

咸淡水组合灌溉模式对棉田土壤 CO₂ 日排放特征影响

李会文¹, 管瑶^{1*}, 贺兴宏^{1,2}, 范德宝¹, 王育强¹

(1.塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2.塔里木大学 南疆岩土工程研究中心, 新疆 阿拉尔 843000)

摘要:【目的】探究咸淡水组合灌溉对棉田 CO₂ 日排放通量的影响。【方法】采用 4 种水质, 即淡水(CK)和矿化度分别为 2(S1)、3(S2)、5 g/L(S3)的微咸水; 4 种咸水淡水灌溉配比, 即微咸水: 淡水为 1:1(P1)、1:4(P2)、4:1(P3)和 1:0(P4), 分析咸淡水组合灌溉对棉田灌溉前后土壤 CO₂ 日排放特征影响。【结果】①与 CK 相比, S1、S2、S3 处理土壤 CO₂ 日平均排放通量分别显著降低了 12.64%~24.35%、18.30%~26.69%、22.16%~28.57%($P<0.05$)。②CK 的土壤 CO₂ 累计排放量显著高于其他各处理, S1 处理与 S2、S3 处理土壤 CO₂ 累计排放量存在显著差异($P<0.05$), 但 S2、S3 处理之间无显著差异($P>0.05$)。③相同微咸水矿化度条件下, 4 种咸水淡水灌溉对比对土壤 CO₂ 日平均排放通量影响为 P2 处理<P1 处理<P3 处理<P4 处理。④土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率、土壤温度正相关, 与箱内气体温度、土壤 pH 值、土壤电导率负相关。【结论】选用 2 g/L 微咸水与淡水按 1:4 施配比例灌溉对土壤盐分积累和 CO₂ 气体排放影响较小, 是灌区合理利用微咸水的一种灌溉方案。

关键词: 微咸水水质; 组合灌溉; 灌溉配比; 土壤 CO₂ 日排放通量

中图分类号: S152.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022700

OSID: 

李会文, 管瑶, 贺兴宏, 等. 咸淡水组合灌溉模式对棉田土壤 CO₂ 日排放特征影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 60-67.

LI Huiwen, GUAN Yao, HE Xinghong, et al. Effects of Irrigation with Mixed Saline and Fresh Waters on CO₂ Emission from Cotton Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 60-67.

0 引言

【研究意义】CO₂ 对全球温室效应加剧的贡献率达到了 60%左右, 每年大气 CO₂ 有 5%~20%来自土壤^[1]。农田生态系统土壤 CO₂ 排放是陆地生态系统 CO₂ 排放的重要影响因素之一, 对全球土壤碳排放也有重要影响^[2]。干旱半干旱地区水资源短缺问题日益突出, 微咸水作为淡水资源的替代资源, 合理开发和利用微咸水是解决干旱地区淡水资源短缺的重要措施。微咸水是指矿化度在 2~5 g/L 范围内的水资源^[3], 通过微咸水与淡水组合灌溉, 不仅可以降低土壤蒸发量, 将盐分淋洗至周围, 减小盐分对作物的影响, 还能提高灌溉水分的利用效率^[4]。灌溉不仅对土壤整体环境产生影响, 还影响土壤呼吸速率和 CO₂ 排放通量。因此, 研究咸淡水组合灌溉下土壤 CO₂ 日排放规律对土壤固碳减排具有重要意义。

【研究现状】目前, 关于土壤碳排放影响的研究主要集中在耕作方式、灌溉水量、施肥模式和秸秆还田等方面。张俊丽等^[5]指出, 夏玉米生长季, 深松、

免耕、旋耕和翻耕 4 种耕作方式下土壤呼吸速率随生育期推进均呈先增加后减少的趋势; 陈慧等^[6]研究表明, 番茄生育期内土壤 CO₂ 排放通量随灌水量增加逐渐增大; 刘春海等^[7]研究发现, 有机肥和化肥配施促进了水稻生育盛期 CO₂ 排放; 武开阔等^[8]研究表明, 玉米秸秆还田通过促进微生物生物量增加并加剧有机质消耗来促进土壤 CO₂ 排放, 并随玉米秸秆还田量的增加而显著增加。此外, 灌溉作为农业生产活动中重要管理措施, 对农田生态系统和大气之间温室气体交换和碳排放有重要影响。新疆地处我国西北干旱地区, 淡水资源短缺, 利用微咸水灌溉的农业实践经验丰富, 但长期微咸水灌溉会导致土壤盐分积累严重, 土壤质量下降, 更会对土壤温室气体排放产生重要影响。

【切入点】现阶段灌溉对土壤 CO₂ 排放影响的研究主要集中于灌水量和施肥, 关于不同矿化度微咸水与淡水组合灌溉对土壤 CO₂ 排放的相关研究还比较少。【拟解决的关键问题】为此, 以南疆地区膜下滴灌棉田为研究对象进行田间试验, 采用 4 种水质, 设置 4 种咸水淡水灌溉配比, 研究咸淡水组合灌溉对土壤理化性质变化和 CO₂ 气体日排放特征影响, 以期为南疆地区节水灌溉和固碳减排提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 7—8 月在塔里木大学水利与建筑

收稿日期: 2022-12-22 修回日期: 2023-03-20 网络出版日期: 2023-05-24
基金项目: 兵团南疆重点产业创新发展支撑计划项目(2021DB017); 中国农业大学塔里木大学联合基金项目(2019TC157)

作者简介: 李会文(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤碳排放方面的研究。E-mail: lhw17423@163.com

通信作者: 管瑶(1975-), 女, 教授, 博士, 主要从事水生态保护及水资源高效利用方面研究。E-mail: 417512676@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

