

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

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

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响

李平^{1,2}, 郎漫^{1,2*}, 李森², 魏玮², 李凯凯²

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 以东北耕作黑土为对象, 在 25℃ 和 60% 最大持水量 (WHC) 条件下开展为期 7 d 的室内培养试验, 研究了不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响。结果表明, 与不施肥对照处理相比, 单施氮肥对土壤呼吸释放的 CO₂ 没有影响, 而在施用氮肥的基础上配施有机物料使得 CO₂ 排放量提高了一个数量级, 氮肥配施秸秆对 CO₂ 排放的促进效果大于氮肥配施猪粪。短期培养时间内施用氮肥对 N₂O 排放没有显著影响, 硝化作用是对照处理和单施氮肥处理土壤排放 N₂O 的主要过程。与单施氮肥处理相比, 氮肥配施猪粪或秸秆显著促进了反硝化过程, 使得 N₂O 排放量提高了两个数量级, 氮肥配施秸秆处理的 N₂O 排放量显著大于氮肥配施猪粪处理。单施氮肥抑制了 CH₄ 的排放, 表现为对 CH₄ 的微量吸收, 而氮肥配施猪粪或秸秆则显著促进了 CH₄ 的排放。

关键词: 施肥; 黑土; 温室气体; 硝化作用; 反硝化作用

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2360-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708256

Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil

LI Ping^{1,2}, LANG Man^{1,2*}, LI Miao², WEI Wei², LI Kai-kai²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: A 7-day incubation experiment was conducted at 25℃ with 60% water holding capacity (WHC) to study the short-term effects of different fertilization treatments on the regularity of greenhouse gas emissions from northeast black soil. The results showed that application of chemical N fertilizer had no effect on CO₂ emission, as compared with the non-fertilizer control treatment; however, a combined application of N fertilizer with pig manure or straw increased CO₂ emissions by one magnitude compared to that of the chemical N fertilizer treatment, with the effect of chemical N fertilizer and straw being more prominent. Nitrification was the main process resulting in N₂O emission for the non-fertilizer control and chemical N fertilizer treatments, and the application of chemical N fertilizer had no significant effect on N₂O emission, as compared with the non-fertilizer control. The combined application of N fertilizer with pig manure or straw promoted the occurrence of denitrification and increased N₂O emissions by two magnitudes compared to that of the chemical N fertilizer treatment, with the effect of chemical N fertilizer with straw being more remarkable. Compared with the non-fertilizer control, the application of chemical N fertilizer inhibited CH₄ emissions and promoted the slightly absorption of CH₄, while the combined application of chemical N fertilizer with pig manure or straw increased significantly the emission of CH₄.

Key words: fertilization; black soil; greenhouse gas; nitrification; denitrification

二氧化碳 (CO₂)、氧化亚氮 (N₂O) 和甲烷 (CH₄) 是引起全球气候变暖的重要温室气体, 其辐射力分别为 1.66、0.16 和 0.48 W · m⁻¹。大气中 N₂O 和 CH₄ 的浓度虽然没有 CO₂ 高, 但是百年尺度上单位分子 N₂O 和 CH₄ 的增温潜势分别为 CO₂ 的 310 和 21 倍^[1]。工业革命以来, 大气中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度以每年 0.5%、0.3% 和 0.8% 的速度持续增长, 到 2100 年大气中 CO₂ 浓度将达到 540 ~ 970 × 10⁻⁶, N₂O 浓度在 38 × 10⁻⁹ ~ 44 × 10⁻⁹ 之间, CH₄ 浓度在 -190 × 10⁻⁶ ~ 1 970 × 10⁻⁶ 之间^[2], 这将严重影响人类社会的生存和可持续发展。大气中温室气体的来源众多, 农田土壤是其中一个重要的排放源^[3]。有研究表明^[4], 由人类农业生产活动导致的温室气体排放量占温室气体排放总量的 10%

~12%。不同类型农田土壤排放温室气体的多少与土壤自身的理化性质直接相关, 而各种农业生产措施如耕作、灌溉、施肥等也都会对土壤温室气体的排放产生重要影响^[5~7]。

不同施肥方式对土壤排放温室气体的影响各有不同。研究发现, 施用氮肥比施用豆科绿肥更能促进稻田土壤 N₂O 的排放^[8], 但施用有机肥的旱作土壤 N₂O 排放量高于施用氮肥处理^[9]。施用化肥和有机肥均对林地土壤 CO₂ 排放具有明显的促进作用

收稿日期: 2017-08-31; 修订日期: 2017-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301345, 41101284); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目

作者简介: 李平 (1982 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤氮循环及其环境效应, E-mail: pli@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: mlang@nuist.edu.cn

用^[10]，而 Gao 等^[11]的研究发现，施用高量氮肥反而降低了我国热带林地土壤 CO₂ 的排放，这可能与气候条件和土壤性质的差异有关。相对于 N₂O 和 CO₂，施肥方式对土壤 CH₄ 排放的影响更为复杂。施用有机肥比氮肥能导致更多的 CH₄ 排放^[12]，而施用氮肥对土壤 CH₄ 排放却可能产生促进、抑制或者没有影响的结果^[13]。由此可见，目前对于施肥影响土壤温室气体排放的研究结果还存在很大争议，有必要进行更深入地研究。

