

网络出版时间:2024-07-08 11:42 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.01.004
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240704.1807.024

氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤氧化亚氮排放及活性氮组分的影响

张志浩,黄禹铭,白雨欣,彭豪,黄超龙,郝潇逸,任广鑫

(西北农林科技大学 农学院,陕西 杨陵 712100)

【摘要】【目的】研究氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤氧化亚氮(N_2O)排放及活性氮组分的影响,以期为关中地区合理高效种植制度优化提供一定的理论支持。【方法】于 2020—2022 年,在陕西省关中地区进行大田定位试验,试验设置施氮量和秸秆还田方式 2 个因素,其中施氮量包括传统施氮(N_1)和减量施氮($N_{0.7}$) 2 个水平,秸秆还田方式包括秸秆不还田(S_0)和秸秆还田(S) 2 个水平,采用随机区组设计,共计 4 个处理,分别为传统施氮+秸秆还田(N_1S)、减量施氮+秸秆还田($N_{0.7}S$)、传统施氮+秸秆不还田(N_1S_0)和减量施氮+秸秆不还田($N_{0.7}S_0$),测定不同处理的土壤 N_2O 排放通量、土壤活性氮组分(硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、无机氮(IN)、有机氮(DON)、微生物生物量氮(MBN))含量以及夏玉米产量和单位产量 N_2O 累积排放量,并分析了土壤 N_2O 排放通量与土壤活性氮组分的相关性。【结果】在同一施氮量处理下,与秸秆不还田(S_0)处理相比,秸秆还田处理(S)增加了土壤 N_2O 累积排放量、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN、DON、MBN 含量以及夏玉米产量和单位产量 N_2O 累积排放量;在同一秸秆还田方式下,与传统施氮(N_1)处理相比,减量施氮($N_{0.7}$)处理降低了土壤 N_2O 累积排放量、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN、DON、MBN 含量以及夏玉米产量和单位产量 N_2O 累积排放量。与 N_1S_0 处理相比, N_1S 和 $N_{0.7}S$ 处理显著增加了夏玉米产量和 N_2O 累积排放量, $N_{0.7}S_0$ 处理显著降低了夏玉米产量和 N_2O 累积排放量。相关性分析结果显示,土壤 N_2O 排放通量与土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN、DON 和 MBN 含量存在极显著正相关关系。【结论】与传统施氮+秸秆不还田处理比较,传统施氮+秸秆还田处理和减量施氮+秸秆还田具有明显的增产效应,减量施氮+秸秆不还田处理可显著降低 N_2O 排放。

【关键词】 夏玉米;减量施氮;秸秆还田; N_2O 排放

【中图分类号】 S513

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)01-0033-12

Effects of nitrogen fertilizer and straw return on nitrous oxide emission and soil reactive nitrogen fractions in summer maize field

ZHANG Zhihao, HUANG Yuming, BAI Yuxin, PENG Hao, HUANG Chaolong,
HAO Xiaoyi, REN Guangxin

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of nitrogen fertilizer and straw return on nitrous oxide (N_2O) emission and reactive nitrogen fractions in summer maize farmland soils to provide support for establishing a rational and efficient cropping system in Guanzhong, Shaanxi. 【Method】 The field locating experiment was conducted in Guanzhong, Shaanxi from 2020 to 2022. The trial was set up with two factors of nitrogen application and straw return method. Nitrogen applications included two levels of

【收稿日期】 2023-11-01

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31971859);陕西省循环农业工程技术研究中心项目(2019HBGC-13)

【作者简介】 张志浩(1999—),男,山西运城人,硕士,主要从事作物资源高效利用研究。E-mail:2021050024@nwfufu.edu.cn

【通信作者】 任广鑫(1969—),男,甘肃庆阳人,副教授,博士,主要从事植物资源高效利用与农业生态、农业区域发展及规划研究。E-mail:rengx@nwsuaf.edu.cn

traditional nitrogen application (N_1) and reduced nitrogen application ($N_{0.7}$), and straw return methods included two levels of straw not returned to field (S_0) and straw returned to field (S) in a randomized block group design. A total of four treatments including traditional nitrogen application+straw returned to field (N_1S), reduced nitrogen application+straw returned to field ($N_{0.7}S$), traditional nitrogen application+straw not returned to field (N_1S_0) and reduced nitrogen application+straw not returned to field ($N_{0.7}S_0$) were used to determine soil N_2O emission fluxes, soil reactive nitrogen fractions of nitrate nitrogen ($NO_3^- -N$), ammonium nitrogen ($NH_4^+ -N$), inorganic nitrogen (IN), dissolved organic nitrogen (DON) and microbial biomass nitrogen (MBN), summer maize yield and cumulative N_2O emission per unit of yield. Correlations between soil N_2O emission flux and soil reactive nitrogen fractions were also analyzed. **【Result】** With same nitrogen levels, straw-returned treatments (S) increased soil N_2O cumulative emissions, contents of $NO_3^- -N$, $NH_4^+ -N$, IN, DON and MBN, summer maize yield and N_2O cumulative emissions per unit of yield, in comparison to straw-not-returned treatments (S_0). With same straw-returned methods, reduced N application treatment ($N_{0.7}$) reduced soil N_2O cumulative emissions, contents of $NO_3^- -N$, $NH_4^+ -N$, IN, DON and MBN, summer maize yield and cumulative N_2O emissions per unit of yield, in comparison to conventional N application treatments (N_1). Compared with the N_1S_0 treatment, the N_1S and $N_{0.7}S$ treatments significantly increased summer maize yield and N_2O cumulative emissions, and the $N_{0.7}S_0$ treatment significantly decreased summer maize yield and N_2O cumulative emissions. There were highly significant positive correlations between soil N_2O emission fluxes and contents of soil $NO_3^- -N$, $NH_4^+ -N$, IN, DON and MBN. **【Conclusion】** Compared with the traditional nitrogen application+straw not returned to the field treatment, the traditional nitrogen application+straw returned to the field treatment and the reduced nitrogen application+straw returned to the field treatment had apparent yield increase effects, and the reduced nitrogen application+straw not returned to the field treatment significantly reduced N_2O emission.

