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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第12期 2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

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.hjkx.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, 100 a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的重要排放源[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排放较高的重要原因[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N_2O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N_2O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N_2O排放[9]. 也有研究显示秸秆还田可抑制N_2O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N_2O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 NH_4^+ 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N_2O排放[12, 13]. 但生物炭对N_2O排放的影响仍存在争议[14, 15],且秸秆还田下添加生物炭对N_2O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N_2O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℃. 试验地土壤为塿土. 试验开始于 2018 年 6 月,N_2O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

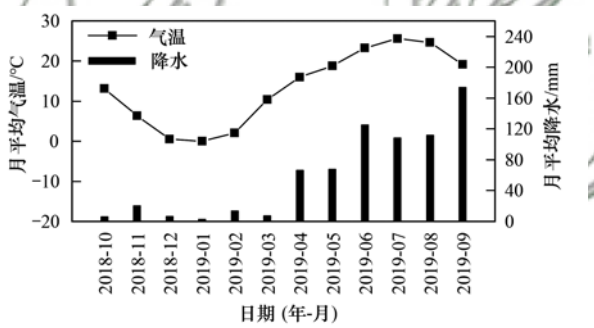


图 1　月平均气温和降水量的变化情况

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 m^2,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_2O_5)	硫酸钾(K_2O)	尿素(N)	过磷酸钙(P_2O_5)	硫酸钾(K_2O)
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　N_2O排放的测定

N_2O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 $mL \cdot min^{-1}$.

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 处埋置 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 $mol \cdot L^{-1}$ 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[$\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; ρ 为温室气体在标准状态下的密度(1.964 $kg \cdot m^{-3}$); 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(℃).

式(2)为土壤充水孔隙度(WFPS)计算公式:

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

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

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 ~ 58.5 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 0.77 ~ 50 $mg \cdot kg^{-1}$; 70% 施氮(70% G)水平下NO_3^--N和NH_4^+-N含量分别在 2.18 ~ 38.09 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 1 ~ 37.37 $mg \cdot kg^{-1}$之间,平均值较 G 水平分别降低了 8% ~ 30% 和 11% ~ 28%.

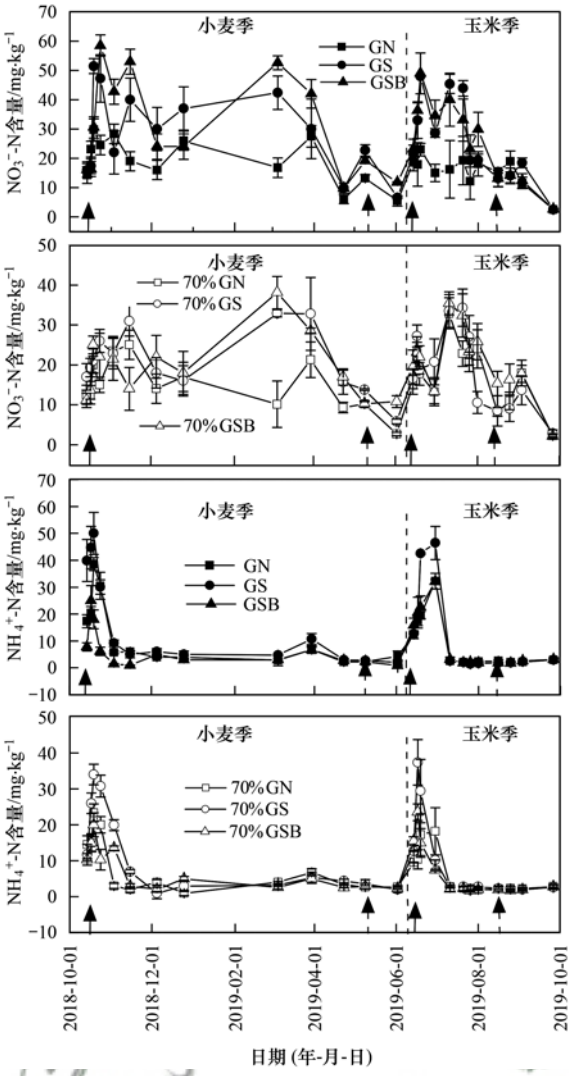
小麦和玉米轮作期间,各处理土壤温度和 WFPS 均无显著性差异($P > 0.05$,图 3). 降水对 WFPS 影响较大,全年尺度下,WFPS 呈现锯齿形波动,变化范围为 24% ~ 91%,不同处理 WFPS 平均值大小顺序为 GS > 70%GS > GSB > 70%GSB > 70% GN > GN,小麦季和玉米季平均 WFPS 分别为 53% 和 58%. 土壤温度变化范围为 4.33 ~ 30.73℃,整体表现为先下降后上升再下降趋势,小麦季和玉米季土壤平均温度分别为 13.91℃和 25.67℃.

