

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

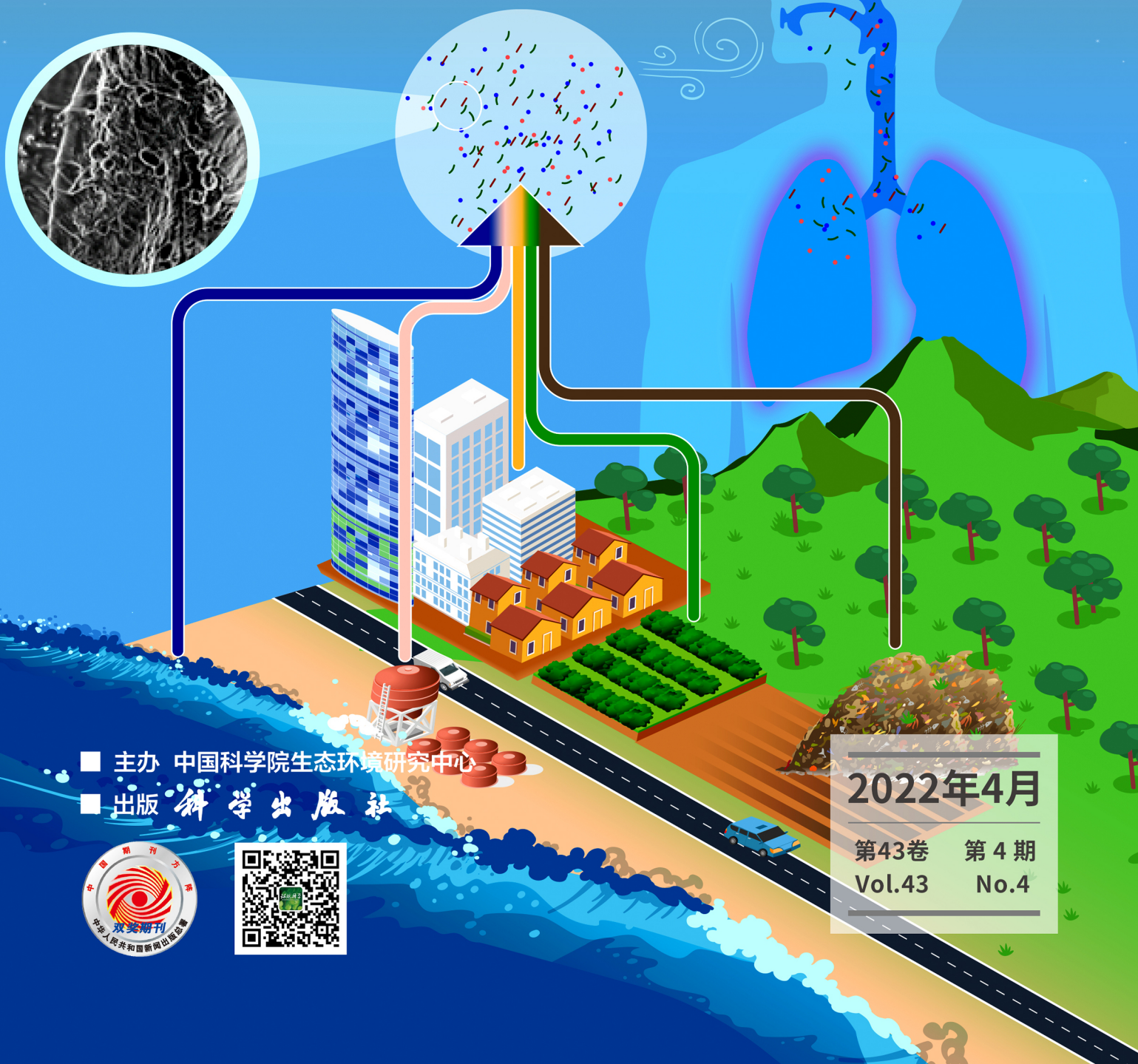
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	
《环境科学》征稿简则(1975)	
信息(1996, 2029, 2080)	

地膜覆盖和生物炭添加对菜地 N_2O 排放的影响

胡剑^{1,2}, 江长胜^{1,2}, 陈鑫童^{1,2}, 熊艳芳^{1,2}, 郝庆菊^{1,2*}

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

摘要: 为研究生物炭添加 (B0 : $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, B20 : $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, B40 : $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和地膜覆盖 (FM : 覆膜、 NM : 不覆膜) 对菜地 N_2O 排放的影响, 以西南大学农场内辣椒-萝卜轮作菜地为研究对象, 采用静态暗箱/气相色谱法进行为期 1 a 的田间原位观测。共设置 6 个处理, 分别为 NMB0 (CK) 和 FMB0 、 NMB20 和 FMB20 、 NMB40 和 FMB40 。结果表明, FM 显著提高辣椒季土壤中铵态氮和硝态氮含量 ($P < 0.05$), 而对萝卜季土壤环境因子均无显著影响。与 NM 相比, 辣椒季 FM 分别对 B0 、 B20 和 B40 处理下的 N_2O 排放提高了 52.87%、52.97% 和 52.49% ($P < 0.05$), 但萝卜季 FM 对 N_2O 排放无显著影响。生物炭对辣椒和萝卜季土壤环境因子均无显著影响。萝卜季生物炭添加减少了 28.76%~67.88% 的 N_2O 排放 ($P < 0.01$), 辣椒季生物炭添加对 N_2O 排放无显著影响。与 NM 相比, 在不同生物炭水平下 FM 对辣椒产量提高了 15.85%~161.32%, 对萝卜产量提高了 43.97%~75.80%。生物炭显著提高了辣椒产量, 对萝卜产量无显著影响。但不管覆膜与否, 生物炭添加量为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 辣椒和萝卜产量均最高。对 N_2O 排放强度的研究发现, 辣椒季 FM 显著降低了 N_2O 排放强度, 萝卜季 FM 和生物炭都显著降低了 N_2O 排放强度, 且两种植季均在 FMB20 处理下 N_2O 排放强度达到最低。因此, 地膜覆盖及施加 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭是辣椒季和萝卜季最优的农田管理措施, 既可以获得高产, 同时 N_2O 排放量最低, 达到经济效益和环境效益的双赢。

关键词: 生物炭; 地膜覆盖; N_2O ; 蔬菜地; 产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2163-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107204

Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N_2O Emission from a Vegetable Field

HU Jian^{1,2}, JIANG Chang-sheng^{1,2}, CHEN Xin-tong^{1,2}, XIONG Yan-fang^{1,2}, HAO Qing-ju^{1,2*}

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

Abstract: The aim of this research was to examine the effects of biochar addition (B0 : $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, B20 : $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and B40 : $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) and mulching (FM : film and NM : no film) on vegetables. The impact of N_2O emissions in the field was based on the pepper-radish rotation vegetable field system on the farm of Southwest University, using static dark box/gas chromatography to conduct in-situ observations in the field for one year. In this experiment, a total of six treatments were set up, namely NMB0 (CK) and FMB0 , NMB20 and FMB20 , and NMB40 and FMB40 . The results showed that FM significantly increased the content of ammonium and nitrate nitrogen in the pepper season soil ($P < 0.05$) but had no significant effect on soil environmental factors in the radish season. Compared with that of NM , the pepper season FM increased the N_2O emissions of the B0 , B20 , and B40 treatments by 52.87%, 52.97%, and 52.49% ($P < 0.05$), respectively, but the radish season FM had no significant effect on N_2O emissions. Biochar had no significant effect on soil environmental factors in the pepper and radish seasons. The addition of biochar in the radish season reduced N_2O emissions by 28.76%-67.88% ($P < 0.01$), and the addition of biochar in the pepper season had no significant effect on N_2O emissions. Compared with that of NM , under different biochar levels, FM increased the yield of pepper by 15.85%-161.32% and increased the yield of radish by 43.97%-75.80%. Biochar significantly increased the yield of peppers and had no significant effect on the yield of radishes. Regardless of whether the film was covered or not, when the amount of biochar added was $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, the yields of pepper and radish were the highest. The analysis of N_2O emission intensity revealed that FM in the pepper season significantly reduced N_2O emission intensity, whereas in the radish season FM and biochar significantly reduced N_2O emission intensity, and both planting seasons reached the lowest N_2O emission intensity under the FMB20 treatment. Therefore, mulching and applying $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ biochar were the best farmland management measures for the pepper season and radish season, which could achieve high yields and the lowest N_2O emissions, accomplishing a win-win for economic and environmental benefits.

Key words: biochar; plastic film mulching; N_2O ; vegetable field; yield

N_2O 是大气中重要的温室气体, 其全球变暖潜在力在 20 a 和 100 a 时间尺度上分别是 CO_2 的 268 倍和 298 倍^[1]。农业活动是 N_2O 的重要来源, 大约 60% 的 N_2O 排放来自耕地土壤^[2]。 N_2O 产生途径的复杂性及其高度的空间和时间变异性, 使得减少土壤 N_2O 排放特别具有挑战性^[3]。因此, 需要制定合理的管理和技术方法减少土壤 N_2O 排放。

菜地是大气 N_2O 的重要排放来源。中国蔬菜种植面积仅占全国总种植面积的 11.4%, 但 N_2O 排

量却达到 $84.7 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$, 对全国农田 N_2O 排放的贡献率为 21%~25%^[4]。地膜覆盖作为一种改善土壤水热条件、抑制杂草生长和提高作物产量的农业实践措施, 已在中国、美国和欧洲被广泛使用。有研究表

收稿日期: 2021-07-24; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977186, 41275160); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2019jcyj-msxmX0425); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS20115)

作者简介: 胡剑 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 1101252045@qq.com

* 通信作者, E-mail: haoqingju@163.com

明覆膜会增强^[5]、降低^[6]或无影响^[7] N_2O 的排放,倪雪等^[8]的研究表明地膜覆盖在春夏季可显著减少 N_2O 的排放量,在秋冬季则显著增加.生物炭是一种稳定和多孔的固体碳质材料,它是在氧气有限的条件下通过有机废物的热解产生^[9].目前,生物炭对 N_2O 的影响主要为降低其排放量^[10-12],影响因素包括生物炭在土壤中的陈化,通过氧化和含氧官能团的形成导致生物炭表面性质发生变化^[13]、自然吸附有机物导致生物炭孔堵塞,以及生物炭表面有机矿物复合物的形成^[14]等.有研究表明,覆膜能提高土壤温度和湿度^[15,16],而温度和湿度的升高会促进生物炭表面氧化,导致碳含量减少,表面负电荷增多^[17],从而吸附土壤阳离子矿物质^[13],形成有机-矿物质复合体,堵塞生物炭上的裂缝和通道,导致 N_2O 排放减少^[18].然而,迄今为止,关于地膜覆盖和生物炭施加的共同作用对菜地 N_2O 排放的研究还鲜见报道.因此,本文以西南地区常见的辣椒-萝卜轮作系统为研究对象,探讨地膜覆盖和生物炭施加共同作用下菜地 N_2O 的排放规律及影响因素,期为菜地 N_2O 减排提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验地点选在西南大学试验农场内,坐标为东经 $106^{\circ}26'$,北纬 $30^{\circ}26'$,海拔高度为 230 m.属于亚热带季风气候.年日照时数 1 276.7 h,无霜期年均约 344 d.试验期间气温和降雨量如图 1 所示,2020 年 5~9 月(辣椒季)平均气温为 27.12°C ,总降水量为 695.20 mm;10~12 月(萝卜季)平均气温为 15.60°C ,总降水量为 247.65 mm.本试验土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色土,土壤 ω (有机碳)为 $25.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (全氮)为 $1.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (碱解氮)为 $56.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (总磷)为 $646.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (有效磷)为 $5.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (总钾)为 $9.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ω (有效钾)为 $102.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

