

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘奎, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997~2017年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事(1024) 《环境科学》征稿简则(1092) 信息(1226, 1264, 1417)

有机肥与无机肥配施对潮土 N_2O 排放的影响

孙赫阳^{1,2}, 万忠梅^{1*}, 刘德燕², 廖霞^{2,3}, 丁维新²

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 华北平原是我国重要的粮食主产区, 由于土壤有机质含量低, 增加氮肥用量并不能导致玉米产量持续增加。有机肥和无机肥配施被广泛认为是同时实现粮食增产和提高土壤有机质的双赢措施, 但是有机肥和无机肥配施对华北平原农田 N_2O 排放的影响尚不明确。本研究在华北平原潮土区, 通过测定不同种类有机肥与无机肥配施后农田 N_2O 排放通量和作物产量, 旨在揭示不同种类有机肥及其用量对潮土 N_2O 排放和作物产量的影响效应。田间试验共设置 8 个处理, 分别为不施肥(CK)、化肥氮(NPK)、40% 牛粪氮 + 60% 化肥氮(CM)、40% 鸡粪氮 + 60% 化肥氮(FC)、40% 猪粪氮 + 60% 化肥氮(FP)、20% 牛粪氮 + 80% 化肥氮(1/2CM)、20% 鸡粪氮 + 80% 化肥氮(1/2FC)和 20% 猪粪氮 + 80% 化肥氮(1/2FP)。整个玉米季 N_2O 排放通量均与土壤 WFPS 显著正相关($P < 0.05$)。除 NPK 处理外, 玉米季 N_2O 排放量与土壤可溶性有机碳(DOC)平均含量存在显著的线性关系。玉米季 CK 处理 N_2O 排放量为 $0.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, NPK 处理增加到 $2.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相同用量不同种类有机肥处理, N_2O 排放未出现显著差异。40% 有机肥氮用量处理下 N_2O 排放量与 NPK 处理无显著差异, 而用量减少至 20% 后, 1/2CM、1/2FC 和 1/2FP 处理 N_2O 排放量分别较 CM、FC 和 FP 减少了 33.6%、43.7% 和 12.1%, 其主要原因为易分解有机碳输入减少, 土壤 DOC 含量降低, 但玉米产量未出现显著差异。因此, 从减少温室效应的角度, 玉米季 80% 化肥氮配施 20% 有机肥氮为本地区农田施肥的较佳选择。

关键词: 华北平原; 潮土; 有机肥; N_2O 排放; 作物产量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1474-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908008

Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N_2O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain

SUN He-yang^{1,2}, WAN Zhong-mei^{1*}, LIU De-yan², LIAO Xia^{2,3}, DING Wei-xin²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The North China Plain is an important grain production area in China. Due to the low content of soil organic carbon, increasing the application rate of nitrogen fertilizer would not lead to a continuous increase of maize yield at present. The combined application of organic fertilizer and inorganic fertilizer is widely regarded as a measure to simultaneously increase grain yield and soil organic carbon; however, the effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on N_2O emissions from farmland in the North China Plain is unclear. Here, N_2O emissions and crop yields in cropland under the combined application of different types and rates of organic fertilizers plus inorganic N fertilizer were measured in the North China Plain. The field experiment included eight treatments: no N fertilizer (CK), inorganic fertilizer (NPK), 40% cow manure N plus 60% inorganic fertilizer N (CM), 40% chicken manure N plus 60% inorganic fertilizer N (FC), 40% pig manure N plus 60% inorganic fertilizer N (FP), 20% cow manure N plus 80% inorganic fertilizer N (1/2CM), 20% chicken manure N plus 80% inorganic fertilizer N (1/2FC), and 20% pig manure N plus 80% inorganic fertilizer N (1/2FP). The N_2O fluxes were significantly correlated with soil water-filled pore space during the maize season ($P < 0.05$). There was a significant linear relationship between N_2O fluxes and soil dissolved organic carbon content during the maize season in all treatments except the NPK treatment. In the maize season, N_2O emission was $0.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ under CK treatment, and increased to $2.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ under NPK treatment. However, when the proportion of manure N to total N applied was reduced from 40% to 20%, N_2O emissions were significantly reduced by 33.6%, 43.7%, and 12.1% under 1/2CM, 1/2FC, and 1/2FP treatments, respectively. The difference in application rate of organic manure N did not significantly affect maize yield. The reduction of N_2O emission at the low manure application rate compared with the high manure application rate was likely due to the decrease in dissolved organic carbon in soils.

Key words: North China Plain; fluvo-aquic soil; organic fertilizer; N_2O emissions; crop yield

收稿日期: 2019-08-01; 修订日期: 2019-10-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200309-5); 国家自然科学基金项目(4173053, 41701297); 江苏省自然科学基金项目(BK20171105)

作者简介: 孙赫阳(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮循环和温室气体排放, E-mail: hysun17@mails.jlu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wanzm@jlu.edu.cn

氧化亚氮(N₂O)是最重要的温室气体之一. 在百年尺度上, N₂O的增温潜势(GWP)是CO₂的298倍^[1]. 大气N₂O所占体积分数已经由工业革命前的 270×10^{-9} 增长到2011年的 324×10^{-9} , 并且仍以每年 $(0.73 \pm 0.01) \times 10^{-9}$ 的速度继续增长^[2]. 全球农业活动产生的N₂O排放量为 $3.8 \sim 6.8 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占全球N₂O排放总量的25%~39%^[3]. 为了满足日益增长的人口对食物的需求, 越来越多的化学氮肥被施入农田以提高粮食产量. 农业N₂O排在很大程度上是由于化学氮肥的大量施用导致^[4]. 我国农业生产过程中排放的N₂O占全国N₂O排放总量的92%, 其中, 因过量施氮造成的N₂O排放量为63万t^[5].

