

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砷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)

生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响

祁乐¹, 高明^{1,2*}, 郭晓敏¹, 牛海东¹, 李婷¹, 孙涛¹, 曹群羚¹, 汤镓豪¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为探究生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响, 通过盆栽试验, 采用静态暗箱/气相色谱法, 研究了不施肥对照(CK)、常规施肥(NPK)、10 t·hm⁻²生物炭+NPK(LBC)、20 t·hm⁻²生物炭+NPK(MBC)、40 t·hm⁻²生物炭+NPK(HBC)这5种处理下温室气体的排放规律。结果表明:①生物炭施用显著降低了土壤CH₄排放通量, 其排放通量大小顺序为:NPK>CK>LBC>MBC>HBC, 各处理CH₄排放通量均呈单峰型曲线, 峰值主要集中在水稻的生长后期, 整个观测期CH₄的排放通量在-0.05~47.34 mg·(m²·h)⁻¹之间; 各处理CO₂排放通量变化较复杂, 介于32.95~1350.88 mg·(m²·h)⁻¹之间, 除LBC和MBC处理呈双峰型曲线外, 其余处理均呈单峰型, 不同生物炭施用量处理均延后了CO₂排放通量峰值出现的时间; N₂O的排放通量在-309.39~895.48 μg·(m²·h)⁻¹之间, 除LBC处理呈双峰型曲线变化外, 其余处理均呈单峰型曲线;②与空白对照处理相比, 生物炭处理均可显著降低CH₄的累积排放量, 而促进了CO₂和N₂O累积排放量, CH₄、CO₂和N₂O的平均累积排放量从大到小分别为CK>LBC>MBC>HBC处理、LBC>MBC>HBC>CK处理和HBC>MBC≈LBC>CK处理; 与常规施肥处理相比, 不同施用量生物炭添加均可显著降低CH₄和CO₂的排放, 且生物炭添加量越多, 对CH₄和CO₂排放的减缓作用越明显, 但是对N₂O排放的抑制作用尚不明显;③在100 a时间尺度上各生物炭处理可显著降低温室气体的综合增温潜势, 表明生物炭配施化肥是一种有效的减排措施。

关键词: 生物炭; 稻田; 温室气体排放; 综合增温潜势; 土壤呼吸

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2351-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201710033

Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil

QI Le¹, GAO Ming^{1,2*}, GUO Xiao-min¹, NIU Hai-dong¹, LI Ting¹, SUN Tao¹, CAO Qun-ling¹, TANG Jia-hao¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to explore the effects of different amounts of biochar applied in purple paddy soil on greenhouse gas (GHG) emissions, potted experiments using a static opaque chamber and gas chromatography method were used to study the regulations and influences of biochar on soil greenhouse gas emission using five treatments: no fertilizer (CK), conventional fertilization (NPK), 10 t·hm⁻² biochar + NPK (LBC), 20 t·hm⁻² biochar + NPK (MBC), and 40 t·hm⁻² biochar + NPK (HBC). ① Soil CH₄ emission flux reduced significantly with all biochar application treatments; the emission flux followed the order, from large to small, of NPK > CK > LBC > MBC > HBC. The CH₄ emission flux of each treatment showed a single peak curve, and the peak value was mainly concentrated in the late growth stage of the paddy cropland. During the entire observation period, the emission flux of CH₄ was between -0.05 mg·(m²·h)⁻¹ and 47.34 mg·(m²·h)⁻¹. The CO₂ emission flux of each treatment was complicated and ranged from 32.95 mg·(m²·h)⁻¹ to 1350.88 mg·(m²·h)⁻¹. The CO₂ emission flux of the LBC and MBC treatments showed bimodal curves, and the CO₂ emission flux of other treatments showed single peak curves. In addition, all biochar treatments delayed the peak time of the CO₂ emission flux. The N₂O emission flux of each treatment ranged from -309.39 to 895.48 μg·(m²·h)⁻¹, and the N₂O emission flux of the LBC treatment showed a bimodal curve, while other treatments showed single peak curves. ② Compared with the CK treatment, biochar treatment can significantly reduce the cumulative emissions of CH₄ and promote the cumulative emissions of CO₂ and N₂O. The average amount of CH₄ cumulative emissions followed the order CK > LBC > MBC > HBC, while the average amount of CO₂ cumulative emissions followed LBC > MBC > HBC > CK, and the average amount of N₂O cumulative emissions followed HBC > MBC ≈ LBC > CK. Compared with conventional fertilization treatment, different application rates of biochar addition significantly reduced CH₄ and CO₂ emissions. As more biochar was added, CH₄ and CO₂ cumulative emissions were lower. Although the regulation of N₂O cumulative emissions on biochar addition was not obvious, the application of nitrogen fertilizer could promote the emission flux of N₂O to some extent. ③ Over the time scale of 100 years, the integrated global warming potentials (GWP) of CH₄ and N₂O emission under different biochar treatment were decreased significantly, indicating that biochar combined with chemical fertilizer is an effective GHG emission reduction measure.