东北黑土区是我国重要的商品粮基地，近几十年以来，过度开垦和不合理的土地利用方式使得黑土质量退化现象日益严重，土壤肥力显著降低^[14]。为了提高作物产量，人们开始致力于土壤肥力的维持和改善。黑土区农业生产过程中在施用化肥的同时，通常配施有机粪肥或者秸秆还田以培肥土壤^[15]。长期大量施用有机无机肥料在维持土壤肥力的同时也会影响土壤理化性质，进而影响温室气体的排放。因此，本文以东北黑土区长期耕作土壤为研究对象，通过室内培养试

验分析不同施肥处理（不施肥、单施氮肥、氮肥配施猪粪、氮肥配施秸秆）下土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的排放规律及其影响机制，以期评估黑土开发利用的生态效应，促进黑土的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以黑龙江省哈尔滨市阿城区蜚克图镇光明村的表层耕作黑土（0~20 cm）为研究对象，该土壤开垦时间近 100 a，主要利用方式为玉米连作。当地年平均气温为 1.5℃，年平均降雨量为 530 mm，冬季寒冷干燥，夏季高温多雨，属北温带大陆季风气候。土壤基本理化性质如表 1 所示。试验所用猪粪采自当地养殖农户，玉米秸秆为土壤采样地玉米收割后新鲜秸秆的地上部分。猪粪的有机碳含量为 30.6%，全氮含量为 2.32%，C/N 为 13.2；秸秆的有机碳含量为 56.9%，全氮含量为 1.12%，C/N 为 50.8。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the test soils

pH	最大持水量 /%	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	有机碳 /%	全氮 /%	碳氮比	水溶性有机碳 /mg·kg ⁻¹	水溶性有机氮 /mg·kg ⁻¹	砂粒 /%	粉粒 /%	粘粒 /%
4.93	61.0	9.05	11.6	1.60	0.164	9.76	233.3	9.42	12.5	72.0	15.5

1.2 试验设计

试验设置不添加氮肥的对照处理（CK）、单施氮肥处理（N）、氮肥配施猪粪处理（N+F）、氮肥配施秸秆处理（N+G）共 4 个处理。试验开始前向适量风干土中分别添加相当于烘干土重 3% 重量的猪粪和秸秆并充分混匀。每个处理称取土样 30 g（干基）置于 250 mL 三角瓶中，调节土壤含水量为 40% 田间最大持水量（WHC），于 25℃ 下黑暗预培养 1 周以激活土壤微生物。预培养结束后向施肥处理土壤中加入硫酸铵溶液使得 N 含量达到 120 mg·kg⁻¹，同时调节水分含量至 60% WHC，不施肥对照处理加入等量的蒸馏水。用锡箔盖住三角瓶的瓶口，并扎 4~5 个小眼以利于通气，每天称重补水使土壤含水量保持在 60% WHC。将三角瓶置于 25℃ 培养箱中黑暗培养 1 周，分别于培养开始后的 0、1、3、5、7 d 破坏性取样，每个处理取 3 瓶土壤作为重复采集气体样品。采气前除去锡箔，用带取气孔的橡胶塞密闭瓶子，分别在密闭后的 0 h 和 24 h 用注射器抽取 20 mL 气体注入到预先抽好真空的 18.5 mL 顶空瓶中，测定 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度。气

体样品采完后，向三角瓶中加入 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液（液土比 2.5:1），振荡提取 1 h 后过滤，测定滤液中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度。

1.3 测定项目与方法

采用水浸提（水土比 2.5:1）电位法测定土壤 pH 值；采用碳氮元素分析仪（NA Series 2，CE Instruments，Italy）测定土壤、猪粪和秸秆的有机碳和全氮含量；采用激光粒度分析仪（Beckman Coulter，Los Angeles，USA）测定土壤质地；土壤用水浸提后（水土比 3:1）过 0.45 μm 滤膜，滤液用有机碳氮元素分析仪（Shimadzu Corp，Kyoto，Japan）测定水溶性有机碳和水溶性有机氮含量^[16]；土壤最大持水量的测定采用漏斗法，具体步骤参照文献^[17]；采用 MgO-定氮合金蒸馏法测定土壤铵态氮和硝态氮含量；采用岛津气相色谱仪（Shimadzu GC-14B，Japan）测定 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的浓度。

1.4 结果计算与统计分析

CO₂、N₂O 和 CH₄ 气体排放速率的计算公式如下：

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times V \times \frac{273}{(273 + T) \times W}$$

式中, F 为 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的排放速率, 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 CO_2 -C、 N_2O -N 和 CH_4 -C 的密度; $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间内培养瓶内气体浓度增加量, 单位为 $\times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 或 $\times 10^{-9} \text{ h}^{-1}$; V 是培养瓶中气体的有效空间体积(m^3); W 为培养瓶内的烘干土重(kg); T 为培养温度($^\circ\text{C}$).

