

有机肥和生物菌剂对菜地土壤 N_2O 排放及土壤团聚体的影响

马静, 陆昕昱, 宋俊杰, 孙丽英

引用本文:

马静, 陆昕昱, 宋俊杰, 等. 有机肥和生物菌剂对菜地土壤 N_2O 排放及土壤团聚体的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 251-261.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳
农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙
农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677-684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙
农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366-1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静
农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马静, 陆昕昱, 宋俊杰, 等. 有机肥和生物菌剂对菜地土壤 N_2O 排放及土壤团聚体的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 251-261.

MA J, LU X Y, SONG J J, et al. Effects of organic fertilizer and microbial agent application on soil N_2O emission and soil aggregate in vegetable fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 251-261.



开放科学 OSID

有机肥和生物菌剂对菜地土壤 N_2O 排放及土壤团聚体的影响

马静, 陆昕昱, 宋俊杰, 孙丽英*

(南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044)

摘要:为探究不同施肥处理对菜地土壤 N_2O 排放、产量及土壤团聚体的影响,本研究以南京地区菜地为研究对象,设置不施氮肥(CK)、施化学氮肥(U)、化学氮肥和生物菌剂配施(UM)、有机肥替代25%化学氮肥(O)、有机肥替代25%化学氮肥和生物菌剂配施(OM)5个处理。采用静态暗箱-气相色谱法,观测菜地土壤 N_2O 的排放,并分析不同施肥处理对菜地土壤 N_2O 排放量、综合温室效应(GWP)、温室气体排放强度(GHGI)、产量、土壤团聚体组成、经济效益等的影响。结果表明:与U处理相比,O处理土壤 N_2O 累积排放量增长了12.70%,UM和OM处理土壤 N_2O 累积排放量均有所降低,其中,UM处理降低了16.67%,OM处理显著降低了23.81% ($P < 0.05$)。在各施肥处理中,OM处理产量最高,为 $11.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,O处理次之,为 $11.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此外,O和OM处理降低了 $< 0.25 \text{ mm}$ 团聚体占比,提高了土壤中大团聚体占比,增加了土壤团聚体稳定性。研究表明,有机肥配施生物菌剂处理可以减缓菜地土壤 N_2O 排放并提高作物产量和经济效益,是实现农业低碳高产的一种可行性措施。

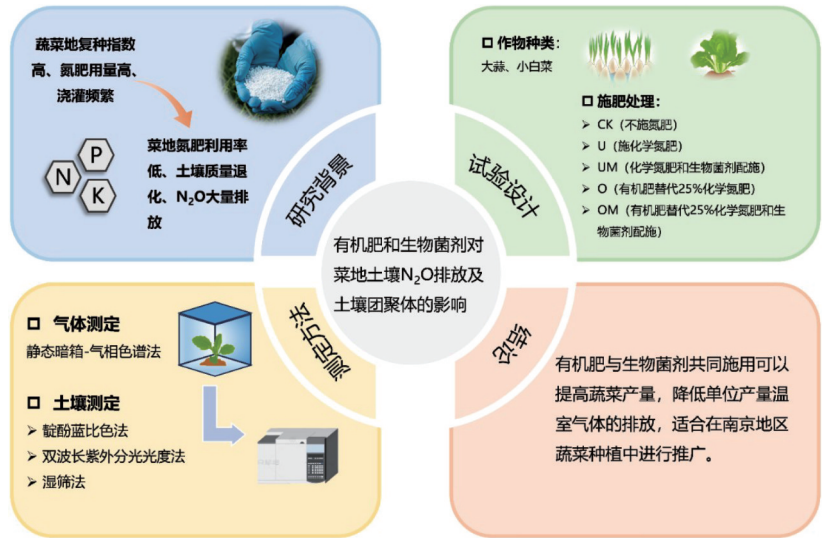
关键词: 有机肥;生物菌剂; N_2O ;团聚体;产量

中图分类号:X71;S153;X144

文献标志码:A

文章编号:1672-2043(2026)01-0251-11

doi:10.11654/jaes.2025-0204



Effects of organic fertilizer and microbial agent application on soil N_2O emission and soil aggregate in vegetable fields

MA Jing, LU Xinyu, SONG Junjie, SUN Liying*

(School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

收稿日期:2025-03-03 录用日期:2025-05-19

作者简介:马静(2003—),女,江苏淮安人,研究方向为农田温室气体减排。E-mail:majing031030@0163.com

*通信作者:孙丽英 E-mail:002585@nuist.edu.cn

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新项目(BE2022425);国家自然科学基金项目(41501245)

Project supported: Special Funds for Scientific and Technological Innovation of Jiangsu Province, China (BE2022425); National Natural Science Foundation of China(41501245)

Abstract: In order to explore the effects of different fertilization treatments on soil N₂O emission, yield and soil aggregate in vegetable fields, the study took vegetable fields in Nanjing as the research object, and set up 5 treatments which consisted of no fertilization (CK), chemical nitrogen fertilizer application (U), chemical nitrogen fertilizer and microbial agent application (UM), organic fertilizer instead of 25% chemical nitrogen fertilizer (O) and organic fertilizer instead of 25% chemical nitrogen fertilizer and microbial agent application (OM). The study employed the static chamber-gas chromatography method to monitor N₂O emissions from vegetable field soils and analyzed the effects of different fertilization treatments on N₂O emission fluxes, global warming potential (GWP), greenhouse gas intensity (GHGI), crop yield, soil aggregate composition and economic benefits. The results showed that the cumulative N₂O emissions of soils treated with O treatment increased by 12.70% compared with the U treatment, while those treated with UM and OM decreased. Specifically, the cumulative N₂O emission of soils treated with UM treatment was decreased by 16.67%, and those treated with OM treatment was significantly decreased by 23.81% ($P < 0.05$). Among the fertilization treatments, the highest yield was achieved with the OM treatment, reaching 11.9 t·hm⁻², followed by the O treatment with a yield of 11.2 t·hm⁻². In addition, the O and OM treatments reduced the proportion of <0.25 mm soil aggregates, increased the proportion of large soil aggregates, and enhanced soil aggregate stability and economic benefits. It can be seen that organic fertilizer combined with microbial agent treatment is a feasible measure to achieve low carbon and high yield in agriculture which can help reduce soil N₂O emission and increase crop yield.

