

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪雅 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344)	
《环境科学》征稿简则(5361)	
信息(5287, 5499, 5508)	

氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤 N_2O 排放的影响

许宏伟^{1,2}, 李娜^{1,2}, 冯永忠^{1,2*}, 任广鑫^{1,2}, 谢呈辉^{1,2}, 吕宏菲^{1,2}, 马星霞^{1,2}, 郝嘉琪^{1,2}

(1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 为探究氮肥和秸秆还田方式对 N_2O 排放的影响, 本研究在关中地区冬小麦-夏玉米轮作模式下, 采用双因素裂区设计, 主区为常规施氮(G)和减量施氮(70%G); 副区为秸秆不还田(N)、秸秆还田(S)和秸秆还田+生物炭(SB), 分析对 N_2O 排放和产量的影响及与相关影响因子间的关系。结果表明, 小麦季和玉米季各处理在施肥后第5~16d内相继出现 N_2O 排放高峰, 在降雨后也出现 N_2O 排放峰值。 N_2O 通量和土壤温度、 NH_4^+-N 含量呈显著正相关。在同等施氮水平下, S处理增加了 N_2O 排放量, SB处理可降低 N_2O 排放量, S和SB处理均能显著增加作物产量, 且SB增产幅度更大; 70%G水平的 N_2O 年排放量较G水平减少了40%~48%, 而产量并没有明显减少。综合考虑, 在常规施氮基础上减氮30%配合秸秆+生物炭, 在保证作物高产的同时, N_2O 减排效果最好。

关键词: 氮肥; 秸秆还田; 生物炭; N_2O 排放; 产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5668-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202005151

Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N_2O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils

XU Hong-wei^{1,2}, LI Na^{1,2}, FENG Yong-zhong^{1,2*}, REN Guang-xin^{1,2}, XIE Cheng-hui^{1,2}, LÜ Hong-fei^{1,2}, MA Xing-xia^{1,2}, HAO Jia-qi^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the impacts of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N_2O emissions, a two-factor split-zone design was adopted for experimentation under the winter wheat-summer maize rotation model in the Guanzhong area of Shanxi, China. The main areas of interest were conventional nitrogen (G) and reduced nitrogen (70% G); the sub-areas were straw no return (N), straw return (S), and straw return + biochar (SB); we analyzed their impacts on N_2O emissions and crop yield, and the relationships with related impact factors. The results showed that the N_2O emissions peaks appeared in the wheat season and maize season treatments within 5-16 days after fertilization, and also appeared after rainfall. The N_2O flux was significantly and positively correlated with soil temperature and NH_4^+-N content. Regardless of the wheat season, maize season, or annual total N_2O emissions, the 70% GSB treatment was the lowest and the GS treatment was the highest. At the same level of nitrogen application, S treatment increased N_2O emissions, SB treatment could reduce N_2O emissions, both S and SB treatments could significantly increase crop yields, and SB production increased more; 70% G-level annual N_2O emissions, when compared with the G level, had been reduced by 40% to 48%, while the yield has not decreased significantly. Through comprehensive consideration, a reduction of nitrogen by 30% was achieved through the combination of straw + biochar on the basis of conventional nitrogen application, while ensuring high crop yields and the best N_2O emissions reduction.

Key words: nitrogen fertilizer; residues; biochar; N_2O emissions; yield

全球变暖已经成为不争的事实, 1880~2012年全球平均温度已升高0.85℃(0.65~1.06℃)^[1]。 N_2O 作为重要温室气体之一, 100a全球增温潜势(NWP)是 CO_2 的280~310倍^[1]。据估计大气中每年有80%~90%的 N_2O 来源于土壤, 而农田土壤是温室气体重要排放源^[2]。因此针对农田 N_2O 减排的研究具有重要意义。

氮肥用量过多是导致农田土壤 N_2O 排放较高的主要原因^[3]。在我国农业生产过程中, 氮肥的投入量占化肥投入总量的比重最高, 但氮肥的当季利用率明显落后于世界水平^[4]。有调查结果显示, 在关中地区冬小麦-夏玉米轮作模式中, 普遍存在施氮

量过大的现象, 小麦、玉米过量施氮农户高达55.3%和78.2%^[5]。事实上过量施氮下产量并没有实现同比增长, 还会使土壤退化、硝酸盐淋失和增加 N_2O 排放等^[6]。因此, 对于改善环境和作物增产方面, 合理的施氮量显得尤为重要。

我国秸秆资源极其丰富, 水稻、小麦和玉米等大宗农作物秸秆年产出在5亿t左右^[7]。合理高效的秸秆还田方式不仅可减少资源浪费, 还可增强土壤肥力, 弥补氮肥减量的不足以及降低氮素损失

收稿日期: 2020-05-15; 修订日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971859)

作者简介: 许宏伟(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田 N_2O 排放机制, E-mail: daxuhxl@163.com

