doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.044

有机无机肥配施对冬小麦农田温室气体排放与氮肥利用效率的影响

马朋辉[1,2]　宋常吉[1]　宋静茹[1]　陈伟伟[1]　杨　健[1,2]　方鸣远[1,3]　吴玉磊[1,3]　胡亚瑾[3,4]

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河南省农村水环境治理工程技术研究中心, 郑州 450003;
3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 为探求冬小麦农田减排优产高效的施肥模式,以冬小麦(小偃 22)为研究对象,设置不施肥(KB),常规施肥(NP),有机肥等氮替代 25%(25% OF)、50%(50% OF)、75%(75% OF)、100%(100% OF)无机肥共 6 个处理,探究不同有机无机肥配施比例对冬小麦农田温室气体排放、产量及氮肥利用效率的影响。结果表明,两个冬小麦生长期,各施肥处理中 75% OF 和 25% OF 处理 CO_2 平均累积排放量最低,分别比 NP 减少 7.62% 和 15.31%,CO_2 排放通量具有夏季升高、冬季降低的特征。NP 处理 CH_4 累积吸收量最高,100% OF 处理 CH_4 累积吸收量最低,有机无机肥配施处理随着有机肥配施比例的增加对 CH_4 的吸收呈减少趋势。75% OF 和 100% OF 处理 N_2O 累积排放量最低,两年平均累积排放量分别比 NP 减少 92.94% 和 159.47%。75% OF 处理全球综合增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)均为最低,分别比 NP 降低 27.19% 和 41.38%。与 NP 相比,50% OF 和 75% OF 处理冬小麦产量在 2018—2020 年分别增加 15.78% ~17.73% 和 18.64% ~23.07%。与 NP 相比,75% OF 处理显著提高了冬小麦氮素吸收量和氮肥利用效率。综合考虑生态因素和经济因素,以有机肥等氮替代 75% 无机肥是西北地区既能实现温室气体减排又能保证冬小麦优产高效的较优施肥模式。

关键词: 冬小麦农田; 温室气体; 氮肥利用效率; 有机无机肥配施; 全球增温潜势

中图分类号: S365　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0474-11　　**OSID**:

Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat Farmland

MA Penghui[1,2]　SONG Changji[1]　SONG Jingru[1]　CHEN Weiwei[1]　YANG Jian[1,2]
FANG Mingyuan[1,3]　WU Yulei[1,3]　HU Yajin[3,4]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou* 450003, *China*
2. *Henan Engineering Research Center of Rural Water Environment Improvement, Zhengzhou* 450003, *China*
3. *Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of the Yellow River Basin, Zhengzhou* 450003, *China*
4. *College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450046, *China*)

Abstract: In order to explore the fertilization mode of emission reduction, superior yield and high efficiency, taking winter wheat (Xiaoyan 22) as the research object, the experiment set six treatments: no fertilization (KB), conventional fertilization (NP), and organic fertilizer substituting 25% (25% OF), 50% (50% OF), 75% (75% OF), and 100% (100% OF) of inorganic fertilizer on equal nitrogen basis, was used to analyze the effects of different proportions of combined organic and inorganic fertilizer application on greenhouse gas emissions, yield, and nitrogen use efficiency in winter wheat farmland, put forward the combined organic-inorganic fertilization mode with the goal of emission reduction, superior yield and high efficiency. The results showed that in the two winter wheat growing seasons, the average cumulative CO_2 emissions of 75% OF and 25% OF were the lowest, which was

收稿日期: 2024-10-30　修回日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809105)、河南省软科学研究计划项目(242400410513)、水利部重大科技项目(SKR-2022020)、黄河水利科学研究院科技发展基金专项(HKF202316)和中央级公益性科研院所基本科研业务项目(HKY-JBYW-2023-26)

作者简介: 马朋辉(1990—),男,工程师,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: mapenghui0371@163.com

通信作者: 胡亚瑾(1989—),女,讲师,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: huyajinxn@163.com

decreased by 7.62% and 15.31% compared with that of NP, respectively. The CO_2 emission flux was increased in summer and decreased in winter. Among all fertilization treatments, NP had the highest CH_4 absorption, while 100% OF had the lowest CH_4 absorption. The absorption of CH_4 in soil was decreased with the increase of the amount of organic fertilizer. The cumulative N_2O emissions of 75% OF and 100% OF were the lowest, which was decreased by 92.94% and 159.47% compared with that of NP, respectively. The global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) of 75% OF were the lowest, which was decreased by 27.19% and 41.38% compared with NP, respectively. Compared with NP, the winter wheat yield of 50% OF and 75% OF was increased by 15.78% ~17.73% and 18.64% ~23.07%, respectively, from 2018 to 2020. Compared with conventional fertilization, 75% OF significantly increased the nitrogen uptake and nitrogen utilization efficiency of winter wheat. Considering the economic and ecological factors, replacing 75% inorganic fertilizer with organic fertilizer can take into account the requirements of emission reduction, superior yield and high efficiency, and provide a reference for the better fertilization mode of winter wheat in Northwest China.

Key words: winter wheat farmland; greenhouse gas; nitrogen fertilizer use efficiency; combined application of organic and inorganic fertilizer; global warming potential

0　引言

在过去的 100 年中,全球地表温度平均上升 0.3 ~0.6℃,预计在未来 100 年将继续上升 2℃[1]。大气中二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是主要的温室气体,其对气候和生态系统产生的影响受到密切关注[2]。2019 年农业 CO_2 排放量达 1.70×10^{11} t,占全球人类活动所产生 CO_2 的 31%,农业 N_2O 和 CH_4 排放量分别占全球人为活动产生量的 78% 和 53%[3]。农业生产过程中排放的大量温室气体给环境造成了巨大压力,因此,研究大田作物温室气体排放规律,提出合理的增产减排措施,对于缓解温室效应具有重要意义。

冬小麦是我国主要粮食作物之一,在农业生产实践中普遍存在过量施肥问题[4]。为提高作物产量,无机肥施用量在 1970—2010 年间增加 200% ~300%[5],而我国氮肥产量在 1963—2015 年间增加 39 倍[6],这一时期氮肥施用量平均比作物所需量多 30% ~50%[7]。据联合国粮食及农业组织预测,无机肥施用量增加的趋势并未减弱,2016—2020 年间氮肥、磷肥和钾肥的年需求量分别增加 1.5%、2.2% 和 2.4%[8]。有机肥部分替代无机肥,能够促进籽粒对氮素的吸收和转运,从而提高小麦产量和氮素利用效率[9],但过量施用有机肥不会产生显著的增产效应,反而会导致更高的氮残留[10]。与施用无机肥相比,施用有机肥能改善土壤呼吸,增加农田土壤 CO_2 排放[11],而部分学者认为与单施无机肥相比,有机无机肥配施对农田土壤 CO_2 排放没有显著差异[12]。在水田中,有机无机肥配施因有机物在厌氧消化过程中增加产甲烷细菌而增加甲烷排放[13],而在旱地中,土壤通常代表大气中 CH_4 的汇[14]。增施有机肥会促进土壤 N_2O 排放[15],然而部分研究表明有机无机肥配施后因速效氮减少,降低了土壤 N_2O 排放量[16-17]。目前,学者们对有机无机肥配施对农田温室气体排放和氮肥利用效率的影响规律尚未达成共识。此外,当前研究多集中于有机无机肥配施对某一温室气体的影响,对主要温室气体、产量及氮肥利用效率的综合评价较少,在减缓温室气体排放、提高作物产量、肥料高效利用方面的研究仍不充分。综合考虑有机无机肥配施的经济效益和环境效益,研究有机肥等氮配施无机肥的合适比例,对农田可持续生产和降低温室气体排放具有重要意义。

