

保护性耕作对黄土高原半干旱地区农田 土壤碳通量的影响

廖名燊¹, 李 广¹, 姚 瑶¹, 杜梦寅¹, 李艳艳², 杜 俊¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学 信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: [目的] 探究保护性耕作对陇中黄土高原半干旱地区旱作农田土壤二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)排放的影响, 阐明两者的排放特征及主要影响因素, 为区域农业生态可持续发展和制定有效的增产减排政策提供科学参考。[方法] 以传统耕作(CT)为对照, 布设免耕(NT)、传统耕作+秸秆覆盖(CTS)、免耕+秸秆覆盖(NTS)3种保护性耕作措施, 利用静态暗箱—气相色谱法测定旱作春小麦农田土壤CO₂和CH₄排放通量, 同时对土壤理化性质和小麦产量进行同期测定。[结果] ①与CT处理相比, NT, NTS和CTS处理的CO₂累积排放量分别减少17.34%, 15.67%和1.52%; CH₄累积吸收量分别提高11.95%, 16.26%和0.16%; 全球增温潜势(GWP)分别减少17.66%, 16.01%和1.5%; 温室气体排放强度(GHGI)分别降低38.15%, 45.15%和24.98%。②各处理的土壤有机碳(SOC)和微生物量碳(MBC)含量随土层的加深呈减少趋势; 在0—40 cm土层, NT, NTS和CTS处理的SOC和MBC含量均高于CT处理。③相关性分析表明, 土壤温度和SOC与CO₂排放通量呈极显著正相关($p < 0.001$), 与CH₄吸收通量呈极显著负相关($p < 0.001$); 而土壤含水量与CO₂排放通量呈极显著负相关($p < 0.001$), 与CH₄吸收通量呈极显著正相关($p < 0.001$)。冗余分析结果则显示, 土壤含水量、土壤温度和SOC是影响土壤碳通量的关键因素, 其中土壤含水量最为重要。[结论] 保护性耕作能够减缓研究地区旱作农田土壤温室气体排放, 降低其对温室效应的贡献, 同时显著增加小麦产量。综合生态效益与经济效益来看, 可以优先考虑将免耕与秸秆覆盖相结合作为该地区农田实现增产减排的耕作措施。

关键词: 保护性耕作; 旱作农田; 春小麦; 土壤碳通量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0242-11

中图分类号: S181, S153.1

文献参数: 廖名燊, 李广, 姚瑶, 等. 保护性耕作对黄土高原半干旱地区农田土壤碳通量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 242-252. Liao Mingshen, Li Guang, Yao Yao, et al. Effects of conservation tillage on carbon fluxes of agricultural soils in semi-arid region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 242-252. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.007; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.007.

Effects of conservation tillage on carbon fluxes of agricultural soils in semi-arid region of Loess Plateau

Liao Mingshen¹, Li Guang¹, Yao Yao¹, Du Mengyin¹, Li Yanyan², Du Jun¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The effects of conservation tillage on the emissions of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) from dryland farming in the semi-arid region of the Loess Plateau in central Gansu Province were investigated and the characteristics of the emissions and the main factors affecting them were elucidated to provide a scientific reference for the sustainable development of regional agricultural ecology and to formulate effective policies for increasing production and reducing emissions. [Methods] Using traditional tillage (CT) as a control, three conservation tillage measures were implemented: no-tillage (NT), conventional tillage plus straw mulching

收稿日期: 2024-09-24

修回日期: 2025-01-08

采用日期: 2025-01-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“旱作麦田土壤N₂O排放对耕作措施及水氮管理的响应模拟”(32360438); 甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09); 甘肃省重点研发计划(22YF7FA116); 甘肃省财政专项(GSCZZ20160909)

第一作者: 廖名燊(1998—), 男(汉族), 福建省南平市人, 硕士研究生, 研究方向为农田温室气体排放。Email: 1786349115@qq.com。

通信作者: 李广(1971—), 男(汉族), 内蒙古自治区化德县人, 博士, 教授, 主要从事作物模拟模型、系统集成和农业信息化研究工作。Email: lig93272883@163.com。

(CTS), and no-tillage plus straw mulching (NTS). Static chamber gas chromatography was employed to measure the CO_2 and CH_4 emission fluxes from the soil of dryland spring wheat fields while simultaneously determining the soil physicochemical properties and wheat yield. [Results] ① Compared with CT treatment, the cumulative CO_2 emissions of NT, NTS, and CTS treatments were 17.34%, 15.67%, and 1.52% lower, respectively. Cumulative CH_4 absorption increased by 11.95%, 16.26%, and 0.16%, respectively. Global warming potential (GWP) was reduced by 17.66%, 16.01%, and 1.5%, whereas greenhouse gas emission intensity (GHGI) decreased by 38.15%, 45.15%, and 24.98%, respectively. ② The soil organic carbon (SOC) and microbial mass carbon (MBC) decreased with increasing soil depth across all treatments. In the 0—40 cm soil layer, the SOC and MBC contents in the NT, NTS, and CTS treatments were higher than those in the CT treatment. ③ Correlation analysis showed that soil temperature and SOC had a highly significant positive correlation with CO_2 emission flux ($p < 0.001$) and a highly significant negative correlation with CH_4 absorption flux ($p < 0.001$). In contrast, soil moisture was highly negatively correlated with CO_2 emission flux ($p < 0.001$) and strongly positively correlated with CH_4 absorption flux ($p < 0.001$). Redundancy analysis showed that soil water content, soil temperature, and SOC were key factors affecting soil carbon fluxes, with soil moisture content being the most important. [Conclusion] Conservation tillage can slow greenhouse gas emissions from the soil of dryland farms in the study area, reduce its contribution to the greenhouse effect, and significantly increase wheat yields. Combining both ecological and economic benefits, the combination of NTS can be prioritized as a tillage measure to increase yield and reduce emissions from farmlands in this region.

