

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.08.005

氮肥对黄壤温室气体排放和玉米产量的影响

陈语, 翟泰雅, 王芳芳, 石美, 高小叶

贵州民族大学生态与环境工程学院, 贵阳 550025

摘要: 为比较不同氮肥施用量对农田温室气体排放强度、玉米产量、全球增温潜势及温室气体排放强度的影响, 正确认识氮肥在农田温室气体排放的贡献, 为化肥减量增效, 玉米增产稳产, 降低综合温室效应, 实现农业可持续发展提供科学依据, 采用大田试验, 以玉米为供试作物, 设置当地传统施肥(CF100)、氮肥减量 30%(CF70)、氮肥减量 50%(CF50)和不施肥(CK)4 个处理, 采用静态箱—气相色谱法测定贵州典型黄壤玉米生长季, 分析不同施氮梯度下作物产量和温室气体排放特征。结果表明, 与 CK 相比, 施氮处理均提高了 CO₂, CH₄ 和 N₂O 的平均排放通量和累积排放量, 但是施氮处理之间差异均无统计学意义。全球增温潜势(GWP)在 CF50、CF70、CF100 处理下分别显著增加了 36.78%, 52.14% 和 50.22%, 三者之间差异无统计学意义。施用氮肥显著增加玉米产量, CF100 与 CF70 产量无显著差异, 与 CF50 相比, 分别显著增加了 16.33% 和 13.53% ($p < 0.05$)。温室气体排放强度(GHGI)在 CF50、CF70、CF100 处理下分别显著降低了 57.88%, 60.15% 和 60.94%, 但是施氮处理之间差异无统计学意义。施氮处理可降低土壤 pH 值、增加土壤全氮(TN)、全磷(TP)质量分数, 而有机碳质量分数呈先增后减趋势。施用氮肥会增加温室气体的排放, 但可显著提高作物产量。从产量和 GHGI 角度来看, CF70 与 CF100 产量、GHGI 差异均无统计学意义 ($p > 0.05$)。因此, 为实现较高的玉米产量和较低的温室气体排放, 实现化肥减量增效, 氮肥减量 30% 的施肥方式符合该区农业可持续发展目标。

关键词: 玉米产量; 化肥减量增效; 温室气体; 全球增温潜势;
温室气体排放强度

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2022)08-0037-11



Effects of Nitrogen Fertilizer on Greenhouse Gas Emissions and Maize Yield in Yellow Soils

CHEN Yu, ZHAI Taiya, WANG Fangfang, SHI Mei, GAO Xiaoye

College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

Abstract: To explore the effects of different rates of nitrogen fertilizer on the greenhouse gas (CO₂, CH₄ and N₂O) emissions, maize yield, global warming potential and greenhouse gas emission intensity, understand the contribution of nitrogen fertilizer to the greenhouse gas emissions, provide scientific basis for stabilizing production, reducing the comprehensive greenhouse effect, and realize the sustainable develop-

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960636); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2018]1076); 贵州省教育厅青年人才成长项目(KY[2017]119)。

作者简介: 陈语, 硕士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。

通信作者: 高小叶, 副教授, 硕士研究生导师。

ment of agriculture. In the field experiment, maize was used as the test crop. Four nitrogen application rates were set up, including the local traditional fertilization (CF100), 30% reduction in nitrogen fertilizer (CF70), 50% reduction in nitrogen fertilizer (CF50) and no fertilization (CK). The static chamber-gas chromatography method was used to determine the greenhouse gas fluxes during the maize growing. The crop yields of different nitrogen application rates for the typical yellow soil in Guizhou were measured at harvest. Compared to CK, nitrogen application increased the average emission flux and cumulative emission of CO_2 , CH_4 and N_2O , but there was no significant difference among the nitrogen application treatments. The global warming potential (GWP) increased significantly by 36.78%, 52.14% and 50.22% under the treatment of CF50, CF70 and CF100, respectively. The application of nitrogen fertilizer significantly increased the yield of maize. There was no significant difference between CF100 and CF70. Compared to CF50, the yield of CF100 and CF70 was increased by 16.33% and 13.53%, respectively ($p < 0.05$). Greenhouse gas emission intensity (GHGI) was significantly reduced by 57.88%, 60.15% and 60.94% under CF50, CF70 and CF100 treatments, respectively, but there was no significant difference among nitrogen application treatments. Nitrogen application treatment could decrease soil pH value and increase the contents of soil total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). The content of organic carbon increased first and then decreased. Application of nitrogen fertilizer could increase the greenhouse gas emissions, but can significantly increase the crop yield. There were no significant differences in grain yield and GHGI between CF70 and CF100 treatments ($p > 0.05$). Therefore, to achieve high maize yield and low greenhouse gas emissions, the 30% of fertilization reduction based on the application of local traditional nitrogen fertilizer would be the management to achieve the sustainable agriculture development.

Key words: maize yield; fertilizer reduction and efficiency enhancement; greenhouse gas; global warming potential; greenhouse gas emission intensity

在农业生产中,人们大量使用氮肥以提高作物产量.近年来,中国农业生产中的化肥投入量增长十分迅速,高强度的化肥施用给生态和环境带来了显著的负面影响.农田中的氮、磷随地表径流进入受纳水体,或随地下水渗入土壤,引起农业面源性富营养化,土壤污染、面源污染严重^[1].氮肥对增产有显著作用,但也会影响 CH_4 , CO_2 和 N_2O 等农田温室气体排放. CH_4 , CO_2 和 N_2O 是导致全球变暖的 3 种主要温室气体,而旱地农田土壤是 CO_2 和 N_2O 的主要排放源,其温室效应不容忽视^[2].玉米作为我国最大的粮食作物,在缓解饲料短缺、保障粮食安全方面发挥着重要作用^[3].因此,探究不同施氮量对温室气体排放特征和作物产量的影响,确定合理的施氮量,对提高作物产量、减少农业温室气体排放具有重要的实际应用价值.