因此,本试验通过设置不施肥、常规施肥和不同比例的有机无机肥配施处理,研究有机无机肥配施对温室气体排放的影响,探明不同有机无机肥配施比例对温室气体排放、全球增温潜势、温室气体排放强度、冬小麦产量和氮肥利用效率影响差异,提出优产高效减排的较佳施肥模式,为冬小麦绿色高效优产提供理论依据。

1　试验材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2018 年 10 月—2020 年 10 月在陕西省杨凌地区进行,试验站位于黄土高原南部(34°20′N,108°24′E,海拔 521 m),年平均气温为 13.0℃,年平均降雨量为 600 mm 左右;试验期间日气温和降雨量由自动气象站监测(图 1)。两年平均最高温分别为 19.2℃ 和 19.8℃,平均最低温分别为 9.1℃ 和 9.5℃,两年冬小麦生长期总降雨量分别为 189.1、162.1 mm。播前 0 ~20 cm 土层有机质含量(质量比)为 13.1 g/kg,全氮含量为 0.97 g/kg,速效磷含量为 19.97 mg/kg,速效钾含量为 173.35 mg/kg,容重为 1.40 g/cm^3,pH 值为 8.17。

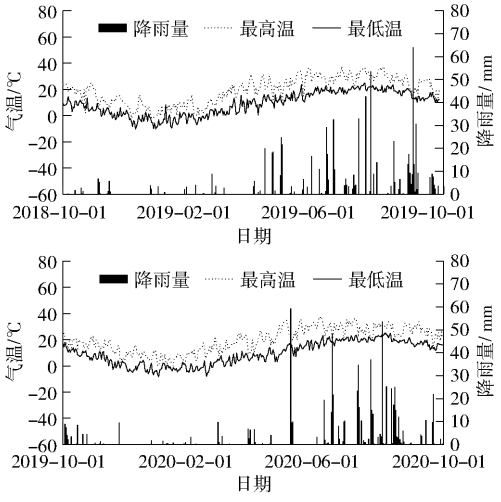

图 1 试验站 2018 年 10 月 1 日—2020 年 10 月 1 日每日降雨量、最高温和最低温

Fig. 1 Daily precipitation, maximum air temperatures and minimum air temperatures as measured from October 1, 2018, to October 1, 2020 at experimental site

1.2 试验设计

供试小麦品种为小偃 22。试验设置 6 个处理:不施肥(KB);常规施肥(NP);在等氮条件下,有机肥替代 25%(25% OF)、50%(50% OF)、75%(75% OF)、100%(100% OF)氮肥。不施肥处理仅用于计算施肥处理的氮肥利用效率。每个处理重复 3 次,小区面积为 4 m×4.5 m,完全随机区组设计。施氮肥(N)150 kg/hm^2,磷肥(P_2O_5)100 kg/hm^2。有机肥采用杨凌霖科生态环境有限公司生产的生物有机肥,其中有机质含量为 30.36%,总氮含量为 1.40%,P_2O_5 含量为 1.95%,K_2O 含量为 0.38%。有机肥及无机肥均于播种前一次性基施,具体施肥量见表 1。种植密度 187.5 kg/hm^2,播种时间分别为 2018 年 10 月 13 日和 2019 年 10 月 13 日,收获时间分别为 2019 年 6 月 3 日和 2020 年 6 月 4 日。

表 1 各处理施肥量

Tab. 1 Amount of fertilizer applied in each treatment kg/hm^2

处理	有机肥施用量(N)	无机肥施用量	
		N	P_2O_5
KB	0	0	0
NP	0	150.0	100.0
25% OF	37.5	112.5	100.0
50% OF	75.0	75.0	100.0
75% OF	112.5	37.5	100.0
100% OF	150.0	0	100.0

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤温室气体采集与测定

采用密闭式静态暗箱法采集温室气体(CO_2、CH_4及 N_2O)[18]。静态箱用不锈钢材料制作,包括箱体和底座。箱体(45 cm×45 cm×45 cm)一面装有采集管,箱顶留孔插温度计测箱内温度,箱外覆有反光铝箔保温膜。底座(45 cm×45 cm×20 cm)顶端有水槽,在播种前,将底座插入每个小区土壤 15 cm 深处,并使水槽与地表水平,底座整个生长期固定不动。采样在 09:00—11:00 进行,施肥后连续采气 7 d,之后每隔 7 d 采气 1 次,降雨后适当加测。气体采集时,水槽加满水后将密闭式静态箱置于水槽上,每隔 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器抽取静态箱内的气体样品。采气结束后,使用安捷伦 7890A 型气相色谱仪(Agilent Technologies 7890A SC,美国)测定收集气体样品中温室气体浓度。

气体排放通量计算公式为

$$F=\rho\frac{V}{A}\frac{\Delta c}{\Delta t}\frac{273}{T} \tag{1}$$

式中 F——CO_2、CH_4或 N_2O 排放通量,单位分别为 mg/(m^2·h)、mg/(m^2·h)、μg/(m^2·h)

ρ——在标准状态下 CO_2、CH_4或 N_2O 密度,mg/cm^3

V——密闭箱体积,m^3

A——密闭箱占地面积,m^2

$\Delta c/\Delta t$——该次采样的 4 个气样由线性回归得到的排放速率

T——采样时箱内绝对温度,K

小麦生长期累积气体排放总量计算式为[19]

$$S=\sum_{i=1}^{n}R_iD_i \tag{2}$$

式中 S——CO_2、CH_4、N_2O 生长期排放总量,g/hm^2

R_i——第 i 次采样时 CO_2、CH_4、N_2O 日排放通量,g/(hm^2·d)