* 通信作者, E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

等^[8]. 关于秸秆还田调控N₂O排放的研究屡见不鲜,但结果却不尽相同. 有研究指出秸秆还田促进了N₂O排放,原因可能是秸秆还田使供碳量增加,从而促进反硝化和N₂O排放^[9]. 也有研究显示秸秆还田可抑制N₂O排放,原因是秸秆中较高的 C/N 增强了土壤氮素固定,降低了N₂O排放^[10]. 生物炭是近年来兴起的一种由农业废弃物在高温低氧条件下产生的含碳量极高的固态物质,可改良土壤,培肥地力^[11],同时也用作温室气体的调控研究. 生物炭由于其较强的吸附性及表面电负性,可吸附土壤中游离的 NH₄⁺ 和温室气体,其较高的 C/N 可导致土壤 N 的矿化和再固定,从而降低N₂O排放^[12, 13]. 但生物炭对N₂O排放的影响仍存在争议^[14, 15],且秸秆还田下添加生物炭对N₂O排放的影响也鲜有报道. 因此本研究以关中地区麦玉轮作模式为基础,探究氮

肥施用量配合秸秆还田方式对土壤N₂O排放和产量的影响,以期为关中地区实现高产低排放的合理高效种植制度提供理论基础与技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在陕西省杨凌区西北农林科技大学曹新庄试验田进行(E108°04', N34°17'). 该地区位于关中地区中部,海拔 520 m,为大陆性季风区半湿润半干旱气候,是典型的一年两熟农作区. 年平均降水量为 550 mm,小麦生育期内的降雨量约占年降雨量的 40%,年平均气温 12.9℃. 试验地土壤为壤土. 试验开始于 2018 年 6 月,N₂O观测周期为 2018 年 10 月至 2019 年 10 月. 2018 年 6 月试验开始前土壤基础理化性质见表 1,观测期内气温和降水量如图 1 所示.

表 1 土壤基础理化性质(0~20 cm)

Table 1 Physical and chemical properties of soils (0-20 cm)

项目	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	pH
参数	7.79	1.4	0.53	9.97	143.44	28.47	8.26

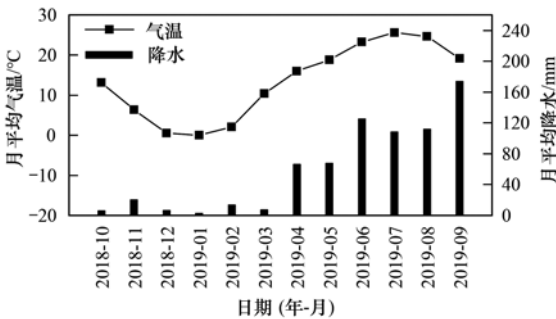


图 1 月平均气温和降水量的变化情况

Fig. 1 Average temperature and precipitation monthly

1.2 试验设计

本试验采用裂区设计,主区为施氮量,设 2 个水

平:常规施氮(G)和 70% 施氮(70% G);副区设 3 个水平:秸秆不还田(N)、秸秆还田(S)和秸秆还田+生物炭(SB). 每个处理 3 次重复,共 18 个小区,各小区面积为 36 m²,间隔 1 m,周围设 3 m 保护行. 所有处理均分别以尿素、过磷酸钙和硫酸钾作为氮磷钾肥,均以基肥的形式在播前均匀撒于各小区. N 为前茬作物收获后,人工移除秸秆地上部分;S 为前茬作物收获后,利用秸秆还田机将该小区内秸秆打碎后旋耕入 15 cm 土层;SB 为前茬作物收获后,将小区内秸秆进行粉碎,均匀撒入 8 t·hm⁻²生物炭,最后进行旋耕. 所有小区均采用旋耕,旋耕深度 15 cm,小麦和玉米肥料用量见表 2.

表 2 小麦和玉米肥料用量/kg·hm⁻²

Table 2 Amount of wheat and maize fertilization/kg·hm⁻²

作物	常规施肥			70% 施肥		
	尿素(N)	过磷酸钙(P ₂ O ₅)	硫酸钾(K ₂ O)	尿素(N)	过磷酸钙(P ₂ O ₅)	硫酸钾(K ₂ O)
小麦	180	90	0	126	90	0
玉米	225	140	120	157.5	140	120

本研究采用蠡玉 18 号和西农 889 为研究对象. 冬小麦于 2018 年 10 月 13 日播种,行距 30.00 cm,播种量为 150 kg·hm⁻²,2019 年 6 月 6 日收获;夏玉米于 2019 年 6 月 13 日播种,行距 70.00 cm,株距 25.00 cm,播种深度 5 cm,2019 年 9 月 27 收获. 本试验期间使用杀虫剂与除草剂进行除草和病虫害防治,观测期内未进行灌水.

1.3 N₂O排放的测定

N₂O排放通量采用密闭式静态暗箱-GC 气相色谱法测定. 箱体为不锈钢金属,由上下两部分组成,上部箱体为立方体(长 50 cm,宽 50 cm 和高 50 cm),周围包裹两层绝热材料,箱体侧面中部设有气密性气体取样口,取样口由三通阀连接控制开关,顶部插有温度计,底部开口可以罩在底座上;下部底

座为四周有水槽的立方体,播种前将底座插入小区中心 15 cm 土中. 采样时间为上午 09:00 ~ 11:00, 测定时,水封槽内注满水,罩上箱体,形成一个密闭性气体空间,随后立即用 50 mL 注射器采集样品,之后分别在扣箱后的 15 min 和 30 min 时采样一次. 监测频率为播种后前两周内每 2 ~ 3 d 采 1 次,之后每 7 ~ 10 d 一次直至作物收获,其中小麦越冬期只采集一次. 降雨后 2 ~ 3 d 一次,直至排放速率恢复稳定. 气体样品于采样当天用气相色谱仪(Agilnet Technologies 7890A)分析气体样品中 N_2O 的含量. 使用电子捕获检测器(ECD),载气为氩甲烷,其柱温是 65℃,检测器温度 330℃,流速为 30 mL·min⁻¹.