Key words: biochar; paddy cropland; GHG emission; GWP; soil respiration

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2017-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017D202)

作者简介: 祁乐(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: ql281142@email.swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

气候变暖是当今国际社会普遍关注的全球性问题,也是当今全球面临的重大挑战^[1]. 水稻是世界三大粮食作物之一,据统计,每年稻田排放 CH_4 的总量约占总排放量的 12%^[2],水稻田 CH_4 的排放对世界 CH_4 源的贡献非常重要. 稻田产生的另一主要温室气体是 N_2O , N_2O 在大气中的浓度虽远低于 CO_2 ,但其温室效应是 CO_2 的 265 倍,温室效应贡献率为 5%,而且它对臭氧层有间接破坏作用^[3]. 因此,探索和推广稻田温室气体减排措施,对缓解全球变暖具有重要意义^[2~4].

生物炭作为一种重要的再利用资源一直受到人们的关注,它可以减少温室气体排放^[5],增加碳汇^[6]. 向土壤中施加生物炭对土壤温室气体排放的影响是当前国际生物炭研究的前沿领域,也是关乎废弃有机物资源能否实现生物炭还田的关键^[7]. 生物炭在农田土壤的固碳减排作用来自于其自身高度的化学稳定性和生物稳定性^[8],它是在厌氧或者无氧的条件下对秸秆等生物质废弃物进行热解^[9],生成的含有丰富空隙、含碳量高、生物降解速率以及氧化速率非常慢的固体^[10],通过碳封存技术锁定和降低大气中 CO_2 来减少温室气体排放^[6].

近年来,关于生物炭添加对土壤温室气体排放影响的研究较多,但研究结果存在较大的差异和分歧^[11~18]. Karhu 等^[14]的研究认为,生物炭施用增加了土壤的通气性,促进 CH_4 氧化而减少排放. 而 Zhang 等^[15]的试验结果发现生物质炭施入增加了稻田 CH_4 排放. Liu 等^[11]通过对我国多个生物炭大田试验点的数据总结发现,生物炭在不同的土壤和作物类型下,以及不同类型的生物炭处理对土壤呼吸均没有显著影响,而 Zheng 等^[13]认为生物炭会促进土壤 CO_2 的排放. Kammann 等^[16]认为高温生产的生物质炭施入土壤后 CO_2 排放量小于低温生物质炭处理. Zhang 等^[12]对 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物

炭配施化肥的旱地玉米温室气体排放的研究认为,不施氮肥时,施用 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭的土壤 CO_2 排放增加 12%,而 CH_4 和 N_2O 综合温室效应随着生物炭施用量的增加而减少. Sagrilo 等^[17]研究认为多数室内培养试验中,生物炭施入土壤中会显著增加土壤 CO_2 排放量. 郭艳亮等^[7]对两种不同材料生物炭的研究发现,对 N_2O 的排放影响没有明显规律性. 而 Cayuela 等^[18]研究认为,生物炭显著降低 N_2O 排放总量的 49%. 近期的研究主要从土壤条件、作物种类、生物炭材料等方面考虑对温室气体排放的影响. 但是多数学者在生物炭与化肥配施的过程中,忽略了不同生物炭施用量对土壤温室气体排放的影响及规律,而生物炭施用量在紫色水稻土中温室气体排放的影响还鲜见报道,本文选取西南地区典型的紫色水稻土为研究对象,探索不同生物炭施用量与化肥配施土壤温室气体排放的特征,对减少农业温室气体排放具有重要的科学理论意义和实践价值.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西南大学温室大棚内以盆栽方式进行,试验地点海拔 242 m,年平均气温 18.3°C . 最高气温 7 月平均 28.7°C ,最低气温 1 月平均 7.7°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $6\,006^\circ\text{C}$. 供试土壤取自西南大学试验农场 ($\text{E}106^\circ24'41''$, $\text{N}29^\circ48'47''$),为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的灰棕紫泥土. 其基本理化性质为:有机碳含量 $13.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $121.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $264.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $206.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 7.86. 土壤装盆前先过 2 mm 筛,再加以充分混合后装盆. 试验盆钵为可再生性 PVC 密闭圆桶,上口直径 24.4 cm,下口直径 21.0 cm,高度 23.0 cm,每盆装入 6 kg 干土. 供试水稻品种

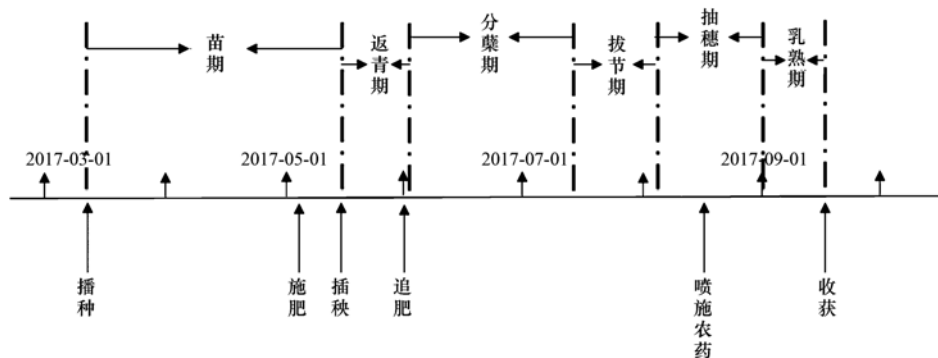


图1 水稻生长期及农作处理时间示意

Fig. 1 Growth of crops and the management of fields

为宜香优 2115, 2017 年 3 月 10 日播种(图 1), 2017 年 5 月 14 日插秧, 定苗 2 穴, 每穴 2 株, 9 月 15 日收割. 水稻在试验期间土壤一直处于淹水条件下, 苗期和返青期 2~3 d 浇一次水, 分蘖期、拔节期、抽穗期和乳熟期阴雨天气 1 d 浇一次水, 遇晴天及高温天气 1 d 浇水 2~3 次, 一直保持水稻在试验期间淹水 3~5 cm. 试验共设 5 个处理: ①不施肥(CK)、②施化肥(NPK)、③施用低量生物炭 10 t·hm⁻² + NPK(LBC)、④施用中量生物炭 20 t·hm⁻² + NPK(MBC)、⑤施用高量生物炭 40 t·hm⁻² + NPK(HBC), 每个处理 6 次重复, 试验采取随机排列.