D_i——第 i 次采样到第 $i+1$ 次采样时的间隔时间,d

n——该生长期总采样次数

在 100 年时间尺度下,CH_4和 N_2O 增温潜势分别为 CO_2的 28 倍和 265 倍,全球综合增温潜势 GWP(Global warming potential)计算公式为[1]

$$GWP=28R_{CH_4}+265R_{N_2O} \tag{3}$$

式中 GWP——单个作物生长期 CH_4和 N_2O 综合增温潜势,kg/hm^2

R_{CH_4}——该生长期农田 CH_4排放总量,kg/hm^2

R_{N_2O}——该生长期农田 N_2O 排放总量,kg/hm^2

温室气体排放强度 GHGI(Greenhouse gas intensity)计算公式为[20]

$$GHGI=\frac{GWP}{Y} \tag{4}$$

式中　*GHGI*——单个作物生长期 CH_4 和 N_2O 综合排放强度，kg/t

Y——该生长期作物产量，t/hm^2

1.3.2　产量测定

冬小麦成熟期，各处理取均匀一致有代表性的 1 m^2 小麦测产，测定各处理冬小麦穗数、每穗粒数和千粒质量。

1.3.3　植株吸氮量测量及氮肥利用效率计算

在冬小麦收获期，取地上部植株（包括茎、叶、穗）干燥粉碎，过 0.5 mm 筛，用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮植物样品，采用凯氏定氮仪（FOSS 2300 型）测定植株全氮含量。

氮肥利用效率（氮肥农学效率、氮肥生理效率、氮肥偏生产力、氮肥回收效率）计算式见文献[4]。

1.3.4　数据处理

采用 SPSS 22.0 进行双因素方差分析。最小显著性差异（LSD，P = 0.05）用于均值检验。用 Sigmaplot 12.5 绘图。

2　结果与分析

2.1　农田温室气体排放

不同施肥处理下土壤 CO_2 排放通量呈相似的季节变化趋势，但波动幅度不同（图 2）。土壤 CO_2 排放主要受温度影响，在冬小麦生长期早期，温度下降使 CO_2 排放量降低。随着温度升高，土壤 CO_2 排放量相应地稳步增加。土壤 CO_2 排放通量从 4 月开始增加，5—6 月达到峰值。在 2018—2019 年和 2019—2020 年冬小麦生长期，土壤 CO_2 排放通量分别为 37.85 ~ 1 315.54 mg/(m^2·h) 和 44.85 ~ 743.02 mg/(m^2·h)。土壤 CO_2 累积排放量随有机肥配施比例的增大呈波动变化趋势（图 3，图中不同小写字母表示处理间差异显著（P < 0.05），下同）。在 2 个冬小麦生长期，各施肥处理中 75% OF 和 25% OF 土壤 CO_2 两年平均累积排放量最低，与 NP 相比分别减少 7.62% 和 15.31%。

不同施肥处理对土壤 CH_4 排放通量没有季节性影响，正值和负值分别表示土壤中 CH_4 的排放和吸收（图 2）。在 2018—2019 年和 2019—2020 年冬小麦生长期，土壤 CH_4 排放通量分别为 −0.38 ~ 0.30 mg/(m^2·h) 和 −0.30 ~ 0.54 mg/(m^2·h)。各施肥处理土壤 CH_4 累积排放量均为负值，表明不同施肥处理土壤均吸收了大气中的 CH_4，土壤为 CH_4 的汇。整体上，土壤对 CH_4 的累积吸收量随有机肥配施比例的增加而减小（图 3）。各施肥处理中 75% OF 和 100% OF 的 CH_4 累积吸收量最低，显著低于 NP 处理（P < 0.05）。与 NP 相比，75% OF 和 100% OF 处理下土壤对 CH_4 的两年平均累积吸收量分别减少 93.94% 和 111.21%。

不同施肥处理下土壤 N_2O 排放通量呈相似的季节变化趋势，但波动幅度不同（图 2）。各施肥处理土壤 N_2O 排放通量在施肥后 7 d 内达到峰值，然后逐渐下降到一个相对稳定的水平。在 2018—2019 年和 2019—2020 年冬小麦生长期，土壤 N_2O 排放通量分别为 0.15 ~ 100.83 μg/(m^2·h) 和 0.25 ~

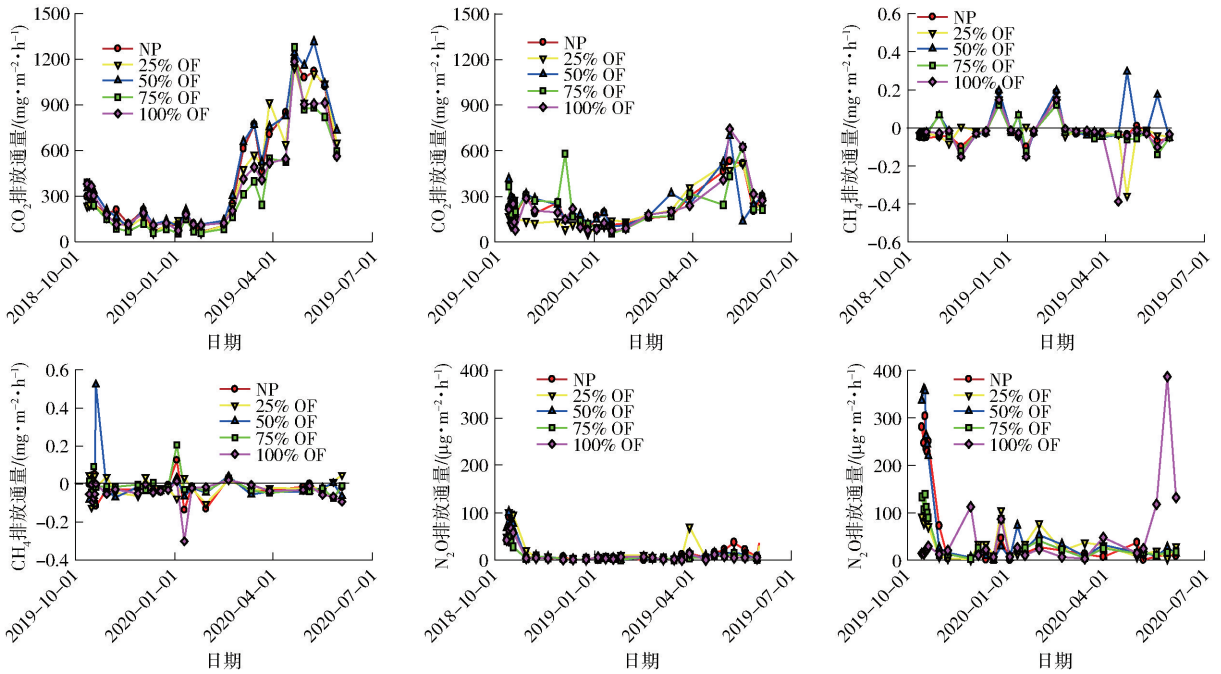

图 2　2018—2020 年冬小麦生长期不同施肥处理下 CO_2、CH_4、N_2O 排放通量变化曲线

Fig. 2　Emissions fluxes of CO_2, CH_4 and N_2O under different fertilization treatments during winter wheat growth season from 2018 to 2020

