

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立 ..... 李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)

矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性 ..... 席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)

小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用 ..... 张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)

湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析 ..... 张红, 黄勇, 李莹 (3323)

基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究 ..... 姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)

基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价 ..... 杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)

东海无机氮排海通量年际变化估算 ..... 吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)

海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响 ..... 于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)

北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布 ..... 孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)

湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究 ..... 余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)

降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 ..... 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)

三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)

三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应 ..... 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)

山地城市地表径流源区水质特征监测研究 ..... 李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)

唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究 ..... 张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)

西藏地表水中砷的分布 ..... 王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)

锡林河流域地表水痕量元素的时空分布 ..... 薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)

天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险 ..... 卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)

松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价 ..... 裴海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)

长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 ..... 李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)

烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征 ..... 杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)

黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义 ..... 姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)

含藻水中壬基酚的光降解转化研究 ..... 彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)

硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化橙黄 IV ..... 张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)

Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究 ..... 还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)

曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究 ..... 李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)

以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究 ..... 王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)

光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征 ..... 贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)

短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究 ..... 孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)

CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 ..... 付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)

MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 ..... 曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)

活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究 ..... 袁冬琴, 王毅力 (3522)

有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)

厌氧污泥降解解动力学与生物多样性研究 ..... 曹新垵, 杨琦, 郝春博 (3535)

雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响 ..... 张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)

近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究 ..... 张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)

甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究 ..... 韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)

聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性 ..... 王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)

土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd ..... 汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)

基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速郑州—商丘段为例 ..... 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 马建华 (3577)

生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险 ..... 卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)

沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响 ..... 吴艳阳, 吴群河, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)

阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲑鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究 ..... 唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)

预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响 ..... 梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)

铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究 ..... 张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)

1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究 ..... 王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)

PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究 ..... 史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)

青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 ..... 彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)

华北平原玉米-小麦轮作农田 N<sub>2</sub>O 交换通量的研究 ..... 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)

影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 ..... 王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)

济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究 ..... 刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)

活性炭分解臭氧机制研究 ..... 刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)

大气 O<sub>3</sub> 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响 ..... 王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)

铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 ..... 王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)

锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染 ..... 郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)

《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)

# CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响

付昆明<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 曹相生<sup>2</sup>, 李冬<sup>2</sup>, 孟雪征<sup>2</sup>

(1. 北京建筑工程学院环境与能源工程学院, 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为考察长期运行条件下全程自养脱氮(CANON)反应器的运行效果, 以人工配置无机高氨氮废水为进水, 研究了连续流 CANON 反应器的运行稳定性. CANON 反应器在控制内部温度为  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , pH 7.39~8.01, 水力停留时间 3.7~5.1 h 条件下, 稳定运行超过 1 a, 短程硝化性能与厌氧氨氧化性能均获得稳定, 平均 TN 去除负荷达到  $1.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 平均 TN 去除率为 65.09%, 最大 TN 去除率可达 81.65%. 低温冲击时, 虽然 ANAMMOX 菌与 AOB 都会受到低温的抑制, 但由于 ANAMMOX 菌对低温更加敏感, 受到的抑制更加严重, 因此造成  $\text{NO}_2^-$ -N 严重积累. 温度恢复  $35^{\circ}\text{C}$  后, CANON 反应器性能很快恢复正常, 短暂的低温冲击不会对 CANON 反应器稳定性构成显著影响; 当经历超过  $50^{\circ}\text{C}$  以上的高温冲击时, 尽管 AOB 可在 1 周内恢复正常, 但 ANAMMOX 菌的活性被完全破坏, 使 CANON 反应器彻底崩溃, 应予以避免.

**关键词:** CANON 工艺; 厌氧氨氧化; 短程硝化; 亚硝酸盐; 稳定性; 温度

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)10-3507-06

## Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact

FU Kun-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, CAO Xiang-sheng<sup>2</sup>, LI Dong<sup>2</sup>, MENG Xue-zheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to study long-term effect of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) reactor, performance stability was investigated by using synthetic inorganic ammonia-rich wastewater as raw water with a continuous flow CANON reactor. Both performances of short-cut nitrification and ANAMMOX were stable for more than one year. Under the condition that inner temperature at  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , pH 7.39 and 8.01, and hydraulic retention time 3.7-5.1 h, the average total nitrogen removal load was  $1.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , and the average and maximum total nitrogen removal efficiency were 65.09% and 81.65% respectively. Under sudden low temperature conditions, both ANAMMOX bacteria and AOB were inhibited, however, the ANAMMOX bacteria were inhibited more, which caused highly accumulated nitrite. When temperature increased to  $35^{\circ}\text{C}$  as normal, the performance of CANON reactor recovered soon, which means low temperature impact will have no significant influence on stability. When the temperature reached more than  $50^{\circ}\text{C}$ , the activity of ANAMMOX bacteria was completely destroyed, so high temperature must be avoided, though AOB can recovered to normal in one week.