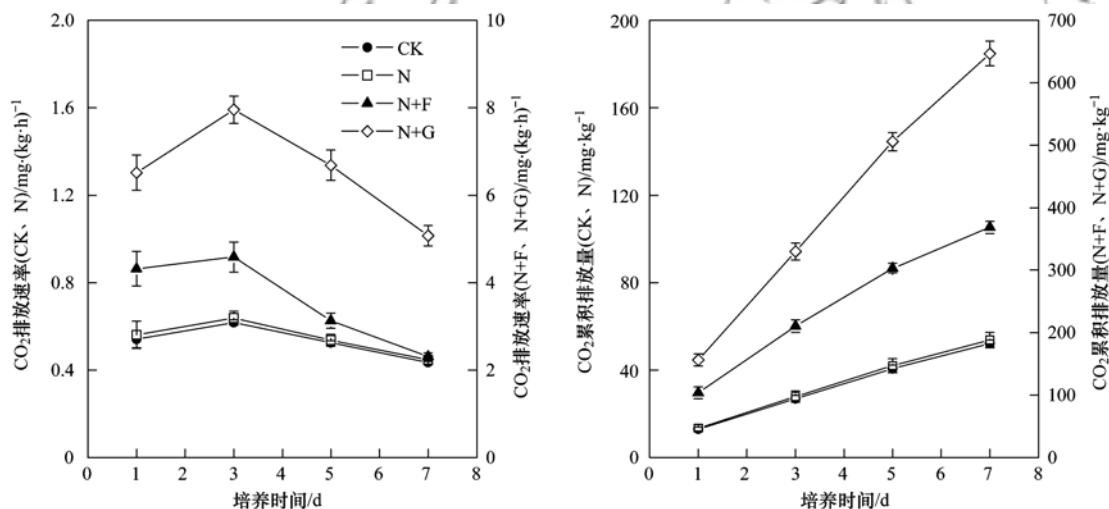
气体累积排放量通过相邻两次气体平均排放速率与排放时间的乘积累加计算得出, 硝化过程中的 N_2O 排放比率为培养一段时间后的 N_2O 累积排放量与净硝化量之比.

文中数据均为 3 次重复的平均值. 利用 Excel 软件进行数据计算与做图, 利用 SPSS 13.0 软件进行数据显著性检验.

2 结果与分析

2.1 CO_2 排放速率及其累积排放量

不同施肥处理土壤的 CO_2 排放速率均随培



竖线表示标准差, 下同

图 1 不同施肥处理土壤的 CO_2 排放速率及其累积排放量

Fig. 1 Changes in CO_2 flux and cumulative emissions from soils with different fertilization treatments

2.2 N_2O 排放速率及其累积排放量

不同施肥处理土壤的 N_2O 排放规律与 CO_2 有所不同(图 2). 在培养的前 3 d, CK 处理和单施氮肥处理的 N_2O 排放速率随培养的进行逐渐增加, 在第 3 d 达到峰值后开始逐渐降低. 而氮肥配施猪粪处理和氮肥配施秸秆处理 N_2O 排放速率的峰值出现在培养后的第 1 d, 其后随着培养时间的推进逐渐降低. 与不施氮肥的 CK 处理相比, 单施氮肥处理的 N_2O 排放速率有所提高, 但是两者之间并没有显著

养的进行而呈现先增加至峰值而后再降低的变化趋势, 且峰值均出现在培养 3 d 后(图 1). 与 CK 处理相比, 单施氮肥处理对 CO_2 排放速率没有显著影响($P > 0.05$), 整个培养期间 CK 处理和单施氮肥处理的 CO_2 排放速率介于 $0.435 \sim 0.638 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间. 与单施氮肥处理相比, 氮肥配施有机物料显著促进了 CO_2 的排放($P < 0.01$), 氮肥配施秸秆处理的 CO_2 排放速率最高. 整个培养期间氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理的 CO_2 排放速率介于 $2.31 \sim 7.96 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 比 CK 处理和单施氮肥处理提高了一个数量级.

CO_2 累积排放量随培养的进行逐渐增加. 培养 7 d 后, CK 处理和单施氮肥处理的 CO_2 累积排放量分别为 $52.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $53.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异不显著($P > 0.05$). 氮肥配施秸秆处理的 CO_2 累积排放量为 $646.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于氮肥配施猪粪处理($368.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$), 两者相比 CK 和单施氮肥处理提高了一个数量级.

差异($P > 0.05$). 在施用氮肥的基础上配施有机物料显著促进了 N_2O 的排放($P < 0.01$). 整个培养期间, CK 处理和单施氮肥处理的 N_2O 排放速率介于 $0.027 \sim 0.082 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 而氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理的 N_2O 排放速率介于 $0.695 \sim 3.56 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 相比单施氮肥处理提高了 1~2 个数量级, 差异极显著($P < 0.01$). 培养前 5 d 氮肥配施秸秆处理的 N_2O 排放速率显著高于氮肥配施猪粪处理($P < 0.01$), 但 5 d 后直到培养结束