肥料施肥: 按照当地农民习惯, 氮肥按 N 0.2

g·kg⁻¹, 磷肥按 P₂O₅ 0.12 g·kg⁻¹, 钾肥按 K₂O 0.16 g·kg⁻¹ 施入. 供试肥料为尿素(N 质量分数 46%), 过磷酸钙(P₂O₅ 质量分数 12%), 钾肥(KCl 质量分数 60%). 氮肥施肥比例为基肥: 分蘖肥 = 60%:40%. 基肥于 5 月 6 日施入; 在 6 月 1 日施入追肥. 钾肥、磷肥作为底肥一次施入. 基肥和不同施用量生物炭与土样一起充分混匀后, 装入盆中, 追肥溶于水施于土壤表面. 每个处理中除 CK 外, 各处理保持等氮磷钾的输入处理(表 1). 试验中所用生物炭由四川省久晟农业有限责任公司提供, 以油菜秸秆为原料在 500℃ 高温厌氧条件下热解 2 h 烧制, 其碳含量为 62.58%, 氮含量为 4.36 g·kg⁻¹, 磷含量为 0.97 g·kg⁻¹, 钾含量为 10.5 g·kg⁻¹, pH 为 8.9.

表 1 不同处理施肥量/g·盆⁻¹
Table 1 Amount of fertilizer applied in different treatments/g·pot⁻¹

处理	编号	尿素		过磷酸钙	氯化钾	生物炭
		基肥	追肥			
对照	CK	—	—	—	—	—
纯施化肥	NPK	1.56	1.04	6	1.6	—
10 t·hm ⁻² 生物炭配施化肥	LBC	1.42	0.94	5.79	1.13	26.67
20 t·hm ⁻² 生物炭配施化肥	MBC	1.26	0.84	5.57	0.67	53.34
40 t·hm ⁻² 生物炭配施化肥	HBC	0.96	0.64	5.14	0.26	106.68

1.2 分析方法

本试验采用静态暗箱法采集 CH₄、CO₂ 和 N₂O 这 3 种气体. 用于气体采集的箱体均设计成分节组合式标准箱, 由顶箱、延长箱和底座组成. 顶箱和延长箱均由不锈钢制成, 箱体尺寸均为 30 cm × 30 cm × 50 cm, 箱体外覆白色棉被, 防止在太阳辐射下箱内温度升高, 每盆水稻底部固定一个高度 3 cm、直径 50 cm 的 PVC 柱作为底座. 顶箱上部装有 2 个轴流扇, 用于混合箱内气体, 侧面安装有电源插头和气体样品采集口. 采样时视作物生长情况适时增加延长箱, 将顶箱或延长箱罩在底座上, 用水密封. 采样频率为每 7~10 d 一次, 每次采样时间控制在上午 08:30~11:30 进行, 遇到施肥情况, 采样频率增加, 为每 1~3 d 一次, 持续 10 d. 扣箱后立刻用 60 mL 的三通阀注射器采集第一次样品, 之后每隔 10 min 采集一次, 共采集 4 次样品, 采样后立即将样品带回实验室分析. 气体样品采用 Agilent GC-7890A 气相色谱仪进行分析, CH₄ 用 FID 检测器(火焰离子化检测器), N₂O 用 ECD 检测器(电子俘获检测器), 具体分析

方法及工作条件详见文献[7]. 标准气体由中国计量科学研究院提供(摩尔分数分别为 CH₄ 10.3 × 10⁻⁶ 和 N₂O 407 × 10⁻⁹), 根据 4 个气样浓度随采样时间的变化率, 参照文献[19]的方法, 计算排放通量. 通过内插累加法^[20]求得全年 CH₄、CO₂ 和 N₂O 的排放通量. 综合增温潜势(GWP)的计算方法参照文献[21].

自然风干后的土壤过 1 mm 筛用于测定土壤 pH、碱解氮、有效磷、速效钾, 土壤 pH 采用 pH 计(美国 Sartorius 公司 PT-10 pH 测定仪)测定(土水比 1:2.5), 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定, 土壤有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定, 土壤速效钾采用 NH₄Ac 浸提-火焰光度计法测定; 并过 0.25 mm 筛测定土壤有机碳(SOC), SOC 采用重铬酸钾容量法测定. 具体测定详细步骤参见文献[22, 23].

1.3 数据处理及分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理, Origin 8.5 作图, 不同处理间差异采用 SPSS 22.0 统计分析软件进行多因素方差分析,

LSD 法进行显著性检验 ($P=0.05$).

