

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中 N_2O 产生量的研究

陈丽丽, 高大文*

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 采用控制低溶解氧 (DO) 在 SBR 反应器内, 研究了好的颗粒污泥微膨胀的实现; 考察了微膨胀颗粒污泥对 COD 和氨氮去除效能以及温室气体 N_2O 产生量. 结果表明, 在低 DO 条件下可以获得微膨胀颗粒污泥, 污泥容积指数 (SVI) 大都在 150 ~ 250 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间. 微膨胀颗粒污泥对 COD 和氨氮去除量影响不大, COD 去除率从 89.45% 上升到 90.99%; 氨氮去除率从 77.29% 降至 68.29%; 硝化速率从 $38.95 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$ 降至 $33.46 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$. 微膨胀颗粒污泥对 N_2O 产生量影响很大, 微膨胀颗粒污泥 N_2O 产生量为 $2.42 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 是没有发生微膨胀颗粒污泥 N_2O 产生量的 1.26 倍. 微膨胀颗粒污泥 N_2O 释放速率由 $3.63 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 上升到 $4.72 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.

关键词: 低溶解氧; 微膨胀颗粒污泥; 污泥容积指数; 去除效能; N_2O 产生量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3532-06

N_2O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge

CHEN Li-li, GAO Da-wen

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Controlled low dissolved oxygen (DO) in a sequencing batch reactor (SBR) was used to study the realization of micro-expansion of aerobic granular sludge, and the removal efficiency of COD and NH_4^+-N as well as the production of the greenhouse gas N_2O by the micro-expansion of granular sludge was investigated. The results showed that under the condition of low dissolved oxygen micro-expansion of sludge could be achieved, and the sludge volume index (SVI) was mostly in the range of 150-250 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. The micro-expansion of granular sludge did not have significant influence on the removal of COD and NH_4^+-N . The COD removal rate increased from 89.45% to 90.99%, the NH_4^+-N removal rate decreased from 77.29% to 68.29%, and the nitrification rate dropped from $38.95 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$ to $33.46 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$. The micro-expansion of granular sludge had a big influence on the production of N_2O , and the N_2O production by the micro-expanded granular sludge was $2.42 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, which was 1.26 times of the N_2O production of the granular sludge without micro-expansion. The N_2O release rate in the micro-expanded granular sludge increased from $3.63 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ to $4.72 \times 10^{-3} \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.

Key words: low DO; sludge micro-bulking; sludge volume index (SVI); removal efficiency; N_2O production

污水生物脱氮过程中会产生一种气态氮氧化物 N_2O . N_2O 是一种重要的温室气体, 它的温室效应是 CO_2 的 250 倍^[1], CH_4 的 20 ~ 30 倍^[2]. 在大气中属于痕量气体, 但 N_2O 在大气中的浓度每增加 1 倍, 就将导致全球升温 0.3°C ^[3]. 此外, N_2O 在平流层非常稳定, 可稳定存在 120 a 以上, 它通过光分解作用产生的氮氧化物能破坏平流层的 O_3 ^[4].

污水处理厂是温室气体 N_2O 的主要释放源, 目前有关污水生物脱氮系统 N_2O 产生量的研究, 大都集中在硝化类型^[5]、工艺类型及影响因素^[6]、产生机制、控制与预防^[7] 方面. 本课题组在前期研究发现: 在不同的氨氮浓度条件下好氧颗粒污泥 N_2O 产生量不同^[8], 然而 DO 浓度作为污水处理厂实际运行中的关键性可控因素, 合理的 DO 浓度不但可以提高污水处理效率, 有利于污水处理厂的节能降耗, 也可以减少 N_2O 的产生量^[9]. 可见 DO 浓度对污水

生物脱氮系统起着至关重要的作用. 在实际工程中也发现, 由低 DO 引发的丝状菌污泥微膨胀, 若其程度控制得当, 不会影响处理效果而且还可节省大量曝气能耗^[10]. 正因为污泥微膨胀可以达到节能的目的, 所以国内外对污泥微膨胀的产生机制、控制与预防进行了大量研究与探索^[11~13], 用缺氧/好氧在 A/O 工艺内处理实际生活污水, 发现 DO 浓度控制在 $0.5 \sim 0.7 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥微膨胀可长期维持稳定^[14]. 同时在 A/O 反应器中成功验证了低 DO 微膨胀节能理论与方法^[15]. 目前已经实现了低 DO 微膨胀和短程硝化的耦合^[16]. 在污水生物脱氮系统温室气体 N_2O 产生是不容忽视的, 而污泥膨胀程度