合理施用氮肥是调控农田N₂O排放的重要措施^[6]. 其中, 施用有机肥被认为是同时实现粮食增产和提高土壤有机碳的双赢措施^[7]. 有机肥种类及用量不同, 施用到农田后对N₂O排放的影响也存在较大差异. Ding等^[8]通过田间试验, 发现有机肥氮代替化肥氮施用能够有效降低农田N₂O排放. 李燕青等^[9]的研究也证实, 与化肥相比, 施用牛粪会降低N₂O的排放. 相反, Cheng等^[10]的研究结果表明施用有机肥比化肥诱导更多的N₂O排放. 陈哲等^[11]的研究指出猪粪施用会促进N₂O排放. 也有研究报道, 与单施化肥相比, 在等氮量情况下化肥配合有机肥施用可导致土壤N₂O排放增加^[12]、减少^[13]或是无显著差异^[14]. 因此, 研究不同种类有机肥及其替代比例对农田N₂O排放的影响, 对寻求

区域合理的养分管理措施, 减少N₂O排放具有重要意义.

华北平原是我国重要的粮食产区, 占全国农业耕地总面积的18%, 生产的粮食占全国总产量的20%以上^[15]. 然而, 由于土地力和有机质含量较低, 高氮肥投入没有获得玉米产量的持续增加^[16], 相反造成氮肥利用效率低、大量氮肥被浪费以及N₂O排放增加^[17]. 为此, 针对不同有机肥及其与无机肥的替代比例如何影响N₂O排放和作物产量这一问题, 在华北平原潮土区, 连续测定了不同种类有机肥及其与无机肥配施后农田N₂O排放通量和作物产量, 旨在揭示不同种类有机肥及其用量对潮土N₂O排放和作物产量的影响效应.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与试验设计

本试验于2018年6~9月在河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态实验站(35°00'N, 114°24'E)的有机无机肥长期定位试验小区进行. 本试验建立于2011年, 种植制度为冬小麦和夏玉米轮作. 该地区属半干旱半湿润暖温带季风气候, 年平均降水量615 mm, 其中2/3分布于6月至9月. 年均气温为13.9℃, 最低月均气温出现在1月, 为-1.0℃, 最高月均气温为27.2℃, 出现在7月. 土壤属黄河冲积物发育而成的潮土, 土壤质地为砂壤土. 2018年5月试验开始前耕层(0~20 cm)土壤基本性质如表1.

表1 试验地土壤基础理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

处理	容重/g·cm ⁻³	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/g·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/g·kg ⁻¹
CK	1.38 ± 0.01 a	8.93 ± 0.10 a	5.03 ± 0.09 d	0.69 ± 0.06 c	0.33 ± 0.12 b	5.89 ± 1.06 a
NPK	1.35 ± 0.03 a	8.63 ± 0.08 b	6.84 ± 0.23 c	0.88 ± 0.05 bc	0.57 ± 0.03 ab	5.75 ± 0.76 a
CM	1.23 ± 0.03 b	8.76 ± 0.10 ab	11.24 ± 0.14 a	1.30 ± 0.02 a	0.67 ± 0.07 ab	6.92 ± 0.32 a
1/2CM	1.32 ± 0.03 ab	8.61 ± 0.07 b	9.39 ± 0.52 b	1.25 ± 0.07 ab	0.81 ± 0.03 a	8.27 ± 2.03 a
FC	1.27 ± 0.01 b	8.69 ± 0.03 b	10.25 ± 0.96 ab	1.34 ± 0.19 a	0.63 ± 0.04 ab	9.05 ± 2.71 a
1/2FC	1.34 ± 0.03 ab	8.78 ± 0.11 ab	7.98 ± 0.80 bc	1.01 ± 0.14 b	0.29 ± 0.19 b	6.49 ± 0.63 a
FP	1.27 ± 0.02 b	8.60 ± 0.04 b	10.78 ± 0.43 ab	1.44 ± 0.08 a	0.57 ± 0.19 ab	6.30 ± 1.87 a
1/2FP	1.32 ± 0.05 ab	8.69 ± 0.04 b	8.70 ± 0.74 b	1.18 ± 0.06 ab	0.49 ± 0.15 ab	7.76 ± 0.41 a

1) 表中数据为平均值 ± 标准误差 (n=3); 同列不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05)

本试验共设8个处理: ①不施肥, 对照(CK); ②单施氮磷钾化肥(NPK); ③40%牛粪氮+60%化肥氮配施(CM); ④20%牛粪氮+80%化肥氮配施(1/2CM); ⑤40%鸡粪氮+60%化肥氮配施(FC); ⑥20%鸡粪氮+80%化肥氮配施(1/2FC); ⑦40%猪粪氮+60%化肥氮配施(FP); ⑧20%猪粪氮+80%化肥氮配施(1/2FP). 核磁共振技术(¹³C-CPMAS NMR)测定有机肥结构, 牛粪有机肥的含氧烷基碳含量高于猪粪和鸡粪(图1). 每个处理3次

重复, 共计24个小区, 采用随机区组排列, 试验小区面积为12.25 m² (3.5 m × 3.5 m).

CK处理不施肥料. 其他施肥处理采用等量氮、磷和钾, 分别为200 kg·hm⁻² (以N计)、120 kg·hm⁻² (以P₂O₅计)和120 kg·hm⁻² (以K₂O计). 磷肥和钾肥作为基肥一次性施入, 氮肥的基肥: 追肥为2:3, 有机肥以基肥形式一次性施入, 玉米季肥料氮施用情况如表2. 有机肥施用前, 首先分析其全氮、全磷和全钾含量. 若施用有机肥的全磷和全钾

含量不能满足基肥的施用量,用化学磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾)补充至等量.在玉米播种前,将基肥均匀地施入各试验处理小区,之后对0~20 cm土层进行翻地,使肥料与土壤混合均匀,同时,CK处理同样进行翻地.在玉米播种后,进行灌溉.追肥时采用撒施,各施肥处理都以化学氮肥(尿素)的形式均匀施入,之后对每个小区进行灌溉,使尿素浸入土壤.供试玉米品种为登海605,2018年6月9日施入基肥、播种,2018年7月28日追肥、灌水,2018年9月23日收获.

