

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响

袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 农田土壤是大气光化学活性气体一氧化氮(NO)的主要人为源之一。为定量研究有机物料还田对 NO 排放的影响, 利用静态暗箱法对关中平原 26 a 长期定位施肥夏玉米-冬小麦轮作农田 NO 排放通量进行周年(2016 年 6 月至 2017 年 6 月)观测。除对照(CK)处理全年不施肥外, 田间设 3 个施肥处理, 冬小麦季分别为全化肥(NPK, 165 kg·hm⁻²)、化肥加秸秆[NPKS, (165 + 40) kg·hm⁻²]和化肥加牛粪[NPKM, (50 + 115) kg·hm⁻²]; 夏玉米季均施等量化肥(188 kg·hm⁻²)。观测期内, CK 处理 NO 排放通量较小[< 12.2 g·(hm²·d)⁻¹]; 各施肥处理均在夏玉米播种、施肥和冬小麦施肥后出现排放峰, 其中 NPK 处理峰值最高[112.0 g·(hm²·d)⁻¹]。各处理 NO 年排放总量和排放系数分别为 0.13 ~ 0.57 kg·hm⁻² 和 0.04% ~ 0.12%。NPKS 和 NPKM 处理年排放总量较 NPK 分别减少 17.6% 和增加 68.0% (P < 0.05)。与 NPK 处理相比, NPKS 和 NPKM 冬小麦季排放总量降低 41.1% ~ 60.0% (P < 0.05); 但夏玉米季增加 25.2% ~ 292.1% (P < 0.05)。冬小麦季添加有机物料有效降低 NO 排放, 而夏玉米季 NO 排放增加则与土壤有机质含量有关。

关键词: NO 排放; 秸秆还田; 牛粪; 直接排放系数; 长期定位施肥

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2819-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709262

Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain

YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, WEI Jing, YANG Xue-yun, GU Jiang-xin*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Agricultural soil is a significant source of nitric oxide (NO). The primary aim of this study was to quantify the effect of long-term organic amendments on NO emissions from the summer maize-winter wheat cropping system in Guanzhong Plain. NO fluxes were regularly measured by the static chamber method for one year (June 2016 to June 2017). Field experiments included four fertilizer treatments that commenced in 1990. The control (CK, 0 kg·hm⁻²) treatment was unfertilized throughout the years. The fertilized treatments were synthetic fertilizer (NPK, 165 kg·hm⁻²), synthetic fertilizer plus maize stalk (NPKS, (165 + 40) kg·hm⁻²), and synthetic fertilizer plus dairy manure (NPKM, (50 + 115) kg·hm⁻²) during the winter wheat season. They were fertilized with synthetic fertilizer (188 kg·hm⁻²) during the summer maize season. The results showed small NO emission [< 12.2 g·(hm²·d)⁻¹] from the CK treatment within the experimental period. Large NO fluxes [up to 112.0 g·(hm²·d)⁻¹ in NPK treatment] were captured following sowing and fertilization during the summer maize season and following fertilization during the winter wheat season for all fertilized treatments. Annual NO emissions and direct emission factors ranged from 0.13 to 0.57 kg·hm⁻² and from 0.04% to 0.12%, respectively. Annual NO emissions from the NPKS and NPKM treatments were 17.6% lower and 68.0% (P < 0.05) larger than those from the NPK treatment, respectively. Seasonal NO emissions from the NPKS and NPKM treatments were 41.1% - 60.0% (P < 0.05) lower than those from the NPK treatment during the winter wheat season, indicating that organic amendments reduced NO emissions. Seasonal NO emissions from the NPKS and NPKM treatments were 25.2% - 292.1% (P < 0.05) larger than that from the NPK treatment during the summer maize season, mostly due to the positive effect of soil organic matter content on NO emissions.

Key words: NO emissions; maize stalk; dairy manure; direct emission factor; long-term fertilization

大气一氧化氮(NO)是光化学活性气体, 在对流层中能与挥发性有机物反应产生大量臭氧前体物^[1], 可调控大气氧化能力并间接影响气候变化^[2]。目前, 对全球土壤 NO 年排放量的估计仍存在极大的不确定性, 估算结果大致为 4 ~ 21 Tg, 其中约 40% 来源于农田土壤^[3-5]。

微生物硝化和反硝化过程是农田土壤 NO 的主要来源, 化学反硝化过程对 NO 的贡献通常在酸性

土壤中较显著^[5]。硝化过程是微生物在有氧条件下将铵态氮(NH₄⁺-N)转化为硝态氮(NO₃⁻-N)的过程, 反硝化过程是微生物在厌氧条件下将NO₃⁻-N和亚硝态氮(NO₂⁻-N)逐步还原为 NO、氧化亚氮(N₂O)和

收稿日期: 2017-09-28; 修订日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475128)

作者简介: 袁梦轩(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田痕量气体排放观测, E-mail: yuanmengxuan1104@outlook.com

* 通信作者, E-mail: gujiangxin@nwsuaf.edu.cn

氮气(N_2)的过程. 影响 NO 产生和排放的首要因素为土壤氧化还原状态和氮底物(NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$)浓度^[6]. 大量田间观测显示 NO 排放峰值通常出现在施肥后^[2, 7]. 此外, NO 排放通量还与土壤温度、湿度、pH 和有机质含量等因素有关^[7]. 各影响因素与硝化、反硝化微生物之间复杂的交互作用, 导致 NO 排放存在极大的时空变异性^[7].

