ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 33 卷 第 10 期
2012 年 10 月 15 日

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,李堃(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 …… 聂海峰,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_2O_2 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,张予荫,李克宇(3529)
厌氧污泥降解萘动力学与生物多样性研究 …… 曹新垲,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)对鲱鱼精 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_2O 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,张智烨,张忠明,焦茹媛,王瑞军(3662)
大气 O_3 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)

华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究

裴淑玮[1], 张圆圆[2], 刘俊锋[2], 伦小秀[1*], 牟玉静[2*]
(1. 北京林业大学环境科学与工程学院,北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要: 以华北地区冬小麦-夏玉米轮作农田为研究对象,运用静态箱法对正常施肥及正常施肥结合秸秆还田农田 N_2O 交换通量进行了连续 1 a 对比研究. 正常施肥及正常施肥结合秸秆还田样地 N_2O 全年的累积排放量分别为 7.61 kg·hm^{-2}和 12.6 kg·hm^{-2},其中秸秆还田引起 N_2O 排放明显增加主要发生在玉米生长季节. 两种处理样地在玉米季 N_2O 的排放量占全年累积排放的 57% ~86%,表明华北玉米-小麦轮作体系中 N_2O 排放主要集中在玉米季. 各次施肥后 10 d 内 N_2O 的累积排放量约占全年总排放量的 71% ~88%,显然现有化肥极大促进了华北农田 N_2O 排放.

关键词:氧化亚氮; 施肥; 秸秆还田; 玉米-小麦轮作田; 华北平原
中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)10-3641-06

N_2O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain

PEI Shu-wei[1], ZHANG Yuan-yuan[2], LIU Jun-feng[2], LUN Xiao-xiu[1], MU Yu-jing[2]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: N_2O exchange fluxes from the intensively cultivated winter wheat-summer maize crop rotation system in the North China Plain were measured by the static chamber technique under normal fertilization treatment and normal fertilization combined with straw returning treatment. The results indicated that the cumulative emissions of N_2O from normal fertilization treatment and normal fertilization combined with straw returning treatment were 7.61 kg·hm^{-2} and 12.6 kg·hm^{-2}, respectively. The increased N_2O from the straw returning mainly occurred during the maize growing season. The N_2O emission during the maize growing season from the two fertilization treatments accounted for 57%-86% of the annual N_2O cumulative emission, which indicated that the annual emission of N_2O mainly occurred during the maize growing season. Total N_2O emission after 10 days of each fertilization accounted for about 71%-88% of the annual emission. It is obvious that the application of existing chemical fertilizers greatly promoted the N_2O emissions in the North China Plain.

Key words: nitrous oxide; fertilization; straw returned; maize-wheat crop rotation; North China Plain

N_2O 是大气中一种非常重要的痕量气体,对全球变暖及臭氧层破坏均有十分重要的贡献[1]. 农业生态系统是 N_2O 的重要排放源,其直接或间接的 N_2O 排放量达 9.7 Tg·a^{-1},占人为排放量的 60% ~70%[2]. 大量研究表明农田 N_2O 排放与氮肥施用有显著的相关关系,目前 IPCC 所报道肥料产生的 N_2O-N 占施氮量的比例在 0.3% ~3% 范围内[3]. 此外,影响农田 N_2O 排放的因素很多,主要有土壤性质、环境因素和农业管理措施等[4~8]. 秸秆还田作为提升土壤有机质及保水保肥能力的一项有效措施目前在我国得到了广泛的应用,但关于该措施对农田 N_2O 排放的影响具有两种完全相反的结论,有研究发现秸秆腐解过程产生的化感物质(苯甲酸和对叔丁基苯甲酸)会抑制 N_2O 的产生[9],但也有研究认为秸秆添加后会增加 N_2O 产生量[10]. Huang 等[11]研究认为秸秆添加后会增加土壤中碳氮的比值,而 N_2O 的排放量随土壤 C/N 值的增加而减小. 为认识秸秆还田对 N_2O 排放的影响,本研究以华北平原地区广泛采用的冬小麦-夏玉米轮作农田为对象,对正常施肥及正常施肥结合秸秆还田处理下的 N_2O 交换通量进行了连续 1 a 的对比研究,以期为评估施肥及秸秆还田处理对整个轮作生态系统 N_2O 排放提供新的科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验场地概况

