation stages

3 结论

(1) 在微气泡曝气的固定床生物膜反应器内可以实现同步硝化反硝化, 提高进水有机负荷和 C:N 比, 降低 DO 浓度, 同时增加填料床层孔隙率, 有助于改善同步硝化反硝化效果.

(2) 在进水 COD 负荷和 TN 负荷为 $0.86 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 且填料床层孔隙率为 81% 时, COD 和 TN 的去除率分别为 97.6% 和 70.2%, 实现了 COD 和 TN 的同步高效去除; 同时氧利用率高达 91.8%, 体现了微气泡曝气强化氧传质的应用优势.

(3) 生物膜活性和硝化及反硝化功能菌群的变化, 与反应器 COD、氨氮和总氮去除能力的变化基本一致.

参考文献:

- [1] 李绍峰, 崔崇威, 黄君礼, 等. DO 和 HRT 对 MBR 同步硝化反硝化影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 887-890.
- [2] Wang B, Wang W, Han H J, et al. Nitrogen removal and simultaneous nitrification and denitrification in a fluidized bed step-feed process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012,

- 24(2): 303-308.
- [3] Yang S, 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(15): 318-323.
- [4] Zhu G B, Peng Y Z, Wu S Y, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in step feeding biological nitrogen removal process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(9): 1043-1048.
- [5] 曹文娟, 徐祖信, 王晟. 生物膜中同步硝化反硝化研究进展 [J]. 水处理技术, 2012, 38(1): 1-5.
- [6] 吴丹. 不同曝气方式下短程硝化反硝化工艺特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 吕越, 刘春, 杨泉, 等. 典型污染物对微气泡曝气中氧传质特性的影响 [J]. 河北科技大学学报, 2012, 33(5): 469-474.
- [8] 刘春, 张磊, 杨景亮, 等. 微气泡曝气中氧传质特性研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 585-589.
- [9] Agarwal A, Ng W J, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment [J]. Chemosphere, 2011, 84(9): 1175-1180.
- [10] 张磊, 刘平, 刘春, 等. 微气泡及其在环境污染控制中的应用 [J]. 河北工业科技, 2011, 28(1): 59-63.
- [11] Chu L B, Xing X H, Yu A F, *et al.* Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles [J]. Chemosphere, 2007, 68(10): 1854-1860.
- [12] Chu L B, Xing X H, Yu A F, *et al.* Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2008, 86(5): 389-393.
- [13] Liu S, Wang Q H, Ma H Z, *et al.* Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 71(3): 337-346.
- [14] 刘春, 马锦, 张磊, 等. 微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响 [J]. 环境科学, 2013, 34(1): 198-203.
- [15] 张磊, 刘平, 马锦, 等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2277-2282.
- [16] Huang X, Liu R, Qian Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2000, 36(5): 401-406.
- [17] 崔玉雪, 袁琦, 唐媛, 等. 水源水生物预处理中填料生物量的测定方法探讨 [J]. 给水排水, 2009, 35(11): 29-31.
- [18] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率 (OUR) 表征活性污泥硝化活性的研究 [J]. 环境科学学报, 1999, 19(3): 225-229.
- [19] 张婧倩, 彭永臻, 唐旭光, 等. COD 对强化生物除磷系统的影响及 OUR 的变化规律 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 301-305.
- [20] Liu W T, Chan O C, Fang H P. Characterization of microbial community in granular sludge treating brewery wastewater [J]. Water Research, 2002, 36(7): 1767-1775.
- [21] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. Journal of Bacteriology, 1990, 172(2): 762-770.
- [22] 夏岚, 李遵龙, 郑朋. 荧光原位杂交法研究氧化沟内微生物群落分布特征 [J]. 化工进展, 2012, 31: 203-207.
- [23] Wallner G, Amann D R, Beisker W. Optimizing fluorescent in situ hybridization with rRNA-targeted oligonucleotide probes for flow cytometric identification of microorganisms [J]. Cytometry, 1993, 14(2): 136-143.
- [24] Xia S Q, Li J Y, Wang R C. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor [J]. Ecological Engineering, 2008, 32(3): 256-262.
- [25] Chiu Y C, Lee L L, Chang C N, *et al.* Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2007, 59(1): 1-7.
- [26] Lan C J, Kumar M, Wang C C, *et al.* Development of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in a sequential batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(9): 5514-5519.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuaishui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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