

不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响

刘晶晶^{1,2} 张阿凤^{2,3} 冯浩^{1,2,4*} 邹小阳⁴ 陈海心^{2,5}

(¹西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ⁴中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ⁵西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 灌溉对农田温室效应与碳足迹贡献产生重要影响. 本文采用静态暗箱-气相色谱法对关中平原小麦-玉米轮作(2014—2015年)农田温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)排放通量进行了监测,并用净增温潜势(NGWP)和碳足迹两个指标评估不同灌溉量对关中平原农田温室效应、作物生产碳足迹的分布和构成的影响. 试验在作物关键需水期(冬小麦越冬期和拔节期、夏玉米出苗期和拔节期)设置W₀(0 mm)、W₁₂₀(120 mm)、W₁₈₀(180 mm)、W₂₄₀(240 mm)4个处理. 结果表明:与W₀处理相比,W₁₂₀、W₁₈₀、W₂₄₀处理下小麦产量分别增加了31.3%、44.3%、33.7%,玉米产量分别增加了9.9%、22.6%、33.8%;CO₂的年际排放总量分别增加了22.2%、24.3%、15.1%,N₂O的年际排放总量分别增加了18.6%、67.8%、91.5%,但CH₄的年际吸收总量分别降低了51.7%、79.6%、97.8%;NGWP分别增加了20.1%、31.6%、31.4%. W₁₂₀处理下碳足迹较W₀处理降低了19.1%,但W₁₈₀、W₂₄₀处理与W₀处理相比无显著性差异;W₁₂₀、W₂₄₀处理单位产量碳足迹较W₀处理分别增加了44.5%、23.3%,而W₁₈₀处理与W₀处理无显著性差异. 综合考虑不同灌溉量的经济效应和环境效应,180 mm的灌水量更有利于关中平原小麦-玉米轮作系统的节水及固碳减排.

关键词 灌溉量; 小麦-玉米轮作; 温室气体; 净增温潜势; 碳足迹

Influences of different irrigation amounts on carbon sequestration in wheat-maize rotation system. LIU Jing-jing^{1,2}, ZHANG A-feng^{2,3}, FENG Hao^{1,2,4*}, ZOU Xiao-yang⁴, CHEN Hai-xin^{2,5} (¹College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁴Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁵Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Irrigation can influence greenhouse gas (GHG) emission and carbon footprint in agricultural production. In this study, annual GHG emissions (including CO₂, CH₄, and N₂O) were monitored with static opaque chamber and gas chromatography from a wheat-maize rotation system under different irrigation treatments in the Guanzhong Plain of China during 2014–2015. A total of four different irrigation treatments were conducted, e.g. W₀, W₁₂₀, W₁₈₀, and W₂₄₀, where the subscripts represented the irrigation amounts in mm. Net global warming potential (NGWP) and carbon footprint were used to evaluate the influence of different irrigation amounts on GHG emission and composition of carbon footprint of crop production. Compared with treatment W₀, wheat yield of

本文由国家高技术研究发展计划项目(2013AA102904)、国家自然科学基金项目(41301305)和西北农林科技大学基本科研业务费专项(2014YB062,2452015355)资助 This work was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2013AA102904), the National Natural Science Foundation of China (41301305), and the Special Funds of the Scientific Research Project of Northwest A&F University, China (2014YB062, 2452015355).

2016-05-12 Received, 2016-10-21 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nercwsi@vip.sina.com

treatments W_{120} , W_{180} , and W_{240} increased by 31.3%, 44.3% and 33.7%, while corn yield increased by 9.9%, 22.6%, and 33.8%, respectively. Similarly, annual CO_2 emission increased by 22.2%, 24.3% and 15.1% and annual N_2O emission by 18.6%, 67.8%, and 91.5%, respectively, while annual CH_4 absorption decreased by 51.7%, 79.6% and 97.8%, respectively. The values of NGWP increased by 20.1%, 31.6%, and 31.4%, respectively. The carbon footprint of treatment W_{120} was 19.1% lower than that of W_0 , while W_{180} and W_{240} showed no significant difference. Treatments W_{120} and W_{240} increased carbon footprint per unit crop yield by 44.5% and 23.3%, respectively, while W_{180} showed no significant difference. Considering both the economic and environmental effects of different irrigation amounts, we recommend the irrigating amount of 180 mm for the wheat-maize rotation system in the Guanzhong Plain of China for the purposes of water saving and carbon sequestration.

Key words: irrigation amount; wheat-maize rotation system; greenhouse gas (GHG); net global warming potential (NGWP); carbon footprint.

近年来温室气体排放增加引起的全球气候变暖成为人们普遍关注的焦点,而农业则是二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体的主要排放源之一^[1]。2000—2010年全球温室气体排放量每年平均增加10亿t CO_2 当量(Gt CO_2 eq),其中农业、林业及其他土地利用(AFOLU)行业的年均温室气体(GHG)总通量为10~12 Gt CO_2 eq,非 CO_2 排放大部分来自农田土壤产生的 N_2O 排放和 CH_4 排放^[2]。因此,对农田土壤碳增汇和温室气体减排的研究刻不容缓。

全球气候变暖使得我国农业水资源呈下降趋势,且预测结果表明,未来30年我国西北及华北地区依靠自然降水增加来缓解农业水资源短缺问题是不可能的^[3]。灌溉是旱区农业获得高产稳产的重要手段,中国70%的粮食来自灌溉农业,农业用水量约占全国总用水量的70%^[4]。由于土壤水分是温室气体排放与碳循环过程的关键驱动因子,在一定变化范围内,土壤水分与温室气体排放通量具有显著的相关性^[5-7]。因此,灌溉带来的土壤水分含量显著变化势必会对农业土壤的温室气体排放/吸收强度产生重要影响。王建林等^[8]和张前兵等^[9]研究表明,土壤呼吸会随灌溉量的增加而增强,而土壤呼吸的温度敏感性值(Q_{10})与灌溉量呈抛物线关系,并在灌溉量为20 mm时最大,当灌溉量增加或减少时, Q_{10} 值均会降低。Adviento-borbe等^[10]在美国内布拉斯加州麦田及稻麦轮作田的研究表明,观测前5 d或3 d的累积降水或灌溉量与 N_2O 排放通量呈现显著正相关。高志岭^[11]对中国华北平原冬小麦与夏玉米田土壤 N_2O 排放通量的监测中发现, N_2O 通量排放峰与灌水时间是相对应的。对于 CH_4 气体,研究表明,少量降水时可以在短期内促进旱作农田土壤对 CH_4

的吸收,然而这种促进作用也会随土壤水分增加而削弱,较高土壤含水量可以刺激土壤产甲烷菌活性并促进 CH_4 释放^[12-13]。当前国内外学者就灌溉量对温室气体净增温潜势以及生态系统碳源汇功能影响的综合评价未见报道,本研究基于此背景采用包含多种温室气体效应贡献的指标来更全面地评价不同灌溉量所带来的净温室效应变化。