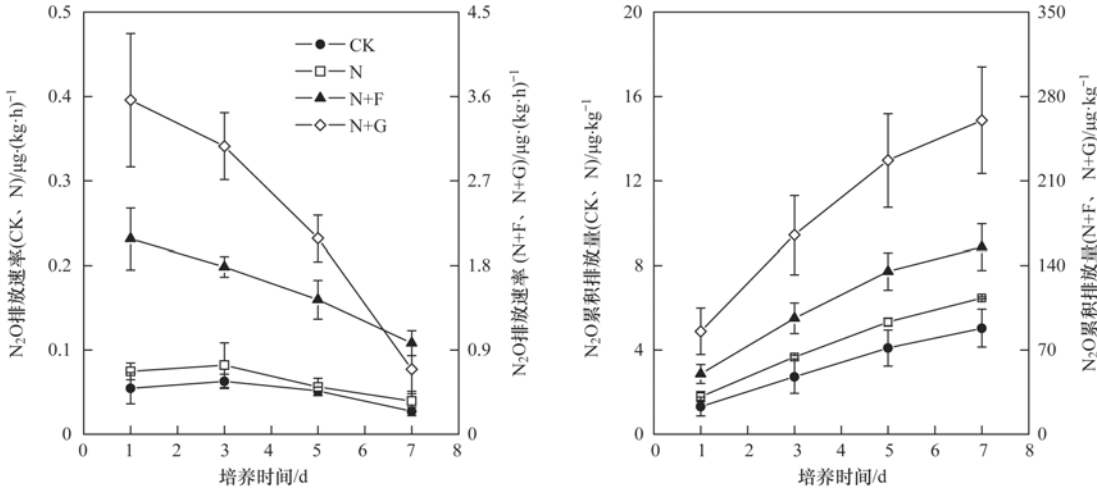


图2 不同施肥处理土壤的N₂O排放速率及其累积排放量

Fig. 2 Changes in N₂O flux and cumulative emissions from soils with different fertilization treatments

两者之间没有显著差异($P > 0.05$).

各处理N₂O累积排放量随培养的进行逐渐增加. 不同处理间的差异表现为氮肥配施秸秆处理 > 氮肥配施猪粪处理 > 单施氮肥处理 > CK 处理. 培养 7 d 后, CK 处理($5.03 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和单施氮肥处理($6.46 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的N₂O累积排放量没有显著差异($P > 0.05$), 而氮肥配施秸秆处理($260.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和氮肥配施猪粪处理($155.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的N₂O累积排放量显著高于CK 处理和单施氮肥处理($P < 0.01$).

2.3 净硝化量及其N₂O排放比率

不同施肥处理显著影响土壤净硝化量(图3). 与CK 处理相比, 施用氮肥显著促进了土壤硝化作用的进行, 培养 7 d 后单施氮肥处理土壤的净硝化量($15.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)是CK 处理($8.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的1.77 倍, 差异极显著($P < 0.01$). 与单施氮肥处理相比, 在施用氮肥的基础上配施猪粪进一步促进了

硝化作用的进行, 培养 7d 后氮肥配施猪粪处理的净硝化量($30.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为单施氮肥处理的1.93 倍. 而氮肥配施秸秆则显著抑制了硝化作用的进行($P < 0.01$), 氮肥配施秸秆处理的净硝化量($2.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)比单施氮肥处理下降了83.7%.

培养 7 d 后 CK 处理和单施氮肥处理的N₂O排放比率分别为0.057% 和0.041%, 没有显著差异($P > 0.05$). 在施用氮肥的基础上配施有机物料显著提高了N₂O排放比率($P < 0.01$). 氮肥配施猪粪处理的N₂O排放比率(0.542%)是单施氮肥处理的13.2 倍, 而氮肥配施秸秆处理的N₂O排放比率高达10.3%, 是单施氮肥处理的251 倍.

2.4 CH₄ 排放速率及其累积排放量

不同施肥处理土壤的CH₄ 排放速率如图4 所示. 在整个培养期间 CK、氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理都表现为对CH₄ 的排放, 排放速率呈现随培养的进行先增加至峰值随后降低的趋势. CK 处理和氮肥配施秸秆处理的CH₄ 排放速率峰值出现在培养后的第5 d, 而氮肥配施猪粪处理的CH₄ 排放速率峰值出现在培养后的第3 d. 在培养的前5 d, 单施氮肥处理表现为对CH₄ 的吸收, 随后则有微量的CH₄ 排放, 且排放速率显著低于不施肥的CK 处理($P < 0.01$). 在施用氮肥的基础上配施有机物料显著促进了CH₄ 的排放, 与单施氮肥处理相比, 氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理的CH₄ 排放速率在各取样时间都显著大于单施氮肥处理($P < 0.01$). 单施氮肥处理的CH₄ 累积排放量为负值且随着培养的进行逐渐下降, 而其余3 个处理土壤的CH₄ 累积排放量均为正值且随着培养的进行逐渐增加. 培养 7 d 后 CK、氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆

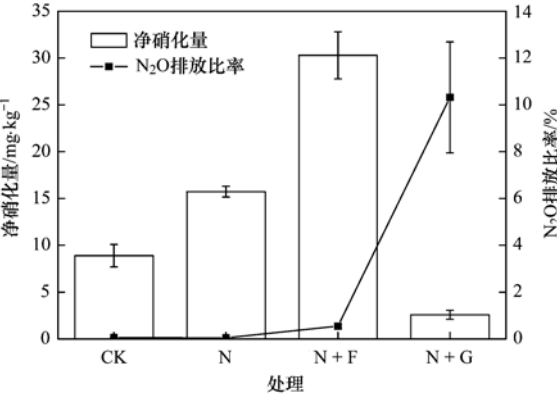
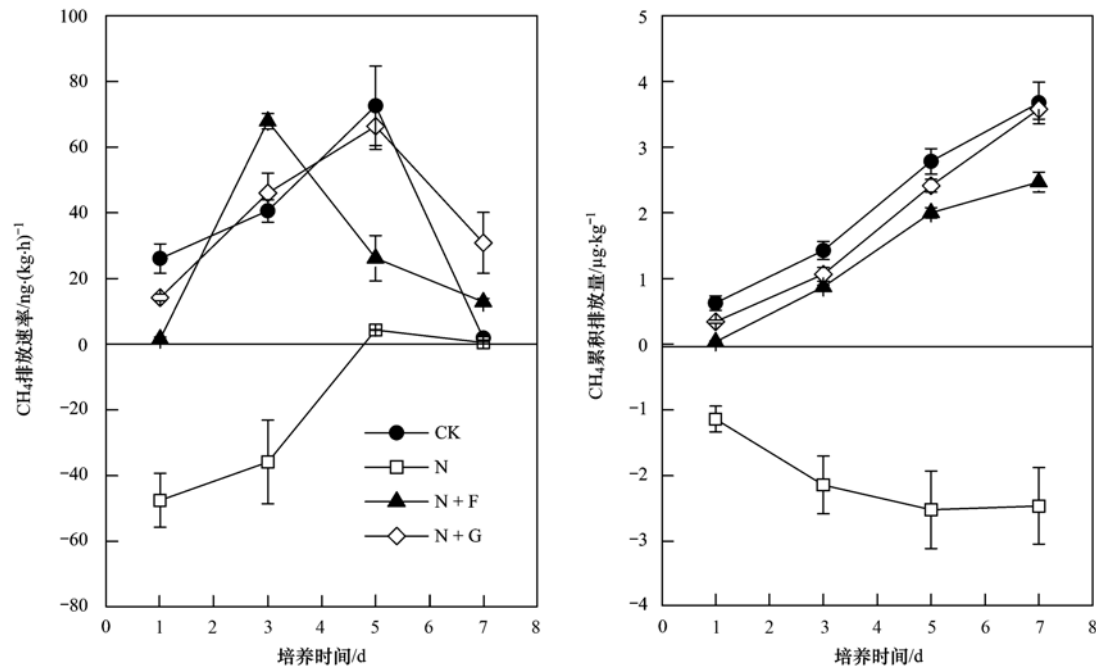


图3 培养 7 d 后不同施肥处理土壤的净硝化量及其N₂O排放比率

Fig. 3 Net nitrified nitrogen and N₂O emission ratio from soils with different fertilization treatments over the 7-day incubation

图4 不同施肥处理土壤的CH₄排放速率及其累积排放量Fig. 4 Changes in CH₄ flux and cumulative emissions from soils with different fertilization treatments

处理的CH₄累积排放量分别为3.68、2.47、3.58 μg·kg⁻¹，显著高于单施氮肥处理的-2.46 μg·kg⁻¹ ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对CO₂排放的影响

在没有种植作物的实验室培养条件下，土壤排放的CO₂主要是来自微生物呼吸，因此土壤微生物活性越强，CO₂排放量也就越高^[18]。土壤呼吸释放CO₂的过程受物理、化学、生物等多种因素的综合影响，其排放量的大小与土壤有机质的数量和质量、土壤微生物数量和活性以及土壤结构密切相关。施肥措施不同，对土壤呼吸的影响也有所不同^[5]。本研究中与不施肥的CK处理相比，施用氮肥对土壤微生物呼吸没有显著影响，这可能是因为常年施用氮肥使得供试土壤中氮素营养充足，氮不是限制微生物活性的主要因子。与单施氮肥处理相比，氮肥配施有机物料使得土壤CO₂排放速率提高了一个数量级，进一步说明了土壤中微生物的活性主要受碳限制。猪粪富含很多易分解的有效碳、氮、磷等营养物质，而且猪粪本身在矿化分解的同时还会释放出一部分有效碳，能够为微生物提供最直接有效的能量和养分，促进微生物的大量繁殖^[19]。因此，氮肥配施猪粪显著改善了土壤的养分状况，进而显著增加了土壤微生物呼吸产生的