Keywords: organic fertilizer; microbial agent; N₂O; aggregate; yield

N₂O既是消耗臭氧层的化学物质,也是影响地球辐射平衡的长寿命温室气体,在100 a时间尺度上,其全球增温潜势是CO₂的273倍^[1]。由于氮肥的大量施用,农田土壤成为大气N₂O最重要的人为排放源,其N₂O排放量占全球人为排放量的70%^[2-3]。根据2021年《中国统计年鉴》可知,我国是世界上最大的蔬菜生产国和消费国,蔬菜种植面积约为2 148.5万hm²,相当于总种植面积的12.83%^[4]。蔬菜具有复种指数高、氮肥用量高、浇灌频繁等特点,导致其氮肥利用率低、土壤质量退化、N₂O排放量大。菜地生态系统的N₂O排放量远高于一般农田^[5],占我国农田总排放的20.0%~21.4%,据估算我国露天和温室菜地土壤N₂O排放量(以N计)分别为2.62 kg·hm⁻²和6.22 kg·hm⁻²^[6]。因此,如何在保证蔬菜产量的同时减缓菜地N₂O的排放成为至关重要的议题。

有机肥和生物菌剂均为农业中常用的土壤改良剂,它们对提高土壤肥力和作物产量都有积极作用。大量研究表明,施用适量的有机肥、生物菌剂能够提高化肥利用率、改良土壤、促进作物生长、提升作物品质^[7-10]。集约化蔬菜种植过程中,有机肥替代化肥不仅可以缓解土壤退化、提升作物产量,在一定程度上也会影响土壤N₂O排放^[11-12]。有机肥矿质氮含量较少,无法为硝化作用或反硝化作用提供充足的反应底物,从而减少土壤N₂O排放。但同时,施用有机肥可能会改善土壤物理性质,促进N₂O从土壤孔隙释放,增加土壤N₂O排放。生物菌剂是含有特定微生物的制剂,通常被用作土壤改良剂或植物生长促进剂。作为一种环境友好型制剂,生物菌剂在温室气体减排方面受到学者的广

泛关注。有研究发现,芽孢杆菌中包含能够编码氧化亚氮还原酶N₂OR的*nosZ*基因,该基因可以通过反硝化作用将N₂O还原为N₂,起到减少土壤N₂O排放的作用^[13]。也有学者研究得出,不同碳源与生物菌剂配施对土壤N₂O排放有不同影响。葡萄糖与巨大芽孢杆菌配施会抑制土壤N₂O排放,而秸秆与巨大芽孢杆菌配施可能促进土壤N₂O排放^[14]。除影响土壤N₂O排放外,有机肥和生物菌剂的施用对改善土壤结构也具有重要作用。有机肥可以通过增加土壤中胶结剂的含量增加土壤团聚体的稳定性^[15],而生物菌剂可能会通过影响微生物分泌物的产生、改变微生物群落结构等途径对土壤团聚体的形成和稳定性产生积极影响。

目前,对于有机肥和生物菌剂的研究多集中在这两者的单独施用或与化肥配施对土壤N₂O排放、理化性质以及作物产量的影响上。施用有机肥可以影响土壤N₂O排放、增强土壤团聚体稳定性并改善土壤肥力,而施用生物菌剂对减少土壤N₂O排放和改善土壤团聚体稳定性也都有积极的影响。张楠等^[16]分析了有机肥组分特征对黑土N₂O排放的影响,发现有机肥组分特征影响其可分解性,进而调控黑土的N₂O排放。杨梦远等^[17]研究了生物菌剂对蔬菜产量及气态氮排放的影响,得出尿素配施EM菌剂处理能够明显增产并促进N₂O与NH₃的排放。还有研究发现,有机肥替代化肥配合生物菌剂施用可以显著提升玉米的株高、地上部和地下部的生物鲜质量与干质量^[18]。但针对生物菌剂与有机肥配合施用对菜地土壤N₂O排放以及土壤理化性质的影响研究仍不够深入。因此,本研究以南京地区新垦菜地为研究对象,通过田间原位

试验,采用静态暗箱-气相色谱法,探究有机肥和生物菌剂对菜地土壤N₂O排放、蔬菜产量、综合温室效应、温室气体强度以及土壤团聚体的影响,以期为实现可持续蔬菜生产提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省南京市南京信息工程大学农业气象试验站(32.20°N, 118.71°E)内的新垦菜地。该地位于长江中下游,气候类型为典型的亚热带季风气候,年均降雨量为1 107 mm,年平均气温为15.3℃。气候温暖湿润,无霜期较长,较为适宜蔬菜生长。该试验地土壤基本理化性质为:pH 7.2(土水比1:5),有机质含量12.7 g·kg⁻¹,总氮量1.8 g·kg⁻¹,有效钾191.4 mg·kg⁻¹,有效磷11.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

试验所施化学氮、磷、钾肥分别为尿素(以N计)、过磷酸钙(以P₂O₅计)和硫酸钾(以K₂O计);有机肥种类为羊粪(干基),其有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为45.0%、2.2%、1.0%及0.6%;生物菌剂为解淀粉芽孢杆菌剂,有效活菌数为1×10¹¹ CFU·g⁻¹。

1.3 试验设计

试验采用完全随机区组设计,共设5个处理:不施肥处理(CK),不施氮肥;施化学氮肥处理(U),尿素180 kg·hm⁻²(尿素以N计);化学氮肥和生物菌剂配施处理(UM),尿素180 kg·hm⁻²+生物菌剂15 kg·hm⁻²;施有机肥处理(O),有机肥替代25%化学氮肥,即有机肥2 045.45 kg·hm⁻²+尿素135 kg·hm⁻²;有机肥和生物菌剂配施处理(OM),有机肥替代25%化学氮肥+生物菌剂15 kg·hm⁻²,即有机肥2 045.45 kg·hm⁻²+尿素135 kg·hm⁻²+生物菌剂15 kg·hm⁻²。除CK处理外各处理施氮量均为180 kg·hm⁻²,每个处理重复3次。每个小区的面积为7.5 m²(3.0 m×2.5 m)。试验期间共种植两茬蔬菜(大蒜-小白菜-休耕期),每茬蔬菜的施肥量一致,具体种植时间见表1。播种前1 d,将尿素、过磷酸钙、硫酸钾、有机肥以及生物菌剂施于菜地中作为基肥并翻耕,使之与土壤充分混合。

1.4 气体样品的采集与分析

采用静态暗箱-气相色谱法测定菜地土壤N₂O排放。每个小区安装一个静态箱进行采样。试验开始前,在各小区内安装好采样底座,采集时,将采样箱置于采样底座上,用水密封。采样箱与采样底座均由不透明的PVC板制成,采样箱的规格为45 cm×45 cm×

表1 蔬菜轮作模式

Table 1 Vegetable crop rotation patterns

项目 Item	播种(开始)时间 Sowing(start) time	收获(结束)时间 Harvest(end) time	采样起止时间 Start and end times of sampling
大蒜	2019.10.15	2020.05.01	2019.10.16—2020.01.04
小白菜	2020.05.12	2020.06.03	2020.05.13—2020.06.03
休耕期	2020.06.04	2020.10.31	无

注:大蒜种植后期(2020年1月之后),因新冠疫情影响,没有采集气体样品。

Note: After January 2020, due to the impact of the COVID-19 pandemic, gas samples were not collected during the later stages of garlic cultivation.