**Key words:** CANON process; anaerobic ammonia oxidation; short-cut nitrification; nitrite; stability; temperature

CANON (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite) 工艺是在发现厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)的基础上, 与亚硝化结合到一个反应器中的新型工艺<sup>[1]</sup>, 笔者把这个反应器称为 CANON 反应器. 从表观来看,  $\text{NH}_4^+$ -N 被直接氧化成  $\text{N}_2$ , 是一种最简捷的脱氮途径, 且氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)与 ANAMMOX 菌均是自养菌<sup>[2]</sup>, 因此 CANON 工艺具有不消耗有机碳源、节省碱度、降低曝气量、降低污泥产量等优点.

在 CANON 反应器中, 一方面, ANAMMOX 菌是利用亚硝酸盐而非硝酸盐做电子受体来氧化  $\text{NH}_4^+$ <sup>[3]</sup>, 因此, 获取稳定亚硝酸盐积累(即短程硝

化)是 CANON 工艺稳定运行的必要条件, 尽管获取亚硝酸盐积累的方法(包括高游离氨<sup>[4]</sup>、低溶解氧<sup>[5,6]</sup>、温度控制<sup>[7]</sup>)很多, 但除温度控制方式外, 其它方式均有使  $\text{NO}_2^-$ -N 向  $\text{NO}_3^-$ -N 转化的趋势<sup>[8]</sup>; 另一方面, 由于没有外部有机碳源, 内源反硝化脱氮量有限, ANAMMOX 会承载反应器中绝大部分脱氮. 因此, 在研究 CANON 反应器稳定性时, 从短程硝化与 ANAMMOX 两方面考察.

目前, CANON 工艺研究主要仍处于实验室研究

收稿日期: 2011-11-07; 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 北京建筑工程学院校内基金项目(101101402); 国家自然科学基金项目(50878003)

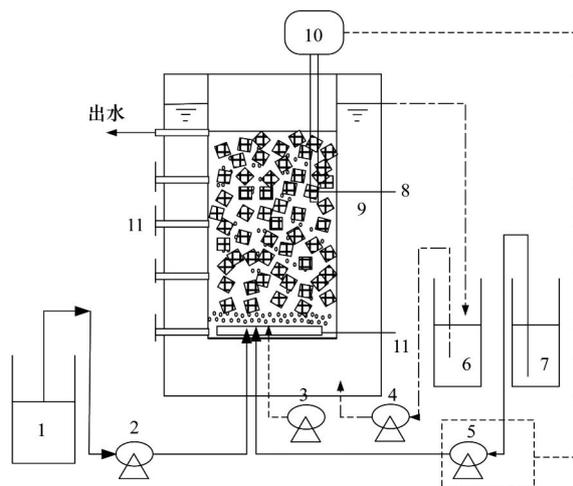
作者简介: 付昆明(1981~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: fukunming@yahoo.com.cn

阶段<sup>[2, 9, 10]</sup>,作者在成功启动 CANON 工艺后,连续运行超过1 a时间,在此期间,除了从上述2个方面外,还考察了低温与高温冲击对 CANON 工艺稳定性的影响,以期为工程应用奠定理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

反应器由有机玻璃制成,总体积为3.85 L,废水由反应器底部进入后,由上部出水口排出,如图1所示。反应器内添加规格为2 cm × 2 cm × 2 cm 海绵填料,载体平均湿密度为1 g·cm<sup>-3</sup>,孔隙率为50%,孔径为2~3 mm。曝气量通过转子流量计调节并计量。反应器内的温度通过水浴夹套中的热水循环进行调节,热水通过 XMT-102 型温度控制仪进行控制,使反应器内的温度控制在35℃ ± 1℃。反应器内 pH 通过 HI 931700 型 pH 控制仪控制在7.39~8.01 之间。



