

ENVIRONMENTAL SCIENCE

# 第45卷 第2期 2024年2月15日

目 次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析
不同方法判定南京臭氧牛成敏感区的差异
2006~2021年夏半年上海阜氧浓度特征及其大气环流背量分析
其于于专时分词测阅的山西省近地面门体和分数分布转征,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
金丁八 (城方地站)当时山口自过地叫约3斤 (万万双方市内正)
$\nabla J = \mu \chi + \lambda \zeta \chi = \chi_{0} \chi_$
起现中国子 FOOSN证、不够及关系形成或密切打 四世派,利加正,利工事,于茂龄,形成,形成,正式,任法(O/O/) 郑周古夕百天宗沅计理由十年 VOO- 宗洗帖纸 並頒優托马廷林公托
邓川市令发学行采过程中人飞VUCS行来付低、不够胜机及值性刀机 ────────────────────────────────────
<sup>2</sup> <sup>2</sup> <sup>2</sup> <sup>2</sup> <sup>1</sup>
中国二天城市群 $PM_2$ 家及非我性爱化分析 美智祉, 顺物吻, 张大岳, 赵又音( $/09$ )
基于LEAP模型的临港新片区甲长期嵌排放顶测及碱排潜刀分析
· 碳交易育景下中国华北地区碳代谢格局变化 ····································
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响谭娟,熊丽君,王卿,任志文,朱丹丹,王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析金爱芳,殷秀兰,李长青,李文娟,庞菊梅,金晓娟 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳,郑文丽,陈关潼一,陈思莉,陈尧,赵晓丽,汪浩(854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd <sup>2*</sup> 的吸附机制 ····································
碑 法圣介 孔 炭吸附 四 环 差 的 效能 与 机 制
游性会磷油茶壳生物最对水中磺胺甲醛唑的吸附特性
而且自好的水力上这次水力,每级上海之前为旧为止。 广东省宫分辨率沮云与伏排韵法首乃姓征…」卢涛 唐明双 原形 黄士烟 幼庄勤 安個冊 冰劲 建短距 漫小明 私安仁 陈夹同 ( $000$ )
了「小自同力卅半価主(平冊以前半及竹曲)」前,店切水,逐步,東心州,竹丘駅,不區砌,九切,加有庫, 木小切,竹本戶, 杯本酉(909) 了河口"泪塘环湿"修有反开太玄弦 CO 态始乃甘环谙调控
及问曰 应治过程 咬及位工心环境 U2人厌及六个光测证 开始果验用研在巨对抽进地区较差数化土壤 N O 和 C U 批读的影响
王彻然爬用两年用对流甲地区相末花作上读 N2O和CH4种从时影响
生初灰以良血颗地则无可应用近底。————————————————————————————————————
光树对伏田王·堤因乘冲的影响研究:MEIa 刀们"你乙泮,阮越民,血把,血痰,血维节,工肥屑,浮示剂,刈刀曰,(江华(932) 服土的新蛙性时后曲则目结常改是目在完成五人有佳思想到落调。因常行日无同
新丁哈州村地区央望芸域账销里町呈供受众多捐泉侯纵顶侧:以盲足芸为例 """"""""""""""""""""""""""""""""""""""
个问以良剂对酸性系巴工团乘评和有机硬的影响 ····································
La以性生物灰刈工場瞬風付形念影响及稳定化机制 "近日" (983) 主約由矾乙曰於乞叭叭衣掛皮曰其她友怪地亦也卫其孤身回書 「」 (983)
秦岭甲段不回恢复所投并耕农田植物多样性受化及兵驱列囚系
我国典型制约厂乃采物地甲抓生系的乃采符值及生态风险"彻炯彬,更孝,赵廷党,何良夹,刘有胜,朔立新,石义静,应尤国(1004)
) 州币主壤多坏方烃仍架符值及风险评估即丁加,陈莲,东培珍,土雨函,土振江,补箖,居卒明,多国庆,钾建武,学智毅,土圆(1015)
基于源导问的主張里金禹风险评价及官径因于分价····································
基于 Monte-Carlo 模拟的砌留省典型上) 周辺农田土壤重金属区或潜住生态风险符值及米源胜竹
·····································
基于参数优化和家特许多模拟的砷污染地块健康风险评估
基于APCS-MLR和PMF模型的亦泥堆场周辺耕地主壤重金属污染源料价
沉智杰, 李杰斤, 李彩霞, 廖泽源, 碑楠, 罗桂钟, 土定男, 张成(1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制
氯代乙烯的伏氧微生物还原脱氯特性
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好,董春雨,杨海婵,孙思静,韩宇,黄祖志,张乃明,包立(1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉砷污染土壤的钝化修复
关键生育期施加外源锌灌溉水对水稻镉吸收转运的影响周霞,胡雨丹,周航,陈琼,谭文韬,曾鹏,辜娇峰,廖柏寒(1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红,魏畅,柳海涛,张静静,刘芳,赵颖,张雪海,李鸽子,姜瑛(1128)
稀土元素铈对锌胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应 …张静静,徐正阳,焦秋娟,范丽娜,刘芳,赵颖,宋佳,化党领,李鸽子,柳海涛(1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵(1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应
······胡晓玥,滑紫微,姚伦广,杜丽,牛秋红,李玉英,闫路,陈兆进,张浩(1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博,王成尘,彭吾光,侬代倩,向萍(1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清(1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴,李冰,王金花,宋文慧,王兰君,王军,朱鲁生(1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素
《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897,1106,1149)

# 生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N₂O 和 CH₄排放的影响

胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈绮琦, 汤水荣, 伍延正\*, 孟磊\*

(海南大学热带作物学院,海口 570228)

摘要:通过探究生物炭施用两年后对海南典型稻菜轮作模式土壤氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)和甲烷(CH<sub>4</sub>)排放的影响,旨在明确生物炭在该 模式下对温室气体排放的长期效应,可为我国热带地区稻菜轮作系统N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>减排提供理论依据.田间试验共设置4个处理, 分別为:不施氮肥对照(CK)、施氮磷钾肥(CON)、施氮磷钾肥配施20t·hm<sup>-2</sup>生物炭(B1)和施氮磷钾肥配施40t·hm<sup>-2</sup>生物炭(B2) 处理.结果表明:①相较于CON常规施氮处理,B1和B2添加生物炭处理显著减少了早稻季32%和54%的N<sub>2</sub>O排放,但在晚稻季 B1和B2处理显著增加了31%和81%的N<sub>2</sub>O排放,辣椒季N<sub>2</sub>O的累积排放量则显著高于早稻和晚稻季,且B1处理显著减少了 35%的N<sub>2</sub>O的排放,B2处理相较于CON处理无显著性差异;②B1和B2比CON处理显著减少了早稻季63%和65%的CH<sub>4</sub>排放,在 晚稻季B2处理显著增加了41%的CH<sub>4</sub>排放,B1处理相较于CON处理无显著性差异,辣椒季各处理CH<sub>4</sub>的累积排放量无显著性差 异;③晚稻季贡献了稻菜轮作系统主要的总增温潜势(GWP),CH<sub>4</sub>的排放量决定了GWP和温室气体排放强度(GHGI)的大小.生 物炭施用两年后,B1降低了整个稻菜轮作系统的CHGI,B2增加了CHGI,并达到显著水平,但B1和B2处理在早稻季和辣椒季显 著降低了CHGI,QB2处理在晚稻季增加了CHGI;④B1和B2相较于CON处理显著增加了早稻产量33%和51%,且B1和B2处理 显著增加辣椒季产量53%和81%,晚稻季除不施氮肥CK处理外,其它处理产量无显著性差异.研究结果表明,热带地区稻菜轮 作系统温室气体排放的大小主要取决于晚稻季的CH,排放,而生物炭施用两年后Q低量生物炭配施氮肥有显著的减排作用,但 高低量生物炭配施氮肥对早稻和辣椒季作物增产具有持续性.

