

网络出版时间:2025-01-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250113.0955.014

有机肥与缓释肥配施对小麦产量及土壤碳储量和 温室气体排放的影响

徐昊¹,周吉鑫¹,唐滢柯¹,李春燕^{1,2},丁锦峰^{1,2},朱敏^{1,2},郭文善^{1,2},朱新开^{1,2,3}

(1.江苏省作物遗传生理重点实验室/扬州大学小麦研究中心,江苏扬州 225009; 2.江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心,江苏扬州 225009; 3.教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室,江苏扬州 225009)

摘要:为探寻最佳有机肥替代缓释肥比例,依照等施氮量原则,以扬麦34为供试材料,设置有机肥+缓释肥全部基施(M1)和有机肥基施+缓释肥基施60%+返青期追施40%(M2)两种施肥模式,以及4种配施类型[40%有机肥+60%缓释肥(4/6MN)、30%有机肥+70%缓释肥(3/7MN)、20%有机肥+80%缓释肥(2/8MN)、100%缓释肥(0/10N)],同时设置5:1:2:2(基肥:壮蘖肥:拔节肥:孕穗肥)施用常规尿素处理(CK)和有机肥100%基施处理(10/0M)处理,分析相同施氮水平下有机肥与缓释肥不同配施比例及氮肥运筹模式对小麦产量、土壤生化性质及温室气体排放强度的影响。结果表明,在不同施肥模式下小麦产量表现为M2>CK>M1>10/0M,以M2模式的3/7MN处理增产效果最好。在相同施肥模式下,随有机肥配施比例的提高,土壤有机质、总碳含量呈先增后减趋势,土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量呈先减后增趋势,其中M2模式下3/7MN处理对土壤养分含量的提高效果显著。缓释肥二次施用条件下3/7MN处理的土壤蔗糖酶、脲酶活性、微生物碳氮含量均最高,2/8MN处理的土壤过氧化氢酶活性最高。不同施肥模式下土壤CO₂累积排放量表现为10/0M>M1>M2>CK,N₂O累积排放量表现为M1>CK>10/0M>M2。与CK相比,缓释肥二次施用能有效降低全球增温潜势,降幅为4.22%。小麦收获后土壤有机碳储量较播前增加9.88%~30.17%,其中缓释肥分施处理较缓释肥一次性基施处理对土壤固碳的影响更为显著。因此,在缓释肥二次施用模式基础上配施20%~30%有机肥,可提升土壤生化性能,促进土壤碳库,减少温室气体排放,提高小麦籽粒产量。

关键词:小麦;有机肥与缓释肥配施比例;土壤养分;籽粒产量;CO₂、N₂O排放;增温潜势

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0662-10

Effects of Partial Replacement of Slow Release Fertilizer with Organic Fertilizer on Wheat Yield, Soil Carbon Storage, and Greenhouse Gas Emissions

XU Hao¹, ZHOU Jixin¹, TANG Yingke¹, LI Chunyan^{1,2}, DING Jinfeng^{1,2},

ZHU Min^{1,2}, GUO Wenshan^{1,2}, ZHU Xinkai^{1,2,3}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Wheat Research Center, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Modern Grain Crop Industry Technology, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3. Joint Laboratory of International Cooperation in Agriculture and Agricultural Products Safety, Ministry of Education, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: In order to explore the effects of the proportion of organic fertilizer replacing slow-release fertilizer on wheat yield, soil fertility, and greenhouse gas emissions, two fertilization modes of organic slow-release fertilizer (M1) and organic fertilizer (60%) + slow-release fertilizer (40% for top-dressing) (M2) in green period were set up with Yangmai 34 as the test material according to the prin-

收稿日期:2024-04-11 修回日期:2024-06-02

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022312);江苏省现代农业产业技术体系建设专项(JATS[2023]459);江苏高校优势学科建设工程项目;扬州市名师工作室资助项目

第一作者 E-mail: xuhao12354@163.com(徐昊)

通讯作者 E-mail: xkzhu@yzu.edu.cn(朱新开)

ciple of equal nitrogen application amount. Four types of combined application were conducted: 40% organic fertilizer+60% slow-release fertilizer(4/6MN), 30% organic fertilizer+70% slow-release fertilizer(3/7MN), 20% organic fertilizer+80% slow-release fertilizer(2/8MN), and 100% slow-release fertilizer(0/10N). The effects of urea(CK) and 100% organic fertilizer(10/0M) on wheat yield, soil biochemical properties, and greenhouse gas emission intensity under the same nitrogen application level were studied in the fertilization mode 5:1:2:2(base fertilizer:tillering fertilizer:jointing fertilizer:gestation fertilizer). The results showed that under different nitrogen management methods, wheat yield ranked as $M2 > CK > M1 > 10/0M$, where the 3/7MN treatment in M2 mode had the best yield increase effect. Under the same fertilization mode, with the increase of the proportion of organic fertilizer application, the soil organic matter and total carbon content showed a trend of first increasing and then decreasing, while the total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen content showed a trend of first decreasing and then increasing. Among them, the 3/7MN treatment under M2 mode had a significant effect on improving soil nutrients. Under the conditions of secondary application of slow-release fertilizer, the soil sucrose, urease activity, and microbial carbon and nitrogen content were highest under the 3/7MN treatment, while the soil catalase activity was highest under the 2/8MN treatment. The cumulative emissions of soil CO_2 under different nitrogen management methods ranked as $10/0M > M1 > M2 > CK$, and the cumulative emissions of N_2O ranked as $M1 > CK > 10/0M > M2$. Compared with CK, the secondary application of slow-release fertilizer can effectively reduce the global warming potential by 4.22%. After wheat harvest, soil organic carbon storage was increased by 9.88% to 30.17%. Compared to M1, the slow-release fertilizer application treatment showed a more significant effect on soil carbon sequestration than the slow-release fertilizer one-time base application treatment. Therefore, combining the application mode of slow-release fertilizer with 20% to 30% organic fertilizer can improve soil biochemical performance, promote soil carbon storage, reduce greenhouse gas emissions, and increase wheat grain yield.

