



等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响

李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 田明慧, 吴梅, 李潮海, 杨青华, 张学林✉

河南农业大学农学院/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室/2011 河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002

摘要: 【目的】明确大田等氮量条件下, 有机肥替代化肥对玉米农田土壤温室气体(N_2O 和 CO_2)排放及其增温潜势的影响, 为稳定作物产量、减少化肥投入、减少氮肥流失、提高氮肥利用效率提供理论依据。【方法】2018和2019年大田采用静态箱-气相色谱法, 以不施肥(CK)为对照, 比较等氮量条件下常规单施化肥(NPK)、有机肥替代30%(化学肥料 $180\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $90\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$, NPKM30)、有机肥替代50%(化学肥料 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $135\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$, NPKM50)对夏玉米生育期土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响, 并估算玉米季农田温室气体排放量、全球增温潜势(global warming potential, GWP)和农业碳足迹(carbon footprint)。【结果】等氮量条件下 NPK、NPKM30和NPKM50处理间的玉米籽粒产量没有显著差异。玉米整个生育期土壤 N_2O 排放通量呈动态变化, 且3个施肥处理的 N_2O 排放通量均高于对照。与NPK相比, NPKM30处理两年 N_2O 累积排放量均值增加5.22%, 而NPKM50处理降低7.92%。玉米生育期 N_2O 累积排放量占土壤全氮的12.91‰—18.74‰。3个施肥处理间 CO_2 排放通量的季节变化趋势基本一致, 变幅为 $74.53\text{—}367.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。施肥显著增加 CO_2 累积排放量, 与NPK相比, NPKM30和NPKM50处理两年 CO_2 累积排放量均值分别增加0.91%和5.79%; GWP分别增加2.07%和2.10%。与NPK处理相比, NPKM30处理的温室气体排放强度(GHGI)和单位产量碳足迹降低2.46%和1.43%, 而NPKM50处理增加3.37%和1.43%。【结论】部分有机肥替代化肥能够增加玉米田土壤温室气体排放量和全球增温潜势, 但能够保持玉米产量稳定, 同时有效降低温室气体排放强度和单位产量碳足迹, 综合考虑玉米产量和生态效益, 有机肥替代30%(NPKM30)是实现玉米稳产减肥减排较为理想的有机肥替代化肥比例。

关键词: 有机肥替代化肥; 温室气体; 全球增温潜势; 温室气体排放强度; 碳足迹

Effect of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizers on Greenhouse Gas Emission Under the Conditions of Same Nitrogen Fertilizer Input in Maize Farmland

LI XiaoLi, HE TangQing, ZHANG ChenXi, TIAN MingHui, WU Mei, LI ChaoHai, YANG QingHua, ZHANG XueLin✉

Agronomy College, Henan Agricultural University/State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops for 2011, Zhengzhou 450002

Abstract: 【Objective】 The aim of this study was to investigate the effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on soil greenhouse gas emission and global warming potential (GWP), so as to provide the theoretical basis for keeping crop yield stable, reducing fertilizer input and nitrogen (N) loss, and improving N use efficiency. 【Method】 In 2018 and 2019, a field experiment was

收稿日期: 2021-01-17; 接受日期: 2021-04-22

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFD0200605)、河南省自然科学基金(182300410013)

联系方式: 李晓立, E-mail: 18647376576@163.com. 通信作者张学林, Tel: 13643867669; E-mail: xuelinzhang1998@163.com, zx11998@henau.edu.cn

conducted to study the effects of different organic fertilizers replacing chemical fertilizers rate on soil N_2O flux, CO_2 flux and GWP and carbon footprint by using static chamber and gas chromatography in maize yield. Four treatments, including control (CK), single application of inorganic fertilizer (NPK), organic fertilizer replacing 30% inorganic fertilizers (inorganic fertilizers $180 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ + organic fertilizer $90 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$, NPKM30), and organic fertilizer replacing 50% inorganic fertilizers (inorganic fertilizers $135 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ +organic fertilizer $135 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$, NPKM50), were established during maize growth periods.【Result】There was no significant difference of maize grain yield among NPK, NPKM30 and NPKM50 in 2018 and 2019. During the maize growth periods, the N_2O emission flux showed temporal variations, and the average fluxes under three fertilizer treatments were higher than that under CK. Compared with NPK, NPKM30 increased the N_2O cumulative emission by 5.22%, while reduced by 7.92% for NPKM50 treatment. The N_2O cumulative emission over the maize growth periods accounted for 12.91‰ -18.74‰ of soil total N. During the maize growth periods, soil CO_2 flux showed similar temporal patterns among the four treatments, and the average flux for the two years ranged from 74.53 to $367.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Fertilization input significantly increased the cumulative CO_2 emission, and the average CO_2 accumulation under NPKM30 and NPKM50 treatments increased by 0.91% and 5.79% than that under NPK treatment, respectively. The average GWP under NPKM30 and NPKM50 treatments was 2.07% and 2.10% higher than that under NPK treatment, respectively. Compared with the NPK treatment, the GHGI and carbon emissions from per unit yield under NPKM30 treatment decreased by 2.46% and 1.43%, respectively, and increased by 3.37% and 1.43% under NPKM50 treatment, respectively.

【Conclusion】 Suitable organic fertilizer rate replacing some chemical fertilizer could keep maize yield stable, increase greenhouse gas emission and global warming potential, while reduce greenhouse gas emission intensity and carbon emissions from per unit yield. Considering the ecological benefits of maize production and greenhouse gas emissions, the organic fertilizer replacing 30% inorganic fertilizers would be a more ideal proportion of organic fertilizer to replace chemical fertilizer.

Key words: organic fertilizer replacing chemical fertilizer; greenhouse gas; global warming potential; greenhouse gas emission intensity; carbon footprint

0 引言

【研究意义】农田 N_2O 和 CO_2 等温室气体排放所引起的全球变暖是人类面临的重要生态环境问题之一^[1-2]。农业管理措施特别是施肥对 N_2O 和 CO_2 的排放影响很大^[3-4]。据统计,中国化肥施用量接近世界总量的 1/3^[5],因化肥施用产生的 N_2O 占总排放的 92.6%^[6]。采用部分有机氮肥替代化学氮肥是稳定作物产量、减少温室气体排放的重要措施之一^[7]。但有机肥的施用增加了土壤有机质含量,有机碳含量是决定土壤呼吸强度的重要因素^[8]。据统计,全球每年 CO_2 总排放量有 5%—20%来源于土壤呼吸^[9]。因此研究有机氮肥替代化学氮肥的用量,稳定作物产量的同时减少 N_2O 和 CO_2 两种温室气体的排放,对减氮增效稳产和农业可持续发展具有重要的意义^[10]。

【前人研究进展】农田土壤中 N_2O 的排放主要由硝化(氨氧化为硝酸盐)和反硝化(NO_3^- 还原成 N_2)两个过程产生^[11]。影响硝化与反硝化过程的农田管理措施如施肥等^[12-14]显著影响土壤 N_2O 的排放^[14]。减少氮肥用量、减轻温室气体环境污染是研究人员关注的重点。翟振等^[15]通过研究有机无机肥料配施对春玉米农田 N_2O 排放,认为有机无机肥料配施(50%M+50%U)较单施化肥可显著降低土壤 N_2O

排放。毕智超等^[16]发现,与单施化肥相比有机无机肥料 1:1 配施处理显著降低 N_2O 周年累积排放量的 36%;而陈雪双等^[17]和 JIA 等^[18]认为有机无机配施与单施化肥处理间 N_2O 排放差异不显著。这些结果表明有机肥影响土壤氮素转化及温室气体排放的研究结果并不一致^[15,18]。有机肥作为一种增加土壤碳汇的措施,同时也增加农田 CO_2 的排放^[19]。李燕青等^[14]采用长期定位试验研究化肥和有机肥在不同施肥水平下玉米季潮土 CO_2 的排放特征发现,等氮条件下有机肥处理显著增加了农田土壤 CO_2 的排放量。王晓娇等^[20]采用 Meta 分析有机肥施用对我国北方农田土壤 CO_2 排放的影响,发现有机肥施用总体上显著提高农田土壤 CO_2 排放量,与不施肥和施用无机肥相比分别提高 50.6%和 36.3%。【本研究切入点】如何在保障玉米产量的同时有效降低 N_2O 和 CO_2 两种温室气体的排放,是实现农业绿色生产迫切需要思考的问题。前人的研究更多关注化肥、有机无机配施对单一温室气体的影响,等氮条件下砂姜黑土区有机肥替代化肥的可行性及减量比例对土壤 N_2O 和 CO_2 温室气体的综合影响效应研究较少。【拟解决的关键问题】本试验以黄淮海夏玉米农田为研究对象,等氮量条件下研究了有机肥替代化肥比例对玉米产量和温室气体排放的影响,明确综合平衡玉米产量与温室气