关键词:热带地区;生物炭;稻菜轮作;氧化亚氮(N<sub>2</sub>O);甲烷(CH<sub>4</sub>);全球增温潜势(GWP) 中图分类号:X16 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2024)02-0929-11 DOI:10.13227/j. hjkx. 202302093

# Effects of Biochar Application Two Years Later on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China

HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, CHEN Qi-qi, TANG Shui-rong, WU Yan-zheng\*, MENG Lei\*

(College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The effects of biochar application on soil nitrous oxide (N20) and methane (CH4) emissions in a typical rice-vegetable rotation system in Hainan after two years were investigated. The aim was to clarify the long-term effects of biochar on greenhouse gas emissions under this model, and it provided a theoretical basis for N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission reduction in rice-vegetable rotation systems in tropical regions of China. Four treatments were set up in the field experiment, including no nitrogen fertilizer control (CK); nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer (CON); nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer combined with 20 t+hm<sup>-2</sup> biochar (B1); and nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer combined with 40 t hm<sup>-2</sup> biochar (B2). The results showed that ; ① compared with that in the CON treatment, the B1 and B2 treatments significantly reduced N,O emissions by 32% and 54% in the early rice season (P < 0.05, the same below), but the B1 and B2 treatments significantly increased N,O emissions by 31% and 81% in the late rice season. The cumulative emissions of N,O in the pepper season were significantly higher than those in the early and late rice seasons, and the B1 treatment significantly reduced N,O emissions by 35%. There was no significant difference between the B2 and CON treatments. 2 Compared with that in the CON treatment, B1 and B2 significantly reduced CH4 emissions by 63% and 65% in the early rice season, and the B2 treatment significantly increased CH<sub>4</sub> emissions by 41% in the late rice season. There was no significant difference between the B1 and CON treatments. There was no significant difference in cumulative CH<sub>4</sub> emissions between treatments in the pepper season. ③ The late rice season contributed to the main global warming potential (GWP) of the rice-vegetable rotation system, and CH4 emissions determined the magnitude of GWP and greenhouse gas emission intensity (GHGI). After two years of biochar application, B1 reduced the GHGI of the whole rice-vegetable rotation system, and B2 increased the GHGI and reached a significant level. However, the B1 and B2 treatments significantly reduced GHGI in the early rice season and pepper season, and only the B2 treatment increased GHGI in the late rice season. ④ Compared with that in the CON treatment, the B1 and B2 treatments significantly increased the yield of early rice by 33% and 51%, and the B1 and B2 treatments significantly increased the yield of pepper season by 53% and 81%. In the late rice season, there was no significant difference in yield except for in the CK treatment without nitrogen fertilizer. The results showed that the magnitude of greenhouse gas emissions in the tropical rice-vegetable rotation system was mainly determined by CH<sub>4</sub> emissions in the late rice season. After two years of biochar application, only low biochar combined with nitrogen fertilizer had a significant emission reduction effect, but high and low biochar combined with nitrogen fertilizer increased the yield of early rice and pepper crops continuously.

Key words: tropical region; biochar; rice-vegetable rotation; nitrous oxide (N20); methane (CH4); global warming potential (GWP)

收稿日期: 2023-02-13;修订日期: 2023-04-25

**基金项目:**海南省自然科学基金青年基金项目(320QN196);国家自然科学基金项目(41661051,42067008);海南省耕地保育重点实验室开放 课题项目(HAAS2022PT0103);海南省自然科学基金高层次人才项目(420RC749)

作者简介:胡煜杰(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤氮循环和环境效应,E-mail:296014642@qq.com

<sup>\*</sup> 通信作者,E-mail:wyz198712@163.com;menglei@hainanu.edu.cn

海南省地处我国热带地区,全年暖热,雨量充 沛,干湿季节分明,特定的气候条件形成了水稻-冬季 瓜菜轮作的种植模式<sup>[1]</sup>.冬季瓜菜大多是多次采摘, 为延长采摘期,农户常过量施氮,这往往超出瓜菜的 生长需求<sup>[2]</sup>.据统计,热带地区稻菜轮作模式下,瓜菜 施氮量甚至高达750 kg·hm<sup>-2</sup>,大量氮肥的施用注定 会增加 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[3]</sup>.此外,海南丰富的雨热资源增 加了土壤和作物的碳代谢从而增加 CH<sub>4</sub>的排放<sup>[4]</sup>.因 此,需要一种适合热带地区农业增汇减排的新途径.

生物炭是一种在低氧或缺氧条件下热解生物质 所产生的含碳量高、稳定性强、比表面积较大等独 特性质的材料<sup>[5]</sup>.近年来,许多研究表明生物炭在固 碳减排、提高作物生产、水土保持和改善土壤质量 等方面发挥着重要的作用<sup>[6]</sup>.但施用生物炭对土壤温 室气体排放仍然存在诸多不确定性,如Huang等<sup>[7]</sup>研 究发现添加生物炭显著降低亚热带稻烟轮作土壤 N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放;Shen等<sup>[8]</sup>和Zhang等<sup>[9]</sup>研究发现添 加生物炭显著增加水稻土N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放.

随着时间的推移,由于生物炭的老化过程,其物 理和化学性质会发生一系列改变<sup>[10]</sup>.如比表面积增 大,微孔结构增多,会增强对 N<sub>2</sub>O 的直接吸附,而老化 生物炭表面酸性含氧官能团的增多,pH下降,电子传 递能力减弱会抑制 N<sub>2</sub>O 还原成 N<sub>2</sub><sup>[11]</sup>.同时,生物炭对 甲烷氧化菌的影响存在滞后性,会改变 CH<sub>4</sub>的排 放<sup>[12]</sup>.除此之外,老化生物炭对氮素吸附和固持能力 的改变会影响作物对养分的吸收利用,从而影响作 物产量<sup>[13]</sup>.Wang等<sup>[14]</sup>对比新鲜生物炭和施入田间 1 a 的老化生物炭发现,后者对 N<sub>2</sub>O 的抑制效果更强; Spokas<sup>[15]</sup>对比新鲜生物炭和施入田间 3 a 的老化生物 炭发现,后者对 CH<sub>4</sub>的氧化能力更强;除此之外,Duan 等<sup>[16]</sup>和 Zhang 等<sup>[17]</sup>研究发现,施入田间 3 a 和 5 a 的老 化生物炭依然显著降低 N<sub>2</sub>O 排放,但效果不如新鲜生 物炭;Kubaczyński 等<sup>[18]</sup>研究发现,新鲜生物炭抑制土 壤 CH<sub>4</sub>排放的效果显著高于施入田间 5 a 的老化生物 炭.以上研究之间通常因为环境条件和土壤类型等 的不同而出现差异性结果.目前的研究主要集中在 稻麦轮作模式下土壤温室气体对生物炭的响应<sup>[19,20]</sup>, 而关于稻菜轮作模式下 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>所引起的增温潜 势与排放强度对生物炭的响应还鲜见报道.并且大 多数研究中生物炭都是一次性施入,而在热带地区 雨热条件丰富的情况下,可能会加快生物炭的老 化<sup>[21,22]</sup>.因此,有必要探究生物炭在稻菜轮作模式下 对土壤温室气体排放的影响是否随时间而改变.

本试验基于海南典型的稻菜轮作模式,以稻菜 轮作土壤为研究对象,原位监测生物炭施用2a后早 稻-晚稻-辣椒生长季N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放,并结合作物 产量、增温潜势(GWP)和温室气体排放强度 (GHGI),旨在综合评价生物炭施用2a后对热带地区 稻菜轮作系统N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的长期效应.

1 材料与方法

# 1.1 试验地概况

本试验于2021年5月至2022年4月在海南省澄 迈县桥头镇西岸村(110°04′E,19°56′N)进行,试验所 在地年平均气温25.3℃,年均降雨量1818.7 mm,年 平均日照时数2058.7 h. 土壤为滨海沉积物母质发 育的沙壤土,当地种植模式主要为早稻-晚稻-辣椒轮 作. 土壤基本理化性质见表1.