表2 试验处理玉米季有机肥氮和无机肥氮施用量

Table 2 Application of organic fertilizer N and inorganic fertilizer N in maize season

处理	代码	基肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		追肥 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
		有机肥	无机肥	
对照	CK	0	0	0
常规施肥	NPK	0	80	120
牛粪	CM	80	0	120
1/2牛粪	1/2CM	40	40	120
鸡粪	FC	80	0	120
1/2鸡粪	1/2FC	40	40	120
猪粪	FP	80	0	120
1/2猪粪	1/2FP	40	40	120

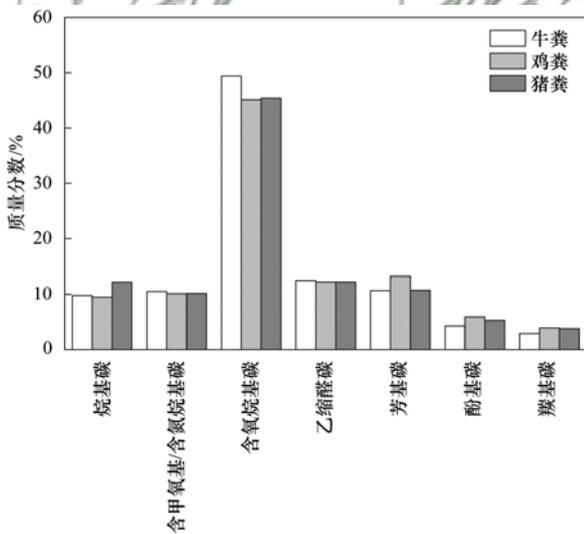


图1 有机肥中各官能团碳所占质量分数

Fig. 1 Mass fraction of carbon functional groups in organic fertilizer

1.2 N_2O 排放通量测定

N_2O 排放通量采用静态箱-气相色谱(GC)法测定.在每个试验小区中心安装一个特制圆柱形聚氯乙烯(PVC)白色圆管(高度10 cm,内径10 cm)至地下5 cm处,并在管内播入2~3粒玉米种子.播种两周后,特制塑料圆管内留存一株长势良好的玉米.玉米播种后,把不锈钢长方形底座(长70 cm,宽30 cm,高15 cm)埋设于采气区域的特制PVC圆管周围,埋入土壤10 cm,使得特制圆管位于底座中间位置.底座上方四周设有水槽(高5 cm,内径5 cm).采

集气体样品之前,将另一个PVC圆筒(高度15 cm,外径10 cm)嵌在已埋好的PVC圆管上,圆筒下端与特制圆管间均匀涂抹硅胶保证密封.把特制的不锈钢采气箱(长70 cm,宽30 cm,高30 cm)置于不锈钢底座上.采气箱的中间留有一个直径为10 cm的圆孔,以便套在PVC圆筒外围,连接处加装密封橡胶垫,确保其与采气箱之间的密封性.采样箱分开的两部分用铰链连接,并用密封橡胶垫密封.采气箱外部包裹有白色泡沫,以降低采气时箱内气温的波动.采气箱顶端设有一个测定箱内气温的端口和一个用橡胶垫密封的采气口,硅胶管连接在采气口上,并安装三通阀,采气时与注射器相连接.

自2018年6~9月,每周采集2次气体样品.采样时间设定在每天上午08:00~11:00之间.每次采气前,预先向采样箱底座的凹槽内注水2~3 cm,然后盖上采样箱.盖箱后0、10、20和30 min,分别用50 mL注射器采集样品,注入已抽真空的钢化玻璃瓶(22 mL)中,同时记录箱内温度. N_2O 浓度用安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890, Santa Clara, CA, USA)测定.

1.3 土壤样品的采集与分析

每次采集气体样品时,记录5、10和15 cm处土壤温度(Soil T_5 、Soil T_{10} 和Soil T_{15}),并选取每个小区中3个不同位置,使用便携式土壤测墒仪测定5 cm处土壤体积含水量(VWC).同时,在每个小区的3个不同位置采集0~20 cm土壤样品,混合成一个样品,放入保温箱中带回实验室,用于测定土壤无机氮(NH_4^+ 、 NO_3^-)和溶解性有机碳(DOC)含量.土壤无机氮用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl提取(土水比1:5), 25°C 恒温振荡60 min,过滤后用SAN++流动注射分析仪(SAKLAR, Breda, Holland)测定.DOC用纯水提取,以1:5土水比在 25°C 下恒温振荡30 min,然后在 4°C 下以 $8000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜(Whatman, Clifton, NJ, USA),用岛津碳氮分析仪(TOC Vcph, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定.

2018年9月23日全小区收获,测定玉米产量,之后分别取部分秸秆和籽粒样品,测定全氮含量^[18].

1.4 数据处理与分析

土壤孔隙含水量(WFPS)的计算公式:

$$\text{WFPS}(\%) = \frac{\text{VWC}(\%)}{1 - \text{BD}/2.65} \times 100 \quad (1)$$

式中,BD为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),2.65为假定的土壤颗粒密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

N_2O -N通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{S} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \times 60 \quad (2)$$

式中, F 为 N₂O-N 通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], ρ 为标准状态下 N₂O-N 密度 ($1.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V 是密闭箱有效体积 (m^3), S 为采气箱覆盖的土壤面积 (m^2), dc/dt 表示单位时间内密闭箱内 N₂O 浓度变化量 ($10^{-9}\cdot\text{h}^{-1}$), T 为密闭箱内平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), 60 用于单位转换. 30 min 内采集的 4 个气体样品浓度与时间之间的线性相关系数 $R^2 > 0.90$ 视为有效.