收稿日期: 2012-12-30; 修订日期: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177033); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20092302110059)

作者简介: 陈丽丽 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向污水生物脱氮过程温室气体的释放, E-mail: chenlili-232@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dawgao@gmail.com

适中不影响污水处理效率;还有利于污水处理厂节能降耗。但是,微膨胀是否影响颗粒污泥 N_2O 的产生量还鲜见报道。

本研究通过控制低 DO,在 SBR 反应器内实现颗粒污泥的微膨胀,然后考察微膨胀颗粒污泥对 COD 和 NH_4^+-N 的去除效能以及 N_2O 产生量,以期为在工程实践中正确应用微膨胀节能理论提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验用水及种泥

试验采用模拟人工配水,其组分为 COD (400 ± 20) $mg \cdot L^{-1}$, NH_4^+-N (30 ± 2) $mg \cdot L^{-1}$,微量元素的投加量为 $1 mL \cdot L^{-1}$ 。微量元素 ($g \cdot L^{-1}$) 组成: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 1.5; H_3BO_3 0.15; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.03; KI 0.18; EDTA 10; $MnSO_4 \cdot H_2O$ 0.06; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.12; $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.18。试验种泥取实验室已具有的颗粒污泥。

1.2 试验装置与运行方案

试验采用 SBR 反应器,反应器(图1)是由有机玻璃制成的,反应器底部装有微孔曝气头,采用鼓风曝气,转子流量计调节曝气量。温度采用温控仪实时控制反应器温度,温控仪由电热丝、石棉布构成,包裹着反应器外壁对反应器内水体温度起到保温作用。反应器有效容积 3.2 L,每周排水 2.5 L。本试验采用传统时间控制模式,好氧硝化时间为 180 min,每天运行 2 个周期。每个运行周期均包括进水、曝气、沉淀、排水和闲置 5 个阶段。试验系统初始温度为 (31 ± 0.5) $^{\circ}C$ 、进水 pH 7~8。工况调试运行实现并稳定了同步硝化反硝化。

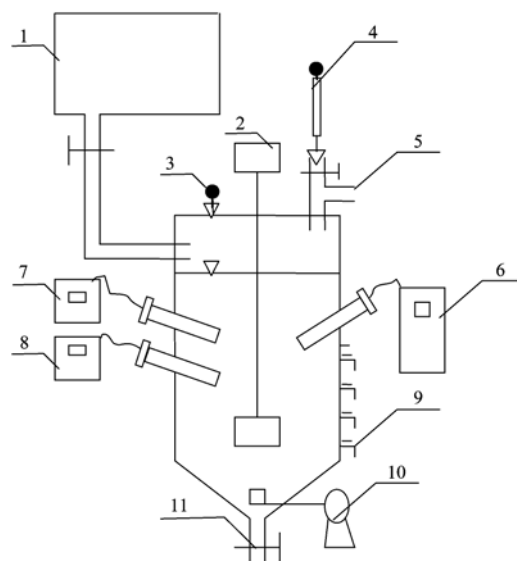
1.3 检测项目及分析方法

1.3.1 水样分析

用 Multi340i 型(WTW 公司)便携式多功能 DO、pH、ORP 测定仪在线测定体系内 DO 值、pH 值和 ORP 值的动态变化。COD、 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 和 MLSS 等指标,采用国家标准方法^[17]测定。微生物相分析采用 OLYMPUS BX51 光学显微镜观测。

1.3.2 N_2O 分析

脱氮过程中 N_2O 产生量包括两部分,即气态 N_2O 和溶解性 N_2O 。气态 N_2O 测定:采用日本岛津 2010 气相色谱仪,运用 PorapakQ 色谱柱 ($30 m \times 0.53 mm \times 20 \mu m$) 测定 N_2O 。色谱条件为进样口温度 $150^{\circ}C$;柱温 $70^{\circ}C$;ECD 检测器 $300^{\circ}C$ 。所有的样品均平行测定 3 次,溶解性 N_2O 测定:溶解于颗粒污泥混合液