表1 土壤基本理化性质

		Table 1 Basic	chemical and physical proper	ties of soil	
指标	$_{\rm pH}$	ω(有机质) /g·kg <sup>-1</sup>	ω(速效氮) /mg·kg <sup>-1</sup>	ω(速效磷) /mg·kg <sup>-1</sup>	ω(速效钾) /mg·kg <sup>-1</sup>
背景值	5.91±0.21	27.31±1.03	147.83±7.42	122.51±2.43	49.51±2.34

## 1.2 试验设计

本试验采取随机区组设计,共设置4个处理,不 施氮肥的空白对照(CK)、施氮磷钾肥不施生物炭 (CON)、施氮磷钾肥 + 20 t·hm<sup>-2</sup>生物炭(B1)和施氮磷 钾肥 + 40 t·hm<sup>-2</sup>生物炭(B2).其中生物炭于2019年4 月20日一次性施入,其余时间不再施用生物炭.每个 处理设置3个重复,共12个小区,每个小区大小为7 m×3m,为防止各小区相互串水串肥,将小区四周起 垄,并用地膜覆盖.供试生物炭为椰糠在高温(600°C) 厌氧条件下热解所得,生物炭的理化性质如下:pH为 9.72,阳离子交换量(CEC)为8.23 cmol·kg<sup>-1</sup>, $\omega$ (氮)为 0.34%,比表面积(BET)为5.83 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>. 本研究观测期间,早稻季于2021年5月10日插 秧,品种为"特优3301",株距15 cm,5月18日施分蘖 肥,6月19日施穗肥,8月15日收获.晚稻季于2021年 8月25日插秧,品种为"万金优366",株距15 cm,9月1 日施蘖肥,9月26日施穗肥,11月20日收获.辣椒于 2021年12月30日定植,品种为"凯丽",基肥于定植前 施入,追肥3次,时间依次为2022年1月9日、2022年 2月27日、2022年3月17日,并于4月5日采收.其他 管理措施与当地农户保持一致.施肥方案见表2.

由于台风影响,辣椒季分别只在2022年1月9 日、2022年2月27日和2022年3月17日进行追肥, 分批收获3次.

					衣 4	2 施肥力	業 <sup>1</sup> /kg・hm <sup>-</sup>		
					Table 2	Fertilizatio	on schemes $/kg \cdot hm^{-2}$		
处理	早稻季 (糵肥+穗肥)			晚稻季 (		辣椒季 (基肥+追肥+追肥+追肥)			
	Ν	$P_2O_5$	$K_2O$	Ν	$P_2O_5$	$K_2O$	Ν	$P_2O_5$	K <sub>2</sub> O
СК	_	27 + 18	27 + 18	—	54 + 36	72 + 48	—	166 + 14.5 + 29 + 43.5	200 + 37.5 + 75 + 112
CON/B1/B2	36 + 24	27 + 18	27 + 18	90 + 60	54 + 36	72 + 48	80 + 40 + 80 + 120	166 + 14.5 + 29 + 43.5	200 + 37.5 + 75 + 112
	- ).(- 100								

1)"一"表示未施肥

# 1.3 样品采集及测定

气体样品采集时间为2021年5月11日至2022 年4月3日,采用静态箱法采集温室气体,采样箱规 格为50 cm×50 cm×90 cm,由PVC材料制成,底座是 装有3 cm凹槽的正方形框.为防止采气时箱温升高 过快,箱外部采用隔热锡纸包裹.采气时间固定为 08:00~11:00,频率为一周一次,施肥后加密采样一 次.采样前,先将采气箱垂直扣在底座凹槽内,并向 水槽中加水防止漏气.采气时,于0、10、20和30 min 时用50 mL筒采集大约20 mL气体,注入真空玻璃瓶 (日电理化玻璃,日本)中,立刻带回实验室用气相色 谱仪(岛津GC-2014,日本)测定 N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>含量.N<sub>2</sub>O 检测器为ECD,载气为氩甲烷;CH<sub>4</sub>检测器为FID,载 气为高纯氮,检测器温度300°C.N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的标准气 体由中国计量科学研究院提供.

每次采气后采集 0~20 cm 土壤样品,自然风干 后过筛测定土壤基本理化性质,测定方法参考土壤 农化分析<sup>[23]</sup>,新鲜土壤中铵态氮( $NH_4^+-N$ )和硝态氮 ( $NO_3^--N$ )含量采用 2 mol·L<sup>-1</sup>KCl 连续流动分析仪 (Proxima1022/1/1,法国)测定.

1.4 数据处理与分析

 $N_20$ 与CH<sub>4</sub>排放通量计算公式<sup>[24]</sup>:

 $F = \rho \times (\Delta c / \Delta t) \times [273.15/(273.15 + T)] \times h$ 式中, F为N<sub>2</sub>O排放通量[µg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]和CH<sub>4</sub>排放通 量[mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]; ρ为标准状态下N<sub>2</sub>O-N和CH<sub>4</sub>-C流 动时的密度(kg·m<sup>-3</sup>); h为采样箱高度(m); Δc / Δt 为 采样时箱内气体浓度变化速率; T为采样时箱内平均 温度(°C).

累积排放量计算公式[25]:

$$f = \sum_{i=1}^{n} (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^{n} \left[ \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right]$$

式中,f为累积排放量( $mg \cdot kg^{-1}$ ), $n \pi i$ 为采样次数,t为采样天数(d).

100 a 尺度的农田土壤直接排放的  $N_2O$  和  $CH_4$ 的 增温潜势(GWP,以  $CO_2$ -eq计, kg·hm<sup>-2</sup>)计算公式<sup>[1]</sup>:

 $GWP = f_{N_20} \times 298 + f_{CH_4} \times 25$ 

式中,  $f_{N_20}$ 为 $N_20$ 累积排放量,  $f_{CH_4}$ 为 $CH_4$ 累积排放量, 单位为kg·hm<sup>-2</sup>.

温室气体排放强度(GHGI,以CO<sub>2</sub>-eq计,kg·kg<sup>-1</sup>) 的计算公式<sup>[26]</sup>:

## GHGI = GWP/Y

式中,Y为作物产量(kg·hm<sup>-2</sup>).

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行统计分析; 处理间差异采用单因素 ANOVA 和 Duncan 多重比较 法;采用 Pearson 法对各变量间相关性进行分析,显著 水平为 P < 0.05 和 P < 0.01;采用 Origin2018 软件作 图.本研究中的数据均以 3 次重复的平均值±标准差 来表示.

2 结果与分析/

2.1 早稻-晚稻-辣椒季 N<sub>2</sub>O 排放通量与累积排放量

结果表明, N<sub>2</sub>O 排放峰值在早稻季内最高, 各处 理 N<sub>2</sub>O 排放高峰主要集中在水稻的分蘖期, 施入蘖肥 后 2~8 d出现排放高峰, 其中 B1处理排放峰值最高, 达到 733.70  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 其次为 CON 处理和 B2 处 理,分别为 569.17  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>和 373.08  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, CK 处理最低为 170.86  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>. 晚 稻季 N<sub>2</sub>O 的排放高峰主要集中在施入穗肥后的孕穗 抽穗期, 其中 B2 处理有相对较高的峰值, 达到 72.55  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>. 辣椒季中 CON 和 B2 处理呈现出多个峰 值, 通常于施肥后的 2~8 d出现, B1 处理在后期才出 现排放高峰, 排放峰持续一周, CK、CON、B1、B2 处 理的排放通量分别为 - 12.3~49.1、- 30.72~ 442.67、- 6.30~ 304.07、- 1.46~ 401.68  $\mu$ g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>. CON 和 B2 处理的排放峰值显著高于 CK 和 B1 处理(*P* < 0.05, 图 1).

早稻季 N<sub>2</sub>O 累积排放量的高低顺序为 CON > B1 > B2 > CK, CON(1.66 kg·hm<sup>-2</sup>)显著高于其他 3 个 处理 (P < 0.05), B1 (1.13 kg·hm<sup>-2</sup>)和 B2 (0.77 kg·hm<sup>-2</sup>)处理相较于 CON 常规施肥处理分别减少了 32%和 54%的排放, CK(0.40 kg·hm<sup>-2</sup>)不施氮肥处理 最低,减少了 76%. 而晚稻季中, B1(0.34 kg·hm<sup>-2</sup>)和 B2(0.47 kg·hm<sup>-2</sup>)处理显著高于 CON(0.26 kg·hm<sup>-2</sup>) 和 CK(0.15 kg·hm<sup>-2</sup>)处理(P < 0.05),对比 CON处理, B1 和 B2 分别增加了 31% 和 81% 的 N<sub>2</sub>O 排放量, CK 处理减少了 42% 的 N<sub>2</sub>O 排放.辣椒季 N<sub>2</sub>O 累积排放 量呈现 CON > B2 > B1 > CK 的大小顺序, CON(2.60 kg·hm<sup>-2</sup>)和 B2(2.35 kg·hm<sup>-2</sup>)处理显著高于 B1(1.70 kg·hm<sup>-2</sup>)和 CK(0.24 kg·hm<sup>-2</sup>)处理(P < 0.05),相较于 CON处理, B2减少了 10% 的 N<sub>2</sub>O 排放, B1 和 CK 处理 分别减少了 35% 和 91%(图 2).