Keywords: conservation tillage; dry farmland; spring wheat; soil carbon fluxes

当前,温室效应所造成的气候变暖问题已成为全球关注的热点。二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)作为两种重要的温室气体,对气候变暖的增温贡献比例分别为63%,18%^[1]。尽管 CH_4 在空气中的含量较低,且其在大气中的滞留时间较长,红外吸收能力更强,且增温效应约为 CO_2 的25倍^[2],对气候变暖的贡献也不容小觑。土壤是陆地生态系统中储量最大的碳库,其储量规模约为大气碳库的2倍,是植被碳库的3倍^[3]。土壤碳通量是指土壤呼吸、土壤微生物活动以及植物根系呼吸等过程将碳以气体的形式释放到大气中的速率,包括 CO_2 和 CH_4 等温室气体的排放^[4],这对气候变暖会产生一定影响。农业生产活动是大气温室气体的主要来源之一,每年约有5%~20%的 CO_2 ,60%~70%的 CH_4 来自农业生产^[5]。而农田土壤作为农业生产的物质基础,也是温室气体的重要排放源和吸收汇。旱作农田在中国分布广泛,在农业生产中占据重要地位。因此,研究旱地农田土壤 CO_2 和 CH_4 排放特征及其影响因素,对理解旱作农田土壤的碳源和碳汇效应具有重要意义。

合适的耕作方式能够有效减缓温室气体排放和促进农作物生长。目前,国内外大量研究^[6-7]已表明,保护性耕作能够保护农田、提高生产力,是改善农业环境与可持续性发展的必然选择。以作物秸秆覆盖与免耕相结合的保耕技术是目前旱区农业缓解旱情、增产增收、改善生态的重要手段^[8],在调控温室气体排放及春小麦产量等方面发挥着重要作用。这类

措施不仅能够减缓地表径流、涵养水源、保持水土,还能够对土壤温度、水分及土壤理化性质产生影响,进而影响 CH_4 及 CO_2 的排放^[9]。张国等^[10]研究指出,耕作是影响 CO_2 排放的重要因素,与免耕相比,耕作可以改变土壤的理化性质,促进微生物分解和厌氧发酵,进而大幅降低温室气体的排放量。此外,有研究^[11]表明,秸秆覆盖可以为土壤提供大量有机质,增加土壤有机碳(SOC)含量,进而促进土壤呼吸,增加 CO_2 排放。土壤 CH_4 排放主要涉及在厌氧环境下产甲烷菌和甲烷氧化菌所参与的一系列反应。大部分研究^[12-13]表明,免耕措施能够减低 CH_4 排放,这是因为免耕会减少对土壤有机质的破坏,使得土壤有机质含量增加,为微生物提供丰富的碳源,促进微生物的活性和数量,增强 CH_4 氧化活性,从而减少 CH_4 排放。也有研究^[14]认为,免耕显著提高表层土壤密度和含水量,阻碍空气的扩散,使厌氧环境得以维持,进而导致 CH_4 的增加。综上所述,不同耕作措施在不同温度、水分及不同土壤条件下对 CO_2 和 CH_4 排放的影响具有不同结果,至今没有一致结论,仍需进一步探究。

黄土高原位于中国中部偏北,土质干旱疏松,水土易流失是其特有的地质特征。春小麦作为该区域的普遍种植作物之一,因其生命力旺盛,抗旱能力强,生长周期短,能够很好地贴合黄土高原特有的生态环境,成为首选的优质农作物^[7]。目前,耕作措施对干旱区温室气体排放影响的研究,大多针对 CO_2 或

氧化亚氮(N_2O)^[7,9],而针对 CO_2 和 CH_4 的研究相对较少,使得农田土壤 CO_2 和 CH_4 在不同耕作措施下的排放特征与相关响应机制尚不明确。因此,研究在不同耕作措施下该地区春小麦农田土壤 CO_2 与 CH_4 排放变化,以及它们与小麦产量之间的平衡关系,对实现农田增产与减排具有重要意义。基于此,本研究以黄土高原半干旱地区春小麦农田土壤为研究对象,探究在4种耕作措施下, CO_2 和 CH_4 排放特征及其主要影响因素,揭示不同耕作措施对农田土壤 CO_2 和 CH_4 排放及小麦产量的影响,明确不同耕作措施对土壤碳排放及全球增温潜力的影响,确定小麦产量与 CO_2 和 CH_4 排放相协调的耕作方式,提出增产减排的耕作措施,以期为推动当地农业生态可持续发展和制定有效的增产减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在甘肃省定西市安定区安家坡村甘肃农业大学旱作农田综合试验站($103^\circ 52' - 105^\circ 13' \text{E}$, $34^\circ 26' - 35^\circ 35' \text{N}$)开展。试验地平坦无起伏,土壤类型多为当地典型黄绵土,土层深厚,质地均匀且松软柔绵,蓄水性能适中。该区气候特征属温带半干旱性气候,海拔1 420~2 032 m,年平均气温 6.3°C ,年均降水量为391.4 mm,主要集中于7—9月,占全年降水量的80%,年平均蒸发量1 576 mm,为典型的半干旱雨养农业区。

1.2 试验区域气候条件

甘肃省定西市水土保持研究所试验站气象统计

资料显示(图1),2023年春小麦生育期内降雨量为133.6 mm,且呈现出季节性分配不均的现象,日平均气温在小麦生育期内呈上升趋势。

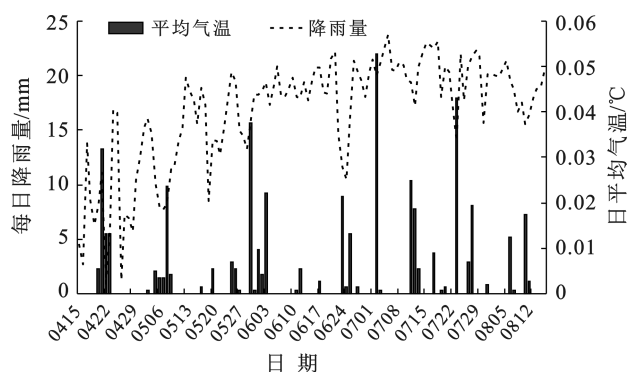


图1 试验区2023年小麦生长阶段
日降雨量及日平均气温变化

Fig.1 Variation of daily rainfall and average daily air temperature during growth stage of wheat in experimental area in 2023

1.3 试验设计

试验于2023年开展,选用本地品种“定西35号”春季小麦作为指示作物。于2023年3月底进行撒播,8月初收获。本研究以传统耕作(CT)为对照,布设免耕(NT)、传统耕作+秸秆覆盖(CTS)、免耕+秸秆覆盖(NTS)3种保护性耕作措施(表1),各处理设置3次重复,共12块小区,小区面积均为 24 m^2 ,播种量为 187.5 kg/hm^2 ,行距25 cm。根据当地施肥经验,各施肥处理统一施加 $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 过磷酸钙作为基肥,地块除耕作方法的差异外,其余的田间管理措施均保持一致。

表1 春小麦地不同耕作措施
Table 1 Different tillage practices in spring wheat fields

耕作措施	处理代码	耕作方法
传统耕作	CT	深翻土壤后播撒化肥(过磷酸钙),随即播撒种子
传统耕作+秸秆覆盖	CTS	耕作程序同CT,收获后脱粒并将作物秸秆均匀归还原小区
免耕	NT	整个生育期不耕作,不进行秸秆覆盖,表层施肥(过磷酸钙)
免耕+秸秆覆盖	NTS	耕作程序同NT,秸秆覆盖程序同CTS

