

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

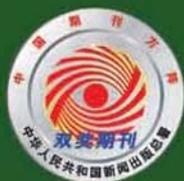
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

## 三峡库区消落带 N<sub>2</sub>O 排放及其影响因素

李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊\*

(西南大学资源环境学院, 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

**摘要:** 为了探讨亚热带水库消落带 N<sub>2</sub>O 的排放规律, 选取三峡库区王家沟一典型消落带内 3 个高程 (180、175 和 155 m) 作为研究对象, 采用静态暗箱和浮箱法进行了为期 2 a 的连续观测。175 m 和 155 m 高程位于三峡库区消落带上, 而 180 m 高程作为对照, 为永不淹水的陆地。结果表明, 各高程处的 N<sub>2</sub>O 排放通量都表现出明显的季节变化, 180 m 高程处的春季 N<sub>2</sub>O 排放最低; 175 m 高程在实验观测的第一年表现为单峰型的夏季 N<sub>2</sub>O 排放高峰, 次年在三峡水库实现最高蓄水位 175 m 后, 表现为干湿交替和夏季 N<sub>2</sub>O 高排放的双峰型; 155 m 高程处只呈现为夏季高 N<sub>2</sub>O 排放的单峰态。另外, 位于消落带上的 175 m 和 155 m 高程均表现为落干期 N<sub>2</sub>O 排放大于淹水期。各高程处 N<sub>2</sub>O 的年累积排放量为 175 m (853.92 mg·m<sup>-2</sup>) > 180 m (336.69 mg·m<sup>-2</sup>) > 155 m (324.69 mg·m<sup>-2</sup>), 与 180 m 高程对照相比, 表明短期淹水会促进 N<sub>2</sub>O 排放, 而长期淹水则会抑制 N<sub>2</sub>O 排放。相关性分析显示, 陆地与消落带落干期的 N<sub>2</sub>O 排放与各环境因子间无显著相关性, 消落带淹水期排放与水温 and 风速呈极显著负相关。对影响陆地、消落带淹水期和落干期 N<sub>2</sub>O 排放的因素进行主成分分析可知, 消落带淹水期水体中可溶性氮素的分布是影响水面 N<sub>2</sub>O 排放的最主要因素, 而消落带落干期及陆地则是受土壤碳氮含量、土壤温度、湿度及 pH 等因素的共同影响和制约。

**关键词:** 三峡水库; 消落带; N<sub>2</sub>O 排放; 季节变化; 主成分分析

**中图分类号:** X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2016)07-2721-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2016.07.040

## Features and Influencing Factors of N<sub>2</sub>O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir

LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, CHAI Xue-si, HUANG Zhe, FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju\*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Three heights (180 m, 175 m and 155 m) located in a typical drawdown area in Wangjiagou of the Three Gorges Reservoir were selected for studying the N<sub>2</sub>O emissions from subtropical reservoirs. The experimental period lasted two years from August 2010 to August 2012. The methods of static opaque chambers during the drainage period and floating chambers during flooding period were adopted in this study. The heights of 175 m and 155 m were both located in the drawdown area, whereas the 180 m height was located in the land as a control to 175 m and 155 m. N<sub>2</sub>O fluxes showed clear seasonal trends at each height and remarkable differences were observed between the two years at the 180 m height. N<sub>2</sub>O fluxes were lowest in spring at the 180 m height. N<sub>2</sub>O fluxes showed a single-peak pattern with climax in summer in the first year, whereas a double-peak pattern with climax in summer and after dry-wet alternating in the next year after the highest water level of 175 m was succeeded in the Three Gorges Reservoir. N<sub>2</sub>O fluxes presented a single-peak shape with summer climax at the 155 m height. Additionally, N<sub>2</sub>O fluxes were higher during the drainage period than in the flooding period at both the 175 m and 155 m heights. The order of the annual N<sub>2</sub>O cumulative emissions at the three heights was 175 m (853.92 mg·m<sup>-2</sup>) > 180 m (336.69 mg·m<sup>-2</sup>) > 155 m (324.69 mg·m<sup>-2</sup>), and there was a notable difference between 175 m and 155 m, indicating that short-term flooding could increase N<sub>2</sub>O emissions but long-term flooding could restrain N<sub>2</sub>O emissions. Correlation analysis showed that there were no obvious relationships between N<sub>2</sub>O fluxes and environmental factors in the land and during the drainage period. However, N<sub>2</sub>O fluxes were significantly negatively correlated with water temperature and wind speed during the flooding period. Principal component analysis found that soil nutrient conditions and physicochemical properties were the most important factors for N<sub>2</sub>O emissions in the land, the nitrogen distribution in water was a main determinant for N<sub>2</sub>O emissions during the flooding period, and soil physicochemical properties and microbial activity importantly affected N<sub>2</sub>O emissions during the drainage period in the drawdown area.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; drawdown area; N<sub>2</sub>O emissions; seasonal variation; principal component analysis

收稿日期: 2015-12-23; 修订日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2016D040)

作者简介: 李睿(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 475385838@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

$N_2O$ 是土壤微生物发生硝化作用的副产物,也是反硝化作用的一种中间产物,它会与平流层的  $O_3$  分子发生光化学反应来破坏臭氧层,虽然其在大气中的浓度和年增长率均低于  $CO_2$ ,但它的温室效应却是同等浓度  $CO_2$  的上百倍<sup>[1,2]</sup>. 有研究发现农田、海洋、土地利用变化、土地种植、河流和海岸区等都是大气 $N_2O$ 的主要来源<sup>[3]</sup>. 而水库作为陆地的一个重要氮汇,也是 $N_2O$ 的一个重要隐形来源<sup>[4]</sup>. 近年来,水库因具有高排水面积率、高固氮率和高氮负载能力使其被认为也是大气 $N_2O$ 的主要来源,其对大气温室气体的贡献受到越来越多的关注<sup>[5]</sup>.

