

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圻, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究

孙洪伟^{1,2}, 郭英¹, 彭永臻²

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要:以实际高氨氮垃圾渗滤液为研究对象,考察了单级 UASB-SBR 生化系统除有机物和脱氮特性,重点研究了常、低温条件下,该生化系统生物脱氮的长期稳定性. 623 d 的实验结果表明,基于 UASB 反应器内高效的反硝化和厌氧产甲烷联合去除机制,以及 SBR 反应器内几乎 100% 的硝化和反硝化,在进水 COD 浓度为 1 000 ~ 13 800 mg·L⁻¹ 条件下,最终出水 COD 浓度为 150 ~ 1 234 mg·L⁻¹,在进水 NH₄⁺-N 浓度为 574 ~ 2 360 mg·L⁻¹ 条件下,最终出水 NH₄⁺-N 小于 10 mg·L⁻¹,平均去除率分别在 90% 和 98% 以上,尤其是获得了 99.2% 的 TN 去除率,出水 TN 小于 30 mg·L⁻¹,实现垃圾渗滤液内有机物和氮的高效、深度去除. 整个实验期间, SBR 反应器实现并维持了稳定的生物硝化和反硝化,成功跨越 2 个冬季, 15℃ 以下共计 171 d,最低温度为 10.2℃.

关键词:垃圾渗滤液; 单级 UASB-SBR; 生物脱氮; 低温

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0221-06

Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate

SUN Hong-wei^{1,2}, GUO Ying¹, PENG Yong-zhen²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The long-term stability of nitrogen removal from municipal landfill with high ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) content was investigated by using a biological system consisting of a first-stage up-flow anaerobic sludge bed (UASB) and sequencing batch reactor (SBR) under normal and low temperature conditions. The 623 days experimental results clearly showed: the efficient denitrification and methanogenesis were conducted in a same UASB reactor, and almost 100% of denitrification was obtained, when feed COD concentration ranged from 1 000 mg·L⁻¹ to 13 800 mg·L⁻¹, effluent COD concentration was between 150 mg·L⁻¹ and 1 234 mg·L⁻¹, and when the influent ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) changed from 574 mg·L⁻¹ to 2 360 mg·L⁻¹, the effluent NH₄⁺-N was below 10 mg·L⁻¹, the removal efficiency reached 90% and 98%, respectively. Especially, above 99.2% removal efficiency of TN was obtained, and effluent TN concentration was below 30 mg·L⁻¹, advanced and efficient nitrogen and organic removal were achieved in the biological system. Furthermore, stable nitrification and denitrification were achieved during the entire experiment period, especially, were maintained successfully for 171 days at the temperature below 15℃ and the lowest temperature of 10.2℃ during two winters.

Key words: landfill leachate; first-stage UASB-SBR; biological nitrogen removal; low temperature

垃圾填埋场渗滤液是一种成分复杂、污染程度很高的有机废水,其中高氨氮、高有机物和营养元素比例失调等独特的水质特点使渗滤液难于处理^[1]. 由于生物脱氮可实现真正意义的氮去除,而非“污染转嫁”,因此生物法是目前处理垃圾渗滤液应用最广泛的方法^[2~4]. 研究表明,厌氧-好氧组合工艺可以同时去除渗滤液中有有机物与氨氮,并且在厌氧反应器内可实现同步反硝化和产甲烷,以强化有机物和氮的去除. 因此,该工艺成为目前渗滤液生物处理的主导工艺^[5~7].

由于渗滤液内的高氨氮所形成的游离氨(FA)对硝化菌活性产生抑制作用,使硝化作用无法

进行^[8,9]. 同时,硝化反硝化作用受温度的影响较大,当温度低于 15℃ 时,硝化、反硝化速率明显降低,当温度 10℃ 以下时,反硝化作用将停止^[10,11]. 鉴于上述原因,本实验针对实际垃圾填埋场渗滤液,采用单级 UASB-SBR 生化系统进行处理,基于 623 d 的连续实验,考察系统在常、低温条件下的去有机物和除氮特性,力求实现高氨氮和有机物的同步、

收稿日期: 2013-03-28; 修订日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168028); 甘肃省青年基金计划项目(1107RJYA279); 兰州交通大学大学生实验创新计划项目(201078)

作者简介: 孙洪伟(1976~),男,博士,副教授,主要研究方向为污水生物处理及过程控制, E-mail: shw@emails.bjtu.edu.cn

深度去除,同时考察 SBR 系统内氮的转化规律.