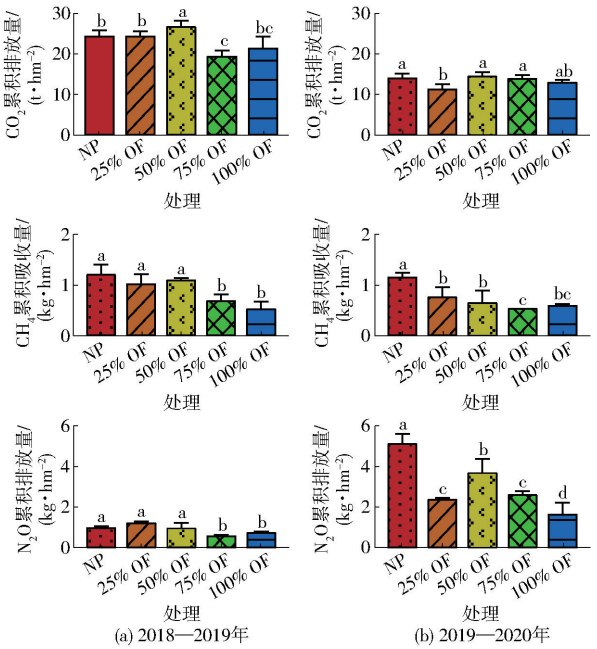

图 3 2018—2019 年和 2019—2020 年冬小麦农田不同施肥处理下 CO_2、CH_4、N_2O 累积排放量

Fig. 3 Accumulated CO_2, CH_4, and N_2O emissions of different fertilization treatments of winter wheat farmland from 2018 to 2020

386.41 μg/(m^2·h)。整体上,土壤 N_2O 累积排放量随有机肥配施比例的增大先增大后减小(图 3)。各施肥处理中 75% OF 和 100% OF 的 N_2O 累积排放量最低,显著低于 NP 处理($P<0.05$)。与 NP 相比,75% OF 和 100% OF 处理下土壤 N_2O 的两年平均累积排放量分别减少 92.94% 和 159.47%。

2.2 综合增温潜势和排放强度

2018—2019 年冬小麦生长期 GWP 为 147.91 ~ 289.20 kg/hm^2,2019—2020 年冬小麦生长期 GWP 为 519.51 ~ 696.10 kg/hm^2(表 2)。GWP 随有机肥配施比例的增大先减小后增大,各施肥处理中

表 2 2018—2020 年不同施肥处理下 GWP 和 GHGI

Tab. 2 GWP and GHGI of winter wheat of different fertilization treatments in 2018—2020

处理	甲烷和氧化亚氮综合增温潜势/(kg·hm^{-2})		甲烷和氧化亚氮综合排放强度/(kg·t^{-1})	
	2018—2019 年	2019—2020 年	2018—2019 年	2019—2020 年
NP	220.51^{b}	696.10^{a}	43.74^{b}	108.81^{a}
25% OF	289.20^{a}	569.92^{b}	57.97^{a}	85.91^{a}
50% OF	216.28^{b}	557.83^{b}	35.61^{c}	75.01^{b}
75% OF	147.91^{c}	519.51^{b}	23.26^{d}	66.11^{bc}
100% OF	173.64^{bc}	527.23^{b}	35.30^{c}	69.42^{b}

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

75% OF 的 GWP 最低且显著低于 NP 处理($P<0.05$)。与 NP 相比,75% OF 的两年平均 GWP 降低 27.19%。

2018—2019 年冬小麦生长期 GHGI 为 23.26 ~ 57.97 kg/t,2019—2020 年冬小麦生长期 GHGI 为 66.11 ~ 108.81 kg/t。GHGI 随有机肥配施比例的增大先减小后增大,各施肥处理中 75% OF 的 GHGI 最低且显著低于 NP 和 25% OF($P<0.05$)。与 NP 相比,75% OF 的两年平均 GHGI 降低 41.38%。

2.3 温室气体排放与环境因子的相关性

两年冬小麦生长季,CO_2 排放通量与 N_2O 排放通量、土壤温度、土壤 NO_3^--N 含量、GWP 和 GHGI 呈显著正相关($P<0.05$)(图 4,* 表示在 0.05 水平差异显著;SWC 表示土壤含水率,ST 表示土壤温度,NH_4^+-N 为氨态氮,NO_3^--N 为硝态氮),与 CH_4 排放通量和土壤含水率呈弱负相关。CH_4 排放通量与 CO_2、N_2O 排放通量、土壤 NO_3^--N 含量、GWP、GHGI 呈弱负相关,与土壤含水率和温度呈弱正相关。N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量、土壤 NO_3^--N 含量、GWP、GHGI 呈显著正相关($P<$

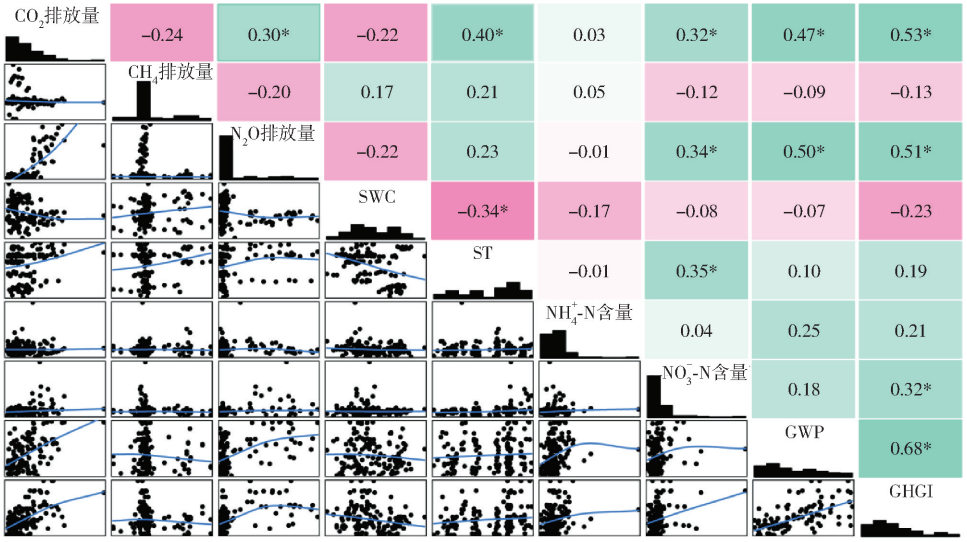

图 4 土壤温室气体排放量与环境因子的相关性

Fig. 4 Relationship between soil greenhouse gas emission flux and environmental factors

0.05)，与土壤含水率呈弱负相关，与土壤温度呈弱正相关。

2.4　产量和植株氮素吸收量

各施肥处理冬小麦籽粒产量如图 5 所示。冬小麦产量随有机肥配施比例的增大先增加后减少。两年冬小麦产量在 50% OF 和 75% OF 均显著高于 NP 处理($P<0.05$)，25% OF 和 100% OF 与 NP 处理无显著差异($P>0.05$)。与 NP 相比，50% OF 和 75% OF 冬小麦产量在 2018—2019 年分别增加 15.78% 和 18.64%，在 2019—2020 年分别增加 17.73% 和 23.07%，两年平均产量分别增加 16.76% 和 20.86%。