1.4 土壤环境因子的测定

在每次监测气体的同时,同步测定土壤相关环境因子. 作物播种后,在每个小区静态箱底座周围约 10 cm 处理置 10 cm 直角地温计用于测定土壤温度. 用螺旋形土钻在静态箱底座周围约 1.5 m 内采集土壤样品,确保土壤相关数据具有代表性. 采用铝盒烘干称重法测定土壤含水的体积分数(0 ~ 10 cm),环刀法测定土壤容重(0 ~ 10 cm);土壤无机氮(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)含量(0 ~ 20 cm)采用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提-AA3 流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定(水土比为 5:1),每个处理重复 9 次.

1.5 数据处理与分析

N_2O 排放通量计算公式如下:

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

式中, F 为温室气体的排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; ρ 为温室气体在标准状态下的密度 ($1.964 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); dc/dt 为采样过程中采样箱内气体的浓度变化率; p 为采样箱内气压; p_0 为标准大气压,由于试验站地区气压与标准大气压相当,因此 p/p_0 值等于 1; V 表示密闭静态箱体积 (m^3); A 表示采样箱内土地面积 (m^2); 273 为气态方程常数; T 为测定时采样箱内平均温度 ($^{\circ}\text{C}$).

式(2)为土壤充水孔隙度(WFPS)计算公式:

$$\text{WFPS} = \frac{\text{SC} \times \text{BD}}{1 - \text{BD}/2.65} \times 100\% \quad (2)$$

式中,SC 为土壤含水的体积分数 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),BD 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$),假定土壤密度为 2.65 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

假定观测所得 N_2O 排放速率为日排放速率的平均值,利用线性内插法估算未观测日的排放速率,逐日累加,估算 N_2O 年排放量.

N_2O 排放强度根据各处理 N_2O 排放总量和作物

产量的比值计算.

利用 Microsoft Excel 2016 进行相关数据计算, OriginPro 2019b 绘图, Spss Statistics 25 进行单因素方差分析及 LSD 多重比较,并对 N_2O 排放通量与土壤环境因素进行皮尔森相关分析.

2 结果与分析

2.1 土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量和水热状况的季节变化

图 2 为冬小麦/夏玉米轮作期间土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的动态变化情况. 在同等施氮水平下,各秸秆还田处理 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的平均值分别表现为 $SB > S > N$ 和 $S > N > SB$. 在小麦和玉米季,各处理 NO_3^- -N 含量的季节变化幅度较大,而 NH_4^+ -N 含量仅在施肥后 10 d 内达到峰值,随后一直保持在较低水平. 常规施氮(G)水平下, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的变化范围分别为 $2.5 \sim 58.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.77 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 70% 施氮(70%G)水平下 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量分别在 $2.18 \sim 38.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 \sim 37.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值较 G 水平分别降低了 8% ~ 30% 和 11% ~ 28%.

小麦和玉米轮作期间,各处理土壤温度和 WFPS 均无显著性差异 ($P > 0.05$, 图 3). 降水对 WFPS 影响较大,全年尺度下,WFPS 呈现锯齿形波动,变化范围为 24% ~ 91%,不同处理 WFPS 平均值大小顺序为 $GS > 70\%GS > GSB > 70\%GSB > 70\%GN > GN$,小麦季和玉米季平均 WFPS 分别为 53% 和 58%. 土壤温度变化范围为 $4.33 \sim 30.73^{\circ}\text{C}$,整体表现为先下降后上升再下降趋势,小麦季和玉米季土壤平均温度分别为 13.91°C 和 25.67°C .

2.2 N_2O 排放通量的动态排放特征

不同处理 N_2O 排放通量年季动态变化趋势基本一致(图 4). 施肥后, N_2O 排放通量迅速增加,各处理 N_2O 排放高峰分别出现在施肥后第 5 ~ 16 d 内,此外,在降雨后也出现 N_2O 排放峰值.

在小麦季, G 条件下, N_2O 排放通量变化幅度为 $0.12 \sim 52.3 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, N、S 和 SB 处理下 N_2O 排放峰值分别为 36.84、52.30 和 $24.23 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 70%G 条件下, N_2O 排放通量变化幅度为 $0.97 \sim 36.3 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, N、GS 和 GSB 处理下 N_2O 排放峰值分别为 20.47、36.33 和 $17.41 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

在玉米季, G 条件下, N_2O 排放通量变化幅度为 $2.37 \sim 276.52 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, N、S 和 SB 处理下 N_2O 排放峰值分别为 218.84、276.52 和 117.67