Keywords: Wheat; Ratio of organic fertilizer and slow-release fertilizer; Soil nutrients; Grain yield; CO_2 and N_2O emission; Warming potential

传统氮素化肥的施用在一定程度上提高了作物的产量,但传统氮素化肥存在氮素利用效率低的问题,常造成过度施用,对生态环境和农业的可持续发展造成不可逆的负面影响^[1]。如何在增加产量的同时提高化肥利用率,满足作物全生育期的养分需求,已成为现代肥料业发展的必然趋势^[2-3]。控释肥料是现代农业肥料发展中出现的必然产物。相关研究表明,缓释肥的养分释放速度可控,养分释放周期长,可为作物的生长持续提供养分,降低过度施肥的风险,被认为可促进作物的增产增效^[4]。由于冬小麦的生长周期和养分需求特性存在差异,对于小麦上缓释肥一次性施用的实际效果,目前仍存在较大争议。缓释氮肥的一次性基施对于小麦的生长具有积极影响,显著增加小麦产量,最高产量增幅可达 38.8%,还能在一定程度上优化氮肥的利用效果,使氮肥利用率提升 23.8 个百分点^[5];而盛海君等^[6]认为,缓

释肥分两次施用比一次性施用更能满足小麦全生育期的养分需求,从而提高肥料利用率。本质上缓释肥是肥效缓和的无机肥,然而无机肥的长期单一施用易造成土壤养分的大量流失、土壤板结酸化加剧等现象^[7]。有机肥虽然肥效较慢,但具有持续的养分供给能力,对于土壤的改善和环境的保护有重要作用。因此,为了满足作物生长需求,同时实现农业可持续发展,有机肥与无机肥配合施用已成为现代农业的必然选择。找到合理的有机肥与无机肥配施比例,不仅可以提高作物的产量和品质,还可以改善土壤环境,提高土壤肥力,减少温室气体排放,为农业的可持续发展奠定基础^[8]。田胜营等^[9-12]研究表明,通过合理搭配有机肥和无机肥,可以确保养分的均衡供应,满足作物的生长需求,促进养分的有效吸收利用,进而提高作物产量。此外,在确保产量稳定的基础上,有机肥部分替代化肥有助于提升土壤养分的有效

性,改善土壤质量,为农业的可持续发展提供有力支持。

鉴于目前有机肥与无机肥配施主要集中在有机肥、无机肥一次性施用对小麦产量及土壤养分吸收利用的影响,对于有机肥部分替代缓释肥在不同施肥模式下应用效果的研究较少。本试验在前人研究的基础上,将有机肥与无机肥不同配施比例与 2 种施肥模式进行组合,分析其对小麦籽粒产量、土壤理化特性、有机碳储量和温室气体排放等方面的影响,提出适宜的配施比例,以期为小麦高产高效栽培及农业可持续发展方面提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验场地描述

试验于 2022—2023 年在扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室试验田(119°25'E, 32°39'N)进行。该地区属于亚热带季风湿润气候向温带季风气候过渡的地区,年平均最高温 22 °C,平均最低温 12 °C,年总降水量 638.1 mm。试验田前茬作物为水稻,土质为砂壤土;0~20 cm 土壤 pH 值 7.42,有机质、速效钾、有效磷、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量分别为 21.0 g·kg⁻¹、194.7 mg·kg⁻¹、81.3 mg·kg⁻¹、119.0 mg·kg⁻¹、2.99 mg·kg⁻¹ 和 19.8 mg·kg⁻¹,容重为 1.52 g·cm⁻³,底施氮肥前土壤有机碳储量为 3.70 kg·m⁻²。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计:主区设置有机肥+缓释肥全部基施(100%基施,M1)和有机肥基施+缓释肥分次施(基施 60%+返青期追施 40%,M2)2 种施肥模式;副区为有机肥与缓释肥配施比例,设 4 种类型[40%有机肥+60%缓释肥(4/6MN)、30%有机肥+70%缓释肥(3/7MN)、20%有机肥+80%缓释肥(2/8MN)、100%缓释肥(0/10N)]。试验另设常规尿素生产推荐施肥(基肥:壮蘖肥:拔节肥:孕穗肥=5:1:2:2)处理(CK)和全部基施有机肥处理(10/0M)。每个处理重复 3 次。各处理总施氮量一致,均为 225 kg·hm⁻²;磷、钾肥全部基施,施用量均为 112.5 kg·hm⁻²。其他管理措施同当地大田生产。小麦于 2022 年 11 月 2 日播种,使用播种机条播,基本苗 225 万株·hm⁻²,行距 27 cm,小区面积 12 m²(3 m×4 m)。

本试验中除普通尿素(N:46%)外,商品有机肥(M)(N:3.5%,P₂O₅:1%,K₂O:0.8%)由东旺肥料公司生产;硫包膜尿素(N:37%)的缓释期 90~120 d,由汉枫缓释肥料(江苏)有限公司生产提供。各处理中除供氮水平一致外,P₂O₅、K₂O 也分别用磷、钾肥调至同一水平。供试小麦品种为扬麦 34,由江苏省里下河地区农业科学研究所提供。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室气体的采集与测定