碳足迹作为一个新的研究方法已得到学术界的认可,并成为气候变化新的研究热点^[14]。农业碳足迹能够系统地评价耕作、施肥、灌溉和收获等农业生产活动过程中,由人为因素引起的直接和间接的碳排放总量,定量测算农业生产活动对温室效应的影响^[15-16]。然而,目前有关中国农田管理对大气温室效应和碳足迹贡献影响的文献中,有关灌溉影响效应的文献甚少。因此,本研究以关中平原小麦-玉米轮作农田土壤为研究对象,通过设置不同灌溉量,研究其对冬小麦-夏玉米生长季内土壤温室气体排放规律的影响,且用净增温潜势(NGWP)和碳足迹两个指标评估不同灌溉量的固碳减排效应,以优化灌溉管理措施,为保障小麦、玉米较高产量及农业节水、固碳减排提供理论支撑和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

田间试验位于陕西关中平原中部杨陵区西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°20' N, 108°24' E, 海拔521 m),属半干旱半湿润气候区。2014年10月—2015年10月年降雨量为540.8 mm,年平均温度为14.3℃,试验站内土壤为壤土,1 m土层的平均田间持水量为23%~25%,萎蔫系数为8.5%(以上均为质量含水量),播前0~20 cm土壤的有机碳含

量为 $8.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮为 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮为 $5.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮为 $1.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 (P_2O_5) 为 $20.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 (K_2O) 为 $287 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH(水土比 1:1) 为 8.32, 土壤容重为 $1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 并参考王文佳等^[17]根据多年的降雨资料和作物需水量, 确定不同水平年作物最优灌溉制度. 设计 W_0 (0 mm)、 W_{120} (120 mm)、 W_{180} (180 mm)、 W_{240} (240 mm) 4 个处理, 灌水时间为作物的关键需水期: 冬小麦越冬期和拔节期以及夏玉米的出苗期和拔节期, 各处理重复 3 次, 共 12 个小区, 每个小区面积为 10 m^2 ($2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$), 小区之间的间距为 0.5 m, 且试验区周围布 0.5 m 宽的作物保护带. 小区分别施尿素和磷酸二氢钙用作基肥, 其他管理措施与当地一致. 小麦(品种‘小偃 22’)于 2014 年 10 月 15 日播种, 2015 年 6 月 6 日收获. 玉米(品种‘秦龙 14’)于 6 月 11 日播种, 10 月 8 日收获. 各处理灌水和施肥时间及其用量如表 1 所示.

1.3 测定项目和方法

1.3.1 温室气体采集与测定

温室气体排放通量采用静态暗箱-气相色谱法进行采集. 采样箱由箱体和底座组成, 箱体用 PVC 材料制成, 覆有泡沫和反光材料, 规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 箱内安装搅匀气体的风扇和抽气接口, 接口连接三通阀. 底座用不锈钢制成, 规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 安放在每个小区的中间位置, 底座里无作物, 且小麦-玉米生育期内进行人工除杂草. 底座上面附有凹槽, 采样之前槽内注水密封以隔绝箱外环境. 气体采集时间为 9:00—11:00. 扣箱后立即用 60 mL 注射器采集样品, 然后分别在扣箱后 10、20 和 30 min 时采样 1 次.

表 1 小麦、玉米季的灌水量和施肥量

Table 1 Fertilization application rates and irrigation amounts in the wheat and maize growing season

日期 Date	灌溉量 Irrigation amount (mm)				施肥量 Fertilization rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
	W_0	W_{120}	W_{180}	W_{240}	
2014-10-15	0	0	0	0	120 (N), 100 (P_2O_5)
2014-11-19	0	30	45	60	0
2015-03-15	0	30	45	60	0
2015-04-09	0	0	0	0	30 (N)
2015-06-10	0	0	0	0	225 (N), 90 (P_2O_5)
2015-06-12	0	30	45	60	0
2015-08-02	0	30	45	60	0

每 10 d 采集 1 次. 若施肥、灌溉或降雨, 则增加采样频率, 一共增加采样 3 次, 分别为 2015 年 5 月 23 日、2015 年 7 月 16 日、2015 年 8 月 5 日. 采样结束后立即带回实验室用 Agilent 7890 A 气相色谱仪进行分析, CH_4 和 CO_2 使用 FID(氢火焰离子检测器), 载气为氮气, 柱温为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, 检测器温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 流速为 $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 燃气是氢气, 流速为 $35 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 助燃气是空气, 流速为 $350 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. N_2O 使用 ECD 检测器, 载气为氩甲烷, 其柱温是 $65 \text{ }^\circ\text{C}$, 检测器温度 $330 \text{ }^\circ\text{C}$, 流速为 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 气体排放速率由 4 个连续样品浓度值的斜率经线性回归分析得出, 排放通量由下式求得, 用内插法估算小麦、玉米生育期 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的排放总量.

$$F = H \frac{MP}{R(273+T)} \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为气体的排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); H 为采样箱高度 (m); M 为气体的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$); P 为采样点气压 (Pa); R 为普适气体常数 ($8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 为采样时箱内平均气温 ($^\circ\text{C}$); dc/dt 为气体排放速率 ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

1.3.2 产量、温度及水分的测定

小麦收获后, 在每个小区选取 1 m^2 的样点进行单独收割, 风干脱粒后称取籽粒质量并计算产量, 最终结果以每公顷小麦产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 表示. 试验区自动气象站测定每日最高、最低气温和降雨量 (图 1), 用地温计测定土壤 5 cm 处温度、气密闭箱内空气温度. 测定时间为密闭箱置于底座 20 min 后. 采用 TDR 土壤水分速测仪测定土壤体积含水量, 每个小区随机测 3 个点取平均值, 用土壤孔隙度含水率 (water filled pore space, WFPS, %) 来表示, $\text{WFPS} = \text{土壤体积含水量} / (1 - \text{土壤容重} / 2.65) \times 2.65$.

1.3.3 生态系统净交换 (NEE) 和净增温潜势 (NGWP) 的计算

生态系统净交换 (NEE) 的计算公式如下^[18]:

$$NPP = 0.446 \times W_{\max} - 0.00067 \quad (2)$$

$$NEE = R_H - NPP \quad (3)$$

式中: NPP 为净初级生产力 ($\text{kg C}_e \cdot \text{hm}^{-2}$); W_{\max} 为作物收获后地上部分和地下部分生物量的总和; R_H 为土壤微生物的异养呼吸量 ($\text{kg C}_e \cdot \text{hm}^{-2}$).