CO₂。有关氮肥配施秸秆促进土壤呼吸的报道有很多^[4,20,21]，其主要机制在于向土壤中添加秸秆增加了土壤总孔隙度^[4]，改善了土壤的通气状况，有利于气体的扩散和传输，从而提高了CO₂的排放速率。此外，秸秆作为一种碳源丰富的物料施入土壤后为微生物提供了充足的碳源，特别是水溶性有机碳和热水溶性有机碳含量^[22]。这两种易分解有效碳很容易被微生物利用，含量越高，土壤微生物的活性越强，呼吸释放的CO₂也越高^[23]。本研究结果表明，氮肥配施秸秆比氮肥配施猪粪对土壤呼吸促进的效果更为显著，这可能与两种有机物料本身的性质有关。秸秆的碳氮比(50.8)显著高于猪粪(13.2)，且秸秆本身的有机碳所占质量分数(56.9%)大于猪粪(30.6%)，碳源更加丰富，能够为微生物提供更多的碳底物，因此呼吸释放的CO₂也越多^[22]。另一方面，向土壤中施用有机物料可以增加>0.25 mm的水稳性团聚体含量，增大水稳性团聚体的几何平均直径和平均重量直径，显著提高土壤结构的化学稳定性^[6]，这种土壤结构上的改变对于气体的扩散和传输具有重要影响。有研究表明，施用秸秆比粪肥更能增加土壤水稳性团聚体的直径^[4]，这可能是氮肥配施秸秆处理的CO₂排放量显著高于氮肥配施猪粪处理的原因之一。

3.2 不同施肥处理对N₂O排放的影响

已有研究发现，施用氮肥会促进N₂O的大量排

放^[3,8]. 本文中与不施肥的 CK 处理相比, 单施氮肥处理并没有显著增加土壤的 N_2O 排放量(图 2), 这可能与本研究的培养时间只有 7 d 有关. 有研究表明向土壤中添加氮肥 1 周后, 硝化作用才开始迅速发生^[17]. 土壤中的 N_2O 排放主要是由硝化过程和反硝化过程产生的, 本试验是在 60% WHC 的水分条件下进行的, 有利于硝化作用的发生^[24]. 本文中 CK 处理和单施氮肥处理的 N_2O 排放比率分别为 0.057% 和 0.041%, 与通常认为的硝化过程排放的 N_2O 占硝化氮的比例 (0.03% ~ 0.20%)^[25] 相当, 说明硝化作用是这两种处理土壤排放 N_2O 的主要过程. 而氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理的 N_2O 排放量比单施氮肥处理提高了两个数量级, N_2O 排放比率分别达到 0.542% 和 10.3% (图 3), 表明土壤反硝化作用可能排放了大量的 N_2O . 反硝化作用的发生需要有厌氧环境的存在以及碳底物的充足供应^[24]. 与单施氮肥处理相比, 氮肥配施猪粪或秸秆处理不仅为土壤微生物提供了充足的氮源, 而且也提供了充足的碳源, 刺激了微生物的活动, 增加了微生物源的溶解性有机碳的含量, 而且猪粪和秸秆本身也含有一部分溶解性有机碳^[22], 这些易分解有效碳不仅为反硝化微生物提供了充足的碳底物, 而且会激活土壤微生物的呼吸作用, 促进土壤微区氧气的快速消耗, 导致厌氧环境的形成, 从而间接促进了反硝化作用的发生和 N_2O 的大量排放^[20]. 王聪等^[26] 针对稻田土壤的研究也发现, 氮肥配施猪粪比单施氮肥的稻田土壤 N_2O 排放量提高了 119%, 这与本文的结果一致. 秸秆相对于猪粪而言有机碳含量更高, 碳源更加丰富, 为反硝化微生物提供的碳底物更为充足, 或者对土壤微生物呼吸的刺激作用更强, 厌氧微区形成的越多, 从而导致更多的 N_2O 排放. 但是, 针对秸秆影响土壤 N_2O 排放的研究结果存在争议. Li 等^[27] 的研究发现施用秸秆降低了土壤 N_2O 的排放, 他们认为可能是因为秸秆提高了土壤的 C/N, 促使微生物争夺利用土壤中的无机氮, 进而减少了硝化作用和反硝化作用的底物. 而宋贺等^[28] 的试验结果表明, 在低氮水平下秸秆还田可刺激培养初期的反硝化速率及 N_2O 排放, 这与本研究结果一致. 由此也说明, 有关有机物料对土壤 N_2O 排放的影响还有待于进一步地深入研究.

