

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水

袁硯^{1,2}, 李祥^{1,2*}, 周呈^{1,2}, 陈宗姮^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究, 苏州 215009)

摘要: 利用已经启动成功并达到稳定脱氮效能的部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器, 研究碱性印制电路板 (PCB) 废水自养生物脱氮的可行性及运行特性. 结果表明, 将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度维持在 $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经过 80 d 的运行, 一体化反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度降低并稳定在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 脱氮效能最高达到 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 同时出水总氮小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 满足接管排放标准. 一体化反应器内好氧区 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 产生速率最高为 $2.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 厌氧区的厌氧氨氧化菌最高脱氮效能达 $2.91 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 说明各功能菌在相应区域得到稳定地增长. 一体化反应器适用于无机含氮的碱性 PCB 废水自养生物脱氮处理.

关键词: 亚硝化; 厌氧氨氧化; 一体化反应器; PCB 废水; 脱氮效能

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2591-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.07.035

Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor

YUAN Yan^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, ZHOU Cheng^{1,2}, CHEN Zong-heng^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The feasibility and operating characteristics of treatment of printed circuit board (PCB) wastewater by using autotrophic nitrogen removal process in partial nitrification and ANAMMOX integrative reactor were investigated. The reactor had startup successfully and achieved the stable nitrogen removal efficiency. The results showed that, after 80d operation, the nitrogen removal rate increased and was up to $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were decreased and stabilized at $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, when the influent concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ maintained at $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. At the same time, the concentration of total nitrogen was less than $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in effluent, which meet the quality emissions requirements. The $\text{NO}_2^- - \text{N}$ production rate was up to $2.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ by nitrite bacteria in aerobic zone, and the highest nitrogen removal rate was $2.91 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ by ANAMMOX bacteria in anaerobic zone, which illuminated functional bacteria were steadily grown in the corresponding region. The inorganic ammonia in PCB wastewater could be removed by autotrophic nitrogen removal process in nitrification and ANAMMOX integrative reactor.

Key words: partial nitrification; ANAMMOX; integrative reactor; PCB wastewater; nitrogen removal rate

近年来,随着电子行业的迅速发展,线路板的需求量非常旺盛,而印刷线路板 (printed circuit board, PCB) 所产生的废水量也在逐年增加. PCB 废液是一种含有大量氨盐和重金属的无机废水^[1,2]. 即使通过蒸氨等物化手段进行氨水回收,其出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度也要达到 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 运用传统的硝化反硝化工艺处理时硝化过程曝气需要大量的动力消耗,同时需要投加甲醇作为反硝化碳源,处理成本高,处理难度大.

部分亚硝化-厌氧氨氧化作为一种新型的组合物脱氮工艺,具有无需有机物参与,避免脱氮过程产生的二次污染,耗氧量少和耐高盐度的特点而受到广泛关注^[3-5]. 目前,部分亚硝化厌氧氨氧化联合工艺已经成功地运用到垃圾渗滤液^[6,7]、味精废水^[8]、化工废水^[9]等行业高氨废水的处理.

然而,好氧氨氧化菌和厌氧氨氧化菌存在溶解氧、pH 等生理特性方面差异^[10],导致联合运行过程中存在控制难度. 为此本课题组设计了一种新型的亚硝化-厌氧氨氧化一体化装置,实现亚硝化与厌氧氨氧化菌在单一反应器分区培养. 该装置后置亚硝化工艺,利用亚硝化曝气尾气将亚硝化液气升回流至厌氧区,并成功实现了含氨废水的自养生物脱氮处理,脱氮速率最终稳定在 $1.46 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ [11].

