

网络出版时间:2026-01-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260112.1501.004

不同灌溉方式对麦田土壤呼吸及碳平衡的影响

杨明达¹,张素瑜¹,黄洁²,李帅¹,王玉梅¹,郑东方¹,杨慎骄³,吕仿杰⁴,陈金平³,马守田³

(1. 商丘市农林科学院,河南商丘 476000; 2. 南阳市宛城区农业技术推广中心,河南南阳 473000; 3. 中国农业科学院
农田灌溉研究所/河南省农业高效用水野外科学观测研究站/农业农村长期因子综合观测新乡站,河南新乡 453003;

4. 商丘市乡村产业发展中心,河南商丘 476000)

摘要:为明确不同灌溉方式对麦田生态系统碳平衡的影响,筛选适宜华北平原小麦生产的节水、减排与增产协同的高效灌溉模式,设置传统地面灌溉(FI)、隔畦交替灌溉(ABI)和微喷灌(MSI)3种灌溉方式,并在微喷灌条件下设置20 mm(MSI20)、30 mm(MSI30)和40 mm(MSI40)微喷定额,探究不同灌溉方式和微喷量对麦田土壤呼吸、农田生态系统净碳值和土壤碳排放效率的影响。结果表明,与FI处理相比,MSI处理均能降低小麦抽穗之前土壤的呼吸速率,提高灌浆阶段土壤的呼吸速率;ABI处理的灌溉量较低,其土壤呼吸速率整体偏低。各处理灌溉耗电碳排放量占生产资料碳排放总量的60.3%~75.8%,是灌溉农业投入中的主要碳源。与FI处理相比,MSI20和MSI30处理两年的平均小麦产量分别提高6.5%和8.1%,且在2022—2023年其麦田生态系统净碳值分别提高20.2%和15.5%,土壤碳排放效率分别提高9.4%和2.9%;虽然ABI处理获得相近甚至更高的农田生态系统净碳值和土壤碳排放效率,但其产量较FI处理降低5.1%~9.8%。随微喷量的提高,冬小麦的产量未显著增加,并且在灌浆中期降雨较多情况下,较高微喷量(2022—2023年MSI40处理)冬小麦的产量、麦田生态系统净碳值和土壤碳排放效率均显著降低。本试验条件下,综合考虑节水、减排、产量及环境效益,微喷灌定额20 mm是最优的灌溉管理模式。

关键词:小麦;灌溉方式;微喷灌;生产资料碳排放量;净碳值;碳排放效率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)03-0374-10

Effects of Different Irrigation Methods on Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field

YANG Mingda¹, ZHANG Suyu¹, HUANG Jie², LI Shuai¹, WANG Yumei¹, ZHENG Dongfang¹,
YANG Shenjiao³, LÜ Fangjie⁴, CHEN Jinping³, MA Shoutian³

(1. Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu, Henan 476000, China; 2. Nanyang Wancheng District
Agricultural Technology Extension Center, Nanyang, Henan 473000, China; 3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese
Academy of Agricultural Sciences/ Henan Province Field Scientific Observation and Research Station for Efficient Agricultural
Water Use/ Xinxiang Station, Chinese Agrosystem Long-Term Observation Network, Xinxiang, Henan 453003, China;

4. Shangqiu Rural Industry Development Center, Shangqiu, Henan 476000, China)

Abstract: To investigate the effects of different irrigation methods on the carbon balance of the wheat field ecosystem and to propose a water-saving, emission-reducing, and high-yield irrigation model suitable for wheat production in the North China Plain, three irrigation methods were set up: traditional surface irrigation(FI), alternate furrow irrigation(ABI), and micro-sprinkler irrigation(MSI), and three micro-sprinkler irrigation quotas of 20 mm(MSI20), 30 mm(MSI30), and 40 mm(MSI40) under the MSI conditions were set up to explore the impacts of different irrigation methods and micro-

收稿日期:2025-06-16

修回日期:2025-09-05

基金项目:国家小麦产业技术体系项目 03-20;河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站开放课题项目(FIRI2021040102);
河南省高等学校重点科研项目(23A210021)

第一作者 E-mail: yangmingda1020@163.com(杨明达)

通讯作者 E-mail: 1370972591@139.com(吕仿杰); mashoutian@caas.cn(马守田)

sprinkler irrigation quotas on soil respiration, net carbon value of the farmland ecosystem, and soil carbon emission efficiency in wheat fields. Compared with the FI treatment, the MSI treatments reduced soil respiration rate before heading stage but increased it during the grain-filling stage. The ABI treatment had a lower soil respiration rate due to the lower irrigation amount. The carbon emissions from irrigation power consumption accounted for 60.3% to 75.8% of the total carbon emissions from production materials of all treatments, being the main carbon source in irrigation agriculture inputs. Compared with the FI treatment, the average yields of the MSI20 and MSI30 treatments increased by 6.5% and 8.1%, respectively over the two years, and the net carbon value of the wheat field ecosystem was increased by 20.2% and 15.5%, respectively, and soil carbon emission efficiency was increased by 9.4% and 2.9% in 2022–2023, respectively. Although the ABI treatment achieved similar or even higher net carbon values of the wheat field ecosystem and soil carbon emission efficiency, its yield decreased by 5.1% to 9.8% when compared to that under FI treatment. Under micro-sprinkler irrigation conditions, the yield of winter wheat did not increase significantly with the increase of micro-sprinkler irrigation quota. Moreover, in the case of heavy rainfall during the middle of grain-filling stage, the yield, net carbon value of the wheat field ecosystem, and soil carbon emission efficiency with higher micro-sprinkler irrigation quota(MSI40 treatment in 2022–2023) were significantly reduced compared to other micro-sprinkler irrigation treatments. Under the conditions of this experiment, considering water conservation, emission reduction, yield, and environmental benefits, micro-sprinkler irrigation quotas of 20 mm is the best irrigation management model.