体排放量条件下的最佳有机肥替代化肥用量,为黄淮海地区稳定玉米产量、减少化肥用量、减少温室气体排放,实现化肥减量增效稳产的绿色生产提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2018 年和 2019 年 6—10 月夏玉米生长季,在河南省西平县二郎乡张尧村(114°02'E,

33°20'N, 平均海拔 49 m) 进行。西平县地处北亚热带向暖温带过渡地带,属亚湿润大陆性季风气候。年均日照时数 1 886 h, 平均气温 15.8℃, 无霜期 221 d, 降雨量 1 027 mm, 属典型的雨养农业区。土壤类型为砂姜黑土。试验期间大气温度、降雨量如图(图 1) 所示。0—20 cm 土层砂粒含量 39.09%、粉粒 21.35%和黏粒 39.56%, 有机质含量 15.59 g·kg⁻¹, 全氮 1.53 g·kg⁻¹, 碱解氮 120.5 mg·kg⁻¹, 速效磷 24.26 mg·kg⁻¹, 速效钾 34.66 mg·kg⁻¹, pH 5.26。

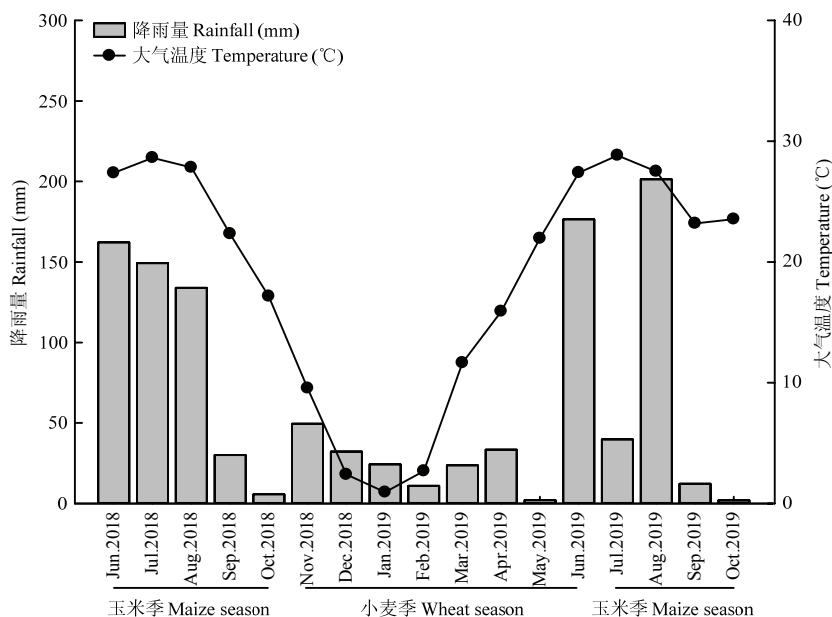


图 1 2018—2019 年玉米和小麦生育期间降雨量和大气温度

Fig. 1 Temporal variations of rainfall and climate temperature during maize and wheat growth periods in 2018 and 2019

1.2 试验设计

本试验采用单因素设计,设 CK(不施肥)、单施化肥(NPK)、有机肥替代 30%(化学肥料 180 kg N·hm⁻²+有机肥 90 kg N·hm⁻², NPKM30)、有机肥替代 50%(化学肥料 135 kg N·hm⁻²+有机肥 135 kg N·hm⁻², NPKM50) 4 个处理,4 次重复,共 16 个小区,小区面积为 40 m²(4 m×10 m)。所选品种为生产上大面积推广应用的郑单 958,种植密度为 67 500 株/hm²。于每年 6 月 10 日左右播种,试验中所用有机肥由济源众德生物工程 有限公司提供(有机质 45%、N 2.2%、P₂O₅ 1.4%、K₂O 1.4%),无机肥分别为尿素(N 46.5%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%)。各施肥处理均采用等量氮、磷和钾,氮磷钾施用量分别为 270 kgN·hm⁻²、90 kgP₂O₅·hm⁻²、

120 kg K₂O·hm⁻²。磷肥、钾肥和有机肥以基肥形式一次性施入(6 月 6 日和 9 日),氮肥在拔节期(25%)和大喇叭口期(25%)进行追肥,玉米季肥料氮施用情况如表 1。有机肥处理中,磷钾肥不足部分用过磷酸钙和氯化钾进行补充,并在播前均匀撒施后翻耕入土,玉米成熟期(10 月 5 日左右)收获,并进行相关参数的测定分析。2018 和 2019 年玉米生育期的生产投入一致,整个生育期不同生产要素的投入量见表 2。

1.3 气体样品采集与测定

大田采用密闭式静态箱法采集 N₂O 气体样品。气体采样箱由箱体和底座组成,底座上有密封槽,规格为 59.5 cm×17 cm×20 cm(长×宽×高),每个小区放置 1 个静态箱。抽气前将箱子底座埋在土壤中,在密封槽中加入水,然后罩上箱体,形成一个密闭环境,

表 1 玉米季各试验处理有机肥氮和无机肥氮施用量

Table 1 Application of organic fertilizer N and inorganic fertilizer N rate during maize growth periods

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer (kg·hm ⁻²)		追肥 Topdressing (kg·hm ⁻²)	
	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer	拔节期 Jointing period	大喇叭口期 Big trumpet period
CK	0	0	0	0
NPK	0	135	67.5	67.5
NPKM30	90	45	67.5	67.5
NPKM50	135	0	67.5	67.5

表 2 玉米生育期各项生产要素的投入量

Table 2 Different production factors input items during maize growth periods

处理 Treatment	氮肥 N (kg·hm ⁻²)	磷肥 P ₂ O ₅ (kg·hm ⁻²)	钾肥 K ₂ O (kg·hm ⁻²)	杀虫剂 Pesticide (kg·hm ⁻²)	除草剂 Herbicide (kg·hm ⁻²)	灌溉量 Irrigation (m ³ ·hm ⁻²)	柴油 Diesel oil (kg·hm ⁻²)	玉米种子 Maize seed (kg·hm ⁻²)
CK	0	0	0	0.45	6	975	31.5	22.5
NPK	270	90	120	0.45	6	975	31.5	22.5
NPKM30	270	90	120	0.45	6	975	31.5	22.5
NPKM50	270	90	120	0.45	6	975	31.5	22.5

使用 20 mL 针筒从通气阀处抽取样品。每次施肥后连续 6 d 取样，其他每隔 10、20、30 d 采集一次。气体采样一般于晴天的早上 8：00 罩上箱体，在罩上箱体前，采集盒子上方的空气作为密封前 N₂O 的浓度，同时记录箱体温度，密封 1 h 后，每个处理采集 40 mL 气体，采集的 N₂O 气体带回实验室用日本岛津气相色谱仪 GC-2010 测定 N₂O 浓度。

土壤呼吸速率的测定采用田间原位测定方法，测定仪器为美国生产的 LI-8100A 便携式呼吸测量系统。玉米播种后，每个小区随机放置 3 个直径 20 cm、高 11 cm 的 PVC 管底座，埋入土壤中 8 cm，田间监测时，将仪器的气体收集罩置于底座上，启动仪器，待仪器稳定后，开始计时测量，测量时间为 5 min；施肥后连续测 3 d，之后间隔 10、20、30 d 测一次，测量均在晴天上午的 9：00—11：00 内完成。

1.4 植株和土壤样品的取样与测定

2018 年和 2019 年于玉米拔节、吐丝和成熟 3 个关键生育时期，每个小区选取长势均匀有代表性的两株玉米，并以植株为中心挖掘 1/2 行距（60 cm）×1/2 株距（25 cm）范围内深度 20 cm 土体的根系，根系洗净后用根系扫描仪（Expression 11000XL 型）扫描，得到根系总根长、根表面积和根体积等数据。植株和根系样品 105℃ 杀青，75℃ 烘干至恒重并称重。将植株地上和地下部各器官干样粉碎，用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后，采