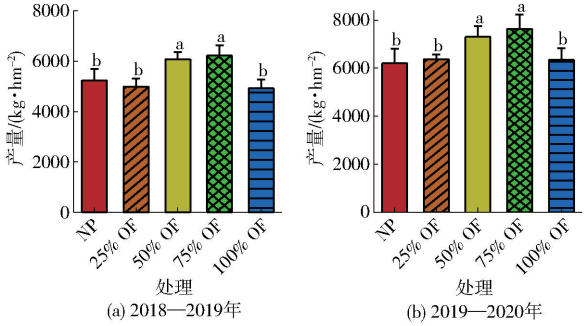

图 5　2018—2020 年不同施肥处理下冬小麦产量

Fig. 5　Winter wheat yield under different fertilization treatments from 2018 to 2020

各施肥处理冬小麦植株成熟期氮素吸收量如图 6 所示。冬小麦植株氮素吸收量随有机肥配施比例的增大先增加后减少。2018—2019 年，75% OF 冬小麦植株氮素吸收量显著高于其它施肥处理($P<0.05$)，分别比 NP、25% OF、50% OF 和 100% OF 增加 22.17%、25.03%、14.62% 和 46.71%。2019—2020 年，冬小麦植株氮素吸收量以 75% OF 最高，但与 NP 和 50% OF 相比差异不显著($P>0.05$)。与 NP 相比，75% OF 两年平均植株氮素吸收量增加 15.69%。

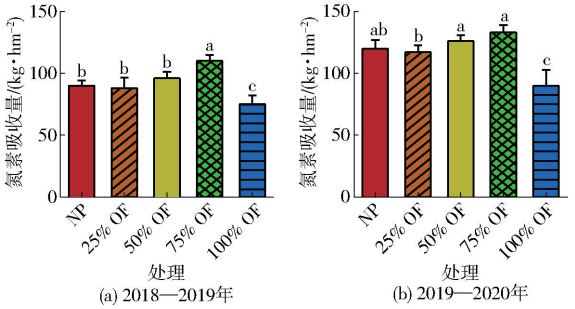

图 6　2018—2020 年冬小麦成熟期不同施肥处理下植株氮素吸收量

Fig. 6　Nitrogen uptake by different fertilization treatments of winter wheat plants during maturity from 2018 to 2020

2.5　氮肥利用效率

冬小麦氮肥农学效率、氮肥生理效率、氮肥偏生产力和氮肥回收效率见表 3。氮肥农学效率随有机肥配施比例的增大先增大后减小。氮肥农学效率在 2018—2019 年为 13.13 ~ 21.79 kg/kg，2019—2020 年为 19.82 ~ 29.37 kg/kg，以 50% OF 和 75% OF 最高，显著高于 NP、25% OF 和 100% OF($P<0.05$)。与 NP 相比，50% OF 和 75% OF 的两年平均氮肥农学效率分别提高 36.68% 和 45.80%。

表 3　2018—2020 年不同施肥处理冬小麦氮肥农学效率、氮肥生理效率、氮肥偏生产力和氮肥回收效率

Tab. 3　Nitrogen agronomic efficiency, nitrogen physiological efficiency, nitrogen partial factor productivity and nitrogen recovery efficiency of winter wheat from different fertilization treatments in 2018—2020

年份	处理	氮肥农学效率/(kg·kg⁻¹)	氮肥生理效率/(kg·kg⁻¹)	氮肥偏生产力/(kg·kg⁻¹)	氮肥回收效率/%
2018—2019	NP	15.27^{b}	65.43^{cd}	34.94^{b}	23.33^{c}
	25% OF	13.58^{c}	61.76^{d}	33.26^{b}	22.00^{c}
	50% OF	20.82^{a}	76.16^{b}	40.49^{a}	27.33^{b}
	75% OF	21.79^{a}	59.43^{d}	41.46^{a}	36.67^{a}
	100% OF	13.13^{c}	98.45^{a}	32.78^{b}	13.33^{d}
2019—2020	NP	19.82^{b}	34.98^{c}	41.36^{b}	56.67^{b}
	25% OF	20.91^{b}	38.27^{c}	42.46^{b}	54.67^{b}
	50% OF	27.14^{a}	44.73^{b}	48.68^{a}	60.67^{a}
	75% OF	29.37^{a}	44.95^{b}	50.91^{a}	65.33^{a}
	100% OF	20.71^{b}	56.49^{a}	42.26^{b}	36.67^{c}

氮肥生理效率整体上随有机肥配施比例的增大而增大。2018—2019 年氮肥生理效率为 59.43 ~ 98.45 kg/kg，2019—2020 年为 34.98 ~ 56.49 kg/kg。2018—2020 年，100% OF 显著高于其它施肥处理($P<0.05$)。与 NP 相比，100% OF 的两年平均氮肥生理效率提高 54.31%。氮肥偏生产力随有机肥配施比例的增大先增大后减小。2018—2019 年氮肥偏生产力为 32.78 ~ 41.46 kg/kg，2019—2020 年为 41.36 ~ 50.91 kg/kg，以 50% OF 和 75% OF 最高，显著高于 NP、25% OF 和 100% OF($P<0.05$)。与 NP 相比，50% OF 和 75% OF 的两年平均氮肥偏生产力分别提高 16.87% 和 21.06%。

氮肥回收效率随有机肥配施比例的增大先增大后减小。2018—2019 年氮肥回收效率为 13.33% ~ 36.67%，75% OF 显著高于其它施肥处理($P<0.05$)。2019—2020 年氮肥回收效率为 36.67% ~ 65.33%，50% OF 和 75% OF 显著高于其它施肥处理($P<0.05$)。与 NP 相比，50% OF 和 75% OF 的两年平均氮肥回收效率分别提高 10.00% 和 27.50%。

综合温室气体排放、产量和氮肥利用效率，以有

机肥等氮替代 75% 无机肥是西北地区既能实现温室气体减排又能保证冬小麦高产高效的较优有机无机肥配施模式。

3 讨论

3.1 有机无机肥配施对温室气体排放的影响

不同施肥处理下土壤 CO_2 排放通量呈相似的季节变化趋势,但 CO_2 排放通量波动幅度受到施肥模式的影响。由于土壤中无机肥施入导致植株根系生物量增加,提高了土壤微生物群落多样性,可能会增加土壤 CO_2 排放通量[21]。也有研究表明有机肥为作物生长和微生物繁殖提供了营养素,促进作物根系呼吸作用,使土壤 CO_2 排放通量增加[22]。之前的研究已经证明,有机肥能够促进有机碳的生物可利用性[23],促进微生物利用生物可利用的有机碳生产二氧化碳[24]。有机无机肥配施增加了 CO_2 产生的有机物源从而增加了土壤 CO_2 排放量[25]。土壤中含有丰富的有机质,可以促进微生物的生长,提高 CO_2 释放速率,增加土壤 CO_2 排放,同时有机肥可以改善土壤结构,加速有机碳分解,促进土壤呼吸速率提高[21]。在两年冬小麦生长期内,土壤 CO_2 排放主要受温度的影响。本研究中冬小麦生长期早期,温度下降使二氧化碳排放通量降低。随着温度升高,土壤 CO_2 排放通量相应地稳步增加。这与 CHEN 等[26]的研究结果一致,该研究表明 CO_2 排放通量具有夏季升高、冬季降低的特征,并与土壤表层温度呈显著正相关。

