

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

不同施肥方式下紫色土 N_2O 与 NO_x 的排放特征

胡磊^{1,2,3}, 刘韵^{1,2,3}, 朱波^{1,3*}

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 利用紫色土长期施肥试验平台, 采用静态箱-气相色谱法开展紫色土“冬小麦-夏玉米”轮作系统 N_2O 和 NO_x 排放的连续两周年(2014年11月~2016年9月)定位观测。研究了氮肥总量相同条件下的常规氮磷钾化肥(NPK)、猪厩肥(OM)、秸秆还田配施氮磷钾化肥(RSDNPK)、猪厩肥配施氮磷钾化肥(OMNPK)和氮磷钾化肥配合硝化抑制剂(DCDNPK)等施肥方式对 N_2O 和 NO_x 排放的影响, 短期不施肥处理(CK)作为排放系数计算的对照。结果表明, 所有施肥方式下紫色土 N_2O 排放峰均出现在施肥初期和大降雨过程期; NO_x 排放过程与 N_2O 类似, 排放峰出现在施肥初期, 但强降雨期未出现明显排放峰。NPK、OM、RSDNPK、OMNPK 和 DCDNPK 处理的 N_2O 年均累积排放量分别为: 1.35、4.38、1.43、2.46、0.92 $kg \cdot hm^{-2}$, 排放系数分别为: 0.33%、1.41%、0.36%、0.73%、0.18%; 相应处理的 NO_x 年均累积排放量分别为: 0.11、0.38、0.10、0.27、0.04 $kg \cdot hm^{-2}$, 排放系数分别为: 0.03%、0.13%、0.03%、0.09%、0.01%。较常规化肥, 增加有机物料如施用猪厩肥和猪厩肥配施氮磷钾肥分别显著增加 226% 和 83% 的 N_2O 排放 ($P < 0.01$), 同时 NO_x 排放分别显著增加 262% 和 157% ($P < 0.01$); 常规化肥配合硝化抑制剂(DCDNPK)使用减少 32% 的 N_2O 排放和 62% 的 NO_x 排放 ($P < 0.01$), 秸秆还田配施氮磷钾肥对 N_2O 排放略有增加 ($P > 0.05$), NO_x 排放略有减少 ($P > 0.05$)。统计分析进一步表明, 土壤无机氮含量是 N_2O 和 NO_x 二者排放的主控因子, 而土壤孔隙充水率与温度分别作为 N_2O 与 NO_x 各自排放的主控因子之一。

关键词: 施肥方式; 累积排放; 排放系数; 控制条件; 合理施肥

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3442-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612250

Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes

HU Lei^{1,2,3}, LIU Yun^{1,2,3}, ZHU Bo^{1,3*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: N_2O and NO_x emissions from a winter wheat-summer maize rotation system in purple soil were measured on a long-term fertilization platform of purple soil for two consecutive cropping years (from November 2014 to September 2016) by using a closed-chamber and gas chromatography-based system. Chemical fertilizer (NPK), pig manure (OM), incorporation of crop residues plus synthetic NPK fertilizer (RSDNPK), pig manure plus synthetic NPK fertilizer (OMNPK), and nitrification inhibitor with NPK fertilizer (DCDNPK) under the same rate of total nitrogen were involved in monitoring N_2O and NO_x emissions. Short-term fertilizer-free treatment (CK) was used as a control for emission coefficient calculation. The results showed that N_2O emission peaks appeared in the early stage of fertilization and in the period of heavy rainfall for all fertilization regimes. The NO_x emission process was similar to that of N_2O , in that emission peaks appeared at the early stage of fertilization, yet no obvious emission peaks were observed during heavy rainfall. The annual cumulative emissions of N_2O from NPK, OM, RSDNPK, OMNPK, and DCDNPK were 1.35, 4.38, 1.43, 2.46, and 0.92 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively, and the emission coefficients were 0.33%, 1.41%, 0.36%, 0.73%, and 0.18%. The annual emissions of NO_x from NPK, OM, RSDNPK, OMNPK, and DCDNPK were 0.11, 0.38, 0.10, 0.27, and 0.04 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively, and the cumulative emission coefficients were 0.03%, 0.13%, 0.03%, 0.09%, and 0.01%. Amendment of organic material was the main stimulator for N_2O and NO_x emissions, as they significantly increased 226% and 262% (for OM) and 83% and 157% (for OMNPK), respectively ($P < 0.01$), compared with conventional synthetic fertilizers. The application of synthetic fertilizers combined with nitrification inhibitor (DCDNPK) significantly reduced N_2O emissions 32% and NO_x emissions 62% ($P < 0.01$), whereas straw returning with NPK application increased N_2O emissions 6% and reduced NO_x emissions 5% ($P > 0.05$). Furthermore, statistical analyses showed that soil inorganic N content was the main regulating factor of N_2O and NO_x emissions together, whereas soil water-filled pore space (WFPS) and temperature were the respective main regulating factors of N_2O and NO_x .

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271321); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB417101)

作者简介: 胡磊(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为小流域氮循环, E-mail: 1449574766@qq.com

* 通信作者, E-mail: bzhu@imde.ac.cn

emissions individually.

Key words: fertilization regime; cumulative emission; emission coefficient; regulation conditions; optimal fertilization

氧化亚氮(N_2O)是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)严格管控的温室气体成分, N_2O 在大气中的寿命约为 120 a,单位分子量 N_2O 的增温潜势(global warming potential,GWP)是 CO_2 的 310 倍,对全球总的 GWP 的贡献率是 2% ~ 4%^[1]. N_2O 还是大气平流层中导致臭氧层破坏的光化学反应的重要参与者^[2]. 据估计,大气中 90% 的 N_2O 来源于农业活动,且仍以 $0.3\% \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度增加^[3]. 相关研究表明,化肥的大量施用是导致 N_2O 大量排放最主要的原因^[4]. 氮氧化物 NO_x 虽然不能直接产生温室效应,但能通过对流层大气的光化学反应产生 O_3 间接地产生温室效应,此外 NO_x 也影响着大气的环境质量^[5-7]. 因此,农业施肥措施与 N_2O 、 NO_x 排放的相关研究越来越受到国内外学者的广泛关注.