箭头从左到右依次表示糵肥、穗肥(早稻),糵肥、穗肥(晚稻),基 肥、追肥、追肥和追肥(辣椒);CK表示不施氯肥空白对照处理,CON 表示施氮磷钾肥处理,B1表示氮磷钾肥配施20 (\*hm<sup>-2</sup>生物炭处理, B2表示氯磷钾肥配施40 t\*hm<sup>-2</sup>生物炭处理

图 1 不同处理早稻-晚稻-辣椒季 N<sub>2</sub>O 排放通量 Fig. 1 N<sub>2</sub>O emission fluxes from early rice-late rice-pepper season under different treatments

**2.2** 早稻-晚稻-辣椒季 CH<sub>4</sub> 排放通量与累积排放量

早稻季、晚稻季和辣椒季 CH<sub>4</sub>排放通量同样存 在明显差异, CH<sub>4</sub>排放主要集中在晚稻季, 4个处理均 呈现出多个峰值, B2 处理的峰值最高, 达到 35.98 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>.早稻季各处理的 CH<sub>4</sub>排放主要集中在 分蘖期和孕穗抽穗期, CON 处理 CH<sub>4</sub>峰值显著高于其 他处理(*P* < 0.05), 达 2.85 mg·(m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>).在辣椒的种 植季中,4个处理的CH<sub>4</sub>排放通量极低,基本上处于零 值的上下波动,各处理CH<sub>4</sub>排放未出现明显差 异(图3).

从不同季节 CH<sub>4</sub>累积排放量来看,晚稻季 CH<sub>4</sub>排 放显著高于早稻季和辣椒季 (P < 0.05). 早稻季 CON(9.36 kg·hm<sup>-2</sup>)处理显著高于其他 3 个处理,B1 (3.46 kg·hm<sup>-2</sup>)、B2 (4.31 kg·hm<sup>-2</sup>)和 CK (0.95 kg·hm<sup>-2</sup>)相对于 CON处理分别减少了 63%、54%和 90%的 CH<sub>4</sub>排放.晚稻季中,B2(310.97 kg·hm<sup>-2</sup>)处 理显著高于其他 3 个处理,对比 CON (220.27 kg·hm<sup>-2</sup>)处理,增加了 41%的 CH<sub>4</sub>排放,而 B1 (216.10 kg·hm<sup>-2</sup>)和 CK(170.62 kg·hm<sup>-2</sup>)处理分别减 少了 2%和 23%.辣椒季 CH<sub>4</sub>累积排放量各处理之间 无显著性差异(图 4).

2.3 早稻-晚稻-辣椒季土壤矿质氮动态变化

早稻、晚稻和辣椒季土壤 $\omega$ (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)动态变化 如图 5(a)所示,土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在每一次施肥后迅 速上升,伴随着时间的延续而逐渐下降.早稻季前期 施入孽肥后的 2~5 d内,CON(98.13 mg·kg<sup>-1</sup>)、B1 (144.95 mg·kg<sup>-1</sup>)和 B2 (178.32 mg·kg<sup>-1</sup>)处 理  $\omega$ (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)达到峰值,施入穗肥后,峰值变为CON (153.49 mg·kg<sup>-1</sup>)、B1(138.58 mg·kg<sup>-1</sup>)和 B2(74.14 mg·kg<sup>-1</sup>),CK处理由于未施氮肥,一直处于较低水 平.晚稻季 CON (130.76 mg·kg<sup>-1</sup>)、B1 (126.71 mg·kg<sup>-1</sup>)和 B2(70.50 mg·kg<sup>-1</sup>)处理土壤 $\omega$ (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的峰值都出现在施入孽肥后.辣椒季 CON(106.60 mg·kg<sup>-1</sup>)、B1(113.65 mg·kg<sup>-1</sup>)和 B2(106.51 mg·kg<sup>-1</sup>) 处 理 $\omega$ (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的最高峰出现在第3次追肥后 [图 5(a)].

早稻、晚稻和辣椒季土壤 $NO_3^{-}N$ 含量动态变化 如图 5(b)所示,辣椒季 $NO_3^{-}N$ 含量显著高于早稻季 和晚稻季(P < 0.05). 早稻季 $CON(13.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和 B2(29.61 mg $\cdot \text{kg}^{-1}$ )处理的 $\omega(NO_3^{-}-N)$ 在施入孽肥后 出现峰值,B1处理则在施入穗肥后达到峰值为 11.76 mg $\cdot \text{kg}^{-1}$ . 晚稻季各处理的 $NO_3^{-}-N$ 含量较为平



(a)早稻季,(b)晚稻季,(c)辣椒季;不同小写字母表示不同处理间差异显著(P < 0.05);  $\triangle$ 表示各处理与CON处理的比较:  $\triangle = (f - f_{CON}) f_{CON} \times 100\%$ , 式中f为N<sub>2</sub>O累积排放量; 虚线表示以CON处理为基准的参考线

#### 图 2 不同处理早稻-晚稻-辣椒季 N,O 累积排放量

Fig. 2 Cumulative N<sub>2</sub>O emission in early rice-late rice-pepper season under different treatments

 $mg \cdot kg^{-1}$ [图 5(b)].

2 期



箭头从左到右依次表示蘖肥、穗肥(早稻),蘖肥、穗肥(晚稻),基 肥、追肥、追肥和追肥(辣椒);CK表示不施氮肥空白对照处理,CON 表示施氮磷钾肥处理,B1表示氮磷钾肥配施20t·hm<sup>-2</sup>生物炭处理,







Cumulative CH4 emission in early rice-late rice-pepper season under different treatments Fig. 4

表 3	不同处理	处理作物产量	$^{1)}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
-----	------	--------	--------------------------------------

Table 3	Crop	wield	undor	different	troatmonte	/ka • hn	n <sup>-2</sup>
rable 5	Crop	yreia	under	amerent	treatments	/кд•пп	4

处理		产量	
	早稻(干重)	晚稻(干重)	辣椒(鲜重)
СК	5 850.87±641.81c	3 727.30±603.00b	3 454.11±119.11d
CON	$7994.17 \pm 562.27 \mathrm{b}$	5 487.80±870.35a	5 240.71±238.21c
B1	9 212.50±335.46a	6 062.70±671.70a	$8\ 019.88 \pm 495.88 \mathrm{b}$
B2	10 181.40±758.40a	4 990.80±877.60ab	9 528.57±238.21a

1)不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

### 2.5 环境因子与气体排放的关系

相关性分析表5结果表明,土壤N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排 放呈显著负相关(P < 0.05). 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO,<sup>-</sup>-N 含 量 与 N,O 排 放 呈 极 显 著 正 相 关 (P < 0.01),与CH<sub>4</sub>呈负相关,且只有NO<sub>5</sub>-N含量与CH<sub>4</sub> 呈极显著负相关(P < 0.01),与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量相关 性不显著.土壤 pH 与 CH<sub>4</sub>呈显极著正相关(P < 0.01),5 cm 土温与 CH4 呈极显著正相关,但与 N2O 相关性并不显著.

稻菜轮作土壤 N,O、CH<sub>4</sub>累积排放量与作物产

处理的最高峰分别为107.60、185.35和174.14

从早稻季来看,各处理产量在5850.87~ 10 181.40 kg·hm<sup>-2</sup>之间,添加生物炭处理的B1和B2

显著高于常规施肥处理CON和不施氮肥处理CK

(P < 0.05),晚稻季产量则呈现出B1 > CON > B2 > CK的高低顺序,其中CON、B1和B2处理无显著性差

异(P>0.05). 辣椒季各处理产量的高低顺序为: B2 > B1 > CON > CK,其中 B2显著高于其他3个处理

(P < 0.05,表3). 在100 a尺度下比较各处理总增温

潜势间的差异,相较于CON处理,B2显著增加了

GWP的值,CK显著降低,B1则无显著性差异(P >

0.05). 而从总增温潜势的贡献率来看,晚稻季贡献

了 77.62%~93.24%(按照种植季分), CH。贡献了

CON 常规施肥处理在早稻季 GHGI 显著高于

81.27%~94.89%(按照气体分),见表4.