土壤添加有机物料是农田保护性耕作的重要措施之一, 目的是增加土壤有机质含量, 提高土壤肥力, 对改良土壤具有重要意义^[8]. 关于有机物料还田对土壤 NO 排放影响的认识仍存在一定差异. 在华北平原的研究显示秸秆还田促进了硝化、反硝化过程 NO 的排放, 主要是由于有机物料腐烂分解释放热量, 提高土壤温度进而激发微生物活性^[9]. 在晋南地区秸秆还田可提供易分解有机质, 增加土壤硝化、反硝化的氮底物, 促进 NO 产生^[10]. 而在日本筑波地区单施粪肥农田 NO 排放量仅为全化肥处理的 50% 左右, 原因可能在于施加有机肥提升了土壤反硝化能力, NO 被进一步还原为 N_2O 和 N_2 ^[11]. 其它研究则显示有机物料还田并未对 NO 排放产生显著影响^[12, 13], 这主要与研究区域内土壤性质、气候条件、田间管理方式及有机物料种类和还田量等因素有关.

关中平原是西北地区主要的粮食产地, 添加有机物料(秸秆、粪肥)是该地区常见的农田管理方式, 但对 NO 排放的关注较少. 我国已有的关于农田土壤 NO 排放的研究主要集中在华东、华北地区^[14~17], 由于气候、土壤和耕作制度的差异, 这些研究结果无法直接应用于西北地区. 本文以关中平原典型夏玉米-冬小麦轮作农田为研究对象, 观测长期定位施肥处理土壤 NO 排放通量及其影响因素, 定量分析添加秸秆和牛粪对 NO 排放的季节动态、年排放量的影响.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在陕西省杨凌示范区五泉镇“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”(34° 17' 51" N, 108°00'48"E)进行, 海拔 516 m, 年平均气温 13.0℃, 年均降水量 550 mm, 降雨主要集中在 7~9 月, 年均蒸发量 1 400 mm. 试验地土壤为旱耕土垫人为土, 黄土母质.

1.2 试验设计

长期定位施肥试验始于 1990 年秋, 在施肥试

验开始前, 所有试验田连续种植三季作物, 但不施肥料, 以保证土壤肥力尽可能一致. 1990 年试验开始时表层土壤(0~20 cm)总有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别为 7.4、0.9、9.6、191.0 $g \cdot kg^{-1}$, 总孔隙度为 49.6%, 容重为 1.35 $g \cdot cm^{-3}$, 除有效磷含量变异系数较高(15%)外, 其余参数的变异系数均低于 6%, 说明土壤性质较均匀, 空间变异性弱.

田间设置 4 个处理, 每个处理面积约为 14 m × 14 m. 其中对照(CK)处理, 除全年不施肥外, 其余农田管理措施与其它处理一致. 在冬小麦季, 3 个施肥处理分别为全化肥(NPK, 尿素、过磷酸钙和硫酸钾)、化肥加秸秆(NPKS)和化肥加牛粪(NPKM). NPK 施入的氮(N)、磷(P)、钾(K)素分别为 165、58、68 $kg \cdot hm^{-2}$. NPKS 的化肥施入量与 NPK 一致, 另添加全部前茬玉米秸秆, 由秸秆引入的 N 素约为 40 $kg \cdot hm^{-2}$, N 素总量为 (165 + 40) $kg \cdot hm^{-2}$, 由秸秆引入的 P、K 素未计算. NPKM 所施 N 素总量为 165 $kg \cdot hm^{-2}$, 源于化肥 N 和有机肥 N 的比例为 3:7, 所施化肥 P、K 素与 NPK 一致, 由牛粪引入的 P、K 未计算. 所有肥料均在 10 月上旬冬小麦播种前均匀撒施于地表. 冬小麦季施用有机肥有利于 N、P 的固定和植物吸收, 减少淋溶损失. 在玉米季, NPK、NPKS 和 NPKM 处理均施用化肥, N、P、K 素分别为 188、25、78 $kg \cdot hm^{-2}$. 所有肥料于玉米播种后约 1 个月时(7 月中旬)条施于玉米行间. 冬小麦季和玉米季均有灌溉, 灌溉频率视作物生长和天气情况而定, 灌溉方式为漫灌, 灌溉水为地下水.