旱地土壤一般是大气 CH_4 的汇,这是由于土壤中的甲烷菌在干燥条件下导致 CH_4 的氧化[26]。施入有机肥可以提高土壤有机碳和微生物数量,从而影响 CH_4 的排放和吸收。本研究中,不同有机无机肥配施处理下 CH_4 排放通量没有明显的季节变化,通量有正有负,土壤对 CH_4 既有排放也有吸收。不同施肥处理 CH_4 排放总量均为负值,表明不同施肥处理下土壤均吸收了大气中的 CH_4。CH_4 排放通量与土壤含水率、温度、土壤氨态氮含量、硝态氮含量之间的相关性不显著($P>0.05$,图 4),这与张黛静等[15]、CHEN 等[26]的研究结果一致。本研究中,与 NP 相比,有机无机肥配施处理均降低了 CH_4 吸收量(图 3),且随有机肥配施比例的增加土壤对 CH_4 的吸收呈减少趋势,各施肥处理中以 NP 土壤对 CH_4 的吸收量最高,75% OF 和 100% OF 土壤对 CH_4 的吸收量最低。这可能是由于配施有机肥促进了微生物生长,有机碳源激活了甲烷菌,进而增加了甲烷的排放[21]。

农田土壤中 N_2O 是由微生物参与的硝化和反硝化过程产生的[27]。大量研究表明,氮肥施用是土壤 N_2O 排放最直接的影响因素,土壤 N_2O 排放依赖于土壤温度和含水率[28-29]。本研究中,各处理 N_2O 排放通量在施肥后 7 d 内达到峰值,之后排放通量降低并保持在一个相对稳定的水平(图 2)。GRAHAM 等[30]研究表明,施用有机肥会增强土壤反硝化过程,提高土壤微生物呼吸作用,有机无机肥配施处理的 N_2O 排放量高于单施无机肥处理。而李燕青等[11]试验表明,在等氮施肥条件下,有机无机肥配施处理的 N_2O 排放量显著低于单施无机肥处理。本研究中第 2 年土壤 N_2O 累积排放量高于第 1 年(图 3),可能是施肥导致土壤中有机碳含量增加,促进了异养微生物的硝化反硝化过程,反硝化对 N_2O 排放起着重要作用,而反硝化作用导致的 N_2O 排放增加可能是累积 N_2O 排放增加的一个原因。这与之前的研究结果一致,即有机肥通过反硝化促进 N_2O 的排放[31]。本文研究结果表明,与单施无机肥(NP)相比,75% OF 和 100% OF 显著降低了 N_2O 排放($P<0.05$)。这与之前的研究结果一致,即通过有机肥替代 75% 无机肥比单独使用无机肥减少 N_2O 排放的潜力更大[32]。随着有机肥替代比例的增加,为反硝化细菌提供足够的碳源,可以完全反硝化,因此 N 的损失将以 N_2 而不是 N_2O 的形式出现[33],然而在单施无机肥处理中,由于缺乏有机碳,限制了反硝化反应的彻底进行。土壤环境对 N_2O 排放也有一定影响。叶远行等[34]研究表明,N_2O 排放通量与 NO_3^--N 含量之间存在极显著正相关关系,且 N_2O 排放量随着土壤硝态氮含量升高而增加。梁东丽等[35]利用土壤硝态氮、铵态氮研究了硝态氮和氨态氮与土壤 N_2O 排放的相关性,发现铵态氮对土壤 N_2O 排放的影响主要发生在刚施肥阶段,而硝态氮对 N_2O 的排放影响持续时间长,会增加 N_2O 排放量。本研究与前人结果一致,N_2O 排放通量与土壤硝态氮含量呈显著正相关($P<0.05$),与土壤含水率、温度和氨态氮含量相关性较弱(图 4)。

3.2 有机无机肥配施对产量的影响

研究表明,有机无机肥配施可以提高冬小麦产量[4,36]。本研究中,与单独施用无机或有机肥料相比,有机无机肥配施可以提高冬小麦产量(图 5),表明有机肥部分替代无机肥能够满足冬小麦生长需求。单施无机肥不利于维持土壤养分,单施有机肥在冬小麦生长早期养分供应有限,而有机无机肥配施能够满足冬小麦生育期生长的需求,并不断提高土壤养分含量[37]。本研究结果表明,在冬小麦生产

中，50% OF 和 75% OF 处理的增产效果最好（图 5）。施用有机肥提高了土壤 CO_2 的释放能力，可被植物吸收利用，提升冬小麦光合效率，从而提高产量。以有机肥替代部分无机肥氮，保证甚至提高了冬小麦产量，说明有机无机肥配施可以提高冬小麦产量。但在等量施氮条件下，完全用有机肥代替无机肥（100% OF）并不能保证冬小麦增产，这说明在西北地区，有机肥不能完全替代无机肥保证冬小麦高产。其他研究也得出了类似结论，指出单独施用有机肥时，土壤有效氮是作物高产的主要限制因素[36]。然而，一项为期 25 a 的肥力试验发现，有机无机肥配施并不比施用相同养分的单一有机肥或无机肥具有产量优势[38]。这些相互矛盾的结果可能是由于肥料和种植系统及田地、年份等环境的其他组成部分之间的相互作用。

3.3　有机无机肥配施对氮肥利用效率的影响

施氮肥可以提高土壤养分含量和冬小麦籽粒产量，但过量施肥会导致氮肥利用率降低[4,39]。有机无机肥配施能够改善土壤物理化学性质，增加对作物养分供应的持续性，促进作物生长发育，显著提高氮肥利用效率[40-41]。申长卫等[42]研究表明，有机无机肥配施下冬小麦植株的总氮素吸收量显著高于单施无机肥处理，并得出单施无机肥的氮肥农学效率、生理效率和回收效率都低于有机无机肥配施处理。张奇茹等[43]通过 5 a 的定位试验研究表明，有机无机肥配施促进了小麦植株的氮素吸收，氮肥偏生产力和氮肥生理效率都显著高于单施无机肥处理。裴雪霞等[44]研究表明有机无机肥配施较单施无机肥处理显著提高了氮肥偏生产力。本研究中，氮肥利用效率整体上随有机肥配施比例的增加呈先提高后下降的变化趋势，总体上 50% OF 和 75% OF 处理显著高于其他处理（$P<0.05$），这可能是由于配施有机肥可以调节土壤养分的释放速率，不断满足冬小麦生长需求，从而提高冬小麦产量和氮肥利用效率[45]。单施有机肥造成氮肥利用效率低的原因可能是有机肥矿化速率慢，冬小麦生长早期与微生物存在争氮现象，冬小麦的营养需求得不到满足。单施无机肥的氮肥利用效率较有机无机肥配施低，可能是因为有机无机肥配施后通过增加土壤微生物的碳源促进了土壤中微生物的繁殖，增加对矿质态氮的固定，减少养分向深层土壤淋溶[46]，且有机肥养分全面，增加了土壤养分累积，促进了冬小麦对养分的吸收。