用流动分析仪（AA3，SEAL-Analytical，Germany）进行全氮测定。玉米成熟后，收获果穗进行考种和计产。

2019 年于玉米拔节、吐丝和成熟 3 个关键生育时期，采集根际和非根际 0—20 cm 土层样品，后用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提，用流动分析仪（AA3，SEAL-Analytical，Germany）测定土壤铵态氮和硝态氮含量。

1.5 计算

（1）N₂O 气体排放通量

$$F=\rho\times H\times(\Delta c/\Delta t)\times273/(273+T)$$

式中，F 为 N₂O 排放通量（μg·m⁻²·h⁻¹）；ρ 为 N₂O 标准状态下的密度（1.964 kg·m⁻³）；H 为取样箱高度（m）；Δc/Δt 为单位时间静态箱内的 N₂O 气体浓度变化率（mL·m⁻³·h⁻¹）；T 为测定时箱体温度（℃）。

（2）土壤 CO₂ 排放通量

$$X=Rs\times3600\times12\times10^{-3}$$

式中，X 为土壤 CO₂ 的排放通量（mg·m⁻²·h⁻¹），Rs 为测定的土壤呼吸速率（μmol·m⁻²·s⁻¹），12 为 CO₂-C 的摩尔质量（g·mol⁻¹）；3600 为换算系数。

（3）N₂O 排放强度

指形成单位经济产量的 N₂O 排放量。计算公式为：

$$I=F/Y$$

式中，I 代表排放强度（kg·t⁻¹）；F 为 N₂O 排放总量（kg·hm⁻²）；Y 为作物产量（t·hm⁻²）。

（4）N₂O、CO₂ 累积排放量

$$M = \sum \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M 为 N_2O (CO_2) 累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); F 为 N_2O (CO_2) 排放通量; i 为采样次数; t 为采样时间 (d); 24 为一天小时数。

(5) N_2O 排放系数

N_2O 排放系数 (%) = (施氮处理 N_2O 排放量 - 不施氮处理 N_2O 排放量) / 施氮量 $\times 100$ 。

(6) N_2O 累积排放量占土壤全氮比重 (Ratio)

$$\text{Ratio} (\text{‰}) = M/TN$$

式中, M 为 N_2O 累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); TN 为土壤全氮含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。土壤重量按 $200 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算。

(7) 农田产生的全球增温潜势 (GWP)

$$GWP = F_{\text{CO}_2} + F_{\text{N}_2\text{O}} \times 298$$

式中, F_{CO_2} 和 $F_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为 CO_2 和 N_2O 的累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); 100 年时间尺度上 N_2O 的全球增温潜势是 CO_2 单位质量的 298 倍^[21]。

(8) 温室气体排放强度 (GHGI)^[22]

$$GHGI = GWP/Y$$

式中, Y 为不同处理单位面积玉米的平均产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

(9) 玉米生育期碳足迹边界和间接排放^[23]

碳足迹计算的边界为玉米种植开始到种植结束, 时间为 4 个月。碳足迹的测算内容包括直接碳足迹和间接碳足迹, 直接碳足迹即农田温室气体 CO_2 和 N_2O , 间接碳足迹指由种子、化肥、农药等农资投入引起的碳排放。其中间接碳排放的计算公式为:

$$CF = \sum_{i=1}^n CF_i = \sum_{i=1}^n m_i \beta_i$$

式中, CF 为农业碳足迹 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), n 表示从播种到收获期间消耗的各种农业生产资料 (农药、化肥、种子等), m_i 表示第 i 种农资的消耗量 (kg), β_i 表示第 i 种农资的碳排放参数 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 具体参数见表 3 (参考前人研究而获得^[24-26])。

(10) 单位产量碳足迹 (CFUY)^[23]

$$CFUY = CF/Y.$$

1.6 统计分析

采用 One way ANOVA 进行处理间产量、植株生物量、氮素积累量、根系性状、土壤铵态氮和硝态氮含量、 N_2O 和 CO_2 排放量、GWP 和 GHGI 方差分析, 并采用 Duncan 比较不同处理之间的差异显著性。所有数据均利用 EXCEL 2016 进行整理, 采用 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行分析, 并用 SigmaPlot 12.5 软件进行作图。

表 3 玉米生育期投入生产资料的碳排放系数

Table 3 Carbon emission indexes of different input items during maize growth periods

生产资料 Input items	碳排放系数 Index of carbon emission (by CO_2)
氮肥 N	1.53 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
磷肥 P_2O_5	1.63 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
钾肥 K_2O	0.65 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
杀虫剂 Pesticide	16.61 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
除草剂 Herbicide	10.15 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
灌溉电力 Electricity	0.80 $\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$
柴油 Diesel oil	3.10 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
玉米种子 Maize seed	1.93 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

2 结果

2.1 有机肥替代化肥对玉米产量的影响

由表 4 可知, 与 CK 相比, NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年玉米籽粒产量均值分别增加 47.37%、54.52% 和 47.28%; 与 NPK 两年产量均值相比, NPKM30 增加了 4.85%, NPKM50 降低了 0.06%, 但 3 个处理之间的差异不显著。说明用有机肥替代部分化肥能够保持玉米产量稳定, 且在 NPKM30 条件下产量达到最高, 为 8 807—12 886 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.2 有机肥替代化肥对植株生物量、氮素积累量、根系性状和土壤养分含量的影响

由表 5 可以看出, 与 CK 相比, NPK、NPKM30、NPKM50 处理两年地上部生物量和根生物量均值分别增加 56.78% 和 33.87%、63.03% 和 45.69%、59.24% 和 59.43%; 与 NPK 相比, NPKM30 和 NPKM50 处理两年地上部生物量和根生物量均值分别增加 3.99% 和 8.82%、1.57% 和 19.09%。说明有机肥替代化肥为玉米生长提供大量营养, 根系可吸收养分增多, 进而促进根系和地上部生物量增加。

由表 5 可知, 地上部氮素积累量随着生育进程呈增加趋势。与 CK 相比, NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年籽粒氮素积累量均值分别增加 75.27%、89.24% 和 91.41%; 地上部氮素积累量均值分别增加 87.62%、96.59% 和 105.11%; 与 NPK 相比, NPKM30 和 NPKM50 处理两年籽粒氮素积累量均值分别增加 7.97% 和 9.21%; 地上部氮素积累量均值分别增加 4.78% 和 9.33%。说明有机肥替代部分化肥可以促进植株体内氮素向玉米籽粒转移。

如图 2 所示, 施肥显著促进玉米各个关键生育时期的根长、根表面积和根体积。与 CK 相比, NPK、

表 4 不同处理之间玉米产量、土壤 N₂O 与 CO₂ 排放量以及全球增温潜势的差异
Table 4 The difference of maize yield, soil N₂O, CO₂ emissions and global warming potential among the treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放 通量 N ₂ O flux (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	N ₂ O 累积 排放量 N ₂ O cumulative emission (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排 放强度 N ₂ O emission intensity (kg·t ⁻¹)	N ₂ O 排 放系数 N ₂ O emission factor (%)	N ₂ O 累积排 放量占土壤全 氮比重 N ₂ O Ratio (‰)	CO ₂ 排放 通量 CO ₂ flux (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	CO ₂ 累积 排放量 CO ₂ cumulative emission (kg·hm ⁻²)	全球增温潜势 GWP (kg·hm ⁻²)	温室气体 排放强度 GHGI (kg·kg ⁻¹)
2018	CK	6399.10±288.53c	211.72±5.99c	4.52±0.32b	0.67±0.03a	0	14.76±1.04b	177.34±36.30c	3674.15±335.41c	5020.37±263.72c	0.79±0.08a
	NPK	8522.88±55.98ab	253.81±1.39b	6.23±0.22a	0.69±0.02a	0.59±0.15a	20.36±0.73a	234.81±11.55b	4333.53±153.99b	6189.98±106.11b	0.73±0.02a
	NPKM30	8807.15±329.88a	275.86±18.60a	6.25±0.49a	0.67±0.06a	0.59±0.14a	20.43±1.61a	235.20±16.59b	4393.73±36.33b	6256.85±150.52b	0.71±0.03a
	NPKM50	8349.92±122.83b	247.16±14.35b	5.89±0.30a	0.67±0.04a	0.48±0.21a	19.25±0.99a	284.30±6.32a	4808.55±190.86a	6564.02±233.98a	0.79±0.04a
2019	CK	7861.60±417.66b	168.22±5.19c	3.38±0.17d	0.41±0.02a	0	11.05±0.54d	192.64±3.22c	3583.36±82.41b	4590.76±115.45c	0.58±0.02a
	NPK	12166.58±1455.93a	269.58±18.25a	4.67±0.17b	0.37±0.03b	0.46±0.11b	15.27±0.57b	227.76±14.48b	4486.64±266.95a	5879.17±241.34ab	0.49±0.05b
	NPKM30	12886.34±1178.23a	275.96±12.12a	5.22±0.15a	0.39±0.02ab	0.66±0.07a	17.06±0.50a	237.48±2.14ab	4506.71±70.87a	6062.18±100.08a	0.47±0.03b
	NPKM50	12326.96±348.83a	216.09±14.06b	4.15±0.21c	0.33±0.02c	0.28±0.09c	13.56±0.69c	241.87±7.31a	4522.70±61.36a	5758.99±91.02b	0.47±0.02b

