

间作及减量灌溉对农田土壤 温室气体排放的互作效应

殷民兴, 赵 财, 葛丽丽, 程宝钰

(甘肃农业大学农学院省部共建干旱旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:基于2014年在甘肃省武威市设置的不同灌水水平与种植模式定位试验,设置两种灌水水平,即减量灌水(495 mm, I1)和传统灌水(540 mm, I2);3种植模式,即玉米||豌豆(M||P)、单作豌豆(P)、单作玉米(M),测定土壤呼吸速率和N₂O排放速率,并计算农田温室气体排放总量、全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)。2021—2022两年结果表明:(1)I1和M||P处理均可显著降低土壤呼吸速率、N₂O排放速率、CO₂排放总量和N₂O排放总量($P<0.05$),且减量灌水与间作种植模式交互效应显著($P<0.05$);与MPI2处理相比,MPI1处理使土壤呼吸速率、N₂O排放速率、土壤CO₂排放总量和N₂O排放总量分别降低8.39%、33.12%、8.75%和32.84%。(2)I2处理土壤温度和土壤含水量显著高于I1处理($P<0.05$);不同种植模式下,整个生育期土壤温度整体表现为M>M||P>P;相关性分析表明,土壤温度和土壤含水量与土壤呼吸速率和N₂O排放速率呈显著正相关关系。(3)灌水水平对作物产量无显著影响($P>0.05$),种植模式对作物产量影响显著($P<0.01$),表现为M||P处理产量最高;减量灌水与种植模式交互效应对GWP和GHGI影响显著($P<0.05$),MPI1处理较MPI2处理的GWP和GHGI分别降低9.45%和10.00%。在绿洲灌区,减量灌水结合玉米||豌豆种植模式能够有效提高作物产量并减少温室气体排放,可作为河西灌区推广应用的种植模式。

关键词:间作;减量灌水;土壤;温室气体排放;玉米;豌豆

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Interaction effect of intercropping and reduced irrigation on greenhouse gas emissions from farmland soil

YIN Minxing, ZHAO Cai, GE Lili, CHENG Baoyu

(State Key Laboratory of Arid Land Crop Science, College of Agronomy,
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the positioning experiment of different irrigation levels and planting patterns in Wuwei City, Gansu Province in 2014, two irrigation levels of reduced irrigation (495 mm, I1) and conventional irrigation (540 mm, I2) and three cropping patterns with maize intercropping with pea (M||P), monocropping peas (P) and monocropping maize (M) were set up. Soil respiration rate, N₂O emission rate, total greenhouse gas emissions from farmland, global warming potential (GWP), and greenhouse gas emission intensity (GHGI) were measured. The two-year results from 2021 and 2022 showed that, (1) Both I1 and M||P treatments significantly reduced soil respiration rate, N₂O emission rate, total CO₂ emissions and total N₂O emissions ($P<0.05$). The interaction between reduced irrigation and intercropping mode was significant ($P<0.05$). Compared with MPI2 treatment, MPI1 treatment reduced soil respiration rate, N₂O emission rate, total CO₂ emissions and total N₂O emissions by 8.39%, 33.12%, 8.75% and 32.84%, respectively. (2) The soil temperature and soil water content of I2 treatment were significantly higher than those of I1 treatment ($P<0.05$). Under different planting patterns, the overall soil temperature was M>M||P>P during the whole growth period. Correlation analysis showed that soil temperature and soil

water content were significantly positively correlated with soil respiration rate and N_2O emission rate. (3) The irrigation level had no significant effect on crop yield ($P>0.05$), while the planting mode had a significant effect on crop yield ($P<0.01$), indicating that M || P treatment yields were the highest. The interaction effect between reduced irrigation and planting pattern had a significant effect on *GWP* and *GHGI* ($P<0.05$), and compared with MPI2, the *GWP* and *GHGI* of MPI1 treatment were significantly reduced by 9.45% and 10.00%, respectively. In oasis irrigation area, reduced irrigation combining with maize intercropping with pea planting pattern effectively increased crop yield and reduced greenhouse gas emissions and should be used as a planting pattern for promotion and application in oasis irrigation area.

Keywords: intercropping; reduced irrigation; soil; greenhouse gas emission; maize; pea

大气中温室气体浓度不断增加导致全球气候变暖,已引起国际社会的高度重视^[1]。大气中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 对温室效应的贡献率约占 80%^[2],农业活动是温室气体重要排放源^[3],种植模式、耕作制度、灌溉和施肥等农业管理措施对温室气体排放均具有显著影响^[4]。因此,制定适宜的农田管理制度对减少农田温室气体排放、保障作物产量具有重要的实际价值。

种植模式通过改变作物群体结构使得土壤温度、含水量、根系呼吸及土壤微生物活性发生变化,从而影响土壤温室气体的排放^[5]。间作是一种被广泛应用的农业管理措施,尤其在有豆科作物参与的体系中,豆科作物固定的氮可替代部分化肥氮供作物吸收利用,可提高作物产量同时减少化肥氮投入和土壤温室气体排放^[6-9]。研究表明,与单作玉米相比,玉米 || 豌豆可年均减少碳排放 $1.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,减排量为 31%^[10]; Qin 等^[9]对河西绿洲灌区典型间作模式的土壤呼吸进行研究,证实玉米 || 豌豆降低了土壤呼吸作用;还有研究表明,玉米 || 花生、玉米 || 大豆模式下的土壤 N_2O 累积排放量分别较单作玉米降低 24.7%和 25.6%^[11],玉米 || 豌豆农田 N_2O 的排放量比单作玉米减少 26.9%^[12]。农田灌溉是一项重要的农艺措施,可通过改变土壤理化性质和土壤结构进一步影响植物根系呼吸和微生物活性,进而影响土壤温室气体排放^[13-15]。在一定变化范围内,土壤水分与温室气体通量具有显著的相关性^[16]。有研究表明,减量灌水降低了土壤 N_2O 和 CO_2 的排放通量^[17];陈慧等^[18]在不同灌水量对温室番茄影响的研究中发现,与充分灌溉相比,含水量 40%和 20%情况下土壤 CO_2 排放量分别减小 12.2%和 8.3%,土壤 N_2O 排放量分别减小 19.1%和 8.0%。已有研究多是针对单一种植模式或灌水对农田土壤温室气体排放的影响展开,灌水和间作集成种植体系下农田温室气体排放特征的研究尚不多见。

近年来,间作在西北绿洲灌区因平衡作物产量和碳排放效率而受到广泛关注^[19]。为此,本研究借助 2014 年在河西绿洲灌区开始的长期定位试验,重点探讨了不同种植模式和灌水水平对农田温室气体排放的交互效应,以期为河西绿洲灌区农田温室气体减排调控机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学河西绿洲现代农业教学科研基地进行。基地位于河西走廊东端 ($37^{\circ}96'N, 102^{\circ}64'E$),属大陆性干旱气候,多年平均降水量 156 mm,年蒸发量约 2 400 mm,多年平均气温约 $7.2^{\circ}C$,年平均无霜期 156 d。该地区是典型的一熟有余、两熟不足的生态农业区,供试土壤为灌漠土。2021—2022 年玉米全生育期温度及降雨量如图 1 所示。

1.2 试验设计

本试验为 2014 年开始的长期定位试验,采用裂区设计,设置两个灌水水平,即减量灌水 I1 (495 mm)和传统灌水 I2 (540 mm);3 种植模式,即单作玉米(M)、玉米 || 豌豆(M || P)和单作豌豆(P)。共计 6 个处理(表 1),每个处理 3 次重复,共 18 个小区,小区面积为 63 m^2 ($7.0 \text{ m} \times 9.0 \text{ m}$)。