Key words: summer maize; nitrogen reduction; straw return; N_2O emission

随着社会经济的发展和科技的进步,人类活动对全球气候的影响日益显著。全球变暖已成为不容忽视的事实。在大气温室气体中,虽然氧化亚氮(N_2O)含量相对较低,但其增温潜势却远高于二氧化碳(CO_2)^[1]。而农田生态系统是大气 N_2O 的重要来源之一^[2]。因为在农业生产中,为了追求高产,人们通常会施用大量的氮肥,然而过量的氮素通过硝化、反硝化过程转化为 N_2O 并释放到大气中^[3]。此外,过量施用氮肥不仅会影响作物产量,降低经济效益,而且还会加剧土壤肥力退化、硝酸盐淋失等^[4-5]。关中地区作为陕西省的主要农业区,过量施用氮肥的现象较为普遍^[6]。农作物秸秆是一种宝贵的资源,通过秸秆还田可以有效减少氮肥的施用量,提高土壤的养分含量,降低农田生态系统中氮素损失^[7-9]。据统计,陕西省超过 2/3 的秸秆分布在关中地区^[10],然而目前农户对作物秸秆的处理方法较为单一,导致资源浪费。因此,本研究探究在关中地区小麦复种玉米种植模式中,氮肥和秸秆还田对夏玉米生育期农田土壤 N_2O 排放以及活性氮组分的影响,并结合夏玉米产量进行综合评价,以期在提高作

物秸秆利用效率的基础上,为关中地区制定高效种植制度提供一定的理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在西北农林科技大学曹新庄试验农场进行,该地位于关中平原中部,为大陆性季风型气候。年均气温为 12.9 °C,日照时数 2 163.8 h,平均降雨量 660 mm,蒸发量 993 mm,无霜期 211 d。当地种植模式为小麦复种玉米的一年两熟型。试验地土壤为塿土,土壤基础理化性质为:有机碳 7.8 g/kg,全氮 1.4 g/kg,全磷 0.5 g/kg,速效磷 9.9 mg/kg,速效钾 143.4 mg/kg,碱解氮 28.5 mg/kg。

1.2 供试材料

供试夏玉米品种为郑单 958,供试冬小麦品种为晋麦 47,均从陕西杨凌种子商行购买。

尿素($N \geq 46\%$),陕西渭河重化工有限责任公司生产;过磷酸钙($P_2O_5 \geq 16\%$),云南安宁兴亚磷化工有限责任公司生产;硫酸钾($K_2O \geq 51.2$),国投新疆罗布泊钾盐有限公司生产。

1.3 试验设计

采用大田定位试验,设置施氮量和秸秆还田方式 2 个因素,其中施氮量包括传统施氮(N_1)和减量施氮($N_{0.7}$)2 个水平,秸秆还田方式包括秸秆不还田(S_0)和秸秆还田(S)2 个水平,采用随机区组设计,共计 4 个处理,分别为传统施氮+秸秆不还田(N_1S_0)、传统施氮+秸秆还田(N_1S)、减量施氮+秸秆还田($N_{0.7}S$)和减量施氮+秸秆不还田($N_{0.7}S_0$),其中 N_1S_0 为传统栽培处理。每个处理 3 次重复,小区面积 36 m^2 。S 处理方法为:前茬作物收获后,用秸秆切碎还田机 JQ-200 将所有秸秆粉碎灭茬旋耕还田; S_0 处理方法为:前茬作物收获后,移除地上秸秆后进行旋耕。夏玉米季, N_1 处理中的施 N 量为 225 kg/hm^2 ; $N_{0.7}$ 处理中施 N 量为 N_1 处理施 N 量的 70%,即 157.5 kg/hm^2 ,所有处理的 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 140 和 120 kg/hm^2 ,3 种肥料分别采用尿素、过磷酸钙和硫酸钾,全部以基肥一次施入。冬小麦季, N_1 处理中的施 N 量为 180 kg/hm^2 ; $N_{0.7}$ 处理中施 N 量为 N_1 处理施 N 量的 70%,即 126 kg/hm^2 ,所有处理的 P_2O_5 施用量为 90 kg/hm^2 ,肥料分别采用尿素和过磷酸钙,全部以基肥一次施入。

1.4 试验方法

冬小麦分别于 2020 和 2021 年 10 月中旬进行播种,行距 20 cm,播种量为 150 kg/hm^2 ,分别于 2021 和 2022 年 6 月初收获。夏玉米分别于 2021 和 2022 年 6 月中旬进行播种,行距 70 cm、株距 25 cm,播种量为 42 kg/hm^2 ,分别于 2021 和 2022 年 9 月底收获。试验期间灌溉和植保由农场统一进行,与当地大田生产一致。小麦秸秆和玉米秸秆还田量分别约为 5 000 和 8 000 kg/hm^2 。

1.5 测定项目与方法

1.5.1 土壤 N_2O 排放通量及累积排放量 采用静态暗箱-GC 气相色谱法^[11]测定 N_2O 排放通量。使用体积 125 L 的静态箱,包裹反光隔热材料,由三通阀控制取气开关。钢槽放置于小区正中心。气体采集时,将水注满钢槽,将气箱卡入钢槽,保证采样箱体的密闭性。气体采集于上午 09:00 开始,采集频率为秸秆还田后每 2~3 d 进行 1 次,采集 4 次后,每周进行 1 次气体采集,于 N_2O 排放稳定后减少采集频率。 N_2O 累积排放量的计算公式参考文献[12]进行。

1.5.2 土壤活性氮组分含量 分别在 2021 年和

2022 年夏玉米播种期—苗期(T1,秸秆还田后 0~7 d)、苗期—拔节期(T2,秸秆还田后 7~28 d)、拔节期—大喇叭口期(T3,秸秆还田后 28~42 d)、大喇叭口期—开花期(T4,秸秆还田后 42~70 d)和开花期—成熟期(T5,秸秆还田后 70 d 到玉米收获),在每个小区,以五点取样法采集 0~10 cm 土层土壤样品,混合后作为一个土样。用连续流动分析法测定土壤硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)含量,无机氮(inorganic nitrogen, IN)含量由 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量相加所得。采用氯化钾浸提法测定土壤可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)含量。采用氯仿熏蒸浸提法测定微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量。

1.5.3 土壤全氮含量 于夏玉米成熟期,以五点取样法采集 0~10 cm 土层土壤样品,混合后作为一个土样,采用半微量凯氏法测定土壤全氮(TN)含量。

1.5.4 夏玉米产量及单位产量 N_2O 累积排放量 在夏玉米成熟期,去除边际效应和中心静态箱的影响,在每个小区中随机收获 3 行×2 m 玉米,风干后脱粒用电子天平称质量,测定玉米产量。单位产量 N_2O 累积排放量= N_2O 累积排放量/产量。

1.6 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行相关指标数据的整理,Origin Pro2023b 进行数据可视化处理,SPSS Statistics19 进行数据相关性分析及 LSD 多重比较。

2 结果与分析

2.1 氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤 N_2O 排放的影响

图 1 显示,2021 年, N_1 条件下, N_2O 排放通量为 1.09~1 321.84 $\mu g/(m^2 \cdot h)$,S 和 S_0 处理的 N_2O 排放通量最大值分别为 1 321.84 和 879.32 $\mu g/(m^2 \cdot h)$; $N_{0.7}$ 条件下, N_2O 排放通量为 0.82~1 100.69 $\mu g/(m^2 \cdot h)$,S 和 S_0 处理 N_2O 排放通量最大值分别为 1 100.69,603.82 $\mu g/(m^2 \cdot h)$ 。

图 1 显示,2022 年,在 N_1 条件下, N_2O 排放通量为 3.47~1 529.81 $\mu g/(m^2 \cdot h)$,S 和 S_0 处理的 N_2O 排放通量最大值分别为 1 529.81 和 791.47 $\mu g/(m^2 \cdot h)$;在 $N_{0.7}$ 条件下, N_2O 排放通量为 3.16~1 125.36 $\mu g/(m^2 \cdot h)$,S 和 S_0 处理的 N_2O 排放通量最大值分别为 1 125.36,679.31 $\mu g/(m^2 \cdot h)$ 。