Keywords: Wheat; Irrigation methods; Micro-sprinkler irrigation; Carbon emissions of production materials; Net carbon value; Carbon emission efficiency

随着 CO₂ 等温室气体排放日益增长,全球气候变暖引起的粮食减产、干旱洪涝、病虫害等问题加剧发生,严重威胁全球农业的可持续发展^[1]。在此背景下,以固碳减排为目的的全球碳循环过程是学者研究和关注的热点主题。农田生态系统碳库是全球碳库的重要组成部分,农田碳库的收支与平衡在全球碳循环中发挥着重要作用^[2]。提升农田固碳能力和降低农业碳排放是实现农田生态系统固碳减排的两条主要途径^[3]。作为典型的人工复合生态系统,农田碳循环受农艺管理措施的影响极大,其中施肥和灌溉既是增加作物产量、生物量及提高固碳量的主要驱动因子,也是农业生产资料碳排放的重要来源^[4-5]。研究表明,人类活动产生的温室气体排放中约 1/3 与不合理的农田管理措施(如过量的水肥供应)密切相关^[6-7]。华北平原是中国粮食的主产区之一,未来该区域粮食产量的持续提升在很大程度上依赖高效施肥和节水灌溉技术的应用,而灌溉和施肥方式的改变势必会引起农田碳循环过程的变化。

水分和养分是限制华北平原冬小麦生产的关键因子。长期以来,该区域粗放的水肥管理方式(如大水漫灌、肥料地面撒施或一次性大量施肥)

不仅增产效果有限,还造成农业水资源严重浪费,并加剧氮素淋失和挥发等环境风险^[8-9]。水肥一体化技术通过将灌溉与施肥相结合,适时、适量、准确地将水肥输送到作物根部附近,可显著提高水肥利用效率^[10]。微喷灌水肥一体化是新研制和发展起来的一种基于喷灌和滴灌优点的先进灌溉技术,有显著的节水、节肥和增产效果^[11-13]。然而,在现阶段农业生产中,地面灌溉仍占主导地位,其中畦灌因灌水方便、工程设施简单、投资低、能耗低等优势^[14-15],仍具有不可替代的现实作用。隔畦交替灌溉是一种传统的节水灌溉技术,基于分根区交替供水原理,通过刺激作物根系生长,调节其在土壤中的分布和叶片气孔导度,降低无效蒸腾,并对作物生长具有一定的补偿作用,具备良好的节水潜力^[16]。不同灌溉方式通过改变水肥入渗及再分配过程,影响土壤水分和养分的时空分布,从而调控土壤理化特性及根际微生物学特性,影响根系及地上部植株生长发育,最终显著影响农田的碳排放和碳固存过程。国内外学者对不同灌溉方式下农田生态系统碳平衡已开展了大量研究^[3,5,17-19]。与漫灌相比,滴灌冬小麦农田生态系统净碳值可增加 25.4%^[5]。Mehmood 等^[19]研

究表明,与喷灌和畦灌相比,滴灌(土壤水分维持在田间持水量的60%)麦田土壤 CO_2 排放量降低7.5%~12.1%。现有研究主要集中于滴灌(露地滴灌、覆膜滴灌)、喷灌和沟灌等灌溉方式^[5,17],而对当前农业生产中应用较广泛的微喷灌研究较少^[20],缺乏微喷灌条件下不同灌溉量对农田碳平衡影响的系统对比研究。基于此,本研究以华北平原冬小麦为对象,系统比较传统地面灌溉、隔畦交替灌溉和微喷灌对麦田生态系统碳平衡的影响,以期为该区域构建高效、节水、低碳的冬小麦水肥管理模式提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年11月—2023年6月年在河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(34°34'N, 115°33'E)进行。试验站海拔55.6 m,年均气温13.9℃,无霜期180~230 d,年均蒸发量1 735 mm,年均降水量708 mm,小麦生育期内近30年的平均降水量为232.8 mm,仅占年降水量的32.9%。试验地土壤类型为潮土,成土母质为黄河冲积后的沉淀物,0~30 cm土层平均土壤容重 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量为25.5%(质量含水量)。2021年冬小麦播前耕层土壤全氮、有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量分别为 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $14.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $87.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $137.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冬小麦生育期间的气温和降水量如图1所示,2021—2022年和2022—

2023年冬小麦生长季的有效降水量分别为35.2和220.0 mm。

1.2 试验设计

试验设置3种灌溉方式:传统地面灌溉(FI)、隔畦交替灌溉(ABI)和微喷灌(MSI)。微喷灌条件下设置(20、30和40 mm)3种微喷定额,分别记为MSI20、MSI30和MSI40。共5个处理,每处理3次重复,共15个小区。小区面积 90 m^2 (6 m×15 m),小区间设1.5 m宽隔离带且不灌溉。FI和ABI处理的灌水定额为70 mm,分别在拔节期和开花期进行灌溉(FI和ABI灌溉定额分别为140和70 mm)。ABI处理每小区设4畦,畦宽1.5 m,隔1畦灌溉1畦,依次交替灌溉。MSI20、MSI30和MSI40处理分别在拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期进行灌溉,灌溉定额分别为80、120和160 mm。微喷带参数:内径48.3 mm,喷洒半径1.0~1.2 m,7孔,每小区铺设3条。各小区内设置空白微区(40 cm×40 cm),以40 cm×40 cm×50 cm的镀锌板框隔离周围根系,空白微区不播种小麦。

供试冬小麦品种为商麦167,两年分别于2021年11月7日和2022年10月18日播种,均于次年的6月2日收获。播量分别为300和 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2021年因播期推迟适当增加播量)。播种前随整地施入复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=20:17:17$) $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。ABI和FI处理在拔节期采用人工追氮 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,MSI各处理在拔节期、开花期和灌浆期通过水肥一体化方式等

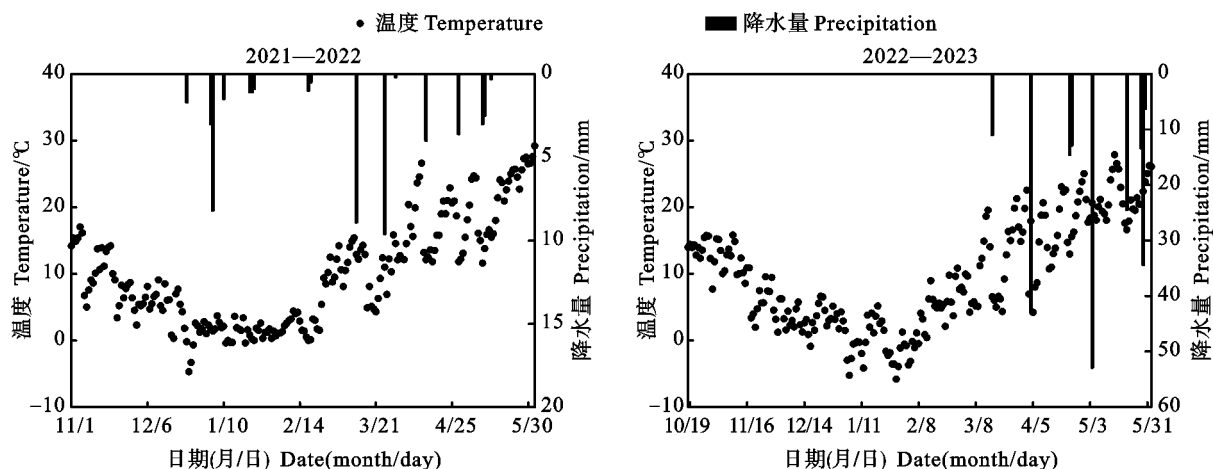


图1 2021—2023年试验区冬小麦生育时期的降水量和日均气温

Fig. 1 Precipitation and daily average temperature at the experiment site during the winter wheat growing season of 2021—2023