4　结论

（1）CO_2 排放通量具有夏季升高、冬季降低的特征；各施肥处理中 CO_2 累积排放量差异不大，75% OF、100% OF 处理 CH_4 累积吸收量和 N_2O 累积排放量均最低且显著低于 NP（$P<0.05$）。

（2）GWP 和 GHGI 均随有机肥配施比例的增大先减小后增大，各施肥处理中 75% OF 处理 GWP 和 GHGI 均为最低且显著低于 NP（$P<0.05$）。

（3）冬小麦产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥回收效率均随有机肥配施比例的增大先增加后减少；50% OF、75% OF 处理冬小麦产量和氮肥利用效率均显著高于其他处理（$P<0.05$）。

（4）综合温室气体排放、产量和氮肥利用效率，以有机肥等氮替代 75% 无机肥是西北地区既能实现温室气体减排又能保证冬小麦高产高效的较优有机无机肥配施模式。

参　考　文　献

[1] IPCC. Climate change 2014: synthesis report[M]. Geneva: IPCC, 2014.

[2] 孙亚楠，段琳博，钟华昱，等. 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：312-322.
SUN Ya'nan, DUAN Linbo, ZHONG Huayu, et al. Response mechanism of soil greenhouse gas emission and yield of greenhouse tomato to water-fertilizer-air coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 312-322. (in Chinese)

[3] 齐智娟，李骜，张忠学，等. 水土保持耕作对黑土玉米氮素利用与温室气体排放影响[J]. 农业机械学报，2023，54(9)：365-373.
QI Zhijuan, LI Ao, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of soil and water conservation tillage on nitrogen utilization and greenhouse gas emissions of maize in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 365-373. (in Chinese)

[4] 宿顺顺. 有机无机肥配施与亏缺灌溉对夏玉米/冬小麦生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2020.
SU Shunshun. Effects of organic and inorganic fertilizer application and deficit irrigation on the growth and water and nitrogen utilization of summer maize/winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)

[5] WALLING E, VANEECKHAUTE C. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: a review of emission factors and their variability[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 276:111211.

[6] LUO Z B, HU S Y, CHEN D J. A historical view of nitrogen metabolism and its driving forces in China's chemical industry:

implications for cleaner production policy and practice[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 308 – 317.
[7] ZHANG T, LIU H B, LUO J F, et al. Long-term manure application increased greenhouse gas emissions but had no effect on ammonia volatilization in a Northern China upland field[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 230 – 239.
[8] FAO. World fertilizer trends and outlook to 2020[R/OL]. 2017. http://www.fao.org.
[9] DUAN C X, LI J B, ZHANG B B, et al. Effect of bio-organic fertilizer derived from agricultural waste resources on soil properties and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in semi-humid drought-prone regions[J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108539.
[10] SEUFERT V, RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. Nature, 2012, 485: 229 – 232.
[11] 李燕青,唐继伟,车升国,等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 中国农业科学,2015, 48(21):4381 – 4389.
LI Yanqing, TANG Jiwei, CHE Shengguo, et al. 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[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(21):4381 – 4389. (in Chinese)
[12] 刘东雪. 施肥对冬小麦夏玉米轮作生态系统温室气体排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学,2013.
LIU Dongxue. Optimal fertilization reduced greenhouse gas emissions of wheat-maize cropping system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
[13] MER J L, ROGER P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37: 25 – 50.
[14] AFREH D, ZHANG J, GUAN D H, et al. Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 259 – 267.
[15] 张黛静,胡晓,马建辉,等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(5): 1753 – 1760.
ZHANG Daijing, HU Xiao, MA Jianhui, et al. Effects of tillage and fertility on soil nitrogen balance and greenhouse gas emissions of wheat – maize rotation system in central Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1753 – 1760. (in Chinese)
[16] WU G, YANG S, LUAN C S, et al. Partial organic substitution for synthetic fertilizer improves soil fertility and crop yields while mitigating N_2O emissions in wheat-maize rotation system[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 154: 127077.
[17] GAO H Z, XI Y J, WU X P, et al. Partial substitution of manure reduces nitrous oxide emission with maintained yield in a winter wheat crop[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326: 116794.
[18] 佟玲,戴永辉,陈阳,等. 水盐胁迫下老化生物炭对温室气体与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2023,54(9):386 – 395.
TONG Ling, DAI Yonghui, CHEN Yang, et al. Effect of aged biochar on greenhouse gases and maize growth under water and salt stress[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 386 – 395. (in Chinese)
[19] SINGH S, SINGH J S, KASHYAP A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(9): 1219 – 1228.
[20] 曹晓强,魏永霞,吴昱,等. 不同灌溉模式寒区稻田温室气体排放与土壤矿质氮特征[J]. 农业机械学报,2022,53(9): 305 – 313.
CAO Xiaoqiang, WEI Yongxia, WU Yu, et al. Effects of different irrigation methods on greenhouse gas emission and mineral nitrogen characteristics of paddy field in cold region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 305 – 313. (in Chinese)
[21] 郭芸. 长期施肥下旱地塿土 CO_2 和 CH_4 排放特征的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
GUO Yun. Emission characteristics of CO_2 and CH_4 on dryland Lou soil under different long-term fertilizations[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
[22] 高洪军. 长期不同施肥对东北玉米产量和土壤肥力及温室气体排放的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
GAO Hongjun. Impacts of long-term different fertilization on maize yield, soil fertility and greenhouse gas emission in Northeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[23] TRIBERTI L, NASTRI A, GIORDANI G, et al. Can mineral and organic fertilization help sequestrate carbon dioxide in cropland[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29: 13 – 20.
[24] IQBAL J, HU R G, LIN S, et al. CO_2 emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: a case study in Southern China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 131: 292 – 302.
[25] 韩广轩,朱波,江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物生态学报,2006, 30(3): 450 – 456.
HAN Guangxuan, ZHU Bo, JIANG Changsheng. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the central Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3): 450 – 456. (in Chinese)
[26] CHEN H X, LIU J J, ZHANG A F, et al. Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: a field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 814 – 824.
[27] BAGGS E M. Soil microbial sources of nitrous oxide: recent advances in knowledge, emerging challenges and future direction

[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2011, 3(5): 321 – 327.

[28] 郭怡婷,罗晓琦,王锐,等. 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学,2022, 43(5): 2788 – 2801.
GUO Yiting, LUO Xiaoqi, WANG Rui, et al. Effects of biodegradable plastic film mulching on greenhouse gas emissions under wheat – maize rotation system in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2788 – 2801. (in Chinese)

[29] LIANG Z H. Combination of organic fertilizer and slow-release fertilizer increases pineapple yields, agronomic efficiency and reduces greenhouse gas emissions under reduced fertilization conditions in tropical areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 343:131054.