收稿日期: 2011-12-27; **修订日期**: 2012-03-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(41075094, 20977097, 40830101); 国家环境保护公益性行业科研专项(201009001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732304)
作者简介: 裴淑玮(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为农田温室气体及含氮气体排放及减排措施,E-mail: peishuwei@126.com
* 通讯联系人, E-mail: lunxiaoxiu@bjfu.edu.cn; yjmu@rcees.ac.cn

试验地位于河北省望都县(38° 71′ N, 115°15′E),该地区农田常年实行冬小麦-夏玉米轮作方式. 土壤质地为砂壤质潮褐土,pH 为 8.1(土水比为 1∶2.5),土壤有机碳含量为 8.34 ~ 9.43 $g\cdot kg^{-1}$,总氮含量为 1.02 ~ 1.09 $g\cdot kg^{-1}$. 该试验地位于华北北部地区,属北温带半干旱季风气候. 夏季炎热多雨,7 月平均气温 26.5℃; 冬季寒冷干燥,1 月平均气温 -4.1℃. 近 10 年的年平均气温 12.3℃,年平均降水量约 555 mm,年平均日照 2 580 h.

试验地进行了 3 种处理:①控制地(CK):不进行施肥,灌溉时间及灌溉水量与其它处理相同;②施肥样地(CF):进行表面施肥和灌溉处理; ③秸秆还田样地(SN):除进行表面施肥和灌溉处理外,还将秸秆粉碎后地面覆盖. 每个试验样地面积为 6.5 × 3.5 m^2. 作物耕作完全按照当地农民耕作方式进行,选用的复合肥均不含硝态氮. 2010 年 6 月中下旬点播玉米,并于 2010-06-30 以复合肥作为底肥(412 $kg\cdot hm^{-2}$,N∶P_2O_5∶K_2O = 26%∶6%∶8%)对 CF 及 SN 样地进行表施及灌溉,麦秆还田量为 4.3 $t\cdot hm^{-2}$(麦秆含 N 量 0.48%),玉米拔节期(2010-08-06)进行追肥(276 $kg\cdot hm^{-2}$,N∶K_2O = 25%∶5%)并灌溉. 玉米收获后播种小麦,2010-10-17 以复合肥作为底肥(333 $kg\cdot hm^{-2}$,N∶P_2O_5∶K_2O = 18%∶18%∶18%)对 CF 及 SN 样地进行表施及灌溉,玉米秸秆还田量为 12.3 $t\cdot hm^{-2}$(玉米秸秆含 N 量 0.6%),2011-11-21 日进行越冬期灌水,小麦拔节期(2011-04-13)进行追肥(525 $kg\cdot hm^{-2}$,N∶S = 20%∶22%)和灌溉,并于 2011-05-22 再次进行灌溉.

1.2 试验设计、样品采集及分析方法

N_2O 交换通量的研究采用静态箱法,箱体尺寸为 60 cm × 60 cm × 90 cm,带有水槽的不锈钢底座插入土壤 10 cm 深. CK 地设置 2 个重复,CF 及 SN 样地分别设置 3 个重复. 为获得施肥对 N_2O 排放影响的详细信息,样地在每次施肥后进行连续 10 d 通量测定,1 月土壤处于冰冻时期,仅测定通量 1 次,其余时间每隔 2 ~ 3 d 进行 1 次. 气体样品在每个采样箱罩上每间隔 10 min 采集 1 次,共采集 4 次,用于每个通量的测定. 气体样品的采集是通过气体采样泵(NMP 830 KNDC, 德国)将箱内气体收集于 200 mL 带有聚乙烯涂层的铝箔采样袋(大连,德霖)内. 试验过程中同时记录大气温度、土壤温度和大气压等参数.

N_2O 的浓度通过带有电子捕获检测器(ECD)的气相色谱仪(GC,SP3410,北京分析仪器厂)进行分析,具体色谱条件参见文献[12,13]. 为了更准确地分析 N_2O 的浓度,每 3 个样品测定后穿插一个标准 N_2O 气体测定. 2 个标准气体样品间的变异系数一般小于 0.5%.

试验中还对 0 ~ 5 cm 土壤孔隙含水率(WFPS)及 0 ~ 10 cm 土壤NH_4^+-N和NO_3^--N 的浓度进行了测定,具体测定方法参见文献[12,13].