1. 进水槽; 2. 搅拌器; 3. 碳源投加口; 4. 气体取样口; 5. 出气口; 6. 温度控制仪; 7. DO 检测仪; 8. pH 检测仪; 9. 液体取样口; 10. 曝气泵; 11. 排泥口

图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

中的 N_2O 采用上部空间法测定。用 50 mL 玻璃注射器抽取 20 mL SBR 反应器中颗粒污泥混合液,再抽取 30 mL 的空气,加入 1 mL 浓度为 $1 mol \cdot L^{-1}$ 的 H_2SO_4 (加酸是为了抑制微生物的活性),手摇 1 min 后,静置 1 h。将玻璃注射器内上部的气体注入气相色谱仪检测^[18,19]。

为进一步确定微膨胀颗粒污泥对 N_2O 产生量的影响,分别采用式(1)和式(2)计算,得出没有发生微膨胀颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥在好氧硝化阶段的硝化速率和 N_2O 释放速率。

$$K_a = \Delta(NH_4^+-N) / X_v \Delta t \quad (1)$$

$$R_e = \Delta C_{N_2O-N(\text{释放量})} / \Delta t \quad (2)$$

式中, K_a 为硝化速率, $mg \cdot (g \cdot min)^{-1}$; $\Delta(NH_4^+-N)$ 为消耗掉的氨氮浓度, $mg \cdot L^{-1}$; $\Delta C_{N_2O-N(\text{释放量})} / \Delta t$ 为 N_2O 释放量, $mg \cdot L^{-1}$; X_v 为反应器内污泥浓度, $mg \cdot L^{-1}$; Δt 为氨氮氧化时间, min; R_e 为 N_2O 释放速率, $mg \cdot (L \cdot min)^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 微膨胀的实现

试验初期,反应器温度控制在 (31 ± 0.5) $^{\circ}C$ 、pH 7~8, DO 在 $4 mg \cdot L^{-1}$ 以上, SVI 都在 $100 mL \cdot g^{-1}$ 以下(图2)。经过一段时间的稳定运行,其他参数不变,将反应器内 DO 调制到小于 $1 mg \cdot L^{-1}$ 并维持 DO 小于 $1 mg \cdot L^{-1}$, 初期颗粒污泥并没有受

DO 的影响,但在第 35 d SVI 开始不断升高. 第 45 d 左右 SVI 值下降的原因是由于排泥不当所造成,但并未影响 SVI 值继续上升. 在第 50 d 时,SVI 达到 $150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上(图 2). 此时颗粒污泥沉降性能不像没有发生微膨胀时那样迅速,但不影响正常排水,认为颗粒污泥已经发生了微膨胀. 研究发现当 SVI 高于 $150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,通常就认为发生了污泥膨胀^[20]. 没有发生微膨胀颗粒污泥表面光滑[图 3(a)],颗粒污泥结构紧密. 现在通过肉眼和显微镜观察发现颗粒污泥四周有绒毛出现[图 3(b)]. 为了进一步确定颗粒污泥发生了微膨胀现象,取带有绒毛的颗粒污泥边缘用显微镜放大,发现丝状菌的

菌丝伸出菌胶团外,呈放射状分布[图 3(c)]. 第 50 ~ 80 d 每天监测 SVI 值都在 $150 \sim 250 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间(图 2). 因此可以确定,颗粒污泥已经发生微膨胀. 维持 SVI 在 $150 \sim 250 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 的范围内,颗粒污泥的膨胀状态比较轻微^[21]. 当颗粒污泥发生微膨胀,丝状菌形成颗粒污泥的骨架,形成具有网状结构的污泥. 微膨胀颗粒污泥沉淀阶段的污泥紧密厚实,不像沉降性能很好时的颗粒污泥那样致密细小,也不像严重膨胀时颗粒污泥那样疏松多孔. 微膨胀颗粒污泥中丝状菌所占比例适中,能够在沉降过程有效地网捕卷扫水中的微小悬浮物,使沉淀后水质非常清澈.