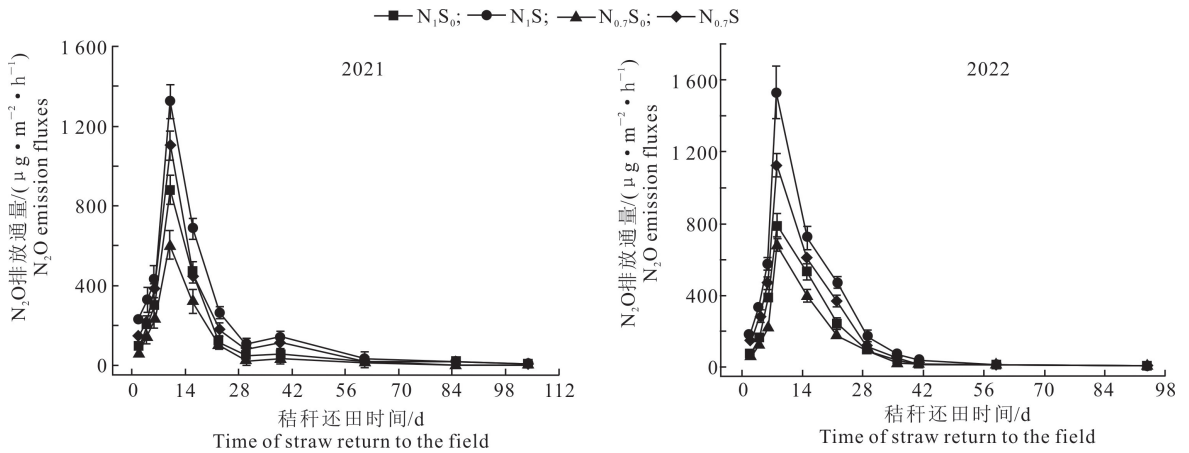


图 1 2021—2022 年氮肥和秸秆还田处理夏玉米土壤 N_2O 排放通量的动态变化

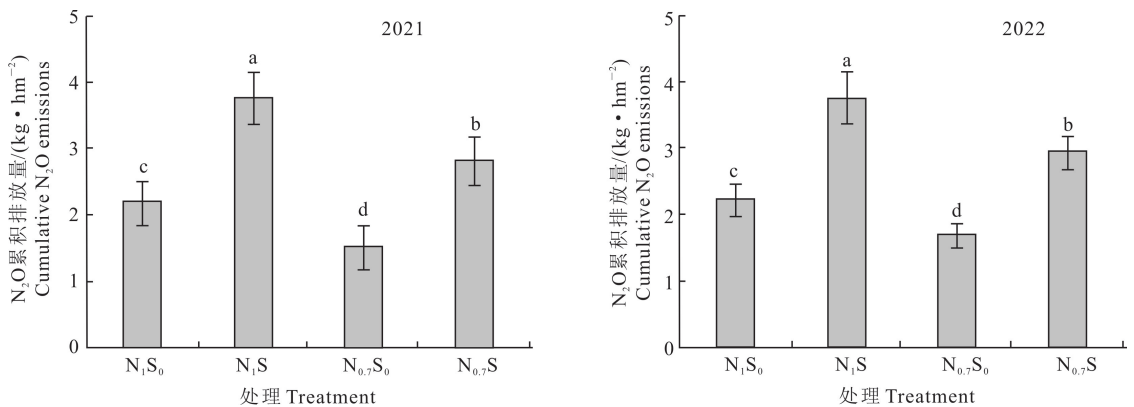
Fig. 1 Dynamics of nitrogen fertilizer and straw return on N_2O emission fluxes from summer maize soils in 2021—2022

2021—2022 年玉米生育期内不同处理土壤 N_2O 排放通量变化趋势基本一致,即 N_2O 排放通量在秸秆还田前期先快速上升,于秸秆还田后 8~10 d 达到高峰,之后开始下降,最终趋于平稳。在 N_2O 排放通量高峰时,不同处理 N_2O 排放通量由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ (图 1)。

2021 和 2022 年,在同一施氮量(N_1 和 $N_{0.7}$)处理下,与秸秆不还田(S_0)处理相比,秸秆还田(S)处

理增加了土壤 N_2O 累积排放量;在同一秸秆还田方式(S_0 和 S)下,与传统施氮(N_1)处理相比,减量施氮($N_{0.7}$)处理降低了土壤 N_2O 累积排放量。2021 和 2022 年,不同处理土壤 N_2O 累积排放量均表现为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ (图 2)。

表 1 显示,秸秆还田方式、施氮量对 N_2O 累积排放量均有极显著影响,但二者的交互作用对 N_2O 累积排放量无显著影响。



图柱上标不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 2 2021—2022 年氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤 N_2O 累积排放量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen fertilizer and straw return on N_2O cumulative emissions from summer maize soils in 2021—2022

2.2 氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤活性氮组分的影响

2.2.1 硝态氮($NO_3^- - N$) 从图 3 可以看出,两年夏玉米生育期内不同处理的土壤 $NO_3^- - N$ 含量为 5.04~57.25 mg/kg,且不同处理的 $NO_3^- - N$ 含量变化趋势基本一致,即随着生育期的延长均呈降低趋势;不同处理夏玉米全生育期土壤 $NO_3^- - N$ 含量平均值由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$,

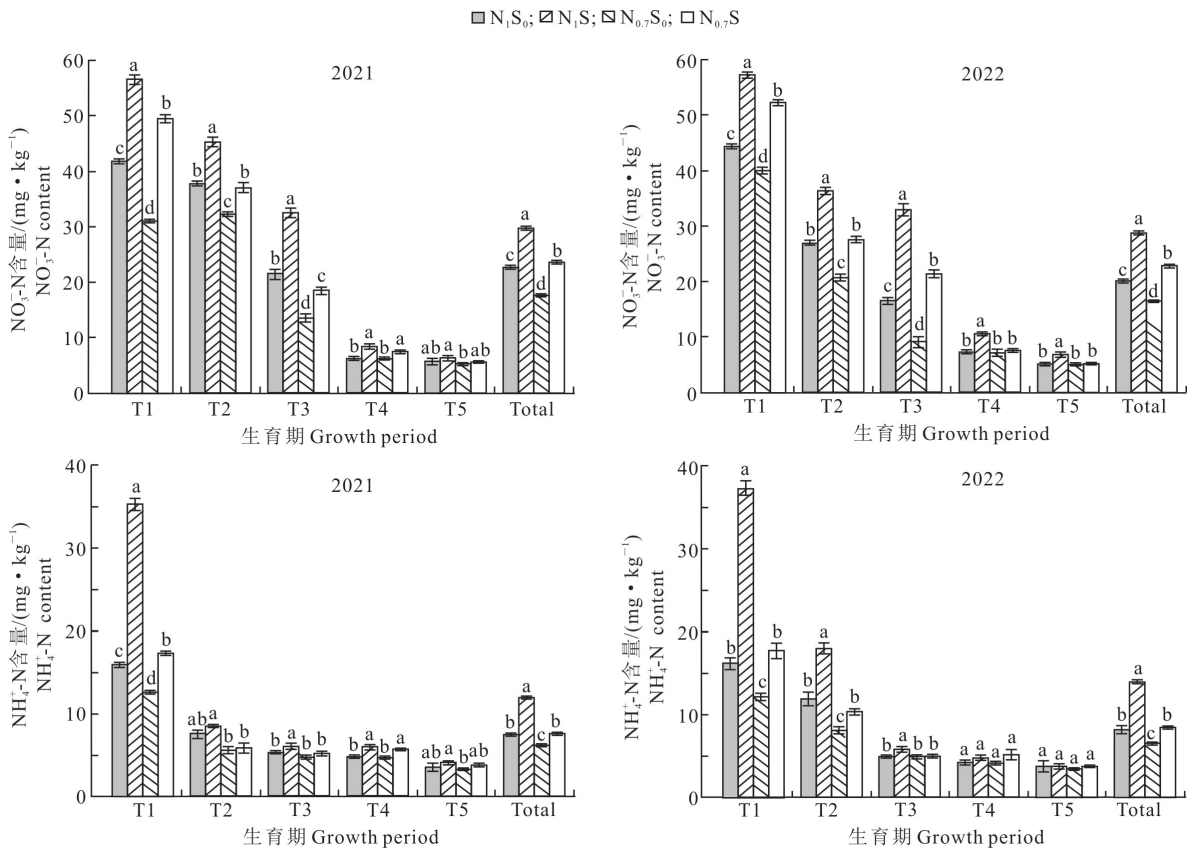
且 4 个处理之间差异显著。2021—2022 年,在夏玉米全生育期,在同一施氮量处理下,与 S_0 处理相比, S 处理的土壤 $NO_3^- - N$ 含量平均值显著提高;在同一秸秆还田方式下,与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理的土壤 $NO_3^- - N$ 含量平均值显著降低; $N_{0.7}S$ 处理土壤 $NO_3^- - N$ 含量平均值较 N_1S_0 处理显著提高了 4.20%~13.82%。