收稿日期: 2014-11-14; 修订日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51008202); 江苏省环境保护厅重大项目 (201104); 苏州科技学院基金项目 (XKY201103); 江苏省环境科学与工程重点专业项目; 江苏省特色优势学科二期项目

作者简介: 袁硯 (1983 ~), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水脱氮处理理论及新工艺, E-mail: crystal_331@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

为此,本文将采用此一体化反应器进行碱性 PCB 废液处理,研究一体化反应器处理碱性 PCB 废水的可行性及处理过程中反应器的运行特性,旨在为电子行业含氨的碱性 PCB 废水脱氮处理提供一个新的工艺与装备。

1 材料与方法

1.1 装置与运行条件

亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器由下部直径 100 mm 和上部直径 140 mm 的圆柱形有机玻璃制成,总高度 920 mm,总有效体积 12 L(图 1)。其中下部厌氧区 5.25 L(由污泥流化区 3.67 L,厌氧生物膜区 1.58 L 组成),上部好氧生物膜区 4.43 L,污泥沉淀区 2.32 L。好氧区溶解氧维持在 $0.5 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,由气体转子流量计控制进入的空气流量实现。好氧区曝气后的尾气由三相分离器收集后通过导气管引入气升室,使得好氧区的亚硝化液气升入气升室。亚硝化液在气升室内通过回流管回流至反应器底部的污泥流化区,以满足厌氧氨氧化菌对 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的需求。进水运行方式为连续流,流量由蠕动泵控制。整个反应器的温度控制在 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 由气浴加热控制调节。

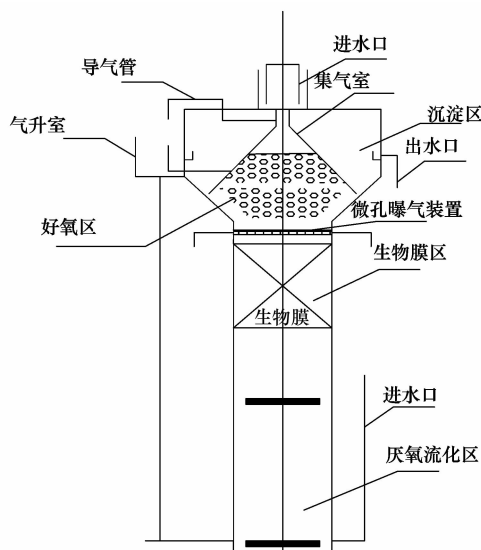


图 1 部分亚硝化厌氧氨氧化一体化反应器

Fig. 1 Schematic diagram of partial nitrification and ANAMMOX integrative reactor

1.2 接种污泥

好氧区接种成熟的亚硝化生物膜,该生物膜最初来源于经过 150 d 左右驯化的亚硝化生物膜反应器^[12],接种量 1.5 L。流化区接种成熟的厌氧氨氧化污泥取自实验室长期运行的厌氧氨氧化种泥反应

器^[13],接种量 1 L。利用人工模拟废水经过 104 d 的运行后,一体化反应器成功实现部分亚硝化-厌氧氨氧化联合脱氮,脱氮速率从 $0.25 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到 $1.46 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.3 废水组成

预处理时,根据前期重金属离子对厌氧氨氧化污泥活性影响的研究^[14],通过投加固体硫化钠形成重金属硫化物,将废水中的 Cu^{2+} 浓度控制在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内。

人工模拟废水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 由 NH_4Cl 提供,同时添加 NaHCO_3 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KHCO_3 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,微量元素 I $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 和微量元素 II $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微量元素浓缩液 I 组分为: EDTA $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 微量元素浓缩液 II 组分为: EDTA $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_4 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

碱性 PCB 废液完全由预处理后的碱性 PCB 废液提供,通过稀释后达到所需浓度,同时添加 NaHCO_3 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KHCO_3 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为碱度和无机碳源,并添加 1/100 生活污水补充微量元素。

1.4 测定项目与方法

水质指标的测定方法均按照文献[15]。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏分光光度法; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 采用 N -(1 萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用离子色谱法; DO 采用梅特勒荧光法在线监测仪; ORP/pH 采用凯美泰克在线监测仪; FISH 采用荧光显微镜(NI-U, nikon, 日本)。

1.5 荧光原位杂交 (FISH) 分析

依照 Isaka 等^[16]的 FISH 步骤对好氧区生物膜和厌氧区污泥进行固定。首先将取出的生物样品放置在新鲜的 4% 多聚甲醛溶液中固定,放置在 4°C 的冰箱中过夜。然后将取出的样品用磷酸缓冲液进行冲洗,接着放置相同体积的乙醇 + PBS (1:1, 质量比) 溶液中。再分别利用不同浓度梯度 (20%、40%、60%、80% 和 100%) 的乙醇对保藏样品进行脱水,最后将样品放置在 -20°C 冰箱中保藏。