2 结果与分析

2.1 生物炭施用量对水稻生育期 CH_4 排放的影响

图 2 (a) 显示, 5 种曲线的变化趋势基本一致, 整个监测期内, 与 CK 处理相比, 生物炭对土壤 CH_4 的排放表现出明显的抑制效应. 对于生物炭不同施用量处理, CH_4 的排放量随着生物炭添加量的增加而降低. 施肥处理中, NPK 处理水稻 CH_4 的排

放量最高, HBC 处理显著减少了 CH_4 的排放通量, 平均通量较 NPK 处理减少了 57.77%. 除 HBC 处理外, 各处理均在抽穗期 8 月 25 日出现 CH_4 排放通量峰值, 说明水稻抽穗期 CH_4 排放通量增加, NPK、LBC、MBC 和 CK 处理 CH_4 排放通量最高峰值分别为 (47.34 ± 12.04) 、 (36.8 ± 8.83) 、 (29.25 ± 1.29) 、 $(26.28 \pm 0.57) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均高于 9 月 11 日 HBC 处理的 CH_4 排放通量最高峰值 $(18.99 \pm 3.98) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

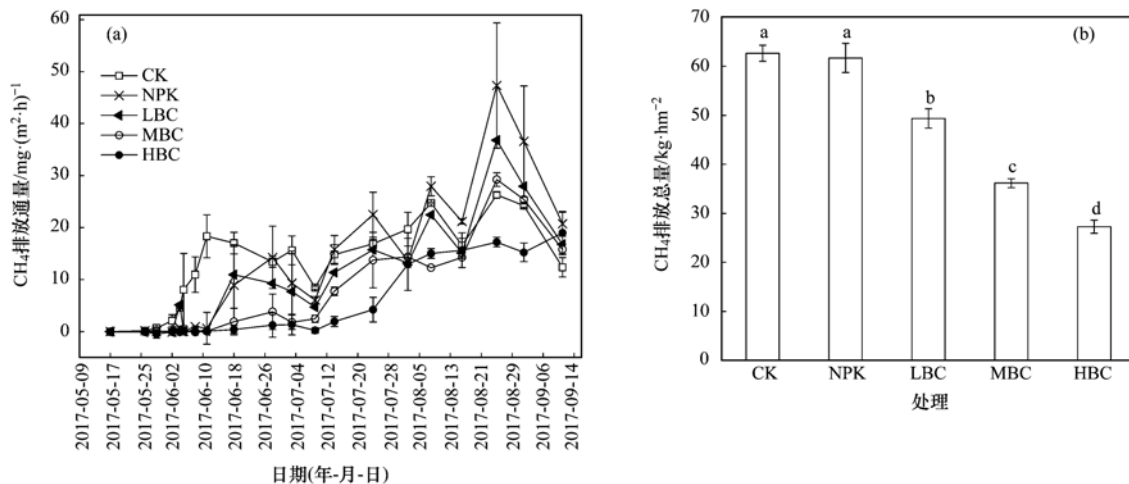


图 2 不同处理对紫色水稻土 CH_4 排放通量和累积排放量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on CH_4 flux emissions and cumulative emissions in purple paddy soil

从图 2(b) 可以看出, 不同施用量生物炭添加处理下整个水稻生育期 CH_4 排放总量较 CK 和 NPK 处理显著减少, CH_4 的排放总量随着生物炭添加量的增加而显著降低. CK (62.65 ± 1.64) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 NPK (61.7 ± 2.97) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理 CH_4 排放总量差异并不显著, 说明化肥的添加对 CH_4 排放并无显著影响. HBC 处理水稻生育期 CH_4 排放总量为 $(27.28 \pm 1.33) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 处理下降了 56.46%; MBC 处理和 LBC 处理水稻生育期 CH_4 排放总量为 $(36.18 \pm 0.93) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(49.35 \pm 1.97) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 处理下降了 42.25% 和 21.22%. 不同施用量生物炭添加处理间 CH_4 排放总量差异也十分显著, MBC 处理比 LBC 处理水稻生育期 CH_4 排放总量减少了 26.69%, HBC 处理比 MBC 处理 CH_4 排放总量减少了 24.6%. 生物炭施用量在 0、10、20 和 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下, 投入量每增加一个梯度, CH_4 排放总量减少 21.22% ~ 26.69%.

2.2 生物炭施用量对水稻生育期 CO_2 排放的影响

图 3(a) 显示, 与 CK 处理相比, 添加生物炭均促进了土壤 CO_2 的排放, 并延后了 CO_2 排放通量最

高峰值出现的时间, LBC 处理的 CO_2 排放量增加表现最明显. 施追肥 10 d 后, NPK 处理 CO_2 排放通量出现最高峰值 $(1350.88 \pm 256.65) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 且整个监测期内, NPK 处理 CO_2 排放通量均显著高于 CK 处理, 说明化肥的施用会增加 CO_2 的排放. 等氮磷钾施用条件下, 化肥施用比生物炭配施化肥对 CO_2 排放的增加效应更明显. CK 处理 CO_2 排放通量最高峰值 $(560.5 \pm 105.12) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 出现在 6 月 18 日, 比纯施化肥处理 CO_2 排放通量最高峰值延后了一周. MBC (897.5 ± 50.58) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 HBC (1033.0 ± 186.61) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 处理 CO_2 排放通量均呈单峰型, 最高峰值出现在分蘖期 7 月 3 日; 而 LBC 处理 CO_2 排放通量呈双峰型, 最高峰值出现在分蘖期 7 月 3 日和抽穗期 8 月 16 日, 峰值分别为 $(1075.04 \pm 41.39) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(1046.1 \pm 61.85) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