表 1 施氮量和秸秆还田方式及其二者交互作用对 N₂O 累积排放量、土壤氮及其组分含量和玉米产量的影响
Table 1 Effects of nitrogen application, straw return method and their interaction on N₂O cumulative emissions, soil nitrogen and its components and maize yield

因素 Factor	N ₂ O 累积 排放量 N ₂ O cumulative emissions	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen	微生物 生物量氮 Microbial biomass nitrogen	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen	全氮 Total nitrogen	产量 Yield	单位产量 N ₂ O 累积排放量 Unit Yield N ₂ O cumulative emissions
秸秆还田方式 Straw return method	**	**	**	**	**	**	**	**	**
施氮量 Nitrogen application	**	**	**	**	**	*	**	**	**
秸秆还田方式×施氮量 Straw return method× nitrogen application	NS	*	**	**	**	**	NS	NS	*

注: NS 代表影响不显著 ($P > 0.05$), * 表示有显著影响 ($P < 0.05$), ** 表示有极显著影响 ($P < 0.01$)。

Note: NS indicates non-significant effect ($P > 0.05$), * indicates significant effect ($P < 0.05$), and ** indicates highly significant effect ($P < 0.01$).



T1. 播种期—苗期; T2. 苗期—拔节期; T3. 拔节期—大喇叭口期; T4. 大喇叭口期—开花期; T5. 开花期—成熟期; Total. 全生育期。

图柱上标不同小写字母表示同一生育期不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

T1. Sowing stage—seedling stage; T2. Seedling stage—jointing stage T3. Jointing stage—big trumpet stage; T4. Big trumpet stage—flowering stage; T5. Flowering stage—maturity stage; Total. Summer maize whole fertility period. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at same growth period ($P < 0.05$). The same below.

图 3 2021—2022 年氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen fertilizer and straw return on nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents of summer maize soils in 2021—2022

2.2.2 铵态氮 (NH_4^+-N) 从图 3 可以看出, 两年夏玉米生育期内不同处理的土壤 NH_4^+-N 含量为 3.21~37.37 mg/kg, 且不同处理的 NH_4^+-N 含量

变化趋势基本一致, 即随着生育期的延长均呈降低趋势; 不同处理的夏玉米全生育期土壤 NH_4^+-N 含量平均值由大到小顺序为 $\text{N}_1\text{S} > \text{N}_{0.7}\text{S} > \text{N}_1\text{S}_0 >$

$N_{0.7}S_0$, 其中 N_1S 处理显著高于其他处理。2021—2022 年, 在夏玉米全生育期, 在同一施氮量处理下, 与 S_0 处理相比, S 处理的土壤 NH_4^+-N 含量平均值显著提高; 在同一秸秆还田方式下, 与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理的土壤 NH_4^+-N 含量平均值显著降低; $N_{0.7}S$ 处理土壤 NH_4^+-N 含量平均值较 N_1S_0 处理明显提高了 1.76%~2.33%。

2.2.3 无机氮(IN) 两年夏玉米生育期内不同处理的土壤 IN 含量变化趋势基本一致, 即随着生育

期的延长均呈降低趋势, 总体变化趋势与 $NO_3^- -N$ 类似; 不同处理的夏玉米全生育期土壤 IN 含量平均值由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$, 且 4 个处理之间差异显著(图 4)。

表 1 显示, 秸秆还田方式、施氮量均对土壤硝态氮、铵态氮和无机氮含量有极显著影响, 二者的交互作用对土壤硝态氮含量有显著影响, 对铵态氮和无机氮含量有极显著影响。

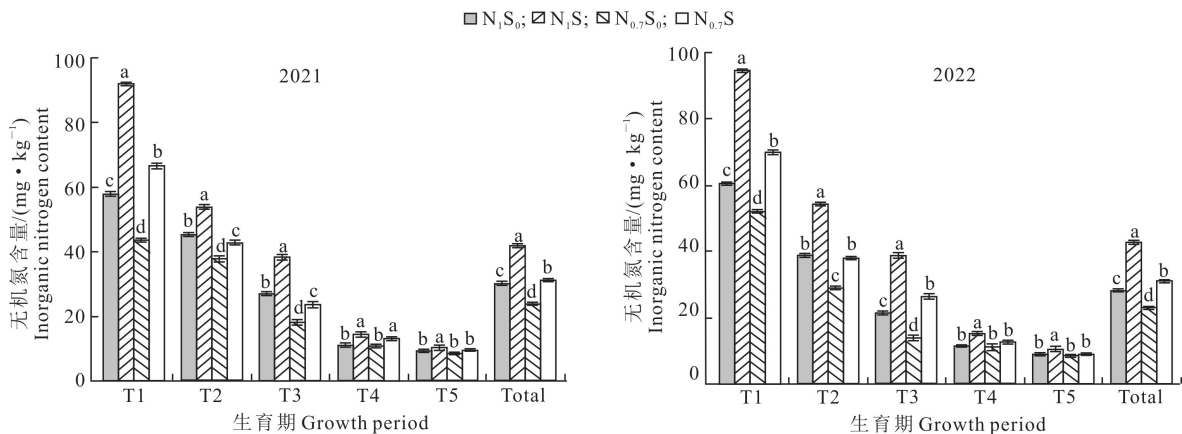


图 4 2021—2022 年氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤无机氮含量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer and straw return on inorganic nitrogen content of summer maize soils in 2021—2022