水库具有向大气大量输入 $N_2O$ 的潜力<sup>[6,7]</sup>,但在已有的研究中,主要关注了水面 $N_2O$ 排放,而忽略了消落带的作用. 比如,Huttunen等<sup>[8]</sup>认为水库 $N_2O$ 的排放很小,其对大气温室效应的贡献很低;而Guérin等<sup>[9]</sup>却发现热带水库水体的 $N_2O$ 排放很大,对大气温室效应的影响不容忽视. Liu等<sup>[10]</sup>发现乌江渡和洪家度水库是大气 $N_2O$ 的重要排放源,水库大坝的建设改变了水体环境,特别是水体营养条件和物理化学特征的改变更是直接作用于水库 $N_2O$ 的排放;Chen等<sup>[11]</sup>对Xipi Dam的 $N_2O$ 排放调查显示,在上游大坝的浅水交汇处有大量 $N_2O$ 排放,水库的水面区域气体氮消除占了总滞留量的86%. Jørgensen等<sup>[12]</sup>指出三峡水库 $N_2O$ 的排放直接受到了水位涨落的影响;Zhu等<sup>[13]</sup>对三峡库区水面 $N_2O$ 的排放研究指出,水体 $N_2O$ 排放有明显的季节变化,气候温暖时期的 $N_2O$ 排放占了总的86%. 但随着人们对消落带认识的不断加深,近年来也有少数学者开展了对三峡水库消落带 $N_2O$ 排放的研究. Chen等<sup>[4]</sup>调查了7~9月间库区消落带4种典型湿地植物 $N_2O$ 排放,发现各植物带的 $N_2O$ 排放具有显著的季节变化和空间差异;方芳等<sup>[14]</sup>发现库区不同高程消落带的土壤 $N_2O$ 排放速率和反硝化速率差异不显著,但低高程消落带土壤反硝化作用相对较强.

三峡水库是目前世界上面积最大的用于水力发电的人工水库,最高水位175 m,最低水位145 m,垂直落差达30 m,库区消落区总面积为348.93 km<sup>2</sup>,是世界上水库消落区水位涨落幅度最高和面积最大的<sup>[15]</sup>. 水库消落带是由于水位季节性的变化导致水库周边陆地出现干湿交替的区域,与库区水域和两岸坡地间存在着物质、能量交换,是一类特殊的湿地生态系统,是研究库区气体排放中不可忽略的重要部分<sup>[14,16]</sup>. 目前关于三峡水库消落带 $N_2O$ 排放

的研究还非常匮乏<sup>[4,14]</sup>,而且已有的研究还存在观测时间短和观测频率低等不足. 为了更好地掌握和理解三峡库区消落带 $N_2O$ 的排放情况,本研究在三峡库区王家沟一典型消落区内进行了为期2 a的连续监测,探讨了库区不同高程消落带 $N_2O$ 的排放规律及影响因素,以期为三峡库区消落带的氮素迁移和氮循环研究提供基础数据,也为估测三峡水库在全球气候变化中的作用提供一定的理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

实验地点选在重庆市涪陵区珍溪镇王家沟,位于长江北岸(N29°54', S 107°27'),属于亚热带季风气候的典型丘陵地,三面环山,南部紧邻长江为水流汇出口,海拔153~307 m;研究区内冬暖夏热、无霜期长、日照充足,最高月均温28.6℃,最低月均温7.1℃,年平均气温高达22.1℃;降雨充沛,年平均降水量920 mm,其中5~7月降雨量占全年70%左右. 水库采取“蓄清排浑”的运行方案,实验期间库区水位变化如图1所示,水库每年10月开始蓄水,水位迅速上升,10月底达到最高水位175 m,次年1~4月进入供水期,水位缓慢下降,175 m落干而155 m处仍淹水,5月底可降至防洪限制水位145 m,6~9月即按防洪限制水位运行,消落带最长出露时期在150 d左右. 该区域土壤主要为侏罗系蓬莱镇组棕紫色砂泥岩相发育的棕紫泥,钾含量较高,有机质及有效养分含量中等,微量元素中度缺乏,pH值范围为5.1~8.15<sup>[17]</sup>.

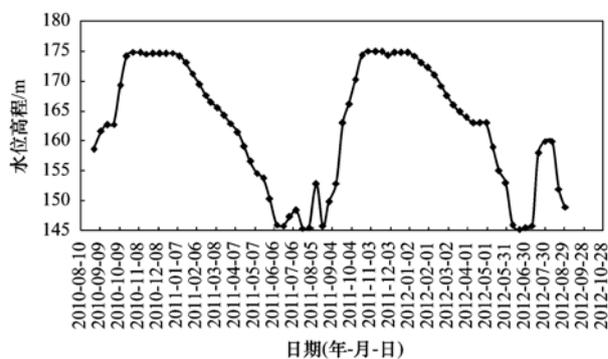


图1 实验期间库区消落带水位

Fig. 1 Water levels of the drawdown area of Three Gorges Reservoir during the experimental period

### 1.2 气体样品的采集和分析

在三峡库区涪陵珍溪镇王家沟选取3个高程:180、175和155 m,其中,175 m和155 m坐落在消落带上,180 m作为对照,为永不淹水的陆地,观测

时间为 2010 年 8 月至 2012 年 8 月. 陆-气界面 $N_2O$ 的采集采用静态暗箱法, 采样箱为不锈钢材质并由顶箱、中段箱和底座组成, 顶箱和中段箱的尺寸规格均为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 箱体外表面覆隔热材料, 中段箱只有在植株高度高于 50 cm 以上时才使用. 顶箱上部装有 2 个轴流扇, 用于混合箱内气体, 侧面安装有电源插头和气体样品采集接口. 底座 (50 cm × 50 cm × 20 cm) 上端有深 3 cm、宽 2 cm 的密封水槽, 样品采集时将顶箱或中段箱罩在底座上, 用水密封. 扣箱后立即用配有三通阀的 60 mL 的注射器采集第 1 个气体样品, 然后每隔 10 min 采集 1 次, 罩箱 30 min, 共采集 4 个气体样品. 每个高程设置 3 个重复, 采样频率为每周采样 1 次, 每次控制在当天 09:00 ~ 11:00 之间进行. 样品采集的同时测定箱内外空气温度、地表温度及地下 5 cm 处温度.

水-气界面 $N_2O$ 的采集选用浮箱法, 箱体是底部开口、内部抛光的不锈钢圆柱 (高 50 cm, 内部直径 50 cm), 于箱体外部距底面 20 cm 左右设置固定浮圈, 在浮圈的上方安装一根聚乙烯的平衡管 (长 2 m, 内径 0.5 cm), 在箱顶中间位置连接气体样品接口及温度探头. 采样前, 先将箱子底部朝上放置 5 min, 将浮箱放入水中打开平衡管, 轻压箱子上部 1 ~ 2 min 后关闭平衡管, 再用配有三通阀的 60 mL 注射器从箱内抽取第 1 个气体样品, 每 15 min 采集 1 个气样, 共采集 4 个气样. 每个高程设置 4 个重复, 每 10 d 采样 1 次; 样品采集的同时用美国 NK Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker 风速仪测定观测点即时大气温度、水面风速、空气湿度和气压, 用 JM624 便携式测温表测定浮箱内部温度以及表层水体温度.