1.3 田间管理

供试玉米品种为‘先玉 335’,豌豆品种为‘陇豌 1 号’。单作玉米种植密度为 9 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (行距 40 cm,株距 27 cm);单作豌豆种植密度为 180 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,分行种植(行距 20 cm,株距 18 cm);玉米 || 豌豆采用 3 : 4 种植(3 行玉米和 4 行豌豆交替种植),玉米行距 40 cm,株距 27 cm,豌豆行距 20 cm,株距 18 cm,玉米与豌豆间距 25 cm,其中玉米密度为 5.2 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,豌豆密度为 76 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。

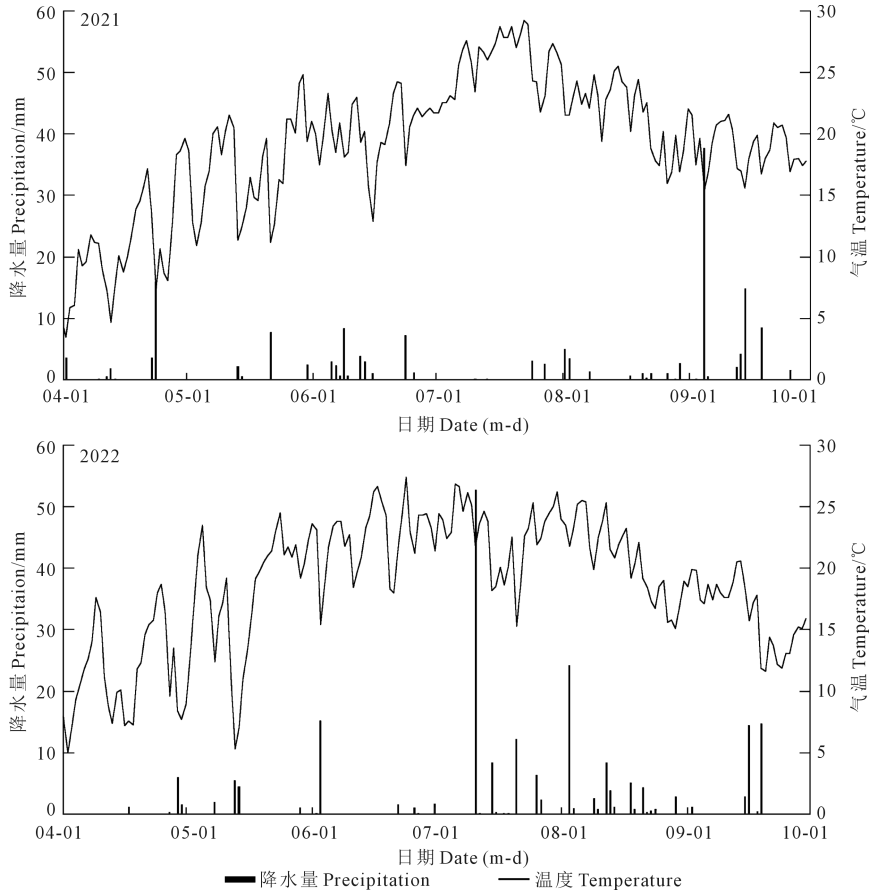


图 1 2021—2022 年研究区降水和气温变化

Fig.1 Dynamic of precipitation and average air temperature in the study area from 2021 to 2022

表 1 试验处理

Table 1 Experiment treatments codes

灌水水平/mm Irrigation level	种植模式 Cropping pattern	处理代码 Treatment code
495(11)	单作玉米(M) Monoculture maize	MI1
	玉米 豌豆(M P) Maize intercropping with pea	MPI1
	单作豌豆(P) Monoculture pea	PI1
540(12)	单作玉米(M) Monoculture maize	MI2
	玉米 豌豆(M P) Maize intercropping with pea	MPI2
	单作豌豆(P) Monoculture pea	PI2

间作处理条带宽度为 2.0 m。其中玉米带宽为 1.2 m,包括 3 行覆膜玉米;豌豆带宽为 0.8 m,包括 4 行豌豆。试验区玉米为全膜覆盖种植,白色农用地膜的宽度为 120 cm,厚度为 0.01 mm,豌豆为不覆膜种植。玉米和豌豆每年播种日期分别在 4 月 20 日和 4 月 5 日前后;收获日期分别在 9 月 20 日和 7 月 10 日前后。

供试肥料为尿素(N:P₂O₅:K₂O 为 46:0:0)和磷酸二铵(N:P₂O₅:K₂O 为 18:46:0)。玉米总施氮量为 360 kg·hm⁻²,单作玉米及间作处理的总施氮水平一致,按基肥:大喇叭口期追肥:灌浆期追肥=3:5:2 分施;豌豆总施氮量为 108 kg·hm⁻²;磷肥按照 N:P=2:1 的比例做基肥一次施入。

I1 处理玉米灌水量为 495 mm,苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期分别灌水 90、105、105、105、90 mm;豌豆灌水量为 195 mm,苗期、开花结荚期分别灌水 90、105 mm。I2 处理玉米灌水量为 540 mm,苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期分别灌水 90、120、120、120、90 mm;豌豆灌水量为 210 mm,苗期、开花结荚期分别灌水 90、120 mm。

1.4 测定指标及方法

土壤呼吸速率:于 2021—2022 年用土壤呼吸测定系统(LI-COR 8100A,美国)测定。此仪器需提前埋设配套底座,入土 5 cm,单作各小区中心埋设一个,间作小区不同作物带各埋设一个,测定时将呼吸室置于底座上,收集从土壤释放的 CO₂。豌豆

出苗 15 d 后(玉米播种后)每隔 15~20 d 测定一次。间作处理采用玉米带和豌豆带的土壤呼吸(R_s)加权平均值作为土壤呼吸速率值。本研究中,土壤呼吸速率用以表征土壤 CO_2 排放速率。

N_2O 排放速率:于 2021—2022 年使用静态箱采集 N_2O 气体,用气相色谱仪测定 N_2O 浓度。箱体为高度 50 cm、直径 45 cm 的桶状,同呼吸底座统一埋设,其下端伸入土壤并分布有均匀圆孔,以避免底座对作物根系生长的影响。豌豆出苗 15 d 后(玉米播种后)每隔 15~20 d 测定一次,每次测定于当日 10:00 开始,每隔 10 min 抽取箱内气体,并记录箱内温度。采集后将样品带回实验室,48 h 内完成样品分析。

土壤含水量:每次采集气体的同时通过烘干法测定 0~30 cm 土层的土壤水分含量。

土壤温度:用曲管地温计定位观测 0~10 cm 土层土壤温度变化。从豌豆苗期开始观测,每隔 15~20 d 观测一次,每个观测日记录 8:00、14:00、18:00 的土壤温度,并用三者的平均值作为当天测定值,直到玉米收获。

CO_2 排放总量、 N_2O 排放通量、 N_2O 排放总量、增温潜势、温室气体排放强度可分别按式(1)~(5)进行计算^[10]:

$$CE = \sum \left[\frac{R_{s(i+1)} + R_{s_i}}{2} (t_{i+1} - t_i) \times 0.1584 \times 24 \right] \times 0.2727 \times 10 \quad (1)$$

式中, CE 为土壤 CO_2 -C 排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); i 为采样次数; t 为采样间隔天数(d),其他系数表示数值单位的转换。

$$NF = \frac{273}{273 + \theta} \times 14 \times \frac{2}{22.4} \times 60 \times 10^{-3} \times h \times \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