净增温潜势 (NGWP) 参考土壤和生物量排放法 (soil and crop-based approach)^[19], 由于本研究把物资和农事活动投入计入碳足迹进行评价, 所以不再计入到增温潜势, 则 NGWP 计算如下:

$$NGWP = GWP_{NPP} + GWP_{\Delta\text{SOC}} - GWP_{\text{CH}_4\text{Gs}} \quad (4)$$

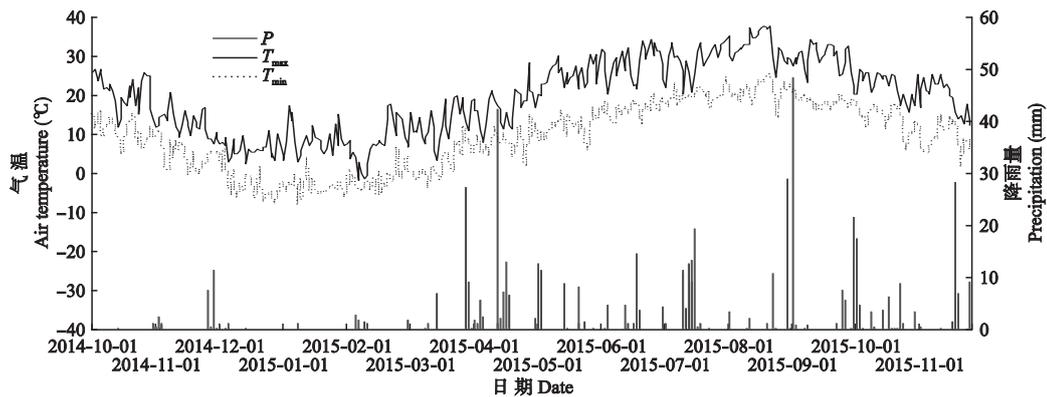


图1 小麦-玉米季的降雨、最低气温和最高气温

Fig.1 Daily precipitation and maximum and minimum air temperature in the winter wheat and summer maize growing season.

P: 降雨量 Precipitation; T_{\max} : 最高气温 Maximum temperature; T_{\min} : 最低气温 Minimum temperature.

式中: NGWP 以 CO_2 当量 ($\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) 来表示; GWP_{NPP} 指净初级生产力的增温潜势, 以 CO_2 当量 ($\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) 来计算; $\text{GWP}_{\Delta\text{SOC}}$ 是试验前后有机碳变化的增温潜势, 由于本试验只有一年可忽略不计; GWP_{GHGs} 是土壤 CO_2 (秸秆部分全部以 CO_2 形式排放到大气中^[20])、 N_2O 和 CH_4 排放总量的增温潜势, 以 CO_2 当量 ($\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) 来计算. 当 $\text{NGWP} > 0$ 时, 表现为温室气体的汇, 反之则为源.

1.3.4 碳足迹评价方法与计算 本试验碳足迹的边界为开始种植小麦到收获玉米结束 (2014 年 10 月—2015 年 10 月), 评价灌溉过程中的能源消耗 (电力)、农艺措施中的能源消耗 (施肥、喷洒农药、耕作和收获)、农资生产过程中 (肥料和农药) 的碳排放、农田生态系统的净交换 (NEE) 表征生态系统的碳吸收以及对小麦和玉米生育期内 CH_4 和 N_2O 排放总量进行分析, 评价不同灌溉量对农田生态系统固碳能力的影响. 本研究各种物质的碳排放参数见表 4, 并统一用单位面积排放的 CO_2 的碳当量来表示 ($\text{kg CO}_2\text{-C}_e \cdot \text{hm}^{-2}$).

小麦-玉米轮作生长过程总碳足迹 CF 的计算公式^[21]:

$$CF = \sum (A_i \times EF_i) \quad (5)$$

式中: A_i 为每个农业投入的总量 (如化肥、农药、灌溉等); EF_i 为相应的排放参数.

作物生产单位产量的碳足迹 CF_y ($\text{kg CO}_2\text{-C}_e \cdot \text{t}^{-1}$)^[22]:

$$CF_y = CF / TY \quad (6)$$

式中: TY 为小麦和玉米的总产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.4 数据处理

试验数据均取 3 次重复的平均值, 采用

Microsoft excel 2013 和 JMP10.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2011) 统计软件处理数据和相关性分析, 用 Duncan 法检验差异显著性, 显著水平设定为 $\alpha = 0.05$. 应用 OriginPro 9.0 软件制图.

采用指数方程拟合土壤呼吸速率对土壤温度的响应关系^[23], 方程如下:

$$R_s = ae^{bT} \quad Q_{10} = e^{10b} \quad (7)$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Q_{10} 为温度敏感性系数 (温度每增加 10°C 土壤呼吸所增加的倍数); T 为土壤温度 ($^\circ\text{C}$); a 、 b 为待定参数.

2 结果与分析

2.1 土壤 CO_2 排放通量的季节变化

从图 2 和图 3 可以看出, 小麦-玉米生育期 CO_2 排放的季节变化与土壤温度的变化规律相似, W_0 处理的 CO_2 排放通量在整个生育期内基本低于其他处理, 冬小麦季 3 月之前 W_{240} 处理的 CO_2 排放通量与其他处理相比基本处于最高, W_{120} 与 W_{180} 之间无显著差异, 但 11 月 19 日和 3 月 15 日灌水后 W_{120} 、 W_{180} 处理 CO_2 排放通量明显高于其他处理, 越冬期没有出现排放峰, 3 月中旬至 4 月中旬的强降雨后出现 CO_2 排放通量有升高的趋势, 并受温度升高影响在 5 月初达到最高值. 当玉米季 7 月的气温达到最高值、无灌溉且极少降雨时, CO_2 排放处于明显低峰状态, 进入 8 月后, 灌溉、几次强降雨和持续高温使 CO_2 排放回升, 之后达到峰值后又伴随温度降低和高频率降雨而减少. 土壤孔隙度含水率 (WFPS) $< 70\%$ 时, W_{120} 和 W_{180} 处理明显增加了 CO_2 排放通量 (图 3). 由表 2 可知, 随温度的升高不同灌溉量土壤呼吸均增加, W_{120} 处理土壤呼吸变幅最大;