不论是陆-气界面还是水-气界面, 不同高程上 $N_2O$ 的采集都是同时进行的. 注射器采集完气体样品后, 立即转入抽成真空的 25 mL 血清瓶中并及时送回实验室, 用 GC-2014 气相色谱仪测定 $N_2O$ 浓度<sup>[18]</sup>.  $N_2O$ 的排放通量可由公式(1)计算.

$$F = H \times 273 / (273 + T) \times P / P_0 \times \rho \times dc / dt \quad (1)$$

式中,  $F$  为 $N_2O$ 的排放通量,  $H$  为采样箱内气室高度,  $T$  为采样期间箱内平均气温,  $P$  为采样时的大气压力,  $P_0$  为标准状况的大气压力,  $\rho$  为 $N_2O$ 的密度,  $c$  为 $N_2O$ 的浓度,  $t$  为采样时间,  $dc/dt$  为采样期间采样箱内 $N_2O$ 的浓度变化速率, 采用线性方程拟合 $N_2O$ 的浓度变化. 通过线性内差法计算 $N_2O$ 的季节或年累

积排放量.

### 1.3 土壤样品的采集和分析

每次采集气样的同时, 采用多点混合法采集不同高程 0 ~ 20 cm 的土壤样品用于分析土壤的理化性质. 土样采好后, 马上带回实验室, 除去其中的植物根系、石块和一些可见的植物残体后, 取一部分土壤鲜样充分混合后放入 4℃ 冰箱中保存, 另外一部分土样风干后研磨, 分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛.

土壤铵态氮 ( $NH_4^+ -N$ ) 和硝态氮 ( $NO_3^- -N$ ) 采用 2 mol·L<sup>-1</sup> 的 KCl 浸提后在流动注射分析仪上进行测定; 可溶性有机碳 (DOC) 及可溶性总氮 (DTN) 用去离子水浸提后在 Multi N/C 2000 分析仪测定, 并由公式(2) 得到可溶性有机氮 (DON) 含量; 新鲜土壤样品经氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提后用 Multi N/C 2000 分析仪测定滤液中的有机碳、氮浓度, 并通过公式(3)、(4) 计算出微生物生物量碳 (SMBC) 和微生物生物量氮 (SMBN) 含量, 式中  $E_C$ 、 $E_N$  为熏蒸土壤与未熏蒸土壤有机碳、氮的差值, 0.38 和 0.45 分别为 SMBC 和 SMBN 的校正系数. 采用重铬酸钾法-外加热法<sup>[19]</sup> 测定土壤有机碳 (SOC); 土壤含水量采用铝盒烘干法测定<sup>[19]</sup>; 采用凯氏定氮法测定土壤总氮 (TN)<sup>[19]</sup>, pHSJ-4A 型酸度计测定 pH, 其土水比为 1:2<sup>[19]</sup>.

另外, 在水-气界面采集气样的同时也采集表层水体水样, 用酸度计测定水体 pH, 流动注射分析仪测定水体  $NH_4^+ -N$  和  $NO_3^- -N$  含量, Multi N/C 2000 分析测定水体 DOC 和 DTN 含量, 并通过公式(2) 得出 DON 含量.

$$DON = DTN - (NH_4^+ -N + NO_3^- -N) \quad (2)$$

$$SMBC = E_C / 0.38 \quad (3)$$

$$SMBN = E_N / 0.45 \quad (4)$$

### 1.4 数据的分析处理

利用 SPSS 17.0 对不同高程的年平均 $N_2O$ 排放通量、淹水期和落干期 $N_2O$ 平均排放通量及同一高程不同年份同一时段的 $N_2O$ 平均排放通量进行方差分析 (ANOVA), 当其通过方差齐次性检验时 ( $P > 0.05$ ), 进行均值间最小差异显著性 (LSD) 检验, 若不能通过方差齐次性检验 ( $P < 0.05$ ), 采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验. 将淹水期或落干期的各环境因素分别与淹水期或落干期的 $N_2O$ 平均排放通量进行相关性分析, 当  $P < 0.05$  时认为两者之间显著相关,  $P < 0.01$  时两者之间极显著相关, Pearson 系数即为两者的相关性系数. 将淹水期或落干期的环境因素与其相对应的水面或落干地的

$N_2O$ 平均排放通量间分别进行主成分分析,提取特征根大于1的主成分,各主成分由公因子方差较大的指标组成,累积贡献率皆达到75%以上;利用主成分分析中保留的环境要素和主成分的相关系数构造方程求环境因素对主成分的直接和间接途径系数,通过公式(5)、(6)计算各因素对主成分的直接、间接和总的决定系数,再根据公式(7)计算各指标对样本变异的贡献值 $V_i$ ;最后对陆地、消落带淹水期与落干期的 $N_2O$ 排放和主因子进行逐步线性回归法分析,得到各自 $N_2O$ 排放通量与主因子间的关系式。

$$R^2 = \sum R(i)^2 \quad (5)$$

$$R(i)^2 = b_i^2 + \sum b_i \times b_j \times r_{ij} \quad (6)$$

式中, $R^2$ 为总的决定系数, $R(i)^2$ 为指标 $i$ 对主成分的决定系数, $b_i$ 为 $i$ 指标对主成分的直接途径系数,

$b_i^2$ 为直接决定系数, $r_{ij}$ 为指标 $i$ 和指标 $j$ 之间的相关系数, $b_j \times r_{ij}$ 为 $i$ 指标通过指标 $j$ 对主成分的间接途径系数, $\sum b_i \times b_j \times r_{ij}$ 为间接决定系数。

$$V_i = \sum \lambda_j \times R(ij)^2 \quad (7)$$

式中, $\lambda_j$ 为 $j$ 主成分的特征值所占的百分率, $R(ij)^2$ 为 $i$ 指标对 $j$ 主成分的决定系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 库区 $N_2O$ 排放的时间变化

图2为实验期间三峡库区不同高程处 $N_2O$ 排放的情况,从中可以看出,各高程上的 $N_2O$ 排放都有明显的季节变化,不同高程上 $N_2O$ 排放的季节变化各不相同。在180m高程上, $N_2O$ 排放以脉冲形式呈现,于2011年11月20日达到了276.31