式中, NF 为 N_2O 排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); θ 为静态箱室温 ($^{\circ}\text{C}$); 14 为 N 分子量; 2 为 N_2O 分子中的 N 分子数; 22.4 是大气压强在 101.325 kPa、气温为 273 K 时的 N_2O 摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); h 为采样箱高度 (cm); dc/dt 为单位时间采样箱内 N_2O 气体浓度的变化率 ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)。

$$NE = \sum \frac{NF_{i+1} + NF_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times \frac{28}{44} \times 24 \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中, NE 为 N_2O -N 排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); NF 为 N_2O 排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); i 为采样次数; t 为采样间隔天数(d)。

$$GWP = E(\text{CO}_2) \times \frac{44}{12} + E(\text{N}_2\text{O}) \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (4)$$

式中, GWP 为全球增温潜势 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 表征综合温室效应; $E(\text{CO}_2)$ 和 $E(\text{N}_2\text{O})$ 分别为农田净 CO_2 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 N_2O ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 排放量; 298 是 1 kg N_2O 的增温效应相对于 1 kg CO_2 的倍数(以 100 a 为计算尺度)^[20]。由于旱地农田 CH_4 排放或吸收通量微弱,故本研究将其忽略。

$$GHGI = \frac{GWP}{GY} \quad (5)$$

式中, $GHGI$ 为温室气体排放强度 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 CO_2 计); GY 为作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 进行整理;使用 SPSS 26.0 进行方差分析,采用线性回归法对温室气体排放速率与土壤水分、温度进行线性相关分析;用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 灌水量及种植模式对土壤温室气体排放速率的影响

2.1.1 土壤呼吸速率 灌水水平与种植模式对土壤呼吸速率影响显著 ($P < 0.05$), 二者交互效应对土壤呼吸速率也具有显著影响 ($P < 0.05$), 表明土壤呼吸速率受到多种因素的共同影响, 因此单靠灌水水平或种植模式都不能起到很好的调控效果。从图 2 可以看出, 土壤呼吸速率在不同年份间的总体变化趋势较为一致, 呈现出先升高后降低的单峰型趋势。

在不同灌水水平下, I1 处理土壤呼吸速率显著低于 I2 处理, PI1 较 PI2 土壤呼吸速率降低 11.66%, MPI1 较 MPI2 降低 8.35%, MI1 较 MI2 降低 15.28%。在不同种植模式下, MPI1 较 MI1 降低 6.16%, MPI2 较 MI2 降低 12.92%, 作物全生育期土壤呼吸速率表现为单作玉米 > 玉米 || 豌豆 > 单作豌豆。减量灌水与间作的互作效应显著 ($P < 0.05$), MPI1 较 MPI2 土壤呼吸速率降低 8.39%。由此看出, 在整个生育期内, 玉米 || 豌豆较单作玉米能显著降低土壤呼吸速率, 且该模式下减量灌水对土壤呼吸速率降低作用明显。因此, 在适宜的种植模式下使用合理的灌水量是降低土壤呼吸速率的有效途径。

2.1.2 N_2O 排放速率 灌水水平与种植模式对 N_2O 排放速率影响显著 ($P < 0.05$), 二者交互效应对 N_2O 排放速率也具有显著影响 ($P < 0.05$), 表明影响 N_2O 排放的因素是复杂而综合的, 单因素对 N_2O 排放速

率的影响较小。从图 3 可以看出,单作豌豆农田土壤 N_2O 排放速率主要发生在豌豆收获前,最大值出现在豌豆成熟期,之后随着生育期的进行土壤 N_2O 排放速率逐渐降低;而玉米田土壤 N_2O 排放速率峰值与灌水和追肥有关,因此总体出现了 3 个排放峰值(分别出现在 05-30、07-24 和 08-31 处)。

在不同灌水水平下, I1 处理 N_2O 排放速率显著低于 I2 处理, P11 较 P12 土壤呼吸速率降低 34.23%,

MPI1 较 MPI2 降低 33.12%, MI1 较 MI2 降低 39.00%; 在不同种植模式下, MPI1 较 MI1 降低 21.54%, MPI2 较 MI2 降低 26.11%, 作物全生育期土壤 N_2O 排放速率表现为单作玉米>玉米 || 豌豆>单作豌豆。减量灌水与间作的交互效应显著($P<0.05$), MPI1 较 MPI2 降低 N_2O 排放速率 33.12%。由此可知,减量灌水下 N_2O 排放速率在整个作物季节都明显降低,与间作种植模式相结合,可进一步降低 N_2O 排放速率。