种植模式^[4]、施肥方式^[5]等会影响作物产量,而氮肥是影响鲜食玉米产量和品质的重要因素之一^[6].大量田间实验表明,增加氮肥施用量可提高作物产量^[4,7],但大量施用化肥会产生过多的温室气体^[8].Qiu 等^[9]研究指出在旱地生态系统中,施氮显著增加了土壤 N_2O 和 CO_2 排放;Shcherbak 等^[10]发现随着施氮量的增加, N_2O 排放量会呈指数型增加.也有研究发现,在稻麦系统中,当施氮量从 $270 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 降低到 $190 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, N_2O 累积排放量将减少 26.0%~34.4%.高氮肥施加量可增强植物光合作用,刺激根系微生物,土壤呼吸增强,导致较高 CO_2 排放量^[11].适宜施氮量可促进青贮玉米干物质积累和水分高效利用,保证玉米根际养分的有效供给,营造良好的根际土壤环境,提高氮素利用效率,提高玉米籽粒产量^[7],表明合理施氮对温室气体排放及玉米产量有极其重要意义.以往的研究重点多在于玉米地 N_2O 和 CO_2 气体的排放^[8,9,12],尽管旱地系统不是 CH_4 排放的重要来源,但是探究氮肥用量对玉米地 CH_4 通量的定量作用,对于明确氮肥对玉米生态系统综合温室效应的影响具有一定的指导意义.

黄壤是西南地区主要土壤类型之一,主要分布于贵州、四川、云南等省.贵州黄壤面积超过 700 万 hm^2 ,约占全国黄土总面积的 30%,其中旱耕地约 460 万 hm^2 ,占全国旱耕地面积的 46%左右^[13].贵州属

喀斯特山区,降雨分布不均,且土壤质地较粘,酸性强,土壤交换性碱质量分数低。虽然黄土表层有机质质量分数较高,但土壤氮素转化淋溶现象尤为突出,导致黄土氮库明显不足^[13]。氮肥增产的同时增加了温室气体排放,因此如何提高黄壤土氮肥有效性,实现玉米增产稳产、温室气体减排是亟待解决的重要问题。本研究在贵州黄壤地开展大田试验,分析不同氮肥施用量对玉米产量以及贵州黄壤土温室气体排放的影响,旨在为旱地黄壤土合理施肥,玉米增产稳产,温室气体减排提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州省贵阳市花溪区麦坪乡(东经 106°27′—106°52′,北纬 26°11′—26°34′),海拔 1 100 m,属亚热带湿润季风气候。年平均气温 16.0 °C,其中冬季平均气温 7.0 °C,夏季平均气温 23.7 °C,全年无霜期 246 d,年降水量 1 178.3 mm,降水分布不均,4—8 月降水量占全年的 70%。该地处于云贵高原东斜坡和苗岭山脉中段,全区地貌以山地和丘陵为主,为典型的喀斯特地质地区,土壤类型为黄壤。土壤 pH 值为 5.62,有机质质量分数为 39.18 g/kg,碱解氮为 178.10 mg/kg,速效磷为 8.96 mg/kg,速效钾为 183.67 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置固定氮肥梯度试验样地,根据当地施肥量设置了 4 个氮肥施肥梯度,分别为不施肥(CK:对照)、减量 50%氮肥(CF50)、减量 30%氮肥(CF70)、传统施肥(CF100),试验小区面积为 18 m²,每个处理 3 个重复,完全随机排列。当地传统化肥施用量为 N 273 kg/hm² 和 P₂O₅ 264 kg/hm²。试验所用肥料为尿素(含 N 46%)和磷酸一铵(含 N 11%,P₂O₅ 44%)。磷酸一铵用作基肥,在玉米播种前一天施入,其中包含总施氮量的 25%;尿素分两次追加施入,其中第一次追肥施氮 30%,第二次追肥施氮 45%。本次试验供试玉米品种为安单 3 号,于 2019 年 4 月 9 日播种,行距、株距均为 60 cm,2019 年 5 月 12 日(拔节初期)第一次追肥,2019 年 7 月 3 日(抽雄吐丝期)第二次追肥,2019 年 9 月 14 日收获,其他田间管理措施与当地常规田间生产一致。

1.3 样品采集及处理

植物样采集:在玉米收获期,每小区随机取 10 株玉米,65 °C 烘至恒质量,测定其籽粒产量以及秸秆生物量。

土壤样采集:供试土样于玉米收获时采集。各小区按 5 点采样法,采样深度 0~20 cm,充分混合后,挑取植物残根和碎石,风干、磨碎过筛。土壤 pH 值采用 2.5:1 水土比提取,用 pH 计测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤总氮采用硫酸消化水杨酸钠法测定;土壤总磷硫酸消解—钼锑抗法,具体方法参考鲍士丹^[14]编制的《土壤农化分析》。

1.4 温室气体测量

采用静态箱—气相色谱法在玉米生长季测定 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体含量。暗箱尺寸为内径 20 cm、高度 5 cm 的圆柱(包含 3 cm 高柱体和 2 cm 高盖子);安放在玉米植株之间,箱内无植株。采样时间为上午 08:00 至上午 11:00,采集气体样品时,将地温计插入 5 cm 深的土壤中,记录抽气前后的地温(图 1)。气样采集时间为 6—9 月,前期间隔 7 d 采一次,后期间隔 15 d 采一次气体,施肥后间隔一天采集一次,遇大雨延迟采集。采样时间间隔为 30 min,分别在 0,30 min 使用注射器抽取 30 mL 箱内混合均匀气体收集在真空气袋中。48 h 内采用气相色谱仪(岛津 GC-2014,日本)测定样品 CO₂、CH₄ 和 N₂O 含量。

温室气体排放通量的计算公式为^[15]:

$$F = H \times \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 为气体排放通量; CO₂ 单位为 mg/(m²·h); CH₄ 和 N₂O 单位为 μg/(m²·h); H 为采样环高度(0.05 m); ρ 为标准状态下温室气体的密度,单位为 kg/m³; $\frac{\Delta c}{\Delta t}$ 为单位时间内静态室内温室气体含量的变

化率, 单位为 $\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{h})$; T 为测量时箱内的平均温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$.

温室气体累积排放通量(C'_t)计算公式^[16]:

$$C'_t = C_t + \frac{F_t + F'_t}{2} \times (t' - t)$$

式中: C'_t 和 C_t 表示第 t' 次和第 t 次累积温室气体通量; F'_t 和 F_t 分别为 t' 和 t 时气体产生速率; t' 和 t 表示采样间隔时间(d).

100 a 尺度上温室气体(CO_2 , CH_4 和 N_2O) 累积排放量的增温潜势(GWP , kg/hm^2) 计算公式^[17]:

$$GWP = E_{\text{CO}_2} + 25 \times E_{\text{CH}_4} + 298 \times E_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中: E_{CO_2} 为 CO_2 累积排放量; E_{CH_4} 为 CH_4 累积排放量; $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 累积排放量.