使用静态暗箱气相色谱法来测量麦田中 CO₂、N₂O 的排放通量。通常每周进行 1 次,施肥后连续观测,采集频率为 2~3 d 一次。每周定时定点进行暗箱观测,采样时间为早上 9:00—11:00,每隔 10 min 使用注射器采集一次气体样品,每次抽取 50 mL,共计 5 次。样品采集后立即带回实验室,用气相色谱仪(Agilent 7890A, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA)分析测定,检测器为 ECD。通过气体浓度变化率求得各气体的排放通量($F, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)^[13]。

$$F = \rho \times h \times dc/dt \times 273 / (273 + T)$$

式中, ρ 为标准状态下气体的密度(kg·m⁻³); h 为采样箱净高度(m), dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率,273 为气态方程常数; T 为采样时箱内平均温度(°C)。

累计排放通量是观测期间内每天排放量的累加值,日排放量为排放通量乘 24 h,两次测定间的排放通量采用插值计算法计算。

根据 IPCC 的报告,以 100 年影响尺度为计,1 kg N₂O 的增温效应是 1 kg CO₂ 的 298 倍,用综合增温潜势(GWP)来表示 2 种温室气体的共同增温作用^[14]。

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

式中, f_{CO_2} 为土壤 CO₂ 的累积排放量(kg·hm⁻²), $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为土壤 N₂O 的累积排放量(kg·hm⁻²)。

1.3.2 产量及其构成因素测定

在小麦成熟期,每个小区选 3 个 1 m 长单行进行穗数统计;连续取麦穗 40~60 个,计算穗粒数。每个小区选取 1.08 m² 进行收割、脱粒后,测定籽粒产量和千粒重,折算为 13%水分含量下的产量和千粒重。

1.3.3 土壤样品采集及测定

小麦收获后采集 0~20 cm 土层土样。样品

分成两部分,一部分鲜土研磨过 2 mm 筛后放置于 4 °C 冰箱保存,用于测定土壤微生物生物量碳、氮含量;另一部分自然风干,研磨过 100 目筛,用于测定土壤有机质、硝态氮、铵态氮、总氮、全碳含量和酶活性。采用重铬酸钾容量法测定 0.1 g 风干土壤中有有机质(SOM)含量^[15]。使用元素分析仪法测定 1.0 g 风干土中的土壤全氮(TN)和总碳(TC)含量。采用 2 mmol · L⁻¹ 的 KCL 溶液(KCL:土壤=5:1)浸提风干土 1 h,使用连续流动分析仪(Model AA3-A001-02E, Bran-Luebbe, Norderstedt, Germany)测定硝态氮和铵态氮含量。使用环刀法测定土壤容重(BD)。土壤微生物生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提后用 TOC 仪测定,土壤微生物生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提-凯氏定氮法测定^[16]。土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性根据相关试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司,苏州)的方法测定。计算有机碳储量^[17]。

$$SOCS = C \times BD \times D \times 10^{-2}$$

式中,SOCS 指有机碳储量(kg · m⁻²);C 是土壤有机碳含量(g · kg⁻¹);BD 是土壤容重(g · cm⁻³);D 是土层深度(cm)。

1.4 数据统计分析

采用 Execl 2010 进行数据整理,采用 SPSS 25.0 统计软件进行数据统计性分析($P < 0.05$),

采用 Origin 2010 进行相关性分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 有机肥与缓释肥配施对小麦产量及构成因素的影响

有机肥与缓释肥配施及施肥模式显著影响小麦产量及其构成因素(表 1)。不同施肥模式的产量趋势总体呈现 M2>CK>M1>10/0M。M1 施肥模式下,有机肥部分替代缓释肥较 CK 均表现出减产效应,小麦减产幅度为 0.56%~11.41%,其中除有机肥替代 30%缓释肥处理(3/7MN)外,其余处理与 CK 差异均显著。M2 施肥模式下,各处理较 CK 均增产 2.25%~14.83%,且差异均显著,其中以 3/7MN 处理的产量最高。从产量构成看, M2 施肥模式的穗数和千粒重较 M1 施肥模式总体上有所提高,穗粒数有所降低。在相同施肥模式下,随有机肥替代缓释肥比例的提高,穗数呈先增后降趋势,千粒重和穗粒数则分别呈增加和降低趋势。这说明,在等施氮量条件下, M2 施肥模式可有效协调产量构成因素,实现增产,其中以有机肥 30%替代缓释肥的增产效果最佳。

2.2 有机肥与缓释肥配施对土壤养分的影响

由表 2 可知,有机肥与缓释肥配施及施肥模式对成熟期麦田 0~20 cm 耕层土壤有机质、总碳、全氮、硝态氮、铵态氮均有显著影响。与 CK 和

表 1 不同配施处理对小麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Differences of wheat yield and its components under different application treatments

处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较 CK 增产幅度 Yield increasing rate relative to CK/%	
CM	468.83c	48.64g	42.34b	8 434.73d	—	
10/0M	376.24f	42.20h	43.80a	6 158.09h	-26.99	
M1+4/6MN	420.99e	49.38e	42.00bc	7 472.02g	-11.41	
M1+3/7MN	441.98d	51.76c	41.38cd	8 387.18de	-0.56	
M1+2/8MN	435.49d	52.78b	41.23cd	8 279.05ef	-1.85	
M1+0/10N	420.68e	53.60a	39.97e	8 185.49f	-2.95	
M2+4/6MN	468.21c	48.78fg	42.39b	8 624.39c	2.25	
M2+3/7MN	519.14a	49.24ef	41.55cd	9 685.27a	14.83	
M2+2/8MN	487.34b	50.20d	41.43cd	8 842.05b	4.83	
M2+0/10N	470.06c	51.30c	41.03d	8 760.00b	3.86	
A	274.577**	3 567.516**	58.765**	1 908.412**	—	
F 值 F value	B	81.566**	114.325**	23.910**	143.371**	—
	A×B	36.443**	46.245**	9.399**	69.214**	—

同列数据后的不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。A:施肥模式;B:配比比例。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。下表同。

Different letters after the values in the same columns indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). A: Fertilization model; B: Combined application ratio. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same in tables 2 and 3.