1. 原水; 2. 进水泵; 3. 空气泵; 4. 循环水泵; 5. 加碱泵;  
6. 恒温水箱; 7. 碱液; 8. 填料; 9. 水浴夹套;  
10. pH 控制仪; 11. 取样口

图1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

### 1.2 CANON 反应器启动

CANON 反应器通过接种本实验室 SBR 反应器的普通活性污泥,直接在好氧条件下启动,在启动的整个过程中,以无机高氨氮废水为进水,始终维持曝气状态,没有人为投加亚硝酸盐或接种 ANAMMOX 菌种,首先建立稳定短程硝化,然后成功培养出 ANAMMOX 菌,并于210 d 时达到 TN 去除负荷1.22 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>;对脱落生物膜碎片收集,进行 ANAMMOX 试验,发现消耗的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及产生的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 比例为 1:1.36:0.22<sup>[11]</sup>,与 ANAMMOX

反应理论比值 1:1.32:0.26<sup>[12]</sup> 非常接近,证明反应器中存在 ANAMMOX 反应,标志着反应器启动成功。

### 1.3 试验用水

试验用水采用人工配水,配水由自来水中添加适量的 NH<sub>4</sub>Cl、NaHCO<sub>3</sub>、NaCl 与 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 配置而成,其中, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 300~500 mg·L<sup>-1</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 为 0~10 mg·L<sup>-1</sup>,其来源于少量 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的氧化, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为 3~5 mg·L<sup>-1</sup>,主要来源于自来水自身, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 约为 2 mg·L<sup>-1</sup>, pH 为 7.5~8.5。

### 1.4 试验方法

在绝大部分时间内, CANON 反应器在中温(保持 35℃ ± 1℃)条件下运行,210~300 d 之间,曝气量保持 14~42 m<sup>3</sup>·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> 之间,进水流量为 18 L·d<sup>-1</sup>,相应水力停留时间为 5.1 h; 300 d 以后,曝气量维持相对稳定,约为 1.5~2.0 m<sup>3</sup>·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>,进水流量为 25 L·d<sup>-1</sup>,相应水力停留时间为 3.7 h。在 245 d 与第 491 d 分别进行了 21℃ 与 15℃ 的温度骤降冲击试验,在 548 d 由于设备故障,温度骤升超过 50℃,在此作为破坏性试验,一并研究。

### 1.5 分析项目及检测方法

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂比色法<sup>[13]</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法<sup>[13]</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 麝香草酚分光光度法<sup>[14]</sup>, pH 值: pHTestr 30 型 pH 计; 溶解氧: HI2400 型溶解氧仪; TN 通过下式计算。

$$\text{TN} = \text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$$

## 2 结果与讨论

曝气量与 TN 去除负荷的变化趋势如图 2 所示; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及 TN 的变化情况分别如图 3~6 所示。

### 2.1 正常运行条件下的稳定性

#### 2.1.1 CANON 反应器的运行

由图 2 和图 3 可以看出, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化率与曝气量有很好的相关性,即曝气量增加, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化率增加,反之亦然。

由图 4 可以看出,在 210~271 d,出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 呈现增加趋势,约从 20 mg·L<sup>-1</sup> 上升至 60 mg·L<sup>-1</sup>, 271 d 后,出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度有逐渐回落并稳定在 30 mg·L<sup>-1</sup>; 由图 5 可以看出, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的总体趋势比较稳定,平均出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 28.88 mg·L<sup>-1</sup>; 300 d 后, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均转化率为 76.72%, 最高 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化率为 96.99%; 平均出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 21.81

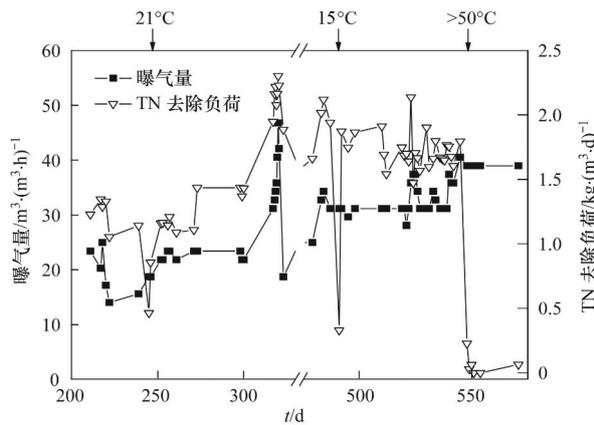


图2 运行过程中曝气量与 TN 去除负荷的变化

Fig. 2 Variations of aeration rate and nitrogen removal load during operation period