在农田中, 玉米的净初级生产力(NPP kg/hm^2) 估算公式如下^[16]:

$$NPP = NPP_{\text{地上}} + NPP_{\text{根}} + NPP_{\text{凋落物}} + NPP_{\text{根沉积}}$$

在收获时收集, 洗净, 在 65°C 下烘干、称质量; 根系与地上部比值为 $1/0.09$ ^[18], 凋落物为地上部的 5% , 玉米(地上+根)/根际沉积物比值为 $0.89/0.11$ ^[19].

利用全球增温潜势与作物产量的关系计算温室气体排放强度($GHGI$ kg/kg)^[17]:

$$GHGI = GWP/Y$$

式中: Y 代表玉米籽粒产量, 单位为 kg/hm^2 .

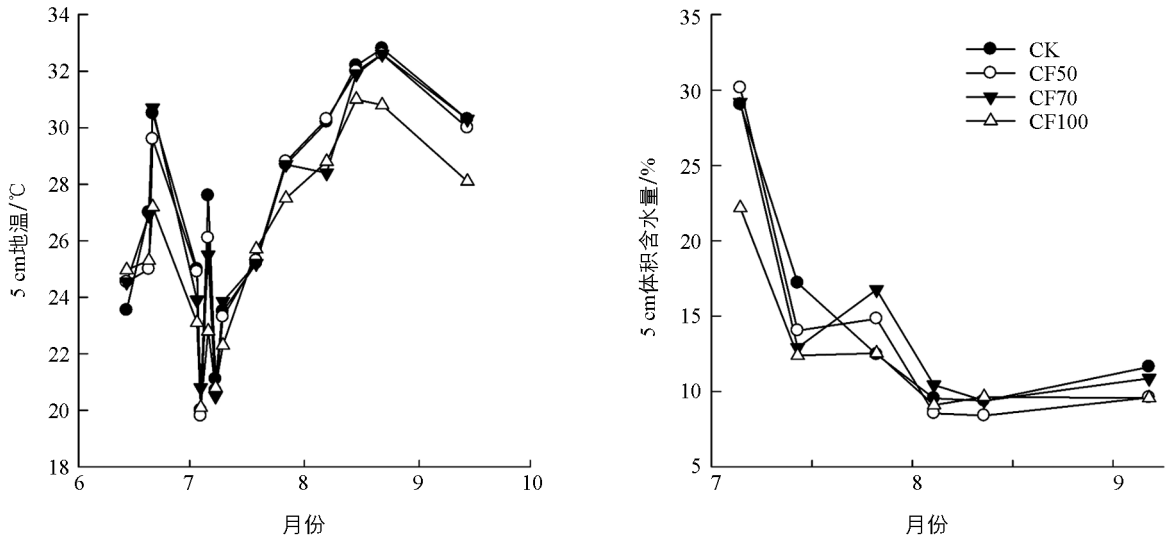


图 1 不同施氮处理下地温及体积含水量变化

1.5 数据分析

使用 Excel 2016, SPSS 21 和 SigmaPlot 14 进行数据排序、统计分析和数据制表. 通过重复测量单因素方差分析(ANOVA)对 CO_2 , CH_4 以及 N_2O 平均排放通量进行显著性检验, 通过 LSD 对 CO_2 , CH_4 以及 N_2O 累积排放量、 GWP 、产量、 $GHGI$ 、土壤理化性质进行显著性检验, 当 $p < 0.05$ 时, 差异有统计学意义.

2 结果

2.1 不同施氮梯度对温室气体通量的影响

整个观测期间, 各处理 CO_2 排放通量趋势基本一致, 变化介于 $1.42 \sim 220.24 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (图 2a). 6 月拔节期 CO_2 排放通量较低. 7 月抽雄吐丝期追肥 1 周后达到峰值, 随后逐渐下降并趋于稳定. CO_2 平均排放通量增幅随氮肥施用量增加呈先增后减的趋势; 其中 CF50, CF70 和 CF100 分别比 CK 增加 60.79% , 78.56% , 39.04% , 且 CF70, CF50 处理与 CK 之间差异有统计学意义($p < 0.05$)(表 1).

不同施肥梯度 CH_4 排放通量无明显规律, 呈现正负波动, 拔节期和抽雄吐丝期波动幅度较大, 追肥

2~3 周后达到峰值(图 2b); 通量最大值出现在 CF50 处理下, 为 $67.94 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 最小值出现在 CK 处理下, 为 $-65.44 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 不同处理 CH_4 平均排放通量为 $-15.15 \sim 0.68 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 从大到小依次为: CF50, CF100, CF70, CK, 其中 CF50, CF100 与 CK 差异有统计学意义($p < 0.05$)(表 1). N_2O 排放通量各处理间趋势一致, 呈多峰变化趋势, 第二次追肥后出现第一个排放高峰; 在追肥后 2~3 周出现第二个排放峰值, 在收获期 N_2O 排放通量略有上升(图 2c). 不同施肥处理的 N_2O 平均排放通量为 $6.67 \sim 28.24 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 从大到小依次为: CF100, CF70, CF50, CK, 表明 N_2O 排放随氮肥施用量的增加而增加, 但各处理间差异无统计学意义($p > 0.05$)(表 1).