工程学院节水灌溉试验基地进行。试验区地处东经 81°17′，北纬 40°32′，试验期间平均土壤温度为 25.78 °C，平均气温为 30.06 °C，平均湿度为 24.71%，地下水埋深 3.5 m，试验期间逐日温度及降水量如图 1 所示。试验用地土壤为砂质壤土，黏粒质量分数、粉粒质量分数、砂粒质量分数分别为 3.40%、32.95% 和 63.65%，土壤体积质量为 1.33 g/cm³，播种前土壤 pH 值为 7.81，电导率为 161.15 μS/cm。

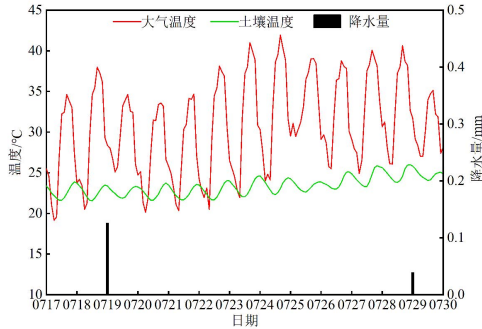


图 1 试验期间大气温度、土壤温度及降水量

Fig.1 Temperature change and rainfall during the test

1.2 试验设计

试验设置淡水灌溉 CK，3 种不同矿化度微咸水与淡水组合灌溉，组合灌溉顺序均为先灌咸水后灌淡水，灌溉方式为膜下滴灌，微咸水的矿化度分别为 S1 (2 g/L)、S2 (3 g/L)、S3 (5 g/L)，每种微咸水下设置 4 种咸水淡水灌溉配比， ω (微咸水) : ω (淡水) 分别为 P1 (1 : 1)、P2 (1 : 4)、P3 (4 : 1)、P4 (1 : 0)，共计 13 个处理，每个处理设置 3 个重复，具体试验方案如表 1 所示。小区面积 7.0 m² (3.5 m×2.0 m)，各小区之间用塑料薄膜隔开，薄膜埋深 40 cm。种植模式为 1 膜 3 管 6 行的宽窄行，设置膜宽为 200 cm，宽行距为 60 cm，窄行距为 30 cm，株距 20 cm。滴灌带布置在窄行中心，滴灌带直径为 16 mm，滴头间距为 20 cm，滴头流量为 4.0 L/h。播种前施入底肥磷酸二铵 (190 kg/hm²) 和尿素 (50 kg/hm²)，于棉花蕾期、花铃期和吐絮期按 2 : 2 : 1 随滴灌追施尿素，总施氮量为 270 kg/hm²。各处理灌水频率为 7 d/次，每次灌水定额为 225 m³/hm²，供试棉花品种为“塔河一号”。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	灌溉水 矿化度/ (g L ⁻¹)	微咸水:淡水	处理	灌溉水 矿化度/ (g L ⁻¹)	微咸水:淡水
CK	0.5	0 : 1	-	-	-
P1S1	2	1 : 1	P3S1	2	4 : 1
P1S2	3	1 : 1	P3S2	3	4 : 1
P1S3	5	1 : 1	P3S3	5	4 : 1
P2S1	2	1 : 4	P4S1	2	1 : 0
P2S2	3	1 : 4	P4S2	3	1 : 0
P2S3	5	1 : 4	P4S3	5	1 : 0

1.3 取样及测定方法

1.3.1 气体样品的采集与测定

棉花花铃期逐日采集与测定灌水前后棉田土壤 CO₂ 气体，共监测 2 个灌水周期。利用静态箱对土壤 CO₂ 气体进行原位采集，静态箱分为顶箱和底座 2 个部分，材质为 2 mm 厚的不锈钢(底座尺寸为 50 cm×50 cm×15 cm，顶箱尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm)。箱内顶部布置 1 个风扇用于将箱内气体混合均匀，箱内设有温度计插槽用于观测箱内气体温度变化，箱外布设有 2 cm 厚的泡沫板和胶带防止采样时箱内气体温度升高过快。底座提前安放在各试验小区行与行的中间，每个小区 1 个底座，每次采集气体时向底座凹槽内注水密封保证装置的气密性。气体采集时间为 11:00—13:00，在罩箱后 0、10、20、30 min 的 4 个时间点采集 4 次，利用三通阀与 50 mL 注射器从箱体内部抽取气体装入 100 mL 的集气袋中。采集后的气体样品利用气相色谱仪 (Agilent 7890A) 测定，土壤 CO₂ 排放通量计算式为：

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{Dc}{Dt} \times \frac{273}{273+T}, \quad (1)$$

式中：F 为 CO₂ 排放通量 (mg/ (m² h))； ρ 为 CO₂ 在标准状态下的密度 (g/cm³)；V、A 为顶箱体积和底面积；Dc/Dt 为采样时 CO₂ 浓度随时间变化的斜率 (采用线性回归拟合)；T 为箱内平均温度 (°C)。

土壤 CO₂ 累计排放量计算式为：

$$M = \frac{(F_i + F_{i+1}) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24}{2 \times 100}, \quad (2)$$

式中：M 为土壤 CO₂ 累计排放量 (kg/hm²)；F 为土壤 CO₂ 排放通量 (mg/ (m² h))；i 为采样次数；t 为采样时间 (d)。

1.3.2 土壤理化性质测定

采集 CO₂ 气体时用提前埋置好的地温计测定土壤温度；采集完 CO₂ 气体样品后在底座周围钻取 0~40 cm 的膜下土样，利用烘干法在 105 °C 测定各土层土壤质量含水率。利用电导率仪 (DDSJ-308A) 测定土壤电导率 (EC_{1:5})；土壤 pH 值通过 pH 计 (PHS-3C) 测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2021 处理数据，使用 Origin 2019 软件绘图，通过 IBM SPSS Statistics 26.0 软件的 LSD 和 Duncan 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 咸淡水组合灌溉下土壤 CO₂ 排放通量的动态变化