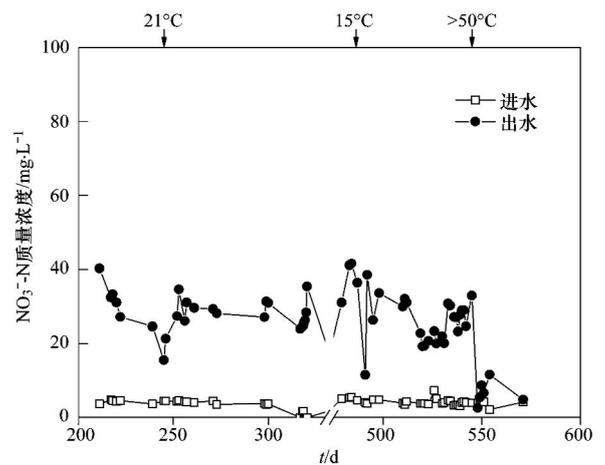
图5 运行过程中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的变化

Fig. 5 Variations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N during operation period

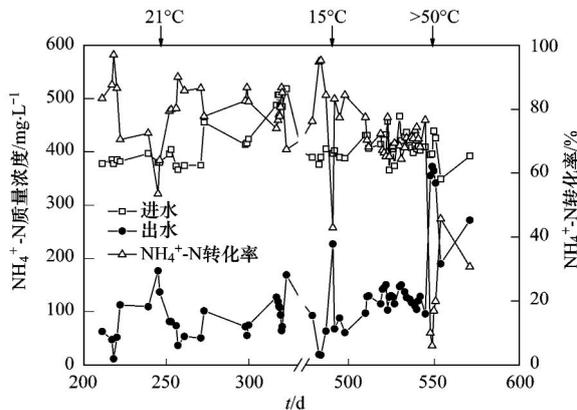
图3 运行过程中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的变化

Fig. 3 Variations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N during operation period

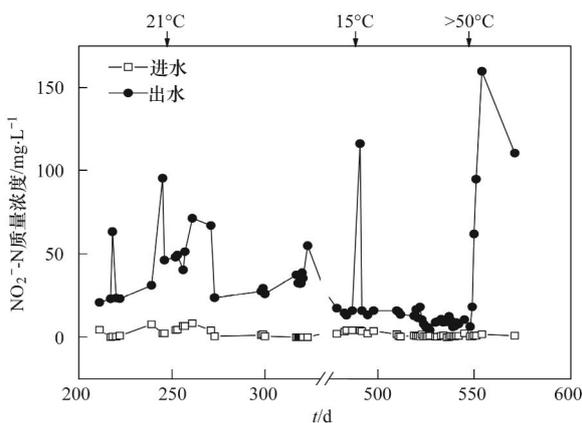
图4 运行过程中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的变化

Fig. 4 Variations of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N during operation period

mg·L<sup>-1</sup>, 平均出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度为 27.62 mg·L<sup>-1</sup>.

### 2.1.2 短程硝化的稳定性

对于只进行亚硝化的反应器而言,一般采用亚硝酸盐积累率( $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_x^- \text{-N}$ )来衡量短程硝

化的效果,但是对于 CANON 反应器而言, AOB 与 ANAMMOX 菌混合在一起,两者同时消耗  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , 且 ANAMMOX 还会消耗  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ , 因此无法用  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_x^- \text{-N}$  来衡量短程硝化的稳定性,而必须找一个新的指标。