不同施用量生物炭添加处理下整个水稻生育期 CO_2 排放总量较 CK 处理显著增加 [图 3(b)], 较等氮磷钾条件下纯施化肥处理显著减少; 纯施化肥处理 $(3036.96 \pm 124.32) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ CO_2 排放总量显著

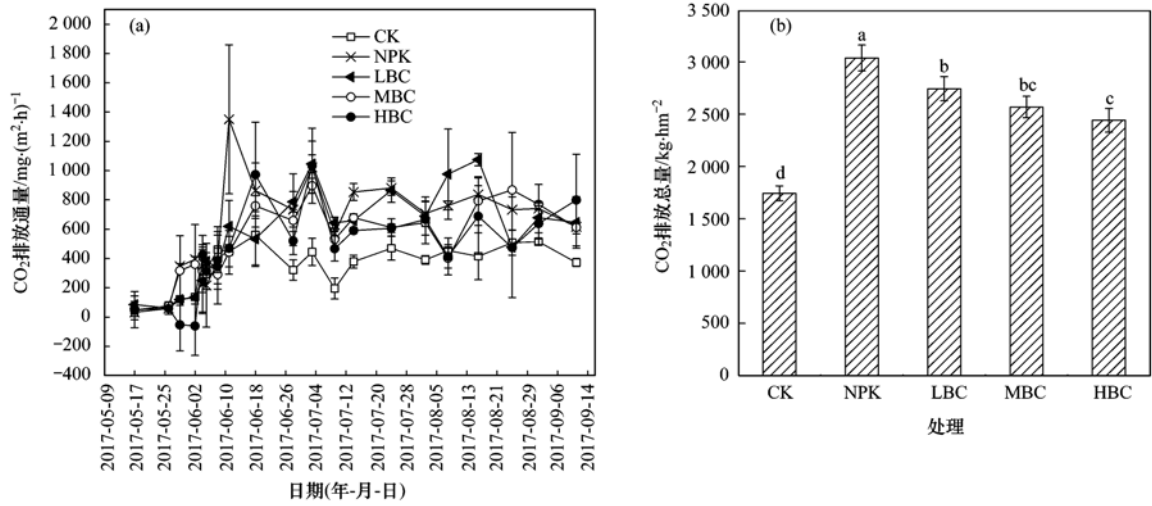


图3 不同处理对紫色水稻土 CO₂ 排放通量和累积排放量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on CO₂ flux emissions and cumulative emissions in purple paddy soil

高于对照处理($1\,742.882 \pm 71.76$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 处理增加了 74.2%. 整个观测期 CO₂ 排放总量 LBC 处理 ($2\,743.91 \pm 115.93$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、MBC 处理 ($2\,568.93 \pm 102.55$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 HBC 处理 ($2\,442.95 \pm 113.18$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 较对照处理分别增加了 57.43%、47.4% 和 40.17%, 比等氮磷钾条件下纯施化肥处理减少了 9.65%、15.41% 和 19.56%. 生物炭不同添加处理间, HBC 处理 CO₂ 排放总量比 LBC 处理显著减少了 11.0%, MBC 处理与 LBC 处理和 HBC 处理 CO₂ 排放总量差异并不显著.

2.3 生物炭施用量对水稻生育期 N₂O 排放的影响

如图 4(a) 所示, 生物炭施用对水稻整个生育期 N₂O 排放通量的影响无明显规律性, N₂O 排放通量变化曲线受到化肥的显著影响. 施追肥 1 d 后, MBC 处理 N₂O 排放通量出现最高吸收峰值

(-309.39 ± 27.07) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CK 处理、NPK 处理和 LBC 处理也出现不同程度的吸收峰值; 施追肥 4 d 后, NPK 处理 N₂O 排放通量出现最高峰值 (198.59 ± 85.59) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, MBC 和 HBC 处理 N₂O 排放通量也分别出现最高峰值 (389.67 ± 97.15) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 (895.48 ± 68.58) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 施追肥一周后, CK 处理 (未施追肥) 和 LBC 处理 N₂O 排放通量出现最高峰值 (22.21 ± 15.41) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 (124.19 ± 96.07) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. MBC 处理在分蘖后期 7 月 14 日出现吸收峰值 (-263.82 ± 15.16) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, LBC 处理在拔节期 7 月 24 日出现最高吸收峰值 (-274.45 ± 13.95) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