各处理土壤 CO₂ 排放通量变化趋势如图 2 所示。各处理土壤 CO₂ 排放通量变化类似，均呈先增大后减

小的趋势, 2次灌水后各处理土壤 CO_2 排放通量均有明显上升, 而后逐渐下降, 各处理土壤 CO_2 的排放峰值共出现 2 次, 均出现在灌水施肥后 1 d。CK 的平均 CO_2 排放峰值为 $425.12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CO_2 日平均排放通量为 $350.98 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。P1S1、P2S1、P3S1、P4S1 处理平均 CO_2 排放峰值分别为 359.99、376.45、345.75、308.29 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 与 CK 相比, P1S1、P2S1、P3S1、P4S1 处理的 CO_2 日平均排放通量分别显著减少了 17.37%、12.64%、20.21%、24.35% ($P < 0.05$)。P1S2、P2S2、P3S2、P4S2 处理平均 CO_2 排放峰值分别为 350.34、364.34、323.76、306.38 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 与 CK

相比, P1S2、P2S2、P3S2、P4S2 处理的 CO_2 日平均排放通量分别显著减少了 22.23%、18.30%、25.26% 和 26.69% ($P < 0.05$), 其余处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。P1S3、P2S3、P3S3、P4S3 处理平均 CO_2 排放峰值分别为 336.68、334.43、310.56、290.12 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 与 CK 相比, P1S3、P2S3、P3S3、P4S3 处理的 CO_2 日平均排放通量分别显著减少了 23.60%、22.16%、26.98% 和 28.57% ($P < 0.05$), 但 4 个处理之间差异并不显著 ($P > 0.05$)。这表明土壤 CO_2 日排放通量随微咸水矿化度和咸水淡水灌溉配比的增加而减小。

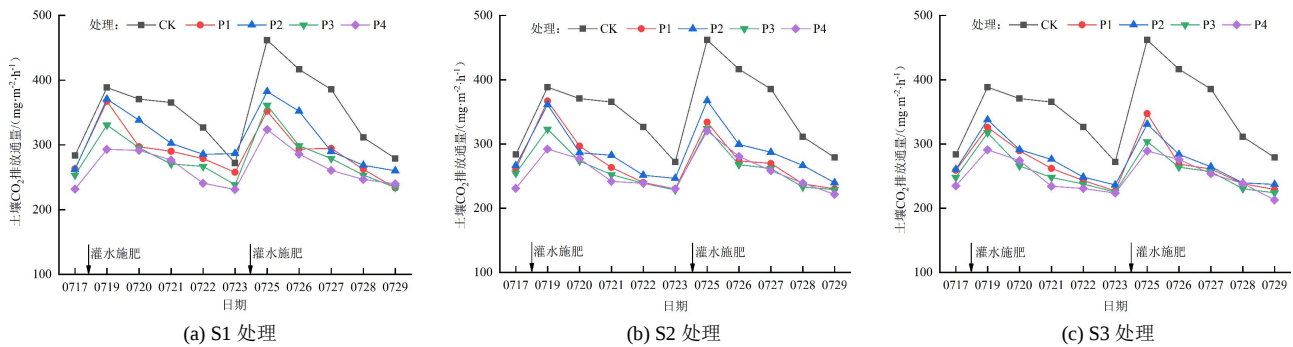


图 2 不同处理土壤 CO_2 排放通量

Fig.2 CO_2 emission flux from soil with different treatments

2.2 咸淡水组合灌溉下土壤 CO_2 累计排放量的变化规律

图 3 为不同处理土壤 CO_2 平均排放通量及累计排放量。由图 3 可知, CK 的土壤 CO_2 累计排放量最大, 为 $85.91 \text{ g}/\text{m}^2$, 显著高于其他处理; P4S3 处理土壤 CO_2 累计排放量最小, 为 $52.68 \text{ g}/\text{m}^2$ 。不同咸水淡水

灌溉配比下, S1 处理与 S2、S3 处理土壤 CO_2 累计排放量均存在显著差异 ($P < 0.05$), 但 S2 处理和 S3 处理之间无显著差异 ($P > 0.05$), 故微咸水矿化度可以抑制土壤 CO_2 排放, 但微咸水矿化度超过一定阈值对 CO_2 排放的影响并不显著。

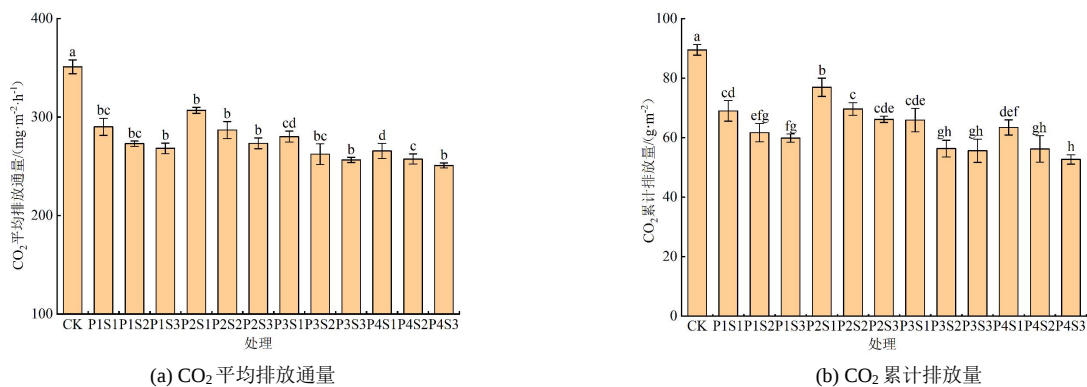


图 3 不同处理土壤 CO_2 平均排放通量及累计排放量

Fig.3 Average emission flux and cumulative emission of CO_2 from soils under different treatments

2.3 土壤 CO_2 排放的影响因素分析

2.3.1 箱内气体温度与土壤温度

图 4 为不同处理箱内气体温度及土壤温度变化。由图 4 可知, 不同处理下箱内气体温度均高于土壤温度, 箱内气体温度与土壤温度的动态变化趋势整体保持一致。试验期间 CK 的箱内气体平均温度和土壤平均温度分别为 27.58°C 和 24.27°C ; S1 处理箱内气体平均温度和土壤平均温度分别为 $28.08\sim 31.18^\circ\text{C}$ 和 $24.40\sim 27.41^\circ\text{C}$; S2 处理箱内气体平均温度和土壤平