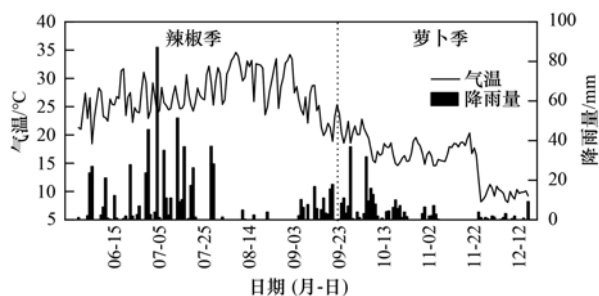


图 1 2020 年试验期间气温和降雨量

Fig. 1 Air temperature and rainfall during the experimental period in 2020

1.2 试验设计

本试验以西南地区典型菜地(辣椒-萝卜轮作)为研究对象,设置了地膜覆盖(FM)和不覆膜(NM)两种方式,每种方式各设置 3 种不同的生物炭添加水平,试验施加的水稻秸秆生物炭购自南京三聚生物质新材料科技有限公司,生物炭基础理化性质: ω (全氮)为 $0.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (总磷)为 $2.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (总钾)为 $27.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (有机碳)为 $537.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和比表面积为 $224.25\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$.本试验共设置 6 个处理,分别是覆膜不添加生物炭(FMB0)、不覆膜不添加生物炭(NMB0)、覆膜添加生物炭 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (FMB20)、不覆膜添加生物炭 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NMB20)、覆膜添加生物炭 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (FMB40)和不覆膜添加生物炭 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NMB40),每种处理有 3 个重复,共 18 个试验小区.每个试验小区有 1 条垄(长×宽×高: $280\text{ cm}\times 80\text{ cm}\times 15\text{ cm}$),垄间距为 40 cm.菜地田间管理与当地种植习惯保持一致,所有试验小区化肥施加量相同,辣椒季和萝卜季化肥施加量也相同.氮肥(尿素,以 N 计)、钾肥(以 K_2O 计)和磷肥(以 P_2O_5 计)施加量分别为 300、100 和 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥和钾肥作为基肥一次性施入,氮肥在基肥和追肥时各施加一半.

由于疫情延迟开学,2020 年 5 月返校后已错过辣椒的播种时间,因此于 2020 年 5 月 27 日移栽辣椒苗,2020 年 6 月 21 日进行追肥,辣椒成熟后分批收获,并于 2020 年 9 月 2 日完成最后一次收获.于 2020 年 9 月 24 日进行菜地翻耕、施肥、覆膜和萝卜籽的播种,2020 年 10 月 23 日追肥,并在 2020 年 12 月 24 日一次性收获.

1.3 样品采集与分析

1.3.1 气体样品采集

N_2O 采用静态暗箱法采集,垄上采样箱由不锈钢材质制成,设计为分节组合式标准箱,由顶箱、延长箱和底座组成,底座尺寸(长×宽×高: $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 20\text{ cm}$),顶箱和延长箱尺寸(长×宽×高: $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$),箱体外覆隔热材料,暗箱的内部设有两个轴流风扇,以使箱内气流得到充分混合,侧面安装电源插头和气体采集口.垄沟气体采集装置为不锈钢圆桶(直径 20 cm、高 25 cm),其顶部装有采集气样的接口.底座在试验开展初期便固定于采样点,上端有密封水槽(深 3 cm、宽 2 cm).采样时,将顶箱与底座上沟槽对齐,并用水密封,每隔 10 min 采集一次样品,在 30 min 的时间内共采集 4 个气体样品.采样频率为一周一次,在每次施肥和追肥后进行连续 3 d 的气样采集.采样时间均为 09:00~11:00,在 24 h 内用 Agilent7890A 气相色谱仪测定

气体样品中 N₂O 含量,具体工作条件见文献[19].

根据测定样品的 N₂O 含量与气体样品采集时间之间的变化曲线关系,计算各处理的 N₂O 排放通量(F),公式如下:

$$F = \frac{H \times 273}{273 + T} \times \frac{p}{p_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; H 为箱内气室高度 (cm); T 为采样期间箱内平均温度 ($^{\circ}\text{C}$); p 为采样时的大气压 (Pa); p_0 为标准状况下的大气压 (Pa); ρ 为 N₂O 的密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); dc/dt 为采样期间箱内 N₂O 含量变化速率.

各处理的试验小区均由垄和垄沟组成,在垄上测得的 N₂O 排放通量为 F_s ; 在垄沟测得的 N₂O 排放通量为 F_g ,各处理的 N₂O 排放通量 (F_m) 为垄和垄沟的 N₂O 排放通量与之一对应面积的加权平均,即:

$$F_m = (F_s \times S_s + F_g \times S_g) / S \quad (2)$$

式中, S_s 为垄上的面积 (m^2), S_g 为垄沟的面积 (m^2), S 为 S_s 和 S_g 的总和 (m^2). 辣椒季和萝卜季 N₂O 累积排放量根据公式(3)计算:

$$A = \frac{\sum \{ [(F_i + F_{i+1}) / 2] \times d + F_n \times 24 \}}{10\,000} \quad (3)$$

式中, A 为 N₂O 累积排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_i 和 F_{i+1} 为相邻两次观测所得排放通量, d 为相邻两次观测值间隔天数, F_n 为试验最后一次观测值.

单位产量的 N₂O 排放强度根据公式(4)计算:

$$Q = 100A / Y \quad (4)$$

式中, Q 为单位产量的 N₂O 排放强度 ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$, 以 N₂O/产量计), A 为某处理的 N₂O 累积排放量

($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), Y 为该处理的作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

1.3.2 土壤指标测定方法

垄上土样每两周采集一次,采样深度为 0 ~ 20 cm,采集的土壤样品一部分风干处理,一部分放于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存. 土壤各指标测定方法^[20]: 土壤水分测定采用烘干法; 铵态氮和硝态氮的测定采用流动注射仪; 全氮(TN)采用凯氏定氮法.

1.4 数据处理

运用 SPSS 19.0 对数据进行统计性分析,不同处理下 N₂O 排放量、土壤重量含水率、地下 5 cm 温度、全氮、硝态氮和铵态氮的差异显著性采用双因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 地膜覆盖和生物炭添加对土壤环境因子的影响

2.1.1 地膜覆盖和生物炭添加对土壤含水率及温度的影响

不同处理下土壤含水率如图 2(a) 和 2(b) 所示,辣椒季土壤含水率先升高后降低,而萝卜季则一直增高. 辣椒季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理下土壤平均含水率分别为 (14.37 ± 3.09)%、(16.20 ± 1.65)% 和 (15.11 ± 2.22)%, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理下各土壤平均含水率为 (15.66 ± 4.16)%、(15.67 ± 4.17)% 和 (18.66 ± 3.71)%. 生物炭、覆膜及其交互作用对土壤含水率均无显著影响 ($P > 0.05$). 萝卜季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理下各土壤平均含水率为 (17.43 ± 1.57)%、(13.83 ± 3.69)% 和 (15.69 ± 2.10)%, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理下各土壤平均含水率为 (15.35 ± 1.07)%、(13.63 ± 2.61)% 和 ($13.33 \pm$