50 cm。采样频率通常为每周一次,施肥后每两天采集一次,持续采集一周左右。采样时间为上午9:00—11:00,在扣上采样箱的第0、10、20、30分钟时用20 mL注射器分别收集气体样品。随后将气体样品带回实验室,使用气相色谱仪(Agilent 7890B)在12 h内分析N₂O浓度。

N₂O排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中:F为N₂O的排放通量,μg·m⁻²·h⁻¹;ρ为标准状态下N₂O气体密度,为1.25 g·L⁻¹;h为采样箱高度,m;dc/dt为采样箱内的气体浓度变化率,nL·L⁻¹·h⁻¹;T为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

N₂O累积排放量的计算公式如下:

$$E = \sum_i^n (R_i \times D_i) \quad (2)$$

式中:E为N₂O的累积排放量,kg·hm⁻²;R_i为采样间隔期间N₂O的平均排放量,kg·hm⁻²;D_i为采样间隔时间,d;n为采样间隔次数。

1.5 土壤理化性质的测定

采集气体和土壤样品时同步测定0~20 cm土层土壤温度。土壤铵态氮和硝态氮的质量分数分别采用靛酚蓝比色法和双波长紫外分光光度法测定。

土壤团聚体在菜地收获第二茬作物并休耕5个月后采集菜地土壤并进行测定。将风干、过筛后的土壤置于团聚体分析仪套筛顶部(套筛孔径自上而下依次为5、2、0.25 mm),沿筒壁加入去离子水至没过土样,浸泡、润湿5 min,然后以30次·min⁻¹竖直振荡5 min。将各级筛层团聚体洗入烧杯中,烘干至质量恒定后称量各粒径质量,计算团聚体的质量分数。

粒径>0.25 mm团聚体(R_{0.25})含量、团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的计算公式如

下^[19,20]:

$$R_{0.25} = \frac{m_{r>0.25}}{m_T} \quad (3)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times W_i \quad (4)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \lg \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (5)$$

式中: $m_{r>0.25}$ 表示粒径大于0.25 mm的团聚体的质量, g; m_T 表示团聚体样品的总质量, g; \bar{X}_i 表示任一粒径大小范围的团聚体平均直径, mm; W_i 表示 \bar{X}_i 对应的团聚体在总团聚体中所占的比例, %。

1.6 蔬菜产量、综合温室效应以及温室气体排放强度

每茬蔬菜收获后,称量新鲜的地上部分,获得每个小区的蔬菜产量。

综合温室效应($GWP, t \cdot hm^{-2}$)的计算以 CO_2 作为参考气体,在100 a时间尺度上, N_2O 的增温潜势按单位质量 CO_2 的273倍^[1]进行计算。具体公式如下:

$$GWP = 273 \times GWP_{CO_2} \quad (6)$$

温室气体排放强度($GHGI, t \cdot t^{-1}$,以 CO_2 当量计),即单位产量的综合温室效应,计算公式如下:

$$GHGI = \frac{GWP}{Y} \quad (7)$$

式中: Y 为蔬菜产量, $t \cdot hm^{-2}$ 。

1.7 经济效益

收获后的大蒜和小白菜的经济效益计算公式如下:

$$I_T = I_Z + I_F + I_J + I_Q \quad (8)$$

$$R_T = Y \times P \quad (9)$$

$$R_{01} = \frac{R_T}{I_T} \quad (10)$$

式中: I_T 为总投入; I_Z 为种子投入; I_F 为肥料投入; I_J 为菌剂投入; I_Q 为其他投入,包括人工成本、土地租金、水电费等; R_T 为总产值; Y 为蔬菜产量; P 为蔬菜单价; R_{01} 为产投比。其中,大蒜价格按10元· kg^{-1} 计算,小白菜价格按3元· kg^{-1} 计算,尿素为1 989元· t^{-1} ,有机肥为230元· t^{-1} ,生物菌剂为120元· kg^{-1} ,蒜种成本为18 000元· hm^{-2} ,小白菜种子成本为2 350元· hm^{-2} ,施入磷、钾肥成本为1 200元· hm^{-2} 。

1.8 数据分析

所有数据用Excel 2019进行整理和绘图;数据分析采用SPSS 27,包括采用单因素方差分析(ANOVA)中的最小显著性差异法(LSD)对不同处理土壤 N_2O 排放量、作物产量、土壤团聚体组成进行显著性分析,并利用相关性分析探究土壤 N_2O 排放量与土壤铵态氮、硝态氮、温度间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 土壤 N_2O 排放通量与累积排放量

由图1可知,在大蒜和小白菜种植的整个生育期内,不同施肥处理下土壤 N_2O 排放通量均先迅速增加并在一周内达到峰值,随后排放通量不断减少并趋于稳定状态。第一茬种植大蒜期间,各处理峰值处 N_2O 排放规律为 $U > OM > UM > O > CK$,而第二茬种植小白菜的土壤各处理峰值处 N_2O 排放规律为 $O > U > UM > OM > CK$ 。除CK处理外,对比不同施肥处理的 N_2O 排放峰值,结果显示大蒜生长期U处理 N_2O 排放峰值较其他

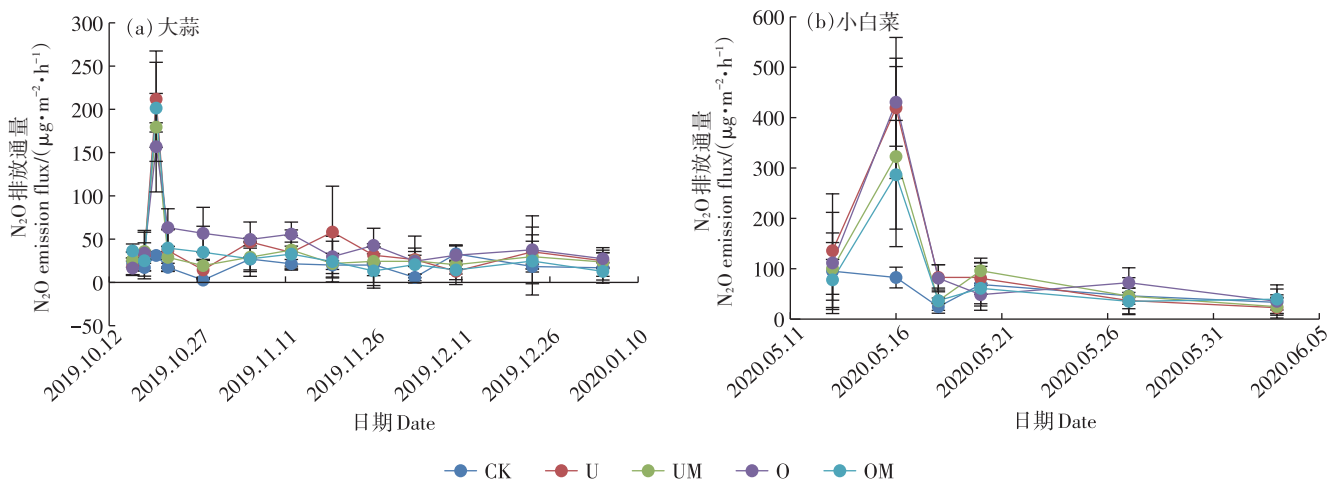


图1 大蒜和小白菜生长期不同施肥处理土壤 N_2O 排放通量

Figure 1 N_2O emission fluxes from soil under different fertilization treatments during the growth periods of garlic and Chinese cabbage