图 4(b) 是整个观测时期内不同施用量生物炭处理下 N₂O 排放总量. 对照处理在整个观测期以吸

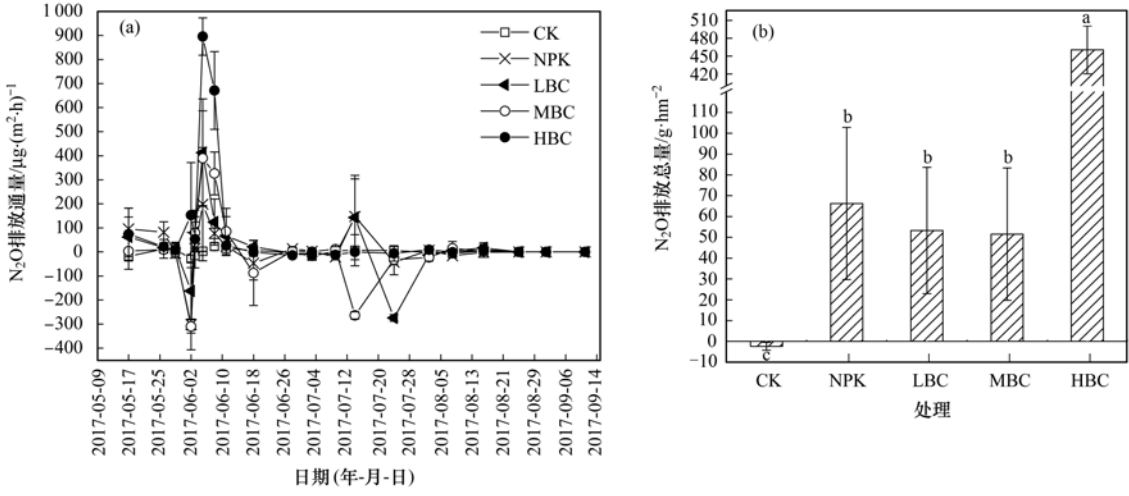


图4 不同处理对紫色水稻土 N₂O 排放通量和累积排放量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on N₂O flux emissions and cumulative emissions in purple paddy soil

收 N_2O 为主, 但吸收总值仅为 $(2.37 \pm 1.9) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$. NPK、LBC 和 MBC 处理 N_2O 排放总量差异并不显著, 平均 N_2O 排放总量在 $51.56 \sim 66.23 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 较对照处理提高 $22.71 \sim 28.09$ 倍. HBC 处理 N_2O 排放总量 $(460.46 \pm 39.87) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 显著高于其他处理, 是其他生物炭处理的 $3.6 \sim 8.5$ 倍.

2.4 不同施用量生物炭处理对水稻温室气体增温潜势的影响

不同处理的增温潜势大小同其 CH_4 季节总排放量顺序相同(表 2), 由于稻田排放 N_2O 的量非常少, 因此整个观测期 CH_4 对温室气体综合增温潜势影响明显, 稻田减缓温室气体增温潜势的主要目标就是减少 CH_4 排放. 在 100 年尺度下, 不同施用量生物炭处理显著减少水稻温室气体的增温潜势, 且生物炭施用量越多, 对温室气体增温潜势的抑制作用就越明显.

表 2 不同处理对紫色水稻土综合增温潜势的影响(以 CO_2 计)/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

Table 2 Effects of different treatments on GWP in purple paddy soil (CO_2)/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理	CH_4	N_2O	GWP($\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$)
CK	$1\,754.12 \pm 45.91\text{a}$	$-0.63 \pm 0.5\text{a}$	$1\,753.49 \pm 46.41\text{a}$
NPK	$1\,727.65 \pm 83.05\text{a}$	$17.55 \pm 9.68\text{b}$	$1\,745.2 \pm 92.73\text{a}$
LBC	$1\,381.84 \pm 55.28\text{b}$	$14.13 \pm 8.05\text{b}$	$1\,395.97 \pm 63.33\text{b}$
MBC	$1\,012.98 \pm 26.03\text{c}$	$13.66 \pm 8.42\text{b}$	$1\,026.65 \pm 34.45\text{c}$
HBC	$763.77 \pm 37.28\text{d}$	$122.79 \pm 9.68\text{c}$	$886.56 \pm 35.91\text{d}$

1) 同一参数同一列中的相同字母表示该两者间的差异性不显著($P > 0.05$)

对照和纯施化肥处理增温潜势基本相同(表 2), 与对照相比, 不同施用量生物炭处理均可显著减少水稻温室气体的综合增温潜势, LBC 处理、MBC 处理和 HBC 处理平均 GWP 分别比对照处理减少了 20.39% 、 41.45% 和 49.44% , 比等氮磷钾条件下纯施化肥减少了 20.0% 、 41.1% 和 49.2% . 不同施用量生物炭处理之间 GWP 值差异显著, HBC 处理较 LBC 和 MBC 处理 GWP 分别减少了 36.49% 和 13.65% , MBC 处理 GWP 值较 LBC 处理减少了 26.46% .

3 讨论

3.1 生物炭对 CH_4 排放的影响

本试验中, 生物炭添加土壤后, CH_4 的释放均受到显著的抑制作用, 且生物炭施加量越多, CH_4 排放的抑制作用越明显, 这与郭艳亮等^[7]的研究结

果一致. 土壤 CH_4 的排放主要是由产甲烷菌在淹水厌氧条件下产生的^[24], 因此, 生物炭对 CH_4 的减排可能由于生物炭抑制产甲烷菌的活性而使产甲烷菌的比例降低^[25]. 而且, 生物炭拥有巨大的表面积和发达的孔隙结构, 能够吸附土壤中的 CH_4 ^[26]. CH_4 排放通量介于 $-0.05 \sim 47.34 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 这个范围与郭腾飞等^[21]的研究结果一致. 整个观测期内, CH_4 排放通量变化曲线与张军科等^[27]的研究结果基本一致, 但与石将来等^[20]、郭腾飞等^[21]的 CH_4 排放通量变化曲线并不一致, 原因一方面可能是与氮肥施入量有关, 其研究施入化肥偏多, 本研究按照当地农民的习惯合理精确控制化肥的用量, 使得在水稻生育期早期 CH_4 排放通量未出现峰值; 另一方面, 生物炭能够吸附土壤中的有机物, 进入生物炭表面孔隙中的有机物被保护起来, 不易被外界微生物所分解, 从而减少了土壤有机碳的矿化^[28]. 生物炭对土壤 CH_4 排放的影响, 还可通过改变土壤微生物种群结构的多样性及微生物(如甲烷氧化菌)活性、土壤理化性质(如容重、pH、氧化还原电位、持水性)等途径来实现^[7].