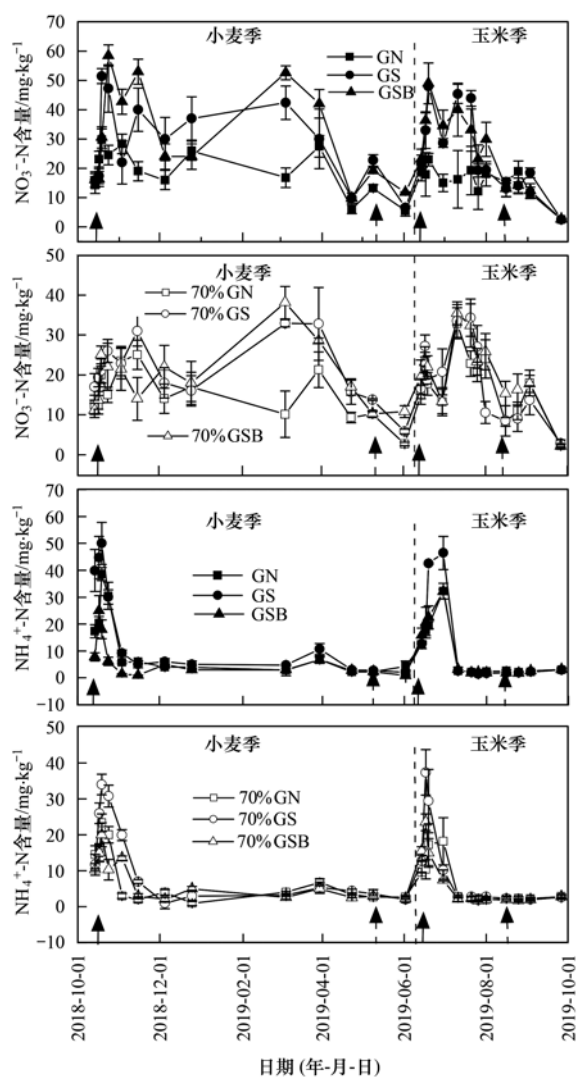


图2 不同处理0~20 cm土层 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in soil layers 0-20 cm deep in different treatments

$\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$. 70% G 条件下, N_2O 排放通量变化幅度为 $3.42 \sim 155.22 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, N、GS 和 SB 处理下 N_2O 排放峰值分别为 96.06 、 155.22 和 $80.22 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$. 玉米季各处理 N_2O 排放高峰均大于小麦季.

2.3 N_2O 排放总量

无论小麦季、玉米季还是年 N_2O 排放总量, 均为 70%GSB 处理最低, GS 处理最高 (图 5). 同等施氮水平, N_2O 排放总量大小顺序为 $S > N > SB$; 对于同等秸秆还田方式, 70% 施氮较常规施氮降低了 N_2O 排放量, 且 GN 和 70%GN、GS 和 70%GS 两组处理间差异显著 ($P < 0.05$).

小麦季, G 和 70%G 水平下, N_2O 排放总量分别在 $260.09 \sim 684.18 g \cdot hm^{-2}$ 和 $208.59 \sim 442.91 g \cdot hm^{-2}$ 之间, S 较 N 处理显著增加了 N_2O 排放量 ($P < 0.05$), 增幅分别为 63% 和 84%, SB 比 N 处理 N_2O