均温度分别为 $29.19\sim 31.42^\circ\text{C}$ 和 $24.68\sim 27.01^\circ\text{C}$; S3 处理箱内气体平均温度和土壤平均温度分别为 $29.09\sim 30.87^\circ\text{C}$ 和 $25.34\sim 26.35^\circ\text{C}$ 。微咸水矿化度对土壤温度的影响并不显著 ($P > 0.05$), 但由表 4 可知, 箱内气体温度和土壤温度存在一定正相关关系, 相关系数 0.827。

2.3.2 土壤含水率

图 5 为不同处理 0~20、20~40 cm 土层土壤含水率。由图 5 可知, 各处理土壤含水率变化基本保持一

致，在灌水后第 1 天土壤含水率均达到峰值，随后呈递减趋势。各处理 0~20、20~40 cm 土层土壤含水率基本表现为 P4S3 处理最大，CK 最小，且灌水后这种现象最为明显。与 CK 相比，S1、S2、S3 处理土壤含水率分别增加 6%~43%、16%~44%和 23%~48%，

这表明微咸水矿化度显著影响了土壤含水率 ($P<0.05$)，土壤含水率随微咸水矿化度增大显著增大 ($P<0.05$)。由表 4 可知，土壤含水率与土壤 CO₂ 排放通量显著正相关 ($P<0.01$)。

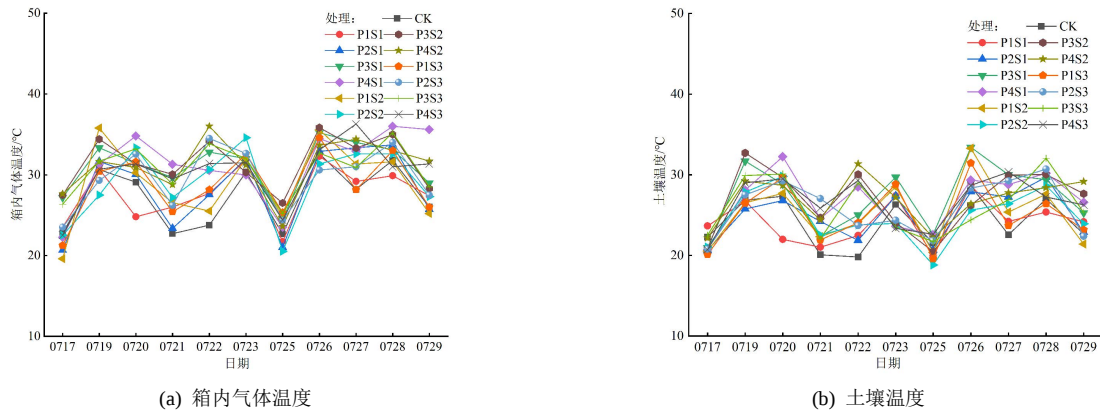


图 4 不同处理箱内气体温度及土壤温度变化

Fig.4 Change of gas temperature inside the box and soil temperature with different treatments

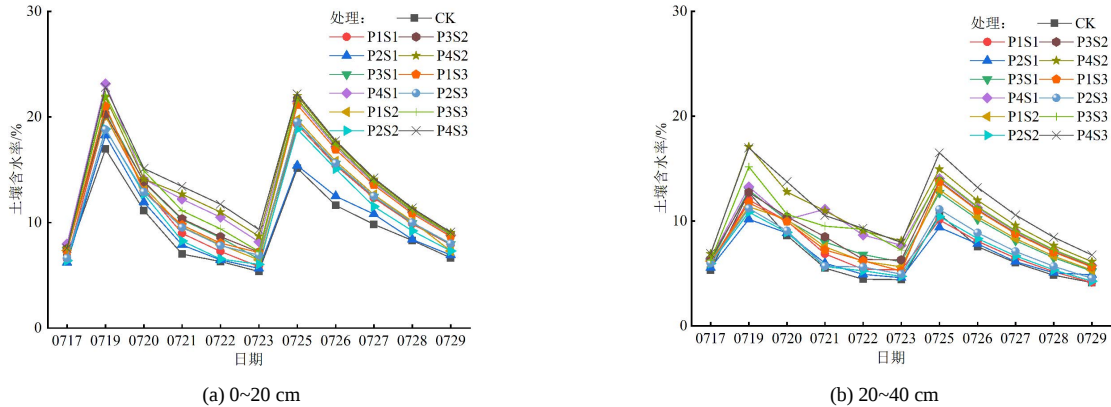


图 5 不同处理土壤含水率动态变化规律

Fig.5 Changes in soil water content under different treatments

图 6 为不同微咸水矿化度下土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率拟合。土壤含水率 (W) 是影响微咸水与淡水组合灌溉下土壤 CO₂ 排放的重要因素，其解释了 50%~66% 的土壤 CO₂ 排放的变化。S1、S2、S3 处理微咸水与淡水组合灌溉处理下的拟合方程为： $Y=-0.14W^2+9.77W+193$ 、 $Y=0.23W^2+0.02W+229.39$ 、 $Y=0.17W^2+0.48W+223.43$ 。不同矿化度微咸水与淡水组合灌溉下土壤 CO₂ 排放通量均与土壤含水率显著正相关，土壤 CO₂ 排放通量随土壤含水率的增加显著增加。

2.3.3 土壤水热因素的综合作用

通过建立以土壤温度 (T) 和土壤含水率 (W) 为自变量，土壤 CO₂ 排放通量为因变量的双因素复合模型，S1、S2、S3 矿化度微咸水与淡水组合灌溉处理下的拟合方程详见表 3， R^2 在 0.702~0.846 之间，与单因素模型相比 ($R^2=0.504\sim0.658$)，土壤温度与土壤含水率双因素复合模型可以更全面地解释土壤 CO₂ 排放的变化。由图 7 可知，当土壤温度一定时，S1、S2、S3 处理下土壤 CO₂ 排放通量均随土壤含水