杂交过程中运用到 Amx368, NSO190 和 EUB (338、338-II 和 338-III) 这 3 种探针。所有的杂交条

件、冲洗条件和荧光标记均列在表 1 中。所有样品杂交程序依照 Manz 等^[17]介绍的实验步骤进行。将所有样品加上杂交液和探针(浓度 5 ng·mL⁻¹)并将其放置在杂交仪(ThermoBrite, USA)中进行杂交,杂

交温度 46℃,杂交时间 4h。杂交后分别利用 4 倍的冲洗液(含有 20 mmol·L⁻¹ Tris 缓冲液, 0.01% SDS, NaCl 浓度见表 1)和无菌水对其进行冲洗,然后在室温下晾干。最后对其进行镜检。

表 1 FISH 过程杂交探针、杂交液及清洗液浓度

探针	基因序列(5'-3')	杂交生物	染料	浓度		文献
				甲酰胺/%	NaCl/mol·L ⁻¹	
EUB338	GCTGCTCCCGTAGGAGT	大部分微生物				
EUB338-Ⅱ	GCAGCCACCCGTAGGTGT	含 EUB 338 未包含微生物	FITC	40	50	[18,19]
EUB338-Ⅲ	GCTGCCACCCGTAGGTGT	含 EUB 338 未包含微生物				
NSO190	CGATCCCcTGCTTTTCTCC	亚硝化菌	Cy3	55	20	[20]
AMX368	CCTTTCGGGCATTGCGAA	ANAMMOX 菌	AMCA	15	338	[21]

2 结果与分析

2.1 PCB 废水在一体化反应器中氮素转化及去除量变化

在反应器运行的前 6 d 以人工模拟废水进入反应器(图 2),进水 NH₄⁺-N 浓度控制在 300 mg·L⁻¹左右, HRT 控制在 3.6 h, 氮容积负荷达到 1.99 kg·(m³·d)⁻¹。反应器内部分亚硝化与厌氧氨氧化反应实现了很好的联合,出水 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 浓度分别稳定在 50、14.5 和 14 mg·L⁻¹左右,脱氮速率最高达到 1.49 kg·(m³·d)⁻¹。

在反应器运行的第 8 d,废水中的 NH₄⁺-N 完全由碱性 PCB 废液中的 NH₄⁺-N 提供,浓度控制在 210 ~ 220 mg·L⁻¹之间。运行初期,出水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度分别为 41 mg·L⁻¹和 10.2 mg·L⁻¹,基本与模拟废水运行时的出水浓度相同,而 NO₃⁻-N 浓度下降至 7.4 mg·L⁻¹,对应脱氮速率为 1.02 kg·(m³·d)⁻¹。前期的研究表明^[14]进水中适当提高 Cu²⁺ 浓度能够刺激微生物活性,而本反应器内却出

现脱氮效能的下降,分析其原因可能是 PCB 废水具有较高盐度,即使稀释也明显高于模拟废水。Ma 等^[22]研究表明短暂的盐度冲击容易使得厌氧氨氧化污泥脱氮效能降低。因此,出现氮素转化效能下降的现象可能是盐度波动,导致微生物不能及时适应环境所致。

随着反应器的持续运行,氮素在不同区域内的转换能力逐步增强。当反应器运行至 80 d 时,出水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度分别降低并稳定在 4.0 mg·L⁻¹和 9.8 mg·L⁻¹左右,出水 NO₃⁻-N 浓度随着厌氧氨氧化脱氮效能的增加逐渐升高并稳定在 24.1 mg·L⁻¹,同时出水水质满足行业废水总氮小于 50 mg·L⁻¹的接管排放标准。一体化反应器总氮去除速率最高达到 1.29 kg·(m³·d)⁻¹,说明部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器完全能够实现含氨碱性 PCB 废液的自养生物脱氮。