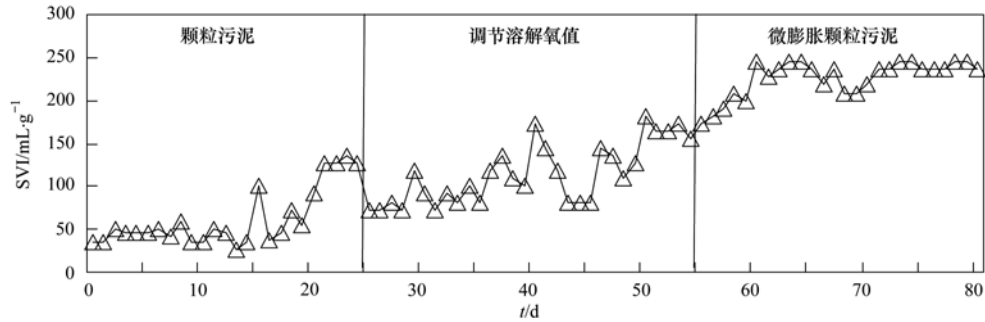


图 2 试验过程中 SVI 的变化情况
Fig. 2 Fluctuation of SVI during the experiment

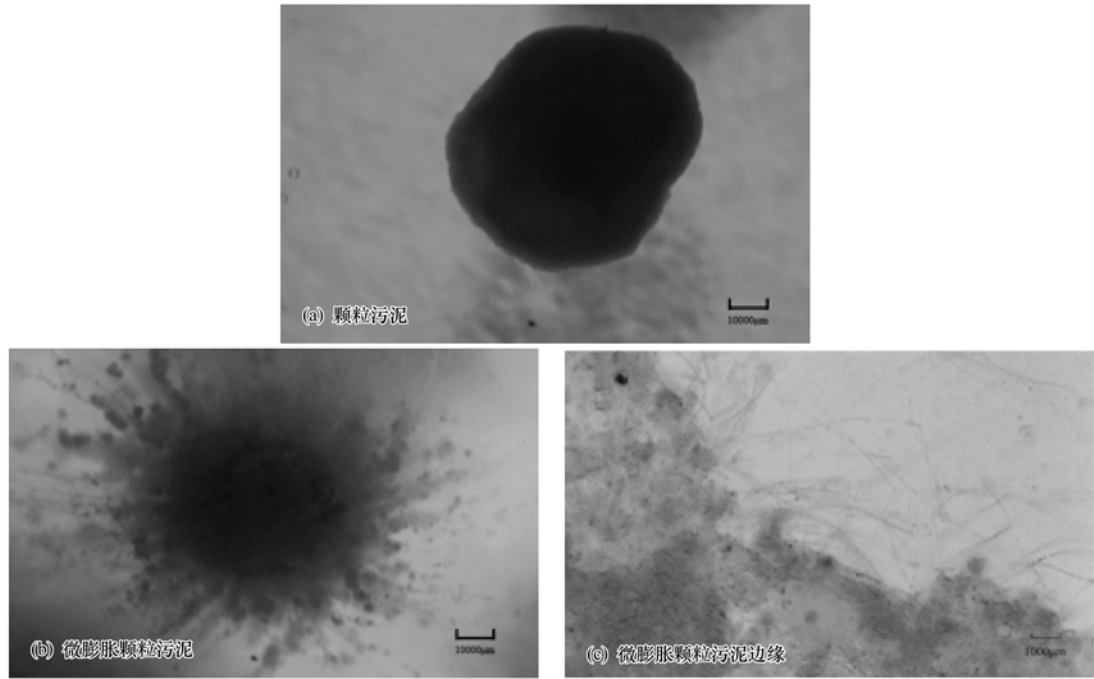


图 3 颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥的显微镜照片

Fig. 3 Microscopy images of the granular sludge and the micro-expanded granular sludge

2.2 微膨胀颗粒污泥污染物去除效能
好氧颗粒污泥没有发生微膨胀时,颗粒污泥对污

染物去除特性良好. 氨氮出水在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,硝酸盐和亚硝酸盐出水都小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是典型的同步

硝化反硝化体系(图4). 污泥 COD 变化见图5. 微膨胀对颗粒污泥氨氮去除量相对影响较大(图6),氨氮去除率由 77.29% 以上下降到 68.29%(表1). 试验中氨氮去除率降低的原因是微膨胀导致硝化反应速率变慢,通过检测典型周期内氨氮的变化情况证实:颗粒污泥的硝化速率为 $38.95 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,微膨胀颗粒污泥的硝化速率为 $33.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$. 颗粒污泥的硝化速率是微膨胀颗粒污泥的 1.16 倍. 微膨胀颗粒污泥在原有的水力停留时间内不能满足硝化反应完全进行.