N₂O-N 累积排放量 ($E_{\text{N}_2\text{O-N}}$) 的计算公式为:

$$E_{\text{N}_2\text{O-N}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5} \quad (3)$$

式中, $E_{\text{N}_2\text{O-N}}$ 表示 N₂O-N 累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), F 为 N₂O-N 排放通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], i 表示第 i 次气体采样, $t_{i+1} - t_i$ 表示两个相邻测定日期的间隔 (d), n 为累积排放量观测时间内总的测定次数, 24×10^{-5} 用于单位转换.

N₂O 排放系数 (EF) (N₂O-N 排放量占施入 N 的比例) 的计算公式为:

$$\text{EF} = \frac{E_{\text{Fertilizer}} - E_{\text{Control}}}{N_{\text{Applied}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, EF 为 N₂O 排放系数 (%), $E_{\text{Fertilizer}}$ 为施氮处理 N₂O-N 排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), E_{Control} 为对照处理 N₂O-N 排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), N_{Applied} 为总施氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

单位产量 N₂O 排放系数 (Yield-scaled N₂O emission, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 由下式计算:

$$\text{Yield-scaled N}_2\text{O emission} = \frac{\text{Cumulative N}_2\text{O}}{\text{Grain yield}} \quad (5)$$

式中, Cumulative N₂O 为 N₂O-N 累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), Grain yield 为玉米产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

所有数据运用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理, Origin 8.50 进行作图. 所有统计分析采用 SPSS 20.0 软件进行, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同施肥处理下土壤 N₂O 累积排放量差异. Pearson 相关系数检验法判定不同施肥处理土壤 N₂O 排放通量与影响因子的相关性及显著水平.

2 结果与分析

2.1 土壤温度和土壤孔隙含水量的变化

整个玉米生长季, 土壤 5 cm 温度平均为 26.8 $^{\circ}\text{C}$, 变化范围为 16 ~ 33.3 $^{\circ}\text{C}$, 各处理间无显著差异 (图 2). 土壤 WFPS 受降雨和灌水的影响, 降雨和灌水后, 土壤 WFPS 达到 50% ~ 60%, 之后迅速下降. 不同处理的平均 WFPS 为 32.7% ~ 37.6%, 各处理间也无显著差异.

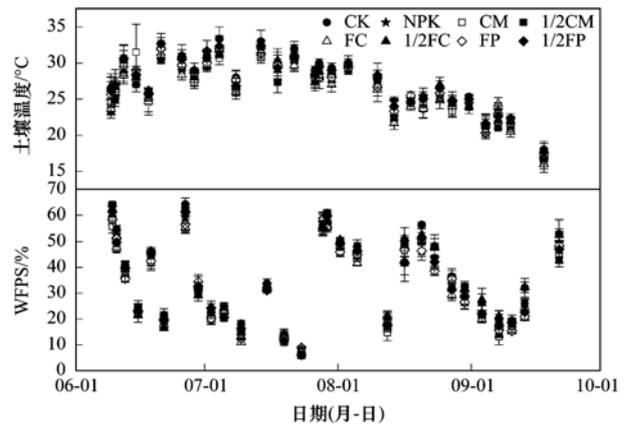
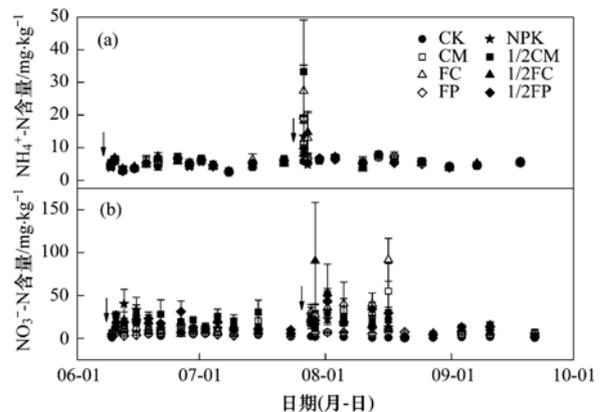


图 2 不同有机肥处理土壤 5 cm 温度和土壤孔隙含水量 (WFPS)

Fig. 2 Soil temperature at 5 cm depth and water-filled pore space (WFPS) under different treatments

2.2 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化

在整个玉米生长季, CK 处理土壤中 NH₄⁺-N 含量变化范围为 1.90 ~ 8.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 3(a)]. 施用基肥后, 各施氮处理土壤中 NH₄⁺-N 含量均略有上升, 但各处理间未出现明显差异. 追肥后, 各施氮处理土壤中 NH₄⁺-N 含量均显著上升, 此后均急剧下降. 追肥后第 1 d, 除 1/2FC 外其余施氮处理 NH₄⁺-N 含量均达到峰值, 追肥后第 2 d, NPK、CM、1/2CM、FC、FP 和 1/2FP 处理土壤 NH₄⁺-N 含量分别较第 1 d 降低了 64.35%、40.66%、82.30%、52.59%、64.19% 和 44.77%. 而 1/2FC 处理土壤 NH₄⁺-N 含量在追肥后第 2 d 达到峰值, 之后迅速降低. 基肥施用后土壤 NO₃⁻-N 含量未显著改变, 追肥后土壤中 NO₃⁻-N 浓度显著上升, 但是 NO₃⁻-N 峰值出现时间晚于 NH₄⁺-N [图 3(b)].



箭头表示施肥时间, 下同

图 3 不同有机肥处理土壤无机氮含量动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil inorganic nitrogen content under different treatments

2.3 土壤 DOC 含量的变化

整个玉米季土壤 DOC 含量变化范围为 10.84 ~ 73.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各处理土壤 DOC 含量分别在基肥和

追肥施用后即 6 月 10 日和 8 月 1 日出现两个峰值 (图 4). 所有施肥处理中,以 CM 处理的土壤 DOC 平均含量最高,为 $46.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于除 FP 外的其他处理 ($P < 0.05$); NPK 处理下土壤 DOC 平均含量最低 ($18.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),显著低于其他施肥处理 ($P < 0.05$),但与对照处理无显著差异 (图 5).