2.2 一体化反应器各功能区域参数及氮素转化效能的变化

部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器各区域环境因子的控制是相应氮素转化微生物高效富集培养的前提。在模拟废水与碱性 PCB 废水切换过程中各区域参数及氮素转化效能如图 3 所示。在反应器运行的前 6 d,好氧区 ORP 维持在 85 mV 左右,温度维持在 27℃,pH 维持在 8.38 左右[图 3(a)]。碱性 PCB 废液替代模拟废水进入后,反应器内的温度仍处于 27℃左右,但是 pH 值出现小幅下降,维持在 7.8 ~ 8.0 之间。同时在不改变进气量的条件下,亚硝化区的 ORP 值随着亚硝化能力下降而上升,处于 100 ~ 110 mV 之间波动。随着厌氧氨氧化菌对 NO₂⁻-N 需求的增加,在反应器运行的 36 d,进气量由 200 L·h⁻¹增加到 250 L·h⁻¹时,反应器 ORP 值进一步升高并稳定在 130 mV 左右。Hellings^[23]研究表明当温度达到

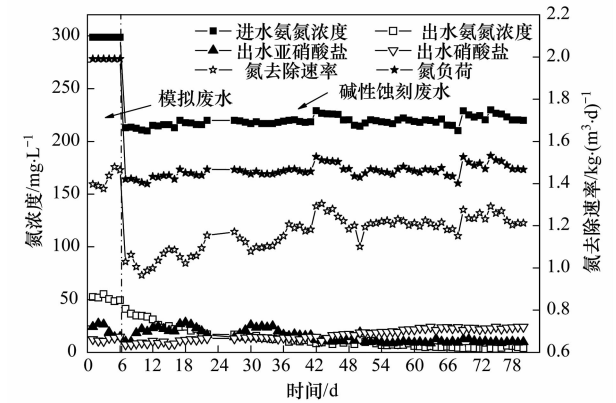


图 2 一体化反应器氮素及脱氮效能变化

Fig. 2 Changes of nitrogen concentration and removal efficiency in integrated reactor

25℃ 以上时, AOB 增长速率大于 NOB, 有利于 AOB 的富集. 邓嫔等^[24]研究表明 ORP 值控制在 60 ~ 75 mV 时能够实现亚硝化反应器的稳定运行. 因此好氧区的环境基本满足亚硝化菌生长的需求. 可能是因为进水中含有充足的 HCO_3^- , 厌氧区 pH 值在不同模拟废水进入后的变化并不大, 基本维持在 7.7 ~ 8.3 之间 [图 3(b)]. 厌氧区的温度也基本维持在 28 ~ 33℃ 之间. 厌氧区 ORP 在更换模拟废水前后一直保持在 -457 ~ -520 mV 之间, 未发生明显变化. 随进气量提升, 虽然气升室亚硝化液回流量明显增加, 但是 ORP 值稳定在 -380 ~ -440 mV 之间, 厌氧区基本处于厌氧状态. 说明厌氧区的环境基本满足厌氧氨氧化的生长环境^[10].

为了考察一体化反应器内好氧区 NO_2^- -N 产生速率与厌氧区厌氧氨氧化脱氮速率的变化. 根据好氧

区和厌氧区参数的变化, 对一体化反应器内的区域反应作如下假设: ① 好氧区存在溶解氧, 所以仅发生亚硝化反应; ② 厌氧区 ORP 一直处于负值, 属于厌氧环境, 所以只存在厌氧氨氧化反应; ③ 忽略好氧区生物膜内部可能发生的微量厌氧氨氧化反应; ④ 忽略厌氧区因微生物死亡及进水携带有机物可能存在的反硝化反应. 根据上述假设计算得到一体化反应器内各区域氮负荷和微生物的氮转化效能. 经过 80 d 的运行, 好氧区 NO_2^- -N 产生速率稳定在 $2.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 对应氮负荷约 $4.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ [图 3(a)]; 厌氧区的脱氮速率稳定在 $2.91 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 对应的氮负荷维持在 $3.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ [图 3(b)]. 说明该类型部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器各功能区域微生物适应碱性 PCB 废水的环境.