3.3 不同施肥处理对 CH_4 排放的影响

土壤中 CH_4 的排放是产甲烷菌和甲烷氧化菌共同作用的结果, 在厌氧条件下, 产甲烷菌分解利用土壤中的有机化合物, 产生 CH_4 , 好气条件下

CH_4 又可以被甲烷氧化菌氧化^[29]. 本研究是在好气培养条件下进行的, 不利于 CH_4 的产生, 但是土壤颗粒和水分的均匀分布可能会导致厌氧微区的形成, 造成微量 CH_4 的排放. 其他研究也有报道, 耕作土壤在好气条件下会排放少量的 CH_4 ^[29,30]. 本文的研究结果表明, 与 CK 处理相比, 施用铵态氮肥显著抑制了 CH_4 的排放(图 4), 这与文献[31]的研究结果一致. 氮肥对土壤 CH_4 排放的影响机制较为复杂, 主要取决于土壤中活性有机碳含量的多少、碳氮比和土壤质地. 有研究表明^[13], 当土壤有机碳含量相对较高而土壤质地黏重导致活性有机碳含量较低时, 土壤还原 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的能力较弱, 硫酸的施入使得 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 对产甲烷菌的抑制作用强于氮素的促进作用, 表现为抑制土壤甲烷的产生. 与单施氮肥处理相比, 氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理显著促进了 CH_4 的排放, 一个可能的原因是猪粪和秸秆的加入增加了土壤中易分解有效碳的含量, 为土壤提供了大量产 CH_4 的基质^[28]. 另一方面, 有效碳含量的增加促使微生物在分解利用碳的过程中消耗大量氧气, 形成微域厌氧环境, 利于产甲烷菌的生长和繁殖^[32]. 本研究中秸秆的有机碳含量显著高于猪粪, 能够为 CH_4 的产生提供更多的基质及更适宜的环境条件, 从而导致更多的 CH_4 排放. 有研究报道^[33], 长期氮肥配施有机肥可以显著提高土壤的微生物碳和微生物氮含量, 有利于微生物分子多样性的形成, 提高土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度, 显著降低 CH_4 的排放. 本研究中氮肥配施猪粪和氮肥配施秸秆处理显著增加了 CH_4 排放, 其长期效应还有待进一步的验证.

值得注意的是, 本试验结果是利用风干土壤在室内培养条件下获得的, 与田间实际条件有很大差异. 比如, 新鲜土壤经过扰动、风干、磨碎等过程后, 会释放一些物理性保护有机物质^[34], 增加了微生物可利用的底物数量. 此外, 风干土壤再次复水后水势的显著变化会促进死亡微生物的分解和细胞物质的释放^[35]. 这些释放的碳底物如氨基酸、甘油等为存活微生物分解利用, 激发了土壤中的碳氮矿化过程^[36]. Mikha 等认为^[37], 干土复水后对土壤碳氮矿化的激发效应只发生在复水后的 16 h 内, 24 h 之后就没有显著影响, 对 N_2O 和 CO_2 排放的激发效应的最常持续时间也就是复水后的 4 d 左右^[38]. 本研究在土壤复水预培养 7 d 后才开始取气测定, 且培养期间由于蒸发导致的水分损失仅占土壤含水量的 0.6% ~ 1.8%, 需要补充的水分量很小. 因此,

由于复水或者补水产生的碳氮矿化差异对温室气体排放的影响应该可以忽略不计。尽管如此,本研究培养过程中没有植物对土壤碳氮的吸收,水分和温度等条件也与田间有很大差异。因此,有关不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的影响还需要开展盆栽或大田原位试验以深入系统地研究其影响规律和机制。

4 结论

不同施肥处理对黑土温室气体排放的影响具有显著差异。短期培养时间内,施用氮肥对 CO_2 和 N_2O 的排放没有显著影响,而在施用氮肥的基础上配施猪粪或秸秆使得 CO_2 排放量提高了一个数量级, N_2O 排放量提高了两个数量级,氮肥配施秸秆处理的促进效果显著大于氮肥配施猪粪处理。施用氮肥显著抑制了 CH_4 的排放,而氮肥配施猪粪或秸秆则显著促进了 CH_4 的排放。然而,本研究是在室内培养条件下进行的,所处的环境条件与田间实际情况有一定的差异。因此,关于不同施肥处理对黑土温室气体排放的影响还需进行田间试验以验证室内试验的结果,进一步明确相关影响机制。

参考文献:

- [1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* 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 [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Atmospheric chemistry and greenhouse gases [A]. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* (eds.). Climate Change 2001: the Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Maraseni T N, Qu J S. An international comparison of agricultural nitrous oxide emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **135**: 1256-1266.
- [4] Lenka N K, Lal R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system [J]. Soil and Tillage Research, 2013, **126**: 78-89.
- [5] Taxis E T, Meneses G C, Mamolos A P, *et al.* Comparing organic and conventional olive groves relative to energy use and greenhouse gas emissions associated with the cultivation of two varieties [J]. Applied Energy, 2015, **149**: 117-124.
- [6] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N_2O and CO_2 emissions differently depending on type of irrigation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **137**(3-4): 251-260.
- [7] Zhang J J, Li Y F, Chang S X, *et al.* Understory management and fertilization affected soil greenhouse gas emissions and labile organic carbon pools in a Chinese chestnut plantation [J]. Forest Ecology and Management, 2015, **337**: 126-134.
- [8] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻稻田氧化亚氮排放贡献的研究 [J]. 土壤学报, 2003, **40**(5): 703-710.
- [9] Xiong Z Q, Xing G X, Tsuruta H, *et al.* Nitrous oxide emissions from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping rice-growing season [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(5): 703-710.
- [10] 曾泽彬, 刘学锋, 王一, 等. 不同施肥制度的川中丘陵区小麦-玉米轮作田 N_2O 排放特征 [J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(28): 13777-13780.
- [11] Zeng Z B, Liu X F, Wang Y, *et al.* N_2O emission characteristics of different fertilization treatments in wheat-maize rotation in hilly area of purple soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, **40**(28): 13777-13780.
- [12] 张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 等. 施肥对板栗林土壤活性碳库和温室气体排放的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(3): 745-752.
- [13] Zhang J J, Li Y F, Jiang P K, *et al.* Effect of fertilization on labile carbon pools and emissions of greenhouse gas in soils of Chinese chestnut stands [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, **19**(3): 745-752.
- [14] Gao Q, Hasselquist N J, Palmroth S, *et al.* Short-term response of soil respiration to nitrogen fertilization in a subtropical evergreen forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **76**: 297-300.
- [15] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice [J]. Geoderma, 2014, **213**: 185-192.
- [16] Sun B F, Zhao H, Lü Y Z, *et al.* The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, **15**(2): 440-450.
- [17] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征 [J]. 中国农业科学, 2016, **49**(11): 2113-2125.
- [18] Kang R F, Ren Y, Wu H J, *et al.* Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(11): 2113-2125.
- [19] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征 [J]. 农业工程学报, 2015, **31**(16): 178-185.
- [20] Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(16): 178-185.
- [21] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, **7**(6): 389-394.
- [22] 李平, 郎漫, 李煜姗, 等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(7): 1326-1332.
- [23] Li P, Lang M, Li Y S, *et al.* Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black soil [J]. Journal of Agro-