量追氮 30 kg · hm⁻²,适时喷洒农药以控制杂草和病虫害。各空白微区内,施肥及其他管理措施均与其所在小区一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤呼吸速率、根系呼吸速率及土壤呼吸碳排放测定

采用静态钠石灰吸收法^[5,21]测定土壤呼吸碳排放量。测定前将直径 16 cm,高 25 cm 的 PVC 管插入小麦行间及空白微区土壤中,管内放置铁架。称取 40 g 钠石灰(105 ℃烘 24 h)置于培养皿中润湿,放入 PVC 管内密封。测定结束后于 105 ℃烘 24 h 后称重,按公式(1)计算土壤日呼吸速率及土壤微生物日呼吸速率,根系日呼吸速率用差值法计算。农田系统土壤碳排放总量按公式(2)计算。分别在 2022 年 3 月 1 日和 2023 年 3 月 5 日起每隔 7 d 测定 1 次麦田土壤呼吸。试验期间不定期清理 PVC 管内的活体植物。

$$SR = \frac{(W_2 - W_1)}{A} \times 1.69 \tag{1}$$

$$GWP_{\text{EXPORT}} = \sum(SR_i + SR_{i+1}) / 2 \times \Delta t \times 0.272 \times B \tag{2}$$

式中,SR 为土壤呼吸速率(g · m⁻² · d⁻¹);W₂ 为反应后钠石灰加培养皿质量(g);W₁ 为反应前钠石灰加培养皿质量(g);A 为 PVC 管罩住土壤的面积(m²);1.69 为钠石灰吸收二氧化碳生成的水被烘干质量差校正系数;GWP_{EXPORT} 为麦田碳排放总量(kg · hm⁻²);(SR_i + SR_{i+1})/2 为前后两次土壤呼吸速率测定的平均值;Δt 为前后两次土壤呼吸测定的时间间隔;0.272 为 CO₂ 转换为 C 的系数;B 为单位换算系数。

1.3.2 生物固碳量测定

自返青期开始,每隔 15 d 在小区选取 50 cm 双行采集地上部分,根系冲洗干净后于 105 ℃下杀青 0.5 h,80 ℃下烘干至恒重并称重,换算成单位面积生物量。冬小麦各测定时期的固碳量按以下公式计算^[22]:

$$CS = BW \times 0.45 \tag{3}$$

式中,CS 为生物固碳量,BW 为冬小麦的生物量,0.45 为冬小麦 C 的当量值。

1.3.3 农业生产资料碳排放量测定

农业生产资料碳排放量为冬小麦种植过程中某一生产资料的消耗量与碳排放参数的乘积。不同农业资料的碳排放参数如表 1 所示,本研究中微喷带的碳排放参数以滴灌带的碳排

放参数计算。

表 1 不同农业资料的碳排放参数
Table 1 Index of carbon emission of different materials for agricultural production

项目 Item	碳排放参数 Index of carbon emission	参考文献 Reference
N	1.74 kg · kg ⁻¹	[23]
P ₂ O ₅	0.20 kg · kg ⁻¹	[24]
K ₂ O	0.15 kg · kg ⁻¹	[24]
除草剂 Herbicide	6.30 kg · kg ⁻¹	[24]
杀虫剂 Pesticide	5.10 kg · kg ⁻¹	[24]
灭菌剂 Bactericidal agent	3.90 kg · kg ⁻¹	[24]
柴油 Diesel	0.94 kg · kg ⁻¹	[24]
电能 Electric energy	1.14 kg · kW ⁻¹ · h ⁻¹	[25]
小麦种子 Wheat seeds	0.11 kg · kg ⁻¹	[26]
微喷带 Micro-sprinkling hose	0.85 kg · kg ⁻¹	[5]
每一人力 Every labor	0.24 kg · d ⁻¹	[5]

1.3.4 净碳值计算

净碳值(NCV)按以下公式计算^[5]:

$$NCV = GWP_{\text{NPP}} - GWP_{\text{EXPORT}} - GWP_{\text{INDIRECT}} \tag{4}$$

式中,NCV 指净碳值,当 NCV>0 时,农田生态系统为固碳;NCV<0 时,此系统为排碳;GWP_{NPP} 指作物生长量的固碳量(包括籽粒和秸秆根系等);GWP_{EXPORT} 指土壤呼吸排出碳量;GWP_{INDIRECT} 指各种农业生产资料间接碳排放总量(化肥、农药、种子、灌溉、人力、畜力等)。

1.3.5 产量测定

成熟期每个小区选取 1 m²(1 m×1 m)无人为干扰的样方进行收割,晾晒脱粒计产(籽粒含水率折算为 13.0%)。

1.3.6 农田碳排放效率计算

农田排放效率(CE)指作物生长期间土壤每排放 1 kg 碳所生产的籽粒产量,按以下公式计算:

$$CE = \frac{Y}{GWP_{\text{EXPORT}}} \tag{5}$$

式中,Y 为作物产量(kg · hm⁻²)。

1.4 数据处理

用 SPSS17.0 统计分析软件进行方差分析和多重比较,使用 SigmaPlot14.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式对冬小麦固碳量的影响

不同灌溉方式显著影响冬小麦的固碳量(图

2 和图 3)。各处理下冬小麦的固碳量随着生育进程的推进而增加,返青到抽穗期 FI 处理最高,MSI40 和 MSI30 处理次之,MSI20 和 ABI 处理较低。开花到成熟期,MSI40(2021—2022 年)和 MSI30(2022—2023 年)处理的冬小麦固碳量逐渐高于 FI 处理,并且随着时间的推移,两处理间的差异越来越大。2021—2022 年,成熟期 MSI40 处理固碳量最高,FI 处理次之,ABI 处理最低(图