处理增长了5.16%~35.04%,小白菜生长期O处理N₂O排放峰值较其他处理增长了2.71%~50.24%。

不同施肥处理下种植大蒜和小白菜的土壤N₂O累积排放量如图2所示。大蒜和小白菜种植期间,CK处理的土壤N₂O累积排放量均为最低,而O处理的土壤N₂O累积排放量均为最高。种植大蒜期间,与CK处理相比,U、UM、O、OM处理N₂O累积排放量分别增加了91.89%($P<0.05$)、59.46%、118.92%($P<0.05$)、45.95%;与U处理相比,O处理N₂O累积排放量增长了14.08%,UM、OM处理的N₂O累积排放量则有所下降,分别降低了15.19%和23.94%。种植小白菜期间,与CK相比,U、UM、O处理N₂O累积排放量分别显著增加了96.43%($P<0.05$)、64.29%($P<0.05$)、117.86%($P<0.05$),OM处理也增长了50.00%;相较于U处理,O处理N₂O累积排放量增长了10.91%,UM处理和OM处理的N₂O累积排放量分别减少了16.36%和23.64%。

2.2 土壤无机氮含量及其对土壤N₂O排放通量的响应

大蒜种植期和小白菜种植期土壤铵态氮和硝态氮含量的动态变化见图3。铵态氮和硝态氮是菜地土壤中蔬菜能够吸收利用的氮素的主要形式。土壤铵态氮含量的变化范围是2.38~66.04 mg·kg⁻¹,土壤硝态氮含量的变化范围是1.13~30.66 mg·kg⁻¹。

土壤N₂O排放的变化,可能与施肥处理、土壤理化性质等有关。相关性分析表明(表2),土壤N₂O排放通量与土壤铵态氮含量呈显著正相关,与温度呈极显著正相关,而与土壤硝态氮无显著相关关系。

2.3 产量、GWP及GHGI

如表3所示,大蒜和小白菜种植期各处理总产量由高到低依次为OM、O、UM、U、CK。OM处理总产量

表2 土壤N₂O排放量与土壤铵态氮、硝态氮、温度的相关性分析
Table 2 Correlation analysis between soil N₂O emissions and soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and temperature

项目 Item	N ₂ O排放通量 N ₂ O flux	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content
铵态氮含量	0.252*		
硝态氮含量	0.170	-0.191	
温度	0.663**	0.403	0.618**

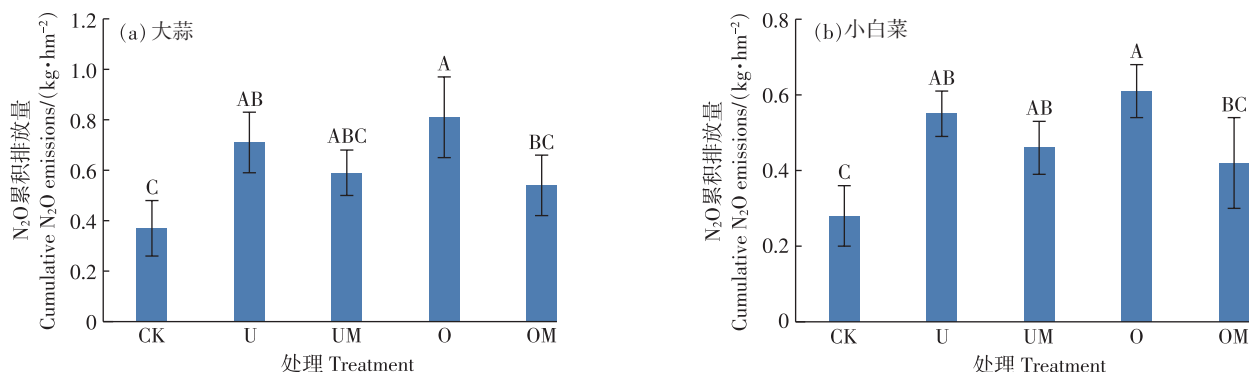
注:*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。

Note: * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

最高,为11.923 t·hm⁻²,CK处理总产量最低,为4.204 t·hm⁻²。与CK处理相比,U、UM、O、OM处理总产量分别显著增长了128.35%($P<0.05$)、137.82%($P<0.05$)、166.65%($P<0.05$)、183.61%($P<0.05$);与U处理相比,O、OM处理的总产量分别显著增长了16.77%($P<0.05$)、24.20%($P<0.05$),UM处理产量虽有所增长,但差异并不显著。由此可见,施氮肥、有机肥和生物菌剂处理均能显著增加蔬菜产量,但与仅施氮肥相比,有机肥部分替代化肥处理以及有机肥部分替代化肥与生物菌剂配施处理的增产效果更好。

由表3可得,各施肥处理的总GWP由高到低依次为O、U、UM、OM、CK,其中,总GWP最高的是O处理,为0.388 t·hm⁻²,最低的是CK处理,为0.180 t·hm⁻²。其中,U、UM、O、OM处理总GWP均显著高于CK处理($P<0.05$);与U处理相比,OM处理的总GWP显著降低了23.91%($P<0.05$),其他处理的差异不显著。

各施肥处理的总GHGI由高到低依次为CK、U、O、UM、OM。总GHGI最高的是CK处理,为0.042 t·



柱上不同大写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

图2 大蒜和小白菜生长期不同施肥处理土壤N₂O累积排放量

Figure 2 Cumulative N₂O emissions from soil under different fertilization treatments during the growth periods of garlic and Chinese cabbage