2.2.4 微生物生物量氮(MBN) 两年夏玉米生育期内不同处理的土壤 MBN 含量为 10.55~118.37 mg/kg, 且 4 个处理土壤 MBN 含量变化趋势基本一致, 即随生育期的推进呈逐渐下降趋势。不同处理夏玉米全生育期土壤 MBN 含量平均值由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ (图 5)。2021—2022 年, 在夏玉米全生育期, 在同一施氮量处理下, 与 S_0 处理相比, S 处理的土壤 MBN 含量平均值显著提高; 在同一秸秆还田方式下, 与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理的土壤 MBN 含量平均值显著降低; $N_{0.7}S$ 处理土壤 MBN 含量平均值较 N_1S_0 处理显著提高了 21.26%~22.93%。表 1 显示, 秸秆还田方式、施氮量及其二者交互作用对土壤 MBN 含量均有极显著影响。

2.2.5 可溶性有机氮(DON) 两年夏玉米生育期内不同处理的土壤 DON 含量为 8.49~37.16 mg/kg, 且 4 个处理土壤 DON 含量变化趋势基本一致, 即随着生育期的推进总体下降; 不同处理夏玉米全生育期土壤 DON 含量平均值由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$, 且处理之间差异显著(图 5)。2021—2022 年, 在夏玉米全生育期, 在同一

施氮量处理下, 与 S_0 处理相比, S 处理的土壤 DON 含量平均值显著提高; 在同一秸秆还田方式下, 与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理的土壤 DON 含量平均值显著降低; $N_{0.7}S$ 处理土壤 DON 含量平均值较 N_1S_0 处理显著提高了 9.46%~19.89%。表 1 显示, 秸秆还田方式及其与施氮量的交互作用对土壤 DON 含量有极显著影响, 施氮量对土壤 DON 含量有显著影响。

2.2.6 全氮(TN) 图 6 显示, 2021 年, 不同处理土壤 TN 含量由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$; 在 2022 年, 不同处理土壤 TN 含量由大到小顺序为 $N_1S > N_1S_0 > N_{0.7}S > N_{0.7}S_0$ 。2021—2022 年, 在同一施氮量处理下, 与 S_0 处理相比, S 处理的土壤 TN 含量显著提高; 在同一秸秆还田方式下, 与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理的土壤 TN 含量显著降低。2021 年 $N_{0.7}S$ 处理的土壤 TN 含量较 N_1S_0 处理提高了 8.50%, 2022 年 $N_{0.7}S$ 处理的土壤全氮(TN)含量较 N_1S_0 处理下降了 2.15%。

表 1 显示, 秸秆还田方式、施氮量对土壤 TN 含量均有极显著影响, 但二者的交互作用对土壤 TN 含量无显著影响。

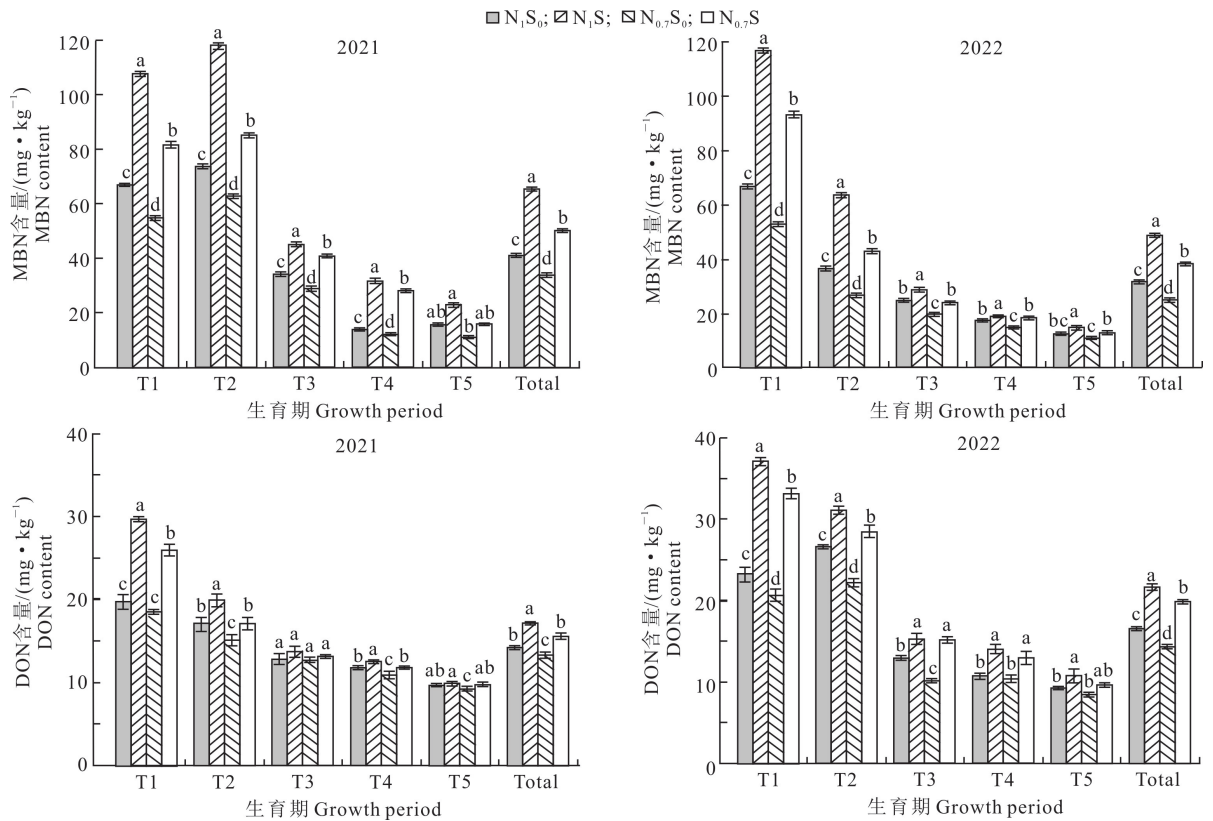


图 5 2021—2022 年氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤微生物生物量氮(MBN)和可溶性有机氮(DON)含量的影响
Fig. 5 Effect of nitrogen fertilizer and straw return on microbial nitrogen (MBN) and dissolved organic nitrogen(DON) content of summer maize soils in 2021—2022

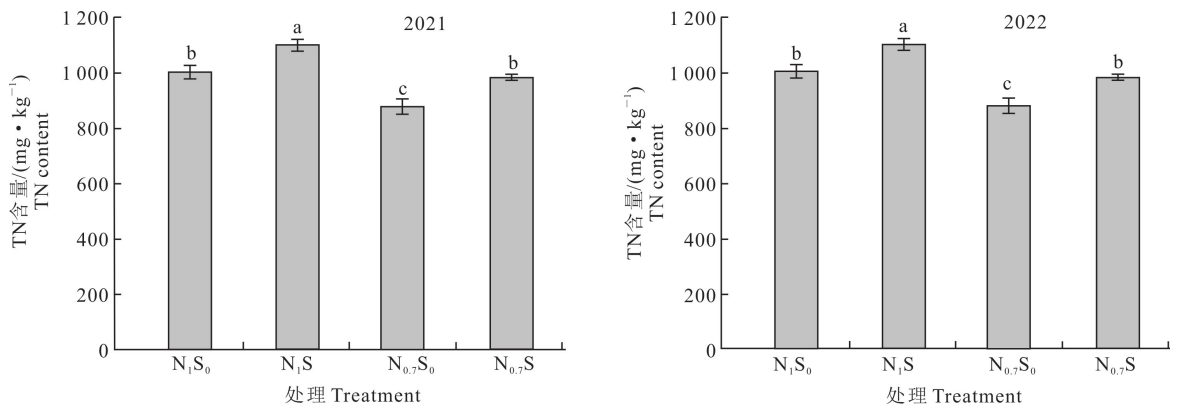


图 6 2021—2022 年氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤全氮(TN)含量的影响