1.4 土壤气体的采集与分析

土壤 CO_2 和 CH_4 排放通量通过静态箱—气相色谱法测定。从春小麦播种起至收获的整个生育期,每隔15 d采集1次并进行测定,每块样地布设3个重复暗箱进行同步采集。采集时间集中于早上9:30—11:30(此时间段气温接近1 d的均值)。采集暗箱(图2)尺寸采用 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 无底座正方体规格,使用厚度为1 mm的304型不锈钢制作,以隔绝内部气温受外界环境干扰,采用隔热泡沫材料将整个箱体紧密包裹,箱体的内上部安装两台空气搅拌

风扇,侧面装有供风扇供电的插座、取气阀门接口及测温器接口。底座为不锈钢材质,尺寸为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,上部有密封水槽,采集气体时将不锈钢底座固定于麦田土壤中(深度为20 cm),并将水注入至水槽内以隔绝箱内气体与外部进行交换,随即扣合箱体进行采集。扣箱后,使用100 ml针管抽取第一次气样注入于气封袋中,每间隔8 min重复进行下一袋抽取,取样时间共计32 min,共取样4次。采集完毕后,对气封袋进行分批编号,带回实验室于72 h内使用气相色谱仪(GC-7890B, Agilent, USA)完成采

集气体中CO₂和CH₄测定分析,分析不同处理下CO₂和CH₄的排放特征。

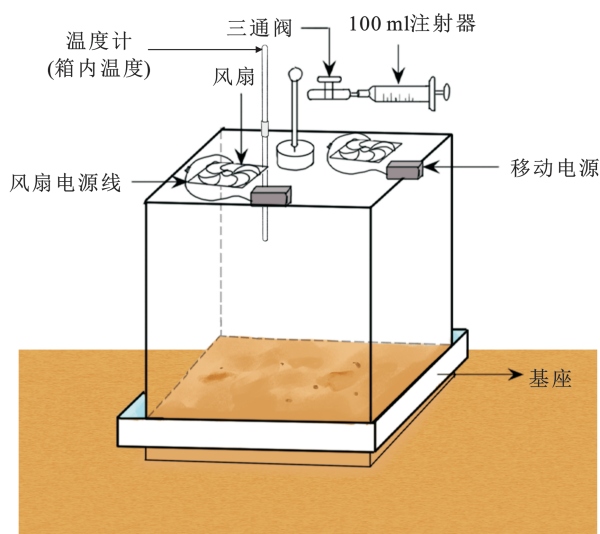


图2 温室气体采集设备示意图
Fig.2 Schematic diagram of collection equipment for greenhouse gas

测定期内CO₂和CH₄排放通量 F 计算公式为:

$$F = \frac{C_2 \cdot V \cdot M_0 \times 273 / T_2 - C_1 \cdot V \cdot M_0 \times 273 / T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4} \quad (1)$$

式中: F 为土壤CO₂,CH₄排放通量[mg/(m²·h)]; A 为采样箱底面积(m²); V 为采样箱体积(m³); M_0 为气体分子量; C_1, C_2 为测定箱关闭的过程中和开启前所对应的体积浓度(mol/mol); T_1, T_2 为采样箱关闭和开启前箱内温度(°C); t_1, t_2 为测定开始和结束的时间。

农田土壤CO₂和CH₄累积排放量 M 计算公式为:

$$M = \sum (F_{N+1} + F_N) \times 0.5 \times (t_{N+1} + t_N) \times 24 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中: M 为整个生育期内土壤CO₂和CH₄排放量(kg/hm²); F 为土壤CO₂和CH₄排放通量[mg/(m²·h)]; N 为采样次数; t 为距离初次采样的时间(d)。

全球增温潜势(GWP)根据CO₂和CH₄的GWP加和得到。在100 a尺度上,CH₄的GWP是CO₂的25倍,其计算公式为:

$$GW_p = E_{CH_4} \times 25 + E_{CO_2} \quad (3)$$

式中: E_{CH_4} 为CH₄的累积排放通量; E_{CO_2} 为CO₂的累积排放通量。

温室气体排放强度(GHGI, kg/hm²),计算公式为:

$$GHGI = GWP / i \quad (4)$$

式中: GWP 为全球增温潜势; i 为不同耕作措施下小麦单位面积产量(kg/hm²)。

1.5 土壤样品的采集与处理

气体采集的同时,在样地小区内采用S型5点取样法,选取5个点进行土壤采集,使用直径为5 cm的土钻分别采集0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm土层土样,将同一土层的样品混合起来,以得到一个综合性的样本。去除残留的根系、干枯的枝条和落叶等杂质后,将土样密封装袋并放入填有冰块的冷藏箱内保存,随后带至实验室进行相关指标的检测。土壤含水量采用铝盒烘干法进行测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化容量法测定;微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法测定;土壤温度采用数据采集仪(EM50)自动采集^[7,15]。小麦成熟后,每块试验区随机选取9行小麦进行产量计算。

1.6 数据处理

采用Excel 2021整理数据,使用Origin 2021进行绘图。借助SPSS 26.0进行数据处理,对不同处理的土壤碳通量、增温潜势、排放强度和小麦产量以及不同土层的土壤理化性质等数据采用单因素方差分析(one-way ANOVA)等统计分析,采用Pearson相关分析研究土壤理化性质与土壤碳通量之间的相关性强弱。冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种用于生态学和环境科学中多变量数据分析的方法。本文基于R语言(R4.3.2)中“vegan”包进行RDA分析,揭示土壤理化性质与土壤碳通量之间的关系。

2 结果与分析

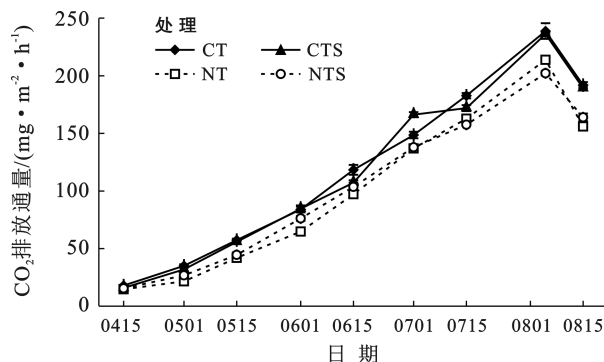
2.1 不同耕作措施对春小麦农田土壤碳通量排放的影响

2.1.1 不同耕作措施下CO₂排放通量与累积排放量动态分析 不同耕作措施的CO₂排放通量如图3a所示,小麦整个生育期4种处理的CO₂排放通量变化无明显区别,均表现为随小麦生长而大幅上升,小麦收获时达到峰值,而收获后逐渐呈下降趋势。其中,排放通量最高的是CT处理,其次为CTS, NTS, NT。通过计算可知,4种处理的CO₂累积排放量(图3b)按照大小顺序表现为:CT > CTS > NTS > NT。与CT处理相比,其他3种处理(NT, CTS, NTS)的CO₂累积排放量分别减少了17.34%,1.52%,15.67%,且各处理间差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 不同耕作措施下CH₄排放通量与累积吸收量动态分析 不同耕作措施的CH₄排放通量与累积吸收量如图4所示。在观测期间,各处理的土壤CH₄排放通量为负值,基本处于吸收CH₄状态。因此,旱作春小麦农田土壤为CH₄吸收汇。由图4a可知,各处理的CH₄吸收通量整体变化趋势无明显差异。具体表现为