1 材料及方法

1.1 实验用水来源与水质特性

本研究所采用的垃圾渗滤液取自北京六里屯垃

圾填埋场,其水质特征见表 1.

1.2 接种污泥

UASB 接种厌氧颗粒污泥取自哈尔滨啤酒废水处理厂, SBR 接种污泥取自本实验室处理生活污水氧化沟内具有良好脱氮活性的污泥,浓度为 $2\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

表 1 渗滤液水质特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Characteristics of landfill leachate/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

物理指标	数值	有机物指标	数值	氮指标	数值
pH	7.1~8.5	COD	2 000~22 500	TN	838~2 500
TS	2 300~5 800	BOD ₅	1 500~12 000	NH ₄ ⁺ -N	650~2 400
TSS	1 500~3 200	TOC	3 100~3 700	NO ₃ ⁻ -N	1.2~5.4
碱度	8 000~11 000	IC	318~237	NO ₂ ⁻ -N	1.0~2.6

1.3 实验装置及运行方式

采用 UASB-SBR 生化系统处理垃圾填埋场渗滤液,实验装置如图 1 所示.

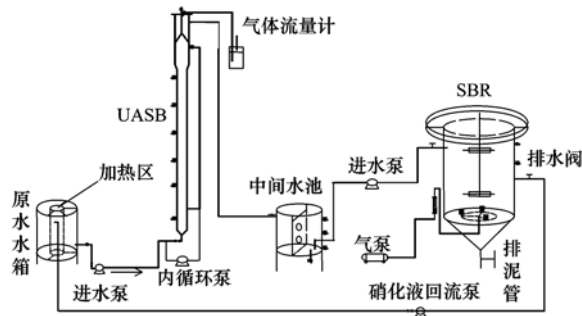


图 1 单级 UASB-SBR 生化系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the first-stage UASB-SBR biological system

原水箱由不锈钢制成,容积为 50 L,水箱中间为容积 10 L 的水浴加热区. UASB 反应器的材质为有机玻璃,有效容积为 1.5 L. SBR 反应器由有机玻璃构成,有效容积为 12 L,采用鼓风曝气, SBR 在室温下运行. 渗滤液从原水箱通过蠕动泵与回流的 SBR 硝化出水一起进入 UASB 反应器,进行缺氧、

厌氧反应. 经 UASB 处理的渗滤液进入 SBR,完成生物脱氮的硝化-反硝化反应及残余有机物的去除. SBR 运行模式:静态进水→曝气反应→静沉→硝化上清液回流→缺氧搅拌(投加碳源)→静沉、排水.

1.4 水样测定方法

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、COD 和碱度等水质指标均采用国家规定的标准方法^[12]. TN 通过 TN 分析仪(Multi N/C3000,德国耶拿)测定. 采用 WTW 测定仪及相应探针监测液相内 DO、ORP、pH 值.

1.5 实验运行条件

本实验共运行 623 d,分 4 个阶段, I 为实验启动阶段, II~IV 为稳定运行阶段. 实验运行条件如表 2 所示. SBR 运行参数:进水 2 min,曝气和缺氧搅拌反应时间采用 DO、ORP、pH 仪实时控制,静沉、硝化上清液回流 30 min,静沉、排水 30 min. 溶解氧(DO)浓度为 $1.0\sim2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SBR 反硝化阶段不进行曝气,只进行缺氧搅拌,因此 DO 浓度始终小于 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 污泥浓度(MLSS) $2\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥龄(SRT)30 d, 温度 $10.4\sim32.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. UASB 运行参数为: HRT 1 d, MLSS $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, SRT 40 d.