在无机高氨氮废水条件下,以  $d(\text{TN})$  表示进出水中 TN 的变化,忽略内源反硝化而导致的 TN 损失,则  $d(\text{TN})$  与 ANAMMOX 作用而产生的  $\text{N}_2$  的量相等;以  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})$  表示进出水中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的变化,它可能包括两方面作用:① ANAMMOX 菌的作用,同化  $\text{CO}_2$  时生成  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ <sup>[15]</sup>, ② 亚硝酸盐氧化细菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 的作用,使  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  被氧化而生成  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ . 若 CANON 反应器中不存在 NOB,则  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})$  稳定,全部源于 ANAMMOX 菌同化  $\text{CO}_2$  时生成  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , 其理论值可根据 ANAMMOX 反应的标准反应式<sup>[16]</sup>中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  与  $\text{N}_2$  的比例为 0.26:1.02 计算,即  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})/d(\text{TN}) = 0.26/(1.02 \times 2) = 0.127$ . 如果反应器中显著出现 NOB,则  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})$  必然增加,而  $d(\text{TN})$  会因 NOB 与 ANAMMOX 菌同时竞争  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  而减少,即  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})/d(\text{TN})$  必然增加,因此,可以通过判断  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})/d(\text{TN})$  与 0.127 的差值来判断 CANON 工艺中短程硝化的稳定性. 如果差值显著大于 0,表明短程硝化不完全,差值越大,短程硝化效果越差。

在整个运行期间(548 ~ 571 d 除外),对实测  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})/d(\text{TN})$  进行统计,发现均低于其理论值 0.127,平均值为 0.09,即  $d(\text{NO}_3^- \text{-N})/d(\text{TN})$  与 0.127 的差值小于 0,表明反应器中 NOB 数量不占

优势,而且存在少量内源反硝化使  $d(\text{NO}_3^- - \text{N})/d(\text{TN})$  与 0.127 的差值  $< 0$ 。上述分析说明,CANON 反应器在  $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , pH 为 7.39 ~ 8.01 之间,水力停留时间为 3.7 ~ 5.1 h 条件下,短程硝化具有良好的稳定性。

### 2.1.3 ANAMMOX 的稳定性

ANAMMOX 的性能主要通过 TN 去除效果反映。由图 2 可以看出,TN 去除负荷与曝气量息息相关,这与作者之前的研究成果<sup>[17]</sup>是相符的,即当不超过极限曝气量时,TN 去除效果随着曝气量的增加而增加。个别例外的情况是,在 218 d,提高曝气量后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  转化率提高至 96%,而 TN 去除率则没有明显的提高,且出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度也突跃至  $63.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,这显示在反应器运行初期,极限曝气量值较小,提高曝气量只能提高反应器的亚硝化水平,而不能提高 ANAMMOX 水平,亚硝化水平与 ANAMMOX 水平的不平衡,造成了出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的大量积累。300 d 之前,平均 TN 去除率为 66% (图 6)。第 300 d 时,TN 去除负荷也由  $1.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  提高至  $1.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,这与进水负荷增加有关。300 d 后, TN 去除负荷始终维持在  $1.6$

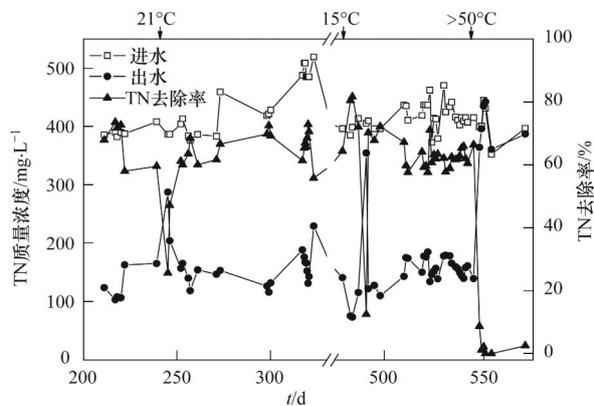


图 6 运行过程中 TN 的变化

Fig. 6 Variations of TN during operation period

表 1 不同低温冲击对 ANAMMOX 菌与 AOB 的影响

Table 1 Different low temperature impact on ANAMMOX bacteria and AOB

时间 /d	温度 / $^\circ\text{C}$	TN 去除量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	ANAMMOX 活性降低 /%	实际转化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	ANAMMOX 菌转化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	AOB 转化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	AOB 活性降低 /%
239	35	243.33	59.24	287.56	119.23	168.33	8.01
245	21	99.18		203.44	48.60	154.84	
487	35	298.09	82.99	341.80	146.06	195.74	25.62
491	15	50.72		170.44	24.85	145.59	