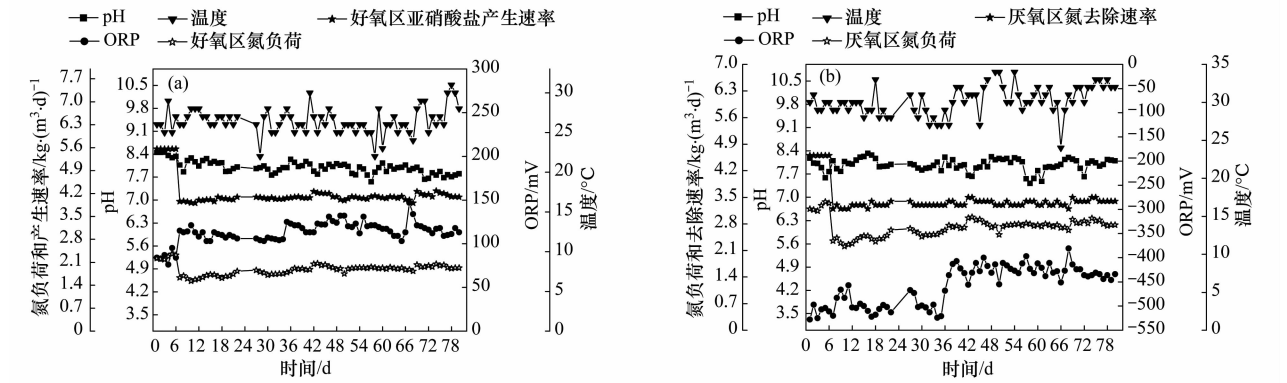


图 3 好氧区亚硝化和厌氧区厌氧氨氧化效能变化
Fig. 3 Changes of nitrification in aerobic zone and ANAMMOX efficiency in anaerobic zone

2.3 碱性 PCB 废水对各区域生物形态的影响

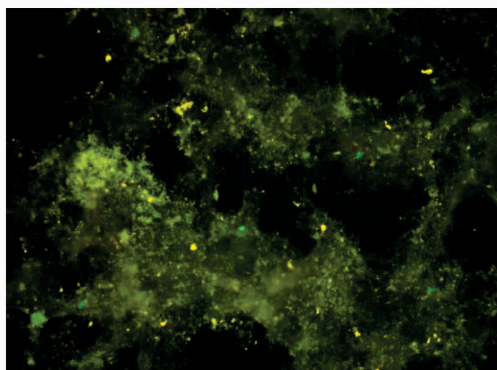
将经过 80 d 运行后的一体化反应器好氧区生物膜和厌氧区的污泥分别进行 FISH 分析, 如图 4 所示. 分别利用全菌探针 (EUB338、EUB 338-II 和 EUB338-III) 和 AOB 探针 (NSO190) 对好氧区生物膜进行标记; 利用全菌探针 (EUB338、EUB 338-II 和 EUB338-III) 和 ANAMMOX 菌探针 (AMX368) 对厌氧区颗粒污泥进行标记. 全菌探针采用 FITC 染料, 荧光激发后为绿色. 而 AOB 探针和 ANAMMOX 菌探针分别采用 Cy3 和 AMCA 探针, 荧光激发后为红色. 亚硝化生物膜污泥中绿色占极少部分 [图 4(a)], 大部分区域为黄色 (绿色与红色复合后的颜色), 说明好氧区的亚硝化生物膜中微生物基本以 AOB 群为主. 好氧区含有少量的其它菌种, 可能是厌氧区一些絮状厌氧氨氧化污泥上浮所致.

厌氧区的 FISH 结果大部分区域显示为黄色

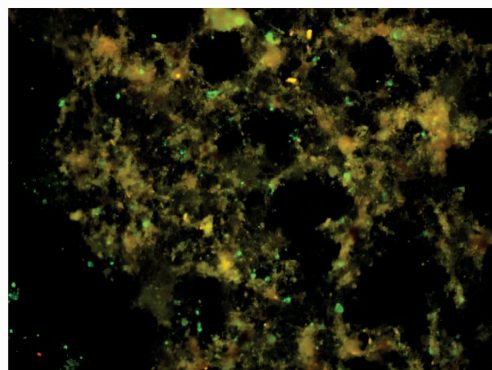
[图 4(b)], 绿色占极少部分, 说明厌氧区的微生物基本以 ANAMMOX 菌群为主, 同时亚硝化区回流携带的微生物未对厌氧区 ANAMMOX 菌富集培养产生影响. 从 FISH 分析进一步说明一体化反应器好氧区和厌氧区的环境十分适宜相应功能的 AOB 和 ANAMMOX 菌生长.