2.4 作物产量、全球增温潜势和气体排放强度

ble 4	Global warming po	tential of N <sub>2</sub> O	and CH <sub>4</sub> , and	greenhouse gas	emission intensi	ty under different trea	tments

		GWP 贡献率/%						#: ⇒ 理 座(CU	CI)/I 1 -1	
む		种植季			气	体	温至气冲排放浊度(GHGI)/kg·kg			
(Gwi)/kg·lilli	早稻	晚稻	辣椒	$N_2O$	$CH_4$	早稻	晚稻	辣椒		
СК	$4.621.65{\pm}510.77{\rm c}$	$3.12 \pm 1.78 \mathrm{c}$	$93.24{\pm}10.72{ m b}$	$3.64 \pm 0.53 \mathrm{c}$	5.11±2.37c	$94.89{\pm}8.97{\rm b}$	$0.03{\pm}0.02{\rm b}$	$1.19{\pm}0.29{\rm b}$	$0.05 \pm 0.01 \mathrm{c}$	
CON	7 193.03 $\pm$ 1 533.93b	10.14±0.68a	$77.62{\pm}19.83\mathrm{b}$	12.24±1.80a	18.73±1.19a	$81.27{\pm}20.17\mathrm{b}$	0.09±0.1a	$1.03{\pm}0.28{\rm b}$	0.17±0.03a	
B1	$6\;525.22{\pm}345.31{\rm b}$	$6.47{\pm}0.45\mathrm{b}$	$84.36 \pm 4.71 \mathrm{b}$	$9.17{\pm}0.78\mathrm{b}$	$14.49{\pm}1.23\mathrm{b}$	$85.51{\pm}4.19\mathrm{b}$	$0.05{\pm}0.00{\rm b}$	$0.91{\pm}0.08{\rm b}$	$0.07{\pm}0.01{\rm bc}$	
B2	9022.42±807.31a	$3.46 \pm 0.89 \mathrm{b}$	87.72±8.58a	8.82±1.05a	$11.86{\pm}1.39\mathrm{b}$	88.14±10.02a	$0.03{\pm}0.01{\rm b}$	1.60±0.14a	$0.08 \pm 0.01 \mathrm{b}$	

1)不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Та



(a)  $NH_4^* - N 含量, (b) NO_3^- - N 含量; 箭头从左到右依次表示蘖肥、$ 穗肥(早稻), 蘖肥、穗肥(晚稻), 基肥、追肥、追肥和追肥(辣椒);CK表示不施氮肥空白对照处理, CON表示施氮磷钾肥处理, B1表示氮磷钾肥配施20 t·hm<sup>-2</sup>生物炭处理, B2表示氮磷钾肥配施40 t·hm<sup>-2</sup>生物炭处理

## 图 5 不同处理早稻-晚稻-辣椒季 NH₄<sup>+</sup>-N和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes in NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents in early rice-late rice-pepper season under different treatments

量、土壤理化性质的相关性结果表明(表 6),早稻 季 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>累积排放量呈极显著正相关(P < 0.01),并且与 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>累积排放量与速效氮含量 也呈极显著正相关关系(P < 0.01),CH<sub>4</sub>累积排放 量与速效磷含量呈显著正相关(P < 0.05),作物产 量与有机质和 pH 分别极显著 (P < 0.01)和有显著 (P < 0.05)正相关性.从晚稻季来看, N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>累 积排放量有极显著正相关性 (P < 0.01), N<sub>2</sub>O 与 pH、有机质分别呈极显著 (P < 0.01)和显著 (P < 0.05)正相关关系.CH<sub>4</sub>与 pH 呈显著正相关关系 (P < 0.05).辣椒季中 N<sub>2</sub>O 累积排放量与速效氮和 速效钾含量有极显著正相关关系(P < 0.01),与作 物产量呈显著正相关(P < 0.05),与 pH 呈极显著负 相关关系(P < 0.01),作物产量与 pH 有显著负相关 关系(P < 0.05).

3 讨论

3.1 生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响

本研究中CON常规施肥处理在早稻季、晚稻季 和辣椒季 N,O 累积排放量分别为 1.66、0.26 和 2.60  $kg\cdot hm^{-2}$ ,辣椒季显著高于早稻季和晚稻季(P < 0.05, 图 2),这与王紫君等<sup>[21]</sup>研究的结果一致,在热带地区 稻菜轮作系统中,瓜菜季N,O排放量较大,一方面是 因为水稻季淹水条件下促进了反硝化过程的彻底进 行,将N,O还原为N,,另一方面是由于辣椒季施氮量 较高,给N,O的产生提供了充足的底物,从而促进了 N<sub>2</sub>O的排放.而早稻季N<sub>2</sub>O累积排放量比晚稻季高的 原因主要是晚稻种植期间为8~12月,受当地雨季的 影响,丰富的降雨形成了强还原的环境,不利于N,O 的产生[27].对比张啸林[28]和黄太庆[29]对双季稻-油菜 轮作体系和单季稻-小麦轮作体系 N<sub>2</sub>O 累积排放量的 研究结果,本研究中热带地区双季稻-辣椒轮作系统 N<sub>2</sub>O累积排放量较高,这主要是由于不同作物的水肥 利用效率和农田管理措施存在差异,作物对碳氮循 环的影响也不相同,进而导致 N<sub>2</sub>O 排放的差异<sup>[30]</sup>,如 钟川等<sup>[31]</sup>研究发现,不同水旱轮作模式N<sub>2</sub>O排放量 为:紫云英-早稻-晚稻(1.42 kg·hm<sup>-2</sup>)>油菜-早稻-晚稻(1.32 kg·hm<sup>-2</sup>) > 马铃薯-早稻-晚稻(1.27 kg·hm<sup>-2</sup>),对比本研究辣椒-早稻-晚稻 N,O 排放量 (4.52 kg·hm<sup>-2</sup>)相对较低.

表5  $N_2O$ 、 $CH_4$ 排放通量与 $NH_4^+$ -N、 $NO_3^-$ -N、和环境因子的相关性<sup>1)</sup>

025
935

	Table 5 Correlations of $N_2O$ and $CH_4$ emissions with $NH_4^+$ -N, $NO_3^-$ -N, and environmental factors						
	$N_2O$	$CH_4$	$NH_4^+-N$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	$_{\rm pH}$	5 cm 土温	
$N_2O$	1.000	$-0.160^{*}$	0.364**	0.303**	-0.154	-0.062	
$CH_4$		1.000	-0.079	-0.209**	0.635**	0.320**	
$NH_4^+$ -N			1.000	0.072	$0.157^{*}$	0.026	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N				1.000	-0.454**	$-0.240^{*}$	
$_{\rm pH}$					1.000	-0.356**	
5 cm 土温						1.000	

1)\*\*表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著,\*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

	Tab	ole 6 Corre	elations of N <sub>2</sub> O ar	id CH <sub>4</sub> cumula	tive emissions fr	om yield and soil prop	erties	
早稻季	$N_2O$	$\mathrm{CH}_4$	产量	$_{\rm pH}$	有机质	速效氮	速效磷	速效钾
$N_2O$	1	$0.779^{**}$	0.259	-0.392	-0.050	$0.778^{**}$	0.431	-0.490
$CH_4$		1	0.204	-0.449	0.002	$0.818^{**}$	$0.604^{*}$	-0.207
产量			1	$0.697^*$	0.815**	0.218	0.367	-0.483
$_{\rm pH}$				1	$0.784^{**}$	-0.400	-0.026	-0.157
有机质					1	0.161	0.513	-0.015
速效氮						$\Lambda^{\perp}\Lambda$	0.854**	0.020
速效磷			5	S		1211	1	0.326
速效钾			4	P		15 10)		(R)
晚稻季	$N_2O$	$CH_4$	产量	рН	有机质	速效氮	速效磷	速效钾
$N_2O$	-	0.837**	0.409	0.739**	0.691*	0.015	0.206	-0.466
CH4	/ /	1	0.316	0.590*	0.542	-0.029	0.059	-0.557
产量	111		VM	0.448	0.353	0.427	0.370	-0.366
pН	SII.	<	150	VP	0.853**	-0.102	0.224	-0.258
有机质	ML		VIII	1	1 (	0.130	0.511	0.030
速效氮	Val		(V/)"	1 11	. V	1 I S I	0.854**	-0.002
速效磷	LIR		16	1/2	)	·	å 1	0.291
速效钾	RIV		3 4	2				1
辣椒季	N <sub>2</sub> O	$CH_4$	产量	рН	有机质	速效氮	速效磷	速效钾
N <sub>2</sub> O	1	0.118	$0.664^{*}$	-0.941**	0.541	$0.720^{**}$	0.497	$0.824^{**}$
$CH_4$		1	-0.303	0.014	0.294	0.332	0.286	0.437
产量			1	$-0.583^{*}$	0.561	0.531	0.441	0.284
$_{\rm pH}$				1	-0.458	$-0.707^{*}$	-0.500	-0.833**
有机质					1	0.915**	$0.922^{**}$	$0.651^{*}$
速效氮						1	$0.940^{**}$	0.864**
速效磷							1	$0.701^*$
速效钾								1