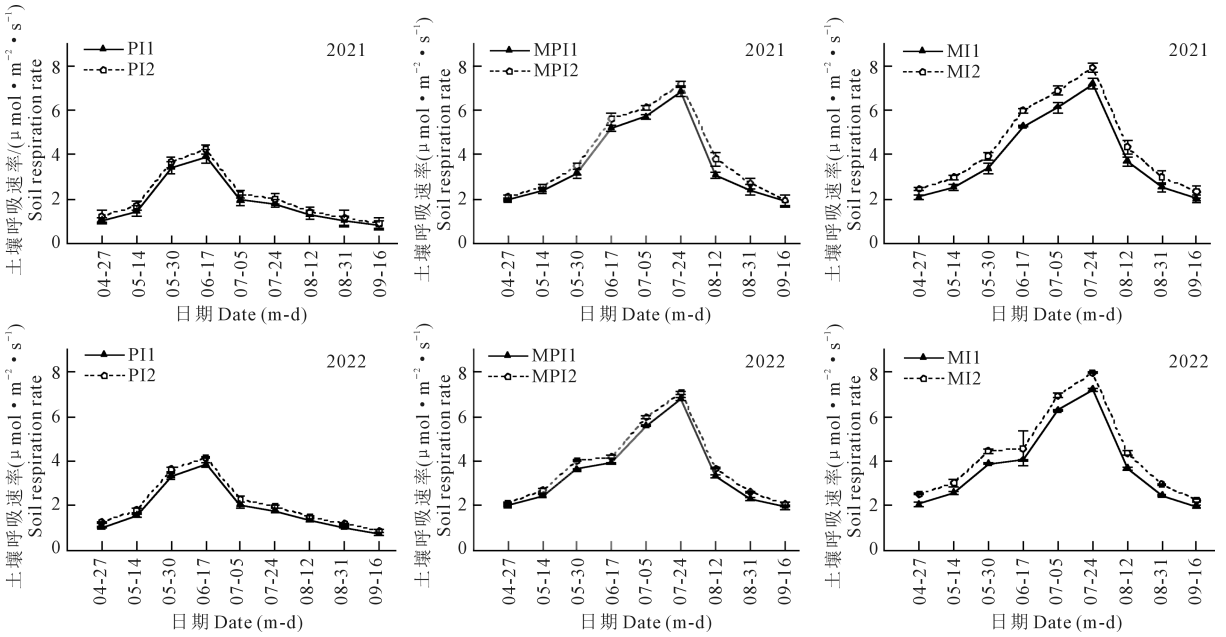


图 2 不同处理下土壤的呼吸速率

Fig.2 Soil respiration rate under different treatments

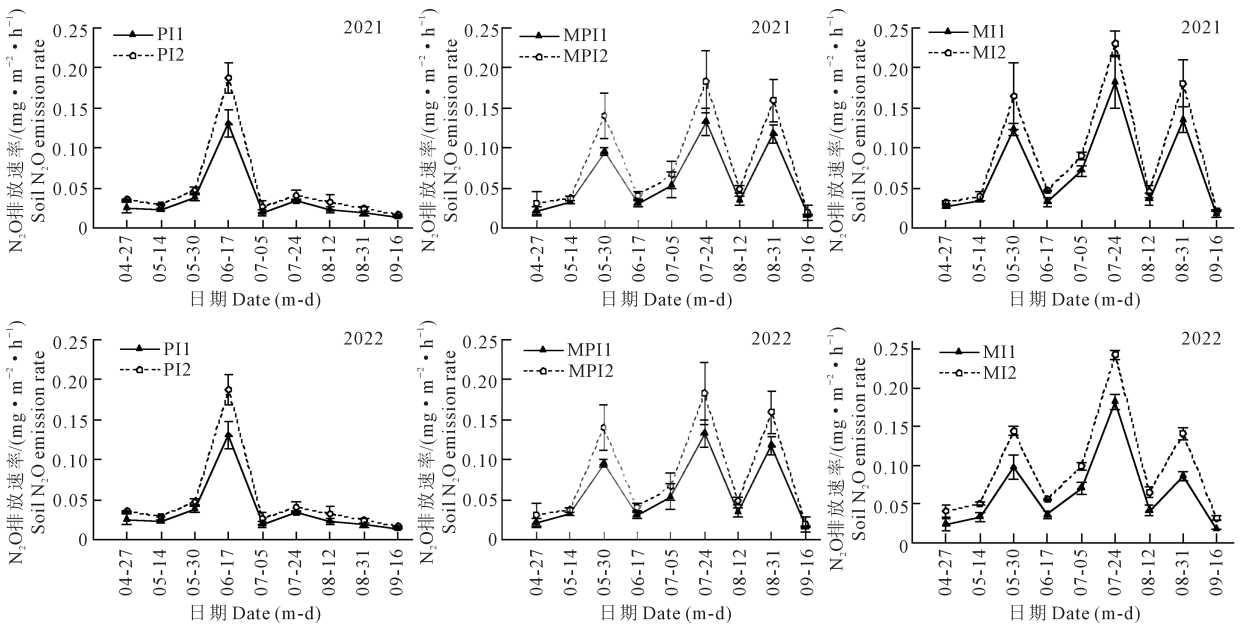


图 3 不同处理下土壤的 N_2O 排放速率

Fig.3 Soil N_2O emission rate under different treatments

2.2 灌水量及种植模式对土壤温度的影响及其相关性

2.2.1 0~10 cm 土层土壤温度 2021—2022 年不同处理作物全生育期 0~10 cm 土层平均土壤温度如图 4 所示。主效应分析表明,灌水水平对 0~10 cm 土层平均土壤温度影响显著($P<0.05$);种植模式对作物收获前、后及整个生育期 0~10 cm 土层平均土壤温度均具有显著影响($P<0.05$),而二者交互效应不显著($P>0.05$)。

不同灌水水平下, I2 处理土壤温度显著高于 I1 处理;不同种植模式下, 0~10 cm 土层平均土壤温度

表现为豌豆收获前单作玉米>玉米 || 豌豆>单作豌豆;豌豆收获后表现为单作豌豆>玉米 || 豌豆>单作玉米;整个生育期整体表现为单作玉米>玉米 || 豌豆>单作豌豆。气温是造成种植模式间土壤温度差异显著的决定性因素之一,豌豆收获后,正是试验区高温季节,而玉米生长后期气温也高于春季。

2.2.2 土壤温度与农田温室气体 CO_2 、 N_2O 排放速率的相关性 0~10 cm 土层土壤温度与农田温室气体排放关系如图 5 所示。两种作物在不同种植模式与灌水水平下, CO_2 与 N_2O 排放速率与 0~10 cm 土层

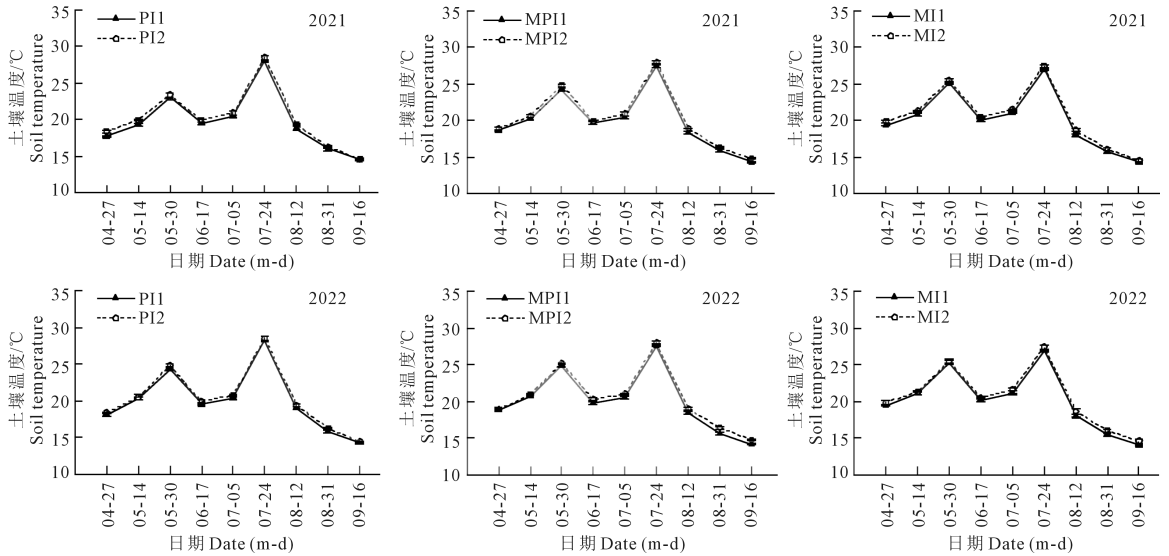


图 4 不同处理下 0~10 cm 土层的土壤温度

Fig.4 Soil temperature of 0~10 cm soil layer under different treatments

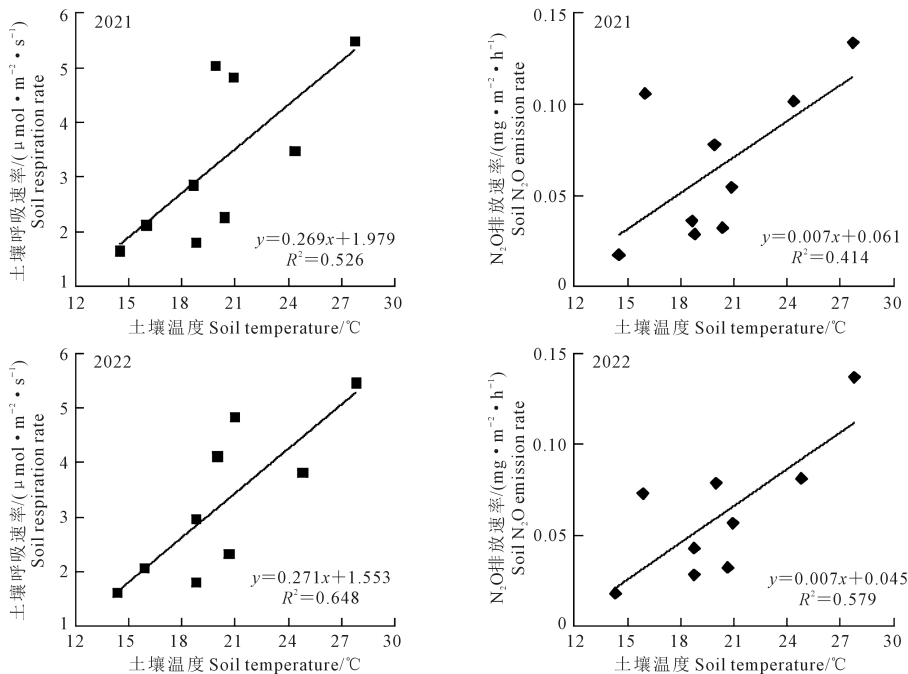


图 5 不同处理下土壤温度与农田温室气体排放速率的相关性

Fig.5 Correlation between soil temperature and greenhouse gas emission rate in farmland under different treatments

平均土壤温度呈显著线性正相关关系 ($P < 0.05$), 说明灌水处理与间作集成于同一模式下农田土壤 N_2O 与 CO_2 排放速率随着土壤温度的升高而升高。