2.4 部分亚硝化厌氧氨氧化联合工艺在高氨氮废水处理中的优越性

目前, 应用于实际含氨废水处理的部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的组合形式有两种, 一种是两步式, 即将亚硝化反应与厌氧氨氧化反应分别放置在两个反应器中, 通过串联实现其工艺的联合; 另一种是一步式, 即将亚硝化反应与厌氧氨氧化反应放置在单一反应器内, 通过限氧等控制参数的调控实现其协同脱氮. Takaaki 等^[25]采用 SBR + UASB 反应器串联成功实现部分亚硝化-厌氧氨氧化反应



(a) 好氧区生物膜



(b) 厌氧区污泥

图 4 好氧区生物膜和厌氧区颗粒污泥生物群落分布

Fig. 4 Distribution of biological community in aerobic zone of biofilm and in anaerobic zone of granular sludge

的联合,并将其运用于电子行业半导体废水处理,经过长期运行后,亚硝化反应器亚硝酸盐转化速率最高达到 $0.48 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,厌氧氨氧化反应器脱氮速率最高达到 $3.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 但是其在运行过程中需要添加大量酸碱用于调节各个单元的 pH 值,控制过程复杂,控制难度增加. Lackner 等^[26]对运用到工业化的众多部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺调查后发现由于 pH 值波动导致脱氮效能恶化概率达到 30%. 同时亚硝化区因硝化细菌生长导致亚硝化很难长期稳定运行.

Daverey 等^[27]采用 SBR 一步式反应器通过限制溶解氧成功实现部分亚硝化-厌氧氨氧化反应的联合,并将其运用于电子行业废水处理,经过近 500 d 的运行,反应器脱氮速率达到 $0.82 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 在运行过程中发现虽然控制溶解氧会成功实现部分亚硝化反应,但是亚硝化率过低限制着整体工艺的脱氮效能,而过高的溶解氧又会对厌氧氨氧化菌产生抑制. Gilbert 等^[28]在研究过程中也发现过低的亚硝化效能是限制一步式反应器脱氮效能的主要问题. 因此在一步式反应器内存在厌氧氨氧化菌和亚硝化菌对溶解氧需求的矛盾,易导致两个反应受到相互牵制,很难充分发挥各自微生物的功能.

本实验采用的亚硝化-厌氧氨氧化一体化装置是一种介于一步式工艺和两步式工艺之间的反应器. 该反应器将好氧区与厌氧区置于同一个反应器的不同区域,既避免亚硝化区曝气过程的剩余溶解氧对厌氧氨氧化菌的影响,同时又通过气升装置实现了亚硝化反应与厌氧氨氧化反应的串联. 利用启动成功的一体化反应器处理碱性 PCB 废水,经过 80 d 的运行,脱氮速率达到 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 表明该反应器完全能够运用于 PCB 废水的处理. 同时该

工艺在运行过程中仅需要鼓风机和运行泵,无需其他设备和动力消耗,极大地降低废水处理成本.

3 结论

(1) 利用启动成功的亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器处理碱性 PCB 废水,经过 80d 运行,好氧区 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 产生速率最高为 $2.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,厌氧区厌氧氨氧化菌最高脱氮速率为 $2.91 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,一体化反应器脱氮速率由启动初期的 $1.02 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,出水总氮小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,满足该行业废水的接管排放要求.

(2) 利用 FISH 对好氧区生物膜和厌氧区污泥分析进一步表明好氧区微生物以亚硝化菌为主,厌氧区微生物以厌氧氨氧化菌为主,各功能菌在相应区域得到稳定地增长.