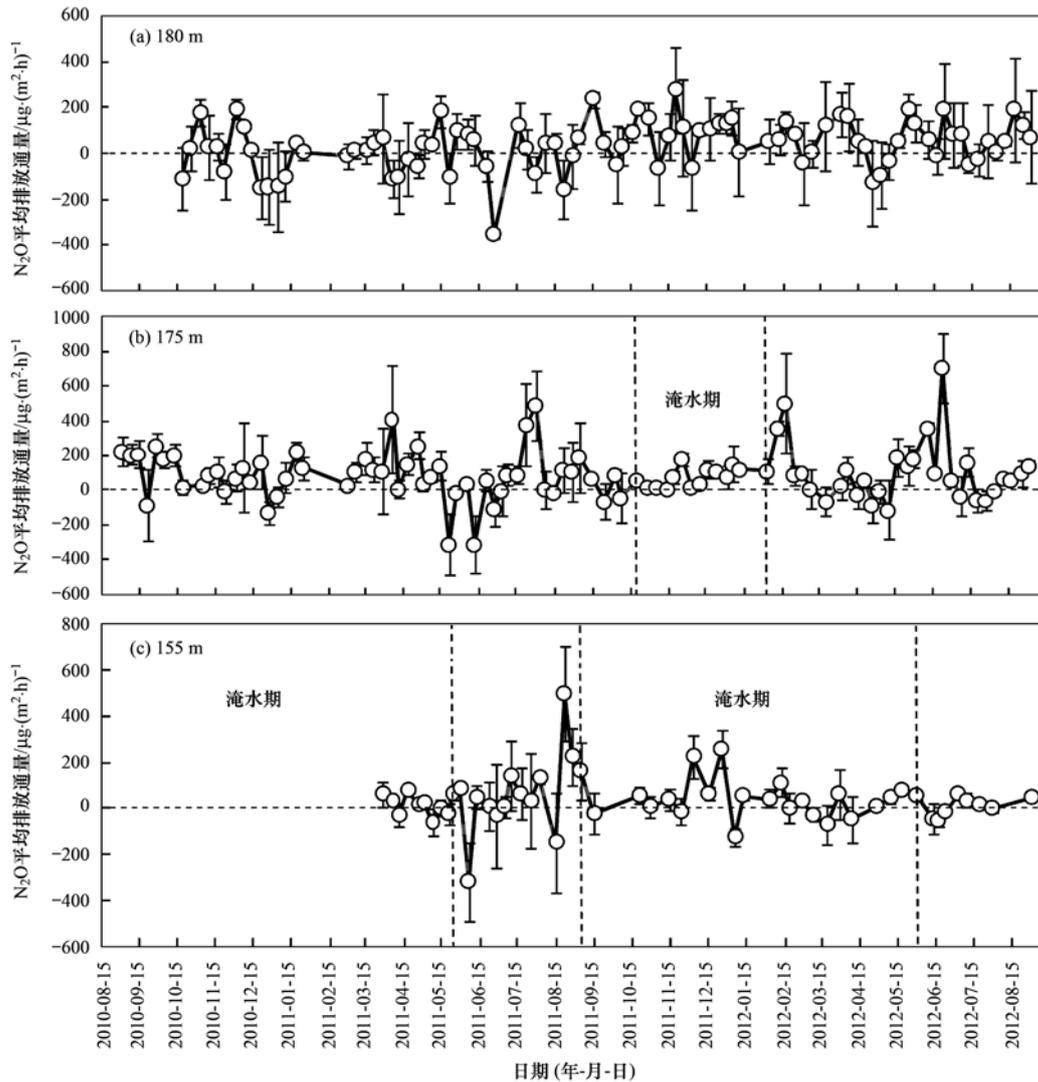


图2 三峡库区消落带不同高程处 $N_2O$ 排放的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of  $N_2O$  fluxes from different heights in the drawdown area of Three Gorges Reservoir

$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的最高N<sub>2</sub>O排放通量,同年6月27日出现了最高吸收通量  $351.18 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  [图 2(a)]. 在2011年9月~2012年8月期间,以3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月~次年2月为冬季来进行四季的划分. 发现180m高程处N<sub>2</sub>O排放比较稳定,四季差异不显著(表1). 175m和155m高程处在干湿交替的消落带上,175m高程处的平均排放通量最大,在2010~2011年间的N<sub>2</sub>O排放表现为夏季单峰态,而2011~2012年间却呈现出了夏季主高峰和2月次高峰的双峰态,冬季N<sub>2</sub>O排放最高,水体最大吸收通量出现在2011年5月22日为  $306.80 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,最高排放通量出现在2012年6月23日为  $705.24 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  [图 2(b)和表1]. 155m高程处淹水期内N<sub>2</sub>O排放较为稳定,而落干期内N<sub>2</sub>O排放通量随时间的变化较为剧烈,实验期间N<sub>2</sub>O最高和最低排放通量均出现在落干期,于2011年8月21日达到最高排放通量  $498.22 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,同年6月5日出现最低排放通量  $-317.53 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,N<sub>2</sub>O排放春季最低[图 2(c)和表1]; 175m和155m高程均处在干湿交替的消落带上,175m高程落干期平均排放通量为

$97.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,淹水期为  $85.78 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ; 155m高程落干期N<sub>2</sub>O的平均排放通量为  $60.45 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,淹水期为  $40.96 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,两个高程处落干期的N<sub>2</sub>O排放均大于淹水期,说明消落带在淹水条件下会抑制N<sub>2</sub>O的排放.

180m高程2010年10月~2011年8月的N<sub>2</sub>O平均排放通量为  $-16.21 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,表现为大气N<sub>2</sub>O的汇,而2011年10月~2012年8月的N<sub>2</sub>O平均排放通量又增至  $67.54 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,年际变化差异显著( $P < 0.05$ ); 175m高程2010年8月~2011年7月的N<sub>2</sub>O年平均排放通量为  $105.84 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,2011年8月~2012年7月的N<sub>2</sub>O年平均排放通量为  $95.10 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,年际变化差异不明显; 155m高程从2011年4~8月的N<sub>2</sub>O平均排放通量为  $33.20 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,次年同时段的N<sub>2</sub>O平均排放通量为  $35.34 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,年际变化差异也不明显. 表明库区消落带上的N<sub>2</sub>O排放受年际变化的影响较小,而陆地N<sub>2</sub>O的产生及排放对环境条件的变化更加敏感,淹水可以提高环境要素的稳定性.

表1 库区消落带不同高程处N<sub>2</sub>O平均季节排放通量<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$

Table 1 Average N<sub>2</sub>O seasonal fluxes from different heights in the drawdown area of Three Gorges Reservoir/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$

高程/m	春	夏	秋	冬
180	54.31 ± 36.38a	66.14 ± 25.01a	89.67 ± 109.89a	66.89 ± 96.84a
175	28.87 ± 45.63b	139.29 ± 67.46ab	61.69 ± 50.47ab	154.09 ± 80.65a
155	2.56 ± 13.45b	12.58 ± 21.21ab	48.54 ± 94.46a	58.01 ± 45.38a

1) 表中小写字母代表同一高程处不同季节间N<sub>2</sub>O排放通量的差异显著性

## 2.2 库区N<sub>2</sub>O排放的高程变化

采用2011年4月~2012年3月间的观测数据进行不同高程间的N<sub>2</sub>O排放差异分析,图3表明,高程越小,N<sub>2</sub>O平均排放通量范围越集中. 180m高程处全年N<sub>2</sub>O排放通量异常值少,基本符合标准正态分布,但数据不够集中,波动性较大; 175m高程的N<sub>2</sub>O排放通量最大,数据呈右偏态分布; 155m处N<sub>2</sub>O排放通量较175m处更为集中,通量范围更小,排放情况更加稳定,也是右偏态分布.

