

灌水量与灌水方式对夏玉米土壤CO₂排放和产量的影响

杨乐^{1,2}, 曹辉^{1,2}, 付媛媛¹, 高阳^{1*}, 刘战东¹

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100082)

摘要:【目的】探寻灌水量和灌水方式对夏玉米农田土壤CO₂排放及产量的影响, 提出节水稳产减排的灌溉管理措施。【方法】设置常规滴灌(DI)和交替滴灌(ADI)2种灌水方式, 灌水量设置为36 mm和27 mm, 共4个处理, 分别记为36DI、27DI、36ADI、27ADI。采用Li-8100A测定土壤CO₂排放通量, 研究灌水量和灌水方式对玉米农田土壤CO₂排放通量、累积排放量、土壤酶活性和玉米产量的影响, 分析土壤CO₂排放与土壤充水孔隙度(WFPS)和土壤温度的关系。【结果】与DI处理相比, ADI处理土壤CO₂累积排放量显著降低12%~17%。36 mm灌水量处理CO₂累积排放量较27 mm灌水量处理增加, 但增加幅度受灌水方式影响。土壤CO₂排放通量与0~10 cm的WFPS、土壤温度及其交互作用间存在显著相关关系。灌水量与灌水方式通过影响WFPS、土壤温度来改变土壤酶活性, 是其影响土壤CO₂排放的调控机制之一。灌水量、灌水方式及其交互作用显著影响玉米产量。27ADI处理的产量较36DI处理降低8.7%, 但CO₂累积排放量减少19%。【结论】27ADI处理在保证玉米产量同时减少了玉米生育期内的土壤CO₂累积排放量, 是一种节水稳产减排的灌水模式。

关键词: 夏玉米; 交替滴灌; CO₂ 排放; 土壤酶活性; 产量

中图分类号: S274; S145

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023027

OSID:



杨乐, 曹辉, 付媛媛, 等. 灌水量与灌水方式对夏玉米土壤 CO₂ 排放和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 31-39, 73.

YANG Le, CAO Hui, FU Yuanyuan, et al. The Effects of Irrigation Amount and Method on Soil CO₂ Emission and Yield of Summer Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 31-39, 73.

0 引言

【研究意义】全球变暖的主要原因是温室气体排放量增加^[1], 其中 CO₂ 的贡献率约占 60%, 在温室气体排放中占据重要地位^[2]。据统计, 每年农田土壤向大气排放 5%~20% 的 CO₂, 是温室气体排放的主要碳源^[3]。中国是农业大国, 全国温室气体排放量的 24% 来自农业系统^[2], 不合理的农田管理措施是造成温室气体排放重要原因。黄淮海平原是我国的粮食主产区之一, 目前大部分地区仍采用传统的农田灌溉方式, 不仅浪费水资源, 还可能因灌溉量过多造成土壤固碳能力下降, 导致土壤肥力下降、作物减产等^[4-5]。滴灌是干旱区节水稳产的主要灌溉方式, 在达到高效节水并高产目标的同时还可降低温室气体排放^[6-7]。因此, 了解灌水量和灌溉方式如何影响温室气体排放对减缓温室气体的排放具有重要意义。【研究进展】不

同灌溉管理措施显著影响土壤碳排放和作物产量, 灌水量和灌溉措施通过影响土壤理化性质(土壤孔隙、有机质、温度等)、微生物数量以及活性、土壤水肥运移过程等, 进而影响土壤 CO₂ 排放和作物产量^[8-10]。减少灌溉水量有可能通过优化土壤中的氮和碳周转过程来减少土壤碳排放。Faisal 等^[11]对小麦进行灌溉制度和灌水方式的研究中发现, 2 a 试验期间低灌水量处理比高灌水量处理降低 7%~24% 的 CO₂ 全球增温潜势。郭乙霏等^[12]研究表明, 减少灌水量显著降低了玉米农田土壤 CO₂ 排放, 但是 Kumar 等^[13]、陈慧等^[14]研究中未发现减少灌水量会显著减少土壤 CO₂ 排放。另外, 交替灌溉也被认为可显著降低土壤碳排放^[15-16], 但 Kruse 等^[17]并未发现干湿交替灌溉对土壤 CO₂ 排放有显著影响。韩昌东等^[18]指出干湿交替灌溉对土壤 CO₂ 排放的影响与灌水下限有关, 灌水下限为 20 kPa 时, 干湿交替灌溉会促进土壤 CO₂ 排放。此外, 灌水量的增加也可能对作物产量产生不同的影响。张富仓等^[19]、唐诚等^[20]研究发现高灌水量显著增加了玉米产量和产量构成要素, 然而, 张丽华等^[21]认为提高灌水量对玉米产量无显著影响。高翠民等^[22]指出适当减少灌水量可促进玉米高产。在水肥一体化的研究中, 刘永贤等^[23]发现, 在相同施肥水平下, 交替滴灌较常

收稿日期: 2023-01-29 修回日期: 2023-07-27 网络出版日期: 2023-11-16
基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02); 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP)

作者简介: 杨乐(1999-), 女。硕士研究生, 主要从事非充分灌溉研究。
E-mail: Leyang625@163.com

通信作者: 高阳(1978-), 男。研究员, 主要从事作物-水分关系研究。
E-mail: gaoyang@caas.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

规滴灌显著提高了糯玉米产量 13.23%~18.53%。而在防雨条件下,黄鹏飞等^[24]研究发现,交替地下滴灌有助于保持玉米高产。【切入点】因此,灌水量和灌水方式对土壤 CO₂ 排放和玉米产量的影响机制还需进一步探讨。【拟解决的关键问题】为此,本试验于 2021 年在中国农业科学院新乡综合试验基地防雨棚下以夏玉米作为研究对象进行灌溉试验,在 2 种灌水定额(27 mm 和 36 mm)下研究不同滴灌方式(常规滴灌 DI 和交替滴灌 ADI)对土壤 CO₂ 排放的影响,研究结果可为制定绿色节水稳产的灌溉制度提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 6—9 月在中国农业科学院新乡综合试验基地(35°9' N, 113°47' E, 海拔高度 81 m)设有防雨棚的测坑中开展,可保障作物生长季不受降水影响。试验区为暖温带大陆性气候,年均蒸发量 2 000 mm,年均降水量 582 mm,无霜期 200 d,夏玉米生育期内逐日气象数据如图 1 所示。试验区土壤为砂壤土,0~100 cm 土层田间持水率为 20.6%(质量含水率),土壤体积质量为 1.51 g/cm³。