2.3 灌水量及种植模式对土壤含水量的影响及其相关性

2.3.1 0~30 cm 土层土壤含水量 2021—2022 年不同处理作物全生育期 0~30 cm 土层平均土壤含水量如图 6 所示。主效应分析表明, 灌水水平对 0~30 cm 土层平均土壤含水量影响显著 ($P < 0.05$); 种植模式对作物收获前、后 0~30 cm 土层平均土壤含水量影响显著 ($P < 0.05$), 对单作豌豆整个生育期 0~30 cm 土层平均土壤含水量影响显著 ($P < 0.05$), 对玉米 || 豌豆和单作玉米整个生育期 0~30 cm 土层平均土壤含水量影响不显著 ($P > 0.05$), 二者交互效应对其影响不显著 ($P > 0.05$)。

不同种植模式下土壤含水量表现为豌豆收获前玉米 || 豌豆 > 单作玉米; 豌豆收获后表现为单作玉米 > 玉米 || 豌豆; 整个生育期表现为单作玉米和玉米 || 豌豆 0~30 cm 土层的土壤含水量显著高于单作豌豆 ($P < 0.05$), 但单作玉米和玉米 || 豌豆的表层土壤含水量差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.3.2 土壤含水量与农田温室气体 CO_2 、 N_2O 排放速率的相关性 0~30 cm 土层土壤含水量与农田温室气体排放关系如图 7 所示, 两种作物在不同种植模式与灌水水平下 CO_2 与 N_2O 排放速率与 0~30 cm 土层平均土壤含水量呈显著线性正相关关系 ($P < 0.05$), 说明灌水处理与间作集成于同一模式下农田土

壤 N_2O 与 CO_2 排放速率随着土壤含水量的升高而升高。

2.4 灌水量及种植模式对土壤温室气体排放总量的影响

2.4.1 CO_2 排放总量 不同处理土壤 CO_2 排放总量如图 8 所示, 灌水水平与种植模式对土壤 CO_2 排放总量影响显著 ($P < 0.05$), 且二者互作对其具有显著影响 ($P < 0.05$)。由此看出, 农田土壤 CO_2 排放的调控需同时兼顾灌水水平和种植模式的综合效应, 单一调控并不能起到最好的效果。

在不同灌水水平下, I1 处理 CO_2 排放总量显著低于 I2 处理, PI1 较 PI2 土壤 CO_2 排放总量降低 11.29%, MPI1 较 MPI2 降低 8.75%, MI1 较 MI2 降低 14.98%; 在不同种植模式下, MPI1 较 MI1 降低 6.45%, MPI2 较 MI2 降低 12.56%。减量灌水与玉米 || 豌豆的交互效应对其影响显著 ($P < 0.05$), MPI1 较 MPI2 土壤 CO_2 排放总量降低 8.75%。说明间作与减量灌水相结合具有较大的碳减排潜力。

2.4.2 N_2O 排放总量 不同处理土壤 N_2O 排放总量如图 9 所示, 灌水水平对玉米 || 豌豆和单作玉米影响显著 ($P < 0.05$), 对单作豌豆无显著影响; 种植模式显著影响作物生育期内土壤 N_2O 平均排放速率 ($P < 0.05$), 且二者互作对其影响显著 ($P < 0.05$)。

在不同灌水水平下, I1 处理 N_2O 排放总量显著低于 I2 处理, MPI1 较 MPI2 降低 N_2O 排放总量 32.84%, MI1 较 MI2 降低 38.76%; 在不同种植模式下, MPI1 较 MI1 降低 22.03%, MPI2 较 MI2 降低 26.32%。减量灌水与玉米 || 豌豆的交互效应对其影