从2011年4月~2012年3月,消落带上不同高程N<sub>2</sub>O的年累积排放量为175m( $853.92 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) > 155m( $324.69 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ),消落带上高高程的N<sub>2</sub>O排放显著大于低高程( $P < 0.05$ ); 180m高程处N<sub>2</sub>O的累积排放量为  $336.69 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,显著低于175m高程,而与155m高程差异不明显. 不同高程处的N<sub>2</sub>O排放差

异说明土壤每年周期性的短期淹水会促进N<sub>2</sub>O向大气排放,但淹水期过长又会抑制N<sub>2</sub>O排放.

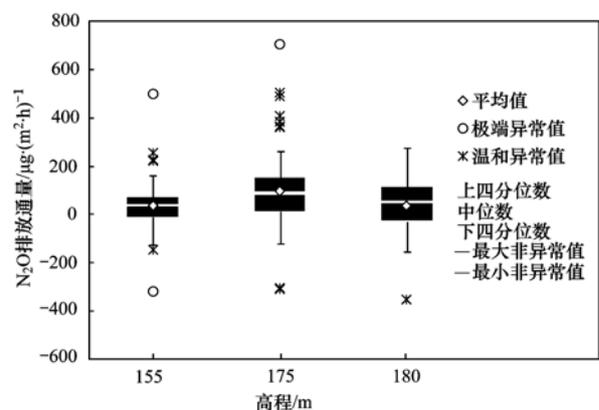


图3 消落带不同高程处N<sub>2</sub>O的排放情况

Fig. 3 N<sub>2</sub>O fluxes from the different heights in drawdown area of Three Gorges Reservoir

### 2.3 库区N<sub>2</sub>O排放的影响因素

分别将 180、175 和 155 m 高程处 N<sub>2</sub>O 排放通量与其对应的土壤或水体环境因子进行相关性分析,结果显示陆地和消落带落干期内的 N<sub>2</sub>O 排放与各环境因子间相关性较弱,只有消落带淹水期内的 N<sub>2</sub>O 排放受水体温度的影响显著 ( $r = -0.41, P < 0.01$ ).

由于影响 N<sub>2</sub>O 排放的各因素间彼此间存在着相互关系,因此本文引进主成分分析来研究这些因素间的关系.如表 2 所示,影响消落带淹水期 N<sub>2</sub>O 排放的有 3 个因子,累积贡献比达到 77.35%.其中因子 1 方差百分比占到 31.68%,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、DTN 和 DON 与因子 1 显著相关,主要体现了水体中可溶性氮素的分布状况;因子 2 方差百分比为 29.68%,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DOC、DON、水体 pH 和水温与因子 2 显著相关;因子 3 方差百分比为 15.99%,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及水温与因子 3 显著相关.影响库区消落带落干期 N<sub>2</sub>O 排放的主要因子也为 3 个,总的方差贡献率达到 77.84%.因子 1 方差百分比占到 33.55%,DOC、SMBC、SOC、TN 及地下 5 cm 温度与因子 1 显著相关,主要反映土壤营养状况和微生物活性;因子 2 方差百分比为 29.44%,SOC、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、土壤 pH 和含水率与因子 2 显著

相关;因子 3 方差百分比为 14.85%,DOC、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、土壤 pH 和含水率与因子 3 显著相关.影响 180 m 高程处陆地 N<sub>2</sub>O 排放的因子有 5 个,总的贡献率达到 74.34%.因子 1 方差百分比为 25.44%,DOC、DON、SMBC、SMBN、SOC、土壤温度和含水率与因子 1 显著相关,主要体现了土壤微生物活性;因子 2 方差百分比为 17.42%,DON、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及土壤 pH 与因子 2 显著相关,主要是体现了土壤的氮素水平;因子 3 方差百分比为 11.60%,DOC、DON、TN、SOC、土壤温度及含水率与因子 3 显著相关;因子 4 方差百分比占到 10.50%,DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SOC 及土壤含水率与因子 4 显著相关;因子 5 方差百分比为 9.42%,DON、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、SOC、土壤 pH 及含水率与因子 5 显著相关.

对影响陆地 N<sub>2</sub>O 排放的因子进行逐步线性回归分析得到,因子 1 是消落带淹水期 N<sub>2</sub>O 排放的显著影响因子 ( $r = 0.34, P < 0.05$ ),关系式为 N<sub>2</sub>O 平均排放通量 = 32.23 - 22.24 × 因子 1;而消落带落干期 N<sub>2</sub>O 的排放则受到因子 2 的显著影响 ( $r = 0.42, P < 0.05$ ),表达式为 N<sub>2</sub>O 平均排放通量 = 84.84 - 49.55 × 因子 2;陆地 N<sub>2</sub>O 平均排放通量 = 69.88 + 17.06 × 因子 3 ( $r = 0.40, P < 0.05$ ).

表 2 陆地、消落带淹水期和消落带落干期各环境因素对 N<sub>2</sub>O 排放影响的主成分分析<sup>1)</sup>

Table 2 Principal component analysis of the environmental variables for N<sub>2</sub>O emission in the land, flooding and drainage periods of the drawdown area in Three Gorges Reservoir

淹水期	因子 1	因子 2	因子 3	落干期	因子 1	因子 2	因子 3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.13	0.59**	-0.53**	DOC	0.65**	-0.18	-0.62**
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.74**	0.44**	0.13	SMBC	0.87**	-0.09	0.37
DOC	0.12	0.80**	0.20	SOC	0.78**	0.46*	-0.23
DTN	0.99**	-0.13	0.10	TN	0.77**	0.36	-0.06
DON	0.77**	-0.52**	0.08	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.21	0.78**	0.38
水体 pH	-0.14	-0.72**	0.17	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.24	-0.79**	0.42*
水温	-0.23	0.32*	0.86**	土壤 pH	-0.31	0.70**	-0.51**
				土壤含水率	-0.20	0.74**	0.45*
				地下 5 cm 温度	-0.63**	0.10	0.16
方差贡献/%	31.68	29.68	15.99	方差贡献/%	33.55	29.44	14.85
陆地	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5		
DOC	-0.42**	-0.05	0.55**	0.19*	-0.26		
SMBC	0.86**	-0.07	-0.03	-0.20	-0.18		
DON	0.32*	0.52**	-0.32*	-0.12	0.44**		
SMBN	0.88**	0.16	0.08	0.05	-0.02		
TN	-0.04	0.37*	0.70**	-0.19	0.35*		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.09	0.50**	0.06	0.51**	-0.30*		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.10	0.81**	-0.07	-0.18	0.16		
土壤 pH	0.14	-0.70**	-0.02	-0.20	0.39**		
土壤含水率	0.40**	-0.27	0.45**	0.48**	0.45**		
土壤温度	-0.83**	0.22	-0.04	0.07	0.21		
SOC	0.35*	0.04	-0.40**	-0.67**	-0.33*		
方差贡献/%	25.44	17.42	11.60	10.50	9.42		