1.3 数据分析处理方法

排放因子(EF) = (施肥样地 N_2O 累积排放量 - 控制地 N_2O 累积排放量)/施氮量 × 100%,

其中施氮量包括化肥施氮量及秸秆施氮量.

累积排放量的计算采用线性内插法,以观测数值作为当日平均交换通量,然后通过累加计算各季及全年的累积排放量. N_2O 交换通量与影响因素间的相关性分析采用 SPSS 16.0 进行分析.

2 结果与分析

2.1 控制地 N_2O 交换通量

图 1(a)是控制地 N_2O 交换通量在全年的变化特征. 图 2 为各处理下土壤 WFPS、温度及降水量在全年的变化. 从图 1(a)可以看出控制地 N_2O 的交换通量具有较大的波动,变化范围在 -12.7 ~ 62.1 $ng\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$之间. N_2O 交换通量的增加多发

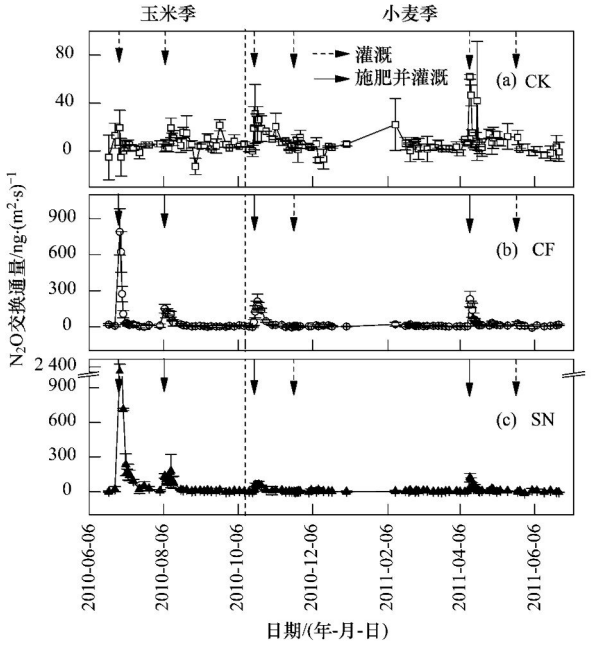

图 1 2010 ~ 2011 年 CK、CF 及 SN 样地 N_2O 的交换通量

Fig. 1 Exchange fluxes of N_2O from CK, CF and SN plots during 2010 and 2011

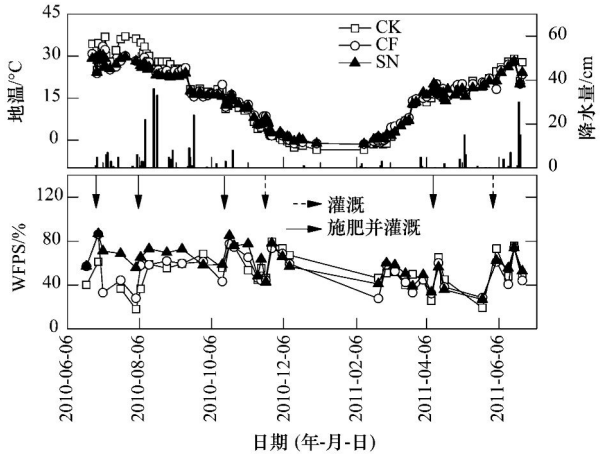

图 2　2010～2011 年 CK、CF 及 SN 样地土壤温度、降水量及 WFPS 变化

Fig. 2　Variation of soil temperature, precipitation and WFPS in CK, CF and SN plots during 2010 and 2011

