

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

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

|                                                                     |                                                               |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 碳同位素比技术定量估算城市大气 CO <sub>2</sub> 的来源 .....                           | 刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)                    |
| 广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映 .....                        | 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)                             |
| 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 .....                                               | 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)                               |
| 白马泉风景区夏季大气 PM <sub>2.5</sub> 中二次有机物的初步研究 .....                      | 代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)           |
| 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 .....                                     | 乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071) |
| 法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 .....                                  | 王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)                                          |
| 胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 .....                                 | 薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)                                 |
| 基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 .....                                      | 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)                           |
| 流域水质时空分布特征及其影响因素初析 .....                                            | 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)                            |
| 潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 .....                                  | 崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)                                           |
| 春季盘溪水质日变化规律及水质评价 .....                                              | 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)                           |
| 西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 .....                                            | 肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)                                  |
| 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 .....                                  | 郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)                          |
| 淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 .....                                          | 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)                                 |
| 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 .....                                       | 王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)                                       |
| 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 .....                                          | 李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)                                     |
| 合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 .....                                          | 李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)                                  |
| 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 .....                                       | 张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)                        |
| 三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 .....                                      | 敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)                                       |
| 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 .....                                  | 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)                                 |
| 竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 .....                                           | 姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)                                      |
| 雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 .....                                   | 赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)                                           |
| 中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 .....                                    | 潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)                                      |
| 三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 .....                                        | 邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)                                 |
| 海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 .....                                          | 田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)                              |
| 新生态铁的混凝作用探索 .....                                                   | 杨雪, 张景成, 关小红 (1221)                                           |
| 饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 .....                                             | 岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)                                     |
| 核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 .....                                 | 王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)                                 |
| 络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 .....                                           | 秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯玺 (1241)                                      |
| 赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 .....                                       | 张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)                          |
| 掺氮 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 .....   | 赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)                                       |
| O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 降解水中扑灭通效能研究 .....     | 李绍峰, 孙楚 (1260)                                                |
| Pr-N 共掺杂 TiO <sub>2</sub> 光电催化降解孔雀石绿动力学 .....                       | 沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)                                       |
| 铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 .....                                        | 张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)                             |
| 聚合铝铁对 A <sup>2</sup> /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 .....                     | 温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)                                |
| 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 .....                                    | 张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)                              |
| 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 .....                                         | 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)                          |
| 好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 .....                                     | 王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)                            |
| 除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 .....                                        | 李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)                                  |
| 利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌 .....                             | 王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)                                     |
| 紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 .....                                          | 于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)                                       |
| 1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究 .....                                              | 陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)                        |
| 氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 .....                                       | 王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)                                           |
| 多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 .....                                        | 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)                       |
| 生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 .....                                    | 王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)                                 |
| 水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: <sup>14</sup> C连续标记法 .....                   | 聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)                       |
| 油田污染土壤残油组成与特征参数分析 .....                                             | 王坚, 张旭, 李广贺 (1352)                                            |
| 挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 .....                                           | 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)                             |
| 田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 .....                                         | 黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)                                     |
| 中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 .....                                       | 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)                                     |
| 基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 .....                            | 袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)                    |
| 填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 .....                                | 兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)                                     |
| 生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 .....                                        | 方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)                                          |
| 岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 .....                                             | 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)                      |
| 《环境科学》征订启事 (1062)      《环境科学》征稿简则 (1107)      信息 (1135, 1215, 1396) |                                                               |

# 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响

李祥<sup>1</sup>, 黄勇<sup>1\*</sup>, 郑宇慧<sup>1</sup>, 袁怡<sup>1,2</sup>, 李大鹏<sup>1</sup>, 潘杨<sup>1</sup>, 张春蕾<sup>1</sup>