3);与 FI 处理相比,MSI40 处理固碳量增加 1.8%,MSI20 和 ABI 处理分别显著降低 6.8%和 9.8%;MSI20 和 ABI 处理较 MSI40 分别显著降低 8.7%和 11.3%。2022—2023 年,成熟期 MSI30 处理固碳量最高,MSI20 处理次之,ABI 处理最低;MSI30 和 MSI20 处理较 FI 处理固碳量分别增加 5.4%和 1.7%,较 ABI 处理分别显著增加 14.0%和 10.1%。

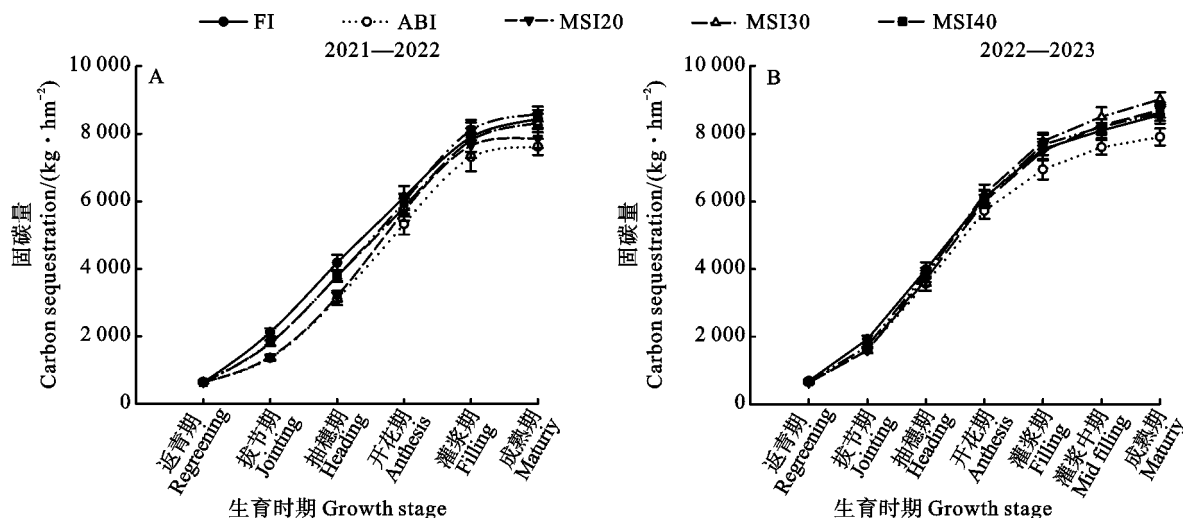


图 2 不同灌溉方式对冬小麦固碳量的影响

Fig. 2 Influence of different irrigation methods on carbon sequestration of winter wheat

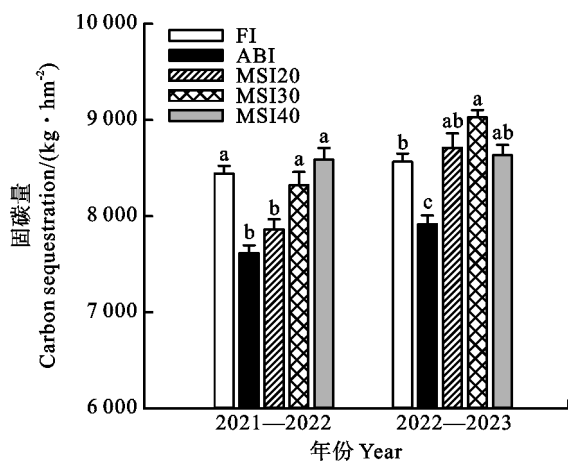


图 3 不同灌溉方式对成熟期冬小麦固碳量的影响

Fig. 3 Influence of different irrigation methods on carbon sequestration of winter wheat at maturity

2.2 不同灌溉方式对麦田土壤、根系和微生物呼吸的影响

两个生长季各处理土壤呼吸速率、微生物呼吸速率和根系呼吸速率随生育期的推进均呈波动上升趋势(图 4)。抽穗之前(2021—2022 年播种后 115 d 至 143 d 及 2022—2023 年 145 d 至 172

d),FI 处理的平均土壤呼吸速率最高,MSI40 处理次之,ABI 处理最低。2021—2022 年 FI 处理的平均土壤呼吸速率较 ABI、MSI20 和 MSI30 处理分别提高 15.2%、16.8%和 11.4%,2022—2023 年分别提高 26.6%、11.4%和 10.9%。在灌浆中后期(2021—2022 年播种后 178 d 至 198 d 及 2022—2023 年播种后 201 d 至 228 d),微喷处理的土壤呼吸速率均高于 FI 处理。在 2021—2022 年 MSI40 处理大多数测定时段的土壤呼吸速率最高,MSI30 处理次之,ABI 处理最低;在 2022—2023 年,MSI30 处理土壤呼吸速率最高,MSI20 处理次之,ABI 处理最低。两个生长季微喷处理的平均土壤呼吸速率较 FI 处理增加 7.3%~21.3%。

两个生长季各处理的微生物呼吸速率和根系呼吸速率的变化趋势与土壤呼吸速率的变化趋势相似。整个测定时段 MSI40 处理的平均微生物呼吸速率最高,FI 处理次之,ABI 处理最低。抽穗之前,各灌溉处理的平均微生物呼吸速率仍以 MSI40 最高,FI 处理次之。2021—2022 年 FI 处理的平均微生物呼吸速率较 ABI、MSI20 和 MSI30 处理分别提高 22.0%、22.2%和 10.8%,

2022—2023 年分别提高 21.0%、7.1%和 6.9%。在灌浆中后期,高微喷量处理(MSI30 和 MSI40)的微生物呼吸速率均高于 FI 处理。2022—2023 年,微喷处理的平均微生物呼吸速率较 FI 处理提高 6.9%~17.8%。2021—2022 年,MSI40 处理平均根系呼吸速率最高,MSI30 处理次之,MSI30 与 FI 处理间的差异较小,ABI 处理最低。2022—2023 年微喷处理平均根系呼吸速率较 FI 处理提高 5.0%~12.1%。抽穗之前,各灌溉处理的平均根系呼吸速率以 FI 处理最高,MSI40 处理次