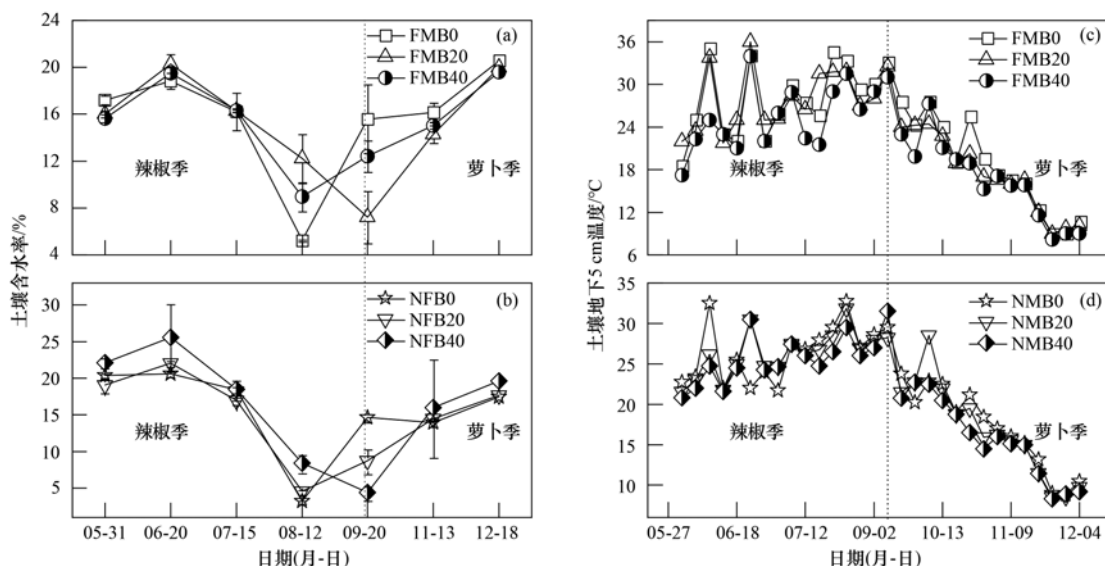


图 2 不同处理下土壤含水率及温度随时间的变化

Fig. 2 Temporal changes in soil moisture and temperature under the different treatments

4.59)%。生物炭、覆膜及其交互作用对土壤含水率均无显著影响($P>0.05$)。

不同处理下土壤地下 5 cm 温度如图 2(c) 和 2(d) 所示,各处理地下 5 cm 温度差异不大且季节变化趋势相同。辣椒季,地下 5 cm 平均温度 FMB0、FMB20 和 FMB40 处理分别为 27.67、27.81 和 25.29℃,NMB0、NMB20 和 NMB40 处理分别为 26.26、26.22 和 25.35℃。生物炭、覆膜及其交互作用对土壤地下 5 cm 温度均无显著影响($P>0.05$)。萝卜季,地下 5 cm 平均温度 FMB0、FMB20 和 FMB40 处理分别为 19.4、18.27 和 17.49℃,NMB0、NMB20 和 NMB40 分别为 17.81、17.49 和 16.78℃。生物炭、覆膜及其交互作用对土壤地下 5 cm 温度均无显著影响($P>0.05$)。

2.1.2 地膜覆盖和生物炭添加对土壤氮素的影响

土壤全氮含量如图 3(a) 和 3(b) 所示,辣椒季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理 ω (全氮) 平均值分别为 (0.55 ± 0.06) 、 (0.74 ± 0.03) 和 (0.84 ± 0.18) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理 ω (全氮) 平均值分别为 (0.58 ± 0.08) 、 (0.74 ± 0.09) 和 (0.70 ± 0.10) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。生物炭、覆膜及其交互作用对土壤全氮均无显著影响($P>0.05$)。萝卜季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理 ω (全氮) 平均值分别为 (0.66 ± 0.19) 、 (0.79 ± 0.19) 和 (0.86 ± 0.19)

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理 ω (全氮) 平均值分别为 (0.66 ± 0.16) 、 (1.02 ± 0.22) 和 (0.76 ± 0.20) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。生物炭、覆膜及其交互作用对土壤全氮均无显著影响($P>0.05$)。

土壤硝态氮含量如图 3(c) 和 3(d) 所示,辣椒季,在 B0、B20 和 B40 水平下 ω (硝态氮) 平均值 $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 分别为 42.41 ± 12.09 (FM) $> 12.75 \pm 3.07$ (NM)、 97.16 ± 27.48 (FM) $> 15.74 \pm 5.11$ (NM) 和 55.56 ± 11.07 (FM) $> 13.88 \pm 4.62$ (NM),覆膜极显著提高了硝态氮含量($P<0.001$),但生物炭及其交互作用对硝态氮无显著影响($P>0.05$)。萝卜季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理 ω (硝态氮) 平均值分别为 (122.65 ± 54.21) 、 (91.40 ± 36.95) 和 (22.49 ± 14.84) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理 ω (硝态氮) 平均值分别为 (16.14 ± 8.19) 、 (19.55 ± 9.31) 和 (71.56 ± 57.96) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物炭、覆膜及其交互作用对硝态氮均无显著影响($P>0.05$)。

不同处理下土壤铵态氮的季节变化趋势相同,如图 3(e) 和 3(f) 所示,辣椒季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理 ω (铵态氮) 平均值分别为 (53.31 ± 1.57) 、 (189.64 ± 74.26) 和 (153.05 ± 61.29) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理 ω (铵态氮) 平均值分别为 (53.75 ± 25.91) 、 $(59.93 \pm$