本试验观测期为 2016 年 6 月至 2017 年 6 月, 玉米季分别于 2016 年的 6 月 7 日、7 月 5 日和 9 月 29 日播种、施肥和收获, 期间分别于 7 月 7 日、8 月 11 日和 24 日灌溉; 冬小麦季分别于 2016 年 10 月 18、19 日和 2017 年 6 月 6 日施肥、播种和收获, 期间于 2017 年 2 月 28 日灌溉. 本试验开始前各处理表层土壤(0~20 cm)的部分理化性质列于表 1.

表 1 2015 年长期定位施肥试验各处理表层土壤(0~20 cm)的理化性状

Table 1 Selected soil properties (0-20 cm layer) under the long-term fertilization experiment in 2015

处理	容重 $/g \cdot cm^{-3}$	有机质 $/g \cdot kg^{-1}$	全氮 $/g \cdot kg^{-1}$	全磷 $/g \cdot kg^{-1}$
CK	1.49	12.8	0.9	0.8
NPK	1.50	17.7	1.2	1.1
NPKS	1.42	20.9	1.4	1.2
NPKM	1.40	27.2	1.8	1.5

1.3 观测方法

每个处理小区随机设置 3 个不锈钢材质底座 (50 cm × 50 cm × 10 cm), 底座埋入土壤约 10 cm, 采样箱为四面和顶部封闭的不锈钢材质暗箱 (50 cm × 50 cm × 50 cm), 另配两端中空的中段箱 (50 cm × 50 cm × 50 cm), 以便在植株较高时配合顶箱使用. 中段箱与顶箱外包保温塑料膜, 避免采样期间箱内温度剧烈变化. 为了减少采样时对底座和周围环境的扰动, 在采样点附近架设栈桥. 在布设采样箱位置时综合考虑沟、垄、植株、采样箱间距等因素. 夏玉米为点播, 行距、株距分别为 50 cm、20 cm, 每个采样箱内包含两株玉米; 冬小麦为条播, 行距 20 cm, 每个采样箱内包含两行小麦. 采样箱均随机布设在试验田中部, 在空间上有较好的代表性.

通常情况下每周采样 1~2 次; 在施肥、灌溉及降雨后, 每天采样 1 次直至 NO 排放通量降至背景值. 采样时间为 09:00~11:00, 此期间的测定值可对日平均排放具有最好的代表性^[18]. 采样时, 采样箱放置在底座的水槽里并加水密封, 为防止箱内压力变化影响气体排放速率^[10], 在放置采样箱的同时采集环境气体样品 (2~3 L), 箱体密闭 40 min 后采集箱内气体样品 (2~3 L), 采样工具为真空抽气泵 (N86KNDC, KNF Neuberger GmbH, Freiburg, Germany), 样品保存于专用气袋 (大连德霖气体包装有限公司, 中国) 内. 样品在采样后 3 h 内带回实验室, 使用 NO-NO₂-NO_x 分析仪 (Model 42i, Thermo Environmental Instruments Inc., USA) 测定 NO 浓度.

采集气体样品的同时, 分别使用数字温度计 (JM22L, 天津今明仪器有限公司, 中国) 和土壤水分速测仪 (ML3, Delta-T Devices, UK) 观测土壤温度 (0~10 cm) 和体积含水量 (0~5 cm), 每个处理随机重复 9 次.

每 2 周采集 1 次土壤样品 (0~20 cm) 用于 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 测定, 每个处理随机重复 3 次. 鲜土样品用 KCl 溶液 (1 mol·L⁻¹) 浸提, 浸提液中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度由连续流动分析仪 (AA3, SEAL Analytical, Germany) 测定.

1.4 数据处理与分析

采用公式(1)计算 NO 通量:

$$F = k \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为气体排放通量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; k 为单

位换算系数; P 和 T 分别为采样时的气压 (kPa) 和温度 (K); H 为采样箱高度 (m); ρ 为标准状态下 ($T_0 = 273 \text{ K}$, $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$) NO 气体的密度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); dc/dt 为气体浓度随时间的变化率.

利用线性内插法估算未观测日排放通量, 逐日累加, 估算 NO 年排放总量和季节总量.

采用公式(2)计算直接排放系数 (EF_d):

$$EF_d = \frac{F_N - F_{CK}}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中, F_N 和 F_{CK} 分别为施肥和不施肥处理 NO 年排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N 为氮肥施用量 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$].

采用公式(3)计算土壤充水孔隙度 (WFPS):

$$\text{WFPS} = \frac{\text{VSWC}}{1 - \text{BD}/2.65} \quad (3)$$

式中, VSWC 为土壤含水量体积分 (cm³·cm⁻³), BD 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 常数 2.65 为假定的土壤密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

使用 SPSS Statistics Client 22.0 统计软件对观测数据进行方差分析与相关性分析.

