

灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响

魏琛琛¹ 任树梅¹ 徐子昂² 张美桃¹ 魏榕³ 杨培岭¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 武汉市青山区水务和湖泊局, 武汉 430080;

3. 北京市大兴区水务局, 北京 102600)

摘要: 为揭示地下水与微咸水灌溉条件下灌水量对土壤 CO₂、N₂O 排放和春玉米生长的影响, 设置 2 种灌溉水含盐量(1.1、5.0 g/L)和 3 种灌水量(210、255、300 mm), 于 2019 年 4—9 月在内蒙古自治区河套灌区进行了春玉米田间试验。结果表明, 不同灌水量下, 微咸水(含盐量 5.0 g/L)灌溉比地下水(含盐量 1.1 g/L)灌溉土壤 N₂O 累积排放量提高了 19.86%~44.21%, 但利用微咸水灌溉并不会影响土壤 CO₂ 累积排放量与全球增温潜势。在相同的灌溉水盐分条件下, 灌水量为 300 mm 时土壤 CO₂、N₂O 累积排放量和全球增温潜势均最大, 灌水量为 210 mm 和 255 mm 时并不会对土壤 CO₂、N₂O 的累积排放量和全球增温潜势产生显著影响。相关性分析表明, 土壤含水率和无机氮含量是影响土壤 CO₂、N₂O 排放的重要因素, 灌溉水盐分通过促进土壤的硝化作用促进土壤 N₂O 排放。在微咸水灌溉条件下, 春玉米产量较地下水灌溉减少了 30.88%~37.32%。随着灌水量的增大, 春玉米产量呈增加趋势, 但 255 mm 和 300 mm 灌水量条件下的春玉米产量差异不显著。在地下水与微咸水灌溉条件下, 灌水量为 255 mm 时, 土壤盐分累积较小, 春玉米产量较高, 土壤 CO₂、N₂O 累积排放量和全球增温潜势相对较小, 是灌区适宜采用的灌溉定额。

关键词: 春玉米; 灌溉水盐分; 灌水量; 土壤 CO₂ 排放; 土壤 N₂O 排放; 土壤性质

中图分类号: S274; S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0251-10

OSID:



Effects of Irrigation Water Salinity and Irrigation Water Amount on Greenhouse Gas Emissions and Spring Maize Growth

WEI Chenchen¹ REN Shumei¹ XU Ziang² ZHANG Meitao¹ WEI Rong³ YANG Peiling¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Wuhan Qingshan District Water and Lakes Bureau, Wuhan 430080, China

3. Beijing Daxing Water Resources Bureau, Beijing 102600, China)

Abstract: In order to reveal the effects of irrigation water amount on soil CO₂, N₂O emissions and spring maize growth under groundwater and brackish water irrigation, two kinds of irrigation water salinity (1.1 g/L and 5.0 g/L) and three kinds of irrigation water amounts (210 mm, 255 mm and 300 mm) were set up in Hetao Irrigation District from April to September, 2019. The results showed that compared with groundwater (1.1 g/L) irrigation, soil N₂O emissions were increased by 19.86%~44.21% under brackish water (5.0 g/L) irrigation, but irrigation water salinity did not affect soil CO₂ emissions and global warming potential (GWP). Under the same irrigation water salinity conditions, cumulative CO₂ emissions, cumulative N₂O emissions and GWP were the largest when the irrigation water amount was 300 mm, and the cumulative CO₂ emissions, cumulative N₂O emissions and GWP were not significantly affected by the irrigation water amount of 210 mm and 255 mm. The results of correlation analysis showed that soil moisture and inorganic nitrogen content were important factors affecting soil CO₂ and N₂O emissions, and irrigation water salinity promoted soil N₂O emissions by promoting soil nitrification. The yield of spring maize under brackish water (5.0 g/L) irrigation was 30.88%~37.32% lower than that under groundwater (1.1 g/L) irrigation. The yield of spring maize was increased with the increase of

收稿日期: 2020-09-21 修回日期: 2021-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408703)和国家自然科学基金项目(51679239, 51909265)

作者简介: 魏琛琛(1992—), 男, 博士生, 主要从事土壤碳氮循环研究, E-mail: weichenchen@cau.edu.cn

通信作者: 杨培岭(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: yangpeiling@126.com

irrigation water amount, but there was no significant difference under the irrigation water amount of 255 mm and 300 mm. Under the condition of groundwater (1.1 g/L) and brackish water (5.0 g/L) irrigation, when the irrigation water amount was 255 mm, the soil salt accumulation was smaller, while the higher spring maize yield was obtained, and the cumulative CO₂ and N₂O emissions and GWP were relatively small, which was the suitable irrigation quota for Hetao Irrigation District.