之,ABI 处理最低。在灌浆中后期,高微喷量处理(MSI30 和 MSI40)的微生物呼吸速率均高于 FI 处理。2021—2022 年,MSI30 和 MSI40 处理平均根系呼吸速率较 FI 处理分别提高 10.8%和 11.9%。2022—2023 年,微喷处理平均根系呼吸速率较 FI 处理增加 12.0%~30.6%。微喷灌(尤其是较高灌水量)降低了生育前期平均土壤呼吸速率、微生物呼吸速率、根系呼吸速率,但增加了灌浆中后期的土壤呼吸速率、微生物呼吸速率和根呼吸速率。

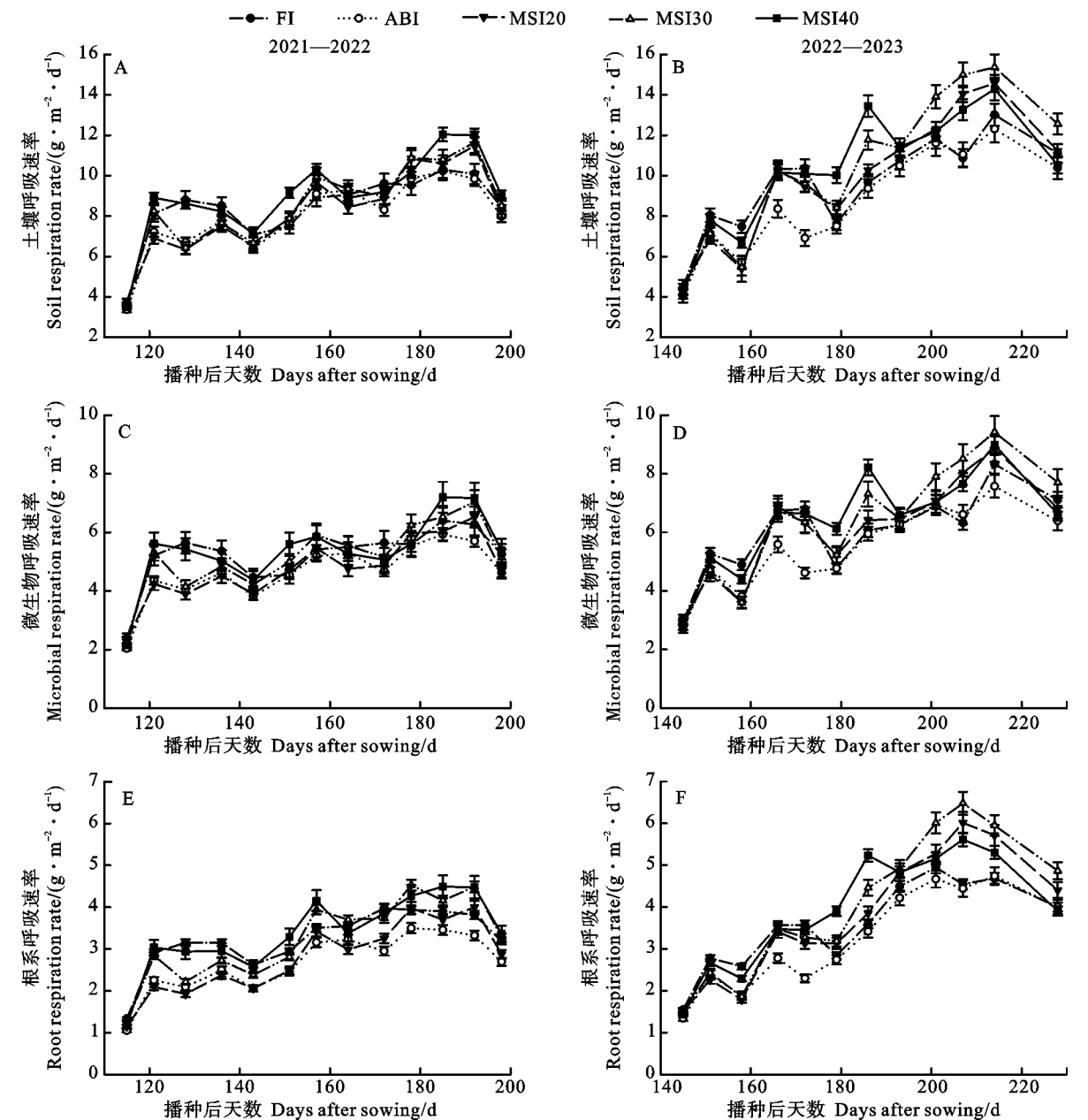


图 4 不同灌溉方式对 2021—2022 年和 2022—2023 年冬小麦土壤呼吸速率、微生物呼吸速率、根系呼吸速率的影响
Fig. 4 Influence of different irrigation methods on soil respiration rate, microbial respiration rate, and root respiration rate of winter wheat from 2021 to 2022 and 2022 to 2023

2.3 不同灌溉方式对冬小麦生产资料碳排放量的影响

不同处理冬小麦生产资料碳排放量的差异主要体现在灌溉耗电、微喷带和人力碳排放量上(表 2)。各处理生产资料碳排放源均以灌溉耗电碳排放量最高,占生产资料碳排放量的 60.3%~75.8%。两个生长季冬小麦生产资料碳排放量均以 MSI40 处理最高,为 2 336~2 474 kg·hm⁻²,

其次为 FI 处理,ABI 处理由于较低的灌溉量致使其生产资料碳排放总量最低。与 FI 处理相比,MSI20、MSI30 处理虽然增加微喷带碳排放量,但降低了灌溉耗电和人力碳排放量,最终其生产资料碳排放总量分别降低 28.2%~29.6%和 8.2%~10.4%。可见,MSI20、MSI30 和 ABI 处理较 FI 处理相比均能减少冬小麦生产资料碳排放总量。