率的增加而增大；当土壤含水率一定时，S1、S2 处理土壤 CO₂ 排放通量随土壤温度的增加而增大，S3 处理土壤 CO₂ 排放通量先随土壤温度的增加而减小，下降至土壤温度 25 °C 左右时，土壤 CO₂ 排放通量随土壤温度的增加而增大。

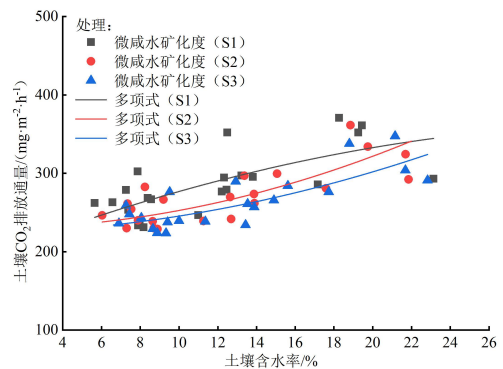


图 6 不同微咸水矿化度下土壤 CO₂ 排放通量与土壤含水率拟合

Fig.6 Relationship between soil CO₂ emission flux and soil water content at different brackish water mineralization levels

表 2 不同处理平均土壤含水率、温度、电导率和 pH 值

Table 2 Average soil moisture content, temperature, electrical conductivity and pH value under different treatment						
指标	处理	P1	P2	P3	P4	平均值
土壤含水率/%	S1	11.52	10.03	12.06	13.47	11.77C
	S2	11.85	10.97	12.81	13.62	12.31B
	S3	12.48	11.65	13.19	14.05	12.84A
	平均值	11.95c	10.89d	12.69b	13.71 ^a	
土壤温度/℃	S1	24.40	25.20	27.41	26.57	25.89A
	S2	25.50	24.68	26.54	26.88	25.90A
	S3	25.34	25.78	25.90	26.35	25.84A
	平均值	25.08b	25.22b	26.62a	26.60a	
土壤电导率/ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	S1	260.97Cc	211.25Cd	272.51Cb	358.91Ca	275.91
	S2	266.44Bc	227.13Bd	285.49Bb	373.08Ba	288.04
	S3	271.08Ac	255.24Ad	304.61Ab	422.07Aa	313.25
	平均值	266.16	231.21	287.54	384.69	
土壤 pH 值	S1	8.11Bbc	8.08Ac	8.16Cb	8.25Ca	8.13
	S2	8.17Ab	8.10Ac	8.21Bb	8.31Ba	8.20
	S3	8.20Ac	8.13Ad	8.27Ab	8.38Aa	8.24
	平均值	8.16	8.07	8.21	8.31	

注 同列数字后不同大写字母表示不同矿化度微咸水处理间差异显著 ($P<0.05$), 同行数字后不同小写字母表示不同咸淡水施肥比例处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 土壤 CO_2 排放通量与土壤温度和

含水率双因素回归方程拟合

Table 3 Fitting of two-factor regression equation of soil CO_2 emission flux with soil temperature and water content

矿化度	拟合方程	拟合优度 R^2
S1	$F=0.850T^2-33.302T-0.130W^2+5.201W+533.045$	0.782
S2	$F=0.686T^2-26.250T+0.104W^2-1.203W+484.841$	0.846
S3	$F=0.773T^2-40.012T+0.064W^2+3.527W+714.482$	0.702

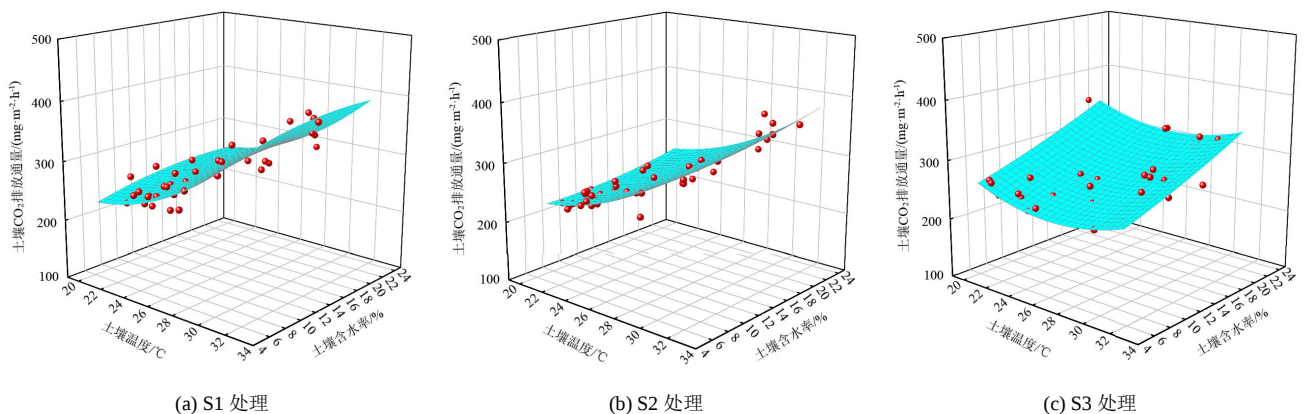
2.3.4 土壤电导率与 pH 值

如图 8 所示, 试验期间各处理土壤电导率整体均有所增加, CK 的土壤电导率较其他处理增长缓慢。微咸水矿化度和咸水淡水灌溉配比对土壤电导率存在显著影响 ($P<0.05$, 表 2); 与 S1 处理相比, S2、S3 处理土壤电导率分别显著增加了 2%~7% 和 3%~20%, 且在同一咸水淡水灌溉配比下, S2、S3 处理与 S1 处理之间均存在显著差异 ($P<0.05$)。由图 8 可知, 各处理土壤 pH 值随灌水施肥呈先减小后增大的趋势, 在灌水后第 2~第 3 天土壤 pH 值下降至最小值。当矿化度为 5 g/L 时, 不同咸水淡水灌溉配比对土壤 pH 值具有显著影响 ($P<0.05$); 当咸水淡水灌溉配比为 P3、P4 时, 微咸水矿化度对土壤 pH 值存在显著影响 ($P<0.05$), 故土壤 pH 值随微咸水矿化度和咸水淡水灌溉配比的增大而增加。