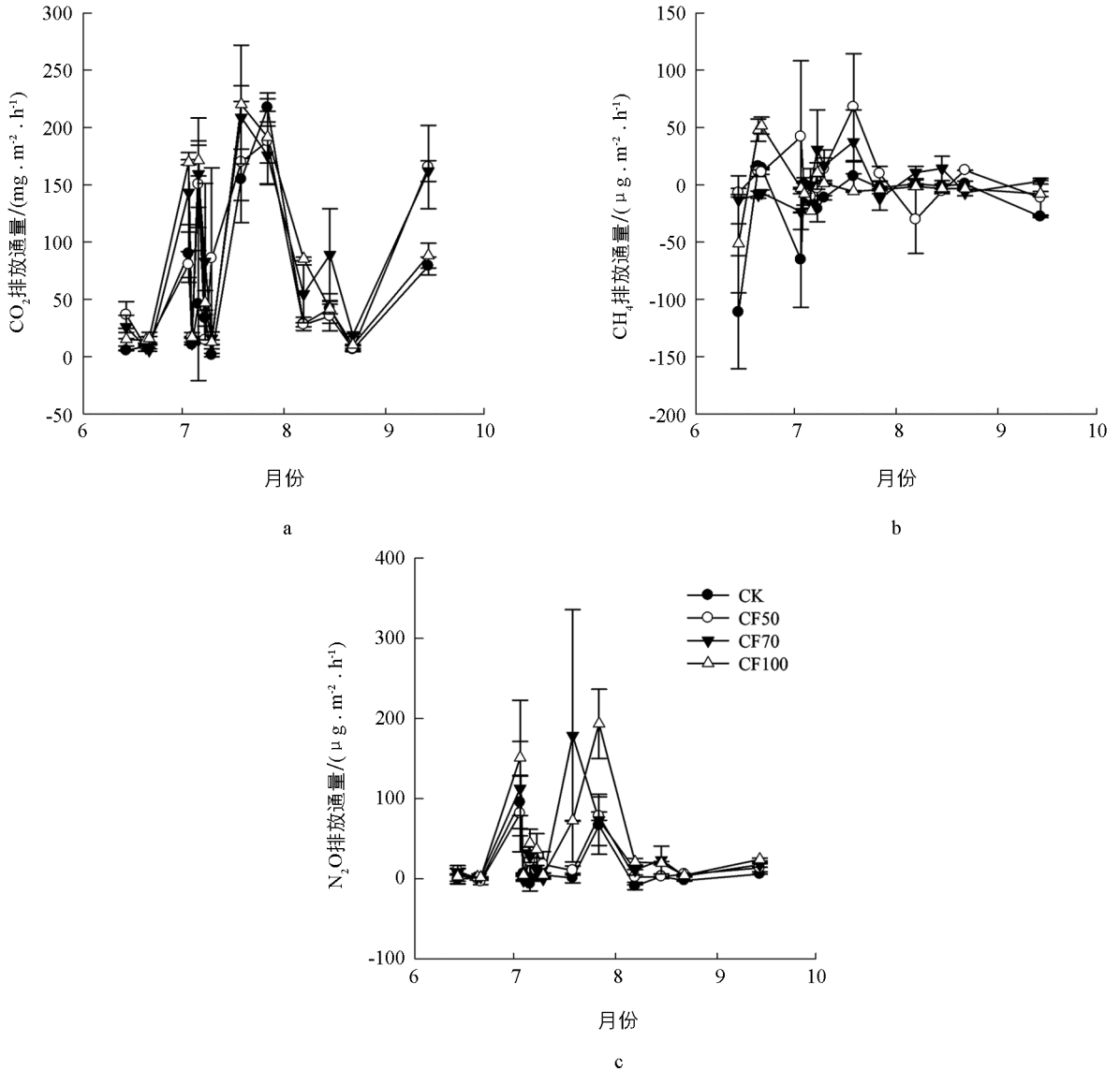


图 2 温室气体排放通量动态变化(平均值±标准误)

表 1 不同施氮处理玉米生长季农田土壤温室气体平均排放通量(平均值±标准误)

处理	$\text{CO}_2/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\text{CH}_4/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\text{N}_2\text{O}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
CK	$48.10 \pm 3.52\text{b}$	$-15.15 \pm 2.39\text{b}$	$6.67 \pm 2.08\text{b}$
CF50	$77.33 \pm 9.98\text{a}$	$0.68 \pm 2.17\text{a}$	$12.52 \pm 1.16\text{ab}$
CF70	$85.88 \pm 6.70\text{a}$	$-4.76 \pm 3.89\text{ab}$	$22.71 \pm 9.24\text{ab}$
CF100	$66.87 \pm 2.38\text{ab}$	$0.22 \pm 5.33\text{a}$	$28.24 \pm 3.88\text{a}$

注: 同一列不同小写字母表示各处理间差异有统计学意义($p < 0.05$). 下同.

2.2 不同施氮处理对温室气体累积排放量和全球增温潜势的影响

CO₂ 累积排放量随氮肥施用量的增加先增加后减少, 其中 CK 最低, 为 1 691.28 kg/hm²; CF70 最高, 达 2 427.16 kg/hm², 比 CK 处理增加了 43.67% ($p < 0.05$) (表 2). 各处理 N₂O 表现为排放源, 累积排放量随化肥施用量的增加逐渐增加, CF50, CF70, CF100 处理分别比 CK 增加了 33.95%, 158.4%, 201.32%, 但各处理间差异无统计学意义 ($p > 0.05$). CH₄ 累积通量方面, CK 与 CF70 为负值, 表现为弱汇, 而 CF50 与 CF100 排放量显示为排放源.

全球增温潜势随着氮肥施用量的降低而下降, 与对照 CK 相比, CF50, CF70 和 CF100 处理的 GWP 分别提高了 36.78%, 52.14% 和 50.22%, 且差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 但 CF50, CF70 和 CF100 处理间差异无统计学意义 ($p > 0.05$). 各处理 GWP 主要来自 CO₂ 贡献, 占 GWP 的 86.41%~94.05%, 其次为 N₂O (表 2).

2.3 不同施氮处理对玉米生物量及温室气体排放强度的影响

施氮处理的地上部生物量显著高于 CK, 最高达 15 684.46 kg/hm², 与 CK 相比, CF50, CF70 和 CF100 处理分别提高了 112.11%, 142.98% 和 153.36%, 并且差异有统计学意义 ($p < 0.05$), CF70 和 CF100 间差异无统计学意义 ($p > 0.05$) (表 3). 随着施氮量的增加, 玉米籽粒产量显著增加, 且与 CK 差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 但 CF70 与 CF100 处理之间玉米籽粒产量差异无统计学意义 ($p > 0.05$) (图 3a). CF50, CF70 和 CF 施氮梯度处理玉米籽粒产量较 CK 分别提高了 185.06%, 228.99% 和 231.60%.

玉米生长季温室气体排放强度 (GHGI) 结果如图 3b 所示, 随着施氮量的增加, GHGI 呈现出与 GWP 不同的趋势; 其中最高的处理是 CK, 为 0.97 kg/kg, 最低的是 CF100 处理, 为 0.37 kg/kg, 从大到小依次为: CK, CF50, CF70, CF100, 且差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 但 CF70 处理与 CF100 处理间差异无统计学意义 ($p > 0.05$).