表 2 不同灌溉方式对冬小麦生产资料碳排放量的影响

Table 2 Influence of different irrigation methods on carbon emission of different materials for winter wheat production

kg·hm⁻²

年份 Year	处理 Treatment	种子 Seed	化肥 Chemical fertilizer	农药 Pesticide	整地 Soil preparation	播种 Sowing	收获 Harvest	灌溉耗电 Irrigation power consumption	微喷带 Micro- sprinkling hose	人力 Labor	合计 Total
2021—2022	FI	33.0	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 596	0	3.18	2 122
	ABI	33.0	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	798	0	2.31	1 323
	MSI20	33.0	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	912	56.7	0.96	1 493
	MSI30	33.0	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 368	56.7	1.20	1 949
	MSI40	33.0	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 824	56.7	1.44	2 405
2022—2023	FI	20.6	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 596	0	3.18	2 110
	ABI	20.6	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	798	0	2.31	1 311
	MSI20	20.6	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	946	56.7	0.96	1 514
	MSI30	20.6	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 322	56.7	1.20	1 891
	MSI40	20.6	401.1	3.42	38.3	10.6	36.6	1 767	56.7	1.44	2 336

2.4 麦田土壤碳累计排放量及碳平衡

不同灌溉处理对麦田土壤呼吸碳排放量的影响存在差异(图 5A)。两个生长季麦田土壤呼吸碳排放量以 MSI30 或 MSI40 处理最高,均以 ABI 处理最低;FI 处理土壤呼吸碳排放量低于 MSI30 和 MSI40 处理,但处理间的差异不显著;MSI20 处理(2021—2022 年)土壤呼吸碳排放量显著低于 MSI40 处理。不同灌溉处理的麦田生态系统净碳值均为正值,说明不同灌溉方式下农田生态系统均表现为大气 CO₂ 的碳“汇”(图 5B)。两个生长季麦田生态系统净碳值均以 MSI20 处理最高,以 ABI(2021—2022 年)或 MSI30(2022—2023 年)处理次之,MSI40 处理最低。2021—2022 年,FI、ABI、MSI20 和 MSI30 处理间麦田生态系统净碳值的差异不显著,但比 MSI40 处理显著提高 6.5%~9.2%。2022—2023 年,MSI20、MSI30 和 ABI 处理间麦田生态系统净碳值的差异不显著,但较 FI 处理分别显著提高 20.2%、15.5%和 12.4%,较 MSI40 处理分别显著提高 26.4%、21.4%和 18.2%。随着微喷量的提高,麦田土壤呼吸碳排放量呈增加趋势,净碳值则表

现出相反趋势。这表明,MSI20 和 MSI30 均能够增加麦田生态系统净碳值,其中 MSI20 处理表现更优。

2.5 不同灌溉方式对冬小麦产量和麦田碳排放效率的影响

籽粒产量是除了农田土壤碳排放总量外影响农田碳排放效率的另一个重要因素。不同灌溉方式显著影响冬小麦的籽粒产量(图 6A)。2021—2022 年冬小麦产量以 MSI40 处理最高,微喷处理间和微喷处理与 FI 处理间的差异均不显著;微喷处理和 FI 处理较 ABI 处理冬小麦产量分别显著提高 10.0%~15.7%和 9.8%。2022—2023 年冬小麦产量以 MSI20 处理最高,MSI30 处理次之,两处理均显著高于 FI、ABI 和 MSI40 处理;ABI 处理冬小麦产量较 FI 处理降低 5.1%。MSI20 和 MSI30 处理两年的平均产量分别较 FI 处理提高 6.5%和 8.1%。不同灌溉处理的碳排放效率在两个生长季表现存在差异(图 6B)。2021—2022 年,麦田碳排放效率以 MSI30 处理最高,MSI20 处理次之,ABI 处理最低,但不同处理间的差异均未达到显著水平。2022—2023 年,

MSI20 处理的麦田碳排放效率最高,显著高于 MSI40;与 FI 处理相比,MSI20 和 MSI30 处理碳排放效率分别提高 9.4%和 2.9%,但差异均不显

著。MSI20 和 MSI30 处理均能提高冬小麦的产量,并获得较高的麦田碳排放效率,其中 MSI20 处理表现更优。

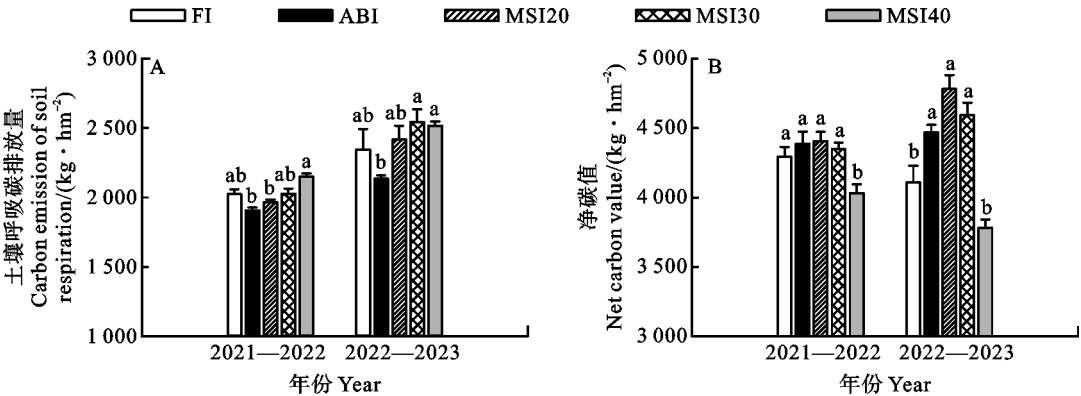


图 5 不同灌溉方式对麦田土壤呼吸碳排放量(A)和净碳值(B)的影响
Different lowercase letters on the columns indicate significant differences among different treatments. The same in figure 6.

图 5 不同灌溉方式对麦田土壤呼吸碳排放量(A)和净碳值(B)的影响
Influence of different irrigation methods on carbon emissions of soil respiration in wheat field(A) and net carbon value(B)

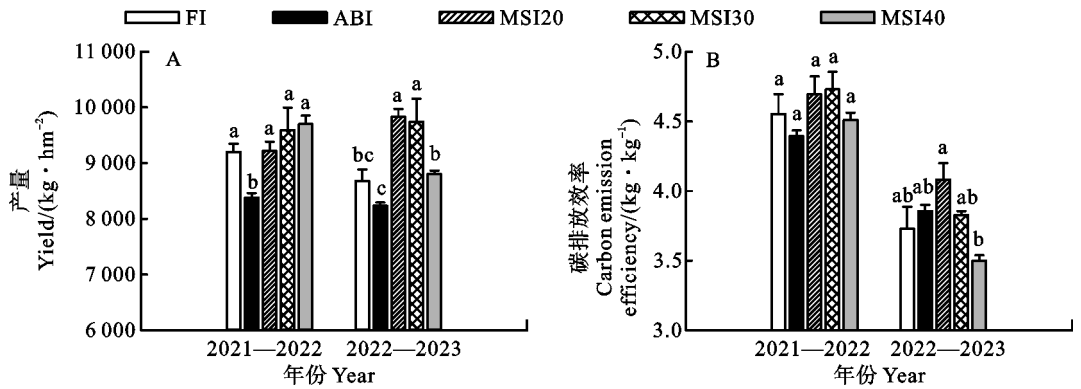


图 6 不同灌溉方式对冬小麦产量(A)和碳排放效率(B)的影响
Fig. 6 Influence of different irrigation methods on yield of winter wheat(A) and carbon emission efficiency(B)