生在降水或灌溉后的 1～4 d. 玉米季最高的 N_2O 排放通量为 21.5 ng·(m²·s)⁻¹出现在 2010-09-21 的降水后. 受灌溉及降水影响 2010-07-01 及 2010-08-12 也表现出较高的排放通量分别为 19.5 ng·(m²·s)⁻¹和 19.3 ng·(m²·s)⁻¹. 小麦季的最高排放通量为 62.1 ng·(m²·s)⁻¹出现在 2011-04-13 的灌溉后,此前 WFPS<25%. 其它 3 次灌溉处理后 N_2O 的排放通量也出现升高,但由于灌溉前 WFPS 均高于 46%,N_2O 排放通量的增幅远远小于 2011-04-13 的灌溉. 由此可见,土壤水分含量变化是引起控制地 N_2O 交换通量波动的一个重要因素,土壤水分含量较低时的快速再湿润作用会极大的促进 N_2O 的排放. 12 月～次年 4 月,CK 地 N_2O 的通量较低,一般在 -7.50～9.55 ng·(m²·s)⁻¹范围,但在 2011-02-12 却表现出相对较高的排放通量[22.2 ng·(m²·s)⁻¹],土壤温度在 2011-02-12 前后接近 0℃(约 -3.5℃),且 2 月 9～10 日出现了降雪,此条件下可能有利于冻融交替现象的发生.

2.2　施肥及秸秆还田样地 N_2O 交换通量变化

图 1(b)和 1(c)为 CF 和 SN 样地 N_2O 交换通量在全年中的变化特征. 可见,N_2O 排放的明显增加均发生在施肥后,一般持续约 10 d 左右. CF 和 SN 样地各次施肥后约 10 d 内 N_2O 累计排放量分别占生长季总排放量的 71% 和 88%,显然农田 N_2O 的排放主要源自现有化肥的施用. CF 和 SN 样地全年 N_2O 最高排放均发生在玉米季底肥施用后分别为 791 ng·(m²·s)⁻¹和 1 995 ng·(m²·s)⁻¹. 其它 3 次施肥处理后其排放也均出现明显增加,但最高排放通量都低于玉米季底肥施用后所引起的最高排放通量值. 这可能是由于玉米季底肥施用时的土壤温度为几次施肥的最高值,且此次的施氮量高于其它几次施肥处理.

对比 CF 和 SN 样地 N_2O 累积排放通量,可见玉米季 N_2O 的累积排放量表现为 SN > CF 样地,小麦季表现为 CF > SN 样地(表 2). 玉米季秸秆还田在底肥施用后极大促进了 N_2O 排放,SN 样地 N_2O 的最高排放通量为 CF 样地的 2.5 倍(表 1 和图 1). SN 样地峰值待续时间约 12 d 高于 CF 样地的 8 d,且 SN 样地由于秸秆的覆盖 WFPS 持续高于 CF 样地可能是引起其长时间较高排放的一个主要原因. 玉米追肥后 SN 样地 N_2O 最高排放通量及 WFPS 均略高于 CF 样地,持续时间大致相同. 玉米季两次施肥后 14 d N_2O 平均排放通量也均表现为 SN > CF 样地. 可见玉米季 SN 样地 N_2O 累积排放量明显高于 CF 样地主要是由于底肥施用后 SN 样地受秸秆还田影响持续保持相对较高的 WFPS 引起的. 在小麦季秸秆还田反而在一定程度上抑制了 N_2O 排放(见表 1、表 2、图 1). 小麦季两次施肥时的土壤温度相对较低,CF 与 SN 样地峰值持续时间均相同. 底肥施用后 CF 样地 N_2O 最高排放通量为 SN 样地的 3.4 倍,追肥后 CF 样地 N_2O 最高排放通量为 SN 样地的 1.9 倍. CF 样地小麦季两次施肥后 14 d N_2O 平均排放通量比 SN 样地分别高了 177% 和 82%. 小麦季秸秆添加量约为玉米季的 2.9 倍,由于温度较低,微生物活

表 1　2010～2011 年不同时期施肥处理后 N_2O 的最高排放通量[1)]

Table 1　Highest fluxes of N_2O after fertilization in 2010-2011

项目		施肥后 14 d 地温/℃	最高排放通量/ng·(m²·s)⁻¹		施肥后 14 d 平均排放通量/ng·(m²·s)⁻¹		持续时间/d	
			CF	SN	CF	SN	CF	SN
玉米季	底肥	28	791 ±112	1995 ±428	152 ±65.9	512 ±172	8	12
	追肥	26	150 ±21.1	179 ±101	67 ±12.9	82 ±13.2	14	14
小麦季	底肥	13	211 ±35.5	61.5 ±19.8	99.1 ±17.1	35.8 ±6.09	9	9
	追肥	17	232 ±38.6	122 ±27.4	59.3 ±19.4	32.5 ±10.0	7	7