微膨胀颗粒污泥的 COD 平均去除率为 90.97%,颗粒污泥的 COD 平均去除率为 89.45%(表1). 所以微膨胀颗粒污泥要比没有发生微膨胀

颗粒污泥 COD 去除效果略好,在典型周期内,同一时间点上,微膨胀颗粒污泥降解 COD 的能力要比没有发生微膨胀颗粒污泥降解的要快. 硝化反应结束前,微膨胀颗粒污泥先将 COD 降解完,但随着反应的进行,二者的出水 COD 数值越来越接近. 也可以说颗粒污泥发生微膨胀对 COD 的去除率没有显著影响(图6). 微膨胀颗粒污泥表面有大量的绒毛并呈放射状分布[图3(b)],接触有机物表面积大,网捕能力强,使出水非常清澈. 通过显微镜观察,丝状菌伸出菌胶团外,丝状菌在菌胶团占优势[图3(c)],丝状菌在微膨胀条件下利用菌丝摄取 DO 和有机物的能力非常强,可以弥补 DO 降低带来的负面影响.

表 1 没有发生微膨胀颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥污染物去除效能

Table 1 Pollutant removal efficiency of granular sludge with and without micro-expansion				
颗粒污泥类型	COD 去除率/%	氨氮 去除率/%	硝化速率 / $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$	N ₂ O释放速率 / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$
没有发生微膨胀颗粒污泥	89.45	77.29	38.95×10^{-3}	3.63×10^{-3}
微膨胀颗粒污泥	90.97	68.29	33.46×10^{-3}	4.72×10^{-3}

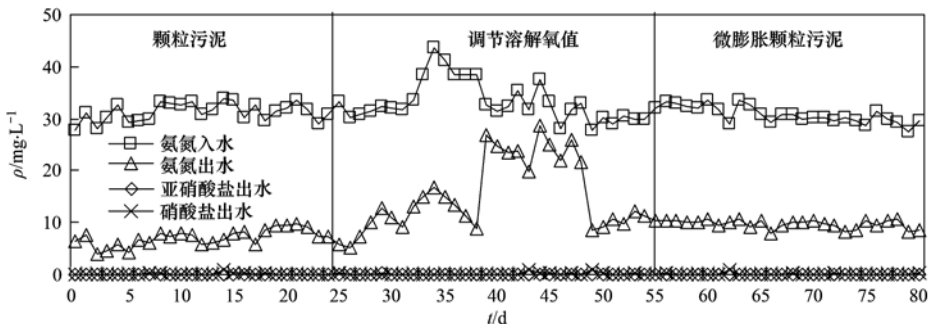


图 4 颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥三氮变化

Fig. 4 Change of three nitrogen forms in granular sludge and micro expansion granular sludge

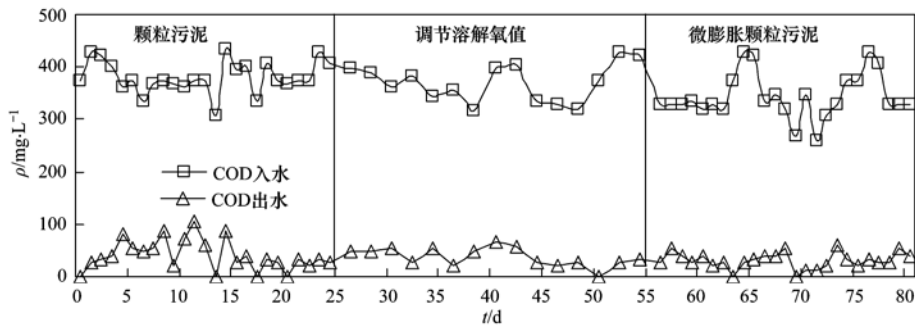


图 5 颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥 COD 变化

Fig. 5 Change of COD in granular sludge and micro expansion granular sludge

2.3 微膨胀颗粒污泥污N₂O产生情况

N₂O产生量并没有随着运行天数的增加而出现差异(图7),体系内的微膨胀颗粒污泥处于相对稳

定状态. 没有发生微膨胀颗粒污泥N₂O产生量为 $1.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,微膨胀颗粒污泥N₂O产生量为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 微膨胀颗粒污泥是颗粒污泥N₂O产生量的