氮肥品种和施氮量对 N_2O 的排放具有重要影响^[8],合理施肥能有效减少因施氮肥而引起的土壤 N_2O 的排放^[9]. 施用有机肥和缓/控肥料对土壤 N_2O 排放的影响是当前研究的热点问题. 不同学者研究有机肥施用对 N_2O 排放的影响得出了不同的结论,Ball 等^[10]发现,在小麦地中总氮投入等量时,有机肥处理 N_2O 通量显著低于化学氮肥处理;有研究指出有机肥的施用对农田土壤 N_2O 的排放具有促进作用^[11];甚至有研究发现有机肥的施用几乎不影响土壤 N_2O 的排放^[12]. 这可能因研究的土壤性质、有机肥性质和气候环境等差异造成矛盾的结果,可见,有机肥施用对 N_2O 排放的影响还有待进一步研究. 此外,缓/控释肥料不仅可以提高作物产量及其肥料利用率,还能显著减少作物生长期田间 N_2O 的排放^[13-15],但缓/控肥料成本普遍偏高,并存在养分控释效果不稳定等问题^[16],导致缓/控肥料推广应用缓慢. 因此,不同施肥方式下土壤 N_2O 排放过程并未完全明晰,导致降低 N_2O 排放的合理施肥方式选择十分困难,成为当前亟待解决的问题.

目前我国耕地土壤 N_2O 排放研究仍主要集中在东北和华北地区^[17,18],而针对重要的玉米和小麦粮食生产基地之一的四川盆地紫色土丘陵区的研究较少,关于施肥方式对该地区土壤 N_2O 排放的研究更少^[19,20]. 另一方面,不同施肥方式下土壤 NO_x 排放的研究也鲜见报道. 因此,本文依托紫色土长期施肥试验平台,探究几种施肥方式下“小麦-玉米”轮作土壤 N_2O 、 NO_x 的排放特征及其影响因素,通过

深入认识施肥方式对 N_2O 、 NO_x 排放的影响,以期紫色土地区土壤氮循环及氮肥管理研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外观测试验依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站($105^\circ 27' \text{E}$, $31^\circ 16' \text{N}$). 该站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3°C ,多年平均降雨量 826 mm. 农田生态系统为代表四川盆地紫色土丘陵区的典型旱地“小麦-玉米”轮作方式.

1.2 供试土壤

供试土壤为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色页岩的钙质紫色土,田间持水量为 28.1% ~ 37.8%,凋萎湿度为 5.4% ~ 7.7%,为典型旱作土壤,平均土层厚度约 60 cm^[21]. 0~20 cm 表土基础理化性质为: pH 8.2,有机质 $8.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $18.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $42.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $9.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $86.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤容重 $1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤黏粒含量 6.5%,粉粒含量 58.9%,砂粒含量 34.6%.

1.3 试验方案

供试作物选择四川盆地紫色土区的代表性轮作作物冬小麦和夏玉米,冬小麦于每年 11 月种植,翌年 5 月收获;夏玉米于每年 5 月播种,同年 9 月收获. 田间试验在中国科学院盐亭紫色土生态试验站的养分长期试验场开展,选择其中的 6 个处理:常规氮磷钾肥(NPK)、秸秆还田配施氮磷钾肥(RSDNPK)、猪厩肥(OM)、猪厩肥配施氮磷钾肥(OMNPK)、硝化抑制剂与无机氮磷钾肥混施(DCDNPK)和短期不施肥对照(CK). 氮肥为碳酸氢铵(含纯氮 17%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%). 除 CK 处理外,各施肥处理保持施用氮素总量在同一水平,其中小麦季施氮 $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米季 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 试验采用完全随机区组设计,每个处理设置 3 个重复,每个重复小区面积为 24 m^2 . 有机-无机复合施肥时,无机化肥的氮量为总施氮量的 60%,有机猪厩肥为总施氮量的 40%;有机肥处理为 100% 的猪厩肥;秸秆按本田秸秆全量还田计,约 $7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 试验

中,还田秸秆采用小区内常规氮磷钾肥处理的上季作物秸秆,秸秆经剪碎后以覆土翻耕的形式还田.施肥前,提前测定新鲜猪厩肥和当季还田秸秆中全氮含量,并按纯氮总量进行换算.施肥方式采用基肥一次性于播种前人工施入,冬小麦肥料采用撒施,夏玉米采用穴施的施肥方式;耕作和施肥同步,耕作方式为人工锄耕,深度为 20 cm.除短期无肥处理外,各处理的施肥方式、施肥量和种植制度已延续 12 a.

1.4 N_2O 和 NO_x 的采集与分析

N_2O 通量测定采用静态箱-气相色谱法,每个采样点于上午 09:00 ~ 11:00 采集气体,每个重复每次采集 5 针气样,每针间隔时间为 7 min. 采集后的气样避光保存在 60 mL 医用注射器内,24 h 内完成分析.施肥初期的第一个星期,采样频率为一天一次,第二星期频率降为隔一天采一次,两星期之后采样频率降为一周两次,如遇降雨则加密采集 3 次.全年的采样主要集中在作物生长周期内,作物收获后的休闲期由于土壤温度和水分等因子变化小,频率降为一周一次. NO_x 气体采集在 N_2O 采集之前和 N_2O 采集完毕之后分两次采集,采用抽气泵将静态箱中的气体收集到气袋中并避光保存(当第一次气袋采集时需将采气暗箱顶部橡皮塞打开,避免静态箱内产生负压影响 N_2O 的采集).采集气体的同时,同步测量采样箱内气体温度、土壤温度(5 cm)和土壤体积含水率,同步采集 0 ~ 10 cm 土壤样品用以分析土壤含水率 and 无机氮(NH_4^+-N 、 NO_3^--N)含量.

N_2O 浓度的气相色谱测量方法见文献[22], NO_x 浓度用氮氧化物分析仪(Thermo-Model 42i)进行测定,土壤无机氮(NH_4^+-N 、 NO_3^--N)含量采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 浸提,AA3 流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定(水土比为 5:1).