参考文献:

- [1] 林锋,陆朝阳,周辰,等. PCB 废水分类处理技术研究现状[J]. 印制电路信息, 2013, (10): 67-70.
- [2] 蒋毅民,何星存,慕光杉. 含铜印刷电路板废水的处理及综合利用[J]. 环境工程, 1998, 5: 103-104.
- [3] Zhang J B, Zhou J, Han Y, *et al.* Start-up and bacterial communities of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) for treatment of high strength ammonia wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **169**: 652-657.
- [4] Kosari S F, Rezania B, Lo K V, *et al.* Operational strategy for nitrogen removal from centrate in a two-stage partial nitrification-anammox process [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35** (9): 1110-1120.
- [5] Kimura Y, Itokawa H, Noto K, *et al.* Stability of autotrophic nitrogen removal system under four non-steady operations [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **137**: 196-201.
- [6] Liang Z, Liu J X. Landfill leachate treatment with a novel process: Anaerobic ammonium oxidation (Anammox) combined

with soil infiltration system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **151**(1): 202-212.

[7] Liu J, Zuo J E, Yang Y, *et al.* An autotrophic nitrogen removal process: Short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(5): 777-783.

[8] Chen X L, Zheng P, Jin R C, *et al.* Biological nitrogen removal from monosodium glutamate-containing industrial wastewater with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(5): 747-752.

[9] Tang C J, Zheng P, Chen T T, *et al.* Enhanced nitrogen removal from pharmaceutical wastewater using SBA-ANAMMOX process [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 201-210.

[10] 周呈, 黄勇, 李祥. 部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺处理高氨氮废水研究进展 [J]. 水处理技术, 2014, **40**(4): 11-15.

[11] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 基于竖流式一体化反应器实现自养生物脱氮研究 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1471-1477.

[12] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 厌氧氨氧化前置亚硝化反应器启动及稳定研究 [J]. 水处理技术, 2013, **39**(7): 96-99.

[13] 李祥, 黄勇, 袁怡, 等. 高脱氮效能厌氧氨氧化反应器颗粒污泥特性及控制研究 [J]. 高校化学工程学报, 2013, **27**(6): 1078-1083.

[14] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 铜、锌离子对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 924-929.

[15] 国家环境保护局. 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. 258-282.

[16] Isaka K, Date Y, Sumino T, *et al.* Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **76**(6): 1457-1465.

[17] Manz W, Amann R, Ludwig W, *et al.* Phylogenetic oligodeoxynucleotide probes for the major subclasses of proteobacteria: problems and solutions [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1992, **15**(4): 593-600.

[18] Amann R I, Binder B J, Olson R J, *et al.* Combination of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations [J]. Applied Environmental Microbiology, 1990, **56**(6): 1919-1925.

[19] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB338 is insufficient for the detection of all bacteria: development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1999, **22**(3): 434-444.

[20] Mobarry B K, Wagner M J, Urbain V, *et al.* Phylogenetic probes for analyzing abundance and spatial organization of nitrifying bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(6): 2156-2162.

[21] Egli K, Langer C, Siegrist H R, *et al.* Community analysis of ammonia and nitrite oxidizers during start-up of nitrification reactors [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(6): 3213-3222.

[22] Ma C, Jin R C, Yang G F, *et al.* Impacts of transient salinity shock loads on Anammox process performance [J]. Bioresource Technology, 2012, **112**: 124-130.

[23] Hellenga C. The SHARON process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater [J]. 1998, Water Science and Technology, **37**(9): 135-142.

[24] 邓嫔, 李小明, 杨麒, 等. pH 控制生物膜移动床反应器完全亚硝化的研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1720-1725.

[25] Takaaki T, Hideyo Y, Sosuke N, *et al.* Application of the nitrification and anammox process into inorganic nitrogenous wastewater from semiconductor factory [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, **137**(2): 146-154.

[26] Lackner S, Gilbert E M, Siegfried E V, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.

[27] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al.* Partial nitrification and anammox process: A method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment [J]. Water Research, 2013, **47**(9): 2929-2937.

[28] Gilbert E M, Müller E, Horn H, *et al.* Microbial activity of suspended biomass from a nitrification-anammox SBR in dependence of operational condition and size fraction [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(19): 8795-8804.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	LI Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> -tert-Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行