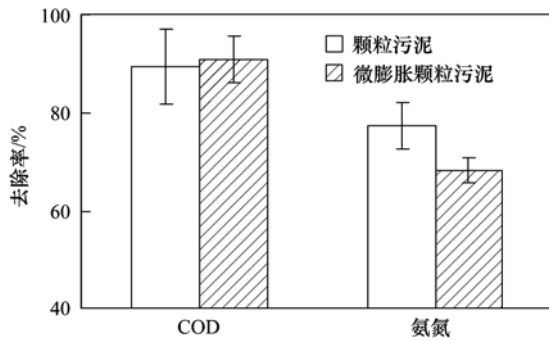


图6 颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥氨氮和 COD 去除率比较

Fig. 6 Comparison of ammonia nitrogen and COD removal rate in granular sludge and micro-expanded granular sludge

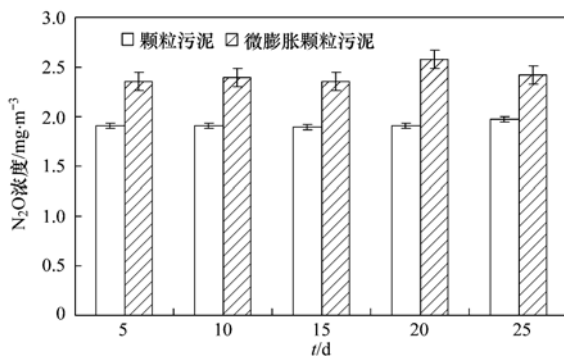


图7 颗粒污泥和微膨胀颗粒污泥N₂O产生量

Fig. 7 N₂O production in granular sludge and micro-expanded granular sludge

1.26 倍,微膨胀颗粒污泥要比没有发生微膨胀颗粒污泥N₂O产生量高.微膨胀对颗粒污泥N₂O释放速率影响很大,没有发生微膨胀颗粒污泥N₂O释放速率为 $3.63 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$;微膨胀颗粒污泥N₂O释放速率为 $4.72 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ (表1).微膨胀颗粒污泥是颗粒污泥N₂O释放速率的1.30倍,微膨胀促进了N₂O释放速率加快.

微膨胀颗粒污泥要比没有发生微膨胀颗粒污泥N₂O产生量高.一方面,微膨胀促进了N₂O产生量升高,因为微膨胀颗粒污泥在低DO条件下运行,DO浓度对N₂O的产生与释放有重要的影响,有报道称DO浓度较低时N₂O释放速率加快^[6],主要原因是两分子NOH聚合脱水后生成N₂O,使N₂O产生量增大^[7].而没有发生微膨胀的好氧颗粒污泥是在相对较高DO浓度($4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下运行的,体系的N₂O产生量较低.另一方面,微膨胀颗粒污泥硝化速率低于没有发生微膨胀的颗粒污泥,而N₂O通常被认为是不完全硝化作用的产物,主要发生在氨及羟氨的氧化过程中^[22],氨氧化菌在将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的同时,为避免 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在细胞内的积累,氨氧化菌会产生异构亚硝酸盐还原酶,从而利用 NO_2^- 作为电子受体产生N₂O^[23]. Gupta^[24] 研究证实好氧硝化过程微生物会将 NO_3^- 或 NO_2^- 还原成N₂O.在亚硝酸型同步硝化反硝化体系内,氨和羟氨的氧化过程中会有N₂O产生^[25].可见,由于系统的自身特性和微膨胀颗粒污泥的运行条件,都将成为微膨胀颗粒污泥N₂O产生量升高的影响因素.

3 结论

(1)控制低DO在SBR反应器内,经过25d左右的调试运行,获得了微膨胀颗粒污泥,SVI在150~250 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间.微膨胀颗粒污泥对COD去除率略微升高,由89.45%上升90.99%;但是氨氮去除率从77.29%降至68.29%;硝化速率 $38.95 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 降至 $33.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$.没有发生微膨胀颗粒污泥的硝化速率是微膨胀颗粒污泥的1.16倍.