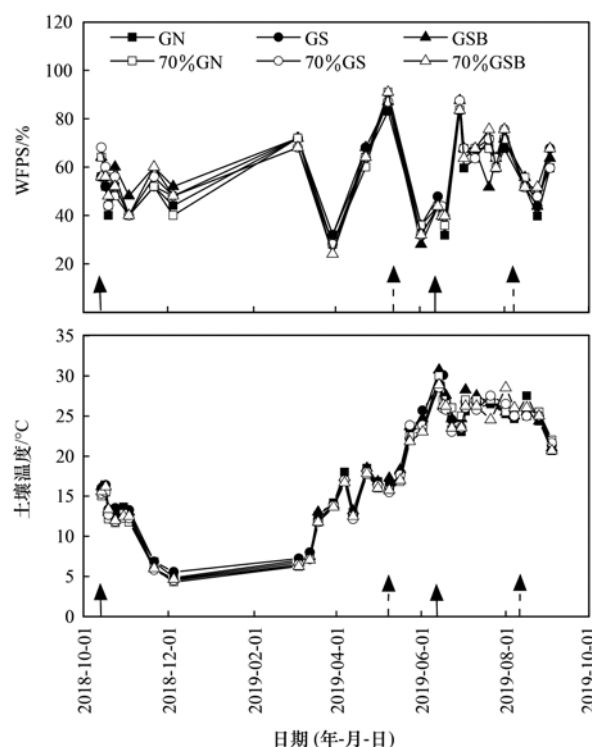


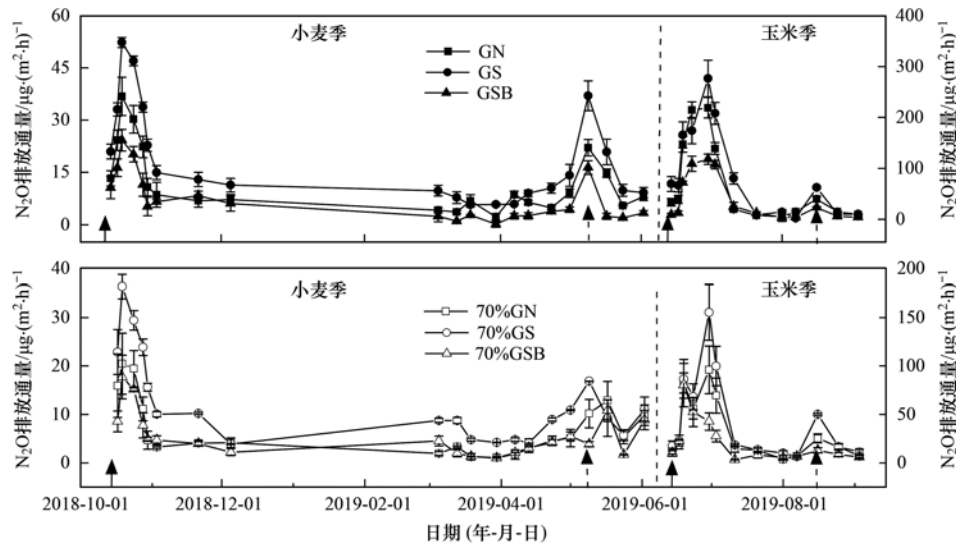
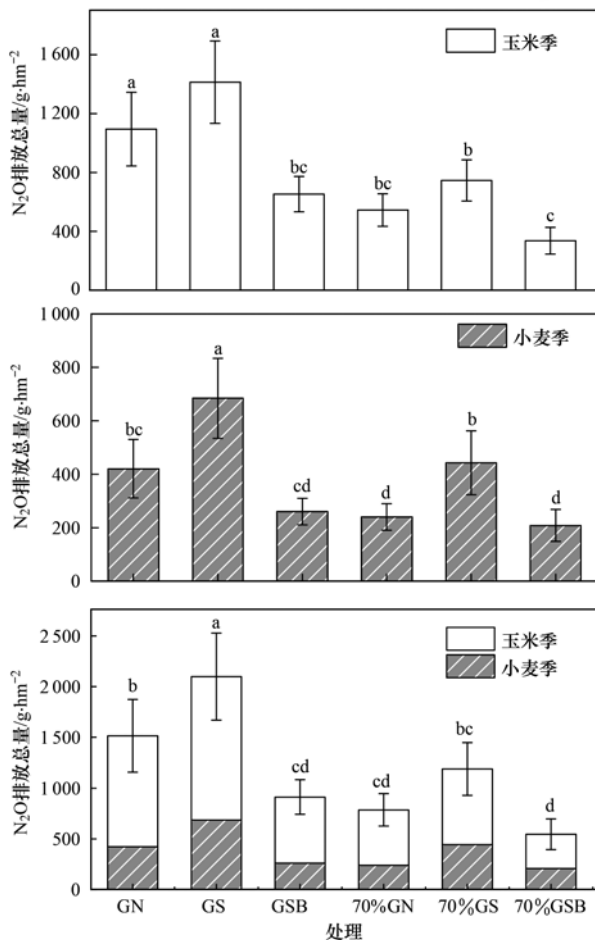
图3 不同处理10 cm土壤温度与0~10 cm土层孔隙充水率

Fig. 3 Soil temperatures at 10 cm and water-filled pore spaces at 0-10 cm in different treatments

排放量低, 但差异不显著 ($P > 0.05$). 玉米季, G 和 70%G 水平下, N_2O 排放总量分别在 $652.25 \sim 1414.59 g \cdot hm^{-2}$ 和 $335.99 \sim 745.6 g \cdot hm^{-2}$ 之间, S 比 N 处理排放量高, 但差异不显著 ($P > 0.05$), SB 较 N 处理分别降低了 N_2O 排放量 40% 和 38%, GSB 与 GN 之间呈现显著性差异 ($P < 0.05$). 在整个小麦、玉米轮作期间, G 和 70%G 水平下, N_2O 排放总量分别在 $912.34 \sim 2098.77 g \cdot hm^{-2}$ 和 $544.58 \sim 1188.89 g \cdot hm^{-2}$ 之间, S 比 N 处理排放量分别增加了 38% 和 51%, SB 较 N 处理 N_2O 排放量分别降低了 40% 和 31%.

2.4 作物产量和 N_2O 排放强度

小麦、玉米和整个轮作期作物产量对各施肥处理的响应呈现相同的趋势 (表 3), 大小顺序为 $GSB > GS > 70\%GSB > 70\%GS > GN > 70\%GN$, 秸秆还田方式对作物产量影响显著 ($P < 0.05$). 小麦季, G 水平下, N 处理产量最低, 为 $(5.23 \pm 0.33) t \cdot hm^{-2}$, S、SB 处理较 N 处理分别显著增产 14% 和 18% ($P < 0.05$); 70%G 水平下, N 处理产量最低, 仅为 $(4.52 \pm 0.22) t \cdot hm^{-2}$, S 和 SB 处理较 N 处理分别显著增产 18% 和 28% ($P < 0.05$). 不同秸秆还田方式 (N、S 和 SB), 70%G 较 G 水平分别减产 14% ($P < 0.05$)、10% ($P < 0.05$) 和 6% ($P > 0.05$). 玉米季, G 水平下, N 处理产量最低, 为 $(8.3 \pm 0.37) t \cdot hm^{-2}$, S 和 SB 处理较 N 处理分

图4 不同处理 N_2O 排放通量年季动态变化Fig. 4 Dynamic annual and seasonal changes of N_2O emissions fluxes in different treatments

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),

图中数据为平均值 $\pm$ 标准差

图5 不同处理 N_2O 排放总量Fig. 5 Total N_2O emissions in different treatments

别显著增产 7% 和 10% ($P < 0.05$); 70% G 水平下, N 处理产量最低, 为 $(7.83 \pm 0.3) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, S 和 SB 处理较 N 处理分别增产 8% 和 13% ($P <$