2.4 不同施氮处理玉米地土壤理化性质的影响

施氮处理可影响玉米地土壤理化性质 (表 4). 由表 4 可知, 施氮处理可降低土壤 pH 值, 且随着施氮量的增加而降低, 差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 土壤有机质是作物有机营养和矿质营养的重要来源, 是形成良好土壤结构的重要因素, 直接反映土壤的肥力. 不同施氮处理土壤有机碳提高了 4.46%~9.50%, 且差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 在施氮处理中最高的是 CF70 处理, 达 28.01 g/kg, 最低的是 CF100 处理, 为 26.72 g/kg. 全氮随着施氮量的增加呈上升趋势, 最高的 CF100 处理达 1.93 g/kg, 最低的为 CF50 处理, 为 1.80 g/kg, 与 CK 相比, 增加了 28.62% ($p > 0.05$). 全磷整体趋势与土壤有机碳类似, 与 CK 相比, 施氮处理增加了全磷质量分数, 但差异无统计学意义 ($p > 0.05$). 土壤 C/N 值维持在 14.00~17.10, 施用氮肥可降低土壤 C/N 值, 但差异无统计学意义 ($p > 0.05$).

表 2 不同施氮处理玉米生长季农田土壤温室气体累积排放通量和全球增温潜势 (平均值 ± 标准误)

处理	CO ₂ 累积排放量 /(kg · hm ⁻²)	CH ₄ 累积排放量 /(kg · hm ⁻²)	N ₂ O 累积排放量 /(kg · hm ⁻²)	全球增温潜势 /(kg · hm ⁻²)
CK	1 689.43 ± 28.46b	-0.65 ± 0.08b	0.41 ± 0.17a	1 798.07 ± 78.53b
CF50	2 288.15 ± 289.35a	0.15 ± 0.42a	0.55 ± 0.13a	2 470.67 ± 260.93a
CF70	2 427.16 ± 66.89a	-0.51 ± 0.57ab	1.07 ± 0.58a	2 800.65 ± 220.93a
CF100	2 331.80 ± 117.85a	-0.19 ± 0.18ab	1.25 ± 0.25a	2 703.93 ± 45.69a

表 3 不同施氮处理玉米生长季净初级生产力 (平均值 ± 标准误)

处理	地上部 /(kg · hm ⁻²)	根部 /(kg · hm ⁻²)	凋落物 /(kg · hm ⁻²)	根系沉积物 /(kg · hm ⁻²)	净初级生产力 /(kg · hm ⁻²)
CK	6 190.58 ± 641.43c	557.15 ± 57.75c	309.53 ± 32.07c	841.64 ± 87.21c	7 891.26 ± 817.64c
CF50	13 130.57 ± 927.59b	1181.75 ± 83.48b	656.53 ± 46.38b	1 785.17 ± 126.11b	16 737.79 ± 1 182.42b
CF70	15 041.65 ± 79.44a	1353.45 ± 7.15a	752.08 ± 3.97a	2 044.99 ± 10.8a	19 173.88 ± 101.26a
CF100	15 684.46 ± 225.11a	1411.60 ± 20.26a	784.23 ± 11.26a	2132.38 ± 30.6a	19 993.28 ± 286.95a

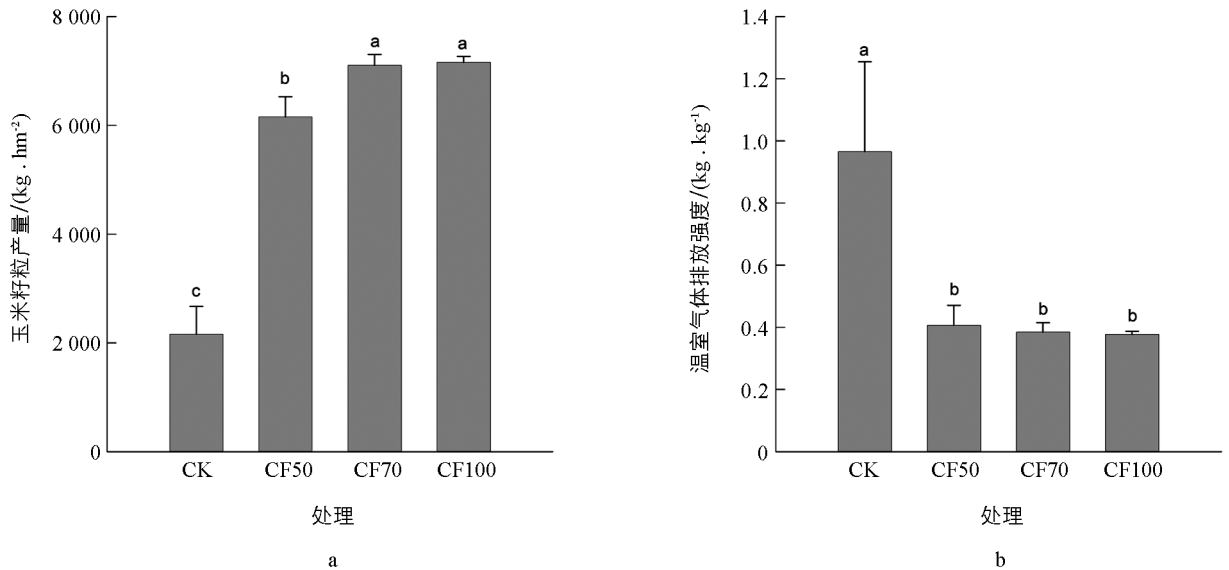


图 3 玉米籽粒产量及温室气体排放强度(平均值±标准误)

表 4 不同施氮处理土壤基本理化性质(平均值±标准误)

处理	pH 值	SOC/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TN/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	TP/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	C/N
CK	$5.77 \pm 0.05\text{a}$	$25.58 \pm 0.19\text{b}$	$1.50 \pm 0.074 \text{ a}$	$0.30 \pm 0.05\text{a}$	$17.10 \pm 0.91 \text{ a}$
CF50	$5.72 \pm 0.07\text{a}$	$27.63 \pm 0.37\text{a}$	$1.80 \pm 0.13 \text{ a}$	$0.33 \pm 0.02\text{a}$	$15.50 \pm 1.32 \text{ a}$
CF70	$5.50 \pm 0.04\text{b}$	$28.01 \pm 0.62\text{a}$	$1.90 \pm 0.25 \text{ a}$	$0.35 \pm 0.01\text{a}$	$15.14 \pm 1.65 \text{ a}$
CF100	$5.48 \pm 0.03\text{b}$	$26.72 \pm 0.56\text{ab}$	$1.93 \pm 0.14 \text{ a}$	$0.31 \pm 0.01\text{a}$	$14.00 \pm 1.32 \text{ a}$