1) \* 代表在 0.05 水平上达到显著, \*\* 代表在 0.01 水平上达到显著

在主成分分析的基础上进一步计算各环境因素对 $N_2O$ 排放的贡献值(表3),发现对消落带淹水期 $N_2O$ 排放影响较大的环境因素主要是 $NO_3^-$ -N、DTN和DON,而影响消落带落干期和陆地 $N_2O$ 排放的因

素则比较复杂,各影响因素间的贡献值差异并不是很大,表明消落带落干期和陆地 $N_2O$ 排放除了受土壤碳氮分布的影响外,还与土壤温度、湿度及pH等理化性质密切相关。

表3 陆地、消落带淹水期和消落带落干期各环境因素对 $N_2O$ 排放的贡献值  
Table 3 Contribution values of the environmental variables for  $N_2O$  emission in the land, flooding and drainage periods of the drawdown area in Three Gorges Reservoir

淹水期	直接贡献值	总贡献值	落干期	直接贡献值	总贡献值	陆地	直接贡献值	总贡献值
$NO_3^-$ -N	0.12	0.23	SMBC	0.05	0.13	SOC	0.08	0.11
DTN	0.09	0.22	SOC	0.04	0.12	SMBC	0.04	0.10
DON	0.10	0.20	DOC	0.06	0.12	TN	0.07	0.10
水温	0.11	0.12	$NO_3^-$ -N	0.05	0.12	SMBN	0.04	0.10
DOC	0.04	0.09	土壤 pH	0.06	0.12	土壤含水率	0.08	0.10
$NH_4^+$ -N	0.08	0.06	$NH_4^+$ -N	0.05	0.11	土壤温度	0.04	0.10
水体 pH	0.03	0.01	含水率	0.05	0.11	$NO_3^-$ -N	0.05	0.09
			TN	0.04	0.10	土壤 pH	0.05	0.09
			地下 5 cm 温度	0.02	0.06	$NH_4^+$ -N	0.05	0.08
						DON	0.06	0.08
						DOC	0.05	0.07

### 3 讨论

#### 3.1 不同高程 $N_2O$ 排放的时间变化规律

不同地区水库的 $N_2O$ 排放情况并不相同,有些表现为源,有些表现为汇,但基本都有明显的季节变化规律<sup>[14,20,21]</sup>。连续观测的2 a期间,175 m高程处第一年 $N_2O$ 排放表现为夏季单峰态,次年却呈现出了夏季主高峰和落干初期次高峰的双峰态;而155 m高程处只表现出了 $N_2O$ 的夏季排放高峰。消落带上175 m和155 m高程处在夏季落干期都出现了 $N_2O$ 的排放高峰,主要是因为夏季土壤温度较高,降水丰富,植物生长茂盛,适宜的温度和较高的土壤含水量使得微生物代谢旺盛,有利于土壤微生物硝化和反硝化作用的加强,主成分分析表明,落干期土壤 $N_2O$ 排放受土壤碳氮含量以及土壤温度、湿度等因素的综合影响和制约,夏季上述环境因素的升高有利于促进 $N_2O$ 的排放;除此之外,夏季水库水位的下降更有利于 $N_2O$ 排放<sup>[22]</sup>。万晓红等<sup>[23]</sup>在白洋淀湿地的湖心区、湖滨带和陆地区进行了近1年的 $N_2O$ 排放观测,发现各区均出现了 $N_2O$ 的夏季排放高峰;方芳等<sup>[14]</sup>对三峡库区忠县境内消落带的 $N_2O$ 排放调查显示6~8月消落带的土壤 $N_2O$ 排放较高,李红丽等<sup>[24]</sup>也发现玉渡山水库消落带8月 $N_2O$ 排放通量最大,均与本研究结果一致。早期的水稻田的大量研究表明,短期的干湿交替能促进 $N_2O$ 的高排放<sup>[25]</sup>,主要是因为土壤落干时土壤通透性大大增强,土壤含水量适中,Eh较高,土壤中的硝化和反硝

化作用都能以较高速率进行且以 $N_2O$ 为主要产物<sup>[26]</sup>。但175 m高程在实验观测的第一年并未出现这么一个排放高峰,而是在第二年落干初期才出现了一个明显的 $N_2O$ 排放高峰(图1),这是因为三峡水库在实验观测的第一年还没有达到175 m蓄水位,直到2012年才正式达到三峡水库设计的175 m最高蓄水位。尽管都处在消落带上,但155 m高程并没有出现干湿交替导致的 $N_2O$ 排放高峰(图1),这是因为155 m高程处淹水期过长,在流水的长期冲刷下造成了土壤中营养物质的大量流失,土壤氨氮和硝氮含量较低,植物难以存活生长,即使土壤出露水面后水分条件适宜 $N_2O$ 的产生和排放,但由于缺少微生物活动的底物, $N_2O$ 的生成受阻;而且持续淹水的土壤处于缺氧和强还原状态,反硝化产生的 $N_2O$ 更易被还原为 $N_2$ <sup>[25,26]</sup>。

除夏季外,175 m和155 m高程处冬季 $N_2O$ 排放也较高(表1)。消落带上冬季是淹水期,其 $N_2O$ 排放高的原因主要有两个,一方面水库蓄水和生物体的衰亡给支流带来了丰富的有机物,为微生物活动提供了丰富的氮源,主成分分析表明,淹水期水体 $N_2O$ 排放主要受水体中可溶性氮素的影响,水体中可溶性氮含量越高, $N_2O$ 排放也就越高。且蓄水时水体受到扰动,水中 $N_2O$ 更容易扩散到大气中去;另一方面,研究区域位于亚热带季风气候区,冬季温度一般在零度以上,既不会形成冰面抑制 $N_2O$ 的传输,也不会对微生物活性起到抑制作用。这与Liu等<sup>[10]</sup>在乌江渡和洪家度水库开展有关水库 $N_2O$ 排放的研究