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 采用厌氧氨氧化反应器, 通过氮去除速率的测定, 研究了不同温度变化方式对反应器脱氮效能稳定性的影响。结果表明, 温度在 26~37℃ 之间变化时, 氮去除速率在 1.51~1.84 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> 之间波动。其中逐渐降温的氮去除速率变化幅度 4.35%, 比阶梯降温(氮去除速率变化幅度 9.03%) 更有利于厌氧氨氧化反应器脱氮效能的稳定。当温度低于 20℃ 时, 反应器氮去除会快速下降。特别当温度低于 15℃ 时, 反应器氮去除速率下降至 0.55 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 同时出现大量的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累, 从而抑制厌氧氨氧化反应。对其进行线性拟合发现, 低于 20℃ 时温度与氮去除速率具有明显的线性关系。根据温度变化对反应器氮去除速率稳定性的影响, 提出了厌氧氨氧化反应器快速启动及实现低温高效运行的控温策略。

**关键词:** 温度; 氮去除速率; 稳定性; 厌氧氨氧化; 策略

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1288-05

## Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor

LI Xiang<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>1</sup>, ZHENG Yu-hui<sup>1</sup>, YUAN Yi<sup>1,2</sup>, LI Da-peng<sup>1</sup>, PAN Yang<sup>1</sup>, ZHANG Chun-lei<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The effect of temperature on stability of nitrogen removal efficiency was investigated in an ANAMMOX reactor by measuring the nitrogen removal rate. The results showed that the nitrogen removal rate changed between 1.51 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> and 1.84 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> when the temperature was between 26℃ and 37℃. Compared with gradually degrading temperature (nitrogen removal rate variation of amplitude 9.03%), the ladder degrading temperature was more advantageous on the stability of nitrogen removal efficiency. Nitrogen removal rate variation of amplitude was 4.35%. The nitrogen removal rate dropped quickly, when the temperature was below 20℃. Moreover, a large number of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N accumulated in the ANAMMOX process, when temperature is below 15℃ in the reactor. A strong relationship between temperature and nitrogen removal rate was found, when the temperature was below 20℃. Based on the effect of temperature on nitrogen removal rate, the strategy about temperature control was proposed to achieve the fast start-up and high efficiency of nitrogen removal under low temperature for the ANAMMOX reactors.

**Key words:** temperature; nitrogen removal rate; stability; ANAMMOX; strategy

厌氧氨氧化是一种新型的生物脱氮反应, 脱氮效能远远超过传统的生物脱氮工艺。厌氧氨氧化菌是中温菌, 适宜的生长温度为 32~37℃<sup>[1,2]</sup>, 因此至今大部分研究者在厌氧氨氧化反应器启动过程中将温度保持在中温, 以实现快速启动<sup>[3~7]</sup>。而实际工业废水的温度一般都处于常温(25℃), 甚至低于常温, 当运用厌氧氨氧化进行脱氮时需要进行预热和保温。但是废水进行预热和保温一直是废水处理过程中的一个难题<sup>[8,9]</sup>, 解决这一难题的途径之一是寻找在低温条件下实现高效厌氧氨氧化的方法。近年来, 有少数的研究者在不同低温下成功启动了厌氧氨氧化反应器, 但是相对于中温, 其启动时间十分缓慢, 氮去除速率相对较低<sup>[10~13]</sup>。而目前鲜有文献报道关于温度变化对厌氧氨氧化反应器氮去除速率的影响以及实现低温稳定运行的控制策略。

因此, 本研究通过阶梯降低温度和随气温逐步

降低温度这 2 种方式研究温度变化对反应器氮去除速率的影响, 从而评价温度变化对反应器脱氮效能稳定性的影响, 探求适应低温高效运行厌氧氨氧化的策略, 旨在为以后工程化过程中温度控制作参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验装置

实验装置采用实验室规模的上流式连续流生物膜反应器, 有效容积为 2.1 L。整个装置的接口处均用硅胶密封。反应器内放置直径 9.5 cm、高 18.5 cm 的圆柱型无纺布(厚 0.5 cm), 防止微生物流失(图

收稿日期: 2011-06-14; 修订日期: 2011-08-31

基金项目: 江苏省环境科学与工程重点实验室开放课题项目(ZD081202); 国家自然科学基金项目(51008202); 江苏省环境工程重点学科建设项目(A0030803)

作者简介: 李祥(1984~), 男, 硕士, 助理实验师, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: lixiang68411364@163.com

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

1). 整个运行过程的控制参数:进水 pH 控制在  $7.30 \pm 0.29$  (通过  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$  调节), HRT 设定为 4 h, 反应器氮容积负荷 (以 N 计, 下同) 保持在  $2.17 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ .

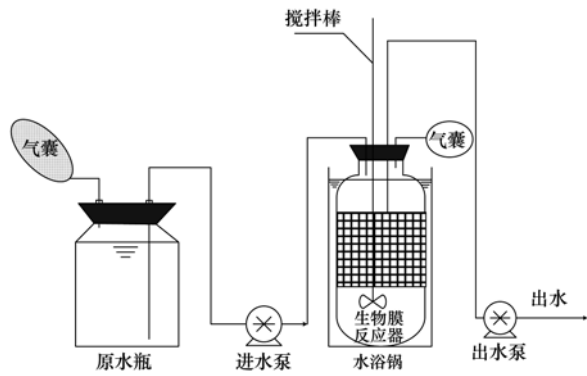


图 1 厌氧氨氧化工艺流程示意  
Fig.1 Schematic diagram of ANAMMOX process

1.2 实验用水

整个实验期间进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度分别维持在  $156 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $206 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 采用人工配水<sup>[14,15]</sup>, 主要由  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (按需配制),  $\text{NaNO}_2$  (按需配制),  $\text{NaHCO}_3$   $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KHCO}_3$   $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $136 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和微量元素为浓缩液 I  $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ , 微量元素浓缩液 II  $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$  组成. 微量元素浓缩液 I: EDTA  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4$   $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 微量元素浓缩液 II: EDTA  $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $990 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $190 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$   $210 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_4$   $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

1.3 接种污泥

反应器污泥为成熟的厌氧氨氧化污泥, 之前大约通过 120 d 的快速富集 (温控  $35^\circ\text{C}$ ), 氮去除率达到  $1.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 运行过程中厌氧氨氧化效果较好,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  与  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  出水浓度分别稳定在  $30.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $44.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 去除率分别稳定在 80% 和 78.8%.

1.4 实验测定项目和方法

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$  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;  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  采用紫外分光光度法; pH 采用哈纳 pH211 型酸度计; 温度采用水银温度计 (精确度  $0.1^\circ\text{C}$ )<sup>[16]</sup>.

1.5 实验方法

根据整个实验中温度的变化规律, 将其主要分为 5 个阶段, 如表 1 所示. 整个实验前三阶段 (阶梯降温) 分别通过水浴锅将温度控制在  $37^\circ\text{C}$ 、 $32^\circ\text{C}$  和  $26^\circ\text{C}$ , 在每个温度下恒定温度, 测定氮去除速率, 待稳定后将温度直接下降到另一个阶段; 第 IV 阶段关掉水浴锅电源, 在不控温的情况下, 研究水温回升对反应器氮去除速率的影响; 然后再经历逐步降温 (第 V 阶段), 研究逐步降温对反应器氮去除速率的影响.

| 表 1 不同运行阶段温度的变化                                          |                      |                |
|----------------------------------------------------------|----------------------|----------------|
| Table 1 Temperature change of different operation stages |                      |                |
| 阶段                                                       | 温度/ $^\circ\text{C}$ | 运行时间/d         |
| I                                                        | $37$ (恒温)            | $1 \sim 15$    |
| II                                                       | $32$ (恒温)            | $16 \sim 23$   |
| III                                                      | $26$ (恒温)            | $24 \sim 50$   |
| IV                                                       | 从 $25$ 升至 $32$       | $51 \sim 125$  |
| V                                                        | 从 $32$ 降至 $11.5$     | $126 \sim 204$ |