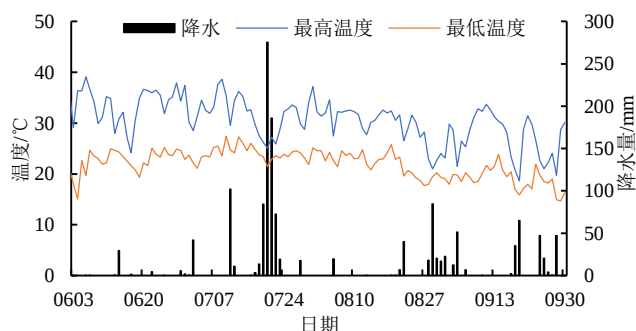


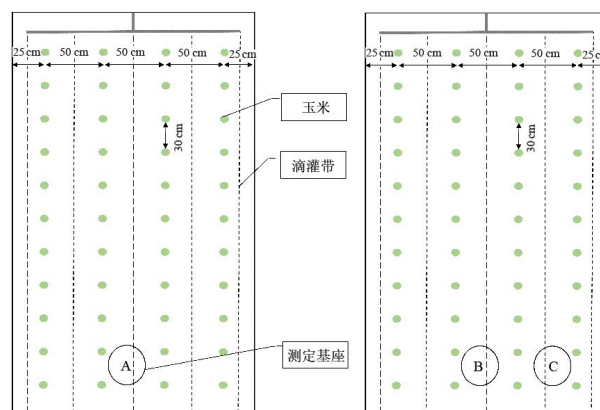
图 1 2021 年夏玉米生育期内逐日气象数据

Fig.1 Daily meteorological data during the growth period of summer maize in 2021

1.2 试验设计

试验设置灌水量和灌水方式二因素,每个因素设置两水平,分别为:(1)灌水量:36 mm 和 27 mm (2)灌水方式:常规滴灌(DI)和交替滴灌(ADI)。试验共 4 个处理,每个处理 3 次重复,采用完全随机设计。测坑长 3 m,宽 2.2 m,土体深度为 2 m。每个测坑布设 5 条滴头流量为 2.2 L/h 的滴灌带,滴灌带间距 50 cm,浅埋于地表下 3 cm。灌水时,DI 处理的 5 条滴灌带全部工作,CO₂ 测定基座置于 A 处(图 2(a))。ADI 处理的滴灌带分 2 组轮流灌水,如图 2(b)所示,虚线组滴灌带工作时,测定基座置于 B 处测定湿区 CO₂ 排放,测定基座置于 C 处测定干区 CO₂ 排放;实线组滴灌带工作时,测定基座置于 B 处测定干区 CO₂ 排放,测定基座置于 C 处测定湿区 CO₂

排放。为保证 ADI 处理 2 组滴灌带的滴灌带流量与灌水量一致,最右侧滴灌带不工作。



(a) DI 处理

(b) ADI 处理

图 2 不同灌水方式下滴灌带与 CO₂ 测定点的示意图

Fig.2 Schematic diagram of drip lines and soil CO₂ sampling sites under different irrigation methods

夏玉米供试品种为“登海 605”,种植行距 50 cm,株距 30 cm,种植密度 67 500 株/hm²(图 2)。玉米于 6 月 11 日播种,播种后撒施基肥(磷肥 105 kg/hm²、钾肥 105 kg/hm²、氮肥 60 kg/hm²),生育期内共灌水 5 次,分别是拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期(表 1)。基于当地气象数据,采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物需水量 ET₀^[25],当玉米实际耗水量 ET_c 达到 36 mm 时灌水(ET_c=K_c×ET₀),K_c 参照课题组总结的新乡地区夏玉米的作物系数(0.51、0.75、1.13)。不同处理的灌水量分别为 ET_c(36 mm)和 75%ET_c(27 mm)。分别在拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期随水追施氮肥,共 140 kg/hm²。

表 1 夏玉米灌水施肥时间表

Table 1 Summer maize irrigation and fertilization schedule

日期	0712	0725	0803	0816	0828
生育期	拔节期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	灌浆期
灌水施肥情况	灌水施肥	灌水施肥	灌水	灌水施肥	灌水施肥

1.3 测定项目和方法

1) 土壤 CO₂ 排放通量

土壤 CO₂ 排放通量于 7 月 14 日开始测定,每周测定 2 次,分别于周二和周五早上 08:00 进行,并在灌水后第 1 天和第 3 天加测。测定采用 Li-8100A (Li-Cor, USA),测定基座置于滴灌带中间并砸入 10 cm 土壤中。土壤 CO₂ 排放通量计算式^[26]为:

$$F_c = \frac{10VP_0(1 - \frac{W_0}{1000})\partial C'}{RS(T_0 + 273.15)\partial t}, \quad (1)$$

式中: F_c 为土壤 CO₂ 排放通量 (μmol/(m²·s)); V 为体积 (cm³); P_0 为压强 (kPa); W_0 为初始水蒸气摩尔分数 (mmol/mol); R 为理想气体常数, 8.314 J/

(mol K); S 为所测土壤面积 (cm²); T_0 为初始气温 (°C); $\partial c'/\partial c'$ 为水分校正后的 CO₂ 摩尔分数的初始变化速率 (μmol/mol)。

2) 土壤 CO₂ 累积排放量

土壤 CO₂ 累积排放量由式 (2) 计算^[26]:

$$M = \sum (F_{N+1} + F_N) \times 0.5 \times (t_{N+1} - t_N) \times 24 \times 0.1584, \quad (2)$$

式中: M 为整个生育期气体排放累积量 (g/m²); F 为土壤 CO₂ 排放通量 (μmol/(m²·s)); N 为取样频次; t 为取样时间 (d)。

3) 土壤酶活性

在玉米抽雄期灌水施肥后, 用土钻取玉米根区附近 0~20 cm 土壤, 土样自然风干后磨碎过筛, 采用苏州科铭生物技术有限公司的土壤碱性磷酸酶试剂盒 (分光光度法) 和土壤脱氢酶试剂盒 (微量法) 测定土壤碱性磷酸酶和土壤脱氢酶活性。

4) 土壤水分、温度和充水孔隙度

在测定土壤呼吸速率的同时, 利用 testo 迷你探针型温度计测定地表和 10 cm 深度土壤温度, 并取 10 cm 深度的土壤在 105 °C 烘干, 测定土壤质量含水率, 用式 (3) 计算土壤充水孔隙度 (WFPS) ^[26]。

$$WFPS = \frac{W \times D}{(1-D)/2.65} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: W 为土壤质量含水率 (g/g); D 为土壤体积质量 (g/cm³)。

5) 玉米产量

玉米于成熟期收获, 收获时每个测坑取 10 株玉米, 自然风干后考种测产。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理与图像绘制, SPSS 24.0 进行统计分析, 并采用邓肯新复极差法进行方差分析和显著性检验 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 夏玉米生育期内土壤 CO₂ 排放的季节变化

夏玉米田土壤 CO₂ 排放通量对不同灌水量和灌水方式处理的响应如图 3 所示, 灌水量、灌水方式及交互作用对不同生育期土壤 CO₂ 排放通量影响的显著性分析如表 2 所示。各生育阶段每次水肥供应后, 土壤 CO₂ 排放通量变化呈先快速增加再递减的变化趋势, 且 3 d 内出现明显峰值; 生育后期处于稳定低排放状态, 且整体呈递减趋势。分析各生育期水肥供应后的土壤 CO₂ 排放通量峰值发现, 拔节期 36DI 处理的排放通量为 7.07 μmol/(m² s), 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 36ADI、27DI、27ADI 处理间无显著差异; 小喇叭口期 4 个处理间无显著差异 ($P>0.05$); 大喇叭口期, 36DI 处理的排放通量显著低于其他 3