3 讨论

3.1 不同灌溉方式对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是农田生态系统碳循环的重要环节,也是土壤碳库输出的重要途径^[27]。研究表明,少量多次灌溉可改善土壤水热状况及物理性质^[20],增强土壤微生物活性和根系代谢,从而提高土壤呼吸速率,加速有机质的分解^[17];而常规地面灌溉由于单次灌溉量较大,易引起土壤板结,从而导致气体扩散受阻,抑制土壤根系活动和微生物活性,不利于土壤呼吸^[28]。本研究结果显示,微喷灌总体上提高了土壤呼吸速率,与前人关于滴灌(覆膜地灌)、微喷灌、沟灌等节水灌溉方式的研究结果一致^[5,17,20]。节水灌溉技术在提高根系呼吸的同时由于其较强的根系活性也会促进对水肥的吸收利用,对作物生长有利。与 FI 处理相

比,MSI 处理降低抽穗期之前土壤呼吸速率,但提高生育后期土壤呼吸速率。在抽穗期之前,FI 处理因灌溉量较大,土壤水分条件较好,微生物和根系活性较强,土壤呼吸速率相对较高;而进入抽穗期后,MSI 处理通过少量多次灌溉形成更稳定的土壤水分环境,且灌浆期温度条件适宜,为土壤微生物和植物根系创造了更适宜的生长环境,有利于提高土壤呼吸速率^[29]。本研究中,MSI30 和 MSI40 处理的生物固碳量随着生育时期的推进逐渐超过 FI 处理也可以间接支持上述观点。干湿交替有利于促进土壤呼吸的进行^[30]。然而,本研究结果显示,ABI 处理的土壤呼吸速率、根系呼吸速率和微生物呼吸速率均低于 FI 处理。这可能是因为,ABI 处理的灌溉量远低于 FI 处理 (ABI 处理灌溉总量为 FI 处理的一半),并且,灌水频率也较低(生育期间 2 次),由此引起的干旱

胁迫导致植株地上和地下部分生长受到抑制,根系活动及微生物活性受限^[17]。此外,本研究发现,随着微喷量的增加,土壤呼吸速率、根系呼吸速率和微生物呼吸速率基本均呈上升趋势。由此可见,适度限水的微喷灌溉有助于在满足作物生长需求的同时,避免过度激发土壤呼吸,从而降低CO₂排放风险。

3.2 不同灌溉方式对麦田生态系统碳平衡的影响

实现农田的固碳减排需同步提升农田固碳能力并降低碳排放强度^[3]。本研究在计算农田生态系统净碳值时,综合考虑了生物固碳、土壤呼吸碳排放以及农业生产资料的间接碳排放。结果显示,各处理的麦田生态系统净碳值均为正值,说明冬小麦田为大气CO₂的“汇”。不同灌溉方式对麦田碳平衡的影响具有明显差异。2021—2022年MSI40处理及2022—2023年MSI20和MSI30处理的固碳量均高于FI处理,说明适宜的微喷灌溉有助于提升小麦生物量积累和农田固碳能力。本研究对麦田生产资料碳排放量的分析得出,灌溉耗电碳排放是灌溉农业中生产资料碳排放的最大来源,这与前人的研究结果一致^[31]。因此,通过优化灌溉方式和灌水定额,减少用电投入,是提升农田净碳吸收能力,实现高产低碳农业的重要途径^[31]。本研究中,MSI20、MSI30和ABI处理在2022—2023年生长季的净碳值均显著高于FI处理。ABI处理虽然降低了生物固碳量,但由于其灌溉量较低,其生产资料碳排放量和土壤呼吸排碳量同步下降,最终净碳值仍有所提高。2022—2023年,与FI处理相比,MSI20和MSI30处理在大幅度降低生产资料碳排放量(降幅10.4%~28.2%)的同时并未显著增加土壤碳排放量,且生物固碳量小幅度增加(增幅1.7%~5.4%),最终使麦田生态系统净碳值提高15.5%~20.2%。这表明,低灌溉量微喷灌在固碳与减排之间实现了更优平衡。

3.3 不同灌溉方式对土壤碳排放效率的影响

土壤碳排放效率是作物产量与土壤碳排放量综合作用的结果,能够较好地反映田间生态系统的经济效益与环境效益^[27]。由此,同时兼顾作物产量及生长季的经济-环境效益是当前全球气候变暖背景下实现可持续发展农业的重要举措。微喷灌能够实现作物增产已被大多数研究证实^[11-13]。本研究下,MSI20和MSI30处理两个生长季冬小麦产量较FI处理均不同程度地提高,其

中2022—2023年差异达到显著水平。尽管微喷灌在一定程度上提高了土壤呼吸碳排放量,但产量增幅更为显著,因此其碳排放效率整体优于FI处理。本研究还发现,随着灌溉量的提高,冬小麦的产量未能持续增加,其中在2022—2023年MSI40处理的产量显著降低。这主要是因为2022—2023年小麦生长季灌浆中后期降雨量较大(5月10日后降雨量为78.6 mm),较高的灌溉量(MSI40处理)会导致土壤孔隙含水率较大,形成的厌氧环境抑制根系微生物活性影响土壤呼吸^[32],同时增加倒伏风险,从而不利于干物质向籽粒的积累,最终会影响产量和碳排放效率的提高。综合产量、净碳值和碳排放效率的变化特征可以看出,适度的限水微喷灌溉更有利于兼顾稳产、节水与减排目标。在本研究条件下,MSI20处理能够获得与MSI30处理相当的产量、麦田生态系统净碳值和碳排放效率,同时节约灌溉水40 mm,其经济-环境效益更优。

参考文献:

- [1] ZHAO C, LIU B, PIAO S L, *et al.* Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(35): 9326.
- [2] 郭树芳, 齐玉春, 董云社, 等. 滴灌对农田土壤CO₂和N₂O产生与排放的影响研究进展[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(11): 2757.
- [3] GUO S F, QI Y C, DONG Y S, *et al.* Response of production and emission of CO₂ and N₂O of agricultural soil to drip irrigation [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11): 2757.
- [4] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 301.
- [5] ZHANG Z X, LI T C, QI Z J, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 301.
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623.
- [7] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 749.
- [8] NIU H S, LI D P, ZHANG N, *et al.* Effect of irrigation modes on carbon budget in winter wheat field [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 749.
- [9] JACINTHE P A, LAL R. Nitrogen fertilization of wheat residue affecting nitrous oxide and methane emission from a central Ohio Luvisol [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(6): 338.
- [10] SCHEER C, WASSMANN R, KIENZLER K, *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in annual and perennial land-use systems of the irrigated areas in the Aral Sea Basin [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2454.
- [11] 杨慧敏, 杨云马, 黄少辉, 等. 优化施肥对小麦-玉米轮作体系产量、养分平衡与生态环境效益的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 699.
- [12] YANG H M, YANG Y M, HUANG S H, *et al.* Effects of optimized fertilization on yield, nutrient balance, and eco-environmental benefits in a wheat-maize rotation system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 408: 137485.

- ronmental benefits in wheat-maize rotation system [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(5): 699.
- [9] JU X T, XING G X, CHEN X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041.
- [10] 郭培武, 赵俊晔, 石玉, 等. 水肥一体化对小麦水分利用和光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1170.
- GUO P W, ZHAO J Y, SHI Y, *et al.* Effects of water-fertilizer integration on water use and photosynthetic characteristics of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1170.
- [11] 张英华, 张琪, 徐学欣, 等. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 88.
- ZHANG Y H, ZHANG Q, XU X X, *et al.* Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 88.
- [12] LI J P, WANG Y Q, ZHANG M, *et al.* Optimized micro-sprinkling irrigation scheduling improves grain yield by increasing the uptake and utilization of water and nitrogen during grain filling in winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 59.
- [13] LI J P, WANG Z M, YAO C S, *et al.* Micro-sprinkling irrigation simultaneously improves grain yield and protein concentration of winter wheat in the North China Plain [J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1397.
- [14] 史学斌, 马孝义, 聂卫波, 等. 地面灌溉的研究现状与发展趋势[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(1): 34.
- SHI X B, MA X Y, NIE W B, *et al.* Research status and trend of surface irrigation [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2005, 16(1): 34.
- [15] 马尚宇. 不同畦长和畦宽灌溉对小麦耗水特性和产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 8.
- MA S Y. Effect of field border length and width for irrigation on water consumption characteristics and yield of wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014: 8.
- [16] 张盼峰, 汪江涛, 焦念元, 等. 轮耕与隔畦灌溉对麦玉两熟作物生长和水分利用效率的影响[J]. *作物杂志*, 2013(6): 118.
- ZHANG P F, WANG J T, JIAO N Y, *et al.* Effects of rotational tillage and alternate border irrigation on crops growth and water use efficiency of wheat-maize double crops [J]. *Crops*, 2013(6): 118.
- [17] 王雯, 张雄. 不同灌溉方式对陕北沙区马铃薯农田生态系统碳平衡的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(2): 194.
- WANG W, ZHANG X. Effects of different irrigation methods on carbon balance of potato cropland ecosystem in sandy region of Northern Shaanxi [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 194.
- [18] 张忠学, 薛里, 李铁成, 等. 水氮耦合下黑土区稻田生态系统碳源汇效应分析[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 330.
- ZHANG Z X, XUE L, LI T C, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on carbon source and sink of paddy ecosystem in black soil area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 330.
- [19] MEHMOOD F, WANG G S, GAO Y, *et al.* Impacts of irrigation managements on soil CO₂ emission and soil CH₄ uptake of winter wheat field in the North China Plain [J]. *Water*, 2021, 13(15): 1.
- [20] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1880.
- GUO S F, QI Y C, YIN F H, *et al.* Effect of irrigation patterns on soil CO₂ and N₂O emissions from winter wheat field in North China Plain [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1880.
- [21] 段青松, 何丙辉, 秦向东, 等. 不同产业沼气作物农田净生态系统生产力和水分利用效率比较[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 265.
- DUAN Q S, HE B H, QIN X D, *et al.* Comparison of net ecosystem productivity of farmland and water use efficiency among different industrial biogas crops [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 265.
- [22] 陈绍民, 杨硕欢, 张保成, 等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 229.
- CHEN S M, YANG S H, ZHANG B C, *et al.* Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 229.
- [23] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239.
- LU F, WANG X K, HAN B, *et al.* Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239.
- [24] LAL R. Carbon emission from farm operations [J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981.
- [25] CHEN X H, MA C C, ZHOU H M, *et al.* Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001 — 2018 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 172: 105661.
- [26] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1-3): 217.
- [27] 杨学慧, 于爱忠, 柴健, 等. 绿肥还田结合减氮对麦田土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(1): 61.
- YANG X H, YU A Z, CHAI J, *et al.* Effects of green manure incorporation combined with nitrogen fertilizer reduction on soil respiration and its temperature sensitivity in regard to wheat fields [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 61.
- [28] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 77.
- ZHANG Q B, YANG L, SUN B, *et al.* Respiration characteristics of cotton soil under irrigation and fertilization measures in arid region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 77.
- [29] NING D F, ZHANG Y Y, QIN A Z, *et al.* Interactive effects of irrigation system and level on grain yield, crop water use, and greenhouse gas emissions of summer maize in North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 864: 9.
- [30] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 140.
- YANG S H, WANG Y J, XU J Z, *et al.* Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8): 140.
- [31] 李玲, 李亚杰, 张永杰, 等. 不同水氮管理措施下复播大豆农田碳平衡[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3673.
- LI L, LI Y J, ZHANG Y J, *et al.* Carbon balance of summer soybean cropland under different irrigation and nitrogen fertilizer regimes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3673.
- [32] 王晓娇, 蔡立群, 齐鹏, 等. 施肥措施对旱地农田土壤 CO₂ 排放和碳库管理指数的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(2): 32.
- WANG X J, CAI L Q, QI P, *et al.* Effects of alternative fertilizer options on soil CO₂ emission and carbon pool management index in a dryland soil [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 32.