0.05)。不同秸秆还田方式 (N、S 和 SB), 70% G 较 G 水平分别减产 6%、5% 和 4%, 差异均不显著 ($P > 0.05$)。

N_2O 排放强度均表现为 70% GSB 处理最低, GS 处理最高 (表 3)。小麦季, G 水平下, N_2O 排放强度在 $42.06 \sim 114.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, S 处理最高, SB 处理最低, N、S 和 SB 三者差异显著 ($P < 0.05$); 70% G 水平下, N_2O 排放强度在 $36.01 \sim 82.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, S 处理显著高于 N 和 SB 处理 ($P < 0.05$), 而 N 和 SB 差异不显著 ($P > 0.05$), 该水平 N 和 S 处理的 N_2O 排放强度显著低于 G 水平 ($P < 0.05$)。玉米季, G 和 70% G 水平, N_2O 排放强度分别在 $71.04 \sim 157.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $37.88 \sim 88.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 同等施氮水平, SB 处理显著低于 N 和 S 处理 ($P < 0.05$), N 和 S 间差异不显著 ($P > 0.05$), 且 70% G 水平 N、S 和 SB 处理下的 N_2O 排放强度显著低于 G 水平 ($P < 0.05$)。

2.5 N_2O 排放和土壤环境因素的显著性关系

如表 4 所示, 全年尺度下 N_2O 排放通量和土壤温度呈现显著正相关 (GS 处理除外), 其中 GSB 处理达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在小麦季, GN、70% GN 和 70% GS 处理下的 N_2O 排放通量与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), GS 和 70% GSB 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 玉米季 70% GS 和 70% GSB 除外, 其他处理 N_2O 排放通量与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 全年尺度下, GN、GS 和 GSB N_2O 排放通量与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 70% GN 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。而 N_2O 排放通量和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量及 WFPS 均无显著相关性。

表 3 不同处理下作物产量和N₂O排放强度¹⁾

Table 3 Crop yield and N₂O emissions intensity in different treatments

处理	产量/t·hm ⁻²			N ₂ O排放强度/mg·kg ⁻¹		
	小麦	玉米	全年	小麦	玉米	全年
GN	5.23 ± 0.33b	8.30 ± 0.37cd	13.53 ± 0.69bc	79.83b	131.09a	111.36b
GS	5.97 ± 0.25a	8.91 ± 0.30ab	14.88 ± 0.55a	114.1a	157.97a	140.47a
GSB	6.17 ± 0.15a	9.15 ± 0.29a	15.32 ± 0.44a	42.06c	71.04b	59.38cd
70% GN	4.52 ± 0.22c	7.83 ± 0.30d	12.35 ± 0.50c	52.98c	69.23b	63.28cd
70% GS	5.34 ± 0.26b	8.45 ± 0.28bc	13.79 ± 0.52b	82.31b	88.04b	85.83bc
70% GSB	5.77 ± 0.15a	8.83 ± 0.26abc	14.59 ± 0.41ab	36.01c	37.88c	37.14d

1) 同列数据后不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,表中数据为平均值 ± 标准差

表 4 N₂O通量与土壤环境因素的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between N₂O flux and soil environmental factors¹⁾

处理	作物	土壤温度	土壤孔隙充水率	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
GN	小麦	-0.046	0.074	0.423	0.861 **
	玉米	-0.247	0.151	0.124	0.905 **
	全年	0.357 *	0.150	0.062	0.568 **
GS	小麦	0.060	0.213	0.529	0.693 *
	玉米	-0.045	0.243	0.312	0.915 **
	全年	0.438	0.248	0.278	0.562 **
GSB	小麦	-0.130	0.322	0.050	0.586 *
	玉米	0.089	0.425	0.494	0.791 **
	全年	0.397 **	0.313	-0.256	0.712 **
70% GN	小麦	0.169	0.029	-0.014	0.800 **
	玉米	-0.008	0.069	-0.303	0.881 **
	全年	0.484 *	0.106	-0.034	0.535 *
70% GS	小麦	-0.075	0.155	-0.048	0.867 **
	玉米	-0.265	0.324	-0.024	0.226
	全年	0.354 *	0.265	-0.048	0.237
70% GSB	小麦	0.059	-0.058	-0.052	0.863 *
	玉米	-0.117	-0.313	-0.252	0.484
	全年	0.368 *	-0.107	-0.100	0.411

1) * 和 ** 分别表示显著相关($P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 土壤环境因素对N₂O排放的影响

农田土壤的硝化反硝化作用是产生N₂O的主要途径^[16],因此土壤中无机氮含量跟N₂O排放关系密切. 本试验结果显示,N₂O通量跟土壤NH₄⁺-N含量具有明显的正相关关系,而跟NO₃⁻-N含量并无显著性关系. 原因可能是该地区土壤呈碱性,N₂O还原酶 Nos 活性较强而硝酸还原酶 Nar 以及亚硝酸还原酶 Nir 活性较弱,不利于反硝化作用生成N₂O^[17],因此导致N₂O通量跟NO₃⁻-N含量相关性较弱. 土壤水热状况也是影响农田N₂O排放的主要因素之一. 有研究表明,N₂O排放通量与土壤温度呈正相关,当土壤温度达到5℃以上时,硝化和反硝化微生物发挥生物活性而开始产生N₂O,且在25~35℃时达到最大排放通量^[18]. 本研究中,全年尺度上N₂O排放通量和土壤温度呈现显著正相关(GS处理除外),其