均值后字母表示不同处理间 $P<0.05$ 水平差异显著性 Different letters in same column indicated a statistically difference among treatment ($P<0.05$)

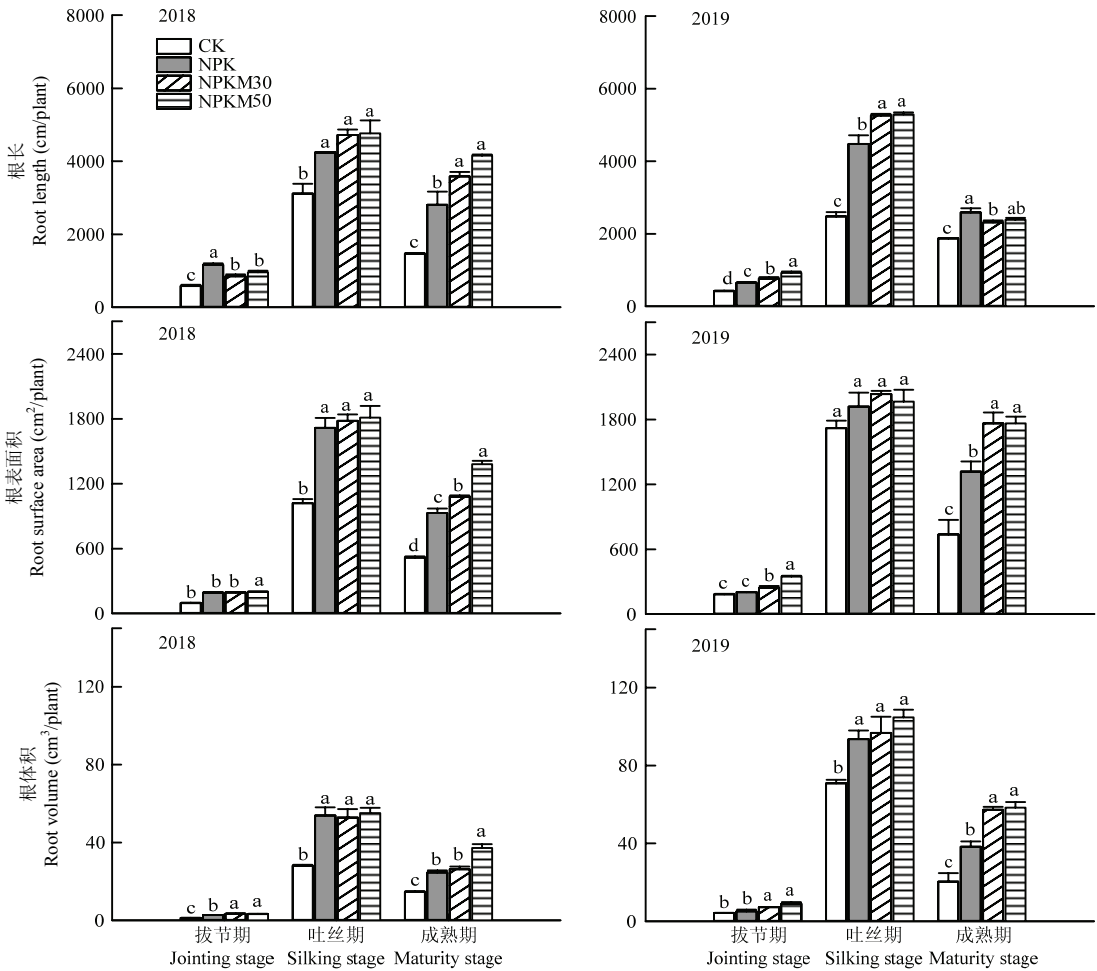


图 2 2018 和 2019 年不同处理之间玉米根长、根表面积、根体积的差异

Fig. 2 The difference of maize root length, root surface area and root volume among treatments in 2018 and 2019

表 5 2018 年和 2019 年不同处理对玉米植株生物量、氮素积累量和土壤养分含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on maize plant biomass, N accumulation and soil nutrient content in 2018 and 2019

参数 Parameter	时期 Period	CK	NPK	NPKM30	NPKM50
生物量 Biomass (g/plant)					
地上部 Aboveground	2018 拔节期 Jointing stage	12.76±1.09b	18.99±2.44a	18.64±0.94a	18.52±1.51a
	2018 吐丝期 Silking stage	69.38±16.75b	106.90±4.57a	112.78±3.67a	119.95±1.59a
	2018 成熟期 Maturity stage	226.06±10.71b	403.20±60.39a	385.51±51.45a	405.39±41.86a
	2019 拔节期 Jointing stage	9.27±2.11b	17.37±1.39a	16.77±2.14a	17.07±0.38a
	2019 吐丝期 Silking stage	148.28±4.07c	167.71±9.36b	169.70±4.85b	191.72±6.03a
	2019 成熟期 Maturity stage	236.94±22.11b	387.47±23.05a	415.29±21.05a	393.20±7.71a
根 Root	2018 拔节期 Jointing stage	0.57±0.12c	0.90±0.03ab	0.66±0.12bc	1.00±0.23a
	2018 吐丝期 Silking stage	8.46±0.95b	11.28±1.08a	10.68±0.20a	10.61±1.50a
	2018 成熟期 Maturity stage	5.84±2.00a	6.72±2.14a	7.79±1.70a	8.99±1.37a
	2019 拔节期 Jointing stage	0.55±0.12c	0.96±0.03ab	0.80±0.15bc	1.13±0.26a
	2019 吐丝期 Silking stage	9.37±1.13b	10.07±1.19b	10.81±1.12a	12.89±1.50ab
	2019 成熟期 Maturity stage	5.50±1.84b	9.25±1.88a	11.89±0.70a	12.04±1.00a
氮素积累量 N accumulation (mg N/plant)					
籽粒 Grain	2018 成熟期 Maturity stage	1062.06±155.77b	1796.03±47.25a	1853.35±65.03a	1891.79±137.66a
	2019 成熟期 Maturity stage	1404.98±281.75b	2527.99±85.31a	2776.74±220.55a	2868.92±625.98a
地上部 Aboveground	2018 拔节期 Jointing stage	316.20±36.52b	578.95±49.54a	576.95±38.64a	576.21±35.50a
	2018 吐丝期 Silking stage	730.92±193.87b	1622.22±108.39a	1877.26±133.01a	1737.69±24.44a
	2018 成熟期 Maturity stage	1855.88±381.54b	4545.08±276.53a	4637.18±52.01a	4641.32±432.87a
	2019 拔节期 Jointing stage	283.00±72.24b	716.77±36.09a	711.64±68.94a	694.13±10.83a
	2019 吐丝期 Silking stage	1879.96±503.84c	2920.41±142.82b	3305.00±247.48ab	3741.69±67.14a
	2019 成熟期 Maturity stage	2039.42±328.46b	4836.64±178.49a	4948.44±23.72a	5043.64±374.47a
非根际土壤 Non-rhizosphere soil (mg·kg ⁻¹)					
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	6.75±0.74a	7.26±0.39a	6.80±0.57a	6.99±0.80a
	2019 吐丝期 Silking stage	6.98±0.18d	57.78±2.59a	32.35±5.43b	10.16±3.78c
	2019 成熟期 Maturity stage	3.34±0.03a	4.05±0.57a	3.24±0.83a	3.27±0.41a
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	5.89±0.28c	18.45±2.18b	26.11±4.96a	27.82±2.44a
	2019 吐丝期 Silking stage	6.75±1.16d	166.70±8.39a	138.92±6.86b	72.11±5.85c
	2019 成熟期 Maturity stage	7.81±0.04b	24.82±0.56a	25.98±0.03a	25.35±2.15a
无机氮 INN (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	12.64±0.94c	25.71±2.00b	32.92±5.99a	35.21±2.04a
	2019 吐丝期 Silking stage	13.73±1.08d	224.49±6.01a	171.27±6.58b	82.27±6.15c
	2019 成熟期 Maturity stage	11.15±0.06b	29.15±0.27a	28.75±0.13a	28.62±2.51a
根际土壤 Rhizosphere soil (mg·kg ⁻¹)					
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	5.87±0.52a	9.55±5.34a	5.45±0.27a	7.16±2.17a
	2019 吐丝期 Silking stage	4.98±0.15a	7.11±2.12a	5.79±0.12a	5.63±0.35a
	2019 成熟期 Maturity stage	3.08±0.31ab	5.20±0.77a	4.19±2.40ab	2.62±0.18b
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	6.13±1.68b	12.08±4.19a	8.40±0.13ab	10.36±1.14ab
	2019 吐丝期 Silking stage	7.21±0.73c	17.73±0.09a	7.98±1.00c	12.81±3.49b
	2019 成熟期 Maturity stage	5.12±0.86b	6.56±0.32b	8.54±1.25a	6.35±1.09b
无机氮 INN (mg·kg ⁻¹)	2019 拔节期 Jointing stage	12.00±2.16b	21.62±6.84a	13.84±0.37b	17.52±1.06
	2019 吐丝期 Silking stage	12.19±0.83c	24.84±2.16a	13.77±0.89c	18.44±3.70b
	2019 成熟期 Maturity stage	8.20±0.56c	11.76±0.64ab	12.73±3.25a	8.97±1.00bc