0/10M 处理相比,有机肥与缓释肥配施处理的土壤有机质含量均提高,且多数差异显著。在相同配施比例下,M2 施肥模式的土壤有机质含量高于 M1 施肥模式,其中 M2 施肥模式下有机肥替代 30%缓释肥处理的土壤有机质含量最高,与其他处理差异显著。

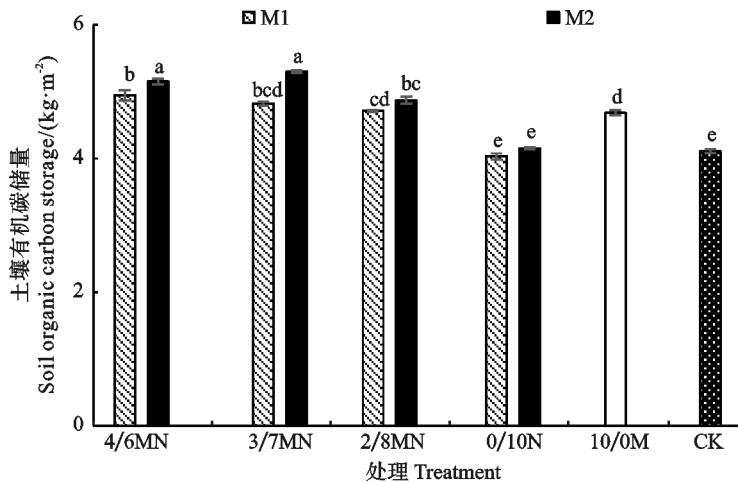
相同施肥模式下,有机肥与缓释肥配施处理的土壤总碳含量变化趋势与土壤有机质基本一致;土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量随有机肥配施比例的增加均呈先减后增趋势(表 2)。相同配施比例下,M2 施肥模式的土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量均低于 M1 施肥模式,其中 M2 施肥模式下有机肥替代 30%缓释肥处理的土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量均最低。

有机肥与缓释肥配施对土壤碳储量有着显著正向效应(图 1)。与 CK 和 0/10M 处理相比,有机肥与缓释肥配施处理的土壤有机碳均不同程度增加,且多数差异显著。与单施缓释肥处理相比,有机肥与缓释肥配施处理的土壤碳储量在 M1 和 M2 施肥模式下分别增加 14.43%~18.48%和 14.77%~21.69%。其中,以 M2 施肥模式下有机肥替代 30%缓释肥处理的土壤有机碳储量最高,有机肥替代 40%缓释肥处理略低,二处理与其他处理均差异显著。进一步分析表明,有机肥替代比例与产量及土壤有机碳储量较播种前的增幅均呈抛物线关系,说明有机肥与缓释肥合理配施可在增加小麦产量的同时提高土壤有机碳储量,有助于改善土壤质量(图 2)。

表 2 不同配施处理下小麦成熟期田间土壤养分含量的影响

Table 2 Differences of soil nutrient contents in wheat field at maturity stage under different application treatments

处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g · kg ⁻¹)	总碳 Total carbon/ (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g · kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg · kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg · kg ⁻¹)	
CM	24.944f	12.705f	1.396gh	22.481ab	8.625de	
10/0M	27.051de	13.569cd	1.388h	23.125a	9.235cd	
M1+4/6MN	28.759bcd	13.405d	1.476a	21.874bc	12.521a	
M1+3/7MN	29.101bc	13.648c	1.405fg	19.033d	10.439bc	
M1+2/8MN	28.133cd	13.734c	1.430bc	19.176d	10.986b	
M1+0/10N	23.577f	12.888ef	1.437b	20.936cd	12.053a	
M2+4/6MN	30.582b	13.682c	1.425cd	15.402e	9.089de	
M2+3/7MN	33.486a	14.511a	1.394h	13.353f	8.131e	
M2+2/8MN	29.443bc	13.946b	1.412ef	14.741ef	8.794de	
M2+0/10N	25.399ef	13.049e	1.417de	15.227e	8.951de	
F 值	A	25.877*	245.602**	124.341**	127.276**	62.166**
F value	B	105.932**	61.284**	123.829**	120.133**	10.275**
	A×B	39.338**	25.169**	55.825**	52.471**	4.801**



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下图同。

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same in Fig. 3.