2 结果与分析

2.1 阶梯恒温下降对反应器氮去除速率的影响

在本实验之前, 厌氧氨氧化反应器一直保持在  $35^\circ\text{C}$  条件下运行. 而在本实验第 I 阶段 ( $0 \sim 15 \text{ d}$ ), 水浴锅温度控制在  $37^\circ\text{C}$ , 反应器氮去除速率并没有明显的升高 (如图 2), 基本维持在  $1.71 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度基本维持在  $31.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $45.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 说明此时升高温度亦不能有效提高反应器氮去除速率. 反应器运行 15 d 后将温度下降至  $32^\circ\text{C}$ , 然后保持恒温运行 8 d. 温度下降初期, 反应器氮去除速率略有下降, 经过 8 d 的运行反应器氮去除速率逐渐上升并稳定在  $1.66 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 此时出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度略有升高, 分别在  $35.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  附

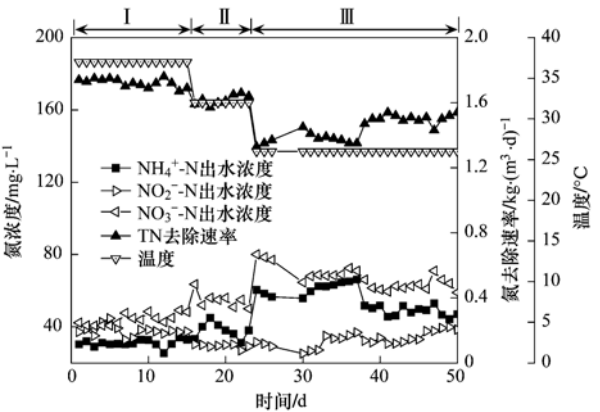


图 2 氮去除速率随阶梯降温的变化  
Fig. 2 Changes of nitrogen removal rate with temperature ladder degrade

近波动.

反应器运行到 24 d 将水浴锅温度下降至 26℃, 此时反应器氮去除速率迅速下降至  $1.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度分别达到  $55.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $80.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 运行数天后, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度开始逐渐下降, 氮去除速率开始逐渐上升. 再经过 25 d 的培养, 氮去除速率基本维持在  $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度基本维持在  $48.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $61.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 说明阶梯降温过程中, 随着温度的降低, 反应器氮去除速率降低幅度会进一步加大, 但是微生物能够逐步适应该温度, 厌氧氨氧化细菌的活性将逐步得到恢复.

2.2 水温变化对反应器氮去除速率的影响

在反应器运行的第Ⅳ阶段(51 ~ 119 d), 如图 3 所示, 温度从 25℃ 逐渐升高到 32℃, 此时出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度随着温度的升高开始逐渐下降. 分别从最高出水  $50.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $71.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  开始逐渐降低至  $33.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $22.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在此阶段, 氮去除速率随水温波动也进行小幅波动. 经过 59 d 的运行, 氮去除速率由  $1.41 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  升高至  $1.90 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 其中当环境温度 > 32℃ 时, 反应器氮去除速率最高达到  $1.92 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 明显高于实验初期的氮去除速率 [ $1.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ], 说明随着温度的逐步提高, 反应器内厌氧氨氧化微生物量在逐渐增加, 从而出现氮去除速率的提高.

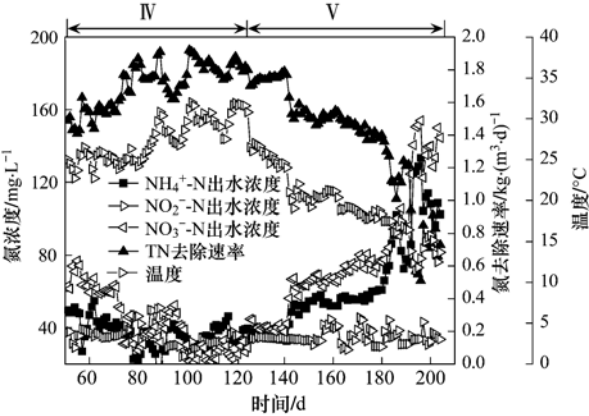


图 3 氮去除速率随水温的变化

Fig. 3 Changes of nitrogen removal rate with water temperature

第Ⅴ阶段(120 ~ 204 d)随着天气转冷, 水温开始下降. 在此阶段反应器氮去除速率也开始下降, 当温度再次下降到 26℃ 时(120 ~ 131 d), 反应器氮去除速率从  $1.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  逐渐下降到  $1.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 当水温低于 20℃ 时, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、