1.5 数据分析与处理

利用 N_2O 、 NO_x 浓度随时间的平均变化率来计算单位面积的气体排放通量:

$$F = k \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 是气体排放通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], M 为气体摩尔质量 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), V_0 为标准状态下气体摩尔体积 ($22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$), T_0 和 P_0 分别为标准状态下的温度 (237 K) 和气压 (1 031 hPa), P 是采样点的气压 (hPa), T 是采样时箱内的平均温度 (K), dc/dt 是采样箱内浓度的变化速率, H 是采样箱的高

度 (cm), k 为量纲转换系数. 根据已观测的气体通量数据,利用一次线性内插法计算未观测时间段包括休闲期的排放通量,并逐日累加得到累积排放量:

$$E = k \left\{ X_n + \sum_{i=1}^n [X_{i-1} + t \cdot (X_{i-1} + X_i)/2] \right\} \quad (2)$$

式中, E 是气体的累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), X_i 、 X_{i-1} 和 X_n 是第 i 、 $i-1$ 和 n 天气体的日排放通量值 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$], t 是相邻两次观测通量之间的间隔天数 (d), n 是作物有效排放通量的总观测天数, k 为量纲转换系数.

$$f = \frac{t_N - t_{CK}}{t} \quad (3)$$

式中, f 是 N_2O 或 NO_x 的排放系数 (%), t_N 是施肥后气体 (N_2O 或 NO_x) 的累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), t_{CK} 为对照不施肥 CK 处理的气体 (N_2O 或者 NO_x) 累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), t 是年氮肥施用总量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

利用 Excel 2007 进行数据汇总与计算,SPSS 进行相关性分析,Origin 9.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子的变化

2.1.1 土壤温度和土壤孔隙充水率变化

2014 ~ 2016 年“小麦-玉米”轮作周期内土壤 5 cm 温度和土壤孔隙充水率 (WFPS) 的动态变化如图 1. 土壤 5 cm 温度呈现明显的季节性变化,夏季高,冬季低,各个施肥处理间土壤温度无显著差异 ($P > 0.05$),日最高、最低与平均土壤温度分别为 31.6、1.5 和 17.5℃. 2014 ~ 2015 轮作期总降雨量为 938 mm,其中小麦季为 164.3 mm,玉米季为 773.7 mm; 2015 ~ 2016 轮作周期内总降雨量 807.1 mm,其中小麦季为 264 mm,玉米季为 543.1 mm. 降雨主要集中在夏季 5 ~ 9 月. 土壤孔隙充水率 (WFPS) 随降雨发生呈现明显波动,波动范围在 15.4% ~ 75.6%,但各施肥处理间无显著差异 ($P > 0.05$).

2.1.2 紫色土 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的含量变化

两个轮作周期内土壤表层 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量随作物生长期变化如图 2,除 CK 和 DCDNPK 处理外,其余处理在小麦季撒施肥料后土壤中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量迅速上升并很快达到峰值, NO_3^--N 含量峰值晚于 NH_4^+-N ,二者峰值一般持续两周左右,而后逐渐降低,在施肥 2 ~ 3 个月土壤 NH_4^+-N 、

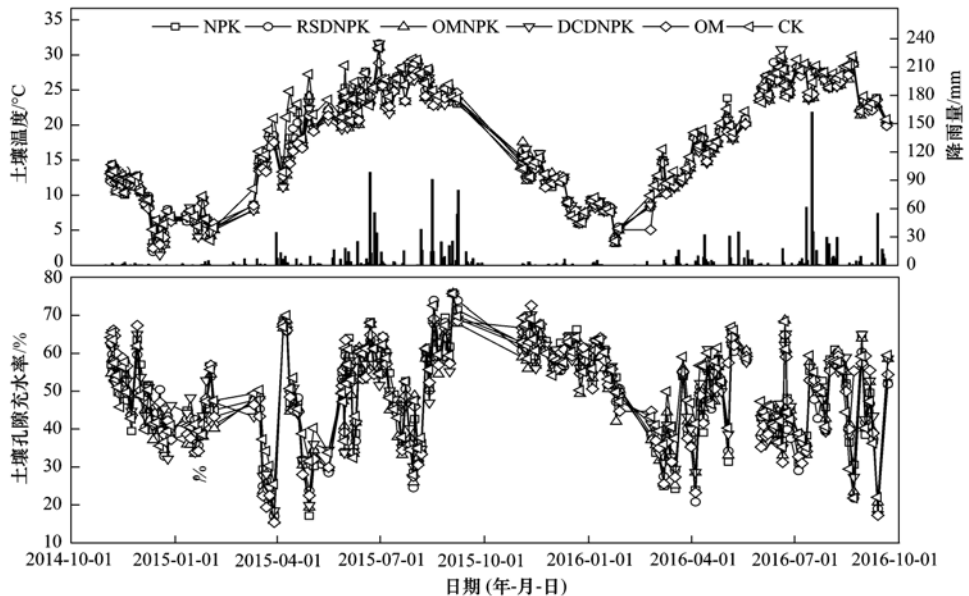


图1 降水量、土壤 5 cm 温度及土壤孔隙充水率 (WFPS) 变化

Fig. 1 Rainfall, soil temperature and WFPS for the topsoil (5 cm) under different fertilization regimes

NO₃⁻-N 含量均呈现较低水平. 在玉米季穴施肥料后,并未在施肥初期观测到高含量 NH₄⁺-N,可能穴施土壤掩埋不利于养分扩散,且为避免直接采集到施肥穴中高 NH₄⁺-N 含量的土壤,通常远离施肥穴采集土样.但在施肥后短时间内观测到一定含量的 NO₃⁻-N 峰,主要源于紫色土的快速硝化作用,铵态氮肥施肥后快速转化成硝酸盐,且硝酸盐易于扩散所致^[23].

无论小麦季还是玉米季,不同施肥方式下的土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量差异极显著 ($P < 0.01$).除 DCDNPK 处理外,其余处理的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 平均含量随着无机氮肥施肥量的减少而降低,可见各处

理 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 平均含量大小与无机氮肥施肥量密切相关. DCDNPK 处理由于施用硝化抑制剂有效抑制 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 转化过程的缘故,在整个生长期土壤 NH₄⁺-N 平均含量高于其他施肥处理,而 NO₃⁻-N 呈相反态势(图 2).