2 结果与分析

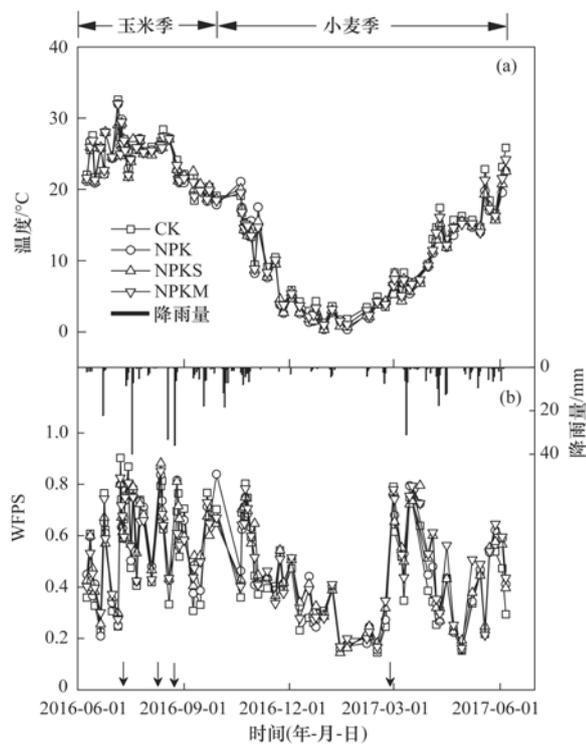
2.1 土壤温、湿度和 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量的季节变化

观测期内降雨量为 525 mm, 其中玉米季占 46.5%. 各处理土壤温、湿度季节变化动态相似 (图 1). 温度变化范围在 0.3~32.0℃ 之间, 各处理间无显著差异. 玉米和小麦季平均土壤温度分别为 24.8℃ 和 9.9℃, 年平均值为 16.0℃. WFPS 变化范围在 0.14~0.90 之间, 其变化主要受降雨和灌溉影响, 各处理间无明显差异. 玉米和小麦季 WFPS 均值分别为 0.59 和 0.28.

CK 处理的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量较低, 分别为 0.8~6.5 mg·kg⁻¹、5.3~21.6 mg·kg⁻¹ (图 2). 施肥处理的土壤 NH₄⁺-N 含量变化范围小 (0.8~15.3 mg·kg⁻¹); NO₃⁻-N 含量季节变化较大 (7.7~130.0 mg·kg⁻¹), 峰值出现在施肥后, NPK、NPKS 和 NPKM 处理的平均值分别为 25.2、27.9 和 32.6 mg·kg⁻¹.

2.2 NO 排放通量的季节变化

CK 处理 NO 排放通量较低 [$< 12.2 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 无明显季节变化 (图 3). 各施肥处理均观测到 3 次排放峰. 玉米季分别在播种和施肥、灌溉后出现 2 次排放峰, 最高值均为 NPKM 处



向下箭头表示灌溉

图1 观测期内日降雨量和试验处理土壤温度(10 cm)、土壤充水孔隙度(WFPS, 5 cm)的季节动态

Fig. 1 Seasonal variations in precipitation, soil temperature (10 cm depth) and water-filled pore space (5 cm depth) in the long-term fertilization experiment

理[$35.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $39.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]. 小麦季仅在施肥后出现NO排放高峰, 最高值为NPK处理[$112.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$].

2.3 NO排放总量和直接排放系数

CK、NPK、NPKS和NPKM处理年排放总量分别为0.13、0.34、0.28和0.57 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表2), 且各处理之间差异显著($P < 0.05$). 夏玉米季施肥处理的NO排放总量在0.12 ~ 0.47 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,

表2 不同施肥处理NO的排放总量、直接排放系数¹⁾

Table 2 Cumulative NO emission and direct emission factor in the long-term fertilization experiment

处理	NO 排放总量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			NO 排放系数/%		
	冬小麦季	夏玉米季	全年	冬小麦季	夏玉米季	全年
CK	0.04 ± 0.0b	0.09 ± 0.0b	0.13 ± 0.0d	—	—	—
NPK	0.22 ± 0.1a	0.12 ± 0.0b	0.34 ± 0.1b	0.11	0.02	0.06
NPK + S	0.13 ± 0.1b	0.15 ± 0.0b	0.28 ± 0.0c	0.04	0.04	0.04
NPK + M	0.09 ± 0.0b	0.47 ± 0.1a	0.57 ± 0.2a	0.03	0.21	0.12