均值后字母表示不同处理间 $P<0.05$ 水平差异显著性 Different letters in same column indicated a statistical difference among treatment ($P<0.05$)

NPKM30、NPKM50 处理两年根长、根表面积和根体积均值分别增加 46.19%、44.09%和 56.12%，65.05%、64.32%和 91.10%，87.52%、91.10%和 113.84%。与 NPK 相比，NPKM30、NPKM50 处理两年根长、根表面积和根体积均值分别增加 12.90%、14.03%和 11.07%，28.27%、32.63%和 36.97%。说明有机肥替代化肥能够促进玉米根系生长，从而获得更多的土壤养分。

由表 5 可知，与 CK 相比，施肥显著增加了根际和非根际土壤中的养分含量。与 NPK 相比，NPKM30 和 NPKM50 的非根际土壤中铵态氮、硝态氮、无机氮含量在 3 个关键生育时期均值分别降低 38.64%和 70.44%；9.03%和 40.34%；16.61%和 47.70%，而根际

土壤中的铵态氮、硝态氮、无机氮含量分别降低 29.43%和 29.48%、31.50%和 18.83%、30.72%和 22.83%。说明有机肥替代化肥可以促进植株对土壤养分的吸收，降低土壤中无机氮含量。

2.3 有机肥替代化肥对温室气体排放、GWP、GHGI、单位产量碳足迹的影响

2018 和 2019 年玉米生育期内随时间推移土壤 N_2O 排放动态均呈逐渐降低趋势（图 3-A，3-B）。与 CK 相比，NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 N_2O 排放通量均值分别增加 37.75%、45.24%和 21.92%；与 NPK 两年 N_2O 排放通量均值相比，NPKM30 处理增加 5.43%，而 NPKM50 降低 11.49%。

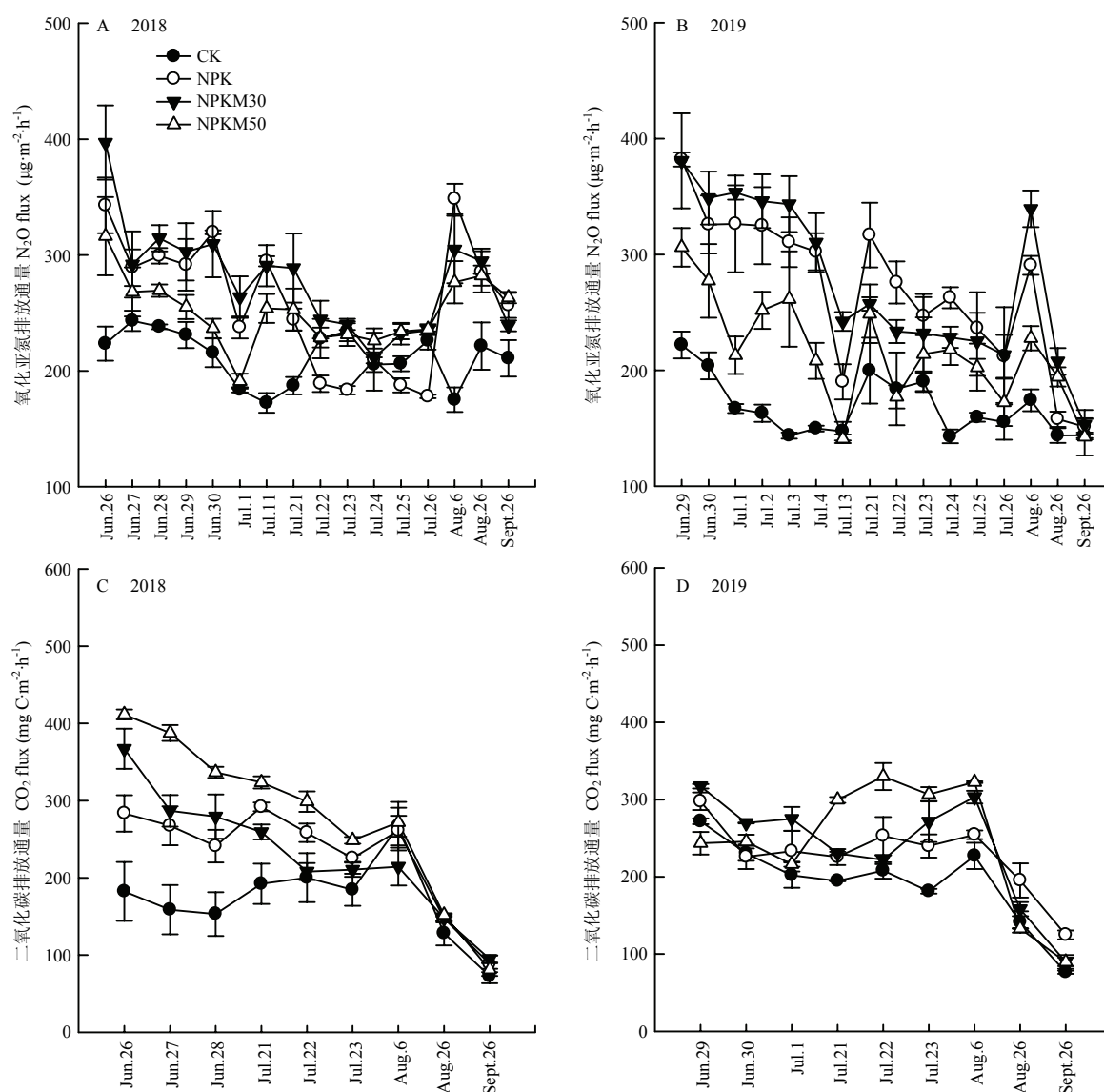


图 3 玉米生长季不同处理土壤 N_2O 和 CO_2 排放通量的动态变化

Fig. 3 Temporal variations of soil N_2O and CO_2 fluxes under different treatments during maize growth periods