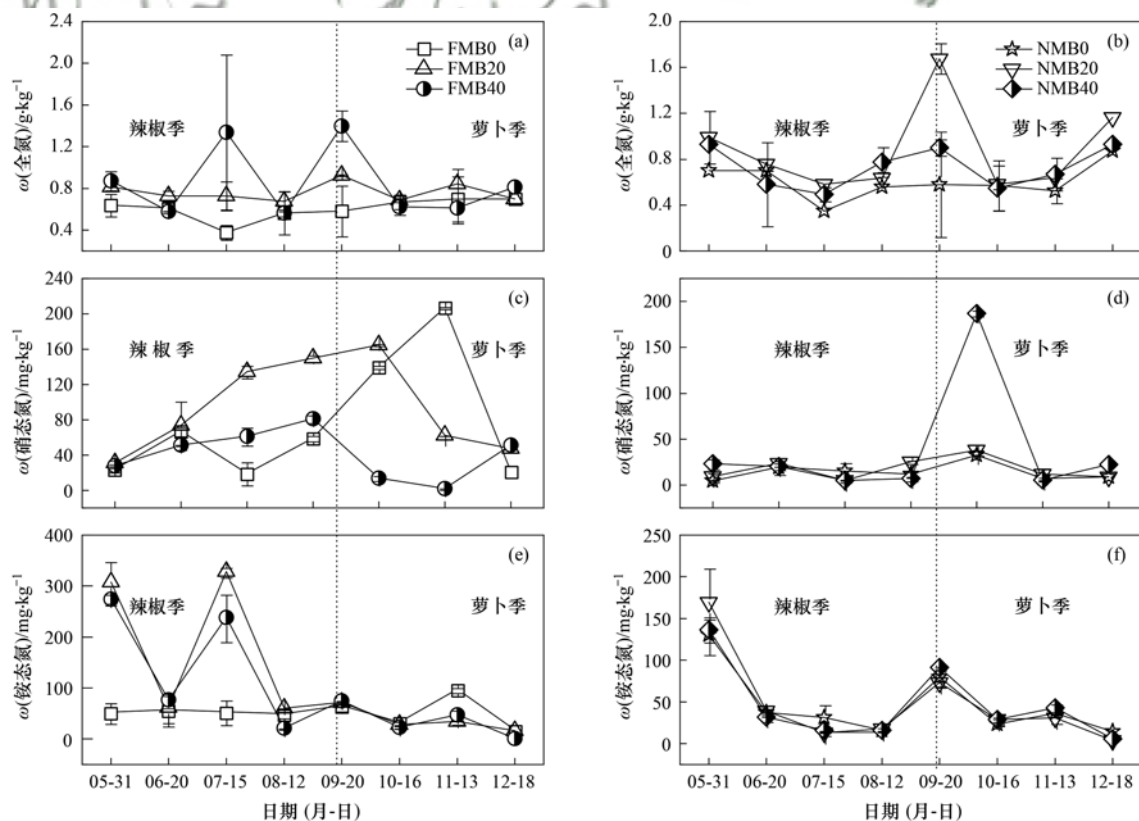


图3 不同处理下土壤氮素含量随时间的变化

Fig. 3 Temporal variations in soil nitrogen contents under the different treatments

36.91) 和 (50.04 ± 28.98) mg·kg⁻¹, 覆膜能显著提高铵态氮含量 ($P < 0.05$), 但生物炭及其交互作用对铵态氮无显著影响 ($P > 0.05$). 萝卜季, FMB0、FMB20 和 FMB40 处理 ω (铵态氮) 平均值分别为 (53.38 ± 17.82)、(37.72 ± 12.09) 和 (36.57 ± 15.91) mg·kg⁻¹, NMB0、NMB20 和 NMB40 处理 ω (铵态氮) 平均值分别为 (38.50 ± 14.45)、(34.18 ± 14.30) 和 (42.21 ± 18.03) mg·kg⁻¹. 生物炭、覆膜及其交互作用对铵态氮均无显著影响 ($P > 0.05$).

2.1.3 地膜覆盖和生物炭添加对产量的影响

辣椒季, 不同处理下产量如表 1 所示, 分析结果表明, 生物炭和覆膜对作物产量有极显著影响 ($P < 0.001$), 其交互效应也有显著影响 ($P < 0.01$). 相对于 NM, FM 在 B0、B20 和 B40 水平分别提高了 116.80%、15.85% 和 161.32% 的辣椒产量. 不论覆膜与否, 生物炭的添加均显著提高了辣椒产量 ($P < 0.001$). FM 处理下, FMB20 和 FMB40 产量相似, 比 FMB0 提高了 21.59% 和 22.09%. NM 处理下, NMB20 产量最高, 比 NMB0 增加了 127.55%, 但 NMB40 却与 NMB0 产量相同, 未有大幅提升. 萝卜季, 不同处理下作物产量如表 2 所示. 相对于 NM, FM 在 B0、B20 和 B40 水平下分别提高了 71.73%、43.97% 和 75.80% 的萝卜产量 ($P < 0.001$), 但生物炭及其交互效应对萝卜产量均无显著影响 ($P > 0.05$), 不论覆膜与否, B20 水平下萝卜产量最高.

表 1 辣椒季产量、N₂O 累积排放量和 N₂O 排放强度

Table 1 Yield, cumulative N ₂ O emission, and N ₂ O emission intensity during hot pepper season			
处理	作物产量 /kg·m ⁻²	N ₂ O 累积 排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放强度 (以 N ₂ O/产量计) /g·t ⁻¹
FMB0	4.70 ± 0.16	3.87 ± 1.27	81.91 ± 13.70
FMB20	5.71 ± 0.47	2.59 ± 1.20	44.02 ± 9.00
FMB40	5.73 ± 0.23	3.49 ± 1.56	59.92 ± 13.44
NMB0	2.17 ± 0.14	2.53 ± 0.33	116.92 ± 3.45
NMB20	4.93 ± 0.16	1.69 ± 0.70	33.84 ± 7.23
NMB40	2.19 ± 0.17	2.29 ± 1.08	103.65 ± 25.87
数据分析			
M	***	*	ns
B	***	ns	**
M × B	**	ns	ns

1) M 和 B 分别表示覆膜和生物炭, * 表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), *** 表示差异达到极显著水平 ($P < 0.001$), ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$), 下同

2.2 地膜覆盖与生物炭添加对 N₂O 排放的影响

图 4 显示了不同处理下辣椒-萝卜轮作菜地 N₂O 排放通量的季节变化. 整个试验观测期内, 在所有处理下, 辣椒季追肥后出现 N₂O 排放通量峰值, 萝卜季则在基肥和追肥时均出现排放通量峰值, 不