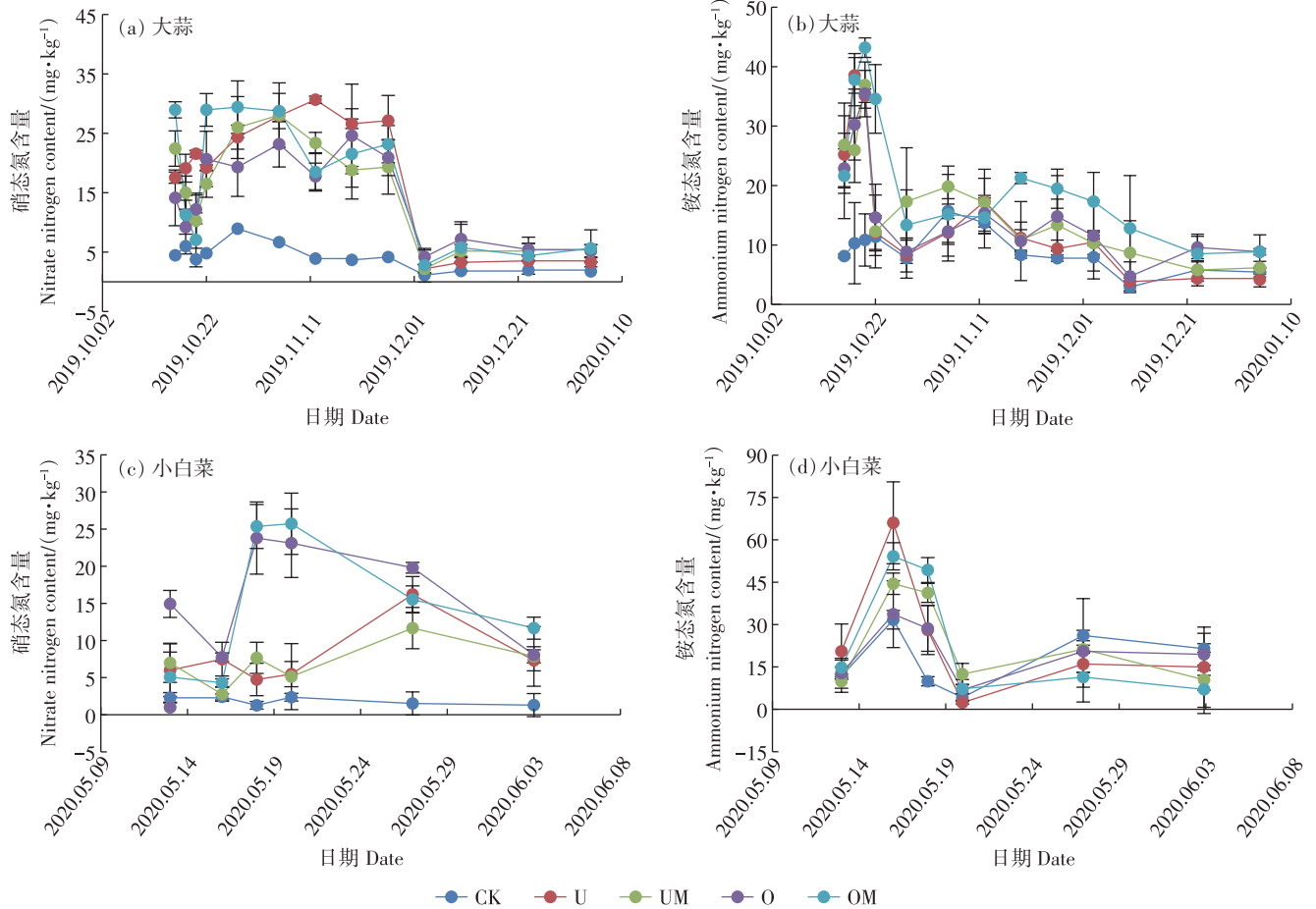


图3 大蒜和小白菜生长期土壤硝态氮和铵态氮含量的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content during the growth period of garlic and Chinese cabbage

表3 不同施肥处理的产量、综合温室效应(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)

Table 3 Yield, GWP, and GHGI under different fertilization treatments

处理 Treatment	产量 Yield/(t·hm ⁻²)		总产量 Total yield/(t·hm ⁻²)	总温室效应 Total GWP/(t·hm ⁻²)	总温室气体排放强度 Total GHGI/(t·t ⁻¹)
	大蒜 Garlic	小白菜 Cabbage			
CK	2.191±0.259C	2.014±0.382C	4.204±0.181D	0.180±0.040D	0.042±0.008A
U	4.999±0.230B	4.601±0.699B	9.600±0.586C	0.343±0.022AB	0.036±0.001AB
UM	5.190±0.171B	4.808±0.265B	9.998±0.226C	0.288±0.043BC	0.029±0.005BC
O	5.340±0.379AB	5.870±0.187A	11.210±0.230B	0.388±0.056A	0.035±0.006AB
OM	5.635±0.147A	6.287±0.400A	11.923±0.398A	0.261±0.051C	0.022±0.005C

注:数值为平均值±标准差,同一列中不同大写字母表示不同处理间有显著性差异(P<0.05)。下同。

Note: The values are represented with mean±standard deviations, different capital letters in the same column indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below.

t⁻¹,最低的是OM处理,为0.022 t·t⁻¹。与CK处理相比,UM、OM处理总GHGI分别显著降低了30.95%(P<0.05)、47.62%(P<0.05),其他处理差异并不显著;与U处理相比,UM、O、OM处理的GHGI均有所下降,其中OM处理显著降低了38.89%(P<0.05)。

2.4 菜地土壤团聚体的组成与稳定性

表4显示了不同施肥处理对土壤团聚体组成的

影响。不同施肥处理下的主要团聚体均为>5 mm 粒级的大团聚体,其在CK、U、UM、O、OM处理中的比例分别为53.25%、56.24%、56.45%、60.17%、62.67%。对于>5 mm 粒级的大团聚体,U、UM、O、OM处理相较于CK处理有所增长,但变化均不显著。对于2~5 mm 粒级的团聚体,U和UM处理较CK处理显著降低了60.08%(P<0.05)和53.26%(P<0.05),而O和OM处理

较CK处理变化不显著;对于0.25~2 mm粒级的团聚体,各处理较CK处理变化均不显著;对于<0.25 mm粒级的团聚体,U和UM处理较CK处理显著增加了85.33% ($P<0.05$)和80.22% ($P<0.05$),O和OM处理较CK处理变化不显著。

表5为不同施肥处理下土壤团聚体的MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 。MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 的平均值均在OM处理中最高,分别为3.69、2.72 mm和93.07%。与CK处理相比,U处理的MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 值分别降低了3.32%、19.37%和10.30%,UM处理分别降低了2.42%、18.92%和9.78%,O处理分别增长了8.16%、

16.22%和3.73%,OM处理分别增长了11.48%、22.52%和4.30%。由此可以看出,O、OM处理可以有效增加团聚体的稳定性。

2.5 大蒜和小白菜的经济效益

不同施肥处理下大蒜和小白菜的经济效益见表6。不同处理大蒜的利润表现为OM>O>UM>U>CK,小白菜的利润表现为O>OM>U>UM>CK。不同处理大蒜的产投比为O>OM>U>UM>CK,小白菜的产投比为O>U>OM>UM>CK。综上,O和OM处理虽然初始投入较高,但利润和产投比较高,其经济效益优于其他施肥处理。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对菜地N₂O排放的影响

施肥处理会改变土壤生物化学性质,从而影响土壤氮素转化和N₂O排放^[21]。本试验结果表明,在各施肥处理中,O处理的土壤N₂O累积排放量最高。分析其原因可能与土壤铵态氮含量有关,在本试验中,土壤N₂O排放与土壤铵态氮含量呈显著正相关,施用的铵态氮肥以及有机肥中的有机氮被矿化成铵态氮,提供了高氨氮底物条件,促进硝化反应速率,从而增加土壤N₂O排放^[22]。同时,有研究发现有机肥的施用改善了土壤的物理结构,使土壤孔隙度增加,从而更有利于N₂O气体从土壤中逸出^[23]。而同等施氮条件下仅施有机肥处理的N₂O排放量低于有机肥配施氮肥处理,这可能是由于有机肥料有较高的C/N,施入土壤后刺激参与硝化和反硝化过程的微生物的呼吸和代谢过程,降低了土壤含氧量^[24],抑制了硝化反应的进行,从而减少N₂O排放。

本试验中,UM处理和OM处理较仅施氮肥和仅施有机肥处理的N₂O累积排放量均有所下降,说明配

表4 不同施肥处理下土壤不同粒级团聚体占比

Table 4 Proportion of soil aggregates of different particle sizes under different fertilization treatments