播种后,各处理的土壤 CH_4 吸收通量逐渐减少,并在 5 月 1 日出现第一个吸收低峰,这可能与播种的基肥施入与该阶段多降雨有关。随后,各处理的 CH_4 吸收通量开始呈现递增趋势,直至 6 月 1 日又转入减少趋势,并在 6 月 15 日出现生育期内第 2 个吸收低峰。而后,随着气温上升,各处理的 CH_4 吸收通量开始大幅提升,持续至 8 月小麦收获。4 种处理(CT, CTS, NT, NTS)的 CH_4 小麦生长期平均吸收通量分别为 42.80,

42.86, 47.38 和 48.92 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 大小顺序表现为: $\text{NTS} > \text{NT} > \text{CTS} > \text{CT}$ 。通过计算可知,4 种处理的 CH_4 累积吸收量(图 4b)具体大小次序为: $\text{NTS} > \text{NT} > \text{CTS} > \text{CT}$ 。与 CT 处理相比,其他 3 种处理(NTS, NT, CTS)累积吸收量增幅为 16.26%, 11.95% 和 0.16%, 且各处理间差异显著($p < 0.05$)。



注:不同小写字母表示生育期内不同处理之间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 3 不同耕作措施下春小麦地土壤 CO_2 排放通量与累积排放量动态变化

Fig.3 Dynamics of soil CO_2 emission fluxes and cumulative emissions in spring wheat fields under different tillage practices

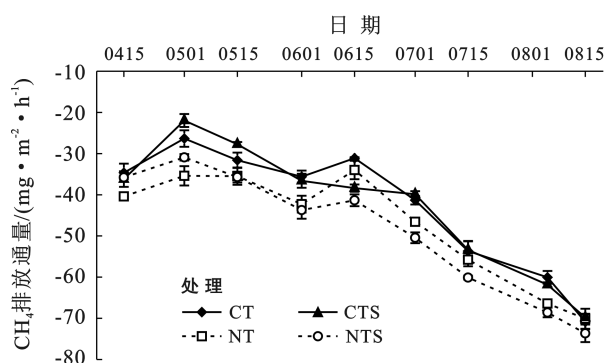


图 4 不同耕作措施下春小麦地土壤 CH_4 排放通量与累积吸收量动态变化

Fig.4 Dynamics of soil CH_4 emission flux and cumulative absorption fluxes in spring wheat land under different tillage practices

2.2 不同耕作措施对土壤碳通量的全球增温潜势、温室气体排放强度以及春小麦产量的影响

不同耕作措施对春小麦农田土壤碳通量的全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)有显著影响(表 2), 且各处理 GWP 和 GHGI 大小均表现为: $\text{CT} > \text{CTS} > \text{NTS} > \text{NT}$ 。其中, 与 CT 处理相

比, NT, NTS, CTS 处理的 GWP 分别显著降低了 17.66%, 16.01% 和 1.5%, GHGI 则分别降低了 38.15%, 45.15% 和 24.98%。此外, 不同处理的小麦产量大小具体表现为: $\text{NTS} > \text{CTS} > \text{NT} > \text{CT}$ 。综合来看, 保护性耕作能够减缓全球增温潜势, 降低温室气体排放强度, 并显著增加小麦产量。

表 2 不同耕作措施下土壤碳通量的全球增温潜势、温室气体排放强度以及春小麦产量的变化

Table 2 Changes of global warming potential, greenhouse gas emission intensity and spring wheat yield in soil carbon fluxes under different tillage practices

处理	小麦产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	全球增温潜势/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	温室气体排放强度/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
CT	1 019.33 ± 35.12 ^c	3 503.75 ± 20.22 ^a	3.44 ± 0.13 ^a
NT	1 195.96 ± 37.30 ^b	2 977.88 ± 8.96 ^d	2.49 ± 0.07 ^c
CTS	1 222.03 ± 22.18 ^{ab}	3 450.64 ± 21.39 ^b	2.82 ± 0.03 ^b
NTS	1 274.56 ± 50.72 ^a	3 019.97 ± 17.02 ^c	2.37 ± 0.09 ^c

注:①数据为平均值 ± 标准误; ②同列数据后不同小写字母表示不同处理间的差异显著($p < 0.05$)。

2.3 保护性耕作对土壤理化性质的影响

2.3.1 不同耕作措施对土壤温度、含水量的影响 在观测期间,各处理的土壤温度变化趋势大体一致(图5)。具体表现为从4月播种后开始大幅上升,到6月中旬土壤温度开始降低直至7月初,这与该阶段多降雨有关;随后又开始大幅上升至8月初小麦收获时达到峰值,小麦收获后各处理则均呈现大幅下降趋势。

不同耕作措施的土壤含水量如图6所示。从生长阶段来看(图6a),各处理的土壤含水量随着生长阶段逐渐降低。在生长初期和生长末期,NTS处理的土壤含水量均为最高,生长中期NTS处理的土壤含水量则显著低于其他3种处理。从不同土层来看(图6b),各处理的土壤含水量变化均随土层加深而

增加;在0—40 cm土层,CT处理的土壤含水量为最高,各处理间无显著差异。

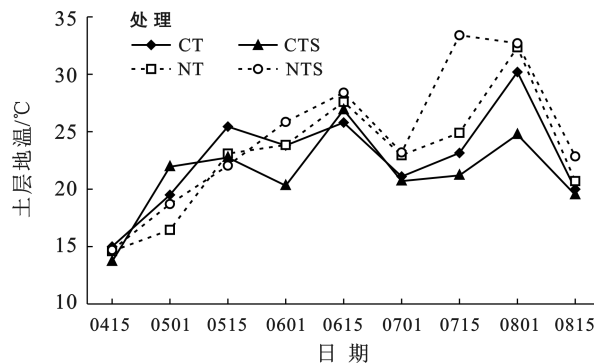
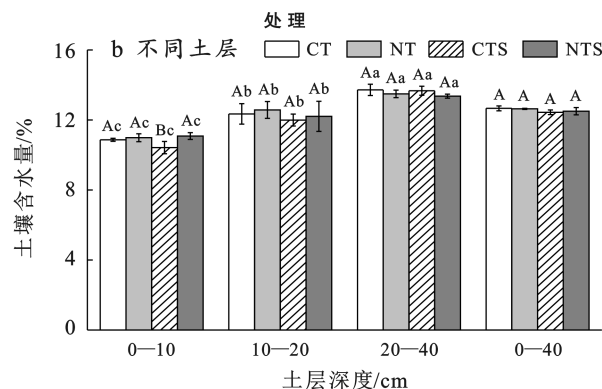
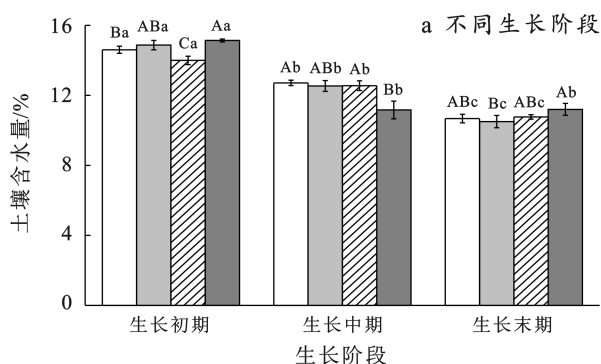