表 4 土壤 CO_2 排放通量与各影响因素的相关分析Table 4 Correlation analysis of soil CO_2 emission flux with each influencing factor

指标	CO_2 排放通量	箱内气体温度	土壤温度	土壤含水率	土壤电导率	土壤 pH 值
CO_2 排放通量	1					
箱内气体温度	-0.233**	1				
土壤温度	0.128	0.827**	1			
土壤含水率	0.668**	0.026	0.154	1		
土壤电导率	-0.493**	0.054	-0.002	-0.147	1	
土壤 pH 值	-0.635**	-0.010	-0.025	-0.277**	0.789**	1

注 **代表变量间极显著相关 ($P<0.01$)。

图 7 不同微咸水矿化度下土壤 CO_2 排放通量对土壤含水率和土壤温度的响应曲面Fig.7 Response surface of soil CO_2 emission flux to soil water content and temperature under different brackish water mineralization

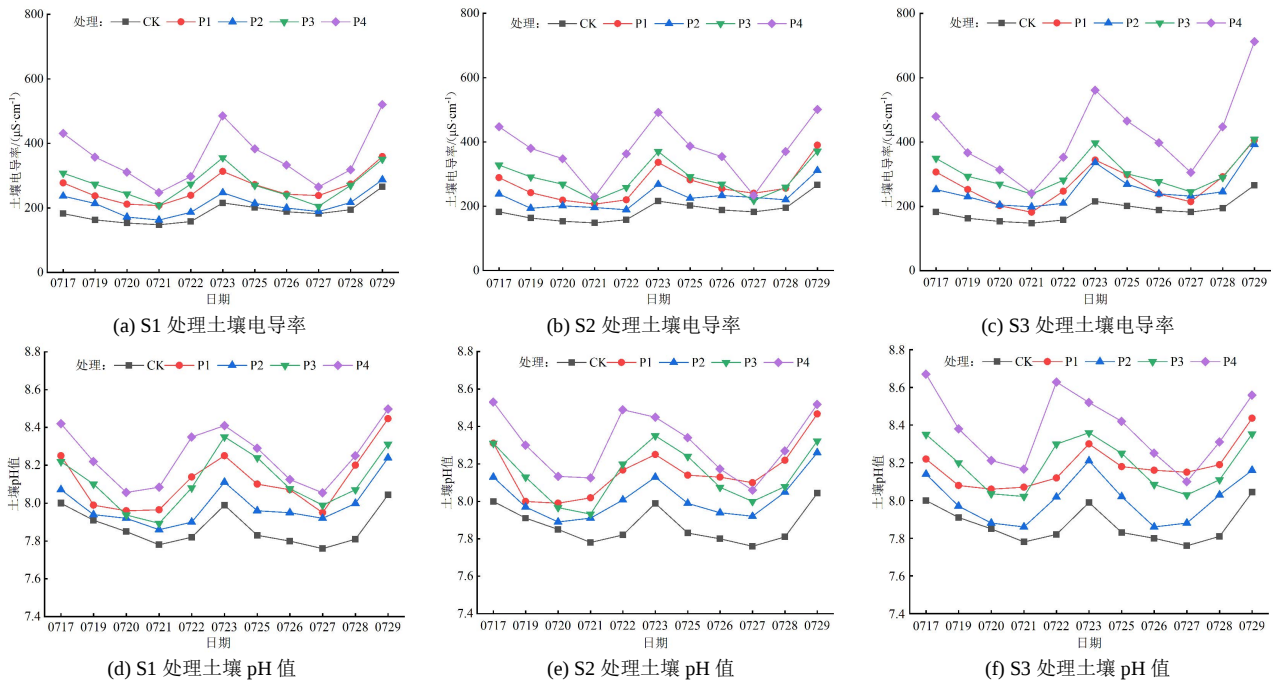


图 8 不同处理土壤电导率和 pH 值随时间变化

Fig.8 Soil conductivity and pH change with time under different treatments

3 讨论

灌溉水盐分会影响土壤微生物的数量、种类、活性和利用碳源的能力,并通过渗透胁迫改变土壤酶的活性,造成土壤环境整体活性下降^[9],从而影响土壤 CO₂ 排放通量。王帅杰等^[10]研究表明,土壤 CO₂ 排放通量随灌溉水盐分的增加而减小;张前前等^[11]在研究微咸水滴灌对土壤 CO₂ 排放通量的影响时发现,不同处理对土壤 CO₂ 排放通量影响表现为淡水>微咸水≥咸水。这都与本研究结果一致。本试验发现, S1 矿化度微咸水与淡水组合灌溉下土壤 CO₂ 排放通量与累计排放量均显著高于 S2 处理和 S3 处理。微咸水灌溉会增加土壤盐分,改变土壤渗透势和孔隙度^[12],进而影响土壤 CO₂ 排放。在灌水施肥后 1 d,各处理土壤 CO₂ 排放均出现排放峰值,这可能是由于灌水施肥提高了土壤含水率,且肥料通过灌水后基本完成水解,促进了土壤根际呼吸和微生物活性,加快了土壤有机质的分解,从而显著提高土壤 CO₂ 排放通量^[13]。这表明灌水和施肥在提高土壤水分和养分的同时可能也会增加土壤 CO₂ 排放,但微咸水和淡水组合灌溉下,微咸水矿化度的增加也会抑制土壤 CO₂ 排放,这与以往大多数试验研究^[10,14-15]结果一致。