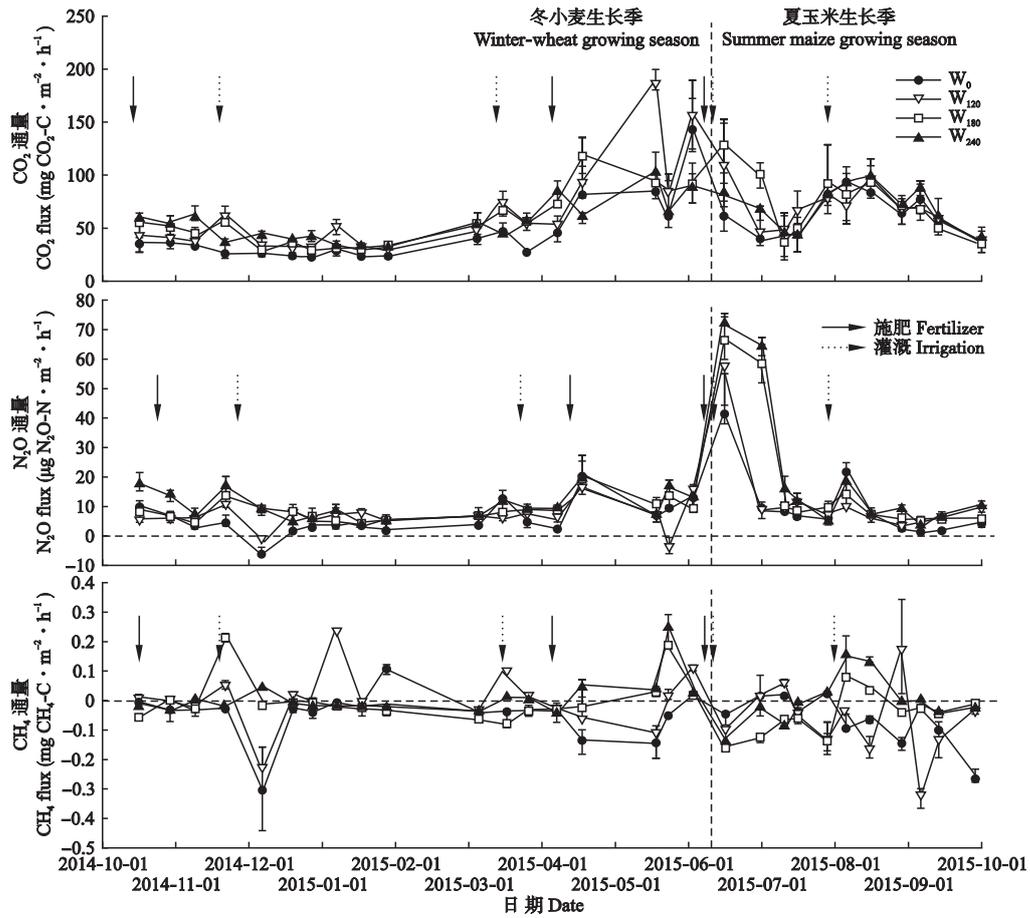


图 2 小麦-玉米生长期不同处理 CO₂、N₂O 和 CH₄ 季节性排放通量

Fig.2 Seasonal dynamics of CO₂, N₂O and CH₄ flux under different treatments during the whole wheat-maize growing season.

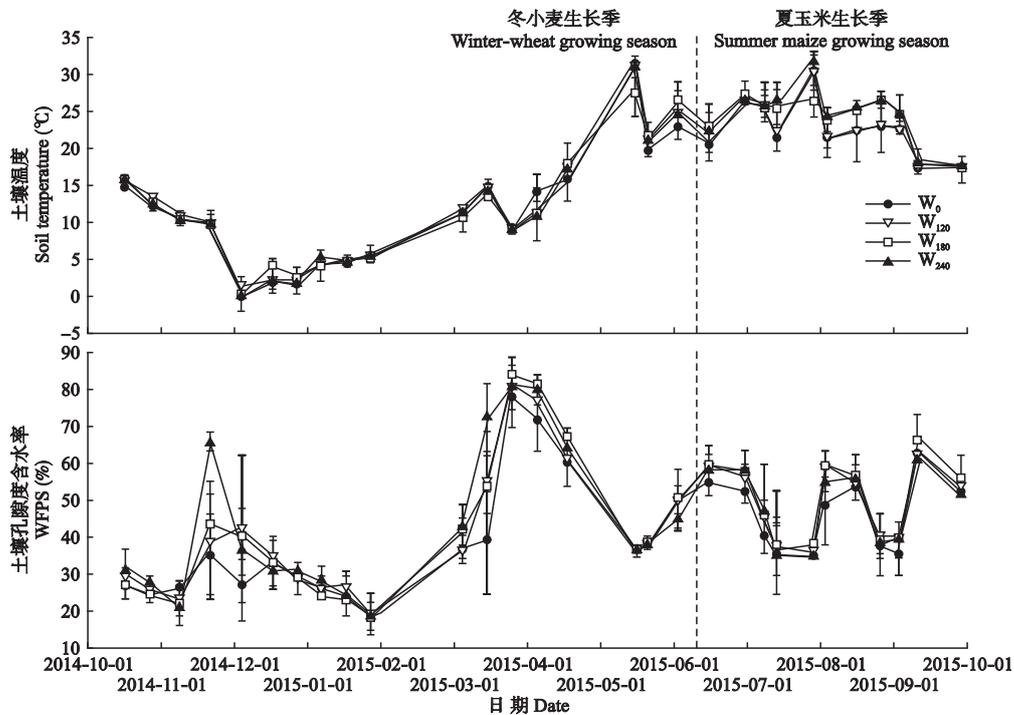


图 3 不同处理土壤温度和土壤孔隙度含水率变化

Fig.3 Dynamics of soil temperature and soil WFPS under different treatments.

表2 土壤呼吸速率与土壤温度的关系方程参数以及土壤呼吸速率的温度敏感性系数

Table 2 Fitted equation parameters of soil respiration rate with soil temperature and temperature sensitivity of soil respiration rate

处理 Treatment	拟合方程 Fitted equation	决定系数 R^2	温度敏感性系数 Q_{10}
W_0	$R_s = 21.42e^{0.05457T}$	0.74	1.72
W_{120}	$R_s = 29.07e^{0.05597T}$	0.77	1.75
W_{180}	$R_s = 30.82e^{0.04837T}$	0.78	1.62
W_{240}	$R_s = 34.98e^{0.03637T}$	0.67	1.44

W_{180} 、 W_{240} 处理较 W_0 处理土壤呼吸对土壤温度敏感性降低,各处理 Q_{10} 值表现为 $W_{120} > W_0 > W_{180} > W_{240}$ 。 W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理下小麦-玉米季 CO_2 排放总量较 W_0 处理分别增加了22.2%、24.3%、15.1%。

2.2 土壤 N_2O 、 CH_4 排放/吸收通量的季节变化

由图2可知, N_2O 排放通量在整个小麦-玉米生育期不灌水时基本表现为 $W_{240} > W_{180} > W_{120} > W_0$,施肥或灌水后均出现了 N_2O 排放峰,从12月中旬至次年的2月底土壤 N_2O 排放通量维持在一个较低水平,4月9日追施尿素后出现 N_2O 排放通量高峰值,之后随着气温的升高和频繁降雨, N_2O 排放迅速上升,玉米种植后灌溉、施肥及高温导致各处理 N_2O 排放通量出现极大值,最高的 W_{240} 处理达到了 $72.1 \mu g N_2O-N \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ (6月17日)。进入7月的高温干旱天气后,此时期WFPS<40%(图3), N_2O 排放通量回落,8月的灌溉又使 N_2O 出现了小排放峰,回落后基本维持在较低水平,各处理间的差异也基本稳定地表现为 $W_{240} > W_{180} > W_{120} > W_0$ 。总体来说, W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理下 N_2O 年际排放总量较 W_0 处理分别