由表 4 可知,玉米生育期施肥显著增加 N₂O 累积排放量。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 N₂O 累积排放量均值分别增加 38.04%、45.25%和 27.11%;与 NPK 两年 N₂O 累积排放量均值相比,NPKM30 处理增加 5.22%,NPKM50 处理降低 7.92%。其中 2018 年 N₂O 累积排放量占土壤全氮的 14.76‰—20.43‰,2019 年 N₂O 累积排放量占土壤全氮的 11.05‰—17.06‰。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 N₂O 排放强度均值分别降低 1.65%、1.09%和 8.66 %;与 NPK 两年 N₂O 排放强度均值相比,NPKM30 处理增加 0.57%,而 NPKM50 降低 7.12%。施肥增加了土壤 N₂O 排放系数,与 NPK 两年 N₂O 排放系数均值相比,NPKM30 处理增加 20.53%,NPKM50 降低 32.17%。说明尽管 3 个处理施入氮肥总量相同,但 NPKM50 处理有部分氮素以有机态形式存在,因此 N₂O 释放量相对较 NPK 化肥处理明显减少,NPKM30 处理可能是由于补充了适量碳素,促进微生物活动,增加了 N₂O 释放量。

2018 和 2019 年玉米生育期内随时间推移土壤 CO₂ 排放动态呈逐渐降低趋势(图 3-C, 3-D),且施肥显著增加 CO₂ 排放通量。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 CO₂ 排放通量均值分别增加 25.03%、27.75%和 42.22%;与 NPK 相比,NPKM30 和 NPKM50 处理两年 CO₂ 排放量通量均值分别增加 2.18%和 13.75%。说明玉米农田施肥对土壤呼吸的影

响较大,有机肥替代化肥能够增加 CO₂ 的排放量。

由表 4 可知,施肥显著增加 CO₂ 累积排放量。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 CO₂ 累积排放量均值分别增加 21.53%、22.64%和 28.57%;与 NPK 相比,NPKM30 和 NPKM50 处理两年 CO₂ 累积排放量均值分别增加 0.91%和 5.79%。由表 4 可知,施肥显著增加了 GWP,但降低了 GHGI。且等氮量条件下施用有机肥处理的 GHGI 与单施化肥处理相比差异不显著。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 GWP 均值分别增加 25.57%、28.17%和 28.22%;与 NPK 相比,NPKM30 和 NPKM50 处理两年 GWP 均值增加了 2.07%和 2.10%。与 CK 相比,NPK、NPKM30 和 NPKM50 处理两年 GHGI 均值分别降低 11.56%、13.73%和 8.58%;与 NPK 两年 GHGI 均值相比,NPKM30 处理降低 2.46%,而 NPKM50 处理增加 3.37%。说明有机肥替代部分化肥(NPKM30)在增加产量的同时并没有显著增加土壤 GWP 和 GHGI。

由表 6 可知,玉米整个生产过程中土壤温室气体排放(直接排放)是碳排放的主要来源,占总碳排放的 83.33%—89.41%,其次是灌溉和化肥,除草剂和杀虫剂导致的碳排放相对较低。施肥增加了总碳排放量,与 NPK 相比,NPKM30 和 NPKM50 总碳排放量增加 1.73%和 1.75%。NPKM30 处理的单位产量碳足迹比 NPK 处理的低 1.43%,而 NPKM50 处理比 NPK 高 1.43%。说明 NPKM30 在稳定产量的同时实现低碳生产。

表 6 生产过程中各项投入的碳排放和单位产量碳足迹

Table 6 Carbon emissions of each input in the production process and carbon footprint of unit yield

处理 Treatment	化肥 Fertilizer	杀虫剂 Pesticide (kg·hm ⁻²)	除草剂 Herbicide (kg·hm ⁻²)	灌溉电力 Electricity (kg·hm ⁻²)	柴油 Diesel oil (kg·hm ⁻²)	玉米种子 Maize seed (kg·hm ⁻²)	直接排放 Direct emissions (kg·hm ⁻²)	总碳排放 Total emission (kg·hm ⁻²)	单位产量碳排放量 Carbon emissions of unit yield (kg·kg ⁻¹)
CK	0	7.47	60.9	360	97.65	43.43	4805.57	5375.02	0.75
NPK	637.8	7.47	60.9	360	97.65	43.43	6034.57	7241.82	0.70
NPKM30	637.8	7.47	60.9	360	97.65	43.43	6159.51	7366.76	0.69
NPKM50	637.8	7.47	60.9	360	97.65	43.43	6161.51	7368.76	0.71

3 讨论

3.1 有机肥替代化肥对 N₂O 排放的影响

普遍研究认为,夏玉米生育期 N₂O 排放通量均在施肥后一周出现排放峰值^[27],这与本研究结果一致。可能是施肥为土壤输入了额外的无机氮源,硝化和反硝化作用反应底物增加,促进 N₂O 的排放^[13]。外源化

肥的施用显著促进 N₂O 排放^[28-29]。本研究发现,玉米农田氮肥通过 N₂O 排放流失量为 5.04 kg·hm⁻²,N₂O 排放量约占土壤全氮的 16.5‰左右。而徐玉秀^[30]认为,在土壤全氮>1 g·kg⁻¹条件下玉米生育期 N₂O 排放量为 0.59 kg·hm⁻²,N₂O 排放量约占土壤全氮的 5.9%,有机肥施入农田后对土壤 N₂O 排放的影响,因有机肥种类及施用量的不同可能存在较大差异^[9,31]。

本研究认为, 等氮量条件下用 30% 的有机肥替代化肥 (NPKM30) 增加玉米农田 N_2O 累积排放量, 但用 50% 的有机肥替代化肥 (NPKM50) 会显著降低其排放量 (表 1)。这可能是因为少量有机肥替代化肥 (NPKM30 处理) 向土壤带入氮素的同时改变了土壤中 C/N 比, 促进了微生物活动^[15], 有机肥提供的有机分子可作为反硝化细菌的基本电子受体, 且有机物质的分解消耗了土壤中的氧气, 造成厌氧环境, 比化肥更能促进土壤反硝化作用产生 N_2O ^[13,17,32]。而 NPKM50 处理较 NPKM30 处理施入了更多的外源碳, 等氮条件下速效养分相对减少, 有机肥养分释放速度较慢, 导致土壤中速效氮含量降低, 可供硝化和反硝化作用的反应底物减少, 从而减少了 N_2O 的产生和排放^[33]; 另外, 有机质大量分解消耗土壤中的氧气, 使土壤中的 N_2O 气体被作为替代氧气的电子受体还原为 N_2 , 也可能是降低 N_2O 排放量的原因^[14,16,34]。降雨量和温度是影响 N_2O 排放的重要因子。降雨量和温度直接影响土壤含水量、通气状况和土壤硝化/反硝化微生物活性, 同时调节土壤中 N_2O 传输速率的物理化学参数, 影响氮素的转化过程, 进而影响 N_2O 排放^[30]。刘运通等^[35]研究认为, 旱地 N_2O 排放通量与土壤含水量在一定范围内呈显著正相关, 土壤含水量高于田间持水量时, 促进土壤反硝化, 增加 N_2O 排放。本研究发现 2018 年的 N_2O 累积排放量比 2019 年高, 可能是降雨量相对较多, 促进土壤反硝化所致。

3.2 有机肥替代化肥对 CO_2 排放的影响

土壤中 CO_2 的排放受土壤物理、化学和生物过程的影响, 与土壤碳、氮含量以及阳离子交换能力密切相关^[36]。董玉红等^[37]通过比较小麦-玉米长期轮作条件下的不同肥料处理, 发现氮磷钾配施条件下 CO_2 排放量显著高于 CK。这与本研究的施肥增加玉米农田 CO_2 累积排放量的结果基本一致 (表 1)。氮磷钾配施增加土壤 CO_2 排放量, 可能是因为施肥促进作物生长和根系分泌, 增加了土壤呼吸底物及作物根系生物量, 促进微生物对易氧化碳的利用和根系的呼吸^[28-38], 从而提高 CO_2 排放量^[39-40]。汤桂容等^[41]研究发现, 两个有机无机配施处理的 CO_2 累积排放量比氮磷钾配施处理高 16%—23%。本研究也发现等氮量条件下两个有机肥替代化肥处理的 CO_2 排放量增加, 一方面可能是由于有机肥替代化肥后促进玉米根系生长, 根长、根表面积、根体积增加, 根系呼吸增加^[42-43]; DING 等^[44]在研究长期施用有机肥

和氮肥对土壤 CO_2 排放的影响中发现, 有机无机混合肥处理比单施无机肥处理增加了土壤中有机碳含量, 促进了土壤呼吸, 这可能是 CO_2 排放量增加的另一个原因。温度是影响土壤呼吸过程的重要因素, 在一定范围内增加温度, 提高土壤微生物活性, 促进有机碳矿化, 增加 CO_2 排放量^[20]。本试验连续两年大气温度变化不大, 可能是年 CO_2 排放总量差别不大的主要原因。