2.2 紫色土 N₂O 与 NO_x 排放的季节动态

2.2.1 不同施肥方式下紫色土 N₂O 的季节排放动态

2014 ~ 2016 年 2 个轮作周年内各施肥处理的 N₂O 的排放通量变化特征如图 3 所示,表 1 汇总了不同施肥方式在施肥初期的 N₂O 排放峰值与出现的时间.无论是在小麦季还是玉米季,所有施肥处

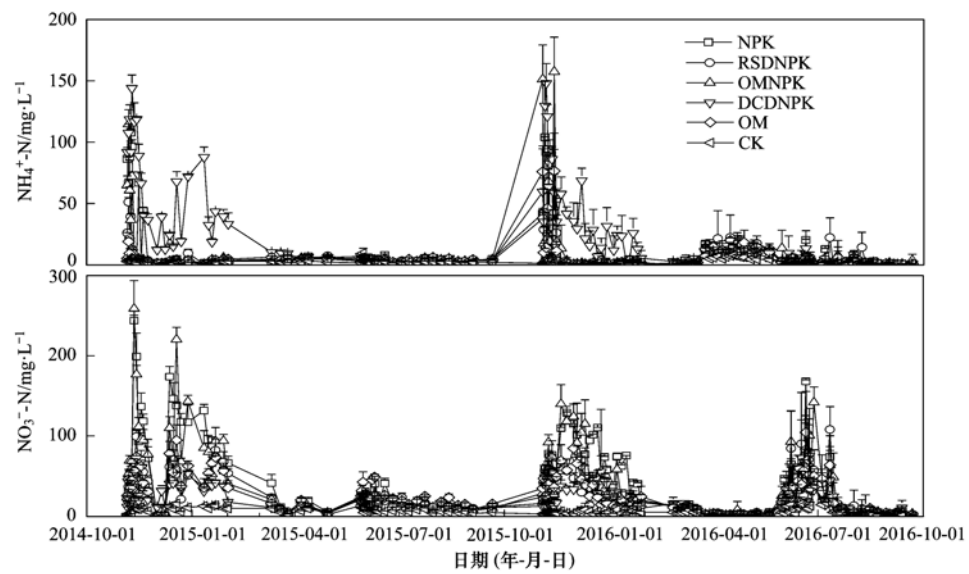


图2 不同施肥方式下土壤无机氮浓度动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in soil inorganic N contents under different fertilization regimes

理的土壤 N_2O 排放呈脉冲式,施肥初期均迅速出现 N_2O 排放峰,峰值持续约两周时间,随后迅速下降,可见氮肥施用是 N_2O 排放峰出现的主要原因之一.不同施肥处理在小麦季、玉米季施肥后 N_2O 排放峰出现时间不尽相同,峰值大小呈以下顺序: $\text{OM} > \text{OMNPK} > \text{RSDNPK} > \text{NPK} > \text{DCDNPK}$,可见有机肥的施用有利于 N_2O 排放峰值的提高.在两个完整轮

作观测周期内总共观测到 3 次大雨量(包括一次灌溉)的次降雨事件中的高 N_2O 排放通量,其中 2016 年 6 月 18 日的玉米抗旱灌溉与 2016 年 6 月 22 ~ 23 日出现的玉米季施肥后首场降雨时间间隔较短,可以看作一次连续的次降雨过程,此时施入土壤的肥料氮正处于快速释放时期,施肥初期的肥料效应和次降雨事件共同促发了此次高 N_2O 排放通量.

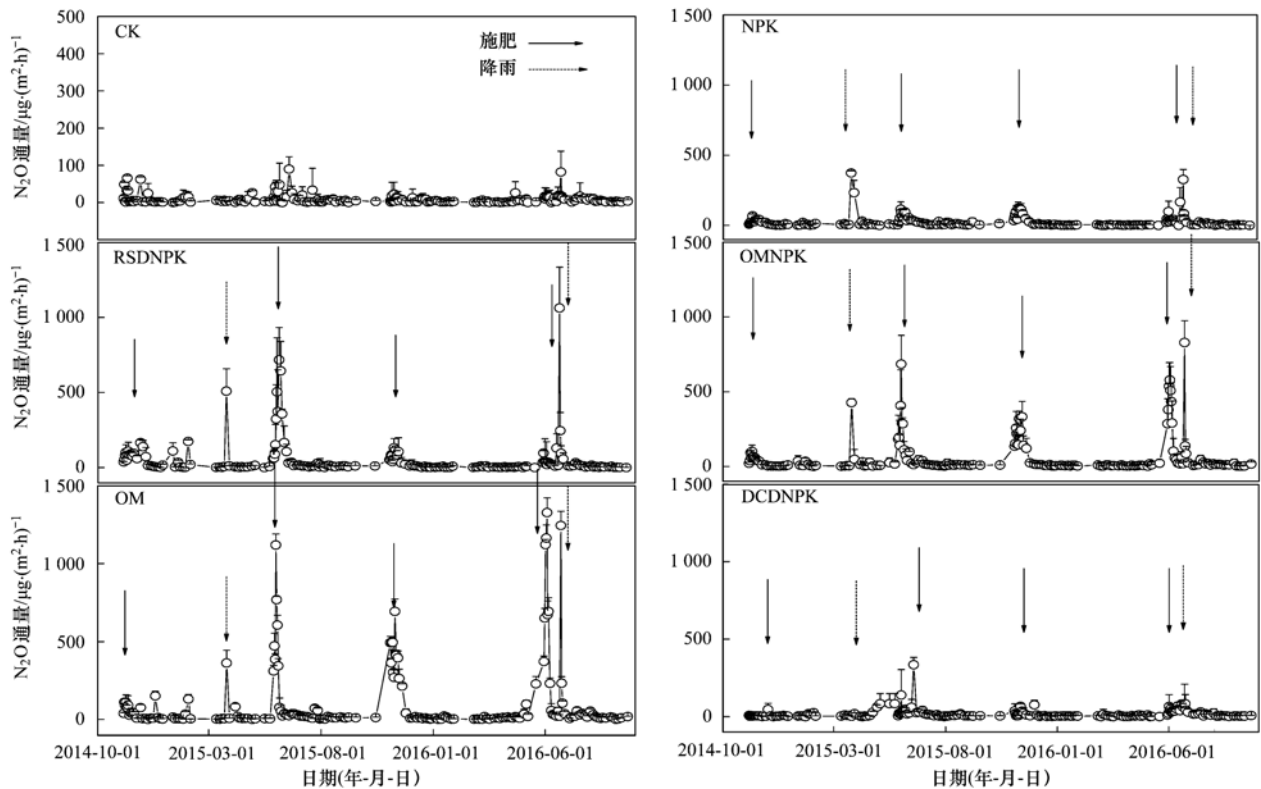


图 3 不同施肥方式下土壤 N_2O 排放通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal patterns of soil N_2O emission flux under different fertilization regimes