个处理 ($P<0.05$); 抽雄期, 27ADI 处理的通量比 36DI、36ADI、27DI 处理分别低 10.18%、15.00%、38.94%; 灌浆期, 36ADI 处理的排放通量最高, 分别比 36DI、27DI、27ADI 处理高 7.85%、38.99%、13.35%。灌水量和灌水方式在大喇叭口、抽雄和灌浆期均极显著提高了峰值处土壤 CO₂ 排放 ($P<0.01$), 且二者交互作用也达显著水平 ($P<0.05$)。

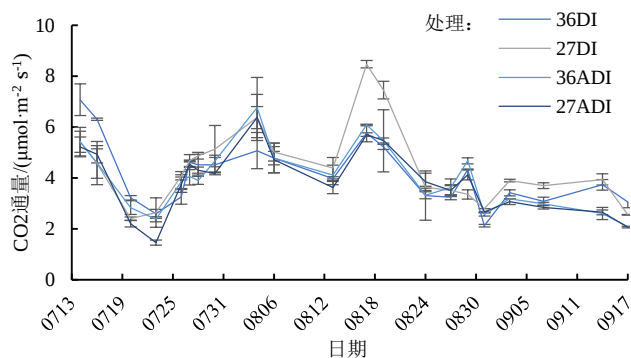


图 3 不同处理土壤 CO₂ 逐日排放通量的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of daily soil CO₂ emission flux in different treatments

表 2 不同因素对不同生育期土壤 CO₂ 排放通量影响的显著性分析

Table 2 Significant analysis of the effects of different factors on soil CO₂ emission flux at different growth stages

因素	拔节期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	灌浆期
灌水量	ns	ns	**	**	**
灌水方式	ns	*	**	**	**
灌水量×灌水方式	*	ns	**	**	*

注 **表示因素对土壤 CO₂ 排放通量影响极显著 ($P<0.01$); *表示因素对土壤 CO₂ 排放通量影响显著 ($P<0.05$); ns 表示因素对土壤 CO₂ 排放通量无显著影响 ($P>0.05$)。

2.2 夏玉米土壤 CO₂ 累积排放量变化特征

不同处理夏玉米不同生育阶段的土壤 CO₂ 累积排放量和显著性分析结果见表 3。拔节期, 同一灌水量条件下, ADI 能有效减少土壤 CO₂ 累积排放量。36ADI、27ADI 处理的累积排放量分别比 36DI、27DI 处理减少 19.65%和 4.93%, 且 36ADI 处理和 36DI 处理差异显著 ($P<0.05$)。相同灌水方式条件下, 36DI 处理的土壤 CO₂ 累积排放量显著高于 27DI 处理, 而 36ADI 处理和 27ADI 处理间无显著差异。小喇叭口期, 相同灌水量条件下, 36ADI、27ADI 处理的土壤 CO₂ 累积排放量分别比 36DI、27ADI 处理显著低 15.53%、7.24%; 相同灌水方式下, 36DI、36ADI 处理的土壤 CO₂ 累积排放量较 27DI、27AD 处理高出 15.59%、5.27%。大喇叭口期, 各处理间的累积排放量无显著差异。抽雄期, 27DI 处理的土壤 CO₂ 累计排放量显著高于其他处理, 36DI、36ADI、27ADI 处理间无显著差别且处于较低水平。灌浆期, 相同灌水量

量下, ADI 处理的累积排放量显著低于 DI 处理; 相同灌水方式下, CO_2 累积排放量受灌水量和灌水方式交互作用的显著影响, 36DI 处理比 27DI 处理低 4.04%, 36ADI 处理比 27ADI 处理高 3.36%, 但差异并不显著。

对于夏玉米全生育期的土壤 CO_2 累积排放量, 相

同灌水水平下, 36ADI、27ADI 处理的土壤 CO_2 累积排放量比 36DI、27DI 处理显著低 13.56%、11.48%; 相同灌水方式下, 36DI 处理的土壤 CO_2 累积排放量相较于 27DI 处理显著高出 5.56%。36ADI 与 27ADI 处理之间无显著差异。

表 3 不同处理夏玉米不同生育阶段的土壤 CO_2 累积排放量

g/m^2

Table 3 Cumulative soil CO_2 emissions at different growth stages of summer maize in different treatments

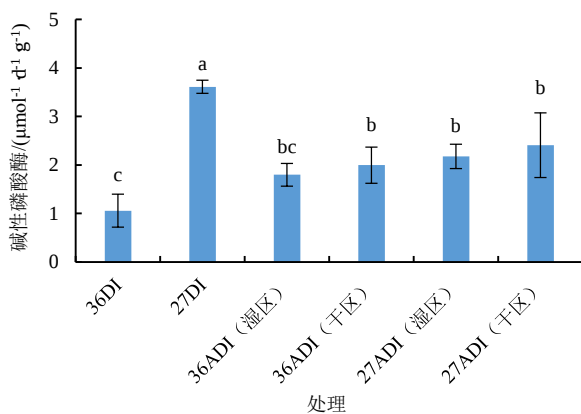
处理	拔节期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	灌浆期	全生育期
36DI	155.23 $\pm$ 1.93a	221.93 $\pm$ 2.91a	186.15 $\pm$ 6.63a	129.02 $\pm$ 5.47b	192.35 $\pm$ 2.70a	884.68 $\pm$ 12.29a
27DI	119.18 $\pm$ 6.49b	191.99 $\pm$ 8.25b	174.11 $\pm$ 5.70a	152.33 $\pm$ 2.62a	200.45 $\pm$ 2.73a	838.08 $\pm$ 24.56b
36ADI	124.72 $\pm$ 6.24b	187.47 $\pm$ 4.36bc	168.65 $\pm$ 8.67a	131.69 $\pm$ 8.13b	152.20 $\pm$ 5.26b	764.74 $\pm$ 10.50c
27ADI	113.30 $\pm$ 2.92b	178.09 $\pm$ 3.33c	169.87 $\pm$ 8.57a	133.40 $\pm$ 4.11b	147.25 $\pm$ 2.53b	741.91 $\pm$ 9.14c
灌水量	0.000	0.010	0.338	0.012	0.542	0.013
灌水方式	0.001	0.000	0.075	0.069	0.000	0.000
灌水量 $\times$ 灌水方式	0.007	0.023	0.247	0.023	0.030	0.307

注 同列不同字母表示各处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

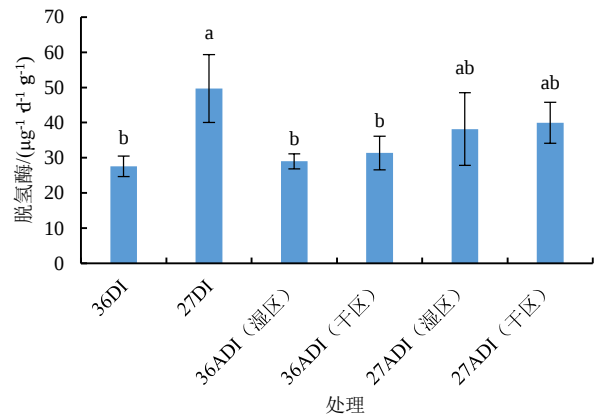
2.3 夏玉米抽雄期的土壤酶活性

土壤碱性磷酸酶和土壤脱氢酶可间接反映土壤微生物活性与数量^[27-28], 夏玉米抽雄期不同处理间根区土壤碱性磷酸酶和脱氢酶活性如图 4 所示, 图中不同字母表示各处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。根区土壤碱性磷酸酶活性对不同处理的响应有差异 (图 4 (a)), 其中, 27DI 处理的碱性磷酸酶活性显著高于其他处理, 分别比 36DI、36ADI (湿区)、36ADI (干区)、27ADI (湿区)、27ADI (干区) 处理高