可以看出,当温度突降至  $21^\circ\text{C}$  时,ANAMMOX 活性降低 59.24%,而 AOB 活性降低仅 8.01%;  $15^\circ\text{C}$  时,ANAMMOX 活性降低 82.99%,而 AOB 活

$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  以上,最高 TN 去除负荷达到  $2.32 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,平均 TN 去除负荷达到  $1.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,显示反应器在本试验条件下,ANAMMOX 性能稳定性良好。

TN 去除率最高达到 81.65%,平均 TN 去除率为 65.09%,显然 TN 去除率还有待于进一步提高。本试验中,TN 去除率难以进一步提高的原因在于:①在 CANON 工艺中,存在最高 TN 去除率为 89% 理论限制<sup>[10]</sup>;②反应器中的传质限制,需要使反应器内部存在一定浓度的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ <sup>[18]</sup>,限制了 TN 去除率的进一步提高;③曝气量没有动态控制,在试验过程中,由于空气压缩泵压力问题或气体流量计自身存在漂移现象,引起了曝气量的波动,进而导致了 TN 去除率的波动。若能建立反应器中水质与曝气量的自动控制系统,将有助于进一步提高 TN 去除率。

### 2.2 应对温度冲击的稳定性

在考虑温度冲击时,主要考虑温度对于 ANAMMOX 菌与 AOB 的影响。由于没有外碳源,所以反硝化作用几乎可以忽略不计,因此 TN 去除率反映了 ANAMMOX 菌受温度的影响,但是,由于 AOB 与 ANAMMOX 菌均能消耗  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,因此 AOB 受温度冲击的影响却不能简单地以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的转化效果来衡量,而要减去 ANAMMOX 菌  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  氧化的数值。ANAMMOX 反应的标准反应式中,  $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{N}_2$  的比例为 1:1.02<sup>[16]</sup>,因此由 ANAMMOX 菌氧化的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  理论值  $= d(\text{TN}) / (1.02 \times 2) = d(\text{TN}) \times 0.49$ 。

#### 2.2.1 低温冲击的影响

考虑到不同时期的 CANON 反应器中的菌群组成与数量可能有所不同,因此,在估算 AOB 受温度影响活性比较时,分别选取其临近时间段内曝气量相同天数进行比较,如表 1 所示。

性降低仅 25.62%。二者对温度冲击的适应性不同,导致了出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的大量积累,如图 4 所示。试验结果表明:低温冲击对于 AOB 与 ANAMMOX 菌都

有抑制作用,且 ANAMMOX 菌更敏感,这与采用序批式生物膜 CANON 反应器所得到的结果是一致的<sup>[19]</sup>. 2 次短暂的低温冲击,对于 CANON 反应器的稳定性没有造成任何不良影响,当温度恢复正常后,反应器的性能亦恢复,如图 2~6 所示. 至于反应器长期处于低温环境下,能否建立稳定的亚硝酸盐积累、ANAMMOX 菌能否在低温条件下逐步提高活性还需要进一步的试验来论证.

### 2.2.2 高温冲击

高温冲击发生在第 548 d,是由于温度控制器失灵,反应器内温度超过 36℃ 时,加热棒没能自动断电,至发现时,时间已经达到 10 h,反应器内温度已经超过 50℃.

在 548 d 发生高温事故之前, CANON 反应器的运行一切正常. 当高温冲击事件发生后,立刻对反应器采取降温措施,使温度恢复正常,至 549 d 进行化验后,发现  $\text{NH}_4^+$ -N 转化率剧烈下降至 5.74%, CANON 反应器出水的 TN 去除率急剧下降至 8.74%,出水  $\text{NO}_3^-$ -N 也急剧下降至 2.6  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这表明反应器中 ANAMMOX 菌受到高温的严重破坏,而  $\text{NH}_4^+$ -N 转化率急剧下降至 9.97%,表明 AOB 也受到了严重破坏. 在随后 1 周的运行过程中,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度逐渐升高,至 554 d 时,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 达到 159.84  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 转化率达到 45.66%,对比表 1 中由 AOB 所氧化的  $\text{NH}_4^+$ -N 值 140.06  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,表明反应器中 AOB 已逐渐恢复;不过, TN 去除率却始终接近于 0,说明 ANAMMOX 菌的活性没有任何恢复,至 571 d 时, TN 去除率仍然没有明显提高,高温环境已经对 ANAMMOX 菌造成不可逆转的破坏,短期内 CANON 反应器的性能将难以恢复,这也吻合文献[16, 20]认为 ANAMMOX 菌的适宜温度不超过 43℃ 的结论. 因此, CANON 反应器在运行过程中一定要避免高温出现.