Key words: spring maize; irrigation water salinity; irrigation water amount; soil CO₂ emissions; soil N₂O emissions; soil properties

0 引言

河套灌区的农业生产长期依赖于过境的黄河水进行灌溉,由于政策性节水,河套灌区的引黄水量将减少至 40 亿 m³ (减少 20% 以上),这使当地的农业生产面临巨大的挑战^[1]。因此,寻找农业灌溉替代水源、并制定合理的灌溉定额对河套灌区农业可持续发展具有重要意义。

由于高蒸发、低降雨的气候条件,加之常年不合理的灌溉,河套灌区地下微咸水(矿化度 2~5 g/L)储量丰富,可利用量达 7.21 亿 m³,具有较大的利用潜力^[2-3]。因此,利用微咸水代替淡水灌溉是解决当地农业水资源短缺的有效措施之一。利用微咸水灌溉能够提供作物生长所需的水分,但也会导致土壤盐分累积,改变土壤环境,进而影响作物生长^[4-5]。膜下滴灌通过“多次少量”的局部湿润方式,不但可以减少土壤蒸发、将盐分淋洗至湿润体周围、减小盐分对作物的不利影响,而且还能够提高水分与养分的利用效率,被认为是利用微咸水灌溉的有效方式^[6]。土壤水分根据“盐随水动”的原则控制土壤中盐分的运移,当灌水量较低时,盐分会在土壤表面累积,且较少的水分不能满足作物生长的需求;当灌水量较高时,土壤盐分与养分会被淋洗至深层土壤,这不仅降低了水分与养分的利用效率,被淋洗的盐分和养分还会污染地下水。因此,在地下水与微咸水灌溉条件下,探究不同灌水量对作物及土壤性质的影响对于选取适宜河套灌区的地下水与微咸水灌溉模式具有重要意义。

不同的灌溉水盐分和灌水量不仅对土壤理化性质、作物生长产生影响,还会影响土壤温室气体的排放。CO₂ 和 N₂O 是导致全球变暖的 2 种主要的温室气体,土壤被证实是 CO₂ 和 N₂O 的主要排放源,所排放的 CO₂ 和 N₂O 分别约占全球人为排放的 26% 和 59.4%^[7-8]。土壤 CO₂ 和 N₂O 主要通过土壤根际呼吸与微生物参与的硝化、反硝化过程进行排放^[9-10]。灌溉水盐分会通过影响土壤根际呼吸、酶和微生物活性,进而影响土壤 CO₂ 和 N₂O 排放。目前,对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放影响的研究多集中于耕作、灌溉与施肥等因素,而关于灌溉水盐分对土壤

CO₂ 和 N₂O 排放影响的研究相对较少,且结论尚未达成一致^[11-13]。例如,邹其会等^[14]在冬小麦-夏玉米轮作试验中观测到,灌溉水盐分显著降低了土壤 CO₂、N₂O 排放;KONTOPOULOU 等^[15]在希腊用咸水灌溉大豆后发现,灌溉水盐分不会影响土壤 CO₂、N₂O 排放;MARTON 等^[16]收集不同盐度的潮汐土壤进行培养试验,发现盐分在一定程度上促进了土壤 CO₂、N₂O 排放。土壤水分是影响温室气体排放的重要因素,主要通过影响土壤 O₂ 浓度、酶和微生物活性以及气体在土壤中的扩散速率来影响温室气体排放^[17]。研究表明,土壤水分对温室气体排放的影响存在阈值,过高或过低的土壤水分含量均会抑制温室气体排放^[18]。目前,关于土壤水分对温室气体排放的研究主要集中于不同灌溉方式与施肥梯度条件下,对不同灌溉水盐分条件下的相关研究仍然缺乏。在地下水与微咸水灌溉条件下,探讨避免盐分累积和作物减产、且温室气体排放较少的最优灌溉模式对灌区农业可持续发展具有重要意义。