表 2 实验运行条件

Table 2 Operational condition in this experiment

阶段 ¹⁾	天数/d	进水流量/L	回流比	季节温度变化
I (n=115)	0~115	3	2:1	秋季→冬季(21.2~10.9℃)
II (n=124)	116~239	3	3:1	春季→夏季(16.9~31.4℃)
III (n=115)	240~354	3	1:1	秋季→冬季(25.2~10.9℃)
IV (n=267)	355~623	3	3:1 2:1	春季→夏季(13.1~32.1℃) 秋季→冬季(32.1~10.2℃)

1) n 表示样品个数

2 结果与讨论

2.1 垃圾渗滤液内有机物去除的长期稳定性

图 2 为单级 UASB-SBR 生化系统对渗滤液内有

机物去除的长期稳定性. 阶段 I,采用逐步提高 UASB 进水有机负荷的方式运行,通过将垃圾渗滤液用自来水分别按 5:1(0~26 d)、4:1(27~58 d)、3:1(59~74 d)、1.5:1(75~96 d)和不稀释(97~

115 d) 来运行, 相应的进水有机负荷(以 COD 计, 下同) 分别为 4.45、5.81、8.67、9.24 和 11.95 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 经过 115 d 的运行, 系统对有机物的去除率在 90% 以上, 最终出水 COD 小于 390 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统启动成功. 此后运行过程中, 由于原渗滤液的特性不同, 导致进水 COD 出现了较大的波动. 实验期间, 进水 COD 介于 1 000 ~ 13 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 出水 COD 浓度为 150.1 ~ 1 234 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率在 90% 以上. UASB 反应器的进水负荷在 1.0 ~ 13.8 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围内波动,

平均值为 5.92 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 4 个阶段的最终出水 COD 平均值分别为 201、315、364 和 387 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实现了有机物深度去除. 需要指出的是, 原渗滤液中有有机物的去除主要在 UASB 反应器内(反硝化作用和厌氧生物降解)完成的, SBR 实现了 UASB 出水中有机物的深度去除. 由于 UASB 反应器的效能和进水有机负荷关系较大, 当原渗滤液有机物浓度较高时, UASB 反应器的效能越高, 反之当进水 COD 较低时, UASB 反应器的效能越低.

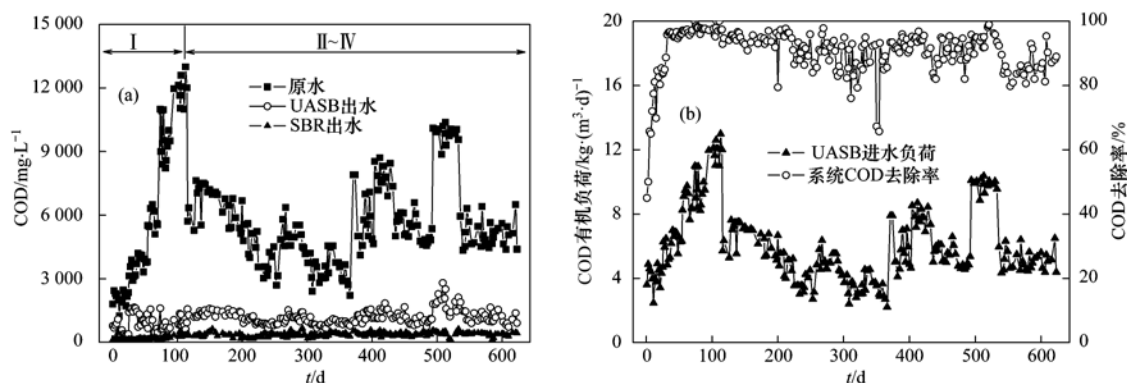


图2 UASB-SBR 生化系统对渗滤液内有机物去除的长期稳定性

Fig. 2 Long-term stability of COD removal in the UASB-SBR biological system

2.2 垃圾渗滤液内氨氮去除的长期稳定性

图3为氨氮在单级 UASB-SBR 生化系统内的去除情况. 在阶段 I, 系统处于启动过程, 随着原水稀释比例的逐渐减小, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐增加. 启动过程, 在 4 种条件下, UASB 的进水有机负荷(以 N 计) 分别为 0.33、0.44、0.63 和 0.91 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 从第 97 d 开始, 原渗滤液直接进入反应器, 运行至 115 d, 系统获得了稳定的氮去除效果, 至此完成了实验启动. 在以后的运行过程中, 阶段 II 和 IV 阶段的原渗滤液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高, 平均值

分别为 1 927 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1 789.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于较为典型的晚期垃圾渗滤液. 阶段 III, 原渗滤液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低, 平均值为 906 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于早期渗滤液.

从图 3(a) 还可看出, 相对于原渗滤液, UASB 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度有了较大程度的降低, 这是由于 SBR 硝化液回流稀释作用, 而非生物降解作用. 整个实验期间, SBR 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度稳定在 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 这也是系统的最终出水, 因此, 单级 UASB-SBR 系统获得了稳定的氮去除.