$\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度急速升高, 反应器氮去除速率开始迅速下降. 当温度低于 15℃ 时, 反应器内出现了  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  积累, 出水  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度最高达到  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 氮去除速率最低降至  $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 并且随着温度的波动出现较大波幅. Dosta 等<sup>[17]</sup> 在低温过程中也同样发现, 当反应器内温度低于 15℃ 时出现大量  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  积累. 说明温度低于 15℃ 将不利于厌氧氨氧化微生物的生长.

2.3 不同降温方式对厌氧氨氧化反应器氮去除速率的影响

温度是影响微生物酶促反应的主要因素之一. 厌氧氨氧化菌属嗜温菌, 其主要途径有 2 种: ①影响酶催化反应的速率; ②影响基质扩散到细胞的速率<sup>[18]</sup>. 低温易使厌氧氨氧化菌细胞膜呈凝胶状而阻碍营养物质的跨膜运输, 导致细胞因“饥饿”而降低活性; 高温则易使厌氧氨氧化菌细胞内的温度敏感组分变性, 导致菌体失活<sup>[19]</sup>. 每一种微生物都有一个温度耐受极限, 超过一定的极限值反应速率反而会下降. 报道称当温度高于 40℃ 时厌氧氨氧化活性将逐步下降, 且不可逆. Dosta 等<sup>[17]</sup> 研究表明, 当温度达到 45℃, 厌氧氨氧化细胞开始破裂, 出水颜色变为桔红色. 为了后续实验能够正常进行, 所以不进行破坏性实验, 将实验的最高温度控制在 37℃.

根据温度变化方式及其范围, 分别选取 32℃ 和 26℃ 稳定运行阶段, 分析温度变化对反应器氮去除速率的影响. 由于在第二次降温前经过一段时间的恢复, 反应器内微生物量发生了一定变化, 因此采用相对氮去除速率变化幅度作为比较的对象, 结果如表 2 所示. 在阶梯降温阶段, 32℃ 稳定运行时的氮去除速率为  $1.66 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 而降至 26℃ 时, 经过 24 d 的培养, 氮去除速率经下降后再逐渐上升并稳定在  $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 下降幅度为 9.03%. 而逐步降温在经过同样的温度区间变化后, 氮去除速率变化幅度仅为 4.35%. 若将其继续稳定在 26℃ 继续运行 12 d, 由阶梯降温可知, 氮去除速率会进一步得到上升, 最终氮去除速率变化幅度将低于 4.35%.

表 2 不同降温方式后的氮去除速率变化

Table 2 Nitrogen removal rate change under different ways of temperature reduction

| 温度变化方式 | 温度/℃ |      | 运行时间<br>/d | 变化幅度 <sup>1)</sup><br>/% |
|--------|------|------|------------|--------------------------|
|        | 32   | 26   |            |                          |
| 阶梯降温   | 1.66 | 1.51 | 24         | 9.03                     |
| 逐渐降温   | 1.84 | 1.76 | 12         | 4.35                     |

1) 变化幅度 = (32℃ 氮去除速率 - 26℃ 氮去除速率) / 32℃ 氮去除速率

说明逐渐降温对厌氧氨氧化菌活性影响较少,更有利于启动成功的厌氧氨氧化反应器从中温降低至常温运行.