本文于 2019 年在河套灌区以膜下滴灌春玉米为研究对象进行田间试验,在 3 种不同灌水量条件下,研究地下水与微咸水灌溉对土壤理化性质(含水率、电导率、pH 值、铵态氮含量、硝态氮含量)、温室气体排放及春玉米生长的影响,旨在为河套灌区制定适宜的地下水与微咸水灌溉定额提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 4—9 月在内蒙古自治区巴彦淖尔市曙光试验站(40°46'N,107°24'E)开展。试验区为典型的干旱大陆性气候,多年平均降雨量 142.1 mm,平均蒸发量 2 306.5 mm。试验期间平均土壤温度为 17.6℃,累积降雨量为 63.68 mm,逐日气象条件如图 1a 所示。试验区耕层土壤为粉砂壤土,砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为 29.93%、62.38% 和 7.69%,田间持水率为 19.80%,容重为 1.50 g/cm³。播前土壤 pH 值为 8.89,电导率为 292.98 μS/cm,铵态氮质量比为 1.87 mg/kg,硝态氮质量比为 7.96 mg/kg。

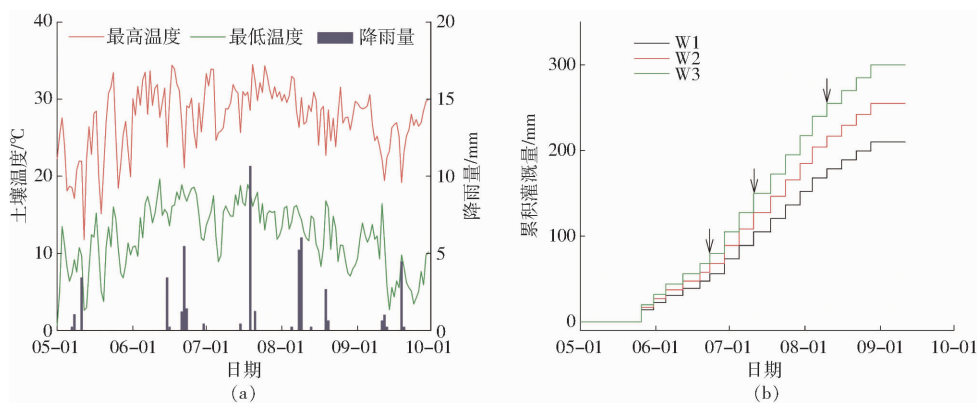


图 1 气象数据与灌溉制度

Fig. 1 Meteorological data and irrigation schedule

1.2 试验设计

试验采用 2 种不同矿化度的水源灌溉,即含盐量为 1.1 g/L(电导率为 1 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的当地地下水与 5.0 g/L(电导率为 8 004 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的微咸水(分别表示为 S1 和 S2)。微咸水在当地地下水的基础上加入浓度比为 1:2 的 KCl 与 NaCl 配置而成。同时参考相关文献与当地的春玉米灌溉经验,在每种灌溉水盐分的基础上设置了低、中、高 3 个灌水水平,分别为 210、255、300 mm(分别表示为 W1、W2 和 W3)^[19-20]。试验采用全因素设计,共计 6 个处理,每个处理设置 3 个重复,共计 18 个随机分布的试验小区,具体试验方案如表 1 所示。试验选取当地常规种植的春玉米“西蒙 3358”为供试作物,采用“膜下滴灌+宽窄行”的灌溉与种植模式,宽行距为 70 cm、窄行距为 40 cm,株距为 30 cm。窄行中心布设有滴灌带并覆盖有薄膜,选取甘肃大禹节水集团股份有限公司生产的贴片式滴灌带,壁厚 0.4 mm,滴头流量 2 L/h,滴头间距 30 cm。春玉米于 4 月 26 日播种,9 月 11 日收获,生育期为 139 d。春玉米生育期灌水与施肥制度如图 1b(图中箭头处表示各处理施肥时间)所示,各处理灌水周期为 6 d,在春玉米生育期共计灌水 17 次。春玉米生育期总施氮量为 300 kg/hm²,其中,播前各处理将磷酸二铵(施用量 375 kg/hm²)和尿素(施用量 75 kg/hm²)作为基肥施入土壤,剩余氮肥以尿素的形式分别在春玉米拔

节期、抽穗期和灌浆期以 2:2:1 的比例溶于灌溉水后通过比例施肥器与滴灌系统施入膜下土壤。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室气体排放