图 3(b) 为 SBR 系统内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率和温度的

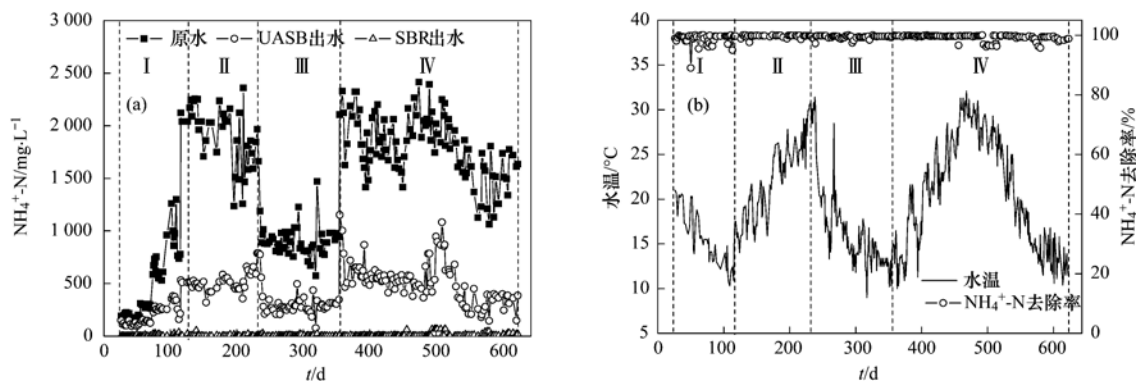


图3 单级 UASB-SBR 生化系统对渗滤液内氨氮去除的长期稳定性

Fig. 3 Long-term stability of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal in the UASB-SBR biological system

变化关系图. 整个实验期间, 由于 SBR 反应器在室温条件下运行, 季节的更替导致了 SBR 内水温的不断变化. 对于硝化反应, 文献报道适宜温度范围为 20 ~ 30℃, 一般温度低于 15℃ 时, 硝化速率明显降低, 硝化反应受到明显抑制. 本实验过程中, 温度波动较大, 最高为 32.1℃, 最低为 10.2℃ 左右, 系统在较长期的低温条件下运行, 其中 15℃ 的运行天数共计为 171 d, 但 SBR 系统仍然维持了几乎为 100% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率, 并且硝化速率并未受到明显影响.

2.3 系统内有机物和氮的物料衡算

表 3 为整个实验期间, 生化系统内 UASB 和 SBR 单元内有机物和氮的物料衡算关系. 由此可知, 不同的运行阶段, 由于进水 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度差异较大, 因此去除机制也不尽相同. 在阶段 I 和 III, 进水 COD 浓度较高, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低时, 渗滤液内的有机物主要通过 UASB 内的厌氧产甲烷作用去除, UASB 内

的反硝化和 SBR 的硝化作用去除贡献为 20% 左右. 在阶段 II 和 IV, 进水 COD 浓度较低, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高时, 渗滤液内的有机物主要通过 UASB 内的反硝化作用去除, UASB 内的厌氧产甲烷作用和 SBR 的硝化作用去除贡献约为 20% 左右.

此外, 对于渗滤液内的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 主要通过 SBR 的好氧硝化作用去除, 贡献率为 95% 以上. UASB 反应器内去除少量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 应为微生物的同化作用利用. 对于渗滤液内的 TN 去除, 主要在 UASB 和 SBR 反应器内完成, 两者贡献大小主要取决于 SBR 硝化液的回流比. 当回流比较大时, UASB 作为 TN 去除的主要角色. 当回流比较小时, TN 去除主要在 SBR 内完成. 需要指出的是, SBR 好氧过程, TN 损失是由于系统内存在同步硝化-反硝化作用, 而缺氧过程 TN 去除是因为氧化态氮被还原成氮气, 从系统中逸出.