1) 同列数据后不同字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

3 讨论

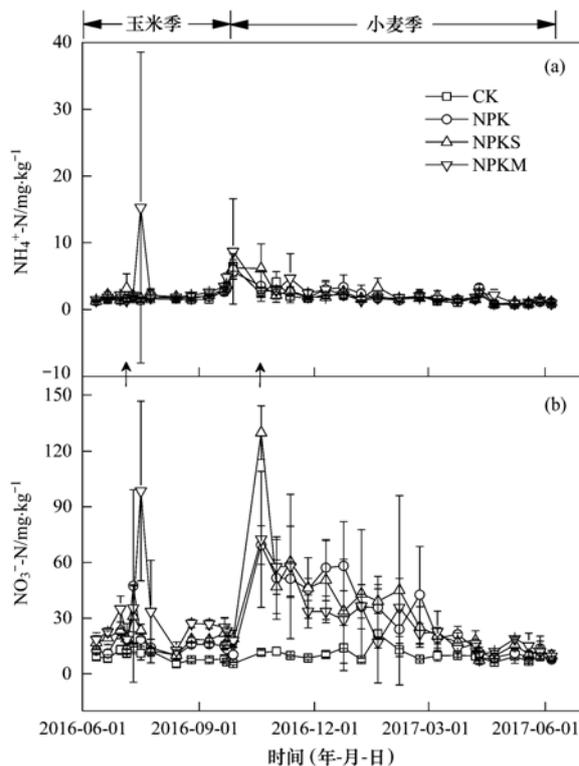
3.1 NO年排放总量和直接排放系数

本研究施肥处理年排放总量(0.28 ~ 0.57

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 在全球农田土壤NO排放(0.20 ~ 23.00 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)中处于较低水平^[4], 接近Lee等^[5]研究中农田土壤NO排放的平均值(0.32 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). NO的年排放因子(0.06% ~ 0.12%)低于全球施肥农

NPKM处理显著高于其他处理($P < 0.05$). 冬小麦季施肥处理的NO排放总量在0.09 ~ 0.22 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, NPK处理显著高于其他处理($P < 0.05$), 但NPKS和NPKM处理之间差异不显著($P = 0.40$).

冬小麦季和夏玉米季NPK、NPKS、NPKM处理NO排放系数分别在0.03% ~ 0.11%和0.02% ~ 0.21%之间(表2). 各处理全年NO直接排放系数分别为0.06%、0.04%和0.12%.

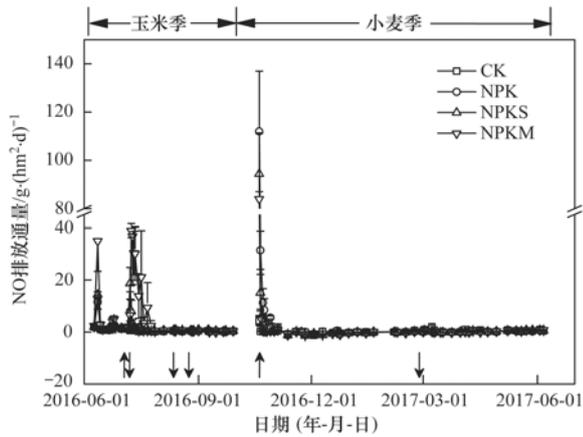


向上箭头表示施肥

图2 试验处理表层(0 ~ 20 cm)土壤铵(NH₄⁺-N)、硝(NO₃⁻-N)态氮的季节动态

Fig. 2 Seasonal variations in soil ammonium (NH_4^+ -N) and nitrate (NO_3^- -N) contents (0-20 layer) in the long-term fertilization experiment

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 在全球农田土壤NO排放(0.20 ~ 23.00 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)中处于较低水平^[4], 接近Lee等^[5]研究中农田土壤NO排放的平均值(0.32 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). NO的年排放因子(0.06% ~ 0.12%)低于全球施肥农



向上箭头表示施肥, 向下箭头表示灌溉

图 3 试验处理条件下 NO 排放通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations in NO fluxes in the long-term fertilization experiment

田的平均值(0.70%)^[19], 远低于中国非石灰性土壤施肥农田研究结果(1.75%~3.50%)^[1], 但在非蔬菜地农田 NO 的直接排放系数(0.01%~3.21%)范围内^[20]. NO 年排放总量和直接排放系数偏低可能与土壤较高的 pH(8.6)有关. 土壤较高的 pH 可直接抑制硝化微生物的活性, 高 pH 值条件下会促进氨(NH₃)挥发而降低硝化反应底物浓度, 从而在较大程度上抑制硝化微生物产生 NO 的过程^[20].