处理 Treatment	不同粒级团聚体质量分数 Mass fraction of aggregates of different particle sizes/%			
	>5 mm	2~5 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm
CK	53.25±7.37A	9.67±2.22A	26.22±5.32A	10.77±4.50B
U	56.24±10.55A	3.86±1.66B	19.94±4.75A	19.96±4.80A
UM	56.45±3.86A	4.52±0.74B	19.61±6.13A	19.41±3.22A
O	60.17±3.55A	8.41±1.93A	23.98±2.45A	7.44±1.03B
OM	62.67±3.03A	8.50±0.47A	21.91±4.98A	6.93±3.60B

表5 不同施肥处理土壤团聚体稳定性

Table 5 Soil aggregate stability under different fertilization treatments

处理 Treatment	团聚体稳定性指标 Aggregate stability index		
	MWD/mm	GWD/mm	$R_{0.25}/%$
CK	3.31±0.31AB	2.22±0.41AB	89.23±4.50A
U	3.20±0.42B	1.79±0.46B	80.04±4.80B
UM	3.23±0.15AB	1.80±0.13B	80.59±3.22B
O	3.58±0.14AB	2.58±0.18A	92.56±1.03A
OM	3.69±0.12A	2.72±0.23A	93.07±3.60A

表6 不同施肥处理大蒜和小白菜的经济效益

Table 6 Economic benefits of different fertilization treatments on garlic and cabbage

处理 Treatment	大蒜经济效益 Economic benefits of garlic				小白菜经济效益 Economic benefits of Chinese cabbage			
	产值 Output value/(万元·hm ⁻²)	投入 Input/ (万元·hm ⁻²)	利润 Profit/ (万元·hm ⁻²)	产投比 R_{oi}	产值 Output value/(万元·hm ⁻²)	投入 Input/ (万元·hm ⁻²)	利润 Profit/ (万元·hm ⁻²)	产投比 R_{oi}
CK	2.19	2.09	0.10	1.05	0.60	0.37	0.23	1.62
U	5.00	2.17	2.83	2.30	1.38	0.44	0.94	3.14
UM	5.19	2.35	2.84	2.21	1.44	0.62	0.82	2.32
O	5.34	2.19	3.15	2.44	1.76	0.47	1.29	3.74
OM	5.64	2.37	3.27	2.38	1.89	0.65	1.24	2.91

注:本试验其他成本(人工、水电、租金等)忽略不计,以便更直观地评估种植蔬菜的物质成本和潜在收益,在实际生产中人工成本须计入投入。
Note: Other costs (such as labor, utilities, and rent) are not taken into account in this experiment, in order to more intuitively assess the material costs of vegetable cultivation and the potential returns. However, labor costs must be included in the inputs in actual production.

施生物菌剂的确能够起到减缓农田 N_2O 排放的作用,这与前人的研究结果相似^[25-26]。解淀粉芽孢杆菌在生长和代谢过程中会消耗部分氮源,减少铵态氮的矿化,降低土壤 N_2O 的排放^[27]。Wu 等^[25]在探究解淀粉芽孢杆菌对植物生长和 N_2O 排放率的影响试验中,通过定量 PCR 和 DNA 测序网络分析发现,解淀粉芽孢杆菌通过显著减少氨氧化细菌(AOB)可部分抑制硝化过程,同时通过增加 N_2O 还原细菌的丰度来增强反硝化过程,从而减少 N_2O 排放。这也进一步解释了本试验中配施生物菌剂的施肥处理降低土壤 N_2O 排放的机制。此外,还有部分微生物菌剂中含有能够编码氧化亚氮还原酶的 *nosZ* 基因,如施氏假单胞菌等,可以通过反硝化过程将 N_2O 还原为 N_2 ,从而减少 N_2O 排放^[28]。也有研究发现,施入一些复合微生物制剂后,土壤脲酶活性提高,加速尿素分解为铵态氮,从而导致土壤 N_2O 排放量增加^[29-30]。因此,对于不同种类生物菌剂对 N_2O 排放的影响仍需进一步探究以揭示其机制。

不同施肥处理可能还受到土壤温度和土壤湿度的影响从而影响土壤 N_2O 的排放。本试验中,土壤温度与土壤 N_2O 排放量呈显著正相关关系。温度可直接和间接影响土壤 N_2O 排放。直接调控主要表现在对土壤微生物活动和酶活性的影响,如土壤温度增加可能降低土壤氧有效性进而促进反硝化作用产生 N_2O ^[31]。间接调控主要是通过土壤微生物活动改变土壤 O_2 和有效性碳的含量等。土壤湿度作为影响土壤 N_2O 排放的环境因子之一,可能通过影响土壤通气度和微生物活性进而调控硝化和反硝化作用的进行,从而影响土壤 N_2O 的排放^[32]。林红莲^[33]通过 ^{15}N 同位素标记法发现森林土壤 N_2O 排放 在 30%~70% 土壤饱和持水量范围内随水分增加而减少,而后随水分增加而增加。也有研究表明, N_2O 排放量随土壤充水孔隙度(WFPS)升高而增加,且在 WFPS 为 80%~95% 时达到最大排放量^[34]。本试验忽视了土壤湿度对土壤 N_2O 排放的影响,并未分析土壤湿度与 N_2O 排放的交互关系,这可能导致研究结果具有一定的片面性,难以全面剖析土壤 N_2O 排放的内在机制及其驱动因素,使得研究结论的科学性和普适性受到一定限制。

3.2 不同施肥处理对菜地 GWP 、 $GHGI$ 的影响

GWP 和 $GHGI$ 是用于评估温室气体排放对全球变暖影响的重要指标。根据试验数据,不同施肥处理的 GWP 由高到低依次为 O、U、UM、OM、CK, $GHGI$ 由高到低依次为 CK、U、O、UM、OM。在本研究中,与 U

处理相比,OM、O、UM 处理产量均有增长,其中 OM 处理增产最高,且其 $GHGI$ 和 GWP 也在各施肥处理中较低,这与前人研究结果一致。分析表明,合理搭配肥料的使用能够增强氮素的利用效率,进而刺激作物生长,实现增产减排的效果^[35-36]。此外,有研究发现不同有机肥、化肥配施比例对作物产量、品质的影响也不同^[37]。黄炎霞等^[38]通过生物有机肥和生物菌剂替代化肥实验发现,化肥减半配施生物有机肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和生物菌剂 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的花生产量与经济效益最高。

3.3 不同施肥处理对菜地土壤团聚体的影响

土壤团聚体由土壤颗粒通过各种作用力团聚形成。良好的团聚体结构不仅能增强土壤的保肥保水能力,而且对提高作物产量和减少 N_2O 排放也有着重要作用。本试验中,不同施肥处理下土壤团聚体组分存在一定差异。分析土壤团聚体组成发现,对比 CK 处理,各施肥处理分别在不同程度上增加了 >5 mm 粒径土壤团聚体占比,降低了 2~5 mm 和 0.25~2 mm 土壤团聚体的比例。U 和 UM 处理中 <0.25 mm 的团聚体占比显著增加,而 O 和 OM 处理则降低了 <0.25 mm 团聚体占比,但并不显著。这与姜灿烂等^[39]的研究结果相一致,其研究发现施用有机物料可以通过增加土壤有机质含量、提高微生物活性和改善土壤结构等途径,促进大团聚体的形成,从而降低土壤微团聚体的比例。