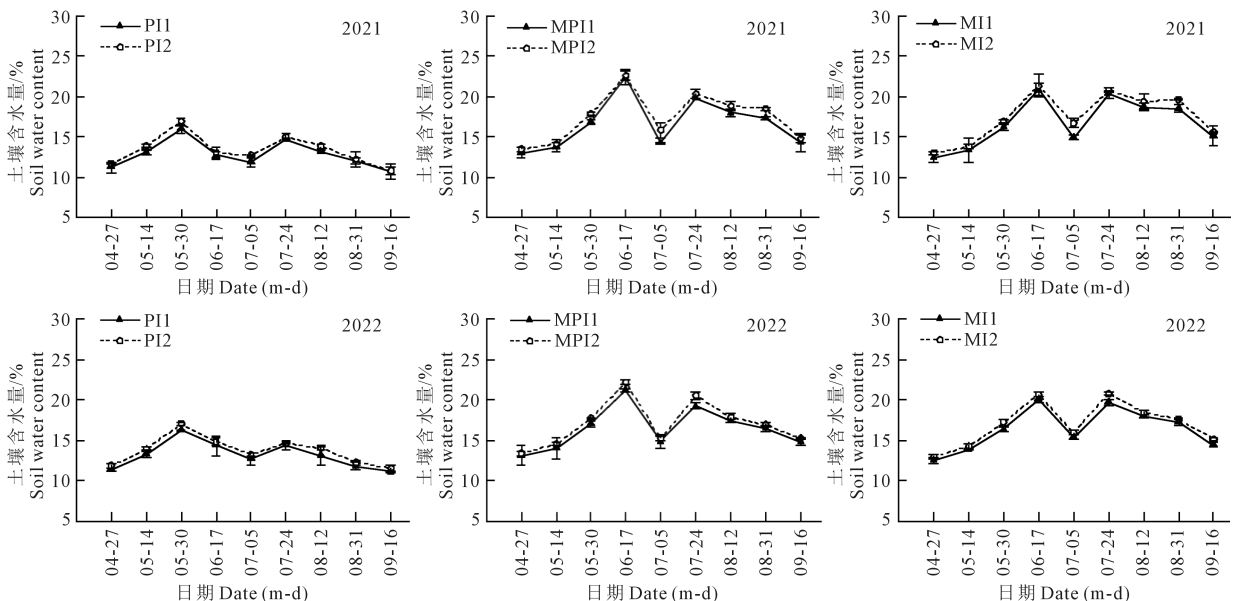


图 6 不同处理下 0~30 cm 土层的土壤含水量

Fig. 6 Soil water content of 0~30 cm soil layer under different treatments

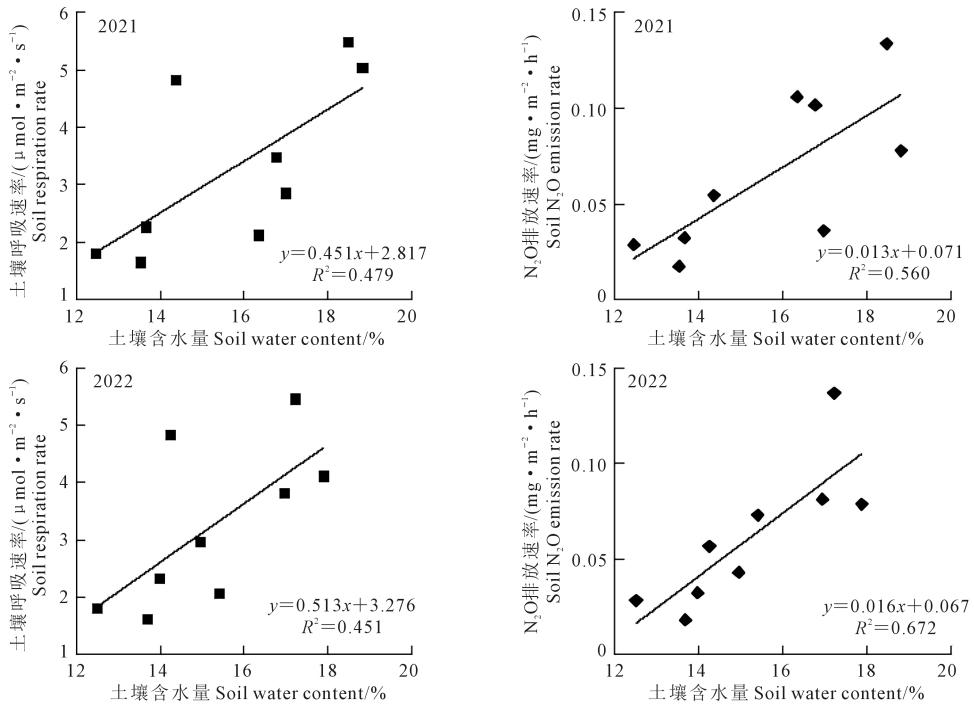
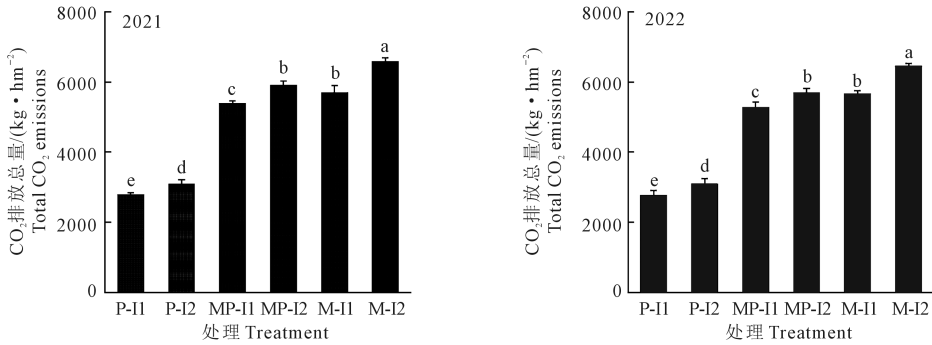


图 7 不同处理下土壤含水量与农田温室气体排放速率的相关性

Fig.7 Correlation between soil water content and greenhouse gas emission rate under different treatments



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below.

图 8 不同处理下土壤 CO₂ 排放总量

Fig.8 Total CO₂ emissions from soils under different treatments

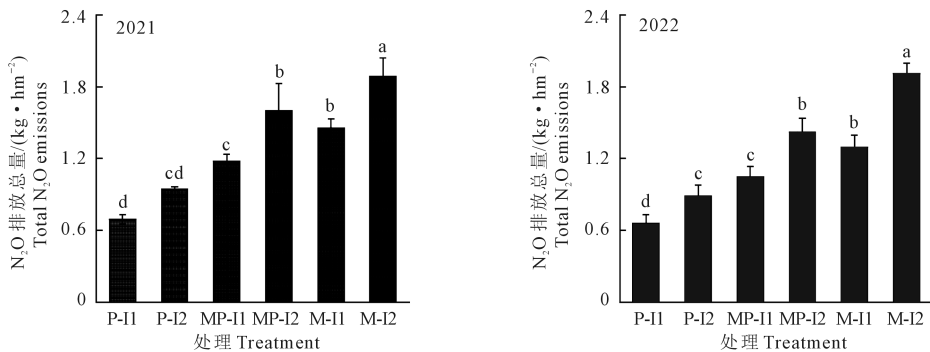


图 9 不同处理下土壤 N₂O 排放总量

Fig.9 Total N₂O emissions from soils under different treatments

显著 ($P < 0.05$), MPI1 较 MPI2 降低 N_2O 排放总量 32.84%。综上,玉米 || 豌豆较单作玉米降低了土壤 N_2O-N 排放量,而土壤 N_2O-N 排放又受到灌水水平和种植模式交互作用的综合影响,因而玉米 || 豌豆系统与减量灌水相结合有效降低了土壤 N_2O-N 排放量。

2.5 灌水量及种植模式对作物产量、增温潜势和温室气体排放强度的影响

不同处理作物产量、增温潜势和温室气体排放强度如表 2 所示。2021—2022 年,灌水水平对作物两年平均产量无显著影响 ($P > 0.05$),种植模式对作物产量影响显著 ($P < 0.01$),表现为玉米 || 豌豆产量最高。考虑到间作中豌豆和玉米两个组分作物分别占系统总面积的 8/19 和 11/19,将单作按此比例折算为与间作占有相同净地面积产量时(加权平均)可以看出,玉米 || 豌豆籽粒产量显著高于两种作物单作模式加权平均。

灌水水平和种植模式对增温潜势影响显著 ($P <$

0.05),且二者交互效应对其影响显著 ($P < 0.05$)。表明农田土壤 GWP 的调控需同时兼顾灌水水平和种植模式的综合效应。不同灌水水平下,I1 处理 GWP 显著低于 I2 处理;不同种植模式下,单作玉米的 GWP 显著大于玉米 || 豌豆,其对增温潜势的贡献最大。减量灌水与间作的交互效应对 GWP 影响显著 ($P < 0.05$),且 MPI1 处理的 GWP 较 MPI2 处理降低 9.45%。

在各处理的产量具有差异的情况下, $GHGI$ 也呈现出与 GWP 不同的变化趋势。不同灌水水平和种植模式对温室气体排放强度影响显著 ($P < 0.01$),且二者的交互效应对其影响显著 ($P < 0.05$)。不同灌水水平下,I1 处理 $GHGI$ 显著低于 I2 处理;不同种植模式下,玉米 || 豌豆的 $GHGI$ 显著低于单作玉米和单作豌豆,减量灌水与间作的交互效应显著 ($P < 0.05$),MPI1 处理下 $GHGI$ 最低,较 MPI2 处理降低了 10.00%。因此减量灌水玉米 || 豌豆系统的温室气体排放强度最低且其产量最高。

表 2 不同处理下作物产量、全球增温潜势 (GWP) 和温室气体排放强度 ($GHGI$)

Table 2 Crop yield, global warming potential (GWP) and greenhouse gas emission intensity ($GHGI$) under different treatments

处理 Treatment	2021			2022		
	作物产量 Crop yield /($kg \cdot hm^{-2}$)	全球增温潜势 GWP /($kg \cdot hm^{-2}$)	温室气体排放强度 $GHGI$ /($kg \cdot kg^{-1}$)	作物产量 Crop yield /($kg \cdot hm^{-2}$)	全球增温潜势 GWP /($kg \cdot hm^{-2}$)	温室气体排放强度 $GHGI$ /($kg \cdot kg^{-1}$)
PI1	4000.5±42.0c	10496.5±209.0e	2.62±0.080b	4028.2±71.0c	10429.1±570.0e	2.59±0.13b
MPI1	15606.4±33.0a	20281.2±337.0c	1.30±0.02e	15777.3±123.0a	19788.6±651.0c	1.25±0.05e
MI1	14515.1±292.0b	21515.6±773.0b	1.48±0.02d	14615.1±377.0b	21317.4±349.0b	1.46±0.02d
PI2	3934.2±91.0c	11733.3±478.0d	2.98±0.06a	3955.0±75.0c	11706.6±613.0d	2.96±0.12a
MPI2	15586.0±382.0a	22362.3±476.0b	1.43±0.04d	15377.5±155.0a	21498.0±453.0b	1.40±0.02de
MI2	14135.8±430.0b	25018.8±424.0a	1.77±0.07c	14041.5±369.0b	24527.7±351.0a	1.75±0.07c
灌水水平 Irrigation level	ns	* *	* *	*	* *	* *
种植模式 Cropping pattern	* *	* *	* *	* *	* *	* *
灌水水平×种植模式 Irrigation level× Cropping pattern	ns	*	*	ns	*	ns