2.4 温度变化对反应器氮去除速率的影响

随着外在水温的不断变化,反应器氮去除速率也在发生着一定的变化.运用 Origin 软件,通过 Logistic 模型对整个实验期间数据进行非线性拟合后,其结果如图 4 所示.经过拟合得到  $y = 1.78 / \{1 + \exp[-0.27(x - 14.14)]\}$ ,  $R^2 = 0.89$ ,说明温度变化会对反应器氮去除速率具有一定的影响.同时从图 4 可以发现,当温度在 25 ~ 32℃ 之间运行时,反应器氮去除速率变化缓慢,变化幅度在 6% 左右.

当水温低于 20℃ 时,温度的变化对厌氧氨氧化速率影响较大.当温度达到 11.5℃ 时,厌氧氨氧化活性虽然存在,但是相对于 37℃ 时其下降幅度达到 67%.从图 4 中可以看出,温度从 11.5 ~ 20℃ 之间变化与氮去除速率具有较强的线性关系.说明温度和氮去除速率具有较强的线性关系.厌氧氨氧化反应器运行温度降低到 20℃ 将会严重影响反应器的脱氮效能.

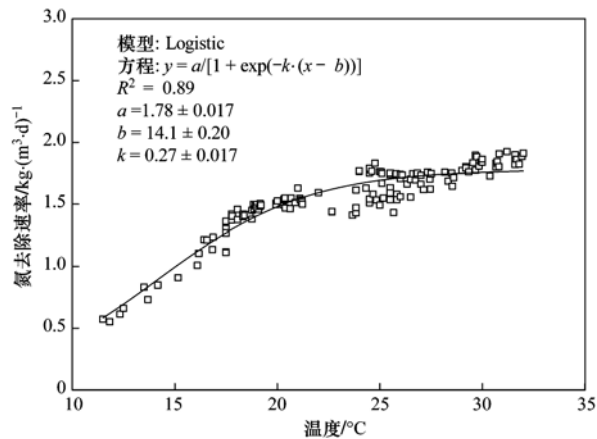


图 4 温度变化与氮去除速率非线性拟合

Fig. 4 Nonlinear fitting of temperature with nitrogen removal rate

2.5 厌氧氨氧化反应器脱氮稳定性的控温优化策略

由本实验结果可知温度对厌氧氨氧化菌的生长有着重要的影响,主要通过反应器的氮去除速率的变化体现.实现厌氧氨氧化反应器常温运行的方法有 2 种策略:一种是在反应器刚启动时就通过常温控制;另一种是在启动时仍采用中温控制,当厌氧氨氧化污泥成熟后再降温运行.但因厌氧氨氧化细菌生长缓慢(倍增时间 11 d),体积小,易流失;以及其它一些生理特性,而使厌氧氨氧化反应器启动十分

缓慢<sup>[20]</sup>.所以在启动过程中尽力保持脱氮效能的稳定,一旦去除效果出现恶化,需要较长时间恢复.为了有利于厌氧氨氧化的工程化过程中的经济有效性,因此需要探讨即能快速启动又能实现厌氧氨氧化低温运行的控制策略.

表 3 列出了近年来研究者在中温和低温条件下启动厌氧氨氧化反应的情况.从表 3 可知,中温条件下运行比低温更能够快速实现厌氧氨氧化反应器启动.因此在厌氧氨氧化反应器的启动阶段最好在中温条件下运行,逐步提高反应器的脱氮效能.在低温下虽然能够启动反应器,但从运行时间的角度而言,需要消耗大量财力,很不经济.因此第一种策略不可取.若采用第二种策略,可以在很短时间内启动厌氧氨氧化反应器.当反应器运行至所需脱氮效能时,再通过降温实现低温运行.由本实验可知,通过逐步降温的方式在保持反应器脱氮效能稳定性的同时可以实现低温运行.这将进一步减少预热和保温所需要的能耗,特别是工程化中的温控,这将减少一笔可观的费用.因此第二种策略更有利于低温条件下反应器的运行.同时由非线性拟合可知,在低温运行过程中要将最低温度控制在 20℃ 以上运行,否则亚硝酸盐积累会抑制厌氧氨氧化菌活性,从而影响反应器脱氮效能.