结果一致,王亮等<sup>[27]</sup>对三峡水库香溪河库N<sub>2</sub>O排放的调查也显示,冬季N<sub>2</sub>O排放最高.另外,季节变化分析表明,消落带内N<sub>2</sub>O排放通量落干期要高于淹水期(图1).一方面干湿交替能增加土壤N<sub>2</sub>O的排放;另一方面水库在秋季开始蓄水,蓄水的20 d内消落带植物会向水体释放大量TN<sup>[24]</sup>,造成大量的氮素损失,真正回归到土壤进行硝化/反硝化作用的很少,再加上环境温度的降低和土壤含水率的增加都会使得N<sub>2</sub>O的产生减少,而且N<sub>2</sub>O在空气中传输的速率是其在空中传输速率的10<sup>4</sup>倍<sup>[14]</sup>,使得N<sub>2</sub>O在土壤中滞留时间延长,土壤淹水期的N<sub>2</sub>O排放偏低.Cheng等<sup>[28]</sup>在中国东部滨海湿地不同淹水状况下N<sub>2</sub>O的排放研究同样表明,非淹水土壤的N<sub>2</sub>O释放速率要高于淹水土壤;墨西哥湾海岸N<sub>2</sub>O排放的研究也发现,沉积物在长期排干的情况下N<sub>2</sub>O的排放将增加<sup>[29]</sup>,说明在自然状态下淹水期过长会抑制N<sub>2</sub>O排放,均与本研究结果吻合.

### 3.2 不同高程间N<sub>2</sub>O排放差异

本研究中175 m高程N<sub>2</sub>O排放最高,180 m高程次之,155 m高程排放最低.175 m由于处于消落带上的较高位置,淹水时间较短,如上所述,短期的淹水落干后则会刺激土壤中N<sub>2</sub>O的大量排放;另一方面,175 m高程处植被发育良好,可为土壤微生物提供丰富的底物供应;另外,相对于180 m高程处较干和155 m高程处长期淹水的土壤环境,175 m高程处的土壤水分环境可能更为适合土壤硝化和反硝化反应的进行.155 m高程处在消落带的较低位置,长期淹水,土壤中的营养元素比较贫瘠<sup>[30]</sup>,植物的存活时间短且生长发育状态不良,这些因素都不利于N<sub>2</sub>O的生成和排放.有研究发现三峡库区消落带内沉积物中的总可转化态氮(TF-N)含量与水位高程呈正相关,随高程增加,地表出露时间越长越有利于沉积物中TF-N含量的增加<sup>[31]</sup>,而在淹水期这部分氮会向水体释放<sup>[32]</sup>;另外,林俊杰等<sup>[33]</sup>在三峡库区消落带的研究还发现,消落带土壤总氮和硝态氮在高水位高程含量更高,而在低水位高程含量较低,在相同培养温度下,硝化和净氮矿化速率均表现为随水位高程增加而增加.根据本研究主成分分析的结果,水体和土壤氮含量的升高能够促进N<sub>2</sub>O的生成和排放.王洪君等<sup>[34]</sup>对太湖秋冬两季植被型湖滨带N<sub>2</sub>O排放的研究显示,从水体到陆地的N<sub>2</sub>O排放先逐渐升高,至水位变幅区的中心位置达到最高,再进入陆向辐射区又逐渐降低,与本研究结果相似.

与180 m高程对照相比,175 m高程的短期淹

水促进了N<sub>2</sub>O排放,而155 m高程的长期淹水则抑制了N<sub>2</sub>O排放.可能主要由以下两个原因所致:一是淹水时间过长导致土壤含水量高、氧化还原电位低,这种厌氧环境下N<sub>2</sub>O易被还原为N<sub>2</sub>,而且土壤中的含水量过大,会形成水膜,阻碍N<sub>2</sub>O向大气中扩散<sup>[28]</sup>;二是淹水时间长短也会影响植物的生长和发育,Hirota等<sup>[35]</sup>发现夏季盐沼N<sub>2</sub>O排放通量的空间变异主要与地上生物量有关.2012年6月22日测得175 m处生物量为315.20 g·m<sup>-2</sup>,155 m处却仅为105.56 g·m<sup>-2</sup>,较高的生物量可为土壤固定更多的可利用性基质<sup>[22]</sup>.方芳等<sup>[14]</sup>在研究三峡库区消落带的N<sub>2</sub>O排放规律时发现,170 m高程处的N<sub>2</sub>O排放要高于160 m高程;另外,Wang等<sup>[36]</sup>对夏季长江口潮间带N<sub>2</sub>O排放通量的研究表明,中潮滩沼泽是大气N<sub>2</sub>O的释放源,而低潮滩平地则为大气N<sub>2</sub>O的汇;三江平原沼泽湿地N<sub>2</sub>O排放观测也发现,季节性积水的小叶章草甸N<sub>2</sub>O排放高于常年积水的毛果苔草沼泽<sup>[37]</sup>.以上研究均表明,淹水时间的长短是控制土壤N<sub>2</sub>O排放的一个重要因素.

### 3.3 库区消落带N<sub>2</sub>O排放的影响因素

土壤N<sub>2</sub>O排放是众多因素共同作用的结果,如土壤温度、含水率、无机氮、有机碳、土壤质地和结构、水深、水位变化、溶解氧、水温、风速、pH和植被生长状况等<sup>[38]</sup>.本研究通过相关分析发现库区消落带淹水期N<sub>2</sub>O排放通量与水温呈极显著负相关关系,一般来说水体温度越高,微生物活性越强,N<sub>2</sub>O应该越容易生成并扩散到大气;但同时水体各种动物、藻类及浮游生物也在快速生长,温度越高,生长繁殖越旺盛,水体氧气和营养物质的消耗越多,水体厌氧程度就越大,且微生物活动又缺少充足底物,导致N<sub>2</sub>O排放偏低.王亮等<sup>[27]</sup>也发现三峡水库水面N<sub>2</sub>O排放与水温成负相关.

本研究分别对陆地、消落带淹水期和消落带落干期N<sub>2</sub>O排放的影响因素进行了主成分分析,结果显示消落带淹水期的N<sub>2</sub>O排放受库区水体氮素分布的影响最多,而陆地和消落带落干期的N<sub>2</sub>O排放则主要由土壤的碳氮情况、微生物活性和一些物理性质共同决定.Chen等<sup>[4]</sup>在三峡库区澎溪河区选取了四种典型的新生湿地以研究消落带落干期N<sub>2</sub>O的排放状况,发现影响消落带落干期N<sub>2</sub>O排放的主要因素为土壤的碳、氮分布情况,土壤湿度及温度等,并受土壤氮素的影响最为显著,与本研究结果相似.