[30] GRAHAM C J, VAN ES H M, MELKONIAN J J. Nitrous oxide emissions are greater in silt loam soils with a legacy of manure application than without[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8): 1123 – 1129.

[31] CUELLO J P, HWANG H Y, GUTIERREZ J, et al. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91: 48 – 57.

[32] 侯苗苗,吕凤莲,张弘弢,等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 321 – 330.
HOU Miaomiao, LÜ Fenglian, ZHANG Hongtao, et al. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N_2O emission in the winter wheat-summer maize rotation system[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 321 – 330. (in Chinese)

[33] ZHU X, BURGER M, DOANE T A, et al. Ammonia oxidation pathways and nitrifer denitrifcation are signifcant sources of N_2O and NO under low oxygen availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110: 6328 – 6333.

[34] 叶远行,郭树芳,李浩,等. 不同有机种植年限菜地的温室气体排放特征及影响因素[J/OL]. 环境科学:1 – 14. https://link.cnki.net/urlid/11.1895.X.20240428.1732.031.
YE Yuanxing, GUO Shufang, LI Hao, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors from vegetable fields with different organic planting years[J/OL]. Environmental Science: 1 – 14. https://link.cnki.net/urlid/11.1895.X.20240428.1732.031. (in Chinese)

[35] 梁东丽,方日尧,李生秀,等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007(1): 67 – 72.
LIANG Dongli, FANG Riyao, LI Shengxiu, et al. Effects of nitrogen types on N_2O emissions of dry-land soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007(1): 67 – 72. (in Chinese)

[36] 李燕青,温延臣,林治安,等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(11): 1835 – 1846.
LI Yanqing, WEN Yanchen, LIN Zhian, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1835 – 1846. (in Chinese)

[37] YANG X Y, SUN B H. ZHANG S L. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(2): 402 – 414.

[38] RIPOCHE A, CRETENET M, CORBEELS M. et al. Cotton as an entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems-evidence from a long-term experiment in southern Mali[J]. Field Crops Research, 2015,177: 37 – 48.

[39] 肖丽丽,代兴龙,孔海波,等. 地力水平和种植密度对冬小麦子粒产量和氮素利用率的影响[J]. 安徽农业科学,2014, 42(8): 2239 – 2242.
XIAO Lili, DAI Xinglong, KONG Haibo, et al. Effects of fertility level and plant density on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(8): 2239 – 2242. (in Chinese)

[40] 刘星,张影,靳亚果,等. 有机无机肥配施对强筋小麦产量和植株生理特征及土壤性质的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(6): 220 – 226.
LIU Xing, ZHANG Ying, JIN Yaguo, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on grain yield and physiological characteristics of winter wheat with strong gluten wheat and soil properties in north Henan plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(6): 220 – 226. (in Chinese)

[41] GUO L Y, WU G L, LI Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 156: 140 – 147.

[42] 申长卫,袁敬平,李新华,等. 有机肥氮替代 20% 化肥氮提高豫北冬小麦氮肥利用率和土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报,2020, 26(8): 1395 – 1406.
SHEN Changwei, YUAN Jingping, LI Xinhua. et al. Improving winter wheat N utilization efficiency and soil fertility through replacement of chemical N by 20% organic manure[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(8): 1395 – 1406. (in Chinese)

[43] 张奇茹,谢英荷,李廷亮,等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农

业科学,2020, 53(23): 4866 - 4878.
ZHANG Qiru, XIE Yinghe, LI Tingliang, et al. Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020, 53(23): 4866 - 4878. (in Chinese)
[44] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768 - 1781.
PEI Xuexia, DANG Jianyou, ZHANG Dingyi, et al. Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(10): 1768 - 1781. (in Chinese)
[45] 吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
LÜ Fenglian. Study on agronomic and environmental effects of combined application organic and chemical fertilizers under winter wheat and summer maize cropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[46] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 142 - 152.
LI Juan, ZHAO Bingqiang, LI Xiuying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 142 - 152. (in Chinese)

(上接第 443 页)

[40] 周丽涛,孙爽,郭尔静,等. 干旱条件下 APSIM 模型修正及模拟华北冬小麦产量效果[J]. 农业工程学报,2023,39(6): 92 - 102.
ZHOU Litao, SUN Shuang, GUO Erjing, et al. Modification of APSIM model under drought conditions and simulation of winter wheat yield in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6):92 - 102. (in Chinese)
[41] 沙慧敏,李琪,孙锡鹏,等. 灌浆期升温和干旱胁迫对江苏冬小麦产量和干物质分配的影响[J]. 气象与减灾研究,2021, 44(3):201 - 208.
SHA Huimin, LI Qi, SUN Xipeng, et al. Effects of warming at seed filling stage and drought stress on the production and dry matter partitioning of winter wheat in Jiangsu Province[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,2021,44(3):201 - 208. (in Chinese)
[42] TANG R S, ZHENG J C, JIN Z Q, et al. Possible correlation between high temperature-induced floret sterility and endogenous levels of IAA, GAs and ABA in rice[J]. Plant Growth Regulation, 2008, 54(1):37 - 43.
[43] 韩智博,张宝庆,田杰,等. 基于 CCSM4 气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10):108 - 115.
HAN Zhibo, ZHANG Baoqing, TIAN Jie, et al. Prediction of future climate change impacts on maize yield in Heihe Oasis based on CCSM4 climate model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(10):108 - 115. (in Chinese)
[44] 温鹏飞,高晨凯,郭锦英,等. RCP 情景下基于 AquaCrop 模型的河南省夏玉米减产风险评估[J]. 玉米科学,2023, 31(1):88 - 97.
WEN Pengfei, GAO Chenkai, GUO Jinying, et al. Yield reduction risk assessment of summer maize base on AquaCrop model under RCP scenarios in Henan Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2023,31(1):88 - 97. (in Chinese)
[45] ZHANG T, ZUO Q, MA N, et al. Optimizing relative root-zone water depletion thresholds to maximize yield and water productivity of winter wheat using AquaCrop[J]. Agricultural Water Management, 2023, 286:108391.
[46] 任聪哲,范文波,乔长录,等. 基于 AquaCrop 模型的塔额盆地夏玉米节水潜力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2):140 - 149,209.
REN Congzhe, FAN Wenbo, QIAO Changlu, et al. Analysis of water-saving potential of summer maize in Ta'e Basin based on AquaCrop model[J]Agricultural Research in the Arid Areas, 2024,42(2):140 - 149,209. (in Chinese)
[47] 蒙继华,王亚楠,林圳鑫,等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2024,55(2):1 - 15,27.
MENG Jihua, WANG Ya'nan, LIN Zhenxin, et al. Progress and perspective of crop growth models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):1 - 15,27. (in Chinese)
[48] 孙仕军,张琳琳,陈志君,等. AquaCrop 作物模型应用研究进展[J]. 中国农业科学,2017,50(17):3286 - 3299.
SUN Shijun, ZHANG Linlin, CHEN Zhijun, et al. Advances in AquaCrop model research and application[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2017,50(17):3286 - 3299. (in Chinese)