241.45%、100.73%、80.92%、65.85%、50.12%。36DI 处理的碱性磷酸酶活性最小, 为 $1.06 \mu\text{mol}/(\text{d g})$; 36ADI 处理和 27ADI 处理之间差异不显著。不同处理之间的玉米根区土壤脱氢酶活性有差异 (图 4(b)), 同土壤碱性磷酸酶活性类似, 4 个处理中土壤脱氢酶活性的最大值出现在 27DI 处理, 36DI 处理最小; 2 个 ADI 处理的干、湿区的土壤酶活性均无差异, 并且同一灌水量下不同灌水方式未显著影响土壤脱氢酶活性, 但灌水量对其有显著影响。



(a) 土壤碱性磷酸酶活性



(b) 土壤脱氢酶活性

注 图中不同字母表示各处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

图 4 不同处理间夏玉米抽雄期根区碱性磷酸酶和脱氢酶活性

Fig.4 Alkaline phosphatase and dehydrogenase activities in the root zone of summer maize in different treatments at the tasseling stage

2.4 夏玉米生育期土壤水热变化规律

图 5 为夏玉米全生育期土壤 $WFPS$ 变化以及土壤温度和气温的变化。 $WFPS$ 的变化规律与 CO_2 排放通量变化趋势一致。玉米各生育阶段每次水肥供应后, $WFPS$ 显著增加, 达到峰值后呈下降趋势。在玉米全生育期, 同一灌溉方式下, 灌水量 36 mm 处理的 $WFPS$ 大于 27 mm 处理; 同一灌水量下, DI 处理的 $WFPS$ 大于 ADI 处理。总体来看, $WFPS$ 以 36DI 处

理最大, 27ADI 处理最小。土壤温度和气温随时间变化呈“M”型变化, 呈先增加后降低趋势。在拔节期供应水肥后, 土壤温度缓慢下降, 7 月 17 日后降温幅度较大, 土壤温度下降也较为迅速。玉米全生育阶段, 同一灌水方式下, 灌水量 27 mm 处理的土壤温度高于 36 mm 处理; 相同灌水量下, ADI 处理的土壤温度高于 DI 处理, 这与土壤全生育期的土壤 CO_2 排放通量规律一致。

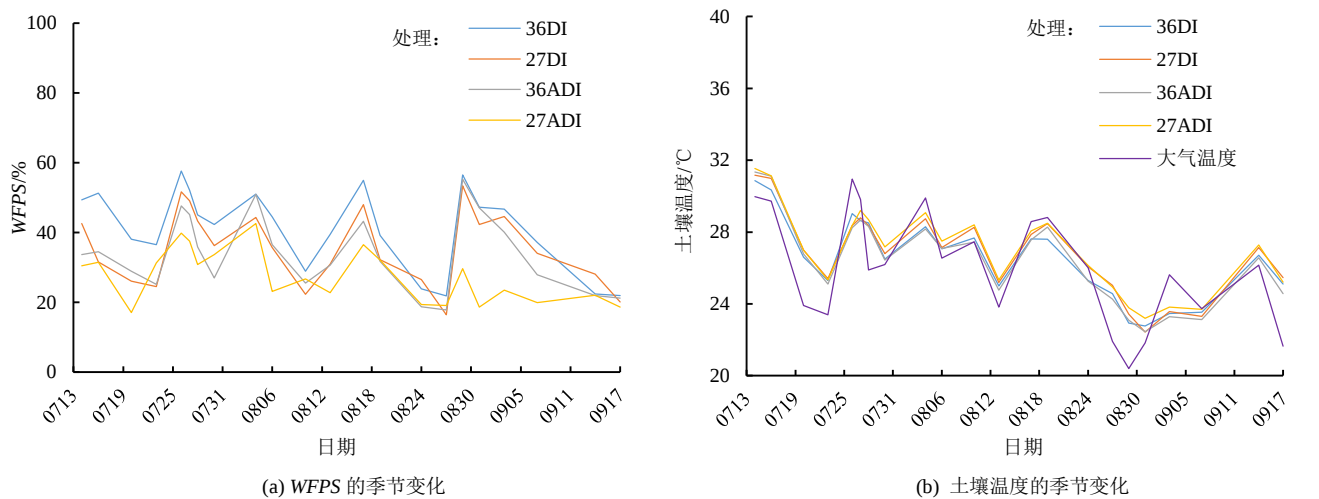


图 5 夏玉米生育期土壤 WFPS、土壤温度的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of soil WFPS and soil temperature during summer maize growth period

2.5 夏玉米生育期土壤水热与土壤 CO₂ 排放通量的关系

表 4 为不同处理下土壤 CO₂ 排放通量与温度、WFPS 皮尔逊相关分析结果。各处理的土壤 CO₂ 排放通量与土壤温度、WFPS 均有正相关关系。27ADI 处理的 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS、温度具有极显著的相关性。此外，36DI、36ADI 处理的 CO₂ 排放通量均与土壤温度极显著正相关，与土壤 WFPS 显著相关，27DI 处理的 CO₂ 排放通量虽与土壤温度的相关关系显著，但与土壤 WFPS 相关性较差。对比处理间土壤 CO₂ 排放通量和土壤温度、WFPS 的相关关系，当灌水方式同为 DI 处理时，灌水量 36 mm 处理的 CO₂ 排放通量与土壤温度、WFPS 的相关性优于灌水量 27 mm 处理，但 ADI 灌水方式下的结果则相反，这说明土壤 CO₂ 排放通量受水热互作效应的影响。图 6 和表 5 给出了不同灌水方式下土壤 WFPS、温度与土壤 CO₂ 排放通量的二元非线性曲面拟合，证实 2 种灌水方式

中水热存在互作效应，而且水热互作在 DI、ADI 处理中起相反的作用。而且，由图 6 和表 5 可知，ADI 处理的土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS、温度的相关性紧密，而 DI 处理相关性则一般，说明灌水方式为 ADI 处理时土壤 CO₂ 排放对水热变化的敏感度高于 DI 处理。

表 4 不同处理下夏玉米全生育期的土壤 CO₂ 排放通量与温度、WFPS 皮尔逊相关系数

Table 4 The Pearson correlation coefficient of soil CO₂ flux, soil temperature, and WFPS during the whole growth period of summer maize in different treatments

处理	WFPS	温度
36DI	0.457*	0.747**
27DI	0.389	0.540*
36ADI	0.484*	0.558**
27ADI	0.655**	0.654**