表 3 不同温度下厌氧氨氧化反应器启动

| Table 3 ANAMMOX reactor start-up under different temperatures |            |                                     |      |
|---------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------|------|
| 运行温度<br>/℃                                                    | 启动时间<br>/d | 最大氮去除速率<br>/kg·(m³·d) <sup>-1</sup> | 文献   |
| 35                                                            | 450        | 76.7                                | [6]  |
| 33                                                            | 90         | 8.4                                 | [21] |
| 35                                                            | 150        | 7.0                                 | [22] |
| 24                                                            | 97         | < 0.1                               | [11] |
| 23                                                            | 92         | 4.5                                 | [12] |
| 22                                                            | 446        | 8.1                                 | [5]  |
| 16                                                            | 96         | 0.284                               | [10] |

3 结论

(1) 温度的变化对厌氧氨氧化反应器氮去除速率具有不同程度的影响.当温度在 26 ~ 37℃ 之间变化时,氮去除速率在 1.51 ~ 1.84 kg·(m³·d)<sup>-1</sup> 之间变化.其中逐步降温方式更有利于厌氧氨氧化氮去除速率的稳定.当温度低于 20℃ 时,随着温度的下降,氮去除速率快速下降.特别反应器温度低于 15℃ 时会出现亚硝酸盐的积累,从而影响厌氧氨氧化反应脱氮效能的稳定性.