土壤温度和土壤含水率是影响土壤 CO₂ 排放的重要因素^[16]。土壤温度与土壤呼吸速率正相关^[17],与本研究结果一致,虽然土壤温度与土壤 CO₂ 排放正相关,但相关性并不显著。土壤水分与土壤 CO₂ 排放通量之间并非简单的线性关系,土壤水分参与了土壤环境中众多反应过程,通过影响土壤根系呼吸、土壤孔

隙、微生物活性以及土壤结构等多个方面来调控土壤 CO₂ 排放^[18]。李贤红^[19]研究表明,土壤 CO₂ 排放速率随土壤含水率的增大而增加;单独分析土壤水分对 CO₂ 排放的影响时,二者相关性并不大,土壤水分和温度相互协调对 CO₂ 排放通量产生影响^[5,20-22]。这与本研究结果相符,通过土壤温度和含水率双因素复合模型解释了 70.2%~84.6% 的土壤 CO₂ 排放规律,高于单因子模型,说明土壤温度和土壤含水率并非单独作用于土壤 CO₂ 排放,而是共同交互作用于土壤 CO₂ 排放。

微咸水和淡水组合灌溉也可能通过影响土壤盐分和 pH 值来影响土壤 CO₂ 排放。郭慧楠等^[23]研究表明,长期利用微咸水灌溉会导致土壤盐分、含水率显著增加。本研究发现, S1、S2、S3 矿化度微咸水与淡水组合灌溉下土壤 EC 值较 CK 分别提高 13.3%~92.5%、21.8%~100% 和 36.9%~126%,表明不同矿化度微咸水明显提高了土壤盐分。微咸水灌溉在显著增加土壤耕层盐分的同时,也会导致土壤导水率和入渗速率下降,微咸水中的 Na⁺ 会增大土壤钠吸附比,进而提高土壤 pH 值^[24],这与本研究结果类似。本研究表明,不同矿化度微咸水和淡水组合灌溉会导致 pH 值升高。Wang 等^[25]认为利用微咸水灌溉后,土壤中异养微生物活性降低,土壤 CO₂ 排放也相应减少,王国栋等^[26]研究表明,长期利用微咸水灌溉后,土壤生物量、酶活性和有机质量与淡水灌溉相比均显著下降,土壤温室气体排放也显著降低。本研究表明,随着微咸水矿化度和咸淡水施配比例的增加,土壤 CO₂ 排放通量相应减少。这可能是微咸水和淡水组合灌溉通过提高土

壤盐分和 pH 值, 抑制土壤中微生物和酶活性, 减少土壤中生物量和有机碳量, 导致土壤呼吸强度减弱, 从而抑制土壤 CO₂ 排放; 同时土壤耕层盐分和 pH 值的增大, 也会减小土壤孔隙度和蒸发量、抑制作物吸水导致土壤含水率提高, 而过高的土壤含水率会阻止土壤中 O₂ 扩散^[5], 抑制作物根系呼吸, 进而导致土壤 CO₂ 排放通量减少。

4 结 论

1) 微咸水矿化度相同时, 在淡水灌溉 (CK) 和 4 种咸水淡水灌溉配比下, 土壤含水率、pH 值和电导率表现均为: CK<P2 处理<P1 处理<P3 处理<P4 处理; 咸水淡水灌溉配比相同时, 土壤含水率、pH 值和电导率表现均为: CK<S1 处理<S2 处理<S3 处理。

2) 咸淡水组合灌溉抑制土壤 CO₂ 气体的排放。微咸水矿化度相同时, 与 CK 相比, P1、P2、P3、P4 处理土壤 CO₂ 日平均排放通量分别减少了 17.37%~23.6%、12.64%~22.16%、20.21%~26.98%、24.35%~28.57%; 咸水淡水灌溉配比相同时, 与 CK 相比, S1、S2、S3 处理土壤 CO₂ 日平均排放通量分别降低了 12.64%~24.35%、18.30%~26.69%、22.16%~28.57%。

3) 本试验条件下, 选用 2 g/L 微咸水与淡水按 1:4 施配比例用于灌溉时, 土壤盐分、pH 值、CO₂ 排放通量和累计排放量相对较低, 可为该地区合理利用微咸水灌溉、节约淡水资源、保护农田生态环境提供理论参考。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975.
- [2] 谢婷, 张慧, 苗洁, 等. 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 839-848.
XIE Ting, ZHANG Hui, MIAO Jie, et al. Greenhouse gas emission characteristics and source/sink analysis of farmland ecosystem in Hubei Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 839-848.
- [3] HU S J, SHEN Y J, CHEN X L, et al. Effects of saline water drip irrigation on soil salinity and cotton growth in an oasis field[J]. Ecohydrology, 2013, 6(6): 1 021-1 030.
- [4] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [5] 张俊丽, 张锦丽, 赵晓进, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤 CO₂