表 1 不同施肥方式下施肥初期土壤 N_2O 排放的峰值与出现时间

Table 1 N_2O emission peak and emergence time under different fertilization regimes

处理	2014 ~ 2015 年				2015 ~ 2016 年			
	出现时间 /d	冬小麦峰值 / $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	出现时间 /d	夏玉米峰值 / $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	出现时间 /d	冬小麦峰值 / $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	出现时间 /d	夏玉米峰值 / $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$
OM	4	111.49 ± 15.21	4	1 118.74 ± 25.84	3	693.37 ± 32.74	5	1 325.86 ± 38.21
NPK	9	57.02 ± 6.34	5	72.14 ± 16.34	7	123.03 ± 43.53	11	166.91 ± 31.47
OMNPK	5	99.36 ± 23.43	5	717.68 ± 29.43	3	256.95 ± 54.52	3	537.11 ± 35.53
RSDNPK	4	101.48 ± 19.43	10	684.42 ± 43.21	6	132.12 ± 23.86	10	190.23 ± 19.57
DCDNPK	6	46.60 ± 9.43	5	68.92 ± 23.93	5	66.72 ± 16.03	6	65.92 ± 13.73

2.2.2 不同施肥方式下紫色土 NO_x 的季节排放动态

不同施肥处理 NO_x 排放的季节特征如图 4 所示,除 DCDNPK 处理外,各施肥处理 NO_x 高排放通量均出现在施肥初期,持续两周左右,随后迅速降低,并保持相对较低的排放通量至作物收获,可见施肥对于土壤 NO_x 排放同样具有促进作用.施用有机

肥的处理(OM、OMNPK)在施肥初期 NO_x 的排放峰值显著大于其他处理. DCDNPK 处理在施肥初期未见明显的排放峰,且在整个生长周期 NO_x 排放通量都较小.

2.3 不同施肥方式下紫色土 N_2O 与 NO_x 的排放总量
在 2014 ~ 2016 年两个完整轮作周期内,不同施

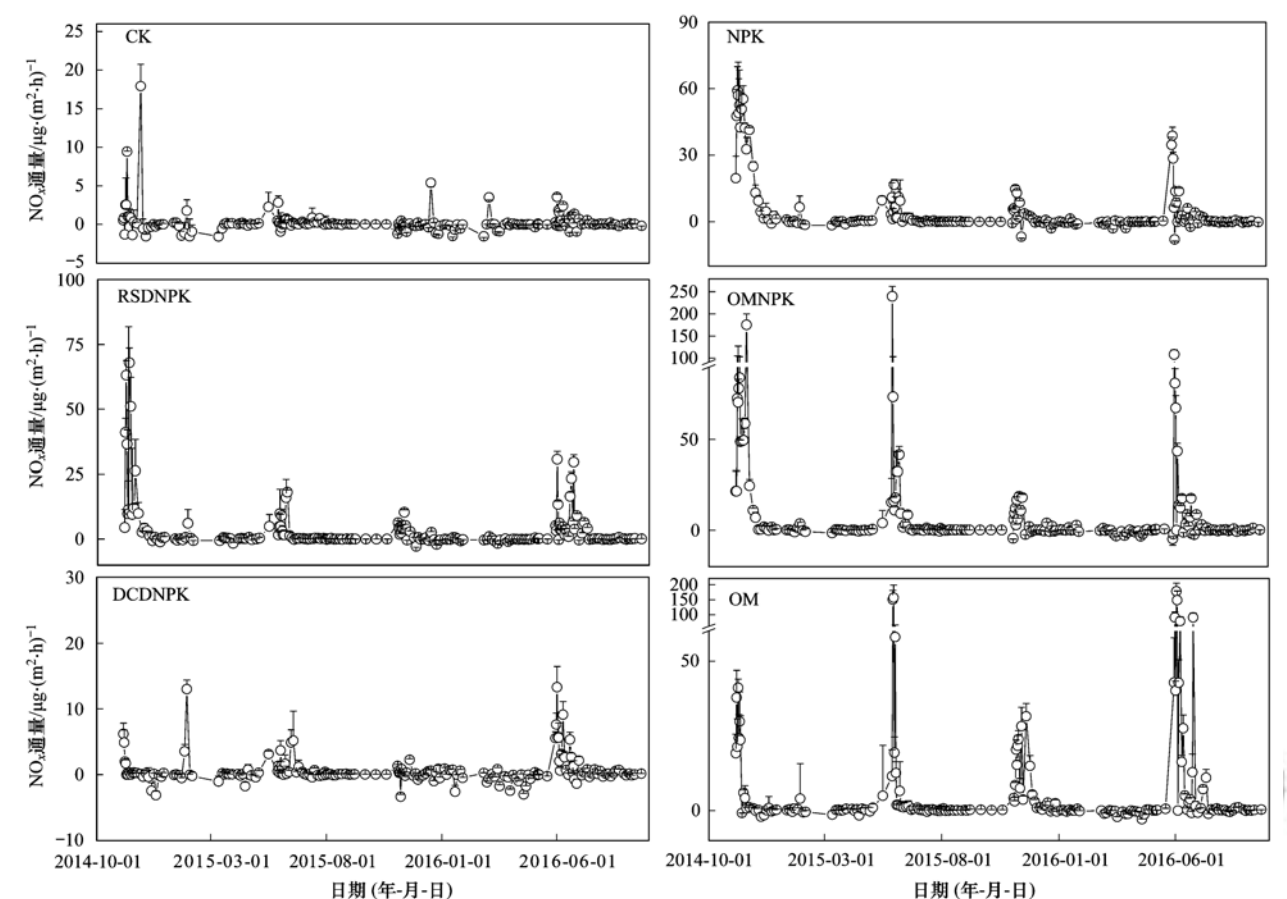


图 4 不同施肥方式下土壤 NO_x 排放通量的季节变化

Fig. 4 Seasonal patterns of soil NO_x emission flux under different fertilization regimes