表 3 生化系统 UASB 和 SBR 单元的有机物和氮的物料衡算关系¹⁾

Table 3 Material balances of COD and nitrogen for UASB and SBR reactor in the system

参数	运行阶段	进、出水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			UASB 去除机制贡献率/%			SBR 去除机制贡献率/%		
		原液	UASB 出水	SBR 出水	硝化液 回流稀释	厌氧 产甲烷	反硝化 作用	泥水混合 液稀释	硝化作用	反硝化 作用
COD	I	6 186	882	201	33	79.5	13.2	33	7.3	—
	II	5 710	980	315	75	18.7	78.9	33	2.4	—
	III	4 185	1 202	364	50	82.7	13.3	33	4.0	—
	IV	6 685	1 252	395	75	20.5	74.5	33	5.0	—
		5 137	1 180	385	33	53.0	45.5	33	1.5	—
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	I	491	160	6.4	33	—	7.1	33	92.9	—
	II	1 863	461	7.5	75	—	3.1	33	96.9	—
	III	899	445	5.1	50	—	3.0	33	97.0	—
	IV	1 930	475	11.8	75	—	4.5	33	95.5	—
		1 521	502	15.9	33	—	2.9	33	97.1	—
TN	I	536	172	25.6	33	—	51.8	33	22.2	25.9
	II	2 134	527	30.5	75	—	63.2	33	15.8	21.0
	III	1 146	552	15.6	50	—	41.1	33	17.8	41.1
	IV	2 260	546	20.4	75	—	64.4	33	14.2	21.4
		1 830	502	30.5	33	—	59.1	33	11.3	29.6

1) 表中数值为每阶段系统运行的平均值

2.4 低温条件下 SBR 系统深度脱氮

图 4 为低温条件下 SBR 内氮的转化规律. 在温度分别为 14.9、11.05、17.1 和 13.4℃ 条件下, 获得了充分的全程生物脱氮[图 4(a)、4(b)]和短程生物脱氮[图 4(c)、4(d)]. 对于全程生物脱氮, 2 种温度下出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 0.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 分别为 4.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 16.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实现了深度脱氮. 即使在 11.05℃ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率仍高达 99.8% 和 86.7%. 需要指出, 反硝化过程中出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累, 积累浓度分

别为 21.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 34.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这种现象已被观察到^[13,14], 认为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的还原速率低于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原速率是主要原因.

对于短程生物脱氮, 2 种温度条件下, SBR 实现了充分短程硝化. 在硝化过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降低, 相应地 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 上升. 硝化过程 TN 损失了约 17.6% ~ 5.2%, 可认为是同步硝化反硝化作用. 硝化结束时, SBR 内亚硝积累率分别为 96.7% 和 96.8%, 维持了稳定的短程硝化. 反硝化过程中, 随着 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的迅速还原, TN 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不断降低. 2 种温度下,

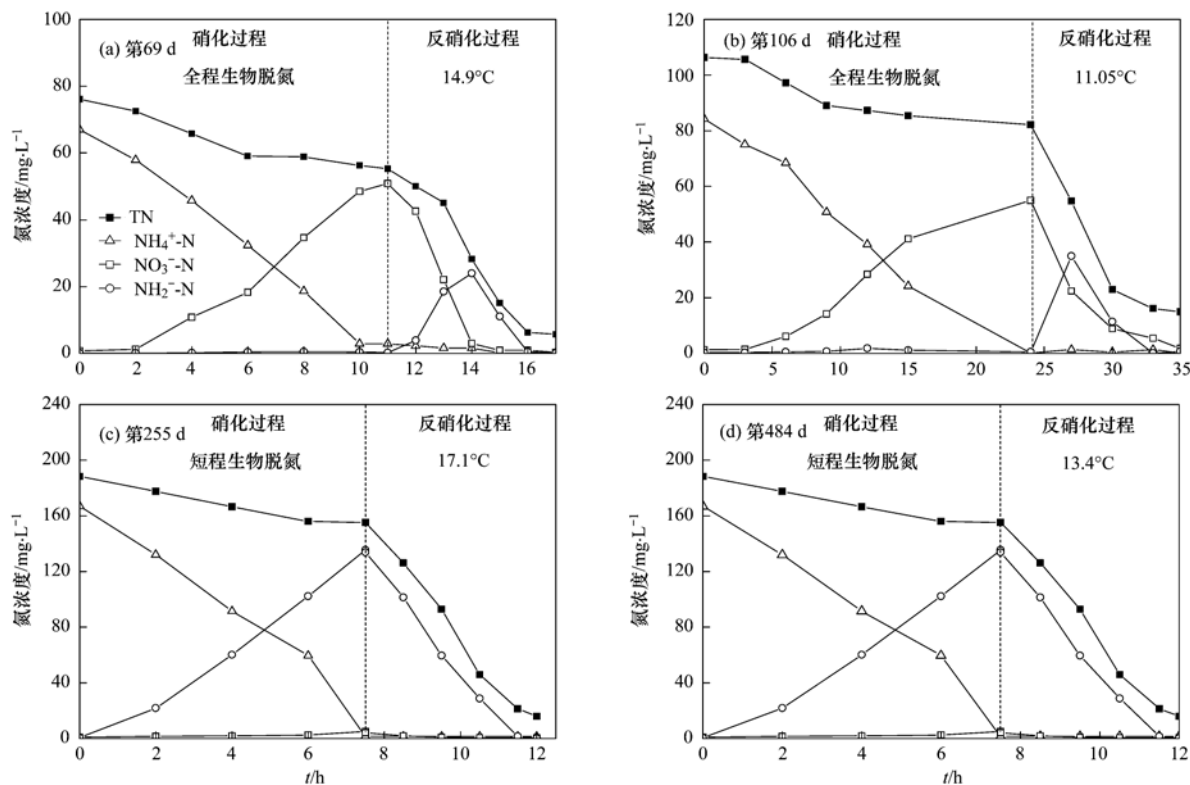
图4 低温条件下,SBR 典型周期内 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的变化规律