注 **相关性极显著 ($P<0.01$)，*相关性显著 ($P<0.05$)。

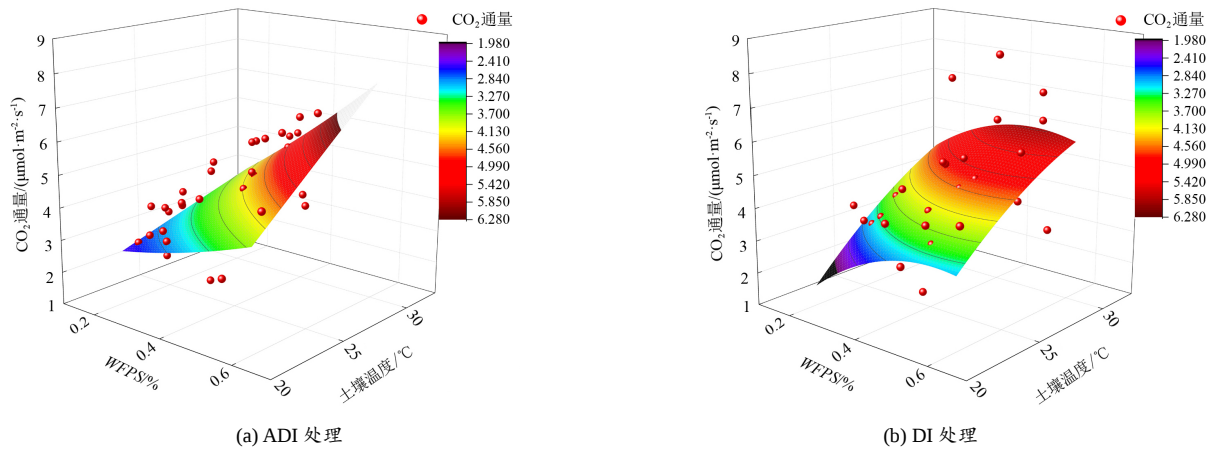


图 6 不同灌水方式土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS、温度的非线性曲面拟合

Fig.6 Nonlinear surface fitting of soil CO₂ flux with soil WFPS and temperature under different irrigation methods

2.6 夏玉米产量对不同灌溉管理措施的响应

表 6 为夏玉米产量对不同灌溉管理措施的响应。

4 个处理间的玉米籽粒产量差异显著，36DI 处理的夏玉米产量最高，分别比 36ADI、27DI、27ADI 处理高

16.45%、13.34%、9.54%；27ADI 处理的产量次之。27DI 处理产量低于 27ADI 处理。当灌水方式为 DI 灌水量、灌水方式及其交互作用极显著影响玉米产量。灌水量为 36 mm 时，36DI 处理产量高于 36ADI 处理高；当灌水方式为 ADI 处理时，36 mm 灌水量处理，这与灌水量为 27 mm 时玉米产量大小相反，处理玉米产量比 27 mm 灌水量处理低。

表 5 不同灌水方式土壤 CO₂ 排放通量与土壤 WFPS、温度的非线性曲面拟合方程Table 5 Nonlinear surface fitting equation of soil CO₂ flux with soil WFPS and temperature under different irrigation methods

处理	ADI	DI
方程	$z=a+bx^2+cy^2+dx+ey+fx$	$z=a+bx^2+cy^2+dx+ey+fx$
<i>a</i>	1.087 13±19.178 52	-20.588 98±25.735 02
<i>b</i>	3.042 70±14.983 54	-14.338 16±15.457 02
<i>c</i>	-3.342 18×10 ⁻⁴ ±0.023 12	-0.015 45±0.030 84
<i>d</i>	-13.453 66±21.785 07	18.548 28±23.395 37
<i>e</i>	0.055 85±1.318 54	1.235 03±1.756 63
<i>f</i>	0.652 81±0.738 53	-0.174 75±0.914 87
R ² (COD)	0.530 57	0.460 78
调整后 R ²	0.467 13	0.383 74

表 6 不同处理下夏玉米产量和显著性分析

Table 6 Significance analysis of summer maize yield in different treatments

处理	36DI	36ADI	27DI	27ADI	灌水量	灌水方式	灌水量×灌水方式
产量/(kg hm ⁻²)	8 280.47±127.63a	7 095.96±21.92d	7 302.82±67.50c	7 559.02±109.32b	**	**	**

注 同列不同字母表示各处理之间差异显著 ($P<0.05$)；**表示此因素对产量影响极显著 ($P<0.01$)。

3 讨论

灌水量和灌水方式通过改变土壤水热条件进而影响土壤物理性质^[29-31]和微生物群落结构和活性^[32-34]等，从而对土壤 CO₂ 排放产生影响。研究表明，在玉米全生育期交替滴灌较常规滴灌能显著减少土壤 CO₂ 累积排放，这与刘水等^[35]研究结果相一致。ADI 处理作为交替灌水方式，改变了田间土壤水分运移的轨迹，增强了作物根区水分胁迫^[36]，导致土壤理化性质较 DI 处理存在明显差异^[37]。陈慧等^[14]研究表明，由于灌水方式不同造成的土壤 CO₂ 排放的变化与土壤水热显著相关，这与本研究结果一致（表 4）。而且，本研究表明，ADI 处理比 DI 处理的土壤 CO₂ 排放与 WFPS 和土壤温度的相关性更显著，说明 ADI 处理的土壤水热变化更能解释土壤 CO₂ 排放通量的变化。土壤水分和土壤温度也可通过影响土壤中微生物与相关土壤酶活性来改变土壤中 CO₂ 的排放^[37]。

本研究中，抽雄期灌水施肥后 36ADI 处理的土壤酶活性与 36DI 处理并无明显差异，并且 36DI 处理与 36ADI 处理间的土壤 CO₂ 累积排放也无明显差异；27ADI 处理的土壤酶活性低于 27DI 处理，27ADI 处理的土壤 CO₂ 累积排放亦显著低于 27DI 处理，这可能是土壤 CO₂ 排放与土壤碱性磷酸酶和脱氢酶活性存在相关关系，这与王园媛等^[38]、张俊丽等^[39]研究一致。余江敏等^[33]、Li 等^[40]指出交替灌溉可提高作物根区（湿润区）土壤酶活性，但本研究中 ADI 处理并未提高湿润区土壤碱性磷酸酶与脱氢酶活性，这可能与土壤理化性质、所种植作物相关^[41]，但具体原因

和机制还需进一步研究。

本研究中，全生育期内高灌水量能增加土壤 CO₂ 累积排放，但是不同生育阶段其对排放的影响与土壤水热效应以及土壤酶活性等有关。其中，抽雄期和灌浆期，36DI 处理的土壤 CO₂ 排放通量整体低于 27DI 处理（图 3），36DI 处理 2 个时期的土壤 CO₂ 累计排放量分别比 27DI 处理低 18.07%和 4.21%（表 2）。由于抽雄期和灌浆期水肥供应后，36DI 处理和 27DI 处理间的土壤温度并无显著差异，而抽雄期土壤 WFPS 变化明显，但变化规律与土壤 CO₂ 排放通量相反，为 36DI 处理高于 27DI 处理。结果表明，在此时期内土壤水分对土壤呼吸的影响较土壤温度占据主导地位，是影响土壤 CO₂ 排放的主要因素之一；除此之外，水热互作效应也影响土壤 CO₂ 排放通量，二者之间存在负相关性（图 6）。土壤碱性磷酸酶与土壤脱氢酶活性均为 36DI 处理显著低于 27DI 处理（图 4），这可能是由于长时间高温干燥，抽雄期水肥供应后，水分迅速充满土壤孔隙，高灌水量导致高 WFPS，土壤孔隙中 O₂ 通道减少；而且，灌水后 36DI 处理土壤温度的降幅大于 27DI 处理（图 5），含氧量减少和温度降低不利于微生物繁衍和提高活性^[42]，导致土壤碱性磷酸酶与脱氢酶活性下降，继而导致 36DI 处理的土壤 CO₂ 排放通量低于 27DI 处理。此外，由于抽雄前期根系生长较为旺盛，呼吸作用强^[43]，也是土壤 CO₂ 排放通量较大的原因之一。由于玉米生育后期（灌浆期）土壤根系生长逐渐减缓甚至开始衰老^[43]，土壤 CO₂ 处于低水平排放状态，此时进行最后一次水肥供应后，27DI 处理未出现明显峰值而且水平较低，其