Fig. 6 Effect of nitrogen fertilizer and straw return on soil total nitrogen content of summer maize in 2021—2022

2.3 氮肥和秸秆还田对夏玉米产量及单位产量 N_2O 累积排放量的影响

表 2 表明,2021 和 2022 年,不同处理玉米产量由大到小顺序为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ 。2021—2022 年,在同一施氮量处理下,与 S_0 处理相比,S 处理夏玉米产量显著增加;在同一秸秆还田方式下,与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理夏玉米产量明显减少; $N_{0.7}S$ 处理夏玉米产量较 N_1S_0 处理增加了 5.19%~13.08%。

表 1 显示,秸秆还田方式、施氮量对夏玉米产量

均有极显著影响,但二者交互作用对夏玉米产量无显著影响。

表 2 还表明,2021 和 2022 年不同处理单位产量 N_2O 累积排放量均表现为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ 。2021—2022 年,在同一施氮量处理下,与 S_0 处理相比,S 处理单位产量 N_2O 累积排放量显著提高;在同一秸秆还田方式下,与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理单位产量 N_2O 累积排放量显著降低; $N_{0.7}S$ 处理单位产量 N_2O 累积排放量较 N_1S_0 处理降低了 13.19%~21.70%。表 1 显示,秸秆还田方式和施

氮量对单位产量 N_2O 累积排放量均有极显著影响, 影响。
二者交互作用对单位产量 N_2O 累积排放量有显著

表 2 氮肥和秸秆还田对夏玉米产量及单位产量 N_2O 累积排放量的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer and straw return on yield and cumulative N_2O emissions per unit volume of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	夏玉米产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$) Summer maize yield	单位产量 N_2O 累积 排放量/($g \cdot kg^{-1}$) N_2O cumulative emission per unit yield	年份 Year	处理 Treatment	夏玉米产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$) Summer maize yield	单位产量 N_2O 累积 排放量/($g \cdot kg^{-1}$) N_2O cumulative emission per unit yield
2021	N_1S_0	7 785.0±233.7 b	0.28±0.01 c	2022	N_1S_0	7 818.2±109.1 c	0.28±0.01 c
	N_1S	9 022.0±189.3 a	0.41±0.01 a		N_1S	8 665.4±347.2 a	0.44±0.02 a
	$N_{0.7}S_0$	7 079.2±163.8 c	0.22±0.01 d		$N_{0.7}S_0$	7 060.4±82.7 d	0.22±0.01 d
	$N_{0.7}S$	8 803.4±227.8 a	0.32±0.01 b		$N_{0.7}S$	8 224.6±151.0 b	0.34±0.01 b

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.4 土壤 N_2O 排放通量与土壤活性氮组分的相关性

表 3 显示,土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN、MBN 和

DON 含量与土壤 N_2O 排放通量均存在极显著正相关关系,相关系数分别为 0.834, 0.776, 0.860, 0.849 和 0.741。

表 3 土壤 N_2O 排放通量与土壤活性氮组分的皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between soil N_2O emission flux and soil reactive nitrogen fractions

指标 Index	N_2O 排放通量 N_2O emission fluxes	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen
N_2O 排放通量 N_2O emission fluxes	1.000	0.741**	0.849**	0.834**	0.776**	0.860**
可溶性有机氮(DON) Dissolved organic nitrogen		1.000	0.958**	0.912**	0.758**	0.908**
微生物生物量氮(MBN) Microbial biomass nitrogen			1.000	0.930**	0.768**	0.925**
硝态氮(NO_3^- -N) Nitrate nitrogen				1.000	0.784**	0.974**
铵态氮(NH_4^+ -N) Ammonium nitrogen					1.000	0.895**
无机氮(IN) Inorganic nitrogen						1.000

注: ** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)极显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at the $P<0.01$ level (bilateral).

3 讨论

3.1 不同因素对土壤 N_2O 排放的影响

在旱地条件下, N_2O 的排放与土壤中的微生物活动和化学反应密切相关^[13], 且当土壤中存在足够的活性氮时, 微生物会将其转化为 N_2O 并释放到大气中^[14]。

施氮量与 N_2O 排放之间存在复杂的动态关系^[15]。增加施氮量会促进作物生长和微生物活动, 从而增加 N_2O 的排放^[16]。本试验结果显示, 当秸秆还田方式相同时, 与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理降低了土壤 N_2O 排放通量高峰和 N_2O 累积排放量, 表明减量施氮可以降低 N_2O 排放, 这与廖欢等^[17] 研究结果一致。此外, 也有研究发现, N_2O 排放量随

着施氮量的增加呈指数增长, 尤其是当施氮量远超过作物需氮量时, N_2O 排放明显增加^[18-19], 可知适当控制氮肥投入, 可以减少 N_2O 的排放, 这与本研究结果一致。

研究表明, 秸秆还田可以增加土壤中的有机碳和氮素含量, 从而为微生物提供更多的底物和能量来源, 这可能会促进微生物的活动和 N_2O 排放^[20-21]。本研究发现, 在同一施氮量处理下, 与 S_0 处理相比, S 处理提高了土壤 N_2O 排放通量高峰和 N_2O 累积排放量。这是因为当土壤中加入秸秆后, 随着秸秆的分解, 产生了更多的无机氮, 加快了硝化反硝化过程^[22], 促进 N_2O 排放; 此外, 秸秆的分解为微生物快速繁殖提供养分, 进而消耗土壤里大量氧气, 为反硝化过程提供厌氧环境, 增加 N_2O 排

放^[23]。本研究还发现,在同一施氮量处理下,与 S_0 处理相比,S 处理明显增加土壤 TN 含量,使 N_2O 排放量增加。这是因为外源施氮可加速秸秆的腐解过程^[24],秸秆腐解释放出的营养元素进入土壤,为土壤提供了有机碳源和氮源,增加了土壤 TN 含量,促进土壤中微生物的生长和繁殖,增加了 N_2O 排放^[25]。