图5 不同耕作措施下0—10 cm土层土壤温度变化
Fig.5 Changes in soil temperature in 0—10 cm layer under different tillage practices



注:不同大写字母表示相同生育期内不同处理间的差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示不同生长阶段相同处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图6 不同耕作措施对土壤含水量的影响

Fig.6 Effects of different tillage practices on soil water content

2.3.2 不同耕作措施耕作对土壤有机碳、微生物量碳的影响 不同耕作措施的土壤有机碳(SOC)含量变化如图7所示。从生长阶段来看(图7a),各处理的SOC含量变化呈现递增趋势。其中,NTS处理的SOC含量在生长初期和生长末期均表现为最高;而在生长中期,CTS处理的SOC含量最高。从土层来

看(图7b),各处理的SOC含量呈显出一致的趋势,均随着土层深度的增加而逐渐减少。NTS处理的SOC含量在各土层均表现为最高;在0—40 cm土层,NT, CTS, NTS处理的SOC含量相较于CT处理显著增加了2.23%,7.82%,11.2%,表明保护性耕作能够显著增加SOC含量。

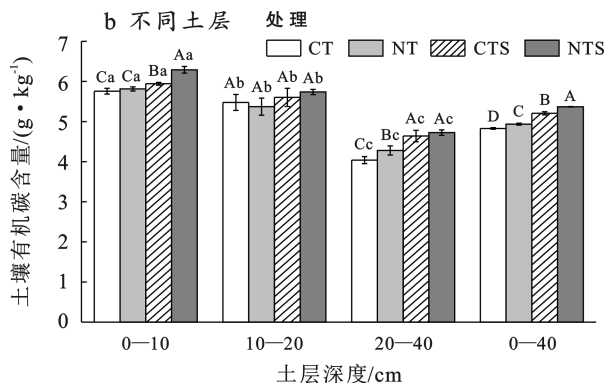
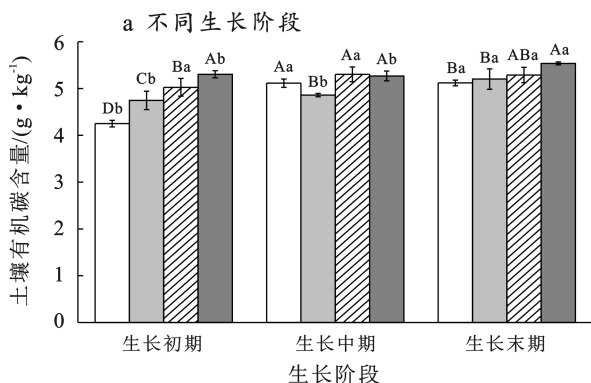


图7 不同耕作措施对土壤有机碳含量的影响

Fig.7 Effects of different tillage practices on soil organic carbon content

不同耕作措施的土壤微生物量碳(MBC)含量变化如图8所示。从生长阶段来看(图8a),各处理的MBC含量变化呈现先增后减的趋势,且NTS处理的MBC含量在生长初期、中期和末期均表现为最高。从土层来看(图8b),各处理的MBC含量均随着土层

加深而逐渐降低。NTS处理的MBC含量在各土层均表现为最高。在0—40 cm土层,NT, CTS, NTS处理的MBC要显著高于CT处理($p<0.05$),分别提高了26.07%,17.36%,13.07%,表明保护性耕作能够显著增加土壤MBC含量。