中GSB处理达到极显著水平($P < 0.01$),充分显示了土壤温度对N₂O排放的影响. 土壤水分状况主要通过影响土壤通气状况、土壤氧化还原状态以及土壤中微生物活性来影响N₂O排放^[19]. 有研究表明,N₂O通量与土壤WFPS呈显著正相关^[20, 21],但在本次试验中,这两者并无显著相关关系,可能的原因是,在小麦和玉米播种后的5d内,土壤WFPS呈连续下降趋势(图3),降幅为14%~35%和18%~28%,但各处理N₂O排放通量由于施肥的影响在此期间持续上升,施肥对N₂O排放的影响掩盖了土壤WFPS的效应,因此导致了以上结果. 但本次数据显示,在两次降雨后N₂O排放通量均出现了峰值,说明WFPS对N₂O排放的影响较大,同时玉米季各个处理N₂O排放总量比小麦季高,占年排放总量的62%~72%,这是由于玉米季雨热同期(图1),土壤平均温度为25.16℃,达到N₂O排放的最适温度,且各处理土壤平均WFPS在56%~60%之间,水分充足,更有利于N₂O的排放.

3.2 氮肥和秸秆还田方式对 N_2O 排放的影响

减少施氮量是降低土壤 N_2O 排放的最直接和有效的措施^[22]。有研究发现,氮肥水平存在一个阈值,高于或者低于此水平 N_2O 排放量均会降低^[23],此种情况在于底物浓度(土壤中矿质态氮)是否是硝化和反硝化作用的限制因素^[24]。本试验结果显示,N、S和SB这3种秸秆还田方式在70%G水平的 N_2O 年排放量比G水平分别减少48%、43%和40%,其中N和S处理减排显著($P < 0.05$),且70%G水平的 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量比G水平低8%~30%和11%~28%,说明在70%G~G范围内,矿质态氮是硝化和反硝化作用的限制因素,减少30%施氮量降低了土壤氮素供应,从而减少 N_2O 排放。

在同等施氮水平下, N_2O 排放总量表现为秸秆还田处理(S)高于单施氮肥处理(N),秸秆还田+生物炭处理(SB)低于单施氮肥处理(N)。目前关于秸秆还田影响土壤 N_2O 排放的研究结果不一致^[25,26]。秸秆还田对 N_2O 的增排效应主要是由于秸秆分解过程中产生的土壤无机氮和水溶性有机碳含量,为硝化反硝化作用提供充足底物的同时,增强氧气的消耗,形成厌氧环境从而促进反硝化作用及 N_2O 排放^[27]。本研究发现,在同等氮水平,S处理下的 NH_4^+ -N和WFPS均值都高于其他处理, NO_3^- -N含量也处于较高水平,这为 N_2O 排放提供了有利条件,因此增加了 N_2O 排放量。多数研究表明,施用生物炭可降低农田 N_2O 排放量^[28~30]。在秸秆还田的基础上添加生物炭,一方面可增加土壤C/N,固定土壤中氮素,另一方面由于其疏松多孔的结构表面呈现电负性的特点可吸附 N_2O 和 NH_4^+ ,从而抑制 N_2O 排放^[31]。本试验发现,在秸秆还田的基础上添加生物炭, NH_4^+ -N含量平均值比单施秸秆降低了34%~35%,这与前人研究结果相似^[32],说明生物炭可能吸附了部分 NH_4^+ ,减弱硝化作用,因此抑制了 N_2O 排放。

3.3 氮肥和秸秆还田方式对产量和 N_2O 排放强度的影响

秸秆还田以及在秸秆还田的基础上添加生物炭可提高作物产量,且后者增产幅度更大。主要因为秸秆还田可改善土壤理化性质,提高作物水肥利用率,从而实现增产^[33],而秸秆+生物炭还田使秸秆在适宜的水热条件下快速腐解释放大量养分,改善了土壤养分状况,提高了微生物数量和活性,更有利于作物生长^[34]。有研究表明,对我国小麦、玉米农田而言,降低30%的施氮量对产量并无明显影响,且能减少10%~18%的 N_2O 排放^[23]。本结果显示在

玉米季,减30%施氮并没有造成显著减产,全年尺度下也仅S处理减产显著,基本符合上述结论,但 N_2O 年排放量减少了40%~48%,可能与该地区土壤质地、施肥方式和耕作措施等因素有关。 N_2O 排放强度整体表现为70%GSB处理最低,GS处理最高,且玉米季70%G处理下的 N_2O 排放强度显著低于所有处理。综合考虑,对于整个麦玉轮作体系而言,氮肥减量70%配合秸秆还田+生物炭的投入,能在保证作物高产的前提下减少 N_2O 的排放。本试验周期较短,生物炭也只有一个水平($8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),而生物炭在土壤中可长期存在,因此要想了解其不同梯度对 N_2O 排放和产量的影响以及长期的累积效应,还有待进一步研究。

4 结论

(1) N_2O 通量和土壤温度、 NH_4^+ -N含量呈现显著正相关。

(2) 两种施氮水平下,S处理可增加土壤无机氮含量和 N_2O 排放,SB处理可降低土壤 NH_4^+ -N含量和 N_2O 排放,氮肥减量可减少土壤无机氮含量和 N_2O 排放。

(3) 两种施氮水平下,S和SB处理均能显著增加作物产量,且后者增产效果更好,而氮肥减量30%对作物产量的影响不太明显。

(4) 70%GSB处理在保证作物高产的同时, N_2O 减排效果最好。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 95-123.
- [2] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975.
- [3] 王效科,李长生,欧阳志云. 温室气体排放与中国粮食生产[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 379-383.
- [4] Ladha K J, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects[J]. Advances in Agronomy, 2005, 87: 85-156.
- [5] 常艳丽,刘俊梅,李玉会,等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.
Chang Y L, Liu J M, Li Y H, et al. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(8): 51-61.