3.3 有机肥替代化肥对夏玉米产量的影响

温延臣^[45]和谢军等^[46]研究认为, 相较于单施化肥有机肥替代化肥不会降低作物产量。本研究发现等氮量条件下有机肥替代化肥主要是通过促进根系生长, 增加玉米地下部和地上部生物量, 使产量保持稳定 (图 3, 表 1、2), 这一结果与向秀媛^[47]和李孝良等^[48]的基本一致。2019 年产量高于 2018 年可能是由于乳熟期 (8 月 18 日) 大风引起的玉米植株大面积倒伏所致。全球增温潜势 (GWP) 是评估不同温室气体对气候系统潜在效应的一个相对指标^[49], 温室气体排放强度 (GHGI) 是把全球增温潜势与作物产量相结合的综合温室效应评价指标, 经常被用来衡量不同施肥措施经济和环境效益^[50], 而碳足迹可以明确作物整个生产过程中各生产要素产生温室气体的情况^[23]。刘晓雨^[50]研究发现, 与氮磷钾配施相比, 氮磷钾肥配施猪粪尽管增加了综合温室效应, 但却能够增加作物产量, 降低早稻单位产量的温室气体排放强度 (GHGI); 李春喜等^[23]研究了冬小麦-夏玉米两熟制农田的碳足迹, 认为碳足迹是由农药、灌溉电力、机械耗油、化肥、种子和温室气体的直接排放所构成, 其中化肥是碳足迹的主要来源。本研究发现 NPKM30 尽管增加全球变暖潜势, 但却降低了 GHGI (表 3) 和单位产量碳足迹 (表 6), 说明用 30% 的有机肥替代化肥不仅能保持玉米产量稳定, 还可以降低温室气体排放强度和农田碳足迹, 是玉米减肥减排低碳生产较为理想的替代比例。因此, 从农田温室气体减排和保持产量稳定角度出发, 采用合适的有机肥用量替代化肥是实现经济效益和生态效益协调均衡的最佳措施。

4 结论

等氮、磷、钾条件下采用适宜的有机肥替代化学氮肥, 能够保持玉米产量稳定, 增加植株生物量及其氮素积累量, 同时增加 CO_2 和 N_2O 等温室气体排放量以及全球变暖潜势, 但却能够降低温室气体排放强度

和单位产量碳足迹。综合考虑玉米产量和生态效益,认为有机肥替代 30%的化肥是黄淮海砂姜黑土区夏玉米生产的最佳替代比例。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation/Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 肖杰, 刘平静, 孙本华, 高明霞, 张树兰, 杨学云, 冯浩. 长期施用化肥对旱作雨养农田 N_2O 排放特征的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 108-114, 122. doi:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.05.013.
XIAO J, LIU P J, SUN B H, GAO M X, ZHANG S L, YANG X Y, FENG H. Effects of long-term chemical fertilization on N_2O emission from rain-fed dry farmland. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 108-114, 122. doi:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.05.013. (in Chinese)
- [3] WEST T O, MARLAND G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 439-444. doi:10.1016/S0269-7491(01)00221-4.
- [4] MORSE J L, BERNHARDT E S. Using ^{15}N tracers to estimate N_2O and N_2 emissions from nitrification and denitrification in coastal plain wetlands under contrasting land-uses. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 635-643. doi:10.1016/j.soilbio.2012.07.025.
- [5] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.
LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207-4229. (in Chinese)
- [6] 苏曼. 主要粮食作物生产中 N_2O 排放强度研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
SU M. Research on greenhouse gas(N_2O)emission intensity of main grain crops[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [7] LIU H T, LI J, LI X, ZHENG Y H, FENG S F, JIANG G M. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland. Science Bulletin, 2015, 60(6): 598-606. doi:10.1007/s11434-014-0679-6.
- [8] 李虎, 邱建军, 王立刚, 任天志. 中国农田主要温室气体排放特征与控制技术. 生态环境学报, 2012, 21(1): 159-165. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.01.025.
LI H, QIU J J, WANG L G, REN T Z. The characterization of greenhouse gases fluxes from croplands of China and mitigation technologies. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 159-165. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.01.025. (in Chinese)
- [9] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 董文旭, 王玉英, 宋利娜. 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. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975. doi:10.3724/SP.J.1011.2011.00966.
ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, DONG W X, WANG Y Y, SONG L N. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975. doi:10.3724/SP.J.1011.2011.00966. (in Chinese)
- [10] VAN GROENIGEN J W, VELTHOF G L, OENEMA O, VAN GROENIGEN K J, VAN KESSEL C. Towards an agronomic assessment of N_2O emissions: A case study for arable crops. European Journal of Soil Science, 2010, 61(6): 903-913. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01217.x.
- [11] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 徐会娟, 贾炎. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800. doi:10.13227/j.hjcx.2014.02.008.
ZHU Y G, WANG X H, YANG X R, XU H J, JIA Y. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies. Environmental Science, 2014, 35(2): 792-800. doi:10.13227/j.hjcx.2014.02.008 (in Chinese)
- [12] DOBBIE K E, SMITH K A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly drained gleysol. European Journal of Soil Science, 2001, 52(4): 667-673. doi:10.1046/j.1365-2389.2001.00395.x.
- [13] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 覃伟, 郭景恒, 陈清, 王敬国. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1781-1798. doi:10.11674/zwylf.18441.
CAO W C, SONG H, WANG Y J, QIN W, GUO J H, CHEN Q, WANG J G. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(10): 1781-1798. doi:10.11674/zwylf.18441. (in Chinese)
- [14] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 温延臣, 孙文彦, 赵秉强. 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. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381-4389. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.21.018.
LI Y Q, TANG J W, CHE S G, WEN Y C, SUN W Y, ZHAO B Q. 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. Scientia

- Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4381-4389. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.21.018. (in Chinese)
- [15] 翟振, 王立刚, 李虎, 邱建军, 杨军, 董小雨. 有机无机肥料配施对春玉米农田 N_2O 排放及净温室效应的影响. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2502-2510.
- ZHAI Z, WANG L G, LI H, QIU J J, YANG J, DONG X Y. Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2502-2510. (in Chinese)
- [16] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 郭澍, 熊正琴. 不同配比有机无机肥料对菜地 N_2O 排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 154-161. doi:10.11674/zwyf.16119.
- BI Z C, ZHANG H X, FANG G, GUO S, XIONG Z Q. Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N_2O emissions in intensified vegetable field. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(1): 154-161. doi:10.11674/zwyf.16119. (in Chinese)
- [17] 陈雪双, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 李永夫, 吴家森. 施肥对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1262-1270. doi:10.11674/zwyf.2014.0523.
- CHEN X S, LIU J, JIANG P K, ZHOU G M, LI Y F, WU J S. Effects of fertilization on soil N_2O flux in Chinese *Carya cathayensis* stands. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1262-1270. doi:10.11674/zwyf.2014.0523. (in Chinese)
- [18] JIA J X, LI B, CHEN Z Z, XIE Z B, XIONG Z Q. Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N_2O and CH_4 . Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(4): 503-509. doi:10.1080/00380768.2012.686436.
- [19] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 张昊青. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451. doi:10.5846/stxb201305070967.
- ZANG Y F, HAO M D, ZHANG L Q, ZHANG H Q. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445-1451. doi:10.5846/stxb201305070967. (in Chinese)
- [20] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 焦亚鹏, 蔡立群, 武均, 谢军红. Meta 分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO_2 排放的影响. 农业工程学报, 2019, 35(10): 99-107. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.10.013.
- WANG X J, ZHANG R Z, QI P, JIAO Y P, CAI L Q, WU J, XIE J H. Meta-analysis on farmland soil CO_2 emission in Northern China affected by organic fertilizer. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 99-107. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.10.013. (in Chinese)
- [21] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [22] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 曹玉军, 魏雯雯, 王立春, 王永军. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1456-1463. doi:10.13930/j.cnki.cjea.160405.
- LÜ Y J, YU H Y, YAO F Y, CAO Y J, WEI W W, WANG L C, WANG Y J. Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(11): 1456-1463. doi:10.13930/j.cnki.cjea.160405. (in Chinese)
- [23] 李春喜, 骆婷婷, 闫广轩, 许双, 宗洁静, 邵云. 河南省不同生态区小麦-玉米两熟制农田碳足迹分析. 生态环境学报, 2020, 29(5): 918-925. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.05.007.
- LI C X, LUO T T, YAN G X, XU S, ZONG J J, SHAO Y. Carbon footprint analysis of wheat-maize double cropping system in different ecological regions of Henan Province. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 918-925. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.05.007. (in Chinese)
- [24] 王钰乔, 濮超, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 张海林. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势. 资源科学, 2018, 40(9): 1800-1811. doi:10.18402/resci.2018.09.10.
- WANG Y Q, PU C, ZHAO X, WANG X, LIU S L, ZHANG H L. Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China. Resources Science, 2018, 40(9): 1800-1811. doi:10.18402/resci.2018.09.10. (in Chinese)
- [25] 朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 邹晓霞. 基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算: 以山东省高密地区为例. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 473-482. doi:10.13254/j.jare.2017.0180.
- ZHU Y C, LI Y E, JIANG D F, ZOU X X. Life cycle assessment on carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping system based on survey data of Gaomi in Shandong Province, China. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 473-482. doi:10.13254/j.jare.2017.0180. (in Chinese)
- [26] HE L Y, ZHANG A, WANG X D, LI J, HUSSAIN Q. Effects of different tillage practices on the carbon footprint of wheat and maize production in the Loess Plateau of China. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 297-305. doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.161.
- [27] ZHANG Y J, LIN F, JIN Y G, WANG X F, LIU S W, ZOU J W.