图 1 不同配施处理下土壤有机碳储量的差异

Fig. 1 Difference of soil organic carbon storage under different application treatments

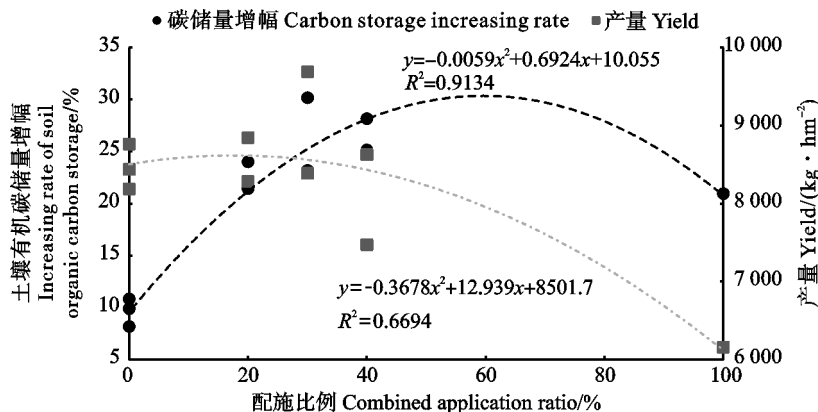


图 2 有机肥部分替代缓释肥比例与土壤碳储量增幅及小麦产量的关系

Fig. 2 Relationship between the proportion of organic fertilizer partially replaced by slow-release fertilizer and the increasing rate of soil carbon storage and wheat yield

2.3 有机肥与缓释肥配施对土壤生物学性质的影响

施肥模式对土壤蔗糖酶、脲酶活性、微生物碳氮含量的影响规律均相似,整体表现为 M2 > M1 > CK > 10/0M(表 3)。与 CK 相比,M1 施肥模式显著降低土壤蔗糖酶、脲酶活性和微生物碳氮含量,M2 施肥模式则显著提高土壤蔗糖酶、脲酶活性和微生物碳氮含量。同一施肥模式下,土壤

蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性、微生物碳氮含量均随有机肥配施比例的增加呈现先增后减的趋势,除过氧化氢酶活性在 M2 施肥模式下以 2/8MN 处理最高外,各指标均以 3/7MN 处理最大。以上结果表明,缓释肥二次分施并与有机肥配施可提高土壤酶活性和微生物碳氮含量,有助于土壤肥力提升,其中缓释肥以 M2 施肥模式配施 30% 有机肥的效果最佳。

表 3 不同处理下小麦收获后土壤生物学性质

Table 3 Soil biological properties after wheat harvest under different treatments

处理 Treatment	蔗糖酶 Sucrase/ ($\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	脲酶 Urease/ ($\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase/ ($\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	微生物量碳 Microbial biomass carbon/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
CM	98.71d	205.88d	18.38efg	128.292d	16.573e	
10/0M	74.33i	124.80g	19.16e	102.827i	11.512i	
M1+4/6MN	79.72h	137.65f	20.25cd	106.029h	12.802h	
M1+3/7MN	97.29e	192.29e	21.62b	119.439e	15.685f	
M1+2/8MN	92.79f	189.65e	20.42bc	115.744f	15.210f	
M1+0/10N	87.42g	144.89f	18.14e	109.060g	13.479g	
M2+4/6MN	99.31cd	207.67d	22.87a	130.664d	17.316d	
M2+3/7MN	117.08a	272.93a	23.28a	147.238a	21.806a	
M2+2/8MN	111.47b	255.21b	23.38a	142.661b	20.257b	
M2+0/10N	100.39c	226.71c	18.93e	136.005c	18.201c	
F 值						
F value	A	2 789.841 **	810.748 **	66.732 **	786.45 **	1 014.16 **
	B	606.528 **	240.458 **	192.349 **	347.517 **	211.391 **
	A×B	243.030 **	93.083 **	80.291 **	146.08 **	76.731 **

2.4 麦田土壤 N₂O、CO₂ 累积排放量及全球增温潜势分析

有机肥与缓释肥配施比例、施肥方式及其互作对麦田土壤 CO₂、N₂O 累积排放量的影响均显

著(图 3)。不同施肥模式间,CO₂ 累积排放量表现为 10/0M > M1 > M2 > CK, N₂O 累积排放量表现为 M1 > CK > 10/0M > M2。与 CK 相比, M1 施肥模式下单施缓释肥处理的 N₂O 累积排

放量增幅最大,达到 10.74%;单施有机肥处理的 CO₂ 累积排放量增幅最大,为 25.09%。在相同施肥模式下,CO₂ 累积排放量表现为有机肥与缓释肥配施处理高于单施缓释肥处理,且随有机肥配施比例的增加而增加;而 N₂O 累积排放量则表现为随配施比例的提高呈先降后增的趋势,且在 M2 施肥模式下配施 30% 有机肥的处理最低,相较于 CK 的降幅达 18.04%。

N₂O、CO₂ 全球增温潜势对施肥的反应和 CO₂ 累积排放量趋势基本一致(图 3)。与 CK 相比,缓释肥二次分施降低了全球增温潜势,降幅为 4.22%;单施有机肥处理的全球增温潜势最大,较

CK 增加 22.26%。在同一施肥模式下,有机肥与缓释肥配施处理的全球增温潜势均显著高于单施缓释肥处理。在相同配施比下,M1 施肥模式的全球增温潜势均显著高于 M2 施肥模式。