原因可能是由于抽雄期温度处于连续下降状态, 土壤微生物活动被抑制^[44]。后期 27DI 处理的土壤 CO₂ 排放通量又高于 36DI 处理可能是由于施入尿素, 土壤碳氮比降低, 而且, 土壤温度逐渐回升, 微生物受到刺激为分解更多有机碳开始增殖并提高活性^[45], 而 36DI 处理的土壤 WFPS 高于 27DI 处理。玉米拔节期至灌浆期, 36ADI 处理和 27ADI 处理的土壤 CO₂ 累积排放与温度、WFPS 均呈显著正相关关系 (表 4), 2 个处理间土壤温度差异并不显著, WFPS 对处理响应的差异显著与否在不同生育期不同。然而, 36ADI 处理和 27ADI 处理的土壤 CO₂ 累计排放量无明显差异, 这可能与土壤的空间异质性^[46]、交替滴灌频率^[47]、交替滴灌导致的土壤呼吸对水分变化的响应差异^[48]以及灌水量与灌水方式的交互作用 (表 3) 等有关, 调控机制具有复杂性和不唯一性, 有待于进一步研究。

夏玉米拔节期至灌浆期农田土壤 CO₂ 排放通量呈明显的季节变化趋势 (图 3), 在关键生育期供应水肥后 3 d 内出现明显峰值, 生育后期呈低排放状态, 这与刘祥超等^[49]研究一致。拔节期至小喇叭口期水肥供应前, 各处理的土壤 CO₂ 排放通量呈急剧下降趋势, 7 月 21 日之前土壤温度连续下降是主要原因, 作物持续耗水使土壤水分降低, 好氧微生物活性下降^[50], 而且土壤中可与酶结合、供微生物分解的有机质底物量被持续消耗导致其量降低^[51]也是 CO₂ 排放通量急剧降低的原因之一。抽雄期 27DI 处理的土壤 CO₂ 排放通量显著高于其他处理 (图 3), 可能是 27DI 处理中的土壤碱性磷酸酶和脱氢酶活性显著高于其他处理 (图 4) 导致。27DI 处理的土壤酶活性显著高于其他处理, 可能是因为灌水施肥后, 水分和氮素的迅速补充以及灌水方式和灌水量的互作使此处理土壤氮激发效应显著增加^[52], 并且各处理土壤理化性质间差异使根系分泌物分泌情况有差别, 又根系分泌物作用于土壤导致不同处理土壤酶活性不同^[53], 导致处理间土壤 CO₂ 排放通量有差异。

本研究中, 灌水方式相同时, 高灌水量未能显著增加玉米产量; 灌水量相同时, 交替滴灌也未能显著提高玉米产量, 这与高翠民等^[22]、张富仓等^[19]、张国强等^[54]研究有差异, 灌水量与灌水方式的交互作用 (表 6) 对产量有极显著影响可能是原因之一。交替滴灌配合高水量处理时, 水肥单侧下渗, 高灌水量可能导致肥料淋洗较低水处理严重, 而且由于长期交替灌水处理, 导致玉米两侧根系分布不均匀, 肥料利用率高水低于低水, 也能影响产量^[55]。

4 结 论

1) 与 DI 处理相比, ADI 处理能显著降低 12%~17%

的土壤 CO₂ 累积排放, ADI 处理中 WFPS、土壤温度变化能更好地解释土壤 CO₂ 排放通量变化。高灌水量对全生育期土壤 CO₂ 累积排放有增加作用, 但受灌水方式影响。36DI 处理较 27DI 处理显著增加土壤 CO₂ 累积排放 5.56% ($P<0.05$), 但是 36ADI 处理较 27ADI 处理增加土壤 CO₂ 累积排放 3.08% ($P>0.05$)。

2) 夏玉米生育期内土壤 CO₂ 排放通量波动较大, 且变化规律与 0~10 cm 的土壤充水孔隙度、土壤温度变化规律一致, 土壤 CO₂ 排放通量与土壤水热及其交互作用有较好的相关关系。通过影响 WFPS、土壤温度来改变土壤酶活性是灌水量与灌水方式影响土壤 CO₂ 排放的调控机制之一, 不同处理之间土壤酶活性变化与土壤 CO₂ 排放规律一致。

3) ADI 处理和高水并未显著增加玉米产量, 36DI 处理提高玉米产量的效果最优, 其次是 27ADI、27DI、36ADI 处理。27ADI 处理能在保证产量的情况下最大限度减少土壤 CO₂ 累积排放, 是一种节水减排的灌水模式。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] GUAN C, LI X R, ZHANG P, et al. Effect of global warming on soil respiration and cumulative carbon release in biocrust-dominated areas in the Tengger Desert, Northern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1 161-1 170.
- [2] HAN M Y, ZHANG B, ZHANG Y Q, et al. Agricultural CH₄ and N₂O emissions of major economies: Consumption-vs. production-based perspectives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 276-286.
- [3] HANSEN J E, LACIS A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6 286): 713-719.
- [4] 强小嫚, 张凯, 米兆荣, 等. 黄淮海平原地区深松和灌水次数对冬小麦-夏玉米节水增产的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(3): 491-502.
- [5] 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): 3 673-3 679.
- [6] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 基于 DNDC 模型的冬小麦-夏玉米农田滴灌施肥优化措施研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 200-212.
- [7] 刘杰云, 邱虎森, 张文正, 等. 节水灌溉对农田土壤温室气体排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 1-7.
- [8] LIU Jieyun, QIU Husen, ZHANG Wenzheng, et al. Response of greenhouse gas emissions to water-saving irrigation in croplands: A review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 1-7.
- [9] WEI C C, REN S M, YANG P L, et al. Effects of irrigation methods and