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ns 表示无显著差异,* 和 * * 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). ns means no significant difference, * and * * mean significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

3 讨论

3.1 间作和减量灌水对土壤温室气体排放速率的影响

农田温室气体排放是近年来的研究热点,在农业生产活动中,种植模式、耕作方式、水分管理和施肥等措施都是影响农田温室气体排放的关键因素^[15,21]。本研究表明,玉米 || 豌豆能显著降低农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放。这与 Dyer 等^[22] 研究结果相似,玉米 || 大豆能显著减少土壤 CO_2 排放,降低了土

壤 N_2O 排放但未达显著性差异。黄坚雄等^[8] 研究表明,玉米 || 大豆降低了土壤 CO_2 排放,没有达到显著水平,但可以显著降低 N_2O 排放。Chai 等^[10] 研究表明,玉米分别与小麦、豌豆和油菜间作的土壤碳年平均排放量依次比单作玉米降低 24%、31% 和 44%。因为温室气体减排与间作两种作物的种间关系有关,在玉米豌豆的共生期产生竞争关系,禾本科作物根呼吸明显减弱^[9];在豌豆收获后玉米进入恢复生长期,氮素吸收利用增大,降低了土壤氮素含量,减少了土壤微生物发生硝化和反硝化作用的氮源,

使得农田土壤 N_2O 排放速率降低^[23-24]。

本研究还发现,相比传统灌水,低灌水均显著降低了作物生育期内农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放,这与王晓云等^[25]研究结果一致,即亏缺灌溉显著降低了土壤 CO_2 和 N_2O 排放。刘晶晶等^[26]研究表明,土壤呼吸随灌溉量的增加而增加,过量灌溉则会降低土壤呼吸。造成此现象的原因可能是减量灌水后土壤含水量降低,使得土壤微生物活性降低,从而抑制了微生物的呼吸,硝化和反硝化反应随之减缓,从而降低了土壤 CO_2 与 N_2O 的排放速率^[27-28]。从系统水平上比较发现,玉米||豌豆生育期 CO_2-C 和 N_2O-N 排放量比单作玉米显著降低,且在减量灌水间作系统下表现更为突出。将多种优化的农艺措施集成在同一系统中,能使不同措施的效果集中体现,从而表现出模式间的加和作用,使系统的可持续性提高。

3.2 间作和减量灌水对土壤温度和水分的影 响及其与温室气体排放的相关性

3.2.1 对土壤温度的影响及其与温室气体排放的相关性 太阳辐射是造成土壤温度变化的主要原因。在间作系统中,作物间冠层的差异使得太阳光有效辐射发生了一定的改变,进而导致不同作物的土壤温度不同^[29]。本研究发现,在共生期土壤温度表现为单作玉米高于玉米||豌豆,在豌豆收获后表现为玉米||豌豆高于单作豌豆,整个生育期整体表现为单作玉米>玉米||豌豆>单作豌豆。这与柴强等^[30]研究结果相似,即0~25 cm 土层土壤温度整体上表现为单作玉米显著高于单作小麦和小麦||玉米;王琦明^[31]研究结果同样表明,间作处理在玉米绿肥共生期内,0~10 cm 土层平均土壤温度低于单作玉米处理;绿肥翻压后,间作带地上部没有作物生长,平均叶面积指数低于单作,故间作处理土壤平均温度高于单作玉米处理。不同灌水水平下,传统灌水处理的土壤温度显著高于减量灌水处理,这与柴强等^[30]的研究结果一致,即单作小麦在中等灌水水平下土壤温度显著高于低灌水处理。

本研究结果还表明,0~10 cm 土层土壤温度与土壤 CO_2 和 N_2O 排放呈显著正相关关系,这与Tang等^[32]研究结果一致。张宇等^[33]研究表明,当温度升高到10℃以上时,0~5 cm 土层土壤含水率与土壤 CO_2 排放通量呈显著正相关关系;王晓云等^[25]研究表明,土壤 N_2O 排放通量与土壤温度呈极显著正相关关系。因为土壤温度的升高促进了土壤有机质的分解,为反硝化作用提供了底物,同时增加了土壤微生物的活性,从而增加了土壤呼吸速率和

N_2O 排放速率^[34-35]。

3.2.2 对土壤水分的影响及其与温室气体排放的相关性 土壤水分是影响温室气体排放的关键因子。种植模式可以改变土壤的受光条件,使作物棵间蒸发发生变化,影响土壤中的水分含量。本研究表明,不同种植模式下土层土壤含水量表现为豌豆收获前玉米||豌豆>单作玉米,豌豆收获后单作玉米>玉米||豌豆,整个生育期单作玉米和玉米||豌豆的表层土壤含水量差异不显著。这与李含婷等^[36]研究结果相似,玉米间作油菜或箭筈豌豆较单作玉米均可提高农田土壤含水量,且间作模式中绿肥带土壤含水量显著高于玉米带。这是因为在豌豆收获前,间作由于豌豆生物量较大且覆盖在地表,降低了作物棵间蒸发量,从而降低土壤水分的无效蒸发,增加水分入渗,提高土壤含水量^[37];豌豆收获后,单作玉米群体生长后期叶面积指数增大,降低了棵间蒸发量,从而增加了土壤含水量。灌溉措施通过改变灌水量来影响土壤含水量,在整个生育期,灌水量越大则土壤含水量越高。

本研究还发现,0~30 cm 土层土壤含水量与土壤 CO_2 和 N_2O 排放呈显著正相关关系,与Lin等^[38]研究结果一致。黄坚雄等^[8]研究表明,土壤水分与土壤 CO_2 和 N_2O 排放存在显著相关性。因为土壤水分增加,作物根呼吸和微生物活性增加,促进了土壤微生物的硝化和反硝化作用,使得农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率增加^[26,39]。

3.3 间作和减量灌水对作物产量、增温潜势和温室气体排放强度的影响

间作对光、热、水、肥等资源进行了充分利用^[40],其不同作物在营养生态位上的差异使种间产生了互补效应^[41]。本研究表明,灌水水平对作物平均产量无显著影响,而种植模式对作物产量影响显著,表现为玉米||豌豆产量显著高于相应单作,进而使间作系统产量显著高于单作加权平均产量值,表明玉米豌豆间作系统具有良好的增产效应。

全球增温潜势是评估不同温室气体对气候变化潜在效应的一个相对指标,温室气体排放强度是把全球增温潜势与作物产量相结合的综合温室效应评价指标^[1]。本研究得出,灌水水平和种植模式对全球增温潜势和温室气体排放强度有显著影响。不同灌水水平下,I1处理下的全球增温潜势和温室气体排放强度显著低于I2处理;不同种植模式下,单作玉米对增温潜势的贡献最大,玉米||豌豆的温室气体排放强度最低,显著低于单作玉米和单作豌豆,且玉米||豌豆的产量最高,这与胡发龙^[42]的研

究结果一致,间作对温室气体的减排和对产量的提高显著,并降低了作物生育期内温室气体排放强度。宋利娜等^[43]研究表明,与充分灌溉处理相比,亏缺灌溉的增温潜势较低。因为充分灌溉会提高作物生物量,增加作物固碳量,而秸秆中的碳最终会以 CO₂ 的形式排放到大气中^[25],使增温潜势提高;相比于低灌溉量,传统灌水对作物产量影响不显著,从而提高了温室气体排放强度。间作种植模式相比单作具有高产和减排温室气体的作用^[9-10],可以显著降低全球增温潜势和温室气体排放强度。说明减量灌水和间作运用在同一系统中不仅能保持玉米产量稳定,同时可降低温室气体排放强度。