肥处理土壤 N₂O 累积排放量的范围为:0.86 ~ 5.72 kg·hm⁻²,不施肥对照 (CK) 的年均累积排放量为 0.42 kg·hm⁻²,N₂O 的直接排放系数为 0.16% ~ 1.89% (表 2). 较常规 NPK 施肥,OM 与 OMNPK 处理的土壤 N₂O 累积排放量分别显著增加 226% 和 83%,RSDNPK 略微增加了 6%,而 DCDNPK 处理则

显著减少 32% 的排放. OM、OMNPK 和 RSDNPK 处理年均累积 N₂O 排放量显著高于 DCDNPK 处理. 同时,施肥显著提高土壤 NO_x 的排放量,玉米季 NO_x 累积排放量高于小麦季,不同施肥方式下土壤 NO_x 排放量范围为 0.04 ~ 0.42 kg·hm⁻²,不施肥对照 (CK) 的年均累积排放量为 0.02 kg·hm⁻²,其直

表 2 不同施肥方式下土壤 N₂O 和 NO_x 的累积排放量¹⁾

Table 2 Cumulative soil N₂O and NO_x emission flux under different fertilization regimes

N ₂ O/NO _x	处理	2014 ~ 2015 年				2015 ~ 2016 年			
		冬小麦	夏玉米	累积	排放系数	冬小麦	夏玉米	累积	排放系数
		/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/%	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/%
N ₂ O	CK	0.14 ± 0.07de	0.26 ± 0.08e	0.40 ± 0.15e	—	0.19 ± 0.05e	0.25 ± 0.09e	0.44 ± 0.14e	—
	OM	1.23 ± 0.08a	1.81 ± 0.07a	3.04 ± 0.15a	0.94	2.45 ± 0.41a	3.27 ± 0.35a	5.72 ± 0.76a	1.89
	NPK	0.74 ± 0.14b	0.79 ± 0.02c	1.53 ± 0.16c	0.40	0.55 ± 0.21c	0.61 ± 0.14c	1.16 ± 0.35c	0.26
	OMNPK	0.75 ± 0.03c	1.16 ± 0.22b	1.91 ± 0.25b	0.54	1.18 ± 0.29b	1.83 ± 0.26b	3.01 ± 0.55b	0.92
	RSDNPK	0.73 ± 0.04b	0.88 ± 0.12c	1.61 ± 0.16c	0.43	0.59 ± 0.21c	0.65 ± 0.23c	1.24 ± 0.44c	0.29
	DCDNPK	0.17 ± 0.05d	0.69 ± 0.05d	0.86 ± 0.10d	0.16	0.35 ± 0.17d	0.63 ± 0.18d	0.98 ± 0.35d	0.19
NO _x	CK	0.01 ± 0.00e	0.01 ± 0.00e	0.02 ± 0.00d	—	0.01 ± 0.00d	0.01 ± 0.00e	0.02 ± 0.00e	—
	OM	0.11 ± 0.04b	0.23 ± 0.02a	0.34 ± 0.06a	0.11	0.07 ± 0.01a	0.35 ± 0.04a	0.42 ± 0.05a	0.14
	NPK	0.05 ± 0.01c	0.04 ± 0.01c	0.09 ± 0.02b	0.03	0.05 ± 0.01c	0.07 ± 0.01c	0.12 ± 0.02c	0.04
	OMNPK	0.15 ± 0.01a	0.21 ± 0.01ab	0.36 ± 0.02a	0.12	0.06 ± 0.01b	0.12 ± 0.02b	0.18 ± 0.03b	0.06
	RSDNPK	0.03 ± 0.01d	0.08 ± 0.02b	0.11 ± 0.03b	0.03	0.01 ± 0.00d	0.08 ± 0.01c	0.09 ± 0.01c	0.03
	DCDNPK	0.02 ± 0.00e	0.02 ± 0.01d	0.04 ± 0.01c	0.01	0.02 ± 0.00d	0.02 ± 0.00d	0.04 ± 0.00d	0.01

1) 表中字母为同一列数据间的 Duncan 多重比较结果,字母不同表示在 0.05 水平显著

接排放系数为 0.01% ~ 0.14% (表 2), 有机肥处理的 NO_x 累积排放量显著高于无机肥处理(表 2). 相对于 NPK 处理, OM 和 OMNPK 处理的土壤 NO_x 排放量分别增加 262% 和 157%, 而 DCDNPK 和 RSDNPK 则减少 62% 和 5%.

3 讨论

3.1 施肥方式对紫色土 N_2O 与 NO_x 排放通量的影响

施肥方式对于紫色土 N_2O 累积排放具有显著影响 ($P < 0.05$, 表 2), 施肥方式对 N_2O 累积排放量均呈现 $\text{OM} > \text{OMNPK} > \text{RSDNPK} > \text{NPK} > \text{DCDNPK}$ 的顺序. 施用猪厩肥促进土壤 N_2O 排放, 这与土壤 C/N 比有关^[24], 本研究所施用的猪厩肥 C/N 较低 (15:1), 导致施用猪厩肥土壤 C/N 与其他处理显著差异. 秸秆还田方式 (RSDNPK) 下土壤 N_2O 累积排放略高于 NPK 处理, 可能因秸秆还田改善了土壤结构、提供了充足的碳源, 有机碳的大量输入增强土壤异养微生物的呼吸作用和活性, 加快了土壤中氧气的消耗, 加速土壤厌氧环境的形成, 间接增强了土壤微生物的反硝化作用^[25]. 较常规施肥 (NPK), 硝化抑制剂配合氮磷钾化肥显著降低了土壤 N_2O 排放, 这主要由于 DCD 能有效抑制土壤中硝化作用, 降低了 NO_3^- -N 的形成进而降低 N_2O 排放^[26], 这也与该施肥方式下土壤硝酸盐含量 (图 2) 较低相一致.