增加了18.6%、67.8%和91.5%。

从图2可知,小麦-玉米季土壤 CH_4 既有吸收特征又有排放特征,整个冬小麦生育期内没有明显的季节性变化,小麦季 W_0 处理只有两次出现正值,而其他不同灌溉量处理在灌溉和降雨后出现 CH_4 排放现象,玉米季8月受灌水和高温影响各处理也出现排放现象,总结发现, CH_4 排放现象基本出现在表土温度为 $10 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、WFPS>60%的情况下(图3),且 CH_4 排放通量随灌溉量的增加而增加。表2显示小麦-玉米季各处理土壤均为 CH_4 的汇,且各处理间 CH_4 的吸收总量存在显著性差异($P < 0.05$), W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理 CH_4 吸收总量较 W_0 处理分别降低了51.7%、79.6%、97.8%。

2.3 小麦、玉米产量和NGWP的变化

由表3可知,灌溉增加了作物产量,但 W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理小麦产量无显著性差异。与 W_0 处理相比, W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理小麦产量分别增加了31.3%、44.3%、33.7%,玉米产量分别增加了9.9%、22.6%、33.8%。本试验NGWP主要取决于籽粒生物量部分,各处理的净增温潜势均表现为温室气体的汇,且籽粒产量越多,固碳潜力越大。灌溉使小麦-玉米季NGWP显著增加($P < 0.05$), W_{120} 、 W_{180} 、 W_{240} 处理NGWP较 W_0 处理分别增加了20.1%、31.6%、31.4%。

2.4 碳足迹的变化

从小麦-玉米季碳足迹分析可知,不同处理均表现为农田生态系统的碳汇(表4)。 W_{120} 处理碳足迹较 W_0 处理增加了19.1%,而 W_{180} 、 W_{240} 处理碳足迹与

表3 不同灌溉量处理的作物产量、温室气体排放总量和净增温潜势

Table 3 Crop yield, annual amount of GHGs emissions and NGWP under different irrigation treatments (mean±SD)

作物 Crop	处理 Treatment	产量 Yield ($t \cdot hm^{-2}$)	CO_2-C ($kg \cdot hm^{-2}$)	CH_4-C ($kg \cdot hm^{-2}$)	N_2O-N ($kg \cdot hm^{-2}$)	NGWP ($kg \cdot hm^{-2}$)
小麦 Wheat	W_0	5.01±0.50b	2644±334c	-2.57±1.20d	0.35±0.08c	8117±826b
	W_{120}	6.58±0.43a	3476±380a	-0.58±0.20c	0.38±0.06c	10603±696a
	W_{180}	7.23±0.25a	3431±407a	-0.28±1.70b	0.51±0.09b	11566±402a
	W_{240}	6.70±0.34a	3152±347b	0.25±0.79a	0.59±0.10a	10672±542a
玉米 Maize	W_0	4.77±0.34b	1789±138b	-2.44±0.16c	0.25±0.01d	7768±554b
	W_{120}	5.24±0.71b	1945±380ab	-1.83±0.27b	0.32±0.01c	8480±1179b
	W_{180}	5.85±0.38ab	2082±101a	-1.60±0.18b	0.47±0.03b	9332±617ab
	W_{240}	6.38±0.66a	1953±103ab	-0.36±0.07a	0.54±0.04a	10195±1104a
年际 Annual	W_0	9.78±0.40B	4433±176C	-5.01±0.53D	0.60±0.05D	15885±657B
	W_{120}	11.82±1.11A	5421±143A	-2.42±0.32C	0.70±0.02C	19083±1822A
	W_{180}	13.08±0.28A	5513±78A	-1.02±0.27B	0.98±0.04B	20898±452A
	W_{240}	13.08±1.00A	5105±109B	-0.11±0.02A	1.13±0.03A	20868±1637A

NGWP: 净增温潜势 Net global warming potential. 同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.

表 4 不同处理碳消耗

Table 4 Carbon cost of different treatments

排放来源 Source of emission	项目 Item	排放参数 Discharge parameter	农业用量 Amount applied in agriculture	碳消耗 Carbon cost (kg CO ₂ -C _e · hm ⁻²)			
				W ₀	W ₁₂₀	W ₁₈₀	W ₂₄₀
肥料 Fertilizer	N	1.52 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² [15]	375 kg · hm ⁻²	570	570	570	570
	P	0.2 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² [15]	190 kg · hm ⁻²	38	38	38	38
农药 Pesticide	-	4.88 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² [15]	14.8 kg · hm ⁻²	72.2	72.2	72.2	72.2
农业活动 Agricultural activity	耕作	15.2 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² · time ⁻¹ [16]	2 次	30.4	30.4	30.4	30.4
	施肥	0.9 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² · time ⁻¹ [16]	3 次	2.7	2.7	2.7	2.7
	喷洒农药	1.4 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² · time ⁻¹ [16]	5 次	7	7	7	7
	收获	22.9 kg CO ₂ -C _e · hm ⁻² · time ⁻¹ [16]	2 次	45.8	45.8	45.8	45.8
灌溉 Irrigation	电力	0.92 kg CO ₂ · (kW · h) ⁻¹ [24]	-	0	181.9	272.9	363.8
温室气体排放 Greenhouse gas emission	N ₂ O	298 kg CO ₂ · kg ⁻¹ N ₂ O ^[24]	-	75.4	89.4	126.4	144.3
	CH ₄	34 kg CO ₂ · kg ⁻¹ CH ₄ ^[25]	-	-61.9	-29.9	-12.6	-1.4
CO ₂ 净交换 Net exchange of CO ₂	NEE	-	-	-8032	-6874	-9596	-8728
总碳足迹 Total carbon footprint	CF	-	-	-7256b	-5873a	-8448b	-7461b

同行不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in same row indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

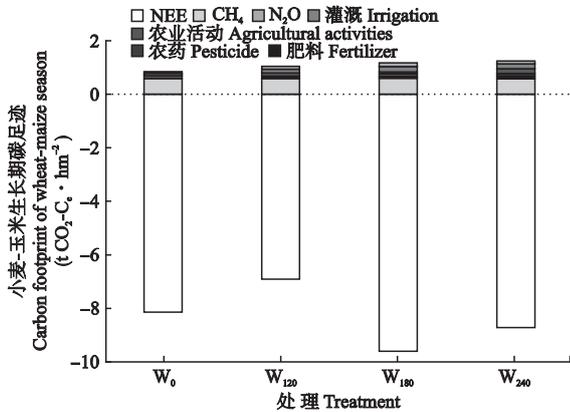


图 4 不同处理小麦-玉米季碳足迹构成

Fig.4 Composition of carbon footprint of wheat-maize season production under different treatments.