## 4 结论

(1)各高程处的N<sub>2</sub>O排放有明显的季节性,180

m 高程处春季 $N_2O$ 排放最低; 175 m 高程处呈现出干湿交替和夏季 $N_2O$ 排放的双高峰, 而 155 m 高程处则只表现为夏季高 $N_2O$ 排放的单峰型。位于消落带上的 175 m 高程和 155 m 高程在落干期的 $N_2O$ 排放均大于淹水期, 说明消落带在淹水条件下会抑制 $N_2O$ 的排放。

(2) 不同高程之间 175 m 高程上 $N_2O$ 排放最高, 155 m 高程处最低, 与 180 m 高程对照相比, 表明在消落带上短期淹水会促进 $N_2O$ 排放, 而淹水时间过长则会抑制 $N_2O$ 排放。

(3) 主成分分析表明, 消落带淹水期水体中可溶性氮素的分布是影响水面 $N_2O$ 排放的最主要因素, 而消落带落干期及陆地则是受土壤碳氮含量、土壤温度、湿度及 pH 等因素的共同影响和制约。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere[A]. In: Bouwman A F (Ed. ). Soils and the Greenhouse Effect [ M ]. Chichester: Wiley & Dond, 1990. 60-66.
- [ 2 ] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 $N_2O$ 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7 (3): 273-279.
- [ 3 ] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al (Eds. ). Climate Change 2007: The Physical Science Basis [ M ]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 499-587.
- [ 4 ] Chen H, Yuan X Z, Gao Y H, et al. Nitrous oxide emissions from newly created littoral marshes in the drawdown area of the three gorges reservoir, China[J]. Water, Air, & Soil Pollut, 2010, 211(1-4): 25-33.
- [ 5 ] Diem T, Koch S, Schwarzenbach S, et al. Greenhouse gas emissions ( $CO_2$ ,  $CH_4$ , and  $N_2O$ ) from several perialpine and alpine hydropower reservoirs by diffusion and loss in turbines [J]. Aquatic Sciences, 2012, 74(3): 619-635.
- [ 6 ] Mengis M, Gächter R, Wehrli B. Sources and sinks of nitrous oxide ( $N_2O$ ) in deep lakes [J]. Biogeochemistry, 1997, 38 (3): 281-301.
- [ 7 ] Wang S L, Liu C Q, Yeager K M, et al. The spatial distribution and emission of nitrous oxide ( $N_2O$ ) in a large eutrophic lake in eastern China: anthropogenic effects[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(10): 3330-3337.
- [ 8 ] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, et al. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, 52(3): 609-621.
- [ 9 ] Guérin F, Abril G, Tremblay A, et al. Nitrous oxide emissions from tropical hydroelectric reservoirs[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(6): L06404.
- [ 10 ] Liu X L, Liu C Q, Li S L, et al. Spatiotemporal variations of nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions from two reservoirs in SW China [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(31): 5458-5468.
- [ 11 ] Chen N W, Chen Z H, Wu Y Q, et al. Understanding gaseous nitrogen removal through direct measurement of dissolved  $N_2$  and  $N_2O$  in a subtropical river-reservoir system [J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 56-67.
- [ 12 ] Jørgensen C J, Elberling B. Effects of flooding-induced  $N_2O$  production, consumption and emission dynamics on the annual  $N_2O$  emission budget in wetland soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 53: 9-17.
- [ 13 ] Zhu D, Chen H, Yuan X Z, et al. Nitrous oxide emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. Ecological Engineering, 2013, 60: 150-154.
- [ 14 ] 方芳, 孙志伟, 高红涛, 等. 三峡库区消落带土壤 $N_2O$ 排放及反硝化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 287-293.
- [ 15 ] 杜立刚, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡库区城市消落带生态规划与保护探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 726-731.
- [ 16 ] Musenze R S, Grinham A, Werner U, et al. Assessing the spatial and temporal variability of diffusive methane and nitrous oxide emissions from subtropical freshwater reservoirs [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24): 14499-14507.
- [ 17 ] 李梦婕, 江韬, 何仁江, 等. 三峡库区典型农田小流域水化学特征及变化规律[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1062-1068.
- [ 18 ] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统  $CH_4$  和 $N_2O$ 排放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 1979-1986.
- [ 19 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 228-233.
- [ 20 ] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. Biogeosciences, 2013, 10(2): 1219-1230.
- [ 21 ] Yang L, Lu F, Zhou X P, et al. Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 204-212.
- [ 22 ] 孙志高, 牟晓杰, 王玲玲. 滨海湿地生态系统 $N_2O$ 排放研究进展[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 159-164.
- [ 23 ] 万晓红, 王雨春, 陆瑾, 等. 白洋淀湿地氮素转化和 $N_2O$ 排放特征研究[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1168-1174.
- [ 24 ] 李红丽, 杨萌, 张明祥, 等. 玉渡山水库生长季温室气体排放特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 406-412.
- [ 25 ] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 $N_2O$ 排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 495-499.
- [ 26 ] 徐华, 邢光喜, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 $N_2O$ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 186-188.
- [ 27 ] 王亮, 王雨春, 段玉杰, 等. 三峡水库香溪河库湾水-气界面

- N<sub>2</sub>O通量特征[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, **34**(1): 14-18.
- [28] Cheng X L, Peng R H, Chen J Q, *et al.* CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in experimental mesocosms[J]. Chemosphere, 2007, **68**(3): 420-427.
- [29] Smith C J, Delaune R D, Patrick Jr W H. Nitrous oxide emission from Gulf Coast wetlands[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, **47**(10): 1805-1814.
- [30] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(7): 1236-1244.
- [31] 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 等. 鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 87-93.
- [32] 林俊杰, 张帅, 杨振宇, 等. 干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2459-2464.
- [33] 林俊杰, 张帅, 刘丹, 等. 季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 697-702.
- [34] 王洪君, 王为东, 卢金伟, 等. 湖滨带温室气体氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 270-275.
- [35] Hirota M, Senga Y, Seike Y, *et al.* Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan[J]. Chemosphere, 2007, **68**(3): 597-603.
- [36] Wang D Q, Chen Z L, Wang J, *et al.* Summer-time denitrification and nitrous oxide exchange in the intertidal zone of the Yangtze Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, **73**(1-2): 43-53.
- [37] Jiang C S, Wang Y S, Hao Q J, *et al.* Effect of land-use change on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from freshwater marsh in northeast China[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(21): 3305-3309.
- [38] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2377-2384.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行