3.2 生物炭对 CO_2 排放的影响

在水稻生育期内, 化肥和生物炭处理改变了 CO_2 的排放特征. 与不施化肥处理相比, 纯施化肥 CO_2 的排放通量峰值约提前一周. 不同施用量与化肥配施处理 CO_2 的排放通量峰值的出现比纯施化肥处理延后 20 d 左右, 原因可能是生物炭施入土壤中吸附固定可溶性有机碳并减缓有机质矿化造成的^[29]. 与对照处理相比, 生物炭施入土壤后, 均不同程度地促进了 CO_2 的累积排放量, 这与郭艳亮等^[7]的研究结果一致. 本文中 CO_2 累积排放量 $(1\,742.88 \sim 3\,036.96) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与张蕾等^[30]的研究结果一致, 但生物炭与化肥配施均比常规施肥显著降低了 CO_2 累积排放量, 而其有机肥处理 CO_2 累积排放量远远高于化肥处理, 说明生物炭与化肥配施在抑制 CO_2 排放的方面要优于有机肥配施化肥处理. 本研究结果显示, 生物炭与化肥配施较 NPK 处理可以抑制 CO_2 的总排放量, 并且生物炭施用量越多, 对 CO_2 排放的抑制作用越明显, 这与 Liu 等^[31]的研究结果一致, 原因可能是生物炭的强吸附性固持了土壤中的氮磷钾, 促进土壤团聚体的形成而对土壤有机质形成物理保护, 减缓纯施化肥对有机碳的矿化.

3.3 生物炭对 N_2O 排放的影响

本研究结果显示, 生物炭与化肥配施处理反而促进 N_2O 的排放, 原因可能是由于长期淹水条件下, 使得土壤中生物炭添加没有减排效应^[32]. 由于稻田排放 N_2O 的量非常少, 各处理 N_2O 的排放通量在 $-309.39 \sim 895.48 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 之间, 大约是甲烷排放量的 $0.004\% \sim 1.69\%$, 虽然比李露等^[33]的结果变化波动更为剧烈, 但是同样没有显著规律. 与CK处理相比, 纯施化肥与添加生物炭处理均显著增加 N_2O 的累积排放量. 其中HBC处理 N_2O 的累积排放量最高, LBC处理、MBC处理和纯施化肥处理 N_2O 的累积排放量差异并不显著, 这可能由于稻田 N_2O 排放非常少, 生物炭对 N_2O 排放的影响有很大变异造成的^[34]. 稻田生态系统中 N_2O 的排放起始于土壤 N_2O 的产生以及传输至大气的整个过程^[21], 土壤排放的 N_2O 是通过生物学过程产生的^[35], 通常硝化作用和反硝化作用被认为是土壤 N_2O 产生的主要过程^[7]. Sánchez-García等^[34]认为高量生物炭通过硝化作用增加土壤 N_2O 的排放, 这也可能是HBC处理 N_2O 的累积排放量显著高于其他处理的原因之一. 化肥尤其是氮肥的施用对 N_2O 的排放影响显著, 化肥作为底肥施用到追肥施用这段时间内, N_2O 的排放通量较少, 原因可能是插秧初期土壤中氧气较充足, 使得相关微生物在进行硝化和反硝化作用时减少了中间产物 N_2O 的排放. 追肥施用1 d后, 各处理 N_2O 的排放通量出现负值, 可能是高浓度的氮肥造成了相关微生物对环境的不适应性, 使得 N_2O 排放减少. 追肥施用一段时间后, 微生物对环境适应逐渐提高, 促进硝化和反硝化过程的进行, 随着氧气的减少, 引起土壤 N_2O 排放峰值的出现^[36]. 而有学者研究认为生物炭对土壤 N_2O 具有减排效应^[18, 35], 这可能与生物炭原料、裂解温度、土壤质地、施肥措施和温度有关.

3.4 生物炭对GWP的影响

本研究采用IPCC确定的因素^[37]来评价100年尺度上不同施肥措施下水稻生育期 CH_4 和 N_2O 的综合温室效应. 与纯施化肥处理相比, 生物炭可显著降低水稻整个生育期的综合温室效应, 且生物炭施用量越多, 对综合温室效应的抑制作用越明显, 与李露等^[33]的研究结果大致相同, 其认为不施氮肥对稻麦轮作处理GWP的影响低于生物炭处理, 但是本研究结果显示不同施用量生物炭处理均比CK处理显著降低其温室效应, 原因是李露等的研究麦季

不同施肥措施所排放 N_2O 对GWP的贡献高于稻季 CH_4 对GWP的贡献, 因此施用氮肥后各处理的温室效应较高. 而本研究不同施肥措施所排放 N_2O 对综合温室效应的贡献远低于 CH_4 , 各处理的增温潜势中, N_2O 所占比重最高的HBC处理也仅仅为 13.8% , 其他的甚至可以忽略不计, 这与Liu等^[38]的研究结果一致. 但是有研究表明, 在500年时间尺度上的化肥处理 N_2O 的增温潜势占到了 79% ^[39], 因此也不能忽视对于 N_2O 排放的研究.