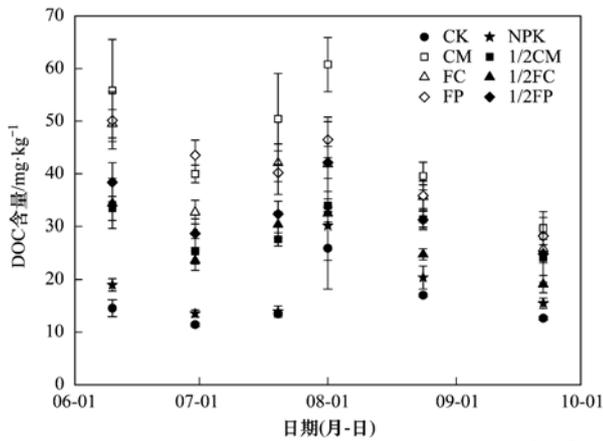


图 4 不同处理土壤 DOC 含量动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil DOC content under different treatments

2.4 玉米产量和氮素吸收量

玉米产量变幅为 $4\ 022 \sim 11\ 009 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中,CK 处理最低,FP 处理最高 [图 6(a)]. 所有施肥处理中,FC 和 1/2FC 处理的产量最低,分别为 $9\ 788 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9\ 755 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著低于 FP 处理 ($P < 0.05$). FP 处理玉米产量较 NPK 处理增加了 6.50%,但各有机肥处理与 NPK 处理玉米产量差异都未达到显著水平. 同种有机肥用量占比 20% 处理

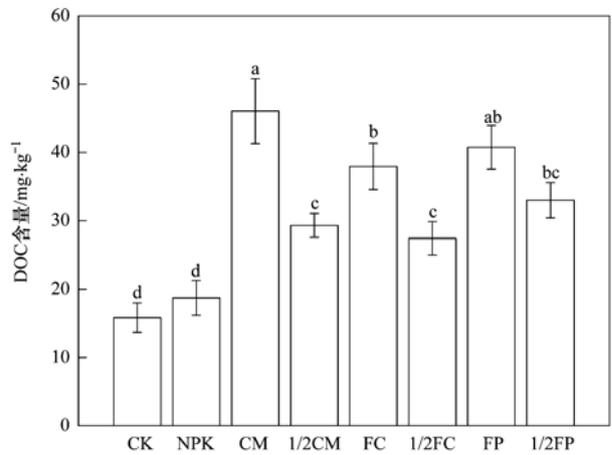


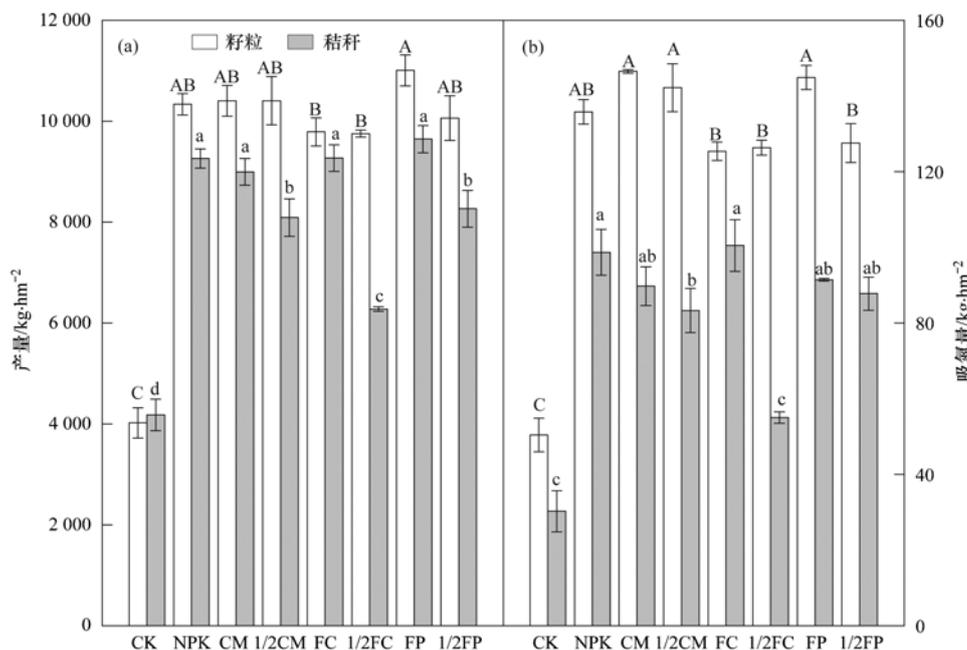
图 5 不同有机肥处理对土壤 DOC 含量的影响

Fig. 5 Soil DOC content under different treatments

与 40% 处理之间玉米产量无显著差异. 玉米籽粒及秸秆吸氮量的变化与产量相似 [图 6(b)].