3 讨论

3.1 有机肥部分替代缓释肥下小麦的产量表现

小麦产量由穗数、穗粒数和千粒重三个因素决定,三者之间相互联系,相互制约^[18]。研究发现,等施氮量条件下硫包膜尿素分次施用(60%基施、40%返青期追施)有利于构建合理的群体结构,提高茎蘖成穗率,协调产量构成因素;相较硫包膜尿素一次基施和常规尿素分次施肥,缓释肥分施处理可有效增加穗数,保证后期养分供应,从而增加粒重^[19]。郭标^[20]研究指出,有机肥替代化肥条件下小麦产量随替代比例的增加呈现先增后降的趋势,以有机肥等养分替代 30% 化肥的产量最高。汪洪焦等^[21]的试验结果显示,有机肥与无机肥配施对小麦的增产效果显著,且千粒重、穗粒数和穗长均显著高于单施化肥处理。赖宁等^[22]研究认为,合理的有机肥与无机肥配施比例能促进小麦地上部植株氮磷的积累,提高穗数、穗粒数和籽粒产量。本研究与这些研究结果基本一致。本试验中,有机肥配施缓释肥的比例与缓释肥施用模式间具有一定的协调性,其中缓释肥二次分施对小麦产量提升效果显著,小麦产量随有机肥配施比例的增加呈先增后减的趋势。其原因可能是分施缓释肥和配施有机肥能够为小麦生育中后期提供充足的养分,促进成穗和籽粒发育,提高结实率,同时有机肥能够减缓小麦根系和叶片的衰老速度,延长光合作用时间,增加灌浆时间,提高穗粒质量,最终实现产量的显著提升^[23-24]。本研究还表明,有机肥配合分施缓释肥能够满足小麦生育后期的养分需求,提高穗数的同时增加了千粒重,从而获得高产。在配施有机肥条件下,缓释肥两次施用处理的穗数和千粒重优于一次基施处理,产量显著提高,其中以有机肥替代 30% 缓释肥且两次施肥的产量最高,达到 9 685.27 kg · hm⁻²。

3.2 有机肥与缓释肥配施对土壤养分及温室气体排放的协同性效应

作物生长需要的养分主要来自于土壤。有机肥与无机肥配施既可以获得作物稳产增产的效果,又能降低化肥施用量,改善土壤质量^[25]。本试验中,有机肥与缓释肥配施显著影响土壤有机

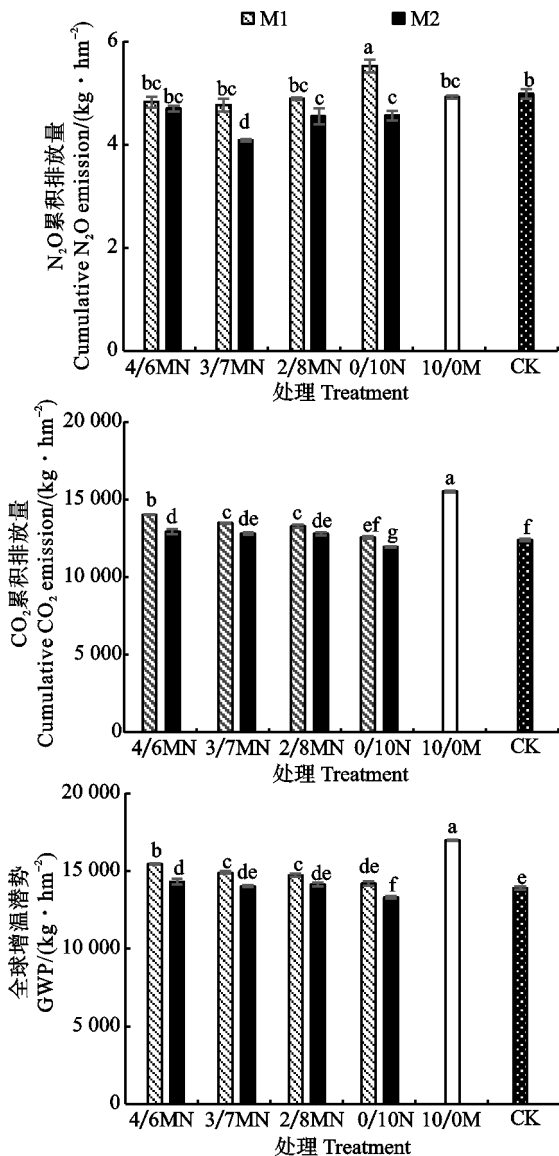


图 3 不同配施处理下土壤累积 CO₂、N₂O 排放量和全球增温潜势

Fig. 3 Cumulative CO₂ and N₂O emissions and global warming potential(GWP) of soil under different treatments

质、总碳、全氮、硝态氮和铵态氮含量。研究发现,小麦植株氮素积累量与土壤无机氮含量呈负相关,说明通过合理的氮肥运筹减少土壤氮含量是提高氮肥利用率的有效途径之一;同时以有机肥部分替代化肥可降低土壤容重和增加土壤有机质,进而提高农田碳储量^[26-27]。通过长期定位试验,施用有机肥对土壤的培肥效果较单施缓释肥显著^[28]。这是因为有机肥含有易分解的氮和碳,矿化损失小于无机肥^[29];同时,缓释肥养分释放具有长时性,从而为小麦生育后期氮的持续供应提供保障,并且缓释肥残膜在土壤中分解能够一定程度上改善土壤理化性质,从而改善微生物群落,有利于土壤养分的矿化和腐殖质的分解^[30]。本研究中,缓释肥分施且有机肥替代30%缓释肥能有效提高土壤有机质和总碳含量,加大农田有机碳储量,减少土壤全氮、硝态氮和铵态氮在0~20 cm土层的积累量,在保证小麦不减产前提下提高农田固碳效益。

在土壤物质循环和能量流动中,土壤酶作为主要参与者影响整个土壤内环境^[31]。有机肥与无机肥配施对土壤酶活性有显著提高效应^[32]。土壤酶能推动土壤有机质的矿化分解以及土壤养分的循环与转化,其活性与土壤肥力之间存在紧密联系^[33]。本试验中,土壤酶与土壤养分之间存在相互促进作用,进而配施合理比例的有机肥能够增进微生物生长和代谢,提高土壤酶活性和养分的可利用性,从而促进小麦生长,实现增产增收。