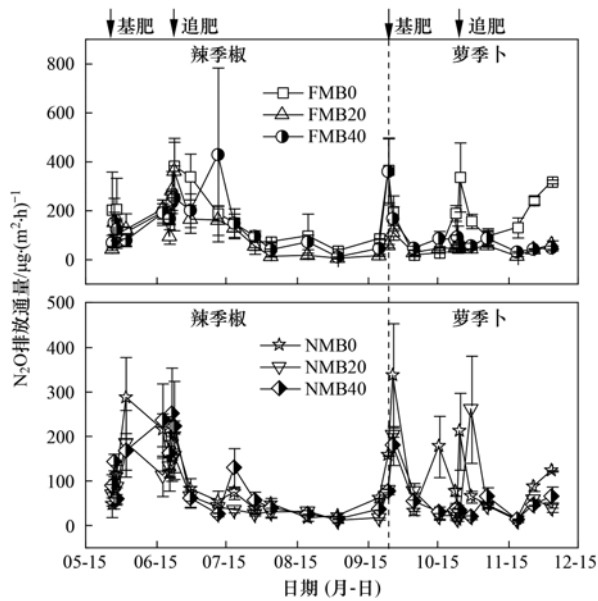
同生物炭添加水平下, 菜地的 N₂O 排放通量随季节变化趋势大致相同, 说明生物炭的添加没有改变菜地 N₂O 排放的季节变化规律. 覆膜能提高辣椒季 N₂O 排放通量的峰值, 但对萝卜季无影响. 辣椒季 N₂O 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 峰值分别为: FMB0 (382.94 ± 113.98) > NMB0 (287.98 ± 91.75)、FMB20 (361.13 ± 119.35) > NMB20 (185.81 ± 74.84)、FMB40 (252.43 ± 131.93) > NMB40 (236.93 ± 83.21). 生物炭能降低萝卜季 N₂O 排放通量的峰值, 但对辣椒季无影响. 萝卜季 FM 处理下不同生物炭添加水平下 N₂O 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 峰值为: B0 (365.99 ± 113.98) > B40 (360.52 ± 134.22) > B20 (111.17 ± 30.04), NM 处理下不同生物炭添加水平下 N₂O 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 峰值为: B0 (338.11 ± 117.08) > B20 (204.60 ± 3.99) > B40 (181.24 ± 43.61).

表 2 萝卜季产量、N₂O 累积排放量和 N₂O 排放强度

Table 2 Yield, cumulative N ₂ O emission, and N ₂ O emission intensity during radish season			
处理	作物产量 /kg·m ⁻²	N ₂ O 累积 排放量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放强度 (以 N ₂ O/产量计) /g·t ⁻¹
FMB0	6.56 ± 0.15	2.49 ± 0.36	37.79 ± 4.63
FMB20	6.85 ± 0.29	0.80 ± 0.19	11.61 ± 1.12
FMB40	6.54 ± 0.56	1.29 ± 0.11	19.70 ± 0.17
NMB0	3.82 ± 0.21	1.74 ± 0.02	45.96 ± 2.87
NMB20	4.75 ± 1.01	1.24 ± 0.25	26.22 ± 2.32
NMB40	3.72 ± 0.20	0.91 ± 0.01	24.59 ± 1.51
数据分析			
M	***	ns	**
B	ns	***	***
M × B	ns	*	ns

辣椒季, 不同处理下的 N₂O 累积排放量如表 1 所示, FM 显著增加了 N₂O 累积排放量 ($P < 0.05$), 而生物炭及其交互作用影响则不明显 ($P > 0.05$). 在 B0、B20 和 B40 水平下, 与 NM 相比, FM 分别提高了 52.87%、52.97% 和 52.49% 的 N₂O 累积排放量 ($P < 0.05$). 萝卜季, 不同处理下的 N₂O 累积排放量如表 2 所示, FM 对 N₂O 累积排放量无显著影响 ($P > 0.05$), 生物炭极显著减少 N₂O 累积排放量 ($P < 0.001$), 交互效应对 N₂O 累积排放量有显著影响 ($P < 0.05$). 与 NMB0 相比, NMB20 和 NMB40 分别减少了 28.76% 和 47.84% 的 N₂O 累积排放量 ($P < 0.01$), 与 FMB0 相比, FMB20 和 FMB40 分别减少了 67.88% 和 48.26% 的 N₂O 累积排放量 ($P < 0.001$).

由表 1 可知, 辣椒季 FM 对产量和 N₂O 累积排放量均有显著促进作用, 因而导致对 N₂O 排放强度的影响并不显著. 然而, 生物炭显著降低了 N₂O 排

图4 N_2O 排放通量的季节变化趋势Fig. 4 Seasonal variations in N_2O fluxes

放强度 ($P < 0.01$), 与 FMB0 相比, FMB20 和 FMB40 分别降低了 50.57% 和 47.60%。与 NMB0 相比, NMB20 和 NMB40 分别降低了 71.06% 和 11.35%。不论覆膜与否, B20 水平下 N_2O 排放强度最低。鉴于覆膜能显著提高辣椒产量, 且 B20 水平下产量提升作用最明显。因此, 对辣椒季而言, FMB20 是辣椒季最优的农田管理措施。

由表 2 可以看出, 萝卜季生物炭和覆膜都显著降低了 N_2O 排放强度 ($P < 0.01$)。在 B0、B20 和 B40 水平下, 与 NM 相比, FM 分别降低了 17.78%、55.74% 和 19.87% 的 N_2O 排放强度。与 FMB0 相比, FMB20 和 FMB40 分别降低了 97.03% 和 47.86% 的 N_2O 排放强度。因此, FMB20 处理下萝卜产量最高而 N_2O 排放最低, 是最优的农田管理措施。

3 讨论

在本研究中 FM 对土壤温度无显著影响 ($P > 0.05$, 图 2), 这可能是由于亚热带地区全年气温较高 (年平均值为 18.3°C) 所致。Liang 等^[21] 在与重庆同属亚热带季风气候的云南的研究表明, 覆膜并未显著改变土壤温度, 与本研究的结果一致。另外, 本研究还发现, 覆膜对土壤含水率无显著影响 ($P > 0.05$)。有研究认为 FM 会阻止降雨进入土壤^[22], 但也有研究认为 FM 能够减少土壤中水分的蒸发^[23], 可能正是由于 FM 对土壤水分的这种正负作用, 导致 FM 对土壤含水率无显著影响 ($P > 0.05$, 图 2)。