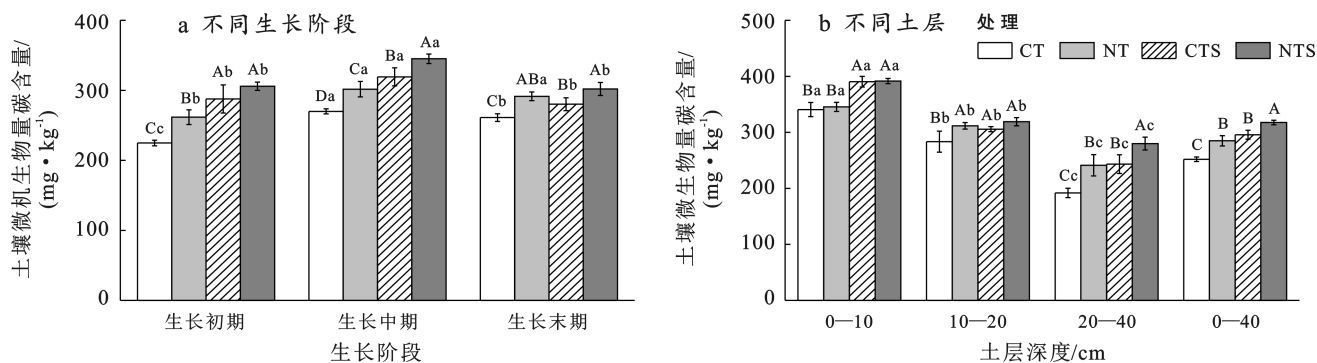


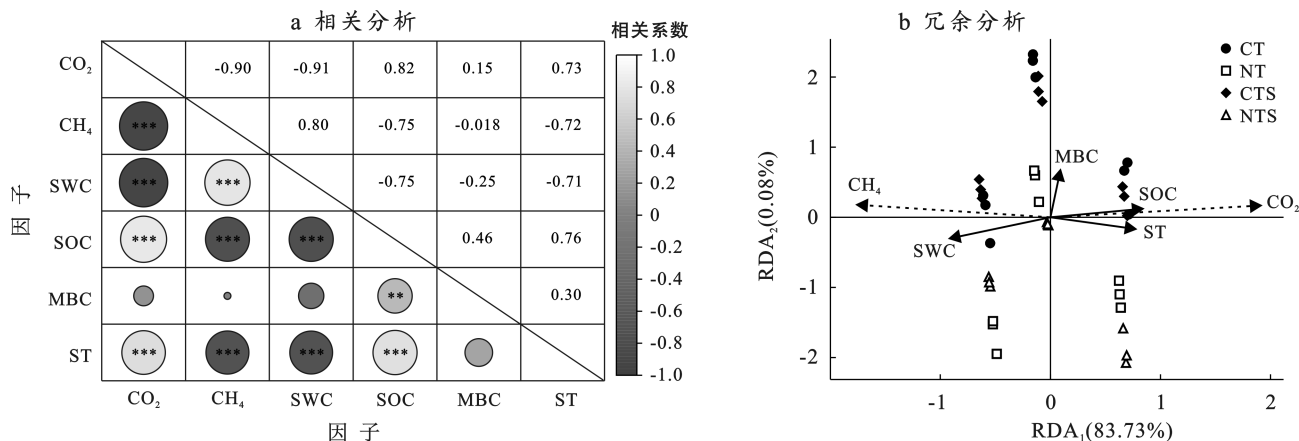
图8 不同耕作措施对土壤微生物量碳含量的影响

Fig.8 Effects of different tillage practices on microbial biomass carbon content

2.4 土壤理化性质对土壤碳通量的影响

相关性分析表明(图9a),土壤温度、SOC含量与CO₂排放通量呈极显正相关关系,与CH₄排放通量呈极显负相关关系;土壤含水量与CO₂排放通量呈极显著负相关关系,与CH₄排放通量呈极显正相关关系;

MBC含量与CO₂排放通量之间呈正相关关系,而与CH₄排放通量之间无显著相关关系。这些均与冗余分析结果(图9b)表现一致。此外,根据RDA分析结果,土壤温度、土壤含水量、SOC和MBC在决定CO₂和CH₄排放通量方面起着重要作用($R^2=82.56\%$)。



注: ①ST为土壤温度;SWC为土壤含水量;SOC为土壤有机碳;MBC为微生物量碳。②**表示该因子在 $p<0.01$ 水平下达到显著水平,***表示该因子在 $p<0.001$ 水平下达到极显著水平。③红线表示CO₂与CH₄的排放通量,蓝线表示土壤环境因子。

图9 土壤碳通量与土壤理化性质的关系

Fig.9 Relationship between soil carbon fluxes and soil physicochemical properties

表3为土壤碳通量的变化影响因素的重要性排序和显著性表现的结果。土壤水分、SOC、土壤温度对土壤CO₂和CH₄排放通量的影响达到极显著水平($p<0.01$),解释率分别为82.37%,67.26%和55.38%,说明这3个环境因子是影响土壤碳通量的重要因子,而MBC的影响未达到显著水平($p>0.05$)。

3 讨论

3.1 不同耕作措施对农田土壤碳通量与小麦产量的影响

本研究结果表明,在小麦整个生育期内,4种耕作措施的CO₂排放通量从播种后均随小麦的生长而逐渐增加,在小麦收获后呈大幅下降趋势。农田土

壤 CO₂ 产生于生物学和非生物学过程,其中生物学过程涉及自养和异养的呼吸过程,包括植物根系的呼吸、土壤微生物活动^[16]随着小麦的生长发育,土壤中微生物的活性与根系活动有所增强,从而促进土壤的呼吸速率。另一方面,播种期正值春季,由于土质的冻融循环,植株和微生物分解产生有机碳,进而激活微生物的代谢作用,微生物活动逐渐活跃^[17]。随着季节的变化,气候逐步转暖,土壤中的生物呼吸过程变得更为频繁,增强土壤内微生物和植物根部的呼吸活跃程度,提高土壤的呼吸速率,强化土壤呼吸作用,进而导致土壤 CO₂ 排放显著增加^[18]。在小麦收获后,土壤与小麦之间的相互关系减少使得土壤微生物活性的降低与根系活动减少,削弱土壤呼吸作用,导致土壤 CO₂ 排放开始大幅降低。此外,本研究表明,农田土壤在小麦整个生育期表现为 CH₄ 吸收汇,这与大部分对旱地农田 CH₄ 的研究结论一致^[2,10]。这是因为旱地土壤中存在大量甲烷氧化细菌,而 CH₄ 是这些微生物唯一能源和碳源物质^[19]。播种后,土壤 CH₄ 的吸收通量呈现减少趋势,这可能是因为播种基肥的施入为土壤表层 CH₄ 细菌提供丰富的源物质,随着小麦生长生物量增加且根系活动增强,有利于 CH₄ 的形成与排放^[20]。Li Chengfang 等^[21]研究结果也表明,在旱地土壤施肥会使得 CH₄ 的吸收变小,这是由于氮肥使得有机基质的供应增加,从而降低土壤对 CH₄ 的吸收率。本研究还发现在 6 月中旬 CH₄ 吸收出现第 2 个低峰,这一现象与当月频繁的降水活动相关。雨量的增加能够提高土壤含水量,从而降低土壤的通透性,这种变化会减缓气体的扩散速率及其范围,抑制甲烷分解细菌的活性,进而降低土壤对 CH₄ 的吸收^[22]。

表 3 土壤环境因子解释度的重要性排序
Table 3 Importance ranking of explanatory power of soil environmental factors

土壤环境因子	排序号	解释度/%	<i>p</i> 值
土壤含水量	1	82.37	0.001
土壤有机碳	2	67.26	0.001
土壤温度	3	55.38	0.001
微生物量碳	4	9.33	0.195

耕作对温室气体的释放起着至关重要的作用。本研究结果表明,在不同耕作处理下,CT 处理的 CO₂ 排放量表现为最高,NT 和 NTS 排放量均显著低于 CT 处理,其原因是传统耕作破坏了土壤结构,造成土壤有机碳流失,土壤固碳能力降低,进而促进土壤 CO₂ 的排放^[23],而免耕和秸秆覆盖对土壤的扰动幅度小,能够降低土壤有机质的分解速率,同时秸秆覆盖

还田能够为土壤提供额外的有机碳输入,使表层土壤有机质及养分富集,有机碳含量的增加,增加碳固持效率,减少 CO₂ 排放^[10]。本研究结果表明,NTS 处理的土壤 CH₄ 吸收率要明显优于其他处理。这是因为免耕和秸秆覆盖不会破坏土壤结构,而且秸秆覆盖还能够增加土壤表层含水量和土壤中好气微生物活性,利于土壤中 CH₄ 的氧化,提高土壤 CH₄ 的吸收速率^[24],这与汪婧等^[25]的研究结果基本吻合。然而,也有研究^[26]表明,秸秆覆盖能够加剧 CH₄ 排放,因为秸秆覆盖能够为 CH₄ 的产生提供丰富的底物,同时在分解过程既消耗氧气又增加厌氧环境,从而促进 CH₄ 的排放。这可能是由于不同地域条件所产生的差异,CH₄ 的吸收和排放机理较为复杂并且受到诸多因素影响。本研究还发现,NTS 和 NT 处理的温室气体排放强度和增温潜势要显著低于 CT 处理,这与保护性耕作能够减少对土壤的扰动,增加土壤固碳能力、减少碳排放等优势息息相关^[27]。本研究结果显示,与 CT 处理相比,保护性耕作能够显著提高小麦产量,且 NTS 处理的产量最高,这可能是因为免耕能够减少土壤的扰动,保持土壤的团聚结构,增加作物氮素吸收,而且秸秆覆盖能够有效促进土壤腐殖质的形成,提高土壤有机质与土壤养分含量,同时秸秆本身能够释放营养物质供作物吸收^[7]。