3 讨论

3.1 施氮处理对温室气体的影响

农田土壤 CO_2 排放主要取决于根系微生物的呼吸作用和土壤有机质的矿化作用^[20], 其变化与温度、土壤含水量、土壤养分等因素密切相关. 已有研究指出, 温度升高加速土壤有机质的分解^[21]. 在本研究观测期间, 7 月份温度较高(图 1a), 且在追肥后, 土壤 CO_2 排放量达到最高; 8 月份 CO_2 排放通量较低, 其可能的原因是土壤水分限制了微生物活性, 导致 CO_2 排放通量减少. 例如叶德练等^[22]指出 β -葡萄糖苷酶和多酚氧化酶活性与水分呈显著正相关关系, 当土壤含水量较低时, 碳相关的酶活性降低, 在土壤含水率较低的情况下, 过氧化氢酶和多酚氧化酶活性降低^[23], 最终导致 CO_2 排放通量降低^[24]. 施氮量与土壤 CO_2 排放通量的研究国内外已有报道, Jin 等^[25]在华东地区研究发现, 土壤 CO_2 随着施氮量的增加而增加; 李睿达等^[26-27]在广西研究也发现, 随着施氮量的增加, 土壤中有效氮质量分数增加促进了有机质的分解矿化, 从而产生大量的 CO_2 ; Kandel 等^[28]在美国研究发现, 农作物土壤 CO_2 通量对施氮量响应较强, 呈正相关关系. 在本研究中随着施氮量的增加 CO_2 排放通量增加, 不同施氮量较 CK 增加了 39.04%~78.56%, 其原因可能是氮肥施用量的增加导致土壤 C/N 减小, 使微生物更容易被分解利用, 从而刺激土壤呼吸, 增加 CO_2 排放通量^[16]. 另外, 施氮可增强植物光合作用^[29], 同时刺激根和微生物, 增强土壤呼吸^[12], 导致 CO_2 排放通量增强. 施氮通过促进土壤有机质的矿化, 降低土壤 pH 值, 增加土壤碳积累和释放速率, 促进 CO_2 排放^[30]. 在本研究中 3 个施氮处理的累积排放量差异无统计学意义, 其可能原因是供试土壤中的氮营养充足, 氮不再是限制微生物活动的主要因素^[31], 这与李燕青等^[8]研究结果一致, CO_2 累积排放通量随着施氮量增加呈上升趋势, 但各施氮梯度差异无统计学意义.

CH_4 在玉米追肥后 2~3 周出现排放峰值, 这与前人研究相似^[32]. 其可能的原因是氮肥的添加为土壤微生物提供了大量的能源, 使其产甲烷菌数量增加, 从而导致 CH_4 排放量增加. CH_4 受温度、湿度、pH

值和氧化还原电位等影响,因此表现出较大的空间差异性^[26].本研究 CH₄ 排放呈正负波动,排放通量较小,可能是 CH₄ 的产生主要是在厌氧条件下,而旱地土壤较为干燥,通气条件较好,更多的氧气进入土壤将 CH₄ 氧化^[33],从而排放量减少.在本研究中施氮处理并未对 CH₄ 累积排放量产生显著影响,这与谢立勇等^[34]研究结果一致,氮肥对土壤 CH₄ 产生的影响受土壤肥力的影响,当土壤有机碳和全氮质量分数较高时,施氮对 CH₄ 排放量的影响不显著.

农田中的 N₂O 主要由硝化和反硝化作用产生^[35],而土壤水分主要通过影响土壤通气、土壤氧化还原和土壤微生物活性来影响土壤 N₂O 排放^[36].在本研究中,N₂O 排放通量在 7 月份达到峰值,其可能的原因是土壤温度和水分共同作用^[37].已有研究表明,当土壤湿度(WFPS)小于 60%时,硝化作用是土壤产生 N₂O 的主要过程,而在大于 60%时,反硝化作用是土壤产生 N₂O 的主要过程^[38].本研究各处理间 N₂O 累积排放通量虽差异无统计学意义,但却随着施氮量的增加而呈增加趋势,这与李平等^[31]研究结果一致,施氮处理与对照相比有升高趋势,但差异无统计学意义.这可能是土壤温度、水分以及土壤养分共同作用下的结果,但实验监测时间不长,差异无统计学意义.较高的施氮量有利于 N₂O 的排放^[39],氮肥施加量增加,为硝化和反硝化提供充足的底物,提高耗氧量,形成厌氧环境,从而促进反硝化和 N₂O 排放^[40].许宏伟等^[41]研究发现土壤矿质态氮是硝化和反硝化作用的限制因素,增加施氮量会使 NH₄⁺-N,NO₃⁻-N 质量分数增加,增加了土壤氮素供应,从而增加 N₂O 排放.陈津赛等^[42]也指出施氮量的增加会降低表层土壤温度,提高土壤硝态氮和铵态氮质量分数,减小耕层土壤水稳性团聚体的平均粒径,降低团聚体的稳定性,增加 N₂O 的排放量.

3.2 施氮处理对玉米产量的影响

土壤氮素营养是影响玉米生长发育和籽粒产量的主要因素.添加氮肥可刺激植物生长,从而提高农田生态系统的总初级生产力^[43].施用氮肥可以为土壤提供丰富的养分,同时能够激活土壤中潜在的养分,改善土壤理化性质,提高作物产量^[44].Shen 等^[45]研究发现,施氮肥可显著提高土壤硝态氮质量分数,改善玉米生长发育过程中土壤有效氮的供给,促进根系生物量增加,扩大根系养分吸收面积,为地上生长提供养分,从而提高玉米产量.马晓霞等^[46]研究发现与不施肥相比,施肥后土壤速效氮增加,微生物活性和功能(脲酶和过氧化氢酶)提升,促进玉米根部养分吸收,提高籽粒产量.