麦田是温室气体排放的重要来源,肥料施用是影响CO₂和N₂O排放的主要原因^[34]。农田N₂O主要源自土壤中的硝化和反硝化过程。在植株生育初期,由于作物对氮素的需求量相对较少,基肥施入后易造成土壤中硝态氮和铵态氮大量积累。此外,有机肥的施用对土壤硝化和反硝化作用具有直接影响,能为土壤提供丰富的酶和有机碳,进而促进反硝化微生物的活动。这些活动在刺激作物生长的同时,也加剧了N₂O的排放^[35-36]。有机肥的施入也会带来大量土壤碳源,有利于促进微生物的活动,加快有机质的分解,提高土壤呼吸作用,也有利于作物根系生长,促进根系呼吸,进而加快CO₂的排放^[37]。本试验结果发现,单施缓释肥且分次施用处理的CO₂累计排放量最低,可能原因是单施无机氮肥改变了土壤的碳氮比,能有效抑制土壤微生物的呼吸作用。施用有机肥促进了麦田土壤CO₂排放,这与丁晨

曦、黄晶等^[16,38]的研究结果一致。此外,在本试验条件下,10/0M处理的CO₂和N₂O排放显著高于其他处理,但不同配施处理间差异不显著,说明纯施有机肥会加大农田温室气体排放,适当的有机肥与无机肥配施既可有效利用有机肥资源,又可减弱有机肥对温室效应的贡献。

4 结论

有机缓释肥配施且缓释氮肥分施能显著提高小麦籽粒产量及其构成因素,但随有机肥配施比例的增加,其增益呈先增后减趋势;在土壤特性及温室气体排放方面,一定程度上减弱无机化肥过量施用带来的环境问题。综上,有机缓释肥配施比例在20%~30%之间且缓释氮肥两次分施对各方面效果最好,可获得提高小麦产量、增加土壤肥力及减少温室气体排放的共赢。

参考文献:

- [1]丁永刚,李福建,王亚华,等. 稻茬小麦氮高效品种产量构成和群体质量特征[J]. 作物学报,2020,46(4):544.
DING Y G, LI F J, WANG Y H, *et al.* Characteristics of yield components and population quality in high-nitrogen utilization wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(4): 544.
- [2]TAN D, JIANG L, TAN S, *et al.* An *in situ* study of inorganic nitrogen flow under different fertilization treatments on a wheat-maize rotation system surrounding Nansi Lake, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 123:45.
- [3]ABBASI M K, TAHIR M M, RAHIM N. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan [J]. *Geoderma*, 2013, 195:87.
- [4]张德奇,季书勤,王汉芳,等. 缓/控释肥的研究应用现状及展望[J]. 耕作与栽培,2010,30(3):46.
ZHANG D Q, JI S Q, WANG H F, *et al.* Research and application status and prospect of slow/controlled release fertilizer [J]. *Tillage and Cultivation*, 2010, 30(3):46.
- [5]马 泉. 稻茬小麦缓释氮肥两次分施调控产量形成和氮效率的形态生理机制[D]. 扬州:扬州大学,2023:7.
MA Q. Morphological and physiological mechanism of wheat slow-release nitrogen fertilizer applied twice after rice to regulate yield formation and nitrogen efficiency [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023:7.
- [6]盛海君,马 泉,蒋 昕,等. 硫包衣缓释掺混肥料施用模式对江苏不同生态区稻茬小麦产量、氮效率与经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(10):118.
SHENG H J, MA Q, JIANG X, *et al.* Effects of sulfur coated blended fertilizer application patterns on yield, nitrogen efficiency and economic benefits of winter wheat following rice in