表6 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>累积排放量与产量和土壤理化性质的相关性<sup>1)</sup>

1)\*\*表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著,\*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

生物炭在施入田间后,受到田间风化作用的影响,官能团发生改变,使得生物炭对土壤的缓冲能力 有所下降.此外,生物炭表面会随着时间的推移而氧 化,影响 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[32]</sup>.Spokas<sup>[15]</sup>研究表明,将生物炭 施入土壤一段时间后,由于田间的风化作用,生物炭 抑制硝化和反硝化的化合物流失,吸附能力下降,并 且表面氧化使其丧失了提高土壤 pH的能力,最终导 致 N<sub>2</sub>O 的减排能力降低.这与本研究结果不同,在本 研究中,生物炭施用 2 a 后,显著减少早稻季 32%~ 54% N<sub>2</sub>O的排放[P < 0.05,图 2(a)],与 2019 年新鲜 生物炭刚施入田间1a的研究结果相比<sup>[21]</sup>,生物炭依 然具有良好的减排效果.这可能是因为生物炭可以 长期稳定地提升土壤肥力,增加土壤氮素转化速率, 将氮从稳定态氮库转化成活性态氮库,减少氮素损 失,从而抑制 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[33]</sup>.此外,老化生物炭表面形 成的有机-矿物复合体导致其中的裂缝和通道堵塞, 改善了生物炭的机械强度,抑制了生物炭颗粒的碎 裂,从而降低 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[34]</sup>.晚稻季施用生物炭 2 a 后

显著增加了 N<sub>2</sub>O 的排放(P < 0.05),高量生物炭 B2甚 至增加了81%「图2(b)],这与2019年新鲜生物炭刚 施入田间1a的研究结果不同<sup>[20]</sup>.可能是由于晚稻季 长期淹水,生物炭减排效应被削弱,其只在土壤由干 转湿的过程对 N<sub>2</sub>O 的排放产生差异性影响<sup>[35]</sup>.并且 相关性结果表明,速效氮含量与N,O排放量呈极显著 正相关(表5和表6),生物炭对土壤氮素具有缓释作 用,在早稻季后期,B1和B2处理NH4\*含量较低,可能 是由于生物炭对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的吸附,延缓了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>向NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的 转换,降低了N,O的排放,而到了晚稻季,随着蘖肥的 施入,B1和B2处理生物炭所吸附的NH4\*逐渐被释 放,增加了N<sub>2</sub>O的排放<sup>[36]</sup>[图5(a)].在辣椒季中,低 量生物炭B1在施用两年后显著降低了35%的N<sub>2</sub>O排 放(P<0.05),而B2高量生物炭对N<sub>2</sub>O减排效果不显 著[图2(c)]. 这可能与辣椒季土壤由水田转变为旱 地有关[37].

**3.2** 生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 CH₄排放的影响

农田土壤 CH<sub>4</sub>的排放是其产生、氧化和传输综 合作用的结果,它往往受到温度、pH和水分管理等 因素的影响<sup>[38]</sup>,相关性结果表明,CH<sub>4</sub>排放动态与5 cm土壤温度和 pH 均呈极显著正相关(P<0.05,表 5),这与 Zhong等<sup>[39]</sup>研究的结果一致.而 CH<sub>4</sub>排放动 态与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量极显著负相关(表 5),可能是由于水 稻季高水分环境下,使得 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N与 CH<sub>4</sub>对甲烷氧化酶 存在竞争,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量的升高限制了 CH<sub>4</sub>的氧化<sup>[22]</sup>. 整个稻菜轮作季 CH<sub>4</sub>的累积排放量在 175.41 ~ 318.09 kg·hm<sup>-2</sup>,晚稻季显著高于早稻季和辣椒季 (P<0.05),这主要是由于热带地区早稻季和辣椒季 降雨量相对较少,田间频繁的干湿交替模式促进了 甲烷氧化,而不利于产甲烷菌的活性,因此导致早稻 季和辣椒季 CH<sub>4</sub>排放相对较低<sup>[40]</sup>.

本研究早稻季中,相比较 CON 处理,B1 和 B2 处 理添加 2 a后,均对 CH<sub>4</sub>有显著的减排作用,并分别减 少了 63% 和 54%,而与新鲜生物炭刚施入田间 1 a的 研究结果相比<sup>[21]</sup>,老化生物炭在早稻季的减排效果 更好.这可能是由于生物炭增加了土壤的通气性,限 制了甲烷菌的活动,从而降低了 CH<sub>4</sub>的排放<sup>[41,42]</sup>.而 生物炭施入田间 2 a后减排能力更佳,可能是由于老 化 2 a 的生物炭虽然显著增加了水稻季甲烷氧化潜 势,但并未对产甲烷潜势产生影响<sup>[43]</sup>,如 Xu等<sup>[44]</sup>研究 结果显示,生物炭对甲烷氧化菌和产甲烷菌均有促 进作用,但对前者的促进作用更强,因此提高了稻田 土壤 CH<sub>4</sub>的氧化能力,减少了 CH<sub>4</sub>的排放.此外,也有 研究表明<sup>[45]</sup>,生物炭虽然会增加土壤中甲烷氧化菌 的丰度和生物多样性,但存在滞后性,施用多年后, 土壤中的微生物群落更大.Qin等<sup>[46]</sup>将不同量生物炭 施入田间4a后也发现生物炭仍显著降低稻田CH<sub>4</sub>排 放.晚稻季B1与CON处理相比,CH<sub>4</sub>的累积排放量无 显著性差异,但B2处理显著增加了CH<sub>4</sub>的排放(*P* < 0.05),这与新鲜生物炭施入第1a的研究结果一 致<sup>[21]</sup>.可能与热带地区早稻季与晚稻季的水热条件 不同有关<sup>[47]</sup>.晚稻季前期雨水充沛,有利于CH<sub>4</sub>的产 生而不利于CH<sub>4</sub>的氧化,高水分条件下生物炭增加土 壤通气性的作用减弱,减排能力下降,并且生物炭本 身含有某种有毒的化学物质,对土壤中甲烷氧化菌 的活性存在着抑制作用,而高量生物炭有毒物质较 多,因此B2处理显著增加了CH<sub>4</sub>排放<sup>[48]</sup>.辣椒季CH<sub>4</sub> 排放降低,仅在灌溉施肥过程中,造成短期的厌氧条 件从而刺激了CH<sub>4</sub>排放,各处理土壤CH<sub>4</sub>排放未出现 显著性差异.

3.3 生物炭施用两年后对作物产量、GWP和GHGI的影响

相比较 CON 处理而言, B1 和 B2 处理在早稻季和 辣椒季均显著增加了作物产量,但在晚稻季无显著 性差异(P>0.05,表3),这主要是由于晚稻季受到台 风等不可抗力的因素所影响,但生物炭在早稻季和 辣椒季所增产的原因可能是由于生物炭有效地改良 了土壤结构,提高作物增产的关键养分的可用性。 提高氮素利用率[50]和酶活性[51]以及改善土壤水分状 况<sup>[52]</sup>来提高作物产量.对比新鲜生物炭刚施入第1a 的研究结果<sup>[21]</sup>,老化2a的生物炭增产效益更好. Zhang 等<sup>[53]</sup>研究结果表明,两年内,氮肥配施生物质 炭可使水稻持续增产, Major等<sup>[54]</sup>研究结果表明, 生物 质炭施入田间后的2~4a,均能促进玉米生长,尤其 第4a增产极显著.这表明生物炭对作物的增产效果 具有持续性,在施入生物炭几年后仍可观测到产量 水平的大幅提升,这与本试验结果相同.Kocsis等<sup>[55]</sup> 和 Criscuoli 等[56]分别在生物炭施入田间 25 a 和 158 a 后,对土壤进行取样分析,发现老化生物炭仍能明显 提高土壤肥力并促进作物生长.因此施用生物炭可 以长期稳定增加作物产量,是一种提高热带地区稻 菜轮作模式生产力的有效措施.