(2) 通过温度与氮去除速率非线性拟合可知其符合 Logistic 模型.当反应器温度控制在 25℃ 以上

时,反应器脱氮效能变化幅度为6%;当期温度低于20℃时,氮去除速率与温度具有较好的线性关系。

(3) 针对厌氧氨氧化工程化过程中的控温条件优化可知,在厌氧氨氧化反应器启动过程中可采用高温运行,而在厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定运行时采用逐步降低温度至常温运行,可进一步降低能耗。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵志宏, 李小明, 廖德祥, 等. ANAMMOX 菌的微生物学研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2007, **34**(1): 138-142.
- [3] Egli K, Fanger U, Alvarez P, *et al.* Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium rich leachate [J]. *Archives of Microbiology*, 2001, **175**(3): 198-207.
- [4] Toh S K, Webb R I, Ashbolt N J. Enrichment of autotrophic anaerobic ammonium-oxidizing consortia from various wastewaters [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **43**(1): 154-167.
- [5] Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, **103**(5): 486-490.
- [6] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [7] 李祥, 黄勇, 袁怡. 厌氧氨氧化菌活性恢复及富集培养研究 [J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(1): 61-66.
- [8] 唐崇俭, 郑平, 张吉强, 等. 中试厌氧氨氧化反应器的运行性能及其过程动力学特性 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1834-1838.
- [9] 郝晓地, 仇付国, Van Der Star W R L, 等. 厌氧氨氧化技术工程化的全球现状及展望 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(18): 15-19.
- [10] 杨朝晖, 徐峥勇, 曾光明, 等. 不同低温驯化策略下的厌氧氨氧化活性 [J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(3): 300-305.
- [11] 冯平, 周少奇. 常温下厌氧氨氧化生物膜反应器的启动研究 [J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(6): 21-23.
- [12] Yang J C, Zhang L, Hira D, *et al.* Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2367-2372.
- [13] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [14] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [15] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [16] 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.
- [17] Dosta J, Fernández I, Vázquez-Padín J R, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on the Anammox process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 688-693.
- [18] Leslie G, Glen T, Henry C, 著. 张锡辉, 刘勇弟, 译. 废水生物处理 [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [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] 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2009, **35**(5): 473-481.
- [21] Zhang L, Yang J C, Hira D, *et al.* High-rate nitrogen removal from anaerobic digester liquor using an up-flow anammox reactor with polyethylene sponge as a biomass carrier [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2011, **111**(3): 306-311.
- [22] 李祥, 黄勇, 袁怡. 生物膜反应器厌氧氨氧化脱氮效能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(11): 133-137.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO <sub>2</sub> by Carbon Isotope Composition .....                                                                   | LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> ( 1041 )            |
| Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation .....                                         | LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> ( 1050 )          |
| Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing .....                                                                                                   | YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> ( 1057 )       |
| Secondary Organic Tracers in Summer PM <sub>2.5</sub> Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province .....                                                | DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> ( 1063 )                |
| Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust .....                                                                           | QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 1071 )        |
| <i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ <sup>15</sup> N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area .....                                        | WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei ( 1080 )                       |
| Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters .....                                         | XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> ( 1086 )          |
| Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake .....                                             | GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> ( 1091 )      |
| Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed .....                                        | HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> ( 1098 )   |
| Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River .....                          | ..... CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai ( 1108 )                  |
| Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring .....                                                                                          | ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> ( 1114 )      |
| Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China .....                                                                                                   | XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> ( 1122 )             |
| Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period .....                    | ..... GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> ( 1129 )            |
| Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms .....                                                              | XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> ( 1136 )              |
| Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area ..... | ..... WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> ( 1144 )          |
| Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall .....                                 | LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> ( 1152 )          |
| Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City .....                                                              | LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> ( 1159 )             |
| Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir .....                                                             | ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> ( 1167 )       |
| Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir .....                                                           | AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> ( 1176 )             |
| Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta .....                           | ..... LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> ( 1182 ) |
| Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake .....                                                          | JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> ( 1189 )          |
| Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay .....                                                        | ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng ( 1198 )                           |
| Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India .....                              | PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> ( 1204 )               |
| Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain .....                                                      | ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> ( 1209 )           |
| Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System .....                                                            | TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> ( 1216 )                |
| Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant .....                                                                                                                 | YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong ( 1221 )                     |
| Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation .....                                                                                             | YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> ( 1227 )     |
| Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment .....                             | ..... WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> ( 1234 )      |
| Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process .....                                                                                 | QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> ( 1241 )              |
| Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite .....                                                                                         | ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> ( 1247 )                      |
| Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....                 | ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> ( 1252 )              |
| Degradation of Prometon by O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                                                                            | LI Shao-feng, SUN Chu ( 1260 )                                          |
| Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO <sub>2</sub> Photocatalyst .....                                                       | SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> ( 1267 )         |
| Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China .....                                                           | ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> ( 1272 )           |
| Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A <sup>2</sup> /O System .....                                                                           | WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> ( 1278 )         |
| Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System .....                                                         | ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> ( 1283 )          |
| Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor .....                                                                                       | LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> ( 1288 )              |
| Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment .....                                                      | WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> ( 1293 )              |
| Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal .....                                                  | LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 1299 )             |
| Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene ( <i>nosZ</i> ) .....                                                           | WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> ( 1306 )     |
| Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis .....                                                                                  | YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> ( 1313 )                 |
| Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain .....                                                            | CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> ( 1318 )              |
| Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow .....                                                                             | WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping ( 1323 )                           |
| Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure .....                                                                               | MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> ( 1331 )           |
| Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils .....                                                                         | WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> ( 1339 )         |
| Quantifying Rice ( <i>Oryza sativa</i> L. ) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous <sup>14</sup> C Labeling .....             | NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> ( 1346 )                 |
| Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields .....                                                         | WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he ( 1352 )                               |
| Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils .....                                                                                 | MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> ( 1361 )       |
| Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils .....                                                           | HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> ( 1369 )         |
| Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads .....                                                    | MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> ( 1376 )      |
| Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste .....                                                               | YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> ( 1383 )             |
| Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation .....                                     | LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> ( 1389 )          |
| Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill .....                                                                                                          | FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng ( 1397 )                  |
| Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area .....                                                                                          | YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> ( 1404 )       |



# 《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4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street ,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                    | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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