- Environment Science, 2015, **34**(7): 1326-1332.
- [18] Zhang J J, Peng C H, Zhu Q, *et al.* Temperature sensitivity of soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions in mountain forest and meadow ecosystems in China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **142**: 340-350.
- [19] 刘学玲, 黄懿梅, 姜继韶, 等. 微生物生理群在猪粪秸秆高温堆肥碳氮转化中的作用[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(5): 1713-1720.
- Liu X L, Huang Y M, Jiang J S, *et al.* Function of microbial physiological group in carbon and nitrogen transformation during a swine manure-straw compost [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(5): 1713-1720.
- [20] Badía D, Martí C, Aguirre A J. Straw management effects on CO₂ efflux and C storage in different Mediterranean agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2013, **465**: 233-239.
- [21] Wang W, Lai D Y F, Wang C, *et al.* Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. Soil and Tillage Research, 2015, **152**: 8-16.
- [22] Chen L, Zhang J B, Zhao B Z, *et al.* Carbon mineralization and microbial attributes in Straw-amended soils as affected by moisture levels[J]. Pedosphere, 2014, **24**(2): 167-177.
- [23] 刘四义, 张晓平, 梁爱珍, 等. 玉米和大豆秸秆还田初期对黑土 CO₂ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(8): 2421-2427.
- Liu S Y, Zhang X P, Liang A Z, *et al.* Effects of corn and soybean straws returning on CO₂ efflux at initial stage in black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(8): 2421-2427.
- [24] Lang M, Li P, Han X Z, *et al.* Gross nitrogen transformations in black soil under different land uses and management systems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, **52**(2): 233-241.
- [25] 李平, 郎漫, 徐向华, 等. 不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4321-4328.
- Li P, Lang M, Xu X H, *et al.* Study on regularity of greenhouse gas emissions from black soil with different reclamation years[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4321-4328.
- [26] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- [27] Li P, Lang M, Li C L, *et al.* Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from soils amended with compost and manure from cattle fed diets containing wheat dried distillers' grains with solubles[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017, **97**(3): 522-531.
- [28] 宋贺, 王成雨, 陈清, 等. 长期秸秆还田对设施菜田土壤反硝化特征和 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2014, **35**(6): 628-634.
- Song H, Wang C Y, Chen Q, *et al.* Effects of long-term amendment of residue on denitrification characteristics and N₂O emissions in greenhouse soil [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, **35**(6): 628-634.
- [29] Hurkuck M, Althoff F, Jungkunst H F, *et al.* Release of methane from aerobic soil: an indication of a novel chemical natural process? [J]. Chemosphere, 2012, **86**(6): 684-689.
- [30] Jena J, Ray S, Srichandan H, *et al.* Role of microorganisms in emission of nitrous oxide and methane in pulse cultivated soil under laboratory incubation condition [J]. Indian Journal of Microbiology, 2013, **53**(1): 92-99.
- [31] Toma Y, Oomori S, Maruyama A, *et al.* Effect of the number of tillages in fallow season and fertilizer type on greenhouse gas emission from a rice (*Oryza sativa* L.) paddy field in Ehime, southwestern Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2016, **61**(1): 69-79.
- [32] Oo A Z, Win K T, Motobayashi T, *et al.* Effect of cattle manure amendment and rice cultivars on methane emission from paddy rice soil under continuously flooded conditions [J]. Journal of Environmental Biology, 2016, **37**: 1029-1036.
- [33] Traore B, Samake F, Babana A, *et al.* Effects of different fertilizers on methane emission from paddy field of Zhejiang, China [J]. African Journal of Environmental Science and Technology, 2017, **11**(1): 89-93.
- [34] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, **46**(1): 35-40.
- Chen W C, Zhu A N, Zhang J B, *et al.* Effects of conservation tillage on the composition and organic carbon content of soil aggregates in Fluvo-aquic soil [J]. Soils, 2014, **46**(1): 35-40.
- [35] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, *et al.* Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **57**: 43-55.
- [36] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 342-350.
- Wang Y, Song X S, Wang J, *et al.* Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(2): 342-350.
- [37] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(2): 339-347.
- [38] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(6): 777-787.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)