本研究中采用静态暗箱和两点采样方法测定 NO_x 的通量, 所测某一时间段 NO_x 通量能否表示当天的 NO_x 排放通量还有待进一步研究, 因此, 此方法具有一定的不确定性^[27]. 施肥方式对于紫色土 NO_x 累积排放也具有显著影响 ($P < 0.05$, 表 2). OM 和 OMNPK 处理比 NPK 处理多排放 2 ~ 3 倍的

NO_x 量, 这可能由于猪厩肥调节土壤 C/N 而改善土壤微生物活性有关; 而 DCDNPK 处理比 NPK 处理显著减少 NO_x 的排放可能与 DCD 抑制 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化有关.

3.2 紫色土 N_2O 与 NO_x 排放的环境驱动因子

土壤无机氮含量、孔隙充水率和温度都不同程度地影响土壤 N_2O 的排放. N_2O 排放通量与土壤无机氮含量显著正相关 ($P < 0.01$, 表 3). 土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 是硝化细菌与反硝化细菌的底物, 对土壤 N_2O 产生起着至关重要的作用, 因此无机氮含量是 N_2O 排放的主控因子之一; 各处理 N_2O 排放通量与土壤孔隙充水率呈显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤孔隙充水率一定程度上反映土壤中 O_2 浓度大小, 孔隙充水率越大, 土壤中空气流通性越差, 土壤更易处于厌氧环境, 土壤中反硝化细菌的活性提高导致排放更多的 N_2O ^[28], 土壤孔隙充水率也是土壤 N_2O 排放的主控因子之一; 土壤温度通过影响微生物反应速率和土壤气体扩散速率而影响 N_2O 的释放^[29], 但在观测周期内, 只有 DCDNPK 和 CK 处理土壤温度与 N_2O 通量呈现相关关系, 其余处理未出现显著相关, 可能因为 N_2O 排放受多个因子的影响, 其他因子掩盖了土壤温度对 N_2O 的影响效应.

一般认为, 土壤 NO_x 排放主要来源于自养和异养硝化细菌的硝化作用^[30], N_2O 的排放主要来源于反硝化作用^[31]. 本研究发现不同施肥方式下的土壤 NO_x 的排放通量与土壤温度呈显著相关 ($P < 0.05$, 表 3), 这可能是因为硝化作用微生物活动的适宜温度范围是 15 ~ 35℃^[32], 而观测期间的平均土壤温度为 17.5℃, 在此温度附近硝化作用微生物活性随温度升高而上升. 此外, 土壤孔隙充水率与 NO_x 排放通量无显著相关, 这是因为土壤水分的影响

表 3 不同施肥方式下土壤 N_2O 和 NO_x 排放通量与土壤环境的相关分析¹⁾

Table 3 Correlation between N_2O and NO_x fluxes and soil environmental factors under different fertilization regimes

$\text{N}_2\text{O}/\text{NO}_x$	处理	样本数	土壤温度	土壤孔隙充水率	土壤无机氮含量
N_2O	CK	169	0.287 *	0.212 * *	0.447 * *
	OM	169	0.236 *	0.251 * *	0.461 * *
	NPK	169	0.175	0.280 * *	0.352 * *
	RSDNPK	168	0.141	0.281 * *	0.420 * *
	OMNPK	169	0.182	0.251 * *	0.422 * *
	DCDNPK	169	0.360 * *	0.227 * *	0.453 * *
NO_x	CK	169	0.185 *	0.039	0.488 * *
	OM	169	0.165 *	0.01	0.464 * *
	NPK	169	0.166 *	0.089	0.512 * *
	RSDNPK	168	0.221 *	0.110	0.428 * *
	OMNPK	169	0.184 *	0.045	0.433 * *
	DCDNPK	169	0.169 *	-0.03	0.346 * *

1) * 和 * * 分别代表在 0.05 和 0.01 水平显著相关, 表中数值代表皮尔森相关系数

响较为复杂^[33], 通常认为 30% ~ 60% 的 WFPS 条件适宜于 NO_x 排放, 而 60% ~ 80% 的 WFPS 适宜于 N_2O 排放^[34], 观测周期内土壤孔隙充水率的范围在 15.4% ~ 75.6% 波动, 波动范围较大是造成 NO_x 与土壤孔隙充水率之间关系不明确的重要原因。

4 结论

(1) 紫色土施肥初期均出现 N_2O 和 NO_x 排放峰值, 高排放通量维持 2 周左右, 之后排放通量迅速下降, 降雨过程中也出现明显的 N_2O 峰值, 但未见 NO_x 排放峰。从整个生长季来看, 玉米季累积 N_2O 、 NO_x 排放量大于小麦季。

(2) 施肥方式对土壤 N_2O 、 NO_x 累积排放有显著影响 ($P < 0.05$), 较常规氮磷钾施肥而言, 猪厩肥配施氮磷钾、秸秆还田配施氮磷钾促进紫色土 N_2O 排放, 而硝化抑制剂显著降低紫色土 N_2O 排放; 施用猪厩肥 (OM、OMNPK) 显著增加 NO_x 累积排放量, 而硝化抑制剂与秸秆还田显著抑制 NO_x 排放。

(3) 土壤无机氮含量是 N_2O 和 NO_x 排放的底物, 施肥是调节土壤无机氮含量的主要手段, 通过合理施肥调控土壤无机氮水平, 可有效减控土壤 N_2O 和 NO_x 的累积排放。