## 3 结论

(1) 控制温度在 35℃ ± 1℃, pH 7.39 ~ 8.01 之间,水力停留时间为 3.6 ~ 5.1 h 与进水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为 300 ~ 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下,以海绵块为填料,短程硝化的稳定性与 ANAMMOX 的稳定性良好, CANON 反应器保持长期稳定,最高 TN 去除率可达到 81.65%.

(2) 低温冲击对 ANAMMOX 菌与 AOB 都会产生抑制作用,但 ANAMMOX 菌对低温更加敏感,造成  $\text{NO}_2^-$ -N 严重积累,致使出水恶化,温度恢复后,反

应器性能随即恢复.

(3) 超过 50℃ 的高温使 CANON 反应器崩溃, ANAMMOX 菌活性被完全破坏,而 AOB 的活性可在 1 周内恢复.

### 参考文献:

- [1] Third K A, Sliemers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(4): 588-596.
- [2] Kimura Y, Isaka K, Kazama F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (anammox) activity [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(6): 4390-4394.
- [3] Van de Graaf A A, Mulder A, De Bruijn P, *et al.* Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(4): 1246-1251.
- [4] 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 Fed*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [5] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor [J]. *Water Research*, 1990, **24**(3): 297-302.
- [6] Kuai L P, Verstraete W. Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(11): 4500-4506.
- [7] Heijnen J J, Hellinga C, Mulder J W, *et al.* The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-143.
- [8] Yamamoto T, Takaki K, Koyama T, *et al.* Long-term stability of partial nitrification of swine wastewater digester liquor and its subsequent treatment by Anammox [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6419-6425.
- [9] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor [J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4359-4370.
- [10] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, *et al.* Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an air pulsing SBR [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(1): 336-341.
- [11] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [12] Van de Graaf A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology-UK*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [13] 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.
- [14] GB/T 5750.5-2006. 生活饮用水标准检验方法——无机非金属指标[S].
- [15] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H, *et al.* Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, **400** (6743): 446-449.
- [16] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [17] 付昆明,张杰,曹相生,等. 曝气量对不同填料 CANON 反应器运行效率的影响[J]. *化工学报*, 2010, **61**(2): 496-503.
- [18] 付昆明,张杰,曹相生,等.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  对连续流 CANON 反应器运行性能的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(7): 1038-1044.
- [19] 张杰,付昆明,曹相生,等. 序批式生物膜 CANON 工艺的运行与温度的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(8): 850-855.
- [20] Jetten M S, Strous M, Van de Pas-Schoonen K T, *et al.* The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, **22**(5): 421-437.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2011年12月2日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2010年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2010年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

综合评价总分86.5,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》86.5,《中国环境科学》77.9,《环境科学学报》77.3).

总被引频次5197,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》5197,《环境科学学报》3914,《农业环境科学学报》3700).

影响因子1.125,排名第三(排名前三名的期刊分别是《环境科学研究》1.531,《中国环境科学》1.457,《环境科学》1.125).

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2010年度《环境科学》综合评价总分86.5,在被统计的1998种核心期刊中名列第27位,在被统计的36种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

## CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake .....	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau .....	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis .....	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data .....	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index .....	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea .....	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae .....	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea .....	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study .....	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event .....	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring .....	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan .....	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet .....	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin .....	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area .....	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin .....	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary .....	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China .....	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators .....	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae .....	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Modified GAC in the Presence of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation .....	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside .....	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers .....	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation .....	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter .....	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact .....	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation .....	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties .....	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor .....	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity .....	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM .....	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment .....	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model .....	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate .....	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants .....	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway .....	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk .....	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments .....	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals .....	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(III) Absorption .....	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2 .....	ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain .....	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain .....	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period .....	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N <sub>2</sub> O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain .....	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing .....	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer .....	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O <sub>3</sub> on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean .....	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress .....	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting .....	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

# 《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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人