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

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



实线箭头代表施肥,虚线箭头代表降水,下同

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

μg·(m^2·h)$^{-1}$. 70% G 条件下,N_2O排放通量变化幅度为 3.42 ~ 155.22 μg·(m^2·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 μg·(m^2·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 ~ 684.18 g·hm^{-2} 和 208.59 ~ 442.91 g·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 ~ 1 414.59 g·hm^{-2} 和 335.99 ~ 745.6 g·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 ~ 2 098.77 g·hm^{-2} 和 544.58 ~ 1 188.89 g·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%.

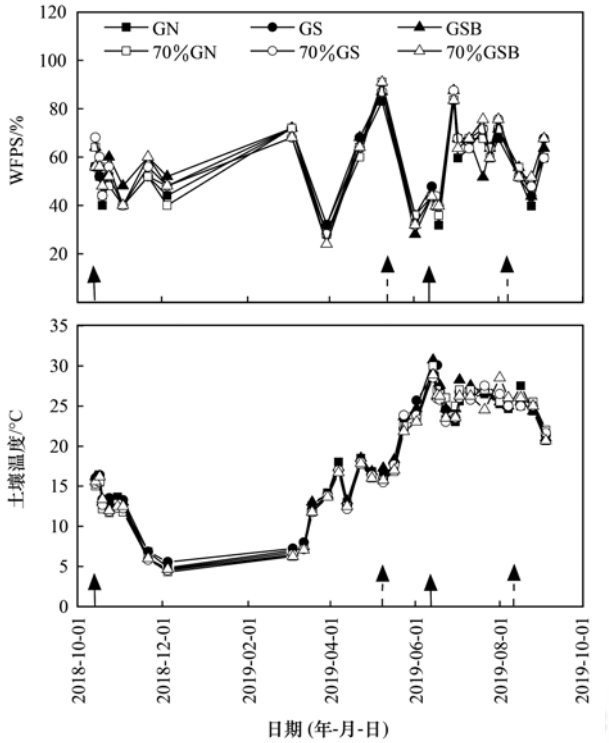


图 3　不同处理 10 cm 土壤温度与 0 ~ 10 cm 土层孔隙充水率

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

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 ± 0.33)t·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 ± 0.22)t·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 ± 0.37)t·hm^{-2}, S 和 SB 处理较 N 处理分