3.2 土壤 N_2O 排放与活性氮组分的相关性

本研究结果显示,土壤活性氮组分(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN、DON 和 MBN)含量均与土壤 N_2O 排放通量存在极显著的正相关关系。这是因为当土壤中活性氮含量较高时,土壤微生物的活动会更加活跃,从而促进 N_2O 的排放^[26]。本研究中,在同一施氮量处理下,与 S_0 处理相比,S 处理的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、IN 含量均显著增加。 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 是硝化和反硝化作用的反应底物,其含量不仅会影响反应速率,还会影响产物中 N_2O 所占比例。商子惠等^[12]发现,当土壤 NO_3^- -N 含量较低时, N_2O 排放比较缓慢;而当 NO_3^- -N 含量较高时, N_2O 排放急剧增加。研究发现,秸秆还田后,土壤 IN 含量快速增加,促进硝化和反硝化的作用,从而导致土壤 N_2O 排放增加^[27]。

MBN 作为土壤氮素重要储备库,对土壤氮循环与转化有重要的作用^[28]。土壤微生物可将秸秆矿化为 NH_4^+ -N,而 NH_4^+ -N 直接被微生物固定或者进一步硝化为硝酸盐,为微生物生长提供基质,促进土壤 MBN 固定,增加了土壤微生物活性^[20]。本研究中,在同一施氮量处理下,与 S_0 相比,S 处理土壤 MBN 含量显著增加,这是因为秸秆为土壤提供了碳源和氮源,增加了土壤微生物活性,从而增加了土壤 MBN 含量。史登林等^[29]在黄壤稻田土中发现,施氮显著增加了土壤 MBN 含量,且随着施氮量的增加,土壤 MBN 含量呈先增加后降低趋势。本研究中,在同一秸秆还田方式下,与 $N_{0.7}$ 处理相比, N_1 处理土壤 MBN 含量显著增加,这是因为施氮量的增加促进了作物凋落物和根系分泌物的增加,有助于促进土壤微生物繁殖,从而提高了土壤 MBN 含量,这与前人研究结果有差异,可能与作物品种及土壤类型不同有关。

DON 作为土壤有机氮的重要组分,可以直接或间接经过转化后被作物吸收利用^[30],在土壤氮素转化方面具有重要作用^[31],但是其易随水流失,是农田土壤氮素损失的重要来源之一^[32]。施入氮肥和秸秆,

土壤微生物会分解土壤有机物释放出 DON,从而提高土壤 DON 含量^[33]。此外,DON 通常会转化为 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N,增加土壤无机氮含量^[34],从而影响 N_2O 排放。本研究中,在同一施氮量处理下,与 S_0 相比,S 处理土壤 DON 含量明显增加;在同一秸秆还田方式下,与 $N_{0.7}$ 处理相比, N_1 处理土壤 DON 含量明显增加;且土壤 DON 含量与 N_2O 排放通量呈极显著正相关,这与前人研究结果一致。

3.3 氮肥和秸秆还田对夏玉米产量及单位产量 N_2O 累积排放量的影响

本研究中,不同处理夏玉米产量和单位产量 N_2O 累积排放量由大到小的顺序均为 $N_1S > N_{0.7}S > N_1S_0 > N_{0.7}S_0$ 。可知在同一施氮量条件下,S 处理较 S_0 处理增加了夏玉米产量,这与孟毅等^[35]的研究一致。有研究表明,减量施氮对作物产量并无明显影响^[36]。本研究中,除 2021 年 S 条件下 $N_{0.7}$ 与 N_1 处理间夏玉米产量无显著差异外,在同一秸秆还田方式下,与 N_1 处理相比, $N_{0.7}$ 处理不仅显著减小夏玉米产量,而且还显著减小单位产量 N_2O 累积排放量,这与前人研究结果^[36]不一致,这可能与土壤质地、自然环境、栽培方式和作物等不同有关。

本研究中,与传统栽培处理(N_1S_0)相比, $N_{0.7}S_0$ 处理夏玉米产量显著降低, N_1S 和 $N_{0.7}S$ 处理夏玉米产量显著增加,且 N_1S 处理夏玉米产量最大,可知 N_1S 处理具有明显的增产效应。与传统栽培处理(N_1S_0)相比, $N_{0.7}S$ 和 N_1S 处理单位产量 N_2O 累积排放量显著增加, $N_{0.7}S_0$ 处理单位产量 N_2O 累积排放量显著降低,可知 $N_{0.7}S_0$ 处理可显著降低 N_2O 排放。

4 结 论

土壤 N_2O 排放通量与土壤硝态氮、铵态氮、无机氮、可溶性有机氮和微生物生物量氮含量存在极显著的正相关关系。在同一施氮量处理下,秸秆还田处理较秸秆不还田处理不仅能明显增加土壤活性氮组分和全氮含量,而且还能增加夏玉米产量、土壤 N_2O 累积排放量。在同一秸秆还田方式下,减量施氮处理较传统施氮处理能明显减少土壤活性氮组分、全氮含量以及夏玉米产量和土壤 N_2O 累积排放量。与传统施氮+秸秆不还田处理相比,传统施氮+秸秆还田处理(N_1S)和减量施氮+秸秆还田处理($N_{0.7}S$)夏玉米产量显著增加,增产效应显著。减量施氮+秸秆不还田处理($N_{0.7}S_0$)显著降低单位产

量 N_2O 累积排放量,具有明显减排效应。

[参考文献]

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [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(4): 379-383.
- WANG X K, LI C S, OUYANG Z Y. Greenhouse gases emission and crop production [J]. Ecology and Environment, 2003(4): 379-383.
- [4] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- WANG Y L, LIU T X, ZHAO P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2483-2491.
- [5] 熊又升, 袁家富, 郝福新, 等. 氮肥用量对不同小麦品种产量和品质的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(6): 697-700.
- XIONG Y S, YUAN J F, HAO F X, et al. Effect of nitrogen dosage on the yield and quality of wheat [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(6): 697-700.
- [6] 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.
- [7] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素 [J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463-465, 478.
- LI S K, WANG K R, FENG J K, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 463-465, 478.
- [8] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373-378.
- TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 373-378.
- [9] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 291-296.
- MU P, ZHANG E H, WANG H N, et al. Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291-296.
- [10] 朱建春, 张增强, 李荣华. 陕西关中地区作物秸秆资源的综合利用现状及其影响因素模型 [J]. 农业环境与发展, 2011, 28(2): 12-17.
- ZHU J C, ZHANG Z Q, LI R H. Current situation of comprehensive utilization of crop straw resources and its influencing factors model in Guanzhong area of Shaanxi [J]. Agricultural Environment and Development, 2011, 28(2): 12-17.
- [11] 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤 N_2O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5668-5676.
- XU H W, LI N, FENG Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N_2O emissions in wheat-maize rotational soils [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5668-5676.
- [12] 商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 等. 水肥气耦合对温室番茄地土壤 N_2O 排放及番茄产量的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2924-2935.
- SHANG Z H, CAI H J, CHEN H, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupling on soil N_2O emission and yield in greenhouse tomato [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2924-2935.
- [13] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N_2O 排放系数增加产量 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163-170.
- SHAN N, ZHAO T K, BI X Q, et al. Suitable nitrogen application reducing N_2O emission and improving grain yield in wheat-maize crop rotation system in Beijing suburb [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 163-170.
- [14] 刘辉. 雄安新区不同土地利用类型氮去除功能微生物的群落结构和功能研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LIU H. Study on community structure and function of nitrogen removal microorganisms in different land use types in Xiong'an New Area [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [15] 李玥, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 842-851.
- LI Y, JU X T. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 842-851.
- [16] 殷熙悦, 殷文, 樊志龙, 等. 绿肥还田及减施氮肥对绿洲灌区小麦产量和土壤 CO_2 、 N_2O 排放的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 48-55.
- YIN X Y, YIN W, FAN Z L, et al. Effects of returning green manure and reducing nitrogen fertilizer application on yield and soil CO_2 and N_2O emissions of wheat field in oasis irrigation area [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(1): 48-55.