土壤团聚体稳定性是评价土壤质量的重要指标,本试验分别测定了 MWD 、 GMD 和 $R_{0.25}$ 值 3 个指标。分析数据发现,U 和 UM 处理的 3 个指标均有所降低,说明施用化肥可能会降低土壤团聚体稳定性。这可能是由于化肥中的养分离子增加了土壤中对团聚体结构具有分散作用的电解质浓度,导致土壤大团聚体含量降低,不利于团聚体的稳定^[40]。相较于 CK 处理,O 和 OM 处理的土壤团聚体稳定性指标则呈现上升趋势,这与赵红等^[41]的研究结果相似。一方面施用有机肥可以增加土壤中的有机质含量^[42],这些有机质作为胶结剂,有助于团聚体的形成和稳定;另一方面有机肥和生物菌剂的施用可提高土壤中微生物的活性^[43],这些生物活动有助于在大团聚体内形成微粒有机质,增加团聚体的稳定性。

3.4 菜地土壤团聚体与 N_2O 排放的关系

土壤团聚体作为土壤物理结构的重要单元,是影响土壤 N_2O 排放的重要因素。有研究发现大团聚体通气性低于小团聚体,可以通过反硝化作用产生更多

的N₂O^[44]。此外,还有研究发现大团聚体中碳氮含量更高,其反硝化潜势及N₂O排放量显著高于微团聚体^[45]。这表明土壤团聚体的结构特征对N₂O的生成与释放具有一定影响。也有学者指出N₂O累积排放量与土壤团聚体大小无相关关系^[46]。本试验通过相关性分析发现土壤团聚体与N₂O累积排放量无显著相关关系,其原因可能是本研究试验对象为新垦蔬菜地,种植年限较短,团聚体变化不显著,对N₂O排放影响较小,此外还可能受到土壤水分条件、施肥管理、土壤类型等因素影响,因此需要进行长期定位试验进行深入探究。

4 结论

(1)与仅施化学氮肥处理相比,化学氮肥和生物菌剂配施处理与有机肥替代25%化学氮肥和生物菌剂配施处理可以显著降低土壤N₂O排放。

(2)有机肥替代25%化学氮肥和生物菌剂配施处理增产效果最佳,有机肥替代25%化学氮肥处理次之。

(3)有机肥替代25%化学氮肥处理与有机肥替代25%化学氮肥和生物菌剂配施处理均能增加土壤大团聚体占比,促进土壤团聚体稳定性。

(4)综合考虑环境效应、产量和经济效益等因素,有机肥与生物菌剂共同施用既能提高蔬菜产量,又能降低单位产量温室气体的排放,适合在南京地区蔬菜种植中推广。

参考文献:

- [1] FORSTER P T, STORELVMO K, ARMOUR W, et al. The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity: in climate change 2021: the physical science basis: working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]//MASSON-DELMOTTE V P, ZHAI A, PIRANI S L, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 923-1054.
- [2] LIU Y, TANG H Y, MUHAMMAD A, et al. Emission mechanism and reduction countermeasures of agricultural greenhouse gases: a review [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019, 9(2): 160-174.
- [3] TIAN H Q, XU R T, CANADELL J G, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks[J]. *Nature*, 2020, 586(7828): 248-256.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook; 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [5] DUAN P P, ZHANG Q Q, ZHANG X, et al. Mechanisms of mitigating nitrous oxide emissions from vegetable soil varied with manure, biochar and nitrification inhibitors[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107672.
- [6] WANG X Z, ZOU C Q, GAO X P, et al. Nitrous oxide emissions in Chinese vegetable systems: a Meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 375-383.
- [7] 马凤捷, 蔡立群, 刘垠霖, 等. 不同微生物菌剂处理对哈密瓜品质及土壤养分和酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 69-77. MA F J, CAI L Q, LIU Y L, et al. Effects of different microbial inoculants on the quality of cantaloupe and soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 69-77.
- [8] 杨龙涛, 尚玮瑶, 万子龙, 等. 化肥减量配施生物有机肥对露地西葫芦产量、品质和养分分配的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(2): 64-73. YANG L T, SHANG W Y, WAN Z L, et al. Effects of fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizer on yield, quality and nutrient allocation of zucchini in open field[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(2): 64-73.
- [9] 祝海燕, 田素波, 李春雷, 等. 化肥减量配施生物有机肥对口感型番茄生长及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 125-130. ZHU H Y, TIAN S B, LI C L, et al. Effects of reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer on growth and quality of taste tomato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(19): 125-130.
- [10] 陈德乐, 王兴祥, 张亚楠, 等. 持续施用生物有机肥对花生产量和根际细菌群落的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 537-544. CHEN D L, WANG X X, ZHANG Y N, et al. Effect of persistent application of bioorganic fertilizer on peanut yield and rhizosphere bacterial community[J]. *Soils*, 2021, 53(3): 537-544.
- [11] 刘慧. 小麦玉米轮作下有机物料替代氮肥对潮土气体排放、理化性质及作物产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023: 62. LIU H. Effects of organic materials replacing nitrogen fertilizer on gas emission, physicochemical properties and crop yield in fluvo-aquic soil under wheat-maize rotation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023: 62.
- [12] 黄慧. 有机无机肥配施对夏玉米根系分布及产量形成的调控[J]. *农学学报*, 2023, 13(9): 13-17. HUANG H. Regulating summer maize root distribution and yield by combined application of organic manure and chemical fertilizer[J]. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(9): 13-17.
- [13] LIU X, CHEN C R, WANG W J, et al. Soil environmental factors rather than denitrification gene abundance control N₂O fluxes in a wet sclerophyll forest with different burning frequency[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 292-300.
- [14] 高琳, 潘志华, 杨书运, 等. 碳源和巨大芽孢杆菌添加对土壤微生物环境及N₂O、CH₄排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(6): 645-653. GAO L, PAN Z H, YANG S Y, et al. Effects of carbon source and *Bacillus megaterium* on soil microbial environment and N₂O, CH₄ emission[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(6): 645-653.
- [15] GAO Y X, SONG X, LIU K X, et al. Mixture of controlled-release and conventional urea fertilizer application changed soil aggregate stability, humic acid molecular composition, and maize nitrogen uptake[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147778.
- [16] 张楠, 黎烨, 刘玉莲, 等. 有机肥组分特征对黑土N₂O排放的影响