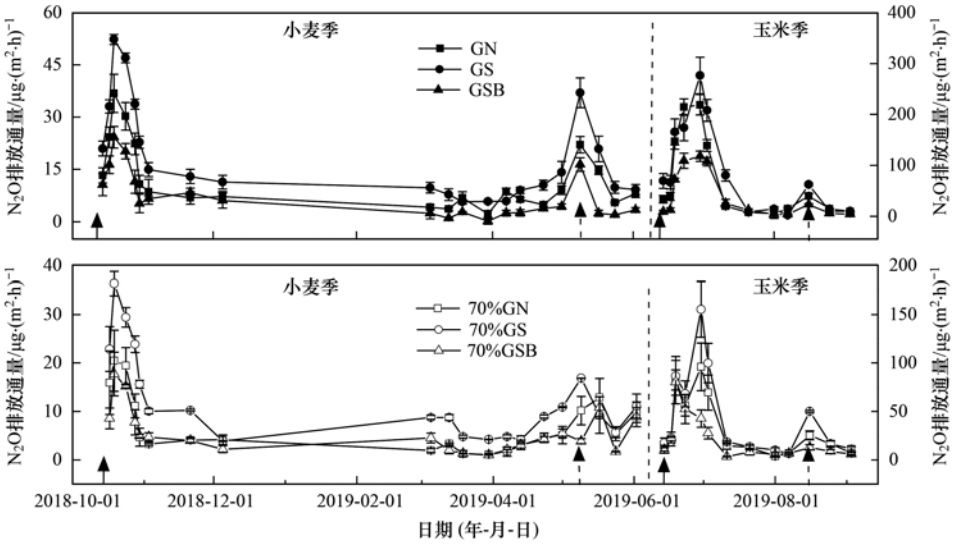
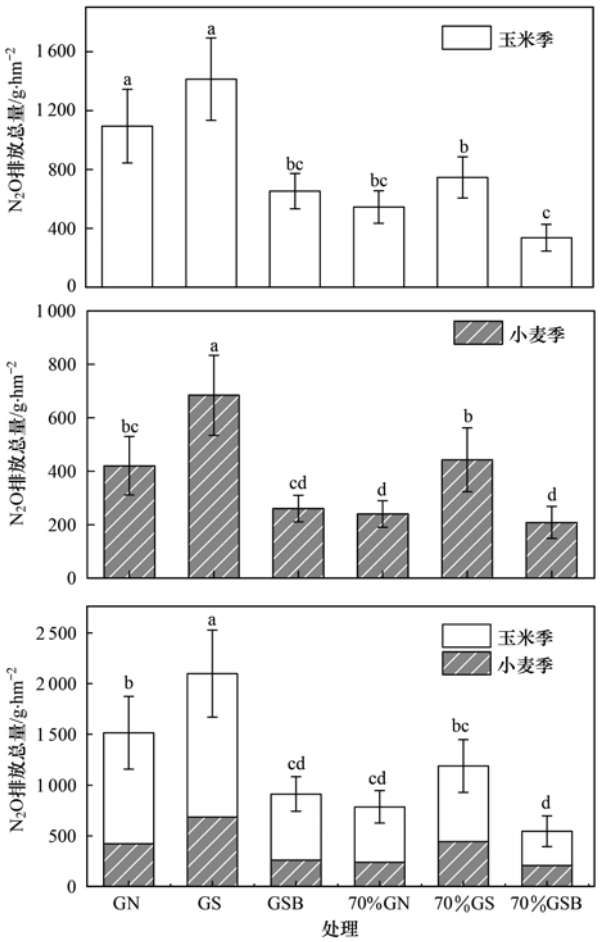


图 4 不同处理N_2O排放通量年季动态变化

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±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±0.3)$t\cdot hm^{-2}$,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 42.06~114.1 $mg\cdot kg^{-1}$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 36.01~82.31 $mg\cdot kg^{-1}$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 71.04~157.97 $mg\cdot kg^{-1}$和 37.88~88.04 $mg\cdot kg^{-1}$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NH_4^+-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NH_4^+-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NH_4^+-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NO_3^--N 含量及 WFPS 均无显著相关性.

表 3　不同处理下作物产量和N_2O排放强度[1)]

Table 3　Crop yield and N_2O emissions intensity in different treatments

处理	产量/t·hm^{-2}			N_2O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　N_2O通量与土壤环境因素的相关性[1)]

Table 4　Correlations between N_2O flux and soil environmental factors[1)]

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N_2O排放的影响

农田土壤的硝化反硝化作用是产生N_2O的主要途径[16]，因此土壤中无机氮含量跟N_2O排放关系密切. 本试验结果显示，N_2O通量跟土壤NH_4^+-N含量具有明显的正相关关系，而跟NO_3^--N含量并无显著性关系. 原因可能是该地区土壤呈碱性，N_2O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N_2O[17]，因此导致N_2O通量跟NO_3^--N含量相关性较弱. 土壤水热状况也是影响农田N_2O排放的主要因素之一. 有研究表明，N_2O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N_2O，且在 25 ~ 35℃ 时达到最大排放通量[18]. 本研究中，全年尺度上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($P<0.01$)，充分显示了土壤温度对N_2O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N_2O排放[19]. 有研究表明，N_2O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N_2O排放通量由于施肥的影响在此期间持续上升，施肥对N_2O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N_2O排放通量均出现了峰值，说明 WFPS 对N_2O排放的影响较大，同时玉米季各个处理N_2O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N_2O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N_2O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($8\ t\cdot hm^{-2}$),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,氮肥减量能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.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2020

CONTENTS