2.5 N₂O 排放通量及其与土壤环境因素的关系

各施肥处理 N₂O 排放通量具有明显的季节变化,且变化规律基本一致,在基肥和追肥后分别出现两个明显的 N₂O 排放峰,排放峰一般维持一周左右,然后又回归到较低排放水平 (图 7). 基肥施用后, NPK 处理 N₂O 排放通量显著高于其他处理 ($P < 0.05$). 在 6 月 27 日降水后, N₂O 排放通量出现一个小的排放峰. 追肥灌水 (7 月 28 日) 后 N₂O 排放通量达到最大排放峰,其中,FC 处理 N₂O 排放通量达到 $1\ 748.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,CK 处理土壤 N₂O 排放通量较低 [$131.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], 20% 有机肥处理 N₂O 排放峰值显著低于同种类 40% 有机肥处理. 整个玉



不同大写字母表示处理间籽粒的产量和吸氮量差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示处理间秸秆的产量和吸氮量差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 不同有机肥处理对作物产量和吸氮量的影响

Fig. 6 Crop yield and amount of nitrogen uptake under different treatments

米季, CK 处理 N₂O 平均排放通量为 19.9 μg·(m²·h)⁻¹, NPK 处理为 90.5 μg·(m²·h)⁻¹, 40% 有机肥处理为 80.5 ~ 93.3 μg·(m²·h)⁻¹, 20% 有机肥处理为 51.7 ~ 70.8 μg·(m²·h)⁻¹.

在所有处理中, N₂O 排放通量与土壤 WFPS 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 表 3). 除 CK、1/2FC 和 1/2FP 处理外, 其余处理 N₂O 排放通量与土壤 NH₄⁺-N 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.001$). 在 1/2CM 和 FP 中, N₂O 排放通量与 TIN-N 含量呈显著正相关 ($P < 0.01$).

2.6 N₂O 累积排放量、N₂O 排放系数和单位产量排放系数

整个玉米生长季, CK 处理 N₂O 累积排放量为

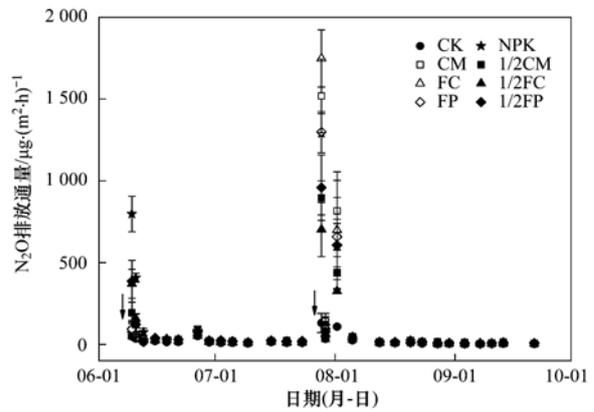


图 7 不同处理玉米季 N₂O 排放通量动态变化

Fig. 7 Dynamics of N₂O emission fluxes in maize growing season under different treatments

表 3 不同处理玉米季 N₂O 排放通量与环境因子的关系¹⁾

Table 3 Correlations between N₂O fluxes and environmental factors in maize growing season under different treatments

处理	Soil T ₅	Soil T ₁₀	Soil T ₁₅	WFPS	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	TIN
CK	0.230	0.186	0.215	0.546 **	0.335	0.111	0.208
NPK	0.055	-0.043	-0.113	0.540 **	0.629 ***	0.199	0.320
CM	0.126	0.193	0.240	0.387 *	0.684 ***	0.257	0.328
1/2CM	0.127	0.156	0.099	0.471 **	0.868 ***	0.296	0.676 ***
FC	0.084	0.107	0.078	0.379 *	0.850 ***	0.209	0.388
1/2FC	0.067	0.026	-0.005	0.478 **	0.189	0.177	0.188
FP	0.109	0.133	0.100	0.368 *	0.854 ***	0.467 *	0.596 **
1/2FP	0.108	0.129	-0.125	0.458 *	0.134	0.098	0.106

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

0.50 kg·hm⁻², 施用氮肥显著增加 N₂O 累积排放量 ($P < 0.05$), NPK 处理为 2.28 kg·hm⁻², 但是与 40% 有机肥氮处理无显著差异 (表 4). 而 20% 有机肥氮处理的 N₂O 累积排放量均低于同种类 40% 有机肥氮处理, 其中 1/2CM 和 1/2FC 处理分别显著低于 CM 和 FC 处理 ($P < 0.05$), 1/2CM、1/2FC 和 1/2FP 分别较 CM、FC 和 FP 减少了 33.6%、43.7% 和 12.1%. 除 NPK 处理外, 玉米季 N₂O 排放量与土壤 DOC 平均含量呈显著线性关系 (图 8). 整个玉米季

NPK 处理 N₂O 排放系数为 0.89%, 与 40% 有机肥氮处理无显著差异 (0.76% ~ 0.92%), 20% 有机肥氮处理 N₂O 排放系数明显降低 (0.40% ~ 0.64%), 且以 1/2FC 处理最低. CK 处理下, 玉米单位产量排放系数为 0.12 g·kg⁻¹, 20% 的有机肥氮处理均低于 40% 的有机肥氮处理和 NPK 处理.

表 4 N₂O 累积排放量、N₂O 排放系数和单位产量排放系数¹⁾

Table 4 Cumulative N₂O emission, N₂O emission factor, and yield-scaled N₂O emission

处理	N ₂ O 累积排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放系数 /%	单位产量排放系数 /g·kg ⁻¹
CK	0.50 ± 0.05c	—	0.12 ± 0.01b
NPK	2.28 ± 0.21ab	0.89 ± 0.1ab	0.22 ± 0.02a
CM	2.35 ± 0.3a	0.92 ± 0.15a	0.23 ± 0.03a
1/2CM	1.56 ± 0.19b	0.53 ± 0.1b	0.15 ± 0.02b
FC	2.31 ± 0.38a	0.91 ± 0.19ab	0.24 ± 0.04a
1/2FC	1.3 ± 0.07b	0.40 ± 0.04b	0.13 ± 0.01b
FP	2.03 ± 0.32ab	0.76 ± 0.16ab	0.18 ± 0.03ab
1/2FP	1.78 ± 0.28ab	0.64 ± 0.14ab	0.18 ± 0.03ab

1) 表中数据为平均值 ± 标准误差 (n = 3); 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