- different ecological regions of Jiangsu Province [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(10):118.
- [7]徐志强,代继光,于向华,等.长期定位施肥对作物产量及土壤养分的影响[J].土壤通报,2008,39(4):766.
XU Z Q, DAI J G, YU X H, *et al.* Effects of long-time fertilization on crop yield and soil nutrients [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):766.
- [8]呼娟娟,陶瑞,褚贵新.有机无机肥配合生化抑制剂抑制土壤有机碳的转化[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):19.
HU J J, TAO R, CHU G X. Partial replacement of inorganic N with cattle manure and combining use of biochemical inhibitors inhibit organic carbon conversion in soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1):19.
- [9]田胜营,潘明泉,吕秀敏,等.有机无机肥配施对土壤性质和小麦生长、养分吸收利用的影响[J].江苏农业科学,2023,51(23):102.
TIAN S Y, PAN M Q, LÜ X M, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil properties, wheat growth, nutrient absorption and utilization [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(23):102.
- [10]张文学,王少先,金伟,等.有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(7):1300.
ZHANG W X, WANG S X, JIN W, *et al.* Short-term effects of organic to chemical nitrogen proportion on paddy soil fertility and double rice yield [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7):1300.
- [11]姜佰文,侯力维,高强,等.有机无机肥料配施对土壤微生物、土壤酶及玉米产量影响[J].东北农业大学学报,2016,47(11):37.
JIANG B W, HOU L W, GAO Q, *et al.* Effect of organic-inorganic fertilizer on soil microbial, enzymes and maize yield [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(11):37.
- [12]王伟,候丽丽,崔新菊,等.有机无机肥配施对小麦产量及土壤质量的影响[J].安徽农学通报,2022,28(1):92.
WANG W, HOU L L, CUI X J, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on wheat yield and soil quality [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(1):92.
- [13]丁晨曦.有机无机肥配施对麦玉系统温室气体排放和产量的影响[D].合肥:安徽农业大学,2016:29-30.
DING C X. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas emission and yield of Maiyu system [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016:29-30.
- [14]PARRY M L. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [15]鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:21.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:21.
- [16]吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
WU J S, LIN Q M, HUANG Q Y, *et al.* Determination method of soil microbial biomass and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [17]李金垚,潘雯,王佳,等.黔中石漠化地区水土保持措施对土壤有机碳的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):38.
LI J Y, PAN W, WANG J, *et al.* Effects of different soil and water conservation measures on soil organic carbon of Karst rocky desertification region in central Guizhou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):38.
- [18]陈平,杜青,周丽,等.减量施氮及施肥距离对玉米/大豆套作系统增产节肥的影响[J].应用生态学报,2016,27(10):3247.
CHEN P, DU Q, ZHOU L, *et al.* Effects of N application reduction and fertilizing distance on saving fertilizer and improving yield in maize/soybean intercropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10):3247.
- [19]马泉,王梦尧,孙全,等.硫包膜尿素施用模式对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率和效益的影响[J].核农学报,2021,35(4):942.
MA Q, WANG M Y, SUN Q, *et al.* Effects of application modes of sulfur coated urea on yield, nitrogen use efficiency and benefit of winter wheat following rice [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(4):942.
- [20]郭标.有机肥和无机肥配施对冬小麦产量、品质及土壤养分的影响[J].安徽农学通报,2023,29(11):82.
GUO B. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on the yield, quality and soil nutrient of winter wheat [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2023, 29(11):82.
- [21]汪洪焦,隋鹏,石彦琴,等.不同培肥措施对土壤养分和小麦产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(18):192.
WANG H J, SUI P, SHI Y Q, *et al.* Effects of different fertilizing treatments on soil nutrient and yield of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(18):192.
- [22]赖宁,耿庆龙,李永福,等.有机无机配施对超晚播冬小麦产量、氮磷养分吸收利用及土壤肥力的影响[J].新疆农业科学,2023,60(6):1335.
LAI N, GENG Q L, LI Y F, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizer on yield, nitrogen, phosphorus uptake and utilization, and soil fertility of the extremely-late winter sown wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(6):1335.
- [23]邓垚,孔强,郭瑞,等.不同硫包膜缓释肥施用模式对红皮小麦产量及效益的影响[J].大麦与谷类科学,2023,40(3):29.
DENG Y, KONG Q, GUO R, *et al.* Effect of different fertilization patterns of sulfur coated slow-release fertilizer on yield and economic benefits of red-skinned wheat [J]. *Barley and*

- Cereal Sciences*, 2023, 40(3): 29.
- [24] 王书停, 李文广, 蔡慧芳, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 393.
WANG S T, LI W G, CAI H F, *et al.* Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and nitrogen uptake and utilization by winter wheat in drylands [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 393.
- [25] 黄亚男. 有机无机肥配施对覆膜花生产量及土壤养分和酶活性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 34-36
HUANG Y N. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on peanut yield, soil nutrients, and enzyme activities under plastic film mulching [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 34-36
- [26] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4630.
MA X H, YU Z W, LIANG X F, *et al.* Effects of nitrogen application rate and its basal-/ top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 4630.
- [27] 靳晓敏, 杜军, 沈润泽, 等. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响[J]. 农业科学研究, 2013, 34(1): 50.
JIN X M, DU J, SHEN R Z, *et al.* The effect of sumash-riding cultivation technology on the growth and yield of corn in Yellow River irrigation district of Ningxia [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 34(1): 50.
- [28] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 230.
CHEN L, HAO M D, ZHANG S M, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 230.
- [29] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1057.
YU W T, JIANG Z S, MA Q, *et al.* Effects of application of manure on soil fertility [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1057.
- [30] 郭传博. 缓释肥配施对小麦产量和土壤养分的影响[J]. 特种经济动植物, 2023, 26(6): 61.
GUO C B. Effects of slow-release fertilizer combined application on wheat yield and soil nutrients [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(6): 61.
- [31] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 316.
ZHENG Y, GAO Y S, ZHANG L M, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 316.
- [32] 卫婷, 韩丽娜, 韩清芳, 等. 有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 611.
WEI T, HAN L N, HAN Q F, *et al.* Effects of organic fertilization on soil nutrient availability and enzyme activity in arid areas [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 611.
- [33] 梁路, 张卫杰, 徐博涵, 等. 有机无机肥配施影响土壤肥力与土壤环境的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(3): 1.
LIANG L, ZHANG W J, XU B H, *et al.* Research progress on effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and soil environment [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(3): 1.
- [34] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 145.
BU R Y, LI M, HAN S, *et al.* Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 145.
- [35] 王军. 有机无机肥配比对麦玉体系产量和 N_2O 、 NH_3 排放影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 36-37
WANG J. Study on yield and N_2O 、 NH_3 emissions of maize-wheat rotation under different application ratios of inorganic and organic fertilizers [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022: 36-37
- [36] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006(7): 1264. ZOU Jian W, HUANG Y, ZONG L G, *et al.* Effect of organic material incorporation in rice season on N_2O emissions from following winter wheat growing season [J]. *Environmental Science*, 2006(7): 1264.
- [37] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO_2 排放特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1399.
ZHANG L, YIN L C, YI Y N, *et al.* Effects of fertilization reforming on the CO_2 flux in paddy soils with different fertilities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1399
- [38] 黄晶, 张杨珠, 刘宏斌, 等. 长期不同施肥条件下红壤小麦和玉米季 CO_2 、 N_2O 排放特征[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 7.
HUANG J, ZHANG Y Z, LIU H B, *et al.* CO_2 and N_2O emissions from red soil during wheat and corn growing seasons under different patterns of long-term fertilization [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(4): 7.