- Response of nitric and nitrous oxide fluxes to N fertilizer application in greenhouse vegetable cropping systems in southeast China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20700. doi:10.1038/srep20700.
- [28] 王立刚, 李虎, 邱建军. 黄淮海平原典型农田土壤 N_2O 的排放特征. *中国农业科学*, 2008, 41(4): 1248-1254. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2008.04.040.
- WANG L G, LI H, QIU J J. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in Huang-Huai-Hai plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(4): 1248-1254. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2008.04.040. (in Chinese)
- [29] RICHARDSON D, FELGATE H, WATMOUGH N, THOMSON A, BAGGS E. Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key? *Trends in Biotechnology*, 2009, 27(7): 388-397. doi:10.1016/j.tibtech.2009.03.009.
- [30] 徐玉秀. 中国主要作物农田 N_2O 和 CH_4 排放系数及影响因子分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- XU Y X. Analyses on emission factors and effect factors of N_2O and CH_4 from main cropland soils in China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [31] 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新. 有机肥与无机肥配施对潮土 N_2O 排放的影响. *环境科学*, 2020, 41(3): 1474-1481. doi:10.13227/j.hjks.201908008.
- SUN H Y, WAN Z M, LIU D Y, LIAO X, DING W X. Effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on N_2O emissions from fluvo-aquic soil in the North China plain. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1474-1481. doi:10.13227/j.hjks.201908008. (in Chinese)
- [32] JASSAL R S, BLACK T A, ROY R, ETHIER G. Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and Bole respiration. *Geoderma*, 2011, 162(1/2): 182-186. doi:10.1016/j.geoderma.2011.02.002.
- [33] AZAM F, MÜLLER C, WEISKE A, BENCKISER G, OTTOW J. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 54-61. doi:10.1007/s00374-001-0441-5.
- [34] BURNEY J A, DAVIS S J, LOBELL D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(26): 12052-12057. doi:10.1073/pnas.0914216107.
- [35] 刘运通, 万运帆, 林而达, 李玉娥, 陈德立, 秦晓波, 高清竹, 金琳, 武艳娟. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N_2O 排放通量的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 997-1002. doi:10.3321/j.issn: 1672-2043.2008.03.029.
- LIU Y T, WAN Y F, LIN E D, LI Y E, CHEN D L, QIN X B, GAO Q Z, JIN L, WU Y J. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 997-1002. doi:10.3321/j.issn: 1672-2043.2008.03.029. (in Chinese)
- [36] SCALA N L Jr, MARQUES J Jr, PEREIRA G T, CORÁ J E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(10): 1469-1473. doi:10.1016/S0038-0717(00)00053-5.
- [37] 董玉红, 欧阳竹, 李鹏, 张磊. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响. *土壤通报*, 2007, 38(1): 97-100. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2007.01.023
- DONG Y H, OUYANG Z, LI P, ZHANG L. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 97-100. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2007.01.023. (in Chinese)
- [38] 杨书运, 严平, 马友华, 戴佳伟, 韩辉邦, 汪大林, 方海义. 施肥对冬小麦土壤温室气体排放的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1642-1645. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.07.007.
- YANG S Y, YAN P, MA Y H, DAI J W, HAN H B, WANG D L, FANG H Y. Effects on emissions of soil greenhouse gas by fertilizing to winter wheat. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1642-1645. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.07.007. (in Chinese)
- [39] 张景源. 长期不同施肥措施下红壤旱地土壤微生物的生物量和多样性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- ZHANG J Y. Soil microbial biomass and diversity under long-term different fertilization utilizations[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [40] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 韩晓增, 李海波. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028-1035. doi:10.3321/j.issn: 0564-3929.2007.06.010.
- QIAO Y F, MIAO S J, WANG S Q, HAN X Z, LI H B. Soil respiration affected by fertilization in black soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1028-1035. doi:10.3321/j.issn: 0564-3929.2007.06.010. (in Chinese)
- [41] 汤桂容, 周旋, 田昌, 彭辉辉, 张玉平, 荣湘民. 有机无机氮肥配施对茼蒿土壤 N_2O 排放的影响. *土壤*, 2019, 51(4): 641-647. doi:10.13758/j.cnki.tr.2019.04.003.
- TANG G R, ZHOU X, TIAN C, PENG H H, ZHANG Y P, RONG X M. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on soil nitrous oxide emission from lettuce (*Lactuca sativa* L.) fields. *Soils*, 2019, 51(4): 641-647. doi:10.13758/j.cnki.tr.2019.04.003. (in Chinese)

- [42] IQBAL J, HU R G, LIN S, HATANO R, FENG M L, LU L, AHAMADOU B, DU L J. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3/4): 292-302. doi:10.1016/j.agee.2009.02.001.
- [43] GINTING D, KESSAVALOU A, EGHBALL B, DORAN J W. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(1): 23-32. doi:10.2134/jeq2003.2300.
- [44] DING W X, MENG L, YIN Y F, CAI Z C, ZHENG X H. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 669-679. doi:10.1016/j.soilbio.2006.09.024.
- [45] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 李伟, 李燕青, 林治安, 赵秉强. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136-2142. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2018.11.011.
- WEN Y C, ZHANG Y D, YUAN L, LI W, LI Y Q, LIN Z A, ZHAO B Q. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136-2142. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2018.11.011. (in Chinese)
- [46] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 李丹萍, 徐春丽, 王珂, 张跃强, 石孝均. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3934-3943. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.20.008.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, LI D P, XU C L, WANG K, ZHANG Y Q, SHI X J. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934-3943. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.20.008 (in Chinese)
- [47] 向秀媛, 刘强, 荣湘民, 谢桂先, 彭建伟, 黄伟明. 有机肥和无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(1): 72-77. doi:10.13331/j.cnki.jhau.2014.01.016.
- XIANG X Y, LIU Q, RONG X M, XIE G X, PENG J W, HUANG W M. Effects of different combined application of organic manures and inorganic fertilizer on yield and N use efficiency of double-rice. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2014, 40(1): 72-77. doi:10.13331/j.cnki.jhau.2014.01.016. (in Chinese)
- [48] 李孝良, 胡立涛, 王泓, 张云晴, 吴长昊, 汪建飞. 化肥减量配施有机肥对皖北夏玉米养分吸收及氮素利用效率的影响. *南京农业大学学报*, 2019, 42(1): 118-123.
- LI X L, HU L T, WANG H, ZHANG Y Q, WU C H, WANG J F. Effects of combination of chemical fertilizer reduction with organic manure on nutrient uptake and nitrogen utilization efficiency of summer maize in Northern Anhui Province. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(1): 118-123. (in Chinese)
- [49] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 1990, 344(6266): 529-531. doi:10.1038/344529a0.
- [50] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响: 田间试验及整合研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- LIU X Y. Effects of soil organic amendment on productivity and greenhouse gas mitigation of croplands: Field studies and synthetic analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)