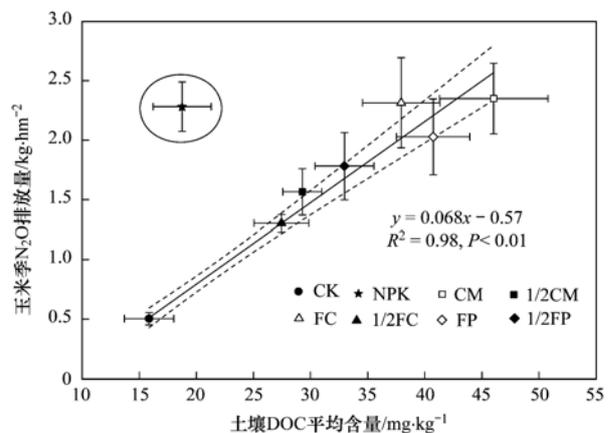


图 8 不同处理玉米季 N₂O 排放量与土壤 DOC 平均含量的关系 (NPK 除外)

Fig. 8 Correlation between cumulative N₂O emission and average soil DOC content in maize growing season under different treatments (except NPK)

3 讨论

农田土壤,尤其是施肥土壤,是全球大气 N_2O 的重要排放源.农田生态系统 N_2O 主要来源于土壤氮素的硝化作用和反硝化作用,环境因素和农田管理措施等(诸如土壤温度、湿度、pH、施肥和耕作等)强烈影响着这两个过程以及 N_2O 的排放量.本研究中土壤 N_2O 排放通量与土壤WFPS显著正相关(表3),土壤水分含量是影响农田土壤 N_2O 排放的重要因素.在土壤含水量WFPS 30%~70%时,硝化作用是产生 N_2O 的主导过程,而在WFPS 70%~90%时,反硝化作用则是主要产生 N_2O 的微生物过程^[19].一般认为,华北平原土壤 N_2O 主要是由硝化作用产生,因为该地区土壤砂粒含量较高和土壤有机碳含量较低,因而通常情况下很难形成适于反硝化作用发生的厌氧环境^[20].本研究中,各处理土壤WFPS 7%~64%, N_2O 排放最高峰出现在土壤水分含量WFPS 60%左右.因此,灌水后土壤WFPS增加至硝化作用的最佳反应条件^[20],促进硝化作用进行,从而诱导更多的 N_2O 排放,这与追肥和灌水后土壤 NH_4^+ 含量减少, NO_3^- 含量增加的变化结果相一致(图3).

本研究中,相同施氮量条件下,与单施无机肥(NPK)处理相比,各40%有机肥氮处理(CM、FC和FP)的 N_2O 累积排放量未出现显著差异,但20%有机肥氮处理(1/2CM、1/2FC和1/2FP) N_2O 累积排放量明显减少(表4).整个玉米生长季 N_2O 排放可以分为基肥和追肥施用后两个大的 N_2O 排放过程.施用基肥后,20%有机肥氮处理的 N_2O 排放高于相应的40%有机肥氮处理,但都低于NPK处理,其主要原因是土壤中无机氮的输入(尤其是NPK处理)为 N_2O 产生提供了底物,促进了 N_2O 排放^[21].伴随着基肥的施入,由于有机肥的大量施入,40%有机肥氮处理中土壤DOC含量显著增加(图4和图5),较高的碳源使得土壤微生物活性增强^[22],然而追肥前由于土壤中较低的无机氮含量, N_2O 排放通量较低.在追施相同量无机氮后(尿素 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),40%有机肥氮处理土壤中丰富的无机氮含量和较强的微生物活性,使得 N_2O 排放峰值显著高于NPK和20%有机肥氮处理,甚至达到20%有机肥氮处理的2倍(图7).除NPK处理外,整个玉米生长季 N_2O 累积排放量与土壤DOC含量呈显著正相关关系,也表明40%有机肥处理引起较高的 N_2O 排放主要是由大量有机碳的输入引起.Zhu等^[23]的研究发现,有机肥处理中较高的有机碳输入促进 N_2O 排放.Ding等^[8]的研究发现单独施用有机肥比有机肥氮和化肥氮对

半施用更能提高 N_2O 排放,并将其归因于更多易分解有机碳的输入.有机肥施用导致的土壤DOC含量增加可以降低土壤反硝化发生的土壤含水量,提高了土壤反硝化潜力.而Cai等^[24]的报道中发现有机无机肥氮对半施用降低了土壤 N_2O 的排放,这可能与有机肥的性质有关,在其研究中,施用的有机肥由粉碎的小麦秸秆、大豆饼和棉籽饼按照一定的比例混合,经过2个多月堆腐而成,其C/N值大约为8.通常情况下,C/N值小于20的有机肥为高度腐熟有机肥,易分解有机碳含量较低^[25].而本研究施用的有机肥C/N值为20~28,易分解有机碳含量较高.然而,本研究中,尽管20%有机肥氮处理的DOC含量较NPK处理明显增加,追施等量无机氮肥后, N_2O 排放量低于NPK处理,其原因可能是适量施用有机肥增强了固氮作用,减少了氮供应,降低了 N_2O 排放^[26].本结果表明,与NPK处理相比,20%有机肥氮与80%化肥氮配施可有效减少 N_2O 排放.由此可见,有机肥起着双重作用,一方面提高活性有机碳,提升土壤反硝化潜力;另一方面,调控土壤无机氮水平,促进或者抑制硝化和反硝化产生 N_2O .

相同用量不同种类的有机肥(牛粪、猪粪和鸡粪)处理下, N_2O 排放通量的季节变化比较一致, N_2O 累积排放量未出现显著差异(表4).有研究指出,有机物料的碳氮结构是控制其对 N_2O 排放影响的主要因素^[27].Cayuela等^[28]认为施入的有机物料中氮含量和组成的不同导致土壤 N_2O 排放的差异.本研究中鸡粪和猪粪的无机氮含量远高于牛粪,但是牛粪有机肥处理的 N_2O 排放与其他两种有机肥处理间无显著差异.表明有机肥施用时的无机氮含量不会影响土壤 N_2O 排放.本研究中,通过 ^{13}C -CPMAS NMR技术测定的有机肥结构,牛粪有机肥的含氧烷基碳含量高于猪粪和鸡粪(图1),表明牛粪中含有相对较多的易分解有机碳,这可能是40%牛粪有机肥处理中土壤DOC含量最高, N_2O 排放系数最大的原因.