由图 1 可以看出, 辣椒季降雨强度大, 降水丰富, 可称之为湿季。有研究表明, 在降雨充沛的季节, FM 能够阻碍雨水进入土壤^[24], 从而减少雨水对土

壤中无机氮的冲刷和淋溶, 显著增加了土壤硝态氮和铵态氮含量 ($P < 0.05$, 图 3), 而土壤中铵态氮和硝态氮作为土壤微生物硝化和反硝化反应的底物, 其含量的增加推进了硝化和反硝化过程^[25], 从而显著提高了 N_2O 排放 ($P < 0.05$, 表 1)。而萝卜季降雨强度小, 降水贫乏, 可称之为干季。在干季, 由于降水的冲刷作用大大减弱, 导致对土壤中铵态氮和硝态氮的淋溶作用也随之减弱, 从而使得 FM 对土壤铵态氮和硝态氮的影响不明显 ($P > 0.05$, 图 3), 因而 FM 对萝卜季 N_2O 的排放未能产生明显影响 ($P > 0.05$, 表 2)。

本研究最初于 2019 年 10 月 12 日在田间施加生物炭, 发现辣椒季生物炭对 N_2O 排放无显著影响 ($P > 0.05$, 表 1), 造成这种现象的原因, 可能是因为辣椒季生物炭施加时间较短, 生物炭会释放不稳定的碳并矿化, 有利于微生物生长, 从而提高 N_2O 排放^[26], 同时生物炭也会释放酚类化合物和多环芳烃等化合物毒害氨氧化细菌 (AOB), 抑制了土壤中的硝化作用^[27]。最终正负效应相互抵消, 表现为无显著影响。然而, 萝卜季生物炭能极显著减少 N_2O 排放 ($P < 0.001$, 表 2)。通过对土壤环境因子分析发现, 生物炭没有显著影响土壤地下 5 cm 温度、含水率和氮素。与有研究发现生物炭通过吸附土壤中无机氮^[28] 和保持水分^[29] 来影响 N_2O 排放的结果不一致。造成这种现象的原因可能是由于生物炭陈化引起的: Wang 等^[18] 的研究发现生物炭陈化会在其表面形成有机-矿物质复合物, 堵塞生物炭的裂缝和通道, 改善了生物炭的机械强度, 一方面通过抑制生物炭颗粒的碎裂, 降低 N_2O 排放; 另一方面, 生物炭含有一定比例的脂肪族碳化合物^[30], 这些物质很容易被各种微生物利用^[31], 促进土壤中 N_2O 排放, 但陈化生物炭机械强度的增加会减少生物炭中这些不稳定碳的进一步释放, 减少 N_2O 排放。另外, 在萝卜季, 覆膜和生物炭添加的交互作用也显著减少了 N_2O 排放 ($P < 0.05$, 表 2)。Nishimura 等^[32] 的研究发现 N_2O 能从覆膜的垄上向未覆膜的垄沟表面水平扩散, 但研究表明生物炭陈化能降低土壤渗透性^[33], 可能会抑制覆膜下 N_2O 从垄上向垄沟的水平扩散, 使 N_2O 在垄上土壤中积累, 增加土壤中微生物与 N_2O 的作用, 导致 N_2O 消耗增加^[6, 34]。

本研究发现覆膜能显著提高辣椒和萝卜产量 ($P < 0.001$, 表 1 和表 2)。Wang 等^[35] 的研究也发现覆膜能提高马铃薯、玉米和小麦的产量。如上文所述, 一方面, FM 减少了辣椒季土壤中无机氮的淋溶, 增加了其含量, 从而提高了耕地质量。另一方面, 在未覆膜菜地, 田间杂草生长茂盛, 容易与辣椒和萝

卜争夺阳光以及土壤养分,而覆膜抑制了杂草的生长,减少了光照以及土壤养分资源的竞争和损失,从而提高了辣椒和萝卜的产量。

生物炭显著提高了辣椒产量($P < 0.001$, 表 1), 但对萝卜产量无显著影响($P > 0.05$, 表 2)。Li 等^[36]的研究发现生物炭显著增加了 17%~29% 的蔬菜产量。本研究生物炭增加辣椒产量可能因为生物炭的多微孔结构,为土壤中有益菌群提供生长栖息点^[37],增强土壤生态系统功能,为根系生长提供良好的生长环境^[38]。但随着生物炭施加时间的增加,生物炭不断陈化,其表面机械强度增加,减少生物炭中不稳定炭组分的进一步释放,陈化也减少了其表面积,可能会降低土壤的渗透性^[18],并且减少了土壤中有益菌群提供生长栖息点,生物炭对作物生长的正面作用减弱,最终表现为生物炭对萝卜产量无显著影响。另外,本研究还发现,辣椒产量并不是随着生物炭的添加量而不断升高,而是在 B20 水平下辣椒产量最高。董成等^[29]的研究发现玉米产量并不随生物炭的添加量而不断增加,而是在中等添加量下增产效果最好,与本研究结果一致,表明作物产量与生物炭添加量并不呈线性关系,过高的生物炭可能导致挥发物和有毒有害物质的含量过高,降低土壤微生物的活性^[39];而且过量的生物炭添加会阻碍土壤的重新聚集,使土壤大团聚体数量减少,氮素有效性降低,从而加剧土壤微生物之间的竞争,导致微生物总体活性下降^[40]。因此过高的生物炭添加对作物增产的效果表现不佳。

4 结论

(1) 与不覆膜相比,覆膜显著增加了辣椒季土壤中硝态氮和铵态氮含量,而对萝卜季土壤环境因子无显著影响;生物炭添加对辣椒和萝卜季土壤环境因子均无显著影响。

(2) 覆膜显著提高了辣椒季 N_2O 排放,但对萝卜季 N_2O 排放无显著影响;生物炭添加对辣椒季 N_2O 排放无显著影响,但显著抑制了萝卜季 N_2O 排放。

(3) 覆膜及生物炭添加均显著提高了辣椒产量,覆膜显著提高了萝卜产量,而生物炭添加对萝卜产量无显著影响。

(4) 不管辣椒季还是萝卜季,FMB20 处理下 N_2O 排放强度最小,即产量最高, N_2O 排放量最低,表明覆膜和 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭添加是辣椒季和萝卜季最优的农田管理措施。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis;

working group I Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] Wang Q, Liu Y R, Zhang C J, *et al.* Responses of soil nitrous oxide production and abundances and composition of associated microbial communities to nitrogen and water amendment [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, **53**(6): 601-611.