1) 平均交换通量和累积排放量值均为平均值 ± 标准误差(SE),下同

表 2 2010 ~ 2011 年 N_2O 的平均交换通量,累积排放量和排放因子

Table 2 Average fluxes, accumulation fluxes and emission factors of N_2O in 2010-2011

项目	平均交换通量/ng·(m^2·s)$^{-1}$			累积排放量/kg·hm^{-2}			EF/%	
	CK	CF	SN	CK	CF	SN	CF	SN
玉米季	6.33 ±0.45	43.5 ±10.9	108 ±29.3	0.629 ±0.40	4.37 ±0.20	10.8 ±0.20	1.34	3.30
小麦季	6.43 ±0.48	14.8 ±2.09	7.92 ±0.92	1.41 ±1.65	3.25 ±1.81	1.74 ±0.14	0.71	0.09
全年	6.40 ±0.35	23.8 ±1.32	39.3 ±1.35	2.04 ±0.07	7.61 ±0.24	12.6 ±1.32	1.03	1.54

性可能较低,且 CF 与 SN 样地间 WFPS 相差不大,大量秸秆及氮肥的施用可能引起土壤 C/N 发生变化,对氮素的利用率增强.

3 讨论

3.1 降水、灌溉及冻融交替对 N_2O 排放的影响

降水或灌溉所引起的土壤快速再湿润可能诱发微生物的溶胞作用,或者导致细胞内的溶质释放出来,而这些 C、N 基质随后被微生物快速矿化[14],从而增加了 N_2O 的排放量. Ruser 等[15]认为干湿交替过程中土壤有效 C 含量的增加及相关呼吸作用对 O_2 消耗所导致的厌氧环境是 N_2O 排放的主要原因. 在土壤温度相近的两次灌溉事件中(2010-10-17 和 2011-04-13),2011-04-13 灌溉导致控制地 N_2O 排放峰值比 2010-10-17 高约一倍,而 2010-10-17 灌溉前土壤湿度(WFPS 约为 50%)远高于 2011-04-13 灌溉前的土壤湿度(WFPS 约为 25%),可见干湿交替过程中土壤原有湿度对 N_2O 的交换通量具有重要影响,与 Zhang 等[13]的研究结果一致. Lu 等[16]也认为相对干湿交替过程(降水),土壤温度对 N_2O 交换通量影响较小.

有研究发现冻融交替过程对 N_2O 的排放具有重要影响,Van Bochove 等[17]认为冻融过程对土壤结构的破坏可能使土壤中有效的碳氮基质增加,从而使微生物活性增强,促进 N_2O 的排放. Brooks 等[18]也发现在雪水溶化时,土壤中的微生物量会增加,促进了 N_2O 的排放. 王风等[19]也发现随着冻结时间延长 N_2O 排放通量降低,并在土壤融化初期出现一个土壤 N_2O 排放通量高峰. 冻融交替过程在冬末春初会频繁出现,对华北农田 N_2O 排放可能具有重要贡献,然而由于受通量测定频率限制,本研究仅观测到一次冻融交替过程对 N_2O 排放影响. 因此,关于冻融交替对华北农田 N_2O 的贡献,还需在冬末春初进行高频度通量测定.

3.2 施肥及土壤环境条件对不同生长季 N_2O 排放的影响

CF 及 SN 样地在玉米季底肥施用后 N_2O 最高排放通量比其它三次施肥高约 3.4 ~ 32.5 倍(图 1、表 2). 玉米季底肥施氮量比玉米追肥和小麦底肥量高约 60% ~ 70%,与冬小麦追肥量相当,因此,单独施氮量很难解释各次施肥所造成 N_2O 排放通量间的显著差异. 在本研究中发现 CF 及 SN 样地 N_2O 交换通量与地温间具有显著的正相关关系(n = 109, CF: r = 0.316, SN: r = 0.498, P < 0.01),SN 样地 N_2O 交换通量与 WFPS 间也呈现显著的正相关关系(n = 35, r = 0.381, P < 0.05),与刘运通等[20]研究结果一致. 从图 1 和图 3 也可看出 N_2O 排放通量的增加与土壤硝态氮和氨态氮含量并没有明显的相关关系. 然而,农田每次施肥后立即进行漫灌,每次施肥后短期内土壤湿度应该没有太大差异(处于土壤饱和水分),因此,笔者认为玉米季底肥施用期间较高的土壤温度是 N_2O 排放量显著高的主要原因. 玉米底肥施用期间的土壤温度与追肥期间相近,但玉米底肥施用期间缺乏植物对追加氮素的利用,且底肥施氮量比追肥高 41%,从而导致玉米底肥使用期间相对较高的 N_2O 排放量. 马二登等[21]还发现降水前后追肥也会对 N_2O 的排放通量产生一定影响.