在本研究中玉米地上部生物量和籽粒产量随着施氮量的增加而增加,但 CF70 与 CF100 处理的产量相近,差异无统计学意义.表明本研究区域施氮量超过 CF70 时,其增产效果不显著,可能的原因是过量的施肥会使土壤肥力下降,从而减少作物产量^[47].张学林等^[7]研究发现适量施加氮肥可降低土壤 pH 值,酸化土壤,促进土壤养分的活化和供给;但过量施氮会导致土壤酸化严重,土壤解毒功能显著降低,不利于提高作物粮食产量.已有研究表明,当施氮量为 60~180 kg/hm² 时,施氮改善了根系生长和玉米植株的生理特性,促使土壤微环境发生改变,能更好地让植物进行光合作用,发达的根系可显著提高植物水分利用效率,最终提高作物产量^[48].吕鹏等^[49]研究也发现,随着施氮量的增加,玉米产量先增加后降低,当施氮量为 240~360 kg/hm² 时,植株氮素总积累量和氮肥利用率均达到最大,实现玉米高产.罗上轲等^[50]在贵州研究发现,随着施氮量的增加,春玉米产量、地上干物质和氮素积累量均先增加后减少,施氮量为 240 kg/hm² 时春玉米产量达最高,干物质营养累积量最大.因此,适宜的施氮量可促进作物产量增加,使干物质营养累积,水分利用效率等达到最高,过量施氮则会造成土壤酸化严重,不利于作物增产.

3.3 施氮处理对全球增温潜势及温室气体排放强度的影响

GWP 由 CO₂,CH₄ 和 N₂O 共同决定,而旱作土壤中 CH₄ 贡献较低,有时还表现为弱汇.在本研究中,CO₂ 排放通量约占总 GWP 的 90%,因此,CO₂ 排放通量的大小直接影响了 GWP 值.在本研究中,氮肥使用促进了 N₂O 的排放,与对照 CK 相比,施氮处理下 N₂O 排放量提高了 33.95%~201.32%,说明施加氮肥为硝化细菌提供底物,进而促进了 N₂O 排放,并且高氮施用量会显著增加氮肥的气态损失,降低作物氮肥利用率^[51].此外,环境因子对 GWP 的影响也不容易忽视,N₂O 与土壤温湿度呈显著正相关关系^[41],pH 值是影响 N₂O 排放的重要环境因子,在碱性地区,降低 pH 值能起到固氮减排的效果^[52].在本研究中,各施氮处理间 GWP 有上升趋势,但差异无统计学意义,这与牛东等^[53]研究结果一致,不同施氮

量可使 *GWP* 增加,但处理间差异无统计学意义,主要原因是 CO_2 排放通量是 *GWP* 的主要部分,本试验供试土壤养分充足,氮施加对其排放差异无统计学意义,在水分、温度以及施肥方式的共同作用下, CO_2 累积排放差异无统计学意义,最终导致各施氮处理间 *GWP* 差异无统计学意义。

温室气体排放强度反映了温室气体累积排放量与作物产量的关系,是现阶段低碳农业的评价指标. 本研究中 *GHGI* 值为 0.38~0.97 kg/kg,与前人结果相似^[9],CK 处理 *GHGI* 最高,说明不施氮肥,土壤肥力较低,导致产量低下^[45],而随着施氮量的增加,玉米籽粒产量随着增加,与 *GWP* 共同决定了 *GHGI* 大小. 施氮处理的温室气体排放强度较弱,低于 CK,这是玉米产量和温室气体累积排放量的共同作用的结果,说明合理的氮肥施用量可以缓解玉米生产对全球变暖的影响. 郝小雨等^[54]在传统施肥的基础上减量 20%氮肥, N_2O 排放通量显著降低,且玉米产量无显著变化,但温室气体排放强度降低了 29.1%. Ma 等^[55]研究也发现,在传统施肥的基础上减少 10%或 25%,*GWP* 分别下降了 20%和 14%,可有效降低 *GHGI* 值. 表明在合适的施氮量下,可以实现玉米不减产,并显著降低 *GHGI*,实现温室气体减排效果^[56]. 可见,高氮肥施加会增加温室气体排放,但对作物增产并无促进作用,不利于实现温室减排. 在本研究中,减量 30%化肥(CF70)可不减少玉米产量,并减少温室气体排放量,是该区玉米旱地合理的施肥量。

4 结论

施加氮肥可促进玉米生长季 CO_2 和 N_2O 排放通量提升并提高玉米生物量及籽粒产量,但较当地传统施肥(CF100),化肥减量 30%(CF70)玉米不减产,而化肥减量 50%显著降低玉米产量. 结合温室气体排放强度,在当地传统施肥基础上,氮肥减量 30%可实现玉米不减产,且对温室气体排放强度无显著影响,可实现化肥减量增效,符合农业的可持续发展目标。

参考文献:

- [1] WANG A, TANG L H, YANG D W, et al. Spatio-Temporal Variation of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in the Upper Yangtze River Basin from 1990 to 2012 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(11): 2189-2201.
- [2] 熊浩,张保成,李建柱,等. 灌水量对冬小麦农田土壤 N_2O 与 CO_2 排放的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 41-50.
- [3] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [4] 李巧玲,肖忠,安杰,等. 不同间作模式对田间杂草防控及栀子产量的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(3): 172-178.
- [5] 方林发,张宇亭,谢军,等. 氮肥用量和运筹对冷浸田水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 53-60.
- [6] 蒋达波,宗秀虹,李帮秀,等. 氮素胁迫对玉米光合及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(1): 135-139.
- [7] 张学林,徐钧,安婷婷,等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2687-2699.
- [8] 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.
- [9] QIU W H, LIU J S, LI B Y, et al. N_2O and CO_2 Emissions from a Dryland Wheat Cropping System with Long-Term N Fertilization and Their Relationships with Soil C, N, and Bacterial Community [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(8): 8673-8683.
- [10] SHCHERBAK I, MILLAR N, ROBERTSON G P. Global Metaanalysis of the Nonlinear Response of Soil Nitrous Oxide (N_2O) Emissions to Fertilizer Nitrogen [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(25): 9199-9204.
- [11] 齐鹏,王晓娇,姚一铭,等. 不同耕作方法和施氮量对旱作农田土壤 CO_2 排放及碳平衡的影响 [J]. *草业学报*, 2021, 30(1): 96-106.
- [12] WANG X L, CHEN Y, YANG K P, et al. Effects of Legume Intercropping and Nitrogen Input on Net Greenhouse Gas Balances, Intensity, Carbon Footprint and Crop Productivity in Sweet Maize Cropland in South China [J]. *Journal of*

Cleaner Production, 2021, 314: 127997.