- [6] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [7] 孟军, 张伟明, 王绍斌, 等. 农林废弃物炭化还田技术的发展与前景[J]. *沈阳农业大学学报*, 2011, **42**(4): 387-392.
Meng J, Zhang W M, Wang S B, *et al.* Development and prospect of carbonization and returning technology of agro-forestry residue[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011, **42**(4): 387-392.
- [8] 闫翠萍, 裴雪霞, 王姣爱, 等. 秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(2): 271-275.
Yan C P, Pei X X, Wang J A, *et al.* Effect of corn straw returned to soil and N application on growth, water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(2): 271-275.
- [9] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, **12**(6): 840-844.
Wang G L, Hao M D, Chen D L. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, **12**(6): 840-844.
- [10] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. *环境化学*, 2012, **31**(4): 407-414.
- [11] Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, **333**(1-2): 117-128.
- [12] Saarnio S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly affects N_2O emissions via soil moisture and plant N uptake[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 99-106.
- [13] Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, *et al.* Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated black chernozem [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(8): 941-946.
- [14] 韩自强, 宋贺, 夏炎, 等. 秸秆还田下生物炭和硫酸铵对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, **47**(2): 135-143.
Han Z Q, Song H, Xia Y, *et al.* Effects of biochar and ammonium sulfate on N_2O and CH_4 emissions from paddy soil with straw returning application [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, **47**(2): 135-143.
- [15] 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.
- [16] Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and denitrification: a review [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(1), doi: 10. 1029/2004GB002282.
- [17] Richardson D, Felgate H, Watmough N, *et al.* Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key? [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, **27**(7): 388-397.
- [18] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(6): 1844-1855.
- [19] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 792-800.
- Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, *et al.* Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 792-800.
- [20] 谭月臣, 诸葛玉平, 刘东雪, 等. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(7): 2638-2649.
Tan Y C, Zhuge Y P, Liu D X, *et al.* Effect of farmland management on N_2O and CH_4 emission from winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(7): 2638-2649.
- [21] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
Hao Y X, Liu J X, Yuan M X, *et al.* Effects of long-term organic amendments on soil N_2O emissions from winter wheat-maize cropping systems in the Guanzhong plain [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2586-2593.
- [22] 李昕, 孙文娟, 黄耀, 等. 中国小麦和玉米农田 N_2O 减排措施及潜力[J]. *气候变化研究进展*, 2017, **13**(3): 273-283.
Li X, Sun W J, Huang Y, *et al.* Options and potentials to mitigate N_2O emissions from wheat and maize fields in China [J]. *Climate Change Research*, 2017, **13**(3): 273-283.
- [23] 张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤 N_2O 排放及其影响因素的 Meta 分析[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(22): 1-6.
Zhang R, Zhao X, Pu C, *et al.* Meta-analysis on effects of residue retention on soil N_2O emissions and influence factors in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(22): 1-6.
- [24] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(21): 4381-4389.
Li Y Q, Tang J W, Che S G, *et al.* Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(21): 4381-4389.
- [25] Xu C, Han X, Ru S H, *et al.* Crop straw incorporation interacts with N fertilizer on N_2O emissions in an intensively cropped farmland [J]. *Geoderma*, 2019, **341**: 129-137.
- [26] 刘全全, 王俊, 付鑫, 等. 不同覆盖措施对黄土高原旱作农田 N_2O 通量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, **34**(3): 115-122, 178.
Liu Q Q, Wang J, Fu X, *et al.* Effects of different mulching measures on soil N_2O flux in rainfed winter wheat fields in the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, **34**(3): 115-122, 178.
- [27] 高焕平, 刘世亮, 赵颖, 等. 秸秆与氮肥调节 C/N 比对潮土 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放/吸收的影响[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(1): 157-164.
Gao H P, Liu S L, Zhao Y, *et al.* Effects of straw and nitrogen fertilizer on emission and absorption of CH_4 , CO_2 and N_2O in alluvial soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(1): 157-164.
- [28] Yao Y, Gao B, Zhang M, *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1467-1471.
- [29] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(5): 1095-1103.
Li L, Zhou Z Q, Pan X J, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous

- oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21** (5): 1095-1103.
- [30] 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 等. 生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38** (12): 5333-5343.
- Shi Y L, Liu X R, Gao P L, *et al.* Effects of biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil N_2O emission in the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 5333-5343.
- [31] Nelissen V, Rütting 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.
- [32] 兰宇, 孟军, 杨旭, 等. 秸秆不同还田方式对棕壤 N_2O 排放和土壤理化性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, **34** (3): 790-796.
- Lan Y, Meng J, Yang X, *et al.* Effects of different straw incorporation ways on N_2O emission and soil physicochemical properties of brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34** (3): 790-796.
- [33] Zhang Z C, Liu L J, Wang Z Q, *et al.* Effect of direct-seeding with non-flooding and wheat residue returning patterns on greenhouse gas emission from rice paddy [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, **16** (1): 16-21.
- [34] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38** (7): 2988-2999.
- Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-Maize rotation systems[J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (7): 2988-2999.



CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)