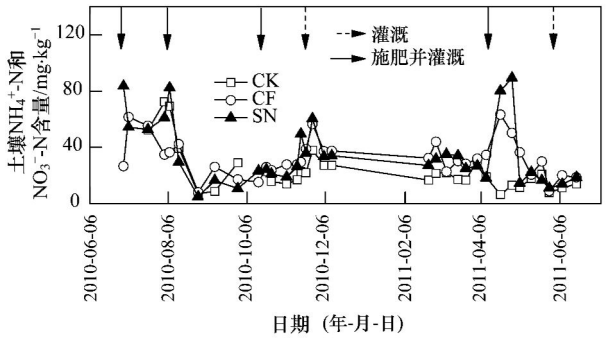

图 3 2010 ~ 2011 年 CK、CF 及 SN 样地土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量变化

Fig. 3 Variation of the content of soil NH_4^+-N and NO_3^--N in CK, CF and SN plots during 2010 and 2011

玉米季和小麦季间 N_2O 累计排放量也存在明显差别(表 2). 虽然小麦生长期约为玉米的 2 倍,但 CF 样地及 SN 样地小麦季 N_2O 的累积排放量仅为玉米季的大约 74% 和 16%(表 2). 除了玉米季总施氮量比小麦季高大约 6% 外,玉米季的平均地温

(约 25℃)和土壤湿度(WFPS 约 68%)比较适合土壤硝化和反硝化过程. 而在小麦季,平均土壤温度(约 8℃)和湿度(WFPS 约 53%)则相对较低,特别是在冬季(1 ~3 月),土壤温度一般低于 0℃,这些条件极大的抑制了微生物硝化和反硝化作用[22]. 因此,较高的施肥量、土壤温度和 WFPS 导致 CF 及 SN 样地在仅占全年大约 1/3 时间的玉米季 N_2O 累积排放量占到了全年总排放量的 57% 和 86%. 与 Dong 等[5]和 Ding 等[6]在华北地区关于施肥样地的研究结果相比(N_2O 累积排放量: 2.4 ~ 7.1 $kg\cdot hm^{-2}$, EF:0.61% ~0.77%),本研究 CF 样地的累积排放量与其研究结果上限接近,但 EF 远高于其结果. SN 样地的 EF 值高于 Zhang 等[12,13]在 2008 及 2009 年所得到的 3.2% 和 1.2%,但仍在 IPCC(2006)报道的范围内,这种差异可能与施肥量、土壤理化性质及环境条件有关.

3.3　秸秆还田对 N_2O 排放的影响

关于秸秆还田对 N_2O 排放影响具有两种截然相反的观点:有研究发现秸秆还田会显著提高土壤活性有机碳含量及酶活性[23],同时也会明显促进土壤中氮素含量的增加[24],从而有利于土壤中硝化反硝化反应的进行,增加 N_2O 的产生量; 但也有研究认为秸秆在腐解过程中产生的化感物质会抑制 N_2O 的排放[9],且秸秆添加后改变土壤的 C/N 比,进而对 N_2O 排放产生影响[10,11]. 本研究观测到玉米季麦秆还田样地 N_2O 累积排放量增加的结果与 Huang 等[10]和 Liu 等[25]等研究结果一致. 叶丹丹等[26]发现玉米-小麦轮作农田土壤溶解性有机碳含量在小麦越冬期含量较高随后逐渐降低,小麦季较高的土壤溶解性有机碳含量可能使得微生物的固氮能力增强,降低了 N_2O 的排放. 小麦季秸秆还田抑制 N_2O 排放的结果与 Hao 等[27]一致. 根据上述两种观点以及本研究和其它研究结果,本研究推测秸秆还田对 N_2O 排放的影响可能与秸秆种类和还田量所引起的 C/N 的不同有关,且不同秸秆施用后产生化感物质的量也可能具有显著差别,因此会对 N_2O 交换通量的高低造成不同影响. 此外,小麦季 SN 样地玉米秸秆添加量比玉米季麦秆还田量大,且施氮量比玉米季低,使得小麦季土壤中 C/N 相对较高,增强了土壤中氮素的固定[10,11],从而降低了 N_2O 的排放量.