参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing[A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 141-212.
- [2] North G R. Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. *Intergovernmental panel on climate change (IPCC)* [J]. Global and Planetary Change, 1997, **15**(1-2): 59-60.
- [3] Syakila A, Kroeze C. The global nitrous oxide budget revisited [J]. Greenhouse Gas Measurement and Management, 2011, **1**(1): 17-26.
- [4] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, *et al.* Closing the global atmospheric N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, **52**(2-3): 225-248.
- [5] 王英, 李令军, 刘阳. 京津冀与长三角区域大气 NO_2 污染特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3685-3692.
Wang Y, Li L J, Liu Y. Characteristics of atmospheric NO_2 in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the Yangtze river delta analyzed by satellite and ground observations[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3685-3692.
- [6] 沈利娟, 李莉, 吕升, 等. 2013 年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1662-1670.
Shen L J, Li L, Lv S, *et al.* Observation of a photochemical event in Jiaxing during summer 2013 [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1662-1670.
- [7] Stavrou T, Müller J F, Boersma K F, *et al.* Assessing the distribution and growth rates of NO_x emission sources by inverting a 10-year record of NO_2 satellite columns [J]. Geophysical Research Letters, 2008, **35**(10): L10801.
- [8] 张中杰, 朱波, 项红艳. 氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N_2O 释放和反硝化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10): 2033-2040.
Zhang Z J, Zhu B, Xiang H Y. Effect of nitrogen fertilizer for wheat on N_2O emission and denitrification in purple soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(10): 2033-2040.
- [9] 曾泽彬, 朱波, 朱雪梅, 等. 施肥对夏玉米季紫色土 N_2O 排放及反硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(1): 130-137.
Zeng Z B, Zhu B, Zhu X M, *et al.* Effects of fertilization on N_2O emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the Sichuan basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(1): 130-137.
- [10] Ball B C, McTaggart I P, Scott A. Mitigation of greenhouse gas emissions from soil under silage production by use of organic manures or slow-release fertilizer [J]. Soil Use and Management, 2004, **20**(3): 287-295.
- [11] Miller M N, Zebbarth B J, Dandie C E, *et al.* Crop residue influence on denitrification, N_2O emissions and denitrifier community abundance in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(10): 2553-2562.
- [12] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2037-2045.
- [13] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(11): 2170-2174.
Li F M, Fan X L, Liu F, *et al.* Effects of controlled release fertilizers on N_2O emission from paddy field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(11): 2170-2174.
- [14] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49**(3): 526-534.
Ji Y, Liu G, Ma J, *et al.* Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(3): 526-534.
- [15] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011, **41**(1): 117-128.
Hu X K, Huang B X, Su F, *et al.* Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China Plain [J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, **41**(1): 117-128.
- [16] Du C Y, Duan Z Y, Lu Y, *et al.* Effect of slow and controlled release fertilizers on the yield and nutrient use efficiency of hot pepper in Qiu-Bei [J]. Agricultural Science & Technology, 2011, **12**(5): 761-764.
- [17] 李虎, 王立刚, 邱建军. 基于 DNDC 模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(4): 414-421.
Li H, Wang L G, Qiu J J. Nitrate loss simulated with DNDC model and control technologies in typical cropland of North China

- [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(4): 414-421.
- [18] 杨黎, 王立刚, 李虎, 等. 基于 DNDC 模型的东北地区春玉米农田固碳减排措施研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(1): 75-86.
- Yang L, Wang L G, Li H, *et al.* Modeling impacts of alternative farming management practices on carbon sequestration and mitigating N₂O emissions from spring maize fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(1): 75-86.
- [19] 项虹艳, 朱波, 况福虹, 等. 氮肥施用对紫色土-玉米根系统 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(3): 413-420.
- Xiang H Y, Zhu B, Kuang F H, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on N₂O emission in a purple soil and maize root system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(3): 413-420.
- [20] 刘韵, 柳文丽, 朱波. 施肥方式对冬小麦-夏玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 735-745.
- Liu Y, Liu W L, Zhu B. Effect of fertilization regime on soil N₂O emission from upland field under wheat-maize rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(3): 735-745.
- [21] 朱波, 周明华, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(1): 102-109.
- Zhu B, Zhou M H, Kuang F H, *et al.* Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(1): 102-109.
- [22] 柳文丽, 李锡鹏, 沈茜, 等. 施肥方式对冬小麦季紫色土 N₂O 排放特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(9): 1029-1037.
- Liu W L, Li X P, Shen X, *et al.* Effects of fertilizer application regimes on soil N₂O emissions in the croplands of purple soil in the Sichuan basin during wheat season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, **22**(9): 1029-1037.
- [23] Wang J, Zhu B, Zhang J B, *et al.* Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **91**: 222-231.
- [24] Fleisher D H, Cavazzoni J, Giacomelli G A, *et al.* Adaptation of Substor for controlled-environment potato production with elevated carbon dioxide[J]. Transactions of the ASAE, 2003, **46**(2): 531-538.
- [25] Cannavo P, Richaume A, Lafolie F. Fate of nitrogen and carbon in the vadose zone; in situ and laboratory measurements of seasonal variations in aerobic respiratory and denitrifying activities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(3): 463-478.
- [26] 刘倩, 褚贵新, 刘涛, 等. DCD 在不同质地土壤上的硝化抑制效果和剂量效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 765-770.
- Liu Q, Chu G X, Liu T, *et al.* Nitrification inhibition and dose-dependent effect of dicyandiamide on sandy, loamy and clayey soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, **19**(4): 765-770.
- [27] 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.
- [28] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和 NH₄⁺-N 浓度对土壤硝化反应速度及 N₂O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 1-6.
- Wang G L, Chen D L, Li Y. Effect of soil temperature, moisture and NH₄⁺-N concentration on nitrification and nitrification-induced N₂O emission[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, **18**(1): 1-6.
- [29] 刘全全, 王俊, 付鑫, 等. 不同覆盖措施对黄土高原旱作农田 N₂O 通量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, **34**(3): 115-122, 178.
- Liu Q Q, Wang J, Fu X, *et al.* Effects of different mulching measures on soil N₂O flux in rainfed winter wheat fields in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, **34**(3): 115-122, 178.
- [30] 杨杉, 吴胜军, 蔡延江, 等. 硝态氮异化还原机制及其主导因素研究进展[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1224-1232.
- Yang S, Wu S J, Cai Y J, *et al.* The synergetic and competitive mechanism and the dominant factors of dissimilatory nitrate reduction processes: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1224-1232.
- [31] Feng C, 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.
- [32] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 1-5.
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. Environmental Science, 1997, **18**(5): 1-5.
- [33] Smith K A. Demystifying organ procurement [J]. AORN Journal, 1992, **55**(6): 1530-1540.
- [34] Sierra J, Renault P. Respiratory Activity and oxygen distribution in natural aggregates in relation to anaerobiosis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(5): 1428-1438.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)