NEE: 生态系统净交换 Net exchange of CO₂.

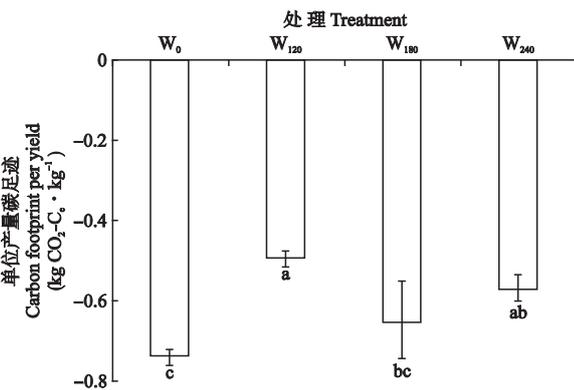


图 5 不同处理单位小麦-玉米产量的碳足迹

Fig.5 Carbon footprint per wheat and maize yield under different treatments.

不同字母表示处理间差异显著 Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

W₀处理无显著差异,但相比 W₁₂₀处理,碳足迹分别

增加了 43.9%、27%。从图 4 的碳足迹构成可知,不同处理 CO₂ 净交换值 (NEE) 占总碳汇的 99.2% ~ 99.9%。W₁₂₀、W₁₈₀、W₂₄₀ 处理总碳消耗较 W₀ 处理分别增加了 23.3%、38.5%、51.4%。碳消耗的排放来源主要是肥料、灌溉和 N₂O 排放,分别占各处理总碳消耗的 47.7% ~ 72.2%、17.4% ~ 28.6% 和 8.6% ~ 11.3%。W₁₂₀、W₂₄₀ 处理单位产量碳足迹较 W₀ 处理分别增加了 44.5%、23.3%, W₁₈₀ 处理与 W₀ 处理无显著性差异 (图 5)。

3 讨论

3.1 不同灌溉量对温室气体排放的影响

研究表明,土壤 CO₂ 排放通量变化与表层土壤温度之间存在显著的正相关关系^[26]。土壤呼吸温度敏感性系数 Q₁₀ 值是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标,McCulley 等^[27] 的研究表明,灌溉显著增加了土壤呼吸的温度敏感性。但是当土壤含水量超过某个阈值,土壤呼吸的温度敏感性反而会降低。这与本研究灌溉 120 mm 时 Q₁₀ 值达到最高,之后随灌溉量增加而逐渐减小的结果一致 (表 2)。梁艳等^[28] 研究灌溉对藏北高寒草甸生物量和温室气体排放的影响时表明,当土壤湿度小于 30% 时,CO₂ 排放通量随湿度的增加而增加, Liu 等^[29] 及王建林等^[8] 研究发现,土壤孔隙度含水率 WFPS < 70% 时低灌溉处理 W₁₂₀ 和 W₁₈₀ 明显增加了 CO₂ 排放通量,高灌溉 W₂₄₀ 处理下反而降低了 CO₂ 排放,这与本试验研究结果一致。可能是过高的土壤含水量使土壤 O₂ 扩散,抑制植物根系和好氧微生物的活动^[30]。Liu 等^[29] 发现土壤含水率引起的 CO₂ 排放通量随时间

变化过程符合非线性函数关系.这一现象在本试验每次灌水后有所体现:高灌溉 W_{240} 处理灌水后期的 CO_2 排放通量呈现先增加后缓慢降落趋势,而低灌溉处理 W_{120} 和 W_{180} 灌水后期的 CO_2 排放通量呈直接下降趋势(图 2).

农田土壤 N_2O 产生与排放主要源于土壤氮素的硝化和反硝化作用,土壤湿度通过影响硝化及反硝化作用影响土壤 N_2O 的产生与排放^[13].不同管理措施下土壤温度和水分差异是影响 N_2O 排放的主要因素,且土壤水分、土壤温度与其都呈显著的正相关^[31].这与我们的研究结果一致(表 5).白红英等^[32]发现,西北干旱半干旱地区较低的湿度范围内(3%~22%)土壤 N_2O 释放速率与土壤湿度呈正相关,这与本试验中当 $WFPS < 60\%$ (土壤湿度 $< 27\%$) 时结果一致.可能是土壤含水量较高时导致 O_2 供给减少, N_2 比例增加,促进反硝化作用发生^[33].梁东丽等^[34]研究发现,在常规的水分管理措施下,土壤 N_2O 的排放基本上来自于土壤硝化和反硝化作用都十分强烈的干湿交替阶段,且土壤干湿交替由于增加了死亡微生物量以及打乱了土壤环境和有机物之间的相互作用,从而使得土壤有效碳和氮的矿化量增加.这说明降水或灌溉后干土变湿的土壤反硝化微生物量和反硝化酶对土壤通气性作出快速反应,反硝化量显著增加,即出现了 N_2O 脉冲排放现象.且土壤硝化和反硝化过程最适宜温度范围分别为 15~35 和 30~67 °C^[35].本试验中土壤湿度、温度基本处于可适范围内,使得 N_2O 排放总量随灌溉量增加而增加.

土壤 CH_4 的产生是产甲烷菌与甲烷氧化菌共同作用的结果,而旱地一般认为是 CH_4 的汇^[36].且 CH_4 在土壤中的排放和吸收受到施肥、灌溉、耕作等农业管理措施和土壤理化特性、气候季节性变化规律的影响^[37].本研究整个小麦-玉米季内 CH_4 排放通量波动较小,各处理基本表现 CH_4 的吸收现象,灌溉或降雨后出现 CH_4 的排放现象,由于有氧条件下不利于 CH_4 的产生,微生物通常是在厌氧条件下分解土壤中的有机物,当土壤含水率较高时,土壤处于厌氧状

态促进了甲烷菌分解有机物^[38]. CH_4 的排放与土壤湿度呈现负相关(表 5),并随土壤湿度的增加 CH_4 排放增加,旱地在灌溉及强降雨的条件下 CH_4 由汇变成源,这与梁艳等^[28]的结果一致.本试验可能由于灌溉频率较低使得所有灌溉量处理下 CH_4 排放总量均表现为土壤的汇.