[3] Venterea R T, Halvorson A D, Kitchen N, *et al.* Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**(10): 562-570.

[4] Liu Q H, Qin Y M, Zou J W, *et al.* Annual nitrous oxide emissions from open-air and greenhouse vegetable cropping systems in China [J]. *Plant and Soil*, 2013, **370**(1-2): 223-233.

[5] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, *et al.* Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **91**: 48-57.

[6] Yu Y X, Jia H T, Zhao C Y. Evaluation of the effects of plastic mulching and nitrapyrin on nitrous oxide emissions and economic parameters in an arid agricultural field [J]. *Geoderma*, 2018, **324**: 98-108.

[7] 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 等. 地膜覆盖对菜地垄沟 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1559-1568.
Xiong W X, Jiang C S, Zhao Z J, *et al.* Effect of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from the ridges and furrows of a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1559-1568.

[8] 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 893-903.
Ni X, Hao Q J, Chen S J, *et al.* Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on N_2O emissions from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 893-903.

[9] Wu P, Wang Z Y, Wang H L, *et al.* Visualizing the emerging trends of biochar research and applications in 2019: a scientometric analysis and review [J]. *Biochar*, 2020, **2**(2): 135-150.

[10] Thomazini A, Spokas K, Hall K, *et al.* GHG impacts of biochar: predictability for the same biochar [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **207**: 183-191.

[11] 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 等. 对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1569-1580.

Tang Z M, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw on soil N_2O emission from a wheat maize rotation system [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1569-1580.

[12] 刘椒, 那立苹, 张琳, 等. 不同量生物炭施用与蚯蚓互作对土壤 N_2O 及 CO_2 排放的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(3): 353-359.

Liu J, Na L P, Zhang L, *et al.* Effects of different amount of biochar application and earthworm inoculation on soil N_2O and CO_2 emissions [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(3): 353-359.

[13] Mia S, Dijkstra F A, Singh B. Chapter one-long-term aging of biochar: a molecular understanding with agricultural and environmental implications [J]. *Advances in Agronomy*, 2017, **141**: 1-51.

[14] Sumaraj N, Padhye L P. Influence of surface chemistry of carbon materials on their interactions with inorganic nitrogen

- contaminants in soil and water[J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 532-547.
- [15] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5246-5256.
- Luo X Q, Zhang A F, Chen H X, *et al.* Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5246-5256.
- [16] 王静, 王弋博, 呼丽萍, 等. 多年覆膜改善冬小麦/油菜轮作地土壤提高产量[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(6): 121-128.
- Wang J, Wang Y B, Hu L P, *et al.* Years of whole-field plastic mulching improving soil and crop yield on winter wheat/rape rotation field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(6): 121-128.
- [17] Cheng C H, Lehmann J, Engelhard M H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(6): 1598-1610.
- [18] Wang L, Gao C C, Yang K, *et al.* Effects of biochar aging in the soil on its mechanical property and performance for soil CO₂ and N₂O emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **782**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146824.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [20] 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.
- [21] Liang S M, Ren C, Wang P J, *et al.* Improvements of emergence and tuber yield of potato in a seasonal spring arid region using plastic film mulching only on the ridge [J]. *Field Crops Research*, 2018, **223**: 57-65.
- [22] 郑梅迎, 张继光, 程森, 等. 不同覆盖方式对土壤温湿度及烟草生长发育的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(16): 13-21.
- Zheng M Y, Zhang J G, Cheng S, *et al.* Effect of different mulching types on soil temperature and moisture and tobacco growth [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(16): 13-21.
- [23] Li R, Hou X Q, Jia Z K, *et al.* Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **116**: 101-109.
- [24] Berger S, Kim Y, Kettering J, *et al.* Plastic mulching in agriculture—friend or foe of N₂O emissions? [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **167**: 43-51.
- [25] Li H T, Wang L, Peng Y, *et al.* Film mulching, residue retention and N fertilization affect ammonia volatilization through soil labile N and C pools [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **308**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107272.
- [26] Troy S M, Lawlor P G, O'Flynn C J, *et al.* Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **60**: 173-181.
- [27] Shi R Y, Ni N, Nkoh J N, *et al.* Beneficial dual role of biochars in inhibiting soil acidification resulting from nitrification [J]. *Chemosphere*, 2019, **234**: 43-51.
- [28] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO₂、N₂O 排放的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- Liu X R, Zhang X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw return on CO₂ and N₂O emissions from farmland in the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- [29] 董成, 陈智勇, 谢迎新, 等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(19): 4024-4034.
- Dong C, Chen Z Y, Xie Y X, *et al.* Effects of successive biochar addition to soil on nitrogen functional microorganisms and nitrous oxide emission [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(19): 4024-4034.
- [30] Singh B, Fang Y, Johnston C T. A fourier-transform infrared study of biochar aging in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, **80**(3): 613-622.
- [31] Sheng Y Q, Zhu L Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **622-623**: 1391-1399.
- [32] Nishimura S, Komada M, Takebe M, *et al.* Nitrous oxide evolved from soil covered with plastic mulch film in horticultural field [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(7): 787-795.
- [33] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, *et al.* The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil -the role of soil aeration [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **51**: 125-134.
- [34] Chapuis-Lardy L, Wragge N, Metay A, *et al.* Soils, a sink for N₂O? a review [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(1): 1-17.
- [35] Wang L L, Coulter J A, Li L L, *et al.* Plastic mulching reduces nitrogen footprint of food crops in China: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **748**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141479.
- [36] Li B, Huang W H, Elsgaard L, *et al.* Optimal biochar amendment rate reduced the yield-scaled N₂O emissions from ultisols in an intensive vegetable field in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138161.
- [37] Kolton M, Harel Y M, Pasternak Z, *et al.* Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(14): 4924-4930.
- [38] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
- Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
- [39] Ding Y, Liu Y G, Liu S B, *et al.* Biochar to improve soil fertility. a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, **36**(2), doi: 10.1007/s13593-016-0372-z.
- [40] Jin L, Wei D, Yin D W, *et al.* Investigations of the effect of the amount of biochar on soil porosity and aggregation and crop yields on fertilized black soil in northern China [J]. *PLoS One*, 2020, **15**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0238883.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)