- salinity on CO₂ emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141-639.
- [9] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5 677): 1 623-1 627.
- [10] SAPKOTA A, HAGHVERDI A, AVILA C C E, et al. Irrigation and greenhouse gas emissions: A review of field-based studies[J]. *Soil Systems*, 2020, 4(2): 20.
- [11] Faisal Mehmood. 灌溉模式对华北地区麦田温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
FAISAL Mehmood. Effects of different irrigation scheduling and irrigation methods on greenhouse gas emissions from winter wheat field in the North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [12] 郭乙霏, 张利平, 王纲胜, 等. 耕作方式与水肥组合对小麦-玉米田温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 95-104.
GUO Yifei, ZHANG Liping, WANG Gangsheng, et al. Effects of the tillage and combination of water and fertilizer on the greenhouse gas emissions of wheat-maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 95-104.
- [13] KUMAR A, NAYAK A, MOHANTY S, et al. Greenhouse gas emission from direct seeded paddy fields under different soil water potentials in Eastern India[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 228: 111-123.
- [14] 陈慧, 商子惠, 王云霏, 等. 灌水量对温室番茄土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3 126-3 136.
CHEN Hui, SHANG Zihui, WANG Yunfei, et al. Effects of irrigation amounts on soil CO₂, N₂O and CH₄ emissions in greenhouse tomato field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3 126-3 136.
- [15] SENYIGIT U, AKBOLAT D. The effect of different irrigation methods on soil carbon dioxide emission[J]. *Ekoloji*, 2010, 19(77): 59-64.
- [16] LIVSEY J, KÄTTERER T, VICO G, et al. Do alternative irrigation strategies for rice cultivation decrease water footprints at the cost of long-term soil health?[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7): 074 011.
- [17] KRUSE J S, KISSEL D E, CABRERA M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(3): 247-256.
- [18] 韩昌东, 叶旭红, 马玲, 等. 不同灌水下限设施番茄土壤 CO₂ 排放特征及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(2): 46-55.
HAN Changdong, YE Xuhong, MA Ling, et al. The characteristics of soil CO₂ emission and its impact factors of greenhouse potato soil under different controlled irrigation low limits[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(2): 46-55.
- [19] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 111-120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(22): 111-120.
- [20] 唐诚, 高慧, 褚贵新. 高密度栽培下滴灌量对春玉米干物质积累、穗部性状、产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(11): 26-30.
TANG Cheng, GAO Hui, CHU Guixin. Effects of drip irrigation on dry matter accumulation, ear characteristics and yield of spring maize with high planting densities[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(11): 26-30.
- [21] 张丽华, 梁双波, 董志强, 等. 出苗水对夏玉米生长发育的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1): 258-264.
ZHANG Lihua, LIANG Shuangbo, DONG Zhiqiang, et al. Effect of emergency water on the summer corn growth and development[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1): 258-264.
- [22] 高翠民, 丁晋利, 张洁梅, 等. 水氮运筹对玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 44-51.
GAO Cuimin, DING Jinli, ZHANG Jiemei, et al. The combined effects of irrigation and nitrogen fertilization on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(2): 44-51.
- [23] 刘永贤, 梁海玲, 农梦玲, 等. 不同施肥及滴灌方式对糯玉米生长及产量的影响[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(7): 981-985.
LIU Yongxian, LIANG Hailing, NONG Mengling, et al. Effects of different drip irrigation modes on growth and yield of waxy corn under integrated management of water and fertilizer[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(7): 981-985.
- [24] 黄鹏飞, 尹光华, 谷健, 等. 交替地下滴灌对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2 507-2 512.
HUANG Pengfei, YIN Guanghua, GU Jian, et al. Effects of alternate subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of spring maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2 507-2 512.
- [25] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 5-9.
PENG Shizhang, XU Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6): 5-9.
- [26] HOU H J, YANG Y Q, HAN Z D, et al. Deficit irrigation effectively reduces soil carbon dioxide emissions from wheat fields in Northwest China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(12): 5 401-5 408.
- [27] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(3): 416-427.
NIU Shiquan, YANG Jianwen, HU Lei, et al. Relationship with soil microbial quantity, soil enzyme activity and physicochemical factor between different saline-alkali soil in Hexi Corridor in spring[J]. *Microbiology China*, 2012, 39(3): 416-427.
- [28] 王睿彤, 孙景宽, 陆兆华. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 425-431.
WANG Ruitong, SUN Jingkuan, LU Zhaohua. Effect of soil ameliorants on the biochemical properties of coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 425-431.
- [29] 付蕾. 日光温室土壤栽培甜椒水肥一体化管理技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
FU Lei. Study on quantitative management technology of fertigation for soil cultivated sweet pepper in solar greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.
- [30] 李欣雨, 张川, 闫浩芳, 等. 生物炭和灌水量对土壤保水性及温室番茄生理特性的影响[J]. *排灌机械工程学*, 2022, 40(3): 317-324.
LI Xinyu, ZHANG Chuan, YAN Haofang, et al. Effects of biochar and irrigation amount on soil water retention and physiological characteristics of tomato under greenhouse condition[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(3): 317-324.
- [31] 黄真真, 刘广明, 李金彪, 等. 滴灌带布置方式与灌水定额对土壤性状及棉花产量影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 325-331.
HUANG Zhenzhen, LIU Guangming, LI Jinbiao, et al. Effect of layout of drip irrigation belt and irrigation quota on soil properties and cotton yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2): 325-331.
- [32] 李华, 贺洪军, 李腾飞, 等. 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2 349-2 354.
LI Hua, HE Hongjun, LI Tengfei, et al. Microbial activity and functional diversity in rhizosphere of cucumber under different subsurface drip irrigation scheduling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2 349-2 354.
- [33] 余江敏, 李伏生, 韦彩会, 等. 根区局部灌溉对有机无机肥配施土壤微生物和玉米水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 63-69.