- 研究[J]. 土壤, 2023, 55(1):62-71. ZHANG N, LI Y, LIU Y L, et al. Effects of manure chemical compositions on N₂O emissions from black soils[J]. *Soils*, 2023, 55(1):62-71.
- [17] 杨梦远, 滕钊军, 孙丽英. 生物菌剂对蔬菜产量及菜地活性气态氮排放的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(4):456-462. YANG M Y, TENG Z J, SUN L Y. Effects of microbial agents on vegetable yield and reactive gaseous nitrogen emissions from vegetable field[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 14(4):456-462.
- [18] 赵文, 刘彬彬, 章蓉月, 等. 有机肥替代配施生物菌剂对玉米抽穗前生长发育的影响试验[J]. 南方农业, 2024, 18(15):26-31. ZHAO W, LIU B B, ZHANG R Y, et al. Experiment on the effect of organic fertilizer substitution and application of biological agents on the growth and development of maize before tasseling[J]. *South China Agriculture*, 2024, 18(15):26-31.
- [19] 袁鹏丽, 覃佳宇, 周雨茜, 等. 旱改水型耕地红壤团聚体稳定性及影响因素研究[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4):45-57. YUAN P L, TAN J Y, ZHOU Y Q, et al. Research on the stability of soil aggregates and influencing factors in paddy-converted farmland red soil[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(4):45-57.
- [20] 李廷宇, 申毅, 童俊飞, 等. 施用生物炭并减少灌水量对麦田土壤团聚结构及冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(36):110-116. LI T Y, SHEN Y, TONG J F, et al. Effects of biochar application and reducing irrigation amount on soil agglomeration structure and yield of winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(36):110-116.
- [21] 王昊, 胡荣桂, 林杉, 等. 长期施用有机肥和化肥对黑土 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(4):2621-2628. WANG H, HU R G, LIN S, et al. Effects of long-term application of organic and chemical fertilizers on N₂O emissions from black soils[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4):2621-2628.
- [22] DI H J, CAMERON K C, SHEN J P, et al. Nitrification driven by bacteria and not Archaea in nitrogen-rich grassland soils[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9):621-624.
- [23] 闫鹏, 张靖, 沈健林, 等. 有机无机肥配施对设施菜地 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(4):701-711. YAN P, ZHANG J, SHEN J L, et al. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on N₂O emission and NH₃ volatilization in protected vegetable soils[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(4):701-711.
- [24] XIA F, MEI K, XU Y, et al. Response of N₂O emission to manure application in field trials of agricultural soils across the globe[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733:139390.
- [25] WU S H, ZHUANG G Q, BAI Z H, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from acidic soils by *Bacillus amyloliquefaciens*, a plant growth-promoting bacterium[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6):2352-2365.
- [26] 王晓朋, 胡坤, 童晨晓, 等. 猪粪与菌剂配施对山地红壤温室气体排放的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(11):1323-1331. WANG X P, HU K, TONG C X, et al. Effect of bacterial agent added to fertilizer on greenhouse gas emissions of mountain red soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(11):1323-1331.
- [27] 王璠, 徐圣君, 马双龙, 等. 解淀粉芽孢杆菌菌剂对雪菜生长和土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(13):229-235. WANG F, XU S J, MA S L, et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer on *Brassica juncea* var. multiceps growth and N₂O emission from soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(13):229-235.
- [28] 刘春梅, 盛荣, 刘毅, 等. 一株兼性氧化亚氮还原菌的还原 N₂O 能力[J]. 微生物学报, 2018, 58(8):1431-1438. LIU C M, SHENG R, LIU Y, et al. Capability of N₂O reduction of a facultative N₂O reducer[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(8):1431-1438.
- [29] 曹恩琿, 侯宪文, 李光义, 等. 复合菌剂对盆栽番茄土壤理化性质及微生物活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5):875-880. CAO E H, HOU X W, LI G Y, et al. Effect of combination bacteria on soil physicochemical properties and soil microbial activity by pot tomato experiments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(5):875-880.
- [30] 白红英, 李春越, 张一平. 旱地土壤 N₂O 排放与土壤脲酶活性关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1):29-33. BAI H Y, LI C Y, ZHANG Y P. Study on N₂O emission and urease activity in dryland soil[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31(1):29-33.
- [31] LI L F, ZHENG Z Z, WANG W J, et al. Terrestrial N₂O emissions and related functional genes under climate change: a global Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2):931-943.
- [32] 苏星源, 吴世杰, 高威, 等. 两种水分含量下生物炭对黑土 N₂O 排放及硝化反硝化基因丰度的影响[J]. 土壤, 2022, 54(5):928-935. SU X Y, WU S J, GAO W, et al. Effects of biochar on N₂O emission and nitrification-denitrification gene abundances under two water status in black soils[J]. *Soils*, 2022, 54(5):928-935.
- [33] 林红莲. 米楮天然林土壤氮素转化和 N₂O 产生的温湿度影响研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2021. LIN H L. A study of soil N transformation and N₂O production for *Castanopsis carlesii* dominated natural forest as affected by temperature and moisture[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2021.
- [34] SCHINDLBACHER A, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, BUTTERBACH-BAHL K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soils[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D17):D17302.
- [35] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [36] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20):3934-3943. XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura*

- Sinica*, 2016, 49(20):3934-3943.
- [37] 张平良, 曾骏, 刘晓伟, 等. 陇东旱塬冬小麦化肥减施有机替代技术规范[J]. 甘肃农业科技, 2020, 51(8):82-85. ZHANG P L, ZENG J, LIU X W, et al. Technical specification for organic substitution of reduced fertilizer application for winter wheat in Longdong dryland[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2020, 51(8):82-85.
- [38] 黄炎霞, 郑国栋, 龚岫, 等. 化肥减量配施生物有机肥和微生物菌剂对花生生长、产量及经济效益的影响[J]. 福建农业科技, 2024, 55(3):57-61. HUANG Y X, ZHENG G D, GONG S, et al. Application effect of chemical fertilizer reduction combined with biological organic fertilizer and microbial agent on peanut growth, yield and economic benefits[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2024, 55(3):57-61.
- [39] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4):715-722. JIANG C L, HE Y Q, LIU X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):715-722.
- [40] SARKAR S, SINGH S R, SINGH R P. The effect of organic and inorganic fertilizers on soil physical condition and the productivity of a rice - lentil cropping sequence in India[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2003, 140(4):419-425.
- [41] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):306-311. ZHAO H, YUAN P M, LÜ Y Z, et al. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. *Soils*, 2011, 43(2):306-311.
- [42] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10):2183-2193. LU T W, CAI A D, XU M G, et al. Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10):2183-2193.
- [43] 王梦雅, 符云鹏, 贾辉, 等. 不同菌肥对土壤养分、酶活性和微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(1):57-63. WANG M Y, FU Y P, JIA H, et al. Influence of different microbial agents on nutrients and enzyme activities of soil and functional diversity of microbial communities[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2018, 39(1):57-63.
- [44] 周汉昌, 张文钊, 刘毅, 等. 土壤团聚体N₂O释放与反硝化微生物丰度和组成的关系[J]. 土壤学报, 2015, 52(5):1144-1152. ZHOU H C, ZHANG W Z, LIU Y, et al. Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5):1144-1152.
- [45] DIBA F, SHIMIZU M, HATANO R. Effects of soil aggregate size, moisture content and fertilizer management on nitrous oxide production in a volcanic ash soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(5):733-747.
- [46] 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N₂O排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11):3961-3968. CHEN J S, SUN W H, WANG G S, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N₂O emission in winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11):3961-3968.

(责任编辑:李丹)