3.2 NO 排放季节动态的影响因素

本研究各施肥处理土壤温度、NO₃⁻-N 均与 NO 排放通量呈极显著相关关系($P < 0.01$), NH₄⁺-N 仅在小麦季和全年与 NO 排放显著相关($P < 0.01$) (表 3). NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 是微生物硝化、反硝化作用的反应底物, 不仅影响硝化和反硝化速率, 还会影响硝化和反硝化产物中 NO 所占比例^[21, 22]. 土壤温度与微生物的活性密切相关, 硝化微生物最适温度范围是在 25.0~35.0℃, 反硝化微生物的适宜温度范围是 15.0~75.0℃^[23], 温度升高引起土壤养分矿化速率增加, 从而导致 NO 排放增加, 但温度过高会使土壤干燥导致养分传输受阻, NO 排放反而降低^[24]. WFPS 与 NO 排放存在阈值效应, 不同土壤条件下适于 NO 排放的 WFPS 值不同^[25], 研究显示 NO 最大通量出现在 0.43 和 0.85 之间^[25, 26]. 本研究较高的 NO 排放通量 [$> 12.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 由 CK 处理 NO 排放通量最大值确定] 主要分布在 WFPS 0.40~0.80 范围内, 最高值出现在 WFPS 0.40~0.45 之间(图 4), 与 Ormeci 等^[26]的研究结果(约为 0.43)一致. 土壤水分主要通过影响土壤通气状况、土壤的氧化还原状况以及土壤微生物的

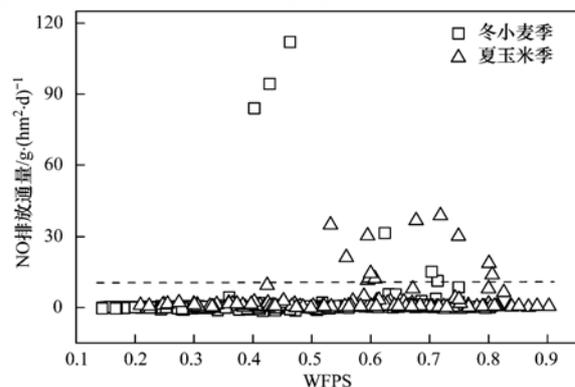
活性来影响土壤 NO 的排放, 在土壤 WFPS > 0.60 时, 以反硝化作用为主, WFPS < 0.60 时, 土壤中主要以硝化作用为主^[6].

NO 排放受温度、水分、氮底物的共同限制: 玉米播种后, 土壤温度(26.3℃)、水分条件(WFPS 为 0.52~0.61)利于硝化、反硝化过程 NO 排放, 但氮底物含量较低(图 2), 排放峰较小. 玉米施肥后充分的氮底物加上灌溉前后强烈的干湿变化(灌溉前后 WFPS 分别为 0.24~0.31 和 0.79~0.90)激发了 NO 排放峰. 已往的研究也表明当土壤经过较长时间干旱后^[27~29], 突然降雨或者灌溉会导致排放峰的产生. 由于土壤湿度较高, 此次排放可能主要由反硝化造成, 但反硝化过程易使 NO 向 N₂O 和 N₂ 转化, NO 排放峰较低. 冬小麦季施肥后, 硝化作用底物充足, 水(WFPS 为 0.40~0.47)、热(20.0℃)状况适于硝化反应进行, 使得各施肥处理冬小麦季 NO 排放出现高峰, 也是全年最高峰, 峰值排放占小麦季排放总量的 50.0%~90.4%.

表 3 NO 排放通量与环境因子的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients between NO flux and related environmental factors			
时期	土壤温度	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
玉米季	0.217 **	0.161	0.385 **
小麦季	0.269 **	0.464 **	0.595 **
全年	0.180 **	0.228 **	0.550 **

1) ** 表示 $P < 0.01$ 显著相关



虚线表示 NO 排放通量为 $12.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

图 4 NO 排放通量与土壤水孔隙度(WFPS)的关系

Fig. 4 Relationship between NO flux and WFPS during the experimental period

3.3 施肥对 NO 排放的影响

本研究显示, 与施化肥相比, 添加秸秆和牛粪处理 NO 年排放总量分别降低 17.6% 和增加 68.0%, 具体原因可能与仅在冬小麦季添加有机物料有关.

冬小麦季施加秸秆和牛粪显著降低了 NO 季节排放总量(表 2),表明有机物料还田可降低 NO 排放,与已有的研究结果一致^[11,22].小麦施肥后的峰值排放是 NO 排放总量的主要构成部分:NPKM 和 NPK 处理施氮量相同,但小麦生长初期吸氮量少,牛粪施入土壤需先经过微生物矿化分解转化为无机氮,使 NO 排放滞后于 NPK 处理^[30],但小麦季后期 NPKM 并未出现大量 NO 排放,可能在于小麦生长期对氮吸收量不断增大及水热条件限制了有机氮的矿化速率,因而使 NPKM 处理 NO 排放低于 NPK; NPKS 较 NPK 引入了更多的氮源,但高 C/N 的玉米秸秆(65~85)使微生物对其分解过程争夺土壤中的氮素,使 NO 排放受到抑制^[6,31].再者,有机肥中含有大量的碳水化合物和矿质元素,为微生物的生长提供了丰富的碳、氮源的同时极大地促进了土壤微生物的生长,加快土壤氧气的消耗,易造成厌氧环境,不利于硝化作用 NO 的产生,同时也增加了反硝化过程中 NO 的消耗^[11].这些原因共同造成了小麦季有机物料还田降低了 NO 排放.而 NPKS 处理因引入了更多的氮源及其秸秆表施的施肥方式使其 NO 排放略高于 NPKM.