- [13] 赵堂甫, 赵欢, 肖厚军, 等. 缓释肥对贵州黄壤地辣椒产量、品质及肥料利用率的影响 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(10): 2373-2377.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [15] 徐驰, 谢海宽, 丁武汉, 等. 油菜-水稻复种系统一次性施肥对 CH_4 和 N_2O 净排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3972-3984.
- [16] 张学良, 张宇亭, 刘瑞, 等. 绿肥不同还田方式对土壤温室气体排放的影响 [J]. 草业学报, 2021, 30(5): 25-33.
- [17] LEE H H, KIM S U, HAN H R, et al. Mitigation of Global Warming Potential and Greenhouse Gas Intensity in Arable Soil with Green Manure as Source of Nitrogen [J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117724.
- [18] HUANG Y, ZHANG W, SUN W J, et al. Net Primary Production of Chinese Croplands from 1950 to 1999 [J]. Ecological Applications, 2007, 17(3): 692-701.
- [19] CATES A M, JACKSON R D. Cover Crop Effects on Net Ecosystem Carbon Balance in Grain and Silage Maize [J]. Agronomy Journal, 2019, 111(1): 30-38.
- [20] 李晓菡, 邹俊亮, 武菊英, 等. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析 [J]. 地球与环境, 2022, 50(1): 73-82.
- [21] 李赞, 王春梅, 高士杰, 等. 模拟增温和氮沉降的耦合作用对高寒泥炭湿地土壤碳激发效应的影响 [J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2430-2438.
- [22] 叶德练, 齐瑞娟, 张明才, 等. 节水灌溉对冬小麦田土壤微生物特性、土壤酶活性和养分的调控研究 [J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 224-231.
- [23] 鄢紫薇, 高璟赟, 张秀玲, 等. 不同水分处理对华中地区稻田土壤酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 91-98.
- [24] LIU Y H, SHAHBAZ M, GE T D, et al. Effects of Root Exudate Stoichiometry on CO_2 Emission from Paddy Soil [J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 101: 103247.
- [25] JIN W Y, LI M, HE Y H, et al. Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration during Growing Season in Winter Wheat (*Triticum Aestivum*) [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(3): 249-257.
- [26] 李睿达, 张凯, 苏丹, 等. 施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3903-3910.
- [27] TAFAZOLI M, HOJJATI S M, JALILVAND H, et al. Effect of Nitrogen Addition on Soil CO_2 Efflux and Fine Root Biomass in Maple Monocultures of the Hyrcanian Region [J]. Annals of Forest Science, 2021, 78(2): 1-11.
- [28] KANDEL T P, GOWDA P H, NORTHUP B K. Influence of Tillage Systems, and Forms and Rates of Nitrogen Fertilizers on CO_2 and N_2O Fluxes from Winter Wheat Cultivation in Oklahoma [J]. Agronomy, 2020, 10(3): 320.
- [29] 涂婷婷, 江长胜, 胡曼利, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 CO_2 通量的影响 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4720-4730.
- [30] 于伟家, 李雪松, 陈竹君, 等. 氮肥对不同无机碳含量土壤二氧化碳释放的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2493-2500.
- [31] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2360-2367.
- [32] LI D M, LIU M Q, CHENG Y H, et al. Methane Emissions from Double-Rice Cropping System under Conventional and no Tillage in Southeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(2): 77-81.
- [33] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田 CH_4 和 N_2O 排放通量研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 924-934.
- [34] 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 481-487.
- [35] 王楷, 史雷, 马龙, 等. 有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N_2O 的排放特征及微生物特性 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6038-6046.
- [36] 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.
- [37] 姚凡云, 刘志铭, 曹玉军, 等. 不同类型氮肥对东北春玉米土壤 N_2O 和 CO_2 昼夜排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3680-3690.
- [38] DOBBIE K E, SMITH K A. Nitrous Oxide Emission Factors for Agricultural Soils in Great Britain: The Impact of Soil

- Water-Filled Pore Space and other Controlling Variables [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 204-218.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 许宏伟,李娜,冯永忠,等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5668-5676.
- [42] 陈津赛,孙玮皓,王广帅,等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N_2O 排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3961-3968.
- [43] 游成铭,胡中民,郭群,等. 氮添加对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2142-2150.
- [44] 张雅蓉,李渝,刘彦伶,等. 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1275-1285.
- [45] SHEN J B, LI C J, MI G H, et al. Maximizing Root/Rhizosphere Efficiency to Improve Crop Productivity and Nutrient Use Efficiency in Intensive Agriculture of China [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(5): 1181-1192.
- [46] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502-5511.
- [47] JING J, ZHANG F, RENGEL Z, et al. Localized Fertilization with P Plus N Elicits an Ammonium-Dependent Enhancement of Maize Root Growth and Nutrient Uptake [J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176-185.
- [48] LI S X, WANG Z H, LI S Q, et al. Effect of Nitrogen Fertilization under Plastic Mulched and Non-Plastic Mulched Conditions on Water Use by Maize Plants in Dryland Areas of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 162: 15-32.
- [49] 吕鹏,张吉旺,刘伟,等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 852-860.
- [50] 罗上轲,刘婕,叶开梅,等. 覆膜方式与施氮量对春玉米产量、干物质和氮素积累与转运的影响 [J]. *玉米科学*, 2020, 28(4): 146-154, 164.
- [51] 卢九斤,聂易丰,魏娇娇,等. 不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(1): 210-220.
- [52] 赵星涵,刘东,黄凯,等. 我国北方几种玉米和设施菜地土壤的 N_2O 和 N_2 排放特征 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3204-3212.
- [53] 牛东,潘慧,丛美娟,等. 氮肥运筹和秸秆还田对麦季土壤温室气体排放的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(12): 1667-1673.
- [54] 郝小雨,周宝库,马星竹,等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [55] MA Y C, KONG X W, YANG B, et al. Net Global Warming Potential and Greenhouse Gas Intensity of Annual Rice-Wheat Rotations with Integrated Soil-Crop System Management [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 209-219.
- [56] LI C J, XIONG Y W, HUANG Q Z, et al. Impact of Irrigation and Fertilization Regimes on Greenhouse Gas Emissions from Soil of Mulching Cultivated Maize (*Zea Mays* L.) Field in the Upper Reaches of Yellow River, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120873.