综上所述,保护性耕作不仅能够显著提升春小麦产量,还能够有效减少 CO₂ 排放与促进 CH₄ 吸收,减缓温室气体排放强度,起到增产减排的效用。

3.2 环境因素对土壤碳通量的影响

土壤温度和土壤含水量是影响土壤 CO₂ 排放与 CH₄ 吸收的两个关键因素。本研究发现,土壤温度与 CO₂ 排放通量呈极显著正相关($p < 0.01$),大部分研究也发现土壤温度能够显著影响 CO₂ 排放^[2,24]。这是因为较高的土壤温度能够增强作物的根系呼吸,促进土壤有机质的分解,提高土壤微生物的活性,从而促进 CO₂ 排放^[28]。在本研究中,土壤含水量与 CO₂ 排放通量呈极显著负相关,可能是因为土壤含水量的增加会抑制作物根系呼吸,而且会产生厌氧环境,弱化微生物活性,从而削弱土壤呼吸作用,进而使得 CO₂ 排放减少^[24]。

土壤温度对 CH₄ 吸收的影响主要归因于温度会改变产甲烷菌和甲烷氧化还原菌的组分和活性^[29]。本研究结果表明,在小麦整个生长阶段旱作麦田土壤表现为 CH₄ 汇,且与土壤温度呈现极显著相关关系($p < 0.01$),反映出土壤温度能够促进 CH₄ 吸收作用。这与杨智慧等^[30]研究结果一致。这是由于土壤温度的升高,加快了土壤水分的蒸发,增强 CH₄ 氧化菌的

活性,进而促进土壤CH₄吸收。但也有与之相反的结论,有学者表明高温会提高CH₄的产生速率,促进CH₄生成菌的生长和代谢活动,增强CH₄排放^[31],这可能是由于不同地区的土壤理化性质和甲烷微生物群落所引起的差异。普遍认为,土壤含水量是影响干旱地区CH₄排放的关键因子之一^[24]。本研究结果表明,土壤含水量与CH₄排放量存在显著正相关。这可能是随着土壤含水量的增加,使得土壤中气体的传播速度和范围降低,更容易造成土壤的缺氧状况,进而形成厌氧环境,减弱土壤对CH₄的氧化作用,导致土壤吸收CH₄的能力下降^[32]。

除了受土壤温度和含水量的影响外,土壤CO₂排放与CH₄吸收还受到土壤化学性质的影响。王怡萌等^[33]的研究结果指出,SOC与CO₂排放呈现显著负相关,这与本研究结果不一致。本研究中土壤CO₂排放与SOC存在极显著正相关。这是因为土壤有机碳库是土壤微生物分解的主要碳源,其含量高低直接影响着土壤微生物的活性,从而影响土壤的碳排放过程^[34]。造成研究结果差异的原因可能是不同地域下的水热条件,水位较高的地域相较于干旱地区能够抑制微生物的活性,进而降低微生物对有机质的分解速率。本研究中土壤CH₄排放通量与SOC则表现为极显著负相关。这是因为SOC含量能够显著影响土壤微生物的数量与活性来调控土壤CH₄排放,SOC的增加会提高土壤有机碳的固存率,减少甲烷菌对其产生的可利用性,从而大幅降低CH₄排放^[35]。

4 结 论

(1)在不同耕作措施下,旱作春小麦农田土壤均表现为CO₂排放源和CH₄吸收汇。相较于CT处理,保护性耕作能够显著降低CO₂累积排放量,提高CH₄累积吸收量,并有效降低GWP和GHGI,促进小麦产量的增加。其中,以NTS处理最为显著。

(2)旱作春小麦农田土壤CO₂和CH₄排放通量与土壤含水量、土壤温度、SOC和MBC存在显著相关关系,其中土壤含水量对土壤碳通量的影响尤为显著。

参考文献(References)

- [1] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. Special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: IPCC, 2000.
- [2] 张志栋,刘景辉,王润莲,等.旱作燕麦不同耕作方式对土壤温室气体排放的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):112-117.
- Zhang Zhidong, Liu Jinghui, Wang Runlian, et al. Effects of oat tillage systems on greenhouse gas emis-

- sions in dry land [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011,29(3):112-117.
- [3] 王博,包玉海,刘静,等.库布齐沙漠植被恢复对风沙土壤碳通量与碳储量的影响[J].土壤,2022,54(3):539-546.
- Wang Bo, Bao Yuhai, Liu Jing, et al. Effects of vegetation restoration on sandy soil carbon flux and carbon storage in Hobq [J]. Soils, 2022,54(3):539-546.
- [4] 阿依谢姆·约麦尔.短期围封对伊犁绢蒿荒漠植被特征和土壤呼吸的影响[D].新疆乌鲁木齐:新疆农业大学,2018.
- Yomal A. Effects of short-term enclosure on vegetation characteristics and soil respiration of *Seriphidium transiliense* desert [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2018.
- [5] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. Science, 2002,298(5601):2173-2176.
- [6] 王长生,王遵义,苏成贵,等.保护性耕作技术的发展现状[J].农业机械学报,2004,35(1):167-169.
- Wang Changsheng, Wang Zunyi, Su Chenggui, et al. Development and application of protective farming technique [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004,35(1):167-169.
- [7] 杜梦寅,袁建钰,李广,等.保护性耕作对黄土高原半干旱区农田土壤N₂O排放的影响[J].干旱区研究,2022,39(2):493-501.
- Du Mengyin, Yuan Jianyu, Li Guang, et al. Effects of protective measures on N₂O emission from farmland soil in a semi-arid area of the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2022,39(2):493-501.
- [8] 孔维萍,成自勇,张芮,等.保护性耕作在黄土高原的应用和发展[J].干旱区研究,2015,32(2):240-250.
- Kong Weiping, Cheng Ziyong, Zhang Rui, et al. Application and development of conservation tillage techniques in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2015,32(2):240-250.
- [9] 张志勇,于旭昊,熊淑萍,等.耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(2):418-428.
- Zhang Zhiyong, Yu Xuhao, Xiong Shuping, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020,39(2):418-428.
- [10] 张国,王效科.我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J].农业环境科学学报,2020,39(4):872-881.
- Zhang Guo, Wang Xiaoke. Impacts of conservation tillage on greenhouse gas emissions from cropland in China: A review [J]. Journal of Agro-Environment Sci-