4 结 论

玉米 || 豌豆与减量灌水互作可显著降低农田土壤呼吸速率、N₂O 排放速率、土壤 CO₂ 排放总量和 N₂O 排放总量。减量灌水处理显著降低了 0~10 cm 土层平均土壤温度和 0~30 cm 土层平均土壤含水量,间作条件下土壤温度低于单作玉米处理,而玉米 || 豌豆和单作玉米处理间的表层土壤含水量差异不显著;土壤温度和土壤含水量与土壤呼吸速率和 N₂O 排放速率呈显著正相关关系。灌水水平对作物产量无显著影响,间作显著提高了作物产量,其中 MPI1 处理的产量最高;减量灌水和间作互作效应显著,MPI1 处理显著降低了全球增温潜势和温室气体排放强度。

参 考 文 献:

- [1] 李晓亮,何堂庆,张晨曦,等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 948-961. LI X L, HE T Q, ZHANG C X, et al. Effect of organic fertilizer replacing chemical fertilizers on greenhouse gas emission under the conditions of same nitrogen fertilizer input in maize farmland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 948-961.
- [2] SMITH D M, CUSACK S, COLMAN A W, et al. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model [J]. *Science*, 2007, 317(5839): 796-799.
- [3] 朱晓晴,安晶,马玲,等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 977-989. ZHU X Q, AN J, MA L, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 977-989.
- [4] 王玉英,李晓欣,董文旭,等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 167-174. WANG Y Y, LI X X, DONG W X, et al. Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 167-174.
- [5] GAN Y T, LIANG C, CHAI Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5012.
- [6] JAMONT M, PIVA G, FUSTEC J. Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: does N transfer matter? [J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1): 641-653.
- [7] MEI P P, GUI L G, WANG P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil[J]. *Field Crops Research*, 2012, 130: 19-27.
- [8] 黄坚雄, 隋鹏, 高旺盛, 等. 华北平原玉米 || 大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 66-74. HUANG J X, SUI P, GAO W S, et al. Effect of maize-soybean intercropping on greenhouse gas emission and the assessment of net greenhouse gas balance in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 66-74.
- [9] QIN A Z, HUANG G B, CHAI Q, et al. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 1-10.
- [10] CHAI Q, QIN A Z, GAN Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 535-543.
- [11] HUANG J X, CHEN Y Q, SUI P, et al. Soil nitrous oxide emissions under maize-legume intercropping system in the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6): 1363-1372.
- [12] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 120-131. HU F L, CHAI Q, GAN Y T, et al. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 120-131.
- [13] 巩文军. 灌水方式对华北不同品种玉米产量形成和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 18-22. GONG W J. Effect of irrigation patterns on yield formation and water use across various maize varieties in the North China Plain [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(3): 18-22.
- [14] 谷鹏, 焦燕, 杨文柱, 等. 不同灌溉方式对农田土壤微生物丰度及通透性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 21-27. GU P, JIAO Y, YANG W Z, et al. Effects of different irrigation methods on soil microbial abundance and permeability in farmland [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(1): 21-27.
- [15] SANCHEZ-MARTÍN L, MEIJIDE A A, GARCIA-TORRES L, et al. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1/2): 99-107.
- [16] NORTON U, MOSIER A R, MORGAN J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1421-1431.
- [17] 熊浩, 张保成, 李建柱, 等. 灌水量对冬小麦农田土壤 N₂O 与 CO₂ 排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 41-50. XIONG H, ZHANG B C, LI J Z, et al. Effects of irrigation amount on emission of N₂O and CO₂ from winter wheat field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 41-50.
- [18] 陈慧, 商子惠, 王云霁, 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): 3126-3136. CHEN H, SHANG Z H, WANG Y F, 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): 3126-3136.

- [19] CHAI Q, NEMECEK T, LIANG C, et al. Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(38): e2106382118.
- [20] WANG W, GUO L P, LI Y C, et al. Greenhouse gas intensity of three main crops and implications for low-carbon agriculture in China[J]. Climatic Change, 2015, 128(1): 57-70.
- [21] 唐艺玲, 王建武, 杨文亭. 间作对旱地 CO₂和N₂O排放影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1323-1330.
TANG Y L, WANG J W, YANG W T. Effects of intercropping on soil CO₂ and N₂O emissions from upland: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1323-1330.
- [22] DYER L, OELBERMANN M, ECHARTE L. Soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions during the growing season from temperate maize-soybean intercrops[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(3): 394-400.
- [23] HU F L, GAN Y T, CHAI Q, et al. Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2016, 198: 50-60.
- [24] CHAPAGAIN T, RISEMAN A. Nitrogen and carbon transformations, water use efficiency and ecosystem productivity in monocultures and wheat-bean intercropping systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(1): 107-121.
- [25] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2413-2425.
WANG X Y, CAI H J, LI L, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2413-2425.
- [26] 刘晶晶, 张阿凤, 冯浩, 等. 不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 169-179.
LIU J J, ZHANG A F, FENG H, et al. Influences of different irrigation amounts on carbon sequestration in wheat-maize rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 169-179.
- [27] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.
- [28] YONEMURA S, NOUCHI I, NISHIMURA S, et al. Soil respiration, N₂O, and CH₄ emissions from an Andisol under conventional-tillage and no-tillage cultivation for 4 years[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(1): 63-74.
- [29] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254.
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [30] 柴强, 于爱忠, 陈桂平, 等. 单作与间作的棵间蒸发量差异及其主要影响因子[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1307-1312.
CHAI Q, YU A Z, CHEN G P, et al. Soil evaporation under sole cropping and intercropping systems and the main driving factors[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1307-1312.
- [31] 王琦明. 减氮及间作绿肥对玉米产量和土壤温室气体排放的互作效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
WANG Q M. Interaction effect of maize yield and soil greenhouse gas emission under reducing N application and intercropping green manure[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [32] TANG X L, LIU S G, ZHOU G Y, et al. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China[J]. Global Change Biology, 2006, 12(3): 546-560.
- [33] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦土壤呼吸及各组贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3354-3360.
ZHANG Y, ZHANG H L, CHEN J K, et al. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3354-3360.
- [34] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1093-1098.
LIU S, LI Y E, SUN X H, et al. Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1093-1098.
- [35] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田N₂O排放的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 7-10.
XIE J F, LI Y E. Effect of soil temperature on N₂O emission in upland farm of Beijing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(1): 7-10.
- [36] 李含婷, 柴强, 王琦明, 等. 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2608-2618.
LI H T, CHAI Q, WANG Q M, et al. Water use characteristics of maize-green manure intercropping under different nitrogen application levels in the oasis irrigation area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(12): 2608-2618.
- [37] ANUGROHO F, KITOU M, NAGUMO F, et al. Potential growth of hairy vetch as a winter legume cover crops in subtropical soil conditions[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2010, 56(2): 254-262.
- [38] LIN S, IQBAL J, HU R G, et al. N₂O emissions from different land uses in mid-subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 136(1/2): 40-48.
- [39] 吕海波, 梁宗锁. 黄土区刺槐林土壤含水量变化对土壤呼吸强度的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 44-48, 52.
LYU H B, LIANG Z S. Effect of different soil water contents on soil respiratory intensity of *Robinia pseudoacacia* forest in loess area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 44-48, 52.
- [40] LITHOURGIDIS A S, DORDAS C A, DAMALAS C A, et al. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(4): 396-410.
- [41] 肖焱波, 段宗颜, 金航, 等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 267-271.
XIAO Y B, DUAN Z Y, JIN H, et al. Spared N response and yields advantage of intercropped wheat and fababean[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2007, 13(2): 267-271.
- [42] 胡发龙. 氮肥后移与玉米间作豌豆对土壤温室气体减排的协同效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
HU F L. The synergetic effect of N-fertilizer postponing application and maize-pea intercropping on the reduction of soil GHG emissions[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [43] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297-307.
SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 297-307.