与CON处理相比,B2处理增加了稻菜轮作气体 总GWP,并达到显著水平(P<0.05),B1处理无显著 性差异(P>0.05).除此之外,B1处理显著减少了3 个作物季的GHGI,而B2处理仅显著减少了早稻和辣 椒季的GHGI(P<0.05),在晚稻季则显著增加(P< 0.05)(表4).前人的研究大多都表明生物炭能显著 降低GWP和GHGI<sup>[57,58]</sup>,这与本研究结果不同,可能 是由于不同地区的水热条件与田间管理的不同所造 成的.对比新鲜生物炭刚施入第1a的研究结果<sup>[21]</sup>, B1处理降低 GWP和 GHGI 的效果更加显著.有研究 表明<sup>[31]</sup>,随着年份的增加,生物炭降低 GWP和 GHGI 的能力增强,这与本研究 B1处理的结果相同,但其减 排效果的持续性和微观机理仍需进一步深入探索. 对作物季而言,主要的 GWP来源于晚稻季气体排放, 而两种温室气体中, CH<sub>4</sub>的排放量决定了 GWP和 GHGI 的大小,因此,在热带地区稻菜轮作系统中,温 室气体的减排应重点关注晚稻季的 CH<sub>4</sub>排放,在今后 的生产工作中可以选择不种植晚稻或改种一些田闲 作物从而减少晚稻季的 CH<sub>4</sub>排放.

### 4 结论

(1)热带地区稻菜轮作系统中,N<sub>2</sub>O的排放主要 集中在辣椒季,CH<sub>4</sub>的排放主要集中在晚稻季.

(2)生物炭添加两年后,低量生物炭依然显著降低了早稻季和辣椒季 N<sub>2</sub>O 的排放,而高量生物炭只显 著降低了早稻季 N<sub>2</sub>O 的排放,对辣椒季 N<sub>2</sub>O 的减排效 果不显著,并且高低量生物炭在晚稻季均增加了 N<sub>2</sub>O 的排放.

(3)生物炭添加两年后,高低量生物炭依然显著 降低了早稻季 CH<sub>4</sub>的排放,但在辣椒季均无显著性影 响;晚稻季中低量生物炭无显著性影响,而高量生物 炭显著增加了 CH<sub>4</sub>的排放.

(4)生物炭添加两年后,对早稻季和辣椒季依然 有显著的增产作用,但在晚稻季的增产作用不显著.
(5)从总体上看,氮肥配施低量生物炭对热带地 区稻菜轮作系统有明显的减排作用.
参考文献:

[1] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2426-2434.

Tian W, Wu Y Z, Tang S R, *et al.* Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2426-2434.

- [2] 赵庆雷,信彩云,王瑜,等.不同轮作模式对花生病虫害及产量的影响[J].植物保护学报,2018,45(6):1321-1327.
   Zhao Q L, Xin C Y, Wang Y, *et al.* Effects of different rotation patterns on peanut diseases, pests and yield[J]. Journal of Plant Protection, 2018,45(6):1321-1327.
- [3] 耿建梅,蒋红香,刘艳艳.海南稻菜轮作休闲期适宜填闲作物初筛[J].土壤通报,2019,50(1):76-80.
   Geng J M, Jiang H X, Liu Y Y. Selecting for suitable catch crop during the fallow period of rice-vegetable rotation in Hainan [J].
   Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1):76-80.
- [4] Pereira J, Figueiredo N, Goufo P, et al. Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields[J]. Atmospheric Environment, 2013, 80: 464-471.
- [5] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies [J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1315-1324.

- [6] Liu X R, Ren J Q, Zhang Q W, et al. Long-term effects of biochar addition and straw return on N<sub>2</sub>O fluxes and the related functional gene abundances under wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 44-55.
- [7] Huang Y B, Wang C J, Lin C, et al. Methane and nitrous oxide flux after biochar application in subtropical acidic paddy soils under tobacco-rice rotation [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1), doi: 10.1038/s41598-019-53044-1.
- [8] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 188: 264-274.
- [9] 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.
- [10] 刘文慧,王昱璇,陈丹丹,等.老化作用对生物炭理化特性的 影响[J]. 工程热物理学报,2021,42(6):1575-1582.
  Liu W H, Wang Y X, Chen D D, et al. Effect of aging on physicochemical properties of biochars[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021,42(6):1575-1582.
- [11] 周咏春,吴柳林,李丹阳,等.生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展[J].环境科学,2023,44(8): 4742-4750.
  Zhou Y C, Wu L L, Li D Y, *et al.* Review on the long-term and short-term effects of biochar addition on soil greenhouse gas emissions [J]. Environmental Science, 2023, 44 (8): 4742-4750.
- [12] Yuan H J, Zhang Z J, Li M Y, et al. Biochar's role as an electron shuttle for mediating soil N<sub>2</sub>O emissions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 133: 94-96.
- [13] Dong D, Feng Q B, McGrouther K, et al. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15: 153-162.
- Wang L, Gao C C, Yang K, et al. Effects of biochar aging in the soil on its mechanical property and performance for soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 782, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2021. 146824.
- [15] Spokas K A. Impact of biochar field aging on laboratory greenhouse gas production potentials [J]. GCB Bioenergy, 2013, 5 (2): 165-176
- [16] Duan P P, Zhang X, Zhang Q Q, et al. Field-aged biochar stimulated N<sub>2</sub>O production from greenhouse vegetable production soils by nitrification and denitrification [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 1303-1310.
- [17] Zhang X, Duan P P, Wu Z, et al. Aged biochar stimulated ammonia-oxidizing archaea and bacteria-derived N<sub>2</sub>O and NO production in an acidic vegetable soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 433-440.
- [18] Kubaczyński A, Walkiewicz A, Pytlak A, et al. Biochar dose determines methane uptake and methanotroph abundance in Haplic Luvisol [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2021. 151259.
- [19] 许欣. 生物炭与氮肥施用对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放及其相关功 能微生物的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
   Xu X. Effects of biochar and nitrogen fertilizer amendment on the related function of microorganisms of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy fields
   [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [20] 马芸芸,周伟,何莉莉,等.秸秆生物质炭对稻田土壤剖面

N<sub>2</sub>0和N<sub>2</sub>浓度的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1540-1551.

Ma Y Y, Zhou W, He L L, *et al.* Effect of application of strawderived biochar on concentrations of  $N_2O$  and  $N_2$  in paddy soil profile[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(6): 1540-1551.

[21] 王紫君,王鸿浩,李金秋,等.椰糠生物炭对热区双季稻田 N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响[J].环境科学,2021,42(8):3931-3942.

> Wang Z J, Wang H H, Li J Q, et al. Effects of coconut chaff biochar amendment on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in hot areas [J]. Environmental Science, 2021, 42 (8): 3931-3942.

- [22] 白金泽,刘镇远,宋佳杰,等. 秸秆还田配施生物炭对关中平 原夏玉米产量和土壤N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学,2022, 43(8): 4379-4386.
  Bai J Z, Liu Z Y, Song J J, et al. Effects of straw returning and Biochar Application on Summer maize yield and soil N<sub>2</sub>O emission in Guanzhong plain [J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4379-4386
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版 社,2000.
- [24] 伍延正,张苗苗,秦红灵,等.不同土地利用方式下冬季N<sub>2</sub>O 排放及其影响因素[J].环境科学,2013,34(8):2968-2974.
  Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.* N<sub>2</sub>O flux in winter and its affecting factors under different land use patterns [J]. Environmental Science, 2013, 34(8):2968-2974.
- [25] 唐瑞杰,胡煜杰,赵彩悦,等.不同水分条件下土地利用方式 对我国热带地区土壤硝化过程及NO和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 环境科学,2022,43(11):5159-5168.
  - Tang R J, Hu Y J, Zhao C Y, et al. Effects of land-use conversion on soil nitrification and NO & N<sub>2</sub>O emissions in tropical China under different moisture conditions [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5159-5168.
- 26] 吴震,董玉兵,熊正琴. 生物炭施用3年后对稻麦轮作系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (1): 141-148.

Wu Z, Dong Y B, Xiong Z Q. Effects of biochar application threeyears ago on global warming potentials of  $CH_4$  and  $N_2O$  in a ricewheat rotation system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(1): 141-148.