Fig. 4 Typical variations of nitrogen concentration in the SBR at low temperature

SBR 出水 TN 分别为 $15.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $26.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实现了氮的深度去除。

3 结论

(1) 单级 UASB-SBR 系统可实现渗滤液内高浓度有机物的长期稳定去除, 在进水 COD 为 $1000 \sim 13800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 出水 COD 为 $150 \sim 1234 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率维持在 90% 左右。基于 UASB 内高效的反硝化和厌氧生物降解作用, 去除了原水中大部分有机物, SBR 实现了 UASB 出水中有机物的深度去除。

(2) 单级 UASB-SBR 生化系统实现了长期稳定的氮去除。在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $574 \sim 2360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 小于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率维持在 95% 以上, 实现了氨氮的深度去除。此外, UASB 和 SBR 系统内充分的反硝化为 SBR 硝化过程提供了充足的碱度, 使得硝化反应过程得以顺利进行。

(3) 低温条件下, SBR 系统获得稳定的生物脱氮特性, 成功跨越 2 个冬季, 15°C 以下共计 171 d, 最低温度为 10.2°C 。

参考文献:

[1] 王宝贞, 王琳. 城市固体废物渗滤液处理与处置[M]. 北京:

化学工业出版社, 2005.

- [2] Ahmed F N, Lan C Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review [J]. Desalination, 2012, **287**: 41-54.
- [3] Bilgili M S, Demir A, Akkaya E, et al. COD fractions of leachate from aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **158**(1): 157-163.
- [4] 杨丽琴, 王存政, 代晓娟, 等. ABR-生物接触氧化工艺处理城市生活垃圾渗滤液[J]. 环境工程, 2012, **30**(2): 41-43.
- [5] 张树军, 彭永臻, 曾薇, 等. 高氮城市生活垃圾渗滤液短程生物脱氮[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 751-756.
- [6] Peng Y Z, Zhang S J, Zeng W, et al. Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate [J]. Water Research, 2008, **42**(4-5): 883-892.
- [7] 吴莉娜, 宋燕杰, 刘牡, 等. 两级 UASB-A/O-SBR 工艺深度处理晚期垃圾渗滤液[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(8): 2520-2525.
- [8] Kim D J, Lee D I, Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(3): 459-468.
- [9] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [10] Eddy M. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse [M].

- USA: McGraw-Hill Companies, 2003.
- [11] 叶建锋. 废水生物脱氮处理新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [12] APHA. Standard method for the examination of water and wastewater[M]. (19th ed.). Washington DC: American Public Health Association, 1995.
- [13] Martienssen M, Schöps R. Biological treatment of leachate from solid waste landfill sites-alterations in the bacterial community during the denitrification process [J]. Water Research, 1997, **31**(5): 1164-1170.
- [14] Welander U, Henrysson T, Welander T. Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate in a pilot scale suspended carrier biofilm process [J]. Water Research, 1998, **32**(5): 1564-1570.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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