(2)微膨胀对颗粒污泥N₂O产生量造成显著的影响.微膨胀颗粒污泥N₂O产生量为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.微膨胀颗粒污泥是颗粒污泥N₂O产生量的1.26倍.微膨胀颗粒污泥对N₂O释放速率影响很大,微膨胀颗粒污泥N₂O释放速率由 $3.63 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 上升到 $4.72 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$.微膨胀颗粒污泥是颗粒污泥N₂O释放速率的1.30倍.

参考文献:

- [1] Beline F, Martinez J, Chadwick D, *et al.* Factors affecting nitrogen transformations and related nitrous oxide emissions from aerobically treated piggery slurry [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, **73**(3): 235-243.
- [2] Houghton J T, Meiro Filho L G, Callander B A, *et al.* Climate change 1995: The science of climate change; contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
- [3] 徐文彬. 概论N₂O大气浓度演变及其大气化学[J]. *地质地球化学*, 1999, **27**(3): 74-78.
- [4] Delwiche C C. Denitrification, Nitrification, and Atmospheric Nitrous Oxide [M]. New York: John Wiley and Sons, 1981. 1-286.
- [5] 刘秀红, 彭永臻, 马涛, 等. 硝化类型对污水脱氮过程中N₂O产生量的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 633-637.
- [6] 刘秀红, 杨庆, 吴永昌, 等. 不同污水生物脱氮工艺中N₂O释放量及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1940-1947.
- [7] 吴永昌, 彭永臻, 刘秀红, 等. 污水生物脱氮过程中温室气体

- 体 N_2O 的产生与控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(10): 1586-1589.
- [8] 韩雪, 高大文. 不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N_2O 产生量的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 204-208.
- [9] 王赛, 王淑莹, 巩有奎, 等. 同步硝化反硝化工艺中 DO 浓度对 N_2O 产生量的影响[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(1): 33-37.
- [10] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3342-3347.
- [11] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge-a critical review[J]. Water Research, 2004, **38**(4): 793-817.
- [12] Agridiots V, Forster C F, Carliell-Marquet C. Addition of Al and Fe salts during treatment of paper mill effluents to improve activated sludge settlement characteristics [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(15): 2926-2934.
- [13] Wang J B, Chai L H, Zhang Y, *et al.* Microbial ecological model of filamentous bulking and mechanisms[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, **22**(12): 1313-1320.
- [14] 王淑莹, 白璐, 宋乾武, 等. 低氧丝状菌污泥微膨胀节能方法[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(12): 1082-1086.
- [15] 郭建华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能方法在 A/O 中的试验验证[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3348-3352.
- [16] 彭赵旭, 彭永臻, 左金龙, 等. 污泥微膨胀状态下短程硝化的实现[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2309-2314.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.
- [18] Shiskowski D M. Nitrous oxide a powerful greenhouse gas with a wastewater treatment connection [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2007, (18): 1279-1290.
- [19] Kimochi Y, Inamori Y, Mizuochi M, *et al.* Nitrogen removal and N_2O emission in a full-scale domestic wastewater treatment plant with intermittent aeration [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1998, **86**(2): 202-206.
- [20] Kruit J, Hulsbeek J, Visser A. Bulking sludge solved? [J]. Water Science and Technology, 2002, **46**(1-2): 457-464.
- [21] 左金龙, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀污染物去除性能的研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(8): 1345-1349.
- [22] Blackmer A M, Bremner J M, Schmidt E L. Production of nitrous oxide by ammonia-oxidizing chemoautotrophic microorganisms in soil [J]. Applied and Environment Microbiology, 1980, **40**(6): 1060-066.
- [23] Papen H, Renneberg H. Microbial processes involved in emissions of radioactively important trace gases [A]. In: Transactions 14th International Congress of Soil Science [C]. Kyoto, Japan, 1990. 232-237.
- [24] Gupta A B. *Thiosphaera pantotropha*: a sulphur bacterium capable of simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1997, **21**(8): 589-595.
- [25] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **84**(2): 170-178.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人