- 排放量及其与土壤水热的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 88-93.
ZHANG Junli, ZHANG Jinli, ZHAO Xiaojin, et al. Effects of different tillages on soil CO₂ flux, and its relation to soil moisture and soil temperature in dry-land maize field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 88-93.
- [6] 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.
- [7] 刘春海, 傅民杰, 吴凤日. 不同施肥类型对北方稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1 653-1 658.
LIU Chunhai, FU Minjie, WU Fengri. Effect of different fertilizer types on emissions of greenhouse gas in the Northern paddy[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(7): 1 653-1 658.
- [8] 武开阔, 张哲, 武志杰, 等. 不同秸秆还田量和氮肥配施对玉米田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 664-670.
WU Kaiquo, ZHANG Zhe, WU Zhijie, et al. Effects of different amounts of straw return and nitrogen fertilizer application on soil CO₂ emission from maize fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 664-670.
- [9] GARCIA-GIL J C, PLAZA C, SOLER-ROVIRA P, et al. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(13): 1 907-1 913.
- [10] 王帅杰, 杨培岭, 苏艳平, 等. 微咸水与淡水轮灌对春玉米土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 41-48.
WANG Shuaijie, YANG Peiling, SU Yanping, et al. Effects of alternative irrigation between brackish water and fresh water on CO₂ and N₂O emission from spring maize soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 41-48.
- [11] 张前前, 王飞, 刘涛, 等. 微咸水滴灌对土壤酶活性、CO₂ 通量及有机碳降解的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2 743-2 750.
ZHANG Qianqian, WANG Fei, LIU Tao, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO₂ flux and organic matter decomposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2 743-2 750.
- [12] 魏琛琛, 任树梅, 徐子昂, 等. 灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 251-260, 236.
WEI Chenchen, REN Shumei, XU Ziang, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation water amount on greenhouse gas emissions and spring maize growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 251-260, 236.
- [13] 白雪原, 红梅, 杨彦明, 等. 施肥对河套灌区土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 66-70.
BAI Xueyuan, HONG Mei, YANG Yanming, et al. Fertilization affects the emission of CO₂ and N₂O in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 66-70.
- [14] 邹其会, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水与微咸水灌溉对土壤温室气体排放的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 80-82.
ZOU Qihui, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Effects of reclaimed water irrigation and brackish water irrigation on soil greenhouse gas emissions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 80-82.
- [15] 高大伟, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 168-174.
GAO Dawei, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 168-174.
- [16] 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.
- [17] 王洁茹, 陈居田, 赵俊辉, 等. 不同土地利用方式下温度对土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 100-104.
- WANG Jieru, CHEN Jutian, ZHAO Junhui, et al. Effects of temperature on soil CO₂ emission under different land use patterns[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2020, 46(1): 100-104.
- [18] WICHERN F, LUEDELING E, MÜLLER T, et al. Field measurements of the CO₂ evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a mountain oasis of Oman[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 25(1): 85-91.
- [19] 李贤红. 滨海盐碱地垦殖土壤呼吸特征及其影响因子研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- LI Xianhong. Characteristics and influencing factors in soil respiration of different reclamation in coastal saline soil[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [20] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 363-371.
- HAN Guangxuan, ZHOU Guangsheng, XU Zhenzhu, et al. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in a maize field[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 363-371.
- [21] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1 916-1 925.
- ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al. Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1 916-1 925.
- [22] 任立军, 赵文琪, 李金, 等. 不同施肥模式对设施土壤 CO₂ 排放特征及碳平衡的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 874-881.
- REN Lijun, ZHAO Wenqi, LI Jin, et al. Characteristics of soil CO₂ emission and carbon balance in greenhouse soil under different fertilization patterns[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 874-881.
- [23] 郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 等. 咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放和反硝化细菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2 455-2 467.
- GUO Huinan, MA Lijuan, HUANG Zhijie, et al. Nitrous oxide emission and denitrifying bacterial communities as affected by drip irrigation with saline water in cotton fields[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2 455-2 467.
- [24] WEI C C, LI F H, YANG P L, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N₂O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation[J]. Water, 2019, 11(8): 1 548.
- [25] WANG Y, YANG P L, REN S M, et al. CO₂ and N₂O emissions from spring maize soil under alternate irrigation between saline water and groundwater in Hetao irrigation district of Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(15): 2 669.
- [26] 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 44-48.
- WANG Guodong, CHU Guixin, LIU Yu, et al. Effects of long-term irrigation with brackish groundwater on soil microbial biomass in cotton field in arid oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 44-48.

Effects of Irrigation with Mixed Saline and Fresh Waters on CO₂ Emission from Cotton Fields

LI Huiwen¹, GUAN Yao^{1*}, HE Xinghong^{1,2}, FAN Debao¹, WANG Yuqiang¹

(1. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

2. Nanjiang Geotechnical Engineering Research Center of Tarim University, Alar 843000, China)

Abstract: 【Objective】 In northwestern China, freshwater resources are scarce while saline water is abundant. Irrigation using mixed fresh and saline waters has been adopted as an improved practice to maximize water resource use and sustain agricultural production in this region. This paper is to study the effect of mixed saline and fresh water irrigation on CO₂ emissions from cotton fields. 【Method】 Saline waters with salt concentration of 2 (S1), 3 (S2), and 5 g/L (S3) were used in the experiment. Each saline water was mixed with freshwater at four ratios (saline water/freshwater): 1 : 1 (P1), 1 : 4 (P2), 4 : 1 (P3) and 1 : 0 (P4). The mixed waters were used to drip-irrigate the cottons. The emission of CO₂ from soil irrigated by different mixed waters was measured daily using static headspace-gas chromatography method. 【Result】 Compared with freshwater irrigation, irrigation with mixed saline and fresh waters reduced average daily CO₂ emissions from the soil by 12.64% to 28.57% ($P < 0.05$), depending on the mixture ratio and concentration of the saline water. The cumulative CO₂ emissions under freshwater irrigation were significantly higher than that from other irrigations. There was a significant difference ($P < 0.05$) in cumulative CO₂ emissions between the soil irrigated by saline water with salinity of 2 g/L and those irrigated by saline waters with salinity of 3 g/L and 5 g/L. No significant difference in CO₂ emission was found between soils irrigated by saline waters with salinity of 3 g/L and 5 g/L. When water salinity was the same, the impact of saline-freshwater ratio on daily CO₂ emissions was ranked in the order of 1 : 4 < 1 : 1 < 4 : 1 < 1 : 0. Correlation analysis showed that CO₂ fluxes from the soils were significantly correlated to temperature, pH and electrical conductivity of the soils. 【Conclusion】 Mixing freshwater and saline water with salinity of 2 g/L at ratio of 1 : 4 (saline water/freshwater) had the least effect on soil salt accumulation and CO₂ emission. It can be used as an effective irrigation practice for cotton production in northwestern China.

Key words: brackish water quality; combined irrigation; irrigation proportion; daily CO₂ emission from soil

责任编辑: 白芳芳