- [17] 廖欢,王方斌,刘凯,等.不同施肥措施配合硝化抑制剂对滴灌棉田土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(9):1378-1388.
- LIAO H, WANG F B, LIU K, et al. Effects of nitrogen application combined with nitrification inhibitors on NH_3 volatilization and N_2O emission in drip-irrigated cotton field [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(9):1378-1388.
- [18] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4):783-795.
- JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):783-795.
- [19] 张楠,潘仕球,乔云发,等.秸秆还田及添加生物炭对黑土玉米生长季 N_2O 排放的影响 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(27):79-85.
- ZHANG N, PAN S Q, QIAO Y F, et al. The response of N_2O emissions to straw returning and biochar addition during maize growing season in mollisol [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(27):79-85.
- [20] 唐占明,刘杏认,张晴雯,等.对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 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.
- [21] JINZE B, JIAJIE S, DANYANG C, et al. Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem; key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347:108366.
- [22] 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.
- [23] 叶桂香,史永晖,王良,等.秸秆还田的小麦-玉米农田 N_2O 周年排放的量化分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3):589-596.
- YE G X, SHI Y H, WANG L, et al. Quantitative analysis of straw returning on annual soil N_2O emission in the wheat-maize rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3):589-596.
- [24] 宫秀杰,钱春荣,曹旭,等.玉米秸秆还田配施氮肥对土壤酶活、土壤养分及秸秆腐解率的影响 [J]. 玉米科学, 2020, 28(2):151-155.
- GONG X J, QIAN C R, CAO X, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil enzymatic activity, soil nutrients and decomposition rate of maize straw [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(2):151-155.
- [25] 郭戎博,李国栋,潘梦雨,等.秸秆还田与施氮对耕层土壤有机碳储量、组分和团聚体的影响 [J]. 中国农业科学, 2023, 56(20):4035-4048.
- GUO R B, LI G D, PAN M Y, et al. Effects of long-term straw return and nitrogen application rate on organic carbon storage, components and aggregates in cultivated layers [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(20):4035-4048.
- [26] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等.稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(3):1033-1042.
- CHEN X B, HU Y J, QIN H L, et al. Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):1033-1042.
- [27] 张星,刘杏认,张晴雯,等.生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10):1943-1950.
- ZHANG X, LIU X R, ZHANG Q W, et al. Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during maize growth season in North China plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10):1943-1950.
- [28] 胡天怡,车佳玥,胡煜杰,等.秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响 [J]. 环境科学, 2024, 45(3):1692-1701.
- HU T Y, CHE J Y, HU Y J, et al. Effects of straw return and biochar addition on soil greenhouse gas emissions after flooding in a rice-vegetable rotation system in the tropics [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3):1692-1701.
- [29] 史登林,王小利,刘安凯,等.黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 [J]. 环境科学, 2021, 42(1):443-449.
- SHI D L, WANG X L, LIU A K, et al. Response of microbial biomass carbon and nitrogen and rice quality in a yellow soil paddy field to biochar combined with nitrogen fertilizer [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1):443-449.
- [30] 陈安强,付斌,鲁耀,等.有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):160-167.
- CHEN A Q, FU B, LU Y, et al. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21):160-167.
- [31] 段鹏鹏,丛耀辉,徐文静,等.氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4717-4727.
- DUAN P P, CONG Y H, XU W J, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamic of soil soluble N in greenhouse cultivation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4717-4727.
- [32] 杨静,郭文圻,杨文浩,等.紫云英翻压后稻田土壤可溶性有机氮迁移特性与损失风险 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3):786-796.

- YANG J, GUO W Q, YANG W H, et al. Migration and risk of loss of soluble organic nitrogen in paddy soil after incorporation of Chinese milk vetch [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 786-796.
- [33] 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 等. 秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4379-4386.
- BAI J Z, LIU Z Y, SONG J J, et al. Effects of straw returning and biochar application on summer maize yield and soil N₂O emission in Guanzhong plain [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4379-4386.
- [34] 陈仕友, 王祎, 白彦锋, 等. 土壤可溶性有机氮研究进展 [J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 233-239.
- CEHN S Y, WANG Y, BAI Y F, et al. Review on soluble organic nitrogen in soil [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(5): 233-239.
- [35] 孟毅, 蔡焕杰, 王健, 等. 麦秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 131-135.
- MENG Y, CAI H J, WANG J, et al. Effect of straw mulching on the growth of summer maize and soil water utilization [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 131-135.
- [36] 张冉, 赵鑫, 濮超, 等. 中国农田秸秆还田土壤 N₂O 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 N₂O emissions and influence factors in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 1-6.
- (责任编辑: 李小平)
-
- (上接第 32 页)
- [30] 徐佳星, 封涌涛, 叶玉莲, 等. 地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(12): 2349-2359.
- XU J X, FENG Y T, YE Y L, et al. Effects of plastic film mulching on yield and water use of maize in the Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(12): 2349-2359.
- [31] 李 W W, WEN X X, HAN J, et al. Optimum ridge-to-furrow ratio in ridge-furrow mulching systems for improving water conservation in maize (*Zea mays* L.) production [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(29): 23168-23179.
- [32] 于亚军, 张浩, 张子豪, 等. 渭北旱塬不同覆膜农田土壤微生物群落和酶活性的差异 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11): 2578-2586.
- YU Y J, ZHANG H, ZHANG Z H, et al. Effects of different plastic film mulching treatments on soil microbial communities and enzyme activities in the Weibei drylands of the Loess Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2578-2586.
- [33] DENG J, CHONG Y J, ZHANG D, et al. Temporal variations in soil enzyme activities and responses to land-use change in the Loess Plateau, China [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 3129.
- [34] 要凯, 赵章平, 康益晨, 等. 沟垄覆膜对连作马铃薯土壤酶活性、理化性状及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2019, 45(8): 1286-1292.
- YAO K, ZHAO Z P, KANG Y C, et al. Effects of ridge-furrow mulching on soil enzyme activity, physicochemical properties and yield in continuous cropping potato field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(8): 1286-1292.
- [35] 朱利霞, 岳善超, 沈玉芳, 等. 施氮和覆膜对旱作春玉米农田土壤微生物量和土壤酶活性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 130-136.
- ZHU L X, YUE S C, SHEN Y F, et al. Effects of nitrogen fertilization and film mulching on soil microbial biomass and enzyme activity of spring maize in semi-arid cropland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 130-136.
- [36] 胡庆兰, 杨凯, 王金贵, 等. 地膜覆盖及不同施肥处理对玉米产量和根际土壤酶活性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(21): 122-126.
- HU Q L, YANG K, WANG J G, et al. Effects of plastic film mulching and different fertilization treatment on maize yield and enzyme activity in rhizosphere soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(21): 122-126.
- (责任编辑: 李小平)