3.4　N_2O 的吸收

本研究观测结果中出现了一些 N_2O 交换通量的负值,一般大于 -15.7 $ng\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$(图 4),表明土壤在一定条件下可能会吸收大气中的 N_2O. 这一现象在其它研究中也有报道,如 Bremner 等[28]和 Barton 等[29]研究发现较低的矿质氮及较高的土壤水分含量条件下有时会出现 N_2O 的吸收,这种环境条件有利于反硝化作用过程中将 N_2O 转化为 N_2. 另外,硝化菌本身的反硝化作用及需氧微生物的反硝化也会消耗部分 N_2O. N_2O 的吸收速率还可能受一系列土壤性质的影响,如矿物质 N、水分含量、温度、氧气、pH、氧化还原电位和一些不稳定的有机碳等[30]. 本研究中的负值多出现在 N 肥施用一段时间以后,降水较多时,但氮素的含量并不一定低(10 ~69 $mg\cdot kg^{-1}$),这与 Liu 等[25]研究结果一致. Chapuis-Lardy 等[30]认为大量文献报道的 N_2O 的吸收并非偶然,提出土壤 N_2O 的吸收也许可以解释全球 N_2O 源汇估算中的不平衡部分.

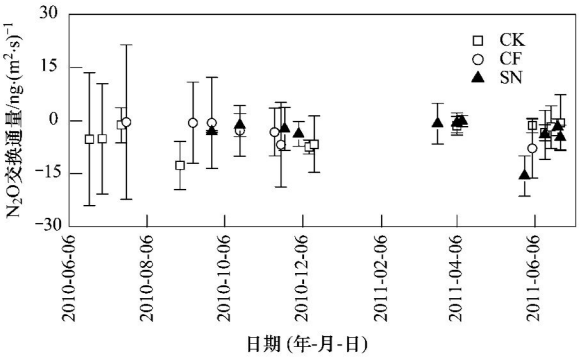

图 4　2010 ~ 2011 年 CK、CF 及 SN 样地 N_2O 交换通量负值

Fig. 4　Negative N_2O exchange fluxes of CK、CF and SN plots during 2010 and 2011

4　结论

(1)玉米-小麦轮作体系中 N_2O 的排放量主要集中在玉米季,CF 及 SN 样地玉米季 N_2O 的排放量占全年总排放量的 57% 和 86%.

(2)施肥极大的促进了 N_2O 的排放,各次施肥后 10 d 内 N_2O 的累计排放量约占生长季总排放量的 71% ~88%. 最高排放通量出现在玉米季底肥施肥后,为其它施肥处理后的 3.4 ~32.5 倍.

(3)秸秆的添加对 N_2O 交换通量在玉米、小麦季中所产生的影响不同,可能是由于秸秆的种类及用量引起土壤 C/N 及化感物质产生量的差异引起的.

参考文献:

[1] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, *et al*. The fourth assessment report-work group I, chapter 7: couplings between changes in the climate system and biogeochemistry [R]. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. 499-588.

[2] Kroeze C, Mosier A, Bouwman L. Closing the global N_2O budget: a retrospective analysis 1500- 1994 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, **13**(1): 1-8.

[3] Klein C D, Novoa R S A, Ogle S, *et al*. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. Chapter 11: N_2O emissions from managed soils, and CO_2 emissions from lime and urea application [R]. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. 1-54.

[4] Bouwman A F. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, **46**(1): 53-70.

[5] Dong Y S, Scharffe D, Domroes M, *et al*. N_2O emission from agricultural soils in the North China Plain: the effect of chemical nitrogen fertilizer and organic manure [J]. Journal of Environmental Sciences, 2000, **12**(4): 463-468.

[6] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, *et al*. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2007, **373**(2-3): 501-511.