- YU Jiangmin, LI Fusheng, WEI Caihui, et al. Effect of partial root-zone irrigation on soil micro-organism and maize water utilize under combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 63-69.
- [34] 梁燕菲, 张潇潇, 李伏生. “薄浅湿晒”灌溉稻田土壤微生物量碳、氮和酶活性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1 403-1 410.
- LIANG Yanfei, ZHANG Xiaoxiao, LI Fusheng. Soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in paddy soil under “thin-shallow-wet-dry”irrigation method[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1 403-1 410.
- [35] 刘水, 李伏生, 韦翔华, 等. 分根区交替灌溉对玉米水分利用和土壤微生物量碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 71-77.
- LIU Shui, LI Fusheng, WEI Xianghua, et al. Effects of alternate partial root-zone irrigation on maize water use and soil microbial biomass carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 71-77.
- [36] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. *水利学报*, 2001, 32(11): 80-86.
- KANG Shaozhong, PAN Yinghua, SHI Peize, et al. Controlled root-divided alternative irrigation—Theory and Experiments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32(11): 80-86.
- [37] 张西超, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 灌溉方法对设施土壤理化性质及番茄生长状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 143-147, 153.
- ZHANG Xichao, ZOU Hongtao, ZHANG Yulong, et al. Effects of irrigation methods on physical and chemical properties of soil and tomato growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 143-147, 153.
- [38] 王圆媛, 陈书涛, 刘义凡, 等. 外源氮添加对森林土壤二氧化碳排放及酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1 205-1 210.
- WANG Yuanyuan, CHEN Shutao, LIU Yifan, et al. Effects of exogenous nitrogen addition on carbon dioxide emission and enzyme activities of a forest soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1 205-1 210.
- [39] 张俊丽, 高明博, 温晓霞, 等. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO₂ 排放量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6 147-6 154.
- ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al. Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO₂ emission in dryland of maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6 147-6 154.
- [40] LI F S, YU J M, NONG M L, et al. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2): 231-239.
- [41] 袁武, 靳振江, 程跃扬, 等. 岩溶湿地和稻田的土壤酶活性与 CO₂ 和 CH₄ 排放特征[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2 897-2 906.
- YUAN Wu, JIN Zhenjiang, CHENG Yueyang, et al. Characteristics of soil enzyme activities and CO₂ and CH₄ emissions from natural wetland and paddy field in Karst areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(14): 2 897-2 906.
- [42] 王融融, 余海龙, 李诗瑶, 等. 干湿交替对土壤呼吸和土壤有机碳矿化的影响述评[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 78-85.
- WANG Rongrong, YU Hailong, LI Shiyao, et al. Review on the effects of soil alternate drying-rewetting cycle on soil respiration and soil organic carbon mineralization[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 78-85.
- [43] 胡田田, 康绍忠, 高明霞, 等. 玉米根系分区交替供应水、氮的效应与高效利用机理[J]. *作物学报*, 2004, 30(9): 866-871.
- HU Tiantian, KANG Shaozhong, GAO Mingxia, et al. Effects and mechanisms of alternate water and nitrogen supply to partial root zone of maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(9): 866-871.
- [44] 郭文章, 井长青, 王公鑫, 等. 天山北坡荒漠草原土壤呼吸和生态系统呼吸对降水的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(9): 2 031-2 039.
- GUO Wenzhang, JING Changqing, WANG Gongxin, et al. Responses of soil respiration and ecosystem respiration to precipitation in desert steppe on the Northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 2 031-2 039.
- [45] 廖利平, 高洪, 汪思龙, 等. 外加氮源对杉木凋落物分解及土壤养分淋失的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 34-39.
- LIAO Liping, GAO Hong, WANG Silong, et al. The effect of nitrogen addition on soil nutrient leaching and the decomposition of Chinese fir leaf litter[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 34-39.
- [46] PERALTA A L, LUDMER S, KENT A D. Hydrologic history influences microbial community composition and nitrogen cycling under experimental drying/wetting treatments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66: 29-37.
- [47] 韩丹, 李玉霖, 杨红玲, 等. 模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 100-108.
- HAN Dan, LI Yulin, YANG Hongling, et al. Effects of simulated temperature increase and change of rainfall frequency on soil respiration in arid and semi-arid areas[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 100-108.
- [48] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1 764-1 773.
- QI Yuchun, GUO Shufang, DONG Yunshe, et al. Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1 764-1 773.
- [49] 刘祥超, 王凤新, 顾小小. 水、热对土壤 CO₂ 排放影响的研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 290-295.
- LIU Xiangchao, WANG Fengxin, GU Xiaoxiao. Study on the influence of water and temperature on soil CO₂ emission[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2): 290-295.
- [50] 朴海淑. 不同播期下土壤水分和容重对苗期玉米根际生物学特性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- PIAO Haishu. Effect of soil moisture content and bulk density on rhizosphere soil biological characteristics under different sowing date[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [51] DAVIDSON E A, JANSSENS I A, LUO Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q₁₀[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 154-164.
- [52] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(4): 303-312.
- LIU Shaowen, YIN Min, CHU Guang, et al. Research progress of soil nitrogen priming effect and its microbial mechanisms[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(4): 303-312.
- [53] 王小平, 肖肖, 唐天文, 等. 连香树人工林根系分泌物输入季节性变化及其驱动的根际微生物特性研究[J]. *植物研究*, 2018, 38(1): 47-55.
- WANG Xiaoping, XIAO Xiao, TANG Tianwen, et al. Seasonal changes of the input of root exudates and its driving characteristics of rhizosphere microbe in a *Cercidiphyllum japonicum* sieb. plantation[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, 38(1): 47-55.
- [54] 张国强, 王克如, 肖春华, 等. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 117-123.
- ZHANG Guoqiang, WANG Keru, XIAO Chunhua, et al. Effect of drip irrigation on yield and water use efficiency of spring maize with high yield in Xinjiang[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(4): 117-123.
- [55] 于坤, 郁松林, 刘怀锋, 等. 不同根区交替滴灌方式对赤霞珠葡萄幼苗根冠生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 113-120.
- YU Kun, YU Songlin, LIU Huaifeng, et al. Effects of alternate partial root-zone drip irrigation on growth of root and shoot of Cabernet Sauvignon grape seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 113-120.

length and diameter, leaf area index, and *SPAD* content. In contrast, multiple topdressing improved spike length and diameter, kernel numbers per spike, and 100-seed weights, ultimately leading to an elevated yield. The grain yield depended not only on topdressing frequency but also on when and how the fertilizer was applied in each topdressing. For example, in the multiple topdressing, applying fertilizer during earing and tasseling stage reduced the kernel numbers, 100-seed weights, yield, and fertilizer use efficiency. Aligning fertilizer application with plant requirements in the multiple topdressing was critical to improving plant growth. Among all treatments, topdressing 11 times was optimal, with the yield reaching 7.36 t/hm²; irrigation water use efficiency, water use efficiency, nitrogen use efficiency reaching 3.27 kg/m³, 1.25 kg/m³ and 24.52 kg/kg, respectively. **【Conclusion】** Increasing the frequency of fertilizer topdressing proves to be a highly effective strategy for improving maize growth and yield in aeolian sandy soil, presenting a promising approach for optimizing fertilization in this region.

Key words: nitrogen fertilizer; drip irrigation; aeolian sandy soil; fertigation; water use efficiency

责任编辑：白芳芳

(上接第 39 页)

The Effects of Irrigation Amount and Method on Soil CO₂ Emission and Yield of Summer Maize

YANG Le^{1,2}, CAO Hui^{1,2}, FU Yuanyuan¹, GAO Yang^{1*}, LIU Zhandong¹

(1. Institute of Filed Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100082, China)

Abstract: **【Objective】** Maize is an important staple crop in central and northern China, and during certain seasons, its cultivation needs irrigation. This paper studied the intertwined effect of irrigation amount and method on soil CO₂ emissions and the yield of summer maize. **【Method】** The field experiment compared two irrigation methods: conventional drip irrigation (DI) and alternating drip irrigation (ADI). For each irrigation, there were two irrigation amounts: 36 and 27 mm. In each treatment, we measured CO₂ emission using the Li-8100A. We also measured soil enzymatic activity, soil water content and temperature, and grain yield, from which we analyzed the dependence of soil CO₂ emission on soil water-filled porosity (*WFPS*) and soil temperature. **【Result】** Compared to DI, ADI reduced cumulative soil CO₂ emission by 12% to 17%. Increasing irrigation amount from 27 mm to 36 mm increased cumulative soil CO₂ emissions, despite the increase depending on irrigation method. A notable correlation was found between soil CO₂ emission and *WFPS* and soil temperature in the 0~10 cm soil layer. The impact of soil water and temperature on CO₂ emission was intertwined. Irrigation amount and method both affected soil enzyme activity via their effect on *WFPS* and soil temperature, which serve as a regulatory mechanism impacting soil CO₂ emissions. Irrigation amount and method also significantly affected maize yield. Compared with DI with irrigation amount of 36 mm, ADI with irrigation amount of 27 mm reduced the yield by 8.7%, but it reduced the cumulative CO₂ emission by 19%. **【Conclusion】** ADI with 27 mm of irrigation was most effective to ensure maize yield while reducing soil CO₂ emissions. It is a water-saving and emission-reducing irrigation method and can be used as an improved agronomic practice for maize production in the studied region.

Key words: maize; alternate drip irrigation; CO₂ emissions; soil enzymatic activity; yield

责任编辑：赵宇龙