- [27] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from two paddy soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(8): 887-896.
- [28] 张啸林.不同稻田轮作体系下温室气体排放及温室气体强度研究[D].南京:南京农业大学,2013.
   Zhang X L. Greenhouse gases emissions and greenhouse gas intensity from different rice-based cropping systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [29] 黄太庆.不同轮作制度稻田生态系统温室气体排放研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
  Huang T Q. Greenhouse gases emissions from different rotation systems in paddy fields [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
  [30] 熊丽萍,吴家梅,纪雄辉,等.水旱轮作系统中土壤CH,和
- [30] 熊丽泙, 美家梅, 纪曜辉, 等. 小平北作系统中工場CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(4): 863-871.
   Xiong L P, Wu J M, Ji X H, *et al.* A review on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy-upland rotation systems[J]. Journal of Agro-

emissions from paddy-upland rotation systems[J]. Journal of Agro Environment Science, 2020, **39**(4): 863-871.

[31] 钟川,杨滨娟,张鹏,等.基于冬种不同作物的水旱轮作模式

对水稻产量及稻田 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 核农学报, 2019, **33**(2): 379-388.

Zhong C, Yang B J, Zhang P, *et al.* Effect of paddy-upland rotation with different winter corps on rice yield and  $CH_4$  and  $N_2O$  emissions in paddy fields [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, **33**(2): 379-388.

- [32] Wu Z, Zhang X, Dong Y B, et al. Microbial explanations for fieldaged biochar mitigating greenhouse gas emissions during a ricegrowing season [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(31): 31307-31317.
- [33] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 55: 20-27.
- [34] Sorrenti G, Masiello C A, Dugan B, et al. Biochar physicochemical properties as affected as affected by environmental exposure[J]. Science of the Total Environmental, 2016, 563-564: 237-246.
- [35] 祁乐,高明,郭晓敏,等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2351-2359.
  Qi L, Gao M, Guo X M, et al. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2351-2359.
- [36] 高德才,张蕾,刘强,等.旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J].农业工程学报,2014,30(6):54-61.
  Gao D C, Zhang L, Liu Q, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate
  [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6):54-61.
- [37] Sánchez-Garcia M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, et al. Biochar increases soil N<sub>2</sub>O emissions produced by nitrificationmediated pathways[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, 2(2), doi: 10.3389/fenvs. 2014. 00025.
- [38] Dong H B, Yao Z S, Zheng X H, et al. Effect of ammoniumbased, non-sulfate fertilizers on CH<sub>4</sub> emissions from a paddy field with a typical Chinese water management regime [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(5): 1095-1101.
- [39] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, et al. Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields [J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 420-426.
- [40] Thammasom N, Vityakon P, Saenjan P. Response of methane emissions, redox potential, and pH to eucalyptus biochar and rice straw addition in a paddy soil [J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST), 2016, 38(3): 325-331.
- [41] 李露,周自强,潘晓健,等.不同时期施用生物炭对稻田N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响[J].土壤学报,2015,52(4):839-848.
  Li L, Zhou Z Q, Pan X T, *et al.* Effects of biochar on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> 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.
- [42] Silber A, Levkovitch I, Graber E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44 (24): 9318-9323.
- [43] Jeffery S, Verheijen F G A, Kammann C, et al. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 251-258.
- [44] Xu X, Wu Z, Dong Y B, et al. Effects of nitrogen and biochar amendment on soil methane concentration profiles and diffusion in a

rice-wheat annual rotation system [J]. Scientific Reports, 2016, 6, doi: 10.1038/srep38688.

- [45] Quilliam R S, Glanville H C, Wade S C, et al. Life in the 'charosphere'-does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 287-293.
- [46] Qin X B, Li Y E, Wang H, et al. Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: a four-year case study in South China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1390-1401.
- [47] 李松,李海丽,方晓波,等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室 气体排放[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 234-240.
  Li S, Li H L, Fang X B, *et al.* Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (21): 234-240.
- [48] Spokas K A, Baker J M, Baker D C. Ethylene: potential key for biochar amendment impacts[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1-2): 443-452.
- [49] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.
- [50] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010, **78**(9): 1167-1171,
- [51] Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, et al. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 511-517.

- [52] 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.
- [53] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012, **127**: 153-160.
- [54] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J].
   Global Change Biology, 2010, 16(4): 1366-1379.
- [55] Kocsis T, Biró B, Ulmer Á, et al. Time-lapse effect of ancient plant coal biochar on some soil agrochemical parameters and soil characteristics [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(2): 990-999.
- [56] Criscuoli I, Baronti S, Alberti G, et al. Anthropogenic charcoalrich soils of the XIX century reveal that biochar leads to enhanced fertility and fodder quality of alpine grasslands[J]. Plant and Soil, 2017, 411(1-2): 499-516.
- [57] Liu J Y, Shen J L, Li Y, et al. Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system [J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 65: 30-39.
- [58] 张卫红,李玉娥,秦晓波,等.长期定位双季稻田施用生物炭的温室气体减排生命周期评估[J].农业工程学报,2018,34 (20):132-140.
  Zhang W H, Li Y E, Qin X B, *et al.* Estimation on GHG emission reduction in double cropping rice paddy with application of biochar in long-term period using LCA method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (20): 132-140.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

# CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	····ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, et al.	. ( 617 )
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	······QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	(626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing ·····	······CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, et al.	. ( 635 )
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years free	om 2006 to 2021	
·····//	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, et al.	. ( 645 )
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Ne	etwork	
	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, et al.	. (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, et al.	. (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	······YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, et al.	. (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzho	ou ······LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, et al.	. (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM2.5 in Zhengzhou	······LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, et al.	. ( 700 )
Nonlinear Variations in PM2.5 Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, et al.	. ( 709 )
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the	LEAP Model	
	······WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, et al.	. ( 721 )
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, et al.	(732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehic	cle Type Differences	
	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, et al.	. ( 744 )
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	·····WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	(755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	······TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, et al.	. (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	····WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, et al.	. (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control	Pollution Sources	
	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, et al.	. (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, et al.	. ( 802 )
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	······ZHENG Tao, OIN Xian-yan, WU Jian-xiong	(813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangijakou Area	IIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-ging, et al.	(826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, et al.	(837)
Contamination Characteristics. Detection Methods, and Control Methods of Antihiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	······PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	(844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	1an-yang ZHENG Wen-li CHEN Guan-tong-yi et al	(854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate		(862)
Prenaration of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> in Aqueous Solution	IIANG Ling AN ling-yue YUE Xiao-giong et al	(873)
Filiegev and Machanism of Tatracycling Adsorption by Boron-donad Maconorous Carbon		(885)
Adsorption Proportios of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifore Shells Biosher to Sulfamethavazole in Weter		(808)
High Resolution Emission Inventory of Creanbause Cas and Its Characteristics in Cuanglang. Chinautumuuuuuuuuuuu	HAN Shuar peng, TANG Li wen, LIO Un, et al.	( 000 )
Figure Constraints and the Environmental Regulation of a Restand Watland in the Linghe River Estuary	LU Ung, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, et al.	( 909 )
Ecosystem CO <sub>2</sub> Exchange and its Environmental Regulation of a Restored werland in the Eaone River Estuary	LIU SI-qi, CHEN Hong, AING Qing-nui, et al.	( 920 )
Effects of biochar Application 1 wo rears Later on $N_2$ of and $Cn_4$ Efficient Region Receive getable Rotation in a fropical Region of China $\sim$	WELV: HAOL ZHANG P	(929)
Research and Application Progress of Biochar in Amerioration of Saline-Aikan Sol	WEITING, JIAO LE, ZHANG Peng, et al.	(940)
Effect of No-thiage on Soil Aggregates in Farmiand: A Meta Analysis	C A F L A F	( 952 )
Spano-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guiznou Province: Taking Puding	County as An ExampleLI Tue, LUO Hong-ten	(901)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	ZHANG CL. ZHALE CHAND.	(9/4)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	(983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG YI-fei, et al.	(992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China		(1004)
	VG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, et al.	(1004)
Pollution Characteristics and Kisk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, et al.	(1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	(1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan	Province Based on Monte - Carlo Simulation	(1020)
	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, et al.	(1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, et al.	(1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models.	SHEN Zhi-jie, Ll Jie-qin, Ll Cai-xia, et al.	(1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, et al.	(1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, et al.	(1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, et al.	(1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	ANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, et al.	(1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	······YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, et al.	(1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, et al.	(1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	·····ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, et al.	. (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (Triticum aestivum L.) Seedlings	ANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, et al.	(1141)
Two-stage Inhibition Effects of Burkholderia sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, et al.	(1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacteri	ial Community	
	····HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, et al.	(1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics : A Critical Review	O Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, et al.	(1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, et al.	(1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, et al.	(1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	HENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	(1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theorem	oryGUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	(1222)