4 结论

(1) 整个监测期内各生物炭处理紫色水稻土 CH_4 累积排放量显著减少($P < 0.01$), 生物炭施用量越多, 对 CH_4 排放量的抑制作用越明显, 不同生物炭处理间差异显著($P < 0.01$). 与CK处理相比, 施用化肥对 CH_4 累积排放量的抑制作用并不明显.

(2) 生物炭施用对紫色水稻土 CO_2 排放的效应因施化肥与否而异. 与不施化肥处理相比, 各生物炭处理促进土壤表面 CO_2 排放($P < 0.01$); 与纯施化肥处理相比, 各生物炭处理抑制土壤表面 CO_2 排放($P < 0.05$), 且不同生物炭处理土壤 CO_2 排放通量随添加量增加呈现降低趋势.

(3) 整体而言, 各处理对紫色水稻土 N_2O 排放的影响与CK之间差异比较显著, 对土壤表层 N_2O 的产生以促进作用为主, 但是不同施用量生物炭处理间规律并不明显.

参考文献:

- [1] 王绍武. 全球气候变暖的争议[J]. 科学通报, 2010, **55** (16): 1529-1531.
Wang S W. The global warming debate [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55** (19): 1961-1962.
- [2] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. The supplementary report to the IPCC scientific assessment [M]. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [3] Nakicenovic N, Alcamo J, Grubler A, et al. Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 612.
- [4] 杨艳. 太湖流域水稻种植系统温室效应、碳汇效应及收益评估[D]. 南京: 南京大学, 2013. 11-12.
Yang Y. The greenhouse effect, the carbon sink effect and cost-benefit assessments of the Taihu Lake Basin rice cultivation system [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. 11-12.
- [5] Aguilar-Chávez á, Díaz-Rojas M, Del Dendooven M, et al. Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L.) as affected by different application rates of charcoal [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **52**: 90-95.
- [6] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of

- manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. *Plant and Soil*, 2007, **291**(1-2): 275-290.
- [7] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in Semi-arid region[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [8] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 56.
- [9] 王萌萌, 周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 768-780.
- Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(5): 768-780.
- [10] Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, *et al.* Charcoal carbon in U. S. agricultural soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(4): 1249-1255.
- [11] Liu X Y, Zheng J F, Zhang D X, *et al.* Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **554-555**: 259-265.
- [12] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. *Plant and Soil*, 2012, **351**(1-2): 263-275.
- [13] Zheng J Y, Stewart C E, Cotrufo M F. Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(5): 1361-1370.
- [14] Karhu K, Mattila T, Bergström I, *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(1-2): 309-313.
- [15] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [16] Kamman C, Ratering S, Eckhard C, *et al.* Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 1052-1066.
- [17] Sagrilo E, Jeffery S, Hoffland E, *et al.* Emission of CO₂ from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, **7**(6): 1294-1304.
- [18] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 5-16.
- [19] Baah-Acheamfour M, Carlyle C N, Lim S S, *et al.* Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **571**: 1115-1127.
- [20] 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emission from a rice-rapeseed crop rotation [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- [21] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(2): 337-345.
- Guo T F, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(2): 337-345.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [24] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs [J]. *Advances in Agronomy*, 2007, **96**: 1-63.
- [25] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 80-88.
- [26] Yaghoubi P, Yargicoglu E N, Reddy K R. Effects of biochar-amendment to landfill cover soil on microbial methane oxidation: initial results [R]. Atlanta, Georgia: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [27] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1979-1986.
- Zhang J K, Jiang C S, Hao Q J, *et al.* Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from Agroecosystems in a purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1979-1986.
- [28] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [29] Hussain M, Farooq M, Nawaz A, *et al.* Biochar for crop production: potential benefits and risks [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **17**(3): 685-716.
- [30] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(5): 1399-1406.
- Zhang L, Yin L C, Yi Y N, *et al.* Effects of fertilization reforming on the CO₂ flux in paddy soils with different fertilities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(5): 1399-1406.
- [31] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, *et al.* Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, **8**(2): 392-406.
- [32] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2007, **53**(2): 181-188.
- [33] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 不同时期施用生物炭对稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, **52**(4): 839-848.
- Li L, Zhou Z Q, Pan X J, *et al.* Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during

- rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 839-848.
- [34] Sánchez-García M, Roig A, Sánchez-monedero M A, *et al.* Biochar increases soil N₂O emissions produced by nitrification-mediated pathways [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014, **2**: 25.
- [35] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, *et al.* Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1732.
- [36] 张仲新, 李玉娥, 华路, 等. 不同施肥量对设施菜地N₂O排放通量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(5): 269-275.
- Zhang Z X, Li Y E, Hua L, *et al.* Effects of different fertilizer levels on N₂O flux from protected vegetable land [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, **26**(5): 269-275.
- [37] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [38] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, *et al.* Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 906-913.
- [39] Li X L, Yuan W P, Xu H, *et al.* Effect of timing and duration of midseason aeration on CH₄ and N₂O emissions from irrigated lowland rice paddies in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **91**(3): 293-305.



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)