夏玉米季各处理均施等量化肥,与 NPK 相比, NPKS 和 NPKM 处理 NO 排放较高.一方面,由于 NPKS、NPKM 处理前茬冬小麦产量较高^[6],土壤残留根系也相对较高,玉米季的水热条件使残留根系及累积在土壤中的有机物料分解矿化速率加快^[30],增加了氮源,在施入相同化肥的情况下,造成 NPKS 和 NPKM 处理 NO 排放显著高于 NPK 处理.岳现录^[30]和李贵春等^[32]的研究也支持这一观点,指出前茬有机物料会在后季作物生长期间大量矿化,对后季作物产生影响.另一方面,玉米季土壤湿度较高(WFPS 均值为 0.59),NO 排放可能主要来自于反硝化过程,因此土壤有机质成为 NO 排放的主要影响因子之一.长期定位施肥提高了根层土壤有机质含量^[33],有机质作为绝大多数异养微生物的细胞能源和电子受体,可促进反硝化过程 NO 产生和排放^[6].本研究结果显示玉米季 NO 排放总量及 NO 排放峰值均与土壤有机质含量呈显著($P < 0.05$)相关关系(图 5),表明有机质含量越高越有利于 NO 排放,因此 NPKM 处理排放显著高于其他处理.同时,NO 排放与土壤全氮、全磷含量均呈显著正相关关系($P < 0.05$),这主要是由于全氮、全磷含量与有机质含量呈显著正相关关系($P < 0.05$).在玉米季施入有机物料对 NO 排放的影响

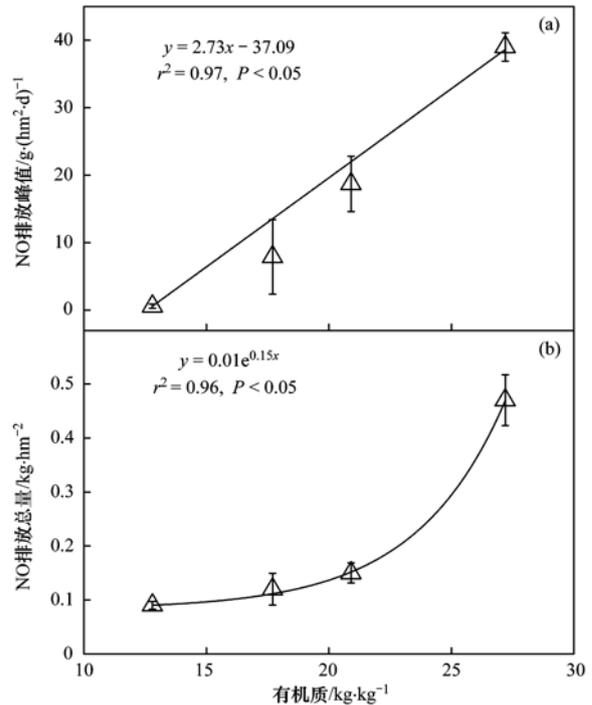


图 5 玉米季 NO 排放峰值、排放总量与土壤有机质含量的相关关系

Fig. 5 Correlation between the maximal NO flux, the cumulative NO emission and soil organic matter content in the summer maize season

还有待进一步研究.

4 结论

- (1) 土壤温度和 NO_3^- -N 含量是影响关中平原土垫旱耕人为土 NO 排放的主要因子,WFPS 在 0.40~0.80 之间有利于 NO 排放.
- (2) NO 年排放总量和直接排放系数处于较低水平,可能与较高的土壤 pH 有关.
- (3) 长期秸秆还田和施用有机肥可降低小麦季 NO 排放;但根层土壤有机质提高增加了玉米季 NO 排放.

参考文献:

- [1] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, *et al.* Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **48**: 10-19.
- [2] Homyak P M, Blankinship J C, Marchus K, *et al.* Aridity and plant uptake interact to make dryland soils hotspots for nitric oxide (NO) emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113** (19): E2608-E2616.
- [3] Gödde M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32** (2): 120-128.