[7] Novoa R S A, Tejeda H R. Evaluation of the N_2O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, **75**(1-3): 29-46.

[8] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 966-975.

[9] 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(5): 478-482.

[10] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al*. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, **36**(6): 973-981.

[11] Huang Y, Jiao Y, Zong L G, *et al*. Nitrous oxide emissions from the wheat-growing season in eighteen Chinese paddy soils: an outdoor pot experiment[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **36**(6): 411-417.

[12] Zhang Y Y, Liu J F, Mu Y J, *et al*. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the North China Plain [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(1): 160-168.

[13] Zhang Y Y, Liu J F, Mu Y J, *et al*. Emissions of nitrous oxide, nitrogen oxides and ammonia from a maize field in the North China Plain[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(17): 2956-2961.

[14] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, **34**(6): 777-787.

[15] Ruser R, Flessab H, Russowc R, *et al*. Emission of N_2O, N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, **38**(2): 263-274.

[16] Lu Y Y, Huang Y, Zou J W, *et al*. An inventory of N_2O emissions from agriculture in China using precipitation-rectified emission factor and background emission [J]. Chemosphere, 2006, **65**(11): 1915-1924.

[17] Van Bochove E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(5): 1638-1643.

[18] Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt[J]. Biogeochemistry, 1998, **43**(1): 1-15.

[19] 王风, 白丽静, 张克强, 等. 氮素调控对冻融过程中土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3142-3145.

[20] 刘运通, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮磷肥施用对春玉米农田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(7): 1468-1475.

[21] 马二登, 马静, 徐华, 等. 追肥时间对小麦拔节-成熟期氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 971-978.

[22] Sehy U, Ruser R, Munch J C. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003, **99**(1-3): 97-111.

[23] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 522-528.

[24] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 626-633.

[25] Liu Y T, Li Y E, Wan Y F, *et al*. Nitrous oxide emission from irrigated and fertilized spring maize in semi-arid northern China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, **141**(3-4): 287-295.

[26] 叶丹丹, 谢立勇, 郭李萍, 等. 华北平原典型农田 CO_2 和 N_2O 排放通量及其与土壤养分动态和施肥的关系[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (3): 15-20.

[27] Hao X, Chang C, Carefoot J M, *et al*. Nitrous oxide emissions from an irrigated soil as affected by fertilizer and straw management[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, **60**(1-3): 1-8.

[28] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49**(1-3): 7-16.

[29] Barton L, Kiese R, Gatter D, *et al*. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(1): 177-192.

[30] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, *et al*. Soils, a sink for N_2O? A review[J]. Global Change Biology, 2007, **13**(1): 1-17.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 10

Oct. 15, 2012

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake ····· LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3329)

Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index ····· DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, *et al.* (3336)

Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea ····· WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, *et al.* (3344)

Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae ····· YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, *et al.* (3352)

Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea ····· MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, *et al.* (3361)

Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study ····· YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3390)

Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring ····· LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, *et al.* (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, *et al.* (3404)

Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet ····· WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3434)

Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary ····· LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, *et al.* (3443)

Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China ····· YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)

Composition of *n*-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, *et al.* (3457)

Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae ····· PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, *et al.* (3466)

Degradation of Orange Ⅳ Dye Solution Catalyzed by $Fe(NO_3)_3$-$(NH_4)_2S_2O_8$ Modified GAC in the Presence of H_2O_2 ····· ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, *et al.* (3473)

Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation ····· HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, *et al.* (3479)

Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside ····· LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3501)

Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact ····· FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3542)

Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment ····· ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, *et al.* (3547)

Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvo-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model ····· HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, *et al.* (3554)

Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate ····· WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, *et al.* (3562)

In Situ Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants ····· TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, *et al.* (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, *et al.* (3577)

Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk ····· LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, *et al.* (3585)

Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments ····· WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, *et al.* (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, *et al.* (3606)

Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in *Pseudomonas aeruginosa* ZGKD2 ····· ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, *et al.* (3613)

Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain ····· WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, *et al.* (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, *et al.* (3634)

N_2O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain ····· PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, *et al.* (3641)

Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing ····· WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, *et al.* (3647)

Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer ····· LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, *et al.* (3656)

Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon ····· LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, *et al.* (3662)

Effect of Elevated O_3 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, *et al.* (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. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：70.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行