- ence, 2020, 39(4): 872-881.
- [11] 吴健成, 刘卿, 汪翠存, 等. 秸秆还田与氮肥施用对稻田温室气体排放的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5328-5339.
- Wu Jiancheng, Liu Qing, Wang Cuicun, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in rice paddy fields and research on fertilizer recommendation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5328-5339.
- [12] Zhang Zhisheng, Chen Jia, Liu Tianqi, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of Central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144: 274-281.
- [13] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.
- Qin Xiaobo, Li Yu'e, Wan Yunfan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH_4 and N_2O emission from double rice field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 216-224.
- [14] Zhang Guangbin, Yu Haiyang, Fan Xianfang, et al. Drainage and tillage practices in the winter fallow season mitigate CH_4 and N_2O emissions from a double-rice field in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(18): 11853-11866.
- [15] 刘帅楠, 李广, 宋良翠, 等. 早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤氮磷元素的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1367-1375.
- Liu Shuainan, Li Guang, Song Liangcui, et al. Effects of early sowing and tillage measures on nitrogen and phosphorus in the soil supporting spring wheat in the semi-arid area of the Loess Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5): 1367-1375.
- [16] 游贤慧, 杨琰, 徐刚, 等. 喀斯特槽谷区土壤 CO_2 浓度的短时变化及影响因素研究[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 16-25.
- You Xianhui, Yang Yan, Xu Gang, et al. Short term concentration change of CO_2 in soils of karst trough valley area and its influencing factors [J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1): 16-25.
- [17] 杨红露, 秦纪洪, 孙辉. 冻融交替对土壤 CO_2 及 N_2O 释放效应的研究进展[J]. 土壤, 2010, 42(4): 519-525.
- Yang Honglu, Qin Jihong, Sun Hui. A review: Response of soil CO_2 and N_2O emissions to freeze-thaw pattern change [J]. *Soils*, 2010, 42(4): 519-525.
- [18] 王鹤琪, 范高华, 黄迎新, 等. 中国北方草地生产力研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(5): 219-229.
- Wang Heqi, Fan Gaohua, Huang Yingxin, et al. Advances in research on grassland productivity in Northern China [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(5): 219-229.
- [19] 高志岭. 冬小麦/夏玉米轮作体系农田土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Gao Zhiling. N_2O flux and CH_4 uptake of soil in winter wheat and summer maize rotation system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [20] 张迪男. 有机管理条件下农田土壤 C, N, P 变化特征[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- Zhang Dinan. The characteristics of farmland soil C, N, P under organic systems [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [21] Li Chengfang, Zhou Danna, Kou Zhikui, et al. Effects of tillage and nitrogen fertilizers on CH_4 and CO_2 emissions and soil organic carbon in paddy fields of central China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(5): e34642.
- [22] 闫琪, 张淑鑫, 侯文姬, 等. 气候变化下基于 DayCent 的旱地玉米农田温室气体排放通量模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 128-136.
- Yan Qi, Zhang Shuxin, Hou Wenji, et al. Modelling greenhouse gas emissions of maize farmland under climate change using DayCent [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 128-136.
- [23] 李发东, 栗照鑫, 乔云峰, 等. 土壤有机碳同位素组成在农田生态系统碳循环中的应用进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 194-205.
- Li Fadong, Li Zhaoxin, Qiao Yunfeng, et al. Using soil organic carbon isotope composition analysis to elucidate the carbon cycle of agroecosystems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 194-205.
- [24] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- Zhang Yuming, Hu Chunsheng, Zhang Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975.
- [25] 汪婧, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1295-1300.
- Wang Jing, Cai Liqun, Zhang Renzhi, et al. Effect of tillage pattern on soil greenhouse gases (CO_2 , CH_4 and N_2O) fluxes in semi-arid temperate regions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1295-1300.
- [26] 马小婷, 隋玉柱, 朱振林, 等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 14-20.
- Ma Xiaoting, Sui Yuzhu, Zhu Zhenlin, et al. Research

- progress on the influence of straw returning to field on soil carbon pool and greenhouse gas emission in farmland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 14-20.
- [27] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, et al. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: -644.
- [28] 韩燕云, 吴永红, 李丹, 等. 微生物介导的稻田水土界面温室气体排放及其农事减排措施研究进展[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(12): 2369-2381.
- Han Yanyun, Wu Yonghong, Li Dan, et al. Advancements in research on microbe-mediated greenhouse gas emissions at the rice paddy soil-water interface and agricultural mitigation strategies [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2369-2381.
- [29] 段琳博. 温室番茄优产减排提质的水肥气耦合模式研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- Duan Linbo. Water, fertilizer and gas coupling for greenhouse tomatoes to improve quality and reduce emissions-model research [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [30] 杨智慧, 牟长城, 王亚辉, 等. 抚育强度对不同林型“栽针保阔”红松林碳源/汇影响[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(6): 19-32.
- Yang Zhihui, Mu Changcheng, Wang Yahui, et al. Effects of tending intensity on carbon source/sink of Korean pine forests with different forest types by planting coniferous forest and reserving broadleaved forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(6): 19-32.
- [31] 任晓静. 冬水田转稻麦轮作对 CH₄ 排放的影响[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2017.
- Ren Xiaojing. Effect of altering rice-flooded-fallow to rice-wheat rotation on CH₄ emission [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [32] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2413-2425.
- Wang Xiaoyun, Cai Huanjie, Li Liang, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2413-2425.
- [33] 王怡萌, 段磊磊, 陈聪, 等. 不同水位管理对恢复泥炭地土壤 CO₂, CH₄ 排放的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4583-4593.
- Wang Yimeng, Duan Leilei, Chen Cong, et al. Effects of different hydrologic managements on soil CO₂ and CH₄ emissions of the restored peatlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4583-4593.
- [34] 刘意立. 我国亚热带季风气候区湿地土壤 CO₂, CH₄ 排放规律研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2014.
- Liu Yili. Laboratory study on the carbon dioxide and methane emission from wetland soil in subtropical monsoon climate zone [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [35] 刘畅, 迟道才, 张丰, 等. 稻草生物炭对干湿交替稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 232-242.
- Liu Chang, Chi Daocai, Zhang Feng, et al. Effects of rice straw biochar on CH₄ and N₂O emissions in alternating wetting and drying rice fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 232-242.

(上接第 232 页)

- [32] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [33] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (Suppl 1): 3665-3672.
- [34] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- Liu Jiyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.
- [35] 陈森, 汪小钦, 林敬兰, 等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 168-177.
- Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 168-177.