- [4] Davidson E A, Kinglerlee W. A global inventory of nitric oxide emissions from soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **48**(1-2): 37-50.
- [5] Lee D S, Köhler I, Grobler E, *et al.* Estimations of global NO_x emissions and their uncertainties[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(12): 1735-1749.
- [6] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
Hao Y X, Liu J X, Yuan M X, *et al.* Effects of long-term organic amendments on soil N₂O emissions from winter wheat-maize cropping systems in the Guanzhong Plain [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
- [7] Liu C Y, Yao Z S, Wang K, *et al.* Effects of increasing fertilization rates on nitric oxide emission and nitrogen use efficiency in low carbon calcareous soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **203**: 83-92.
- [8] 李英臣, 侯翠翠, 李勇, 等. 免耕和秸秆覆盖对农田土壤温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(6): 1076-1083.
Li Y C, Hou C C, Li Y, *et al.* Effects of no-till and straw mulch on greenhouse gas emission from farmland: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(6): 1076-1083.
- [9] Liu C Y, Wang K, Meng S X, *et al.* Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in Northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(1-2): 226-233.
- [10] 蒙世协, 刘春岩, 郑循华, 等. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤-大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响[J]. *气候与环境研究*, 2012, **17**(4): 504-514.
Meng S X, Liu C Y, Zheng X H, *et al.* Effects of the applied amount of wheat straw on methane, carbon dioxide, nitrous oxide, and nitric oxide fluxes of a bare soil in south Shanxi[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, **17**(4): 504-514.
- [11] Hayakawa A, Akiyama H, Sudo S, *et al.* N₂O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(3): 521-529.
- [12] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(4): 1058.
- [13] Laville P, Lehuger S, Loubet B, *et al.* Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(2): 228-240.
- [14] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China [J]. *Agronomy Journal*, 2006, **98**(4): 938-945.
- [15] Mei B L, Zheng X H, Xie B H, *et al.* Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in Southeastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(17): 2762-2769.
- [16] Deng J, Zhou Z X, Zheng X H, *et al.* Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from rice-wheat rotation and vegetable fields: a case study in the Tai-Lake region, China [J]. *Plant and Soil*, 2012, **360**(1-2): 37-53.
- [17] Li D J, Wang X M. Nitrogen isotopic signature of soil-released nitric oxide (NO) after fertilizer application [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(19): 4747-4754.
- [18] 王霆宇. 晋南地区盐碱地冬小麦-夏玉米轮作田的 NO 排放特征 [D]. 太原: 山西大学, 2010. 26-28.
- [19] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(4): 1080.
- [20] 李明, 梁旺国, 郑循华, 等. 晋南地区典型盐碱地棉田的 NO 排放特征 [J]. *气候与环境研究*, 2009, **14**(3): 318-328.
Li M, Liang W G, Zheng X H, *et al.* Characteristics of NO emission from typical saline soil of southern Shanxi cotton land [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, **14**(3): 318-328.
- [21] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制 [J]. *土壤*, 2012, **44**(6): 881-887.
Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Factors controlling N₂O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: a review [J]. *Soils*, 2012, **44**(6): 881-887.
- [22] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统冬小麦田 NO 排放观测研究 [J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(4): 577-581.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* NO emission from winter wheat fields of rice-wheat rotation ecosystem in Southeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(4): 577-581.
- [23] 曹彦圣, 田玉华, 尹斌, 等. 农业土壤 NO 排放研究进展 [J]. *土壤*, 2013, **45**(5): 791-799.
Cao Y S, Tian Y H, Yin B, *et al.* Investigation on NO emission from agricultural soils [J]. *Soils*, 2013, **45**(5): 791-799.
- [24] Johansson C, Granat L. Emission of nitric oxide from arable land [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1984, **36**(1): 25-37.
- [25] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soils [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D17): D17302.
- [26] Ormecci B, Sanin S L, Peirce J J. Laboratory study of NO flux from agricultural soil: effects of soil moisture, pH, and temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D1): 1621-1629.
- [27] Bakwin P S, Wofsy S C, Fan S M, *et al.* Emission of nitric oxide (NO) from tropical forest soils and exchange of NO between the forest canopy and atmospheric boundary layers [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, **95**(D10): 16755-16764.
- [28] Davidson E A. Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(1): 95-102.
- [29] Meixner F X, Fickinger T, Marufu L, *et al.* Preliminary results on nitric oxide emission from a southern African savanna ecosystem [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **48**(1-2): 123-138.
- [30] 岳现录. 华北平原小麦-玉米轮作中有机肥的氮素利用与去向研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009. 23-25.
- [31] Recous S, Mary B, Faurie G. Microbial immobilization of

- ammonium and nitrate in cultivated soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(7): 913-922.
- [32] 李贵春, 王利伟, 卢琳琳, 等. 华北平原小麦-玉米轮作对奶牛粪肥的消纳能力研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, **37**(7): 66-72, 86.
- Li G C, Wang L W, Lu L L, *et al.* A study on the cow manure assimilating capacity of wheat-corn rotation in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, **37**(7): 66-72, 86.
- [33] Gu J X, Yuan M X, Liu J X, *et al.* Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 371-379.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。



CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)