3.2 不同灌溉量对 NGWP 的影响

赵自超等^[19]用土壤碳库排放法、生物量法、土壤和生物量排放法来评估硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果,其中土壤和生物量排放法综合考虑了温室气体以及农田的作物产量.这里采用此方法评估不同灌溉量对农田生态系统的固碳潜力,主要取决于 NPP,虽然各处理 N_2O 、 CH_4 排放总量对综合温室效应的贡献随灌溉量增加而增加,但其本身所占 NGWP 比重较小,这与刘巽浩等^[39]的研究结果一致.本试验将 NPP 移出农田部分的收获物(作物籽粒)作为固碳单元,故整个系统移出农田部分越高(产量越高),固碳潜力越大.武继承等^[40]研究表明,分期灌溉和施肥能显著提高小麦、玉米产量,且以灌水量 90~150 mm 范围内分 2 次灌溉的增产效果递增,本试验在此范围内分 2 次灌溉的处理 W_{180} 、 W_{240} 相比其他两个处理高.各处理之间的籽粒产量差异和 NGWP 差异基本一致, W_0 、 W_{120} 、 W_{180} 和 W_{240} 处理 NGWP 分别高达 15885、19083、20889 和 20867 $kg \cdot hm^{-2}$,比赵自超等^[19]的研究结果高,这是因为灌溉、机械和肥料施用等农事活动所造成的 CO_2 排放当量没有计入,而是把这一部分放入碳足迹来评价,且高籽粒产量和 N_2O 排放是 W_{180} 、 W_{240} 处理下 NGWP 高于其他两个处理的主要原因.

3.3 不同灌溉量对碳足迹的影响

许多研究在评价农田生态系统碳平衡时,只考虑了农业投入产生的碳足迹,而没有考虑土壤呼吸 CO_2 排放量、生态系统净初级生产力以及农田生态系统 CH_4 和 N_2O 的排放量^[15, 21-22, 41].本研究综合考虑这些方面分析不同灌溉量对农田生态系统碳平衡的影响.碳足迹是碳汇和碳源(总碳消耗)的差值,本

表 5 不同灌溉量处理与土壤温度(5 cm)和土壤孔隙度含水量(10 cm)的相关系数

Table 5 Spearman correlation coefficients of soil temperature (5 cm) and WFPS (10 cm) in different irrigation treatments

环境因子 Environmental factor	W_0			W_{120}			W_{180}			W_{240}		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
土壤温度 Soil temperature	0.777*	0.014	0.576*	0.891**	0.043	0.231	0.858**	0.524*	0.533*	0.864**	0.467	0.461
土壤湿度 Soil water content	0.372	-0.066	0.350	0.227	-0.036	0.234	0.563*	-0.079	0.517*	0.205	-0.021	0.412

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

试验各处理 NEE 值占碳汇的 99.2%~99.9%。成功等^[42] 研究表明,各处理 NEE 值占碳汇的 97.0%~99.7%。可见 NEE 是影响碳汇的最关键因子,而 NEE 主要受温度、降水等气候因子及施肥、灌溉等农田管理措施的影响^[43]。徐昔保等^[44] 研究表明,太湖流域典型稻麦轮作农田年 NEE 为 -7494~-7853 kg C_e·hm⁻²。这与本研究 NEE 值为 -6874~-9595 kg C_e·hm⁻² 的结果一致。本试验中,与 W₀ 处理相比, W₁₂₀ 处理未增加生态系统净初级生产力,但增加了土壤呼吸,从而增加了 NEE 和整个生态系统的碳足迹。W₁₈₀、W₂₄₀ 处理较 W₀ 处理既增加了生态系统净初级生产力也增加了土壤呼吸,使得 W₀、W₁₈₀、W₂₄₀ 处理间生态系统碳足迹无显著差异。当灌溉量增加到一定值时 NEE 值无显著差异,因为土壤水分过高会抑制土壤呼吸,且不利于作物本身的碳固定^[30],这也是 W₁₈₀ 处理碳汇最高的原因所在。从碳足迹的构成可知(图 4),碳消耗的排放来源主要是肥料、灌溉和 N₂O 排放,其中肥料占总碳消耗的 47.7%~72.2%,是总碳消耗的主要部分,这与其他学者研究结果相同^[16,42,45-46]。主要原因是化肥本身在生产和运输的过程中需要消耗大量的化石燃料,造成碳排放增加^[42]。其次是灌溉,占总碳消耗的 17.4%~28.6%。王占彪等^[22] 研究华北平原 1993—2012 年作物碳足迹构成时发现,灌溉碳足迹占总碳足迹的 32.5%。史磊刚等^[41] 研究发现,灌溉电能消耗量与作物碳足迹存在显著的正相关性。因此,发展节水节能灌溉技术将有效减少碳足迹。本研究表明,各处理 N₂O 排放仅占总碳消耗的 8.6%~11.3%,但随灌溉量增加而增加。灌溉增加了单位产量碳足迹,是因为本试验 W₁₂₀ 处理相比 W₀ 处理产量增加幅度大于碳足迹增加幅度, W₁₈₀、W₂₄₀ 处理的产量较 W₀ 处理显著增加,而碳足迹无显著差异。

4 结 论

灌溉增加了小麦产量,且灌溉 180 mm 时增产最多,灌溉 240 mm 时增产幅度减小。玉米产量随灌溉量增加而增加。温室气体方面,土壤呼吸与灌溉量呈正相关,而过量灌溉则会降低土壤呼吸,灌溉 240 mm 时 CO₂ 年际排放总量较灌溉 120 和 180 mm 减少。本研究灌溉量范围内 N₂O 的年际排放总量随灌溉量增加而增加,但 CH₄ 的年际吸收总量随灌溉量增加而减少。相关分析表明,土壤温度和水分是影响温室气体排放的重要因素。

用净增温潜势(NGWP)和碳足迹两个指标评价

时,结果存在差异。NGWP 随灌溉量增加而增加,而灌溉 120 mm 处理下碳足迹较不灌溉处理降低了 19.1%,但灌溉 180 mm、240 mm 处理与不灌溉处理相比无显著性差异。灌溉 120 mm、240 mm 处理单位产量碳足迹较不灌溉处理分别增加了 44.5%、23.3%,而灌溉 180 mm 处理与不灌溉处理无显著性差异。因此,综上两个指标考虑不同灌溉量的经济效益和环境效应,180 mm 的灌水量更有利于关中平原小麦-玉米轮作系统的节水及固碳减排。

参考文献

- [1] Metz B, Davidson OR, Bosch PR, et al. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [3] Xiao G-J (肖国举), Zhang Q (张强), Wang J (王静). Impact of global climate change on agro-ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(8): 1877-1885 (in Chinese)
- [4] Han H-Y (韩洪云), Zhao L-G (赵连阁). Development of irrigated agriculture in China: Problems and challenges. *Journal of Economics of Water Resources* (水利经济), 2004, **22**(4): 54-58 (in Chinese)
- [5] Yue J (岳进), Huang G-H (黄国宏), Liang W (梁巍), et al. Relationship between CH₄ and N₂O emissions and related microorganism populations in paddy soils under different water management regimes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(12): 2273-2277 (in Chinese)
- [6] Flanagan LB, Johnson BG. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**: 237-253
- [7] Norton U, Mosier AR, Morgan JA, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheat grass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 1421-1431
- [8] Wang J-L (王建林), Zhao F-H (赵风华), Ouyang Z (欧阳竹). Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2010, **25**(3): 186-189 (in Chinese)
- [9] Zhang Q-B (张前兵), Yang L (杨玲), Wang J (王进), et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region. *Scientia*

- Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(12): 2420–2430 (in Chinese)
- [10] Adviento-borbe MAA, Haddix ML, Binder DL, et al. Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 1972–1988
- [11] Gao Z-L (高志岭). N₂O Flux and CH₄ Uptake of Soil in Winter Wheat and Summer Maize Rotation System. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [12] Liu Q-Q (刘全全), Wang J (王俊), Chen R-R (陈荣荣), et al. Short-term response of soil CH₄ flux to simulated precipitation in a winter wheat field on the Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(1): 140–146 (in Chinese)
- [13] Minamikawa K, Sakai N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **107**: 397–407
- [14] Duan H-P (段华平), Zhang Y (张悦), Zhao J-B (赵建波), et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2011, **25**(5): 203–208 (in Chinese)
- [15] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, **30**: 981–990
- [16] Hillier J, Hawes C, Squire G, et al. The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, **7**: 107–118
- [17] Wang W-J (王文佳), Feng H (冯浩). Water requirement and irrigation systems of winter wheat: CROPWAT-DSSAT model solution in Guanzhong District. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(6): 795–802 (in Chinese)
- [18] Raich JW, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71–90
- [19] Zhao Z-C (赵自超), Han X (韩笑), Shi Y-F (石岳峰), et al. Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter and summer maize rotation system in North China. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(6): 254–262 (in Chinese)
- [20] Huang J-X (黄坚雄), Sui P (隋鹏), Gao W-S (高旺盛), et al. Effect of maize-soybean intercropping on greenhouse gas emission and the assessment in North China Plain. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2015, **20**(4): 66–74 (in Chinese)
- [21] Liu Q, Liu B, Ambus P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment: A case study in a Chinese rice cropping system. *GCB Bioenergy*, 2016, **8**: 148–159
- [22] Wang Z-B (王占彪), Wang M (王猛), Chen F (陈阜). Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2015, **48**(1): 83–92 (in Chinese)
- [23] Wang X-G (王小国), Zhu B (朱波), Wang Y-Q (王艳强), et al. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use condition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(5): 1960–1968 (in Chinese)
- [24] Mosier AR, Halvorson AD, Reule CA, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**: 1584–1598
- [25] Stocker TF, Qin D, Plattner G, et al. Climate change 2013: The physical science basis// IPCC. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 710–716
- [26] Fang B (房彬), Li X-Q (李心清), Cheng J-Z (程建中), et al. CO₂ flux in the upland field with corn-rapeseed rotation in the karst area of southwest China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(17): 5299–5307 (in Chinese)
- [27] McCulley RL, Boutton TW, Archer SR. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 820–828
- [28] Liang Y (梁艳), Hasbagan G (干珠扎布), Zhang W-N (张伟娜), et al. Effects of irrigation on biomass and greenhouse gas emissions of alpine meadow in Northern Tibet. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2015, **34**(4): 801–808 (in Chinese)
- [29] Liu XZ, Wan SQ, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, **240**: 213–223
- [30] Chen Q-S (陈全胜), Li L-H (李凌浩), Han X-G (韩兴国), et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(5): 972–978 (in Chinese)
- [31] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, et al. Emission of N₂O and CO₂ and uptake of CH₄ in soil from a satsuma mandarin orchard under mulching cultivation in central Japan. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2007, **76**: 279–287
- [32] Bai H-Y (白红英), Han J-G (韩建刚), Zhang Y-P (张一平). Mechanism of N₂O emission relying on humidity and temperature from soil. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2003, **22**(6): 724–726 (in Chinese)
- [33] Song C-C (宋长春), Wang Y-Y (王毅勇), Wang Y-S (王跃思), et al. Dynamics of CO₂, CH₄ and N₂O emission fluxes from mires during freezing and thawing season. *Environmental Science* (环境科学), 2005, **26**(4): 7–12 (in Chinese)
- [34] Liang D-L (梁东丽), Tong Y-A (同延安), Emteryd O, et al. Effect of irrigation and rainfall on the N₂O losses in dryland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2002, **8**(3): 298–302 (in Chi-

- nese)
- [35] Xie L-Y (谢立勇), Ye D-D (叶丹丹), Zhang H (张贺), *et al.* Review of factors on greenhouse gases emission from upland soils and relevant adjustment practices. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2011, **32**(4): 481-487 (in Chinese)
- [36] Dalal RC, Allen DE, Livesley SJ, *et al.* Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: A review. *Plant and Soil*, 2008, **309**: 43-76
- [37] Le Mer J, Roger P. Production oxidation emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**: 25-50
- [38] Cuello JP, Hwang HY, Gutierrez J, *et al.* Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation. *Applied Soil Ecology*, 2015, **91**: 48-57
- [39] Liu X-H (刘巽浩), Xu W-X (徐文修), Li Z-J (李增嘉), *et al.* Missteps improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficient of China's intensive farming. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*(中国农业资源与区划), 2014, **35**(1): 1-7 (in Chinese)
- [40] Wu J-C (武继承), Yang Y-H (杨永辉), Zheng H-L (郑惠玲), *et al.* Effects of stage irrigation and fertilizer coupling on crop yield and water utilization in sandy land. *Journal of Irrigation and Drainage*(灌溉排水学报), 2014, **33**(4): 35-39 (in Chinese)
- [41] Shi L-G (史磊刚), Chen F (陈阜), Kong F-L (孔凡磊), *et al.* Carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2011, **21**(9): 93-98 (in Chinese)
- [42] Cheng G (成 功), Zhang A-F (张阿凤), Wang X-D (王旭东), *et al.* Assessment of wheat straw and its bio-char effects on carbon sink in agricultural ecosystems using "carbon footprint" method. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2016, **35**(3): 604-612 (in Chinese)
- [43] Li J (李 俊), Yu Q (于 强), Sun X-M (孙晓敏), *et al.* Carbon exchange and its environmental regulation mechanism of farmland ecosystem in North China Plain. *Science in China Series D* (中国科学 D 辑), 2006, **36**(suppl.1): 210-223 (in Chinese)
- [44] Xu X-B (徐昔保), Yang G-S (杨桂山), Sun X-X (孔小祥). Analysis of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2015, **35**(20): 6655-6665 (in Chinese)
- [45] Han B (韩 宾), Kong F-L (孔凡磊), Zhang H-L (张海林), *et al.* Effects of tillage conversion on carbon sequestration capability of farm land soil doubled cropped with wheat and corn. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 91-98 (in Chinese)
- [46] Meisterling K, Samaras C, Schweizer V. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: A case study of organic and conventional wheat. *Journal of Cleaner Production*, 2009, **17**: 222-230

作者简介 刘晶晶,女,1991年生,硕士研究生.主要从事水土资源高效利用研究. E-mail: 717240336@qq.com

责任编辑 张凤丽