4 结论

整个玉米季CK处理 N_2O 排放量为 $0.50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,NPK处理增加到 $2.28\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.40%有机肥氮处理的 N_2O 排放量较NPK处理无显著差异($1.78\sim 2.35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),但显著高于20%有机肥处理($1.30\sim 2.35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).在等施氮量情况下,相同用量不同种类有机肥处理下, N_2O 排放量未出现显著差异;有机肥氮用量占比由40%减少到20%,对玉米产量无显著影响,但是 N_2O 排放显著降低,主要原因为土壤易分解有机碳输入降低.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013; the physical science basis [A]. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA; IPCC, 2013.
- [2] IPCC. Climate Change 2014; Synthesis Report [A]. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Geneva, Switzerland; IPCC, 2014.
- [3] UNEP. Drawing down N_2O to protect climate and the ozone layer; A UNEP synthesis report [R]. Nairobi, Kenya; United Nations Environment Programme, 2013.
- [4] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860 [J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(4): 659-662.
- [5] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [6] National Development and Reform Commission. The People's Republic of China initial national communication on climate change [M]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [7] Huang T, Yang H, Huang C C, *et al.* Effect of fertilizer N rates and straw management on yield-scaled nitrous oxide emissions in a maize-wheat double cropping system [J]. Field Crops Research, 2017, **204**: 1-11.
- [8] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z, *et al.* Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N_2O and CO_2 emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China [J]. Agricultural Sciences in China, 2011, **10**(11): 1748-1757.
- [9] Ding W X, Luo J F, Li J, *et al.* Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N_2O and fertilizer-induced N_2O emissions from an intensively cultivated soil [J]. Science of the Total Environment, 2013, **465**: 115-124.
- [10] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, **48**(21): 4381-4389.
- [11] Li Y Q, Tang J W, Che S G, *et al.* Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(21): 4381-4389.
- [12] Cheng Y, Xie W, Huang R, *et al.* Extremely high N_2O but unexpectedly low NO emissions from a highly organic and chemical fertilized peach orchard system in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, **246**: 202-209.
- [13] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油菜田土壤 N_2O 排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 129-139.
- [14] Chen Z, Chen Y Y, Gao J, *et al.* Effects of different fertilization measures on N_2O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(1): 129-139.
- [15] 刘韵, 柳文丽, 朱波. 施肥方式对冬小麦-夏玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响 [J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 735-745.
- [16] Liu Y, Liu W L, Zhu B. Effect of fertilization regime on soil N_2O emission from upland field under wheat-maize rotation system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(3): 735-745.
- [17] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N_2O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 321-330.
- [18] Hou M M, Lu F L, Zhang H T, *et al.* Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N_2O emission in the winter wheat-summer maize rotation system [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 321-330.
- [19] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和 N_2O 排放的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6197-6203.
- [20] Meng L, Cai Z C, Ding W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N_2O emission in fluvo-aquic soil in North China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(12): 6197-6203.
- [21] Li X X, Hu C S, Delgado J A, *et al.* Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain [J]. Agricultural Water Management, 2007, **89**(1-2): 137-147.
- [22] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [23] Cai G X, Chen D L, Ding H, *et al.* Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, **63**(2-3): 187-195.
- [24] 李晓, 颜晓元, 邢光熹, 等. 不同动物排泄物氮的作物利用及对 N_2O 排放的贡献 [J]. 土壤, 2008, **40**(4): 548-553.
- [25] Li X, Yan X Y, Xing G X, *et al.* Nitrogen utilization ratio and N_2O emission from different animal manures [J]. Soils, 2008, **40**(4): 548-553.
- [26] Dobbie K E, Smith K A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly drained gleysol [J]. European Journal of Soil Science, 2001, **52**(4): 667-673.
- [27] Ding W X, Meng L, Cai Z C, *et al.* Effects of long-term amendment of organic manure and nitrogen fertilizer on nitrous oxide emission in a sandy loam soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(2): 185-193.
- [28] Ma B L, Wu T Y, Tremblay N, *et al.* Nitrous oxide fluxes from corn fields: on-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(1): 156-170.
- [29] Ju X T, Lu X, Gao Z L, *et al.* Processes and factors controlling N_2O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(4): 1007-1016.
- [30] Zhu K, Bruun S, Larsen M, *et al.* Heterogeneity of O_2 dynamics in soil amended with animal manure and implications for greenhouse gas emissions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **84**: 96-106.
- [31] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize-wheat rotation systems: A 3-year field measurement [J]. Atmospheric Environment, 2013, **65**: 112-122.
- [32] López-Fernández S, Díez J A, Hernáiz P, *et al.* Effects of fertiliser type and the presence or absence of plants on nitrous oxide emissions from irrigated soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, **78**(3): 279-289.
- [33] Yin G F, Wang X F, Du H Y, *et al.* N_2O and CO_2 emissions, nitrogen use efficiency under biogas slurry irrigation: A field study of two consecutive wheat-maize rotation cycles in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2019, **212**: 232-240.
- [34] Garcia-Ruiz R, Baggs E M. N_2O emission from soil following combined application of fertiliser-N and ground weed residues [J]. Plant and Soil, 2007, **299**(1-2): 263-274.
- [35] Cayuela M L, Velthof G L, Mondini C, *et al.* Nitrous oxide and carbon dioxide emissions during initial decomposition of animal by-products applied as fertilisers to soils [J]. Geoderma, 2010, **157**(3-4): 235-242.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)