土壤温室气体采集于春玉米苗期开始至收获期结束,每 10 d 测定 1 次,并在施肥后第 1、2、3、5、7 天加测,气体利用静态暗箱法原位采集。静态箱由顶箱(0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)和底座(0.5 m × 0.5 m × 0.15 m)组成:顶箱由 3 mm 厚的不锈钢板制成,箱内对称布设了 2 个风扇以便采样时将箱内气体混合均匀,并设有温度计插槽用于观测采样时箱内温度的变化,箱外布设了 3 cm 厚的泡沫板与黄色胶带防止采样时箱内温度升高过快;底座于播前插入各小区膜下 0~15 cm 土壤中直到玉米收获,底座顶部设有 3 cm 厚的凹槽用于放置顶箱,采集气体时往凹槽中注水密封防止采样箱内外空气交换。气体采集时间为 08:30—11:30,罩箱后 30 min 内每 10 min 采集 1 次,利用医用三通与 50 mL 的注射器将采集的气体转移到 100 mL 的气体采样袋中。气体采集结束后,在室内利用气体浓度分析仪(Picarro G2308 型)测定气体采样袋中 CO₂、N₂O 浓度,气体排放通量计算公式为

$$F = \rho H \frac{\Delta c}{\Delta t} \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中 F ——气体排放通量,mg/(m²·h)

ρ ——标准大气压下的气体密度,g/cm³

H ——顶箱高度,m

T ——采样期间箱内空气的平均温度,℃

$\Delta c/\Delta t$ ——采样时箱内气体浓度随时间变化的斜率,mL/(m³·h)

气体累积排放量计算公式为

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{(F_i + F_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (2)$$

式中 M ——气体累积排放量,t/hm²

表 1 田间试验处理

Tab. 1 Field experiment treatment

处理	灌溉水矿化度/(g·L ⁻¹)	灌溉定额/mm
S1W1	1.1(地下水)	210(70% 亏缺灌溉)
S1W2	1.1(地下水)	255(85% 亏缺灌溉)
S1W3	1.1(地下水)	300(充分灌溉)
S2W1	5.0(微咸水)	210(70% 亏缺灌溉)
S2W2	5.0(微咸水)	255(85% 亏缺灌溉)
S2W3	5.0(微咸水)	300(充分灌溉)

F_i, F_{i+1} ——第 i 和第 $i+1$ 次气体排放通量,
mg/(m²·h)

t_i, t_{i+1} ——第 i 和第 $i+1$ 次采集气体时刻

n ——采样总次数

全球增温潜势计算公式为

$$G_{wp} = M_{CO_2} + 265M_{N_2O} \quad (3)$$

式中 G_{wp} ——全球增温潜势, t/hm²

M_{CO_2} ——土壤 CO₂ 累积排放量, t/hm²

M_{N_2O} ——土壤 N₂O 累积排放量, t/hm²

1.3.2 土壤理化性质

在采集气体的同时,用土钻钻取静态箱附近 0~30 cm 的膜下土壤,部分土壤装入铝盒中利用干燥法测定土壤质量含水率,其余土壤风干、均质化后过 1 mm 筛用于测定其他土壤理化性质。

土壤电导率(EC_{1:5})与 pH 值测定:准确称量 10 g 风干土壤并加入 50 mL 去离子水,在恒温振荡器中以 180 r/min 振荡 30 min,静置 30 min 后取 30 mL 上清液在高速离心机中以 4 000 r/min 离心 30 min,用校准后的多参数仪(SG23 型)测定上清液的 EC_{1:5} 与 pH 值。

土壤铵态氮与硝态氮含量测定:准确称量 5 g 风干土并加入 50 mL 的氯化钾溶液(2 mol/L)浸提,在恒温振荡器中以 180 r/min 振荡 60 min,静置 30 min 后过滤得到上清液,用连续流动分析仪(Alliance Futura II)测定上清液中铵态氮与硝态氮含量。

1.3.3 玉米生长指标

在春玉米收获期,各小区选取长势均匀的 3 株

玉米测量生长指标与产量。其中:株高与叶面积采用卷尺测定,干物质量与籽粒产量干燥至质量恒定后测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 软件对数据进行整理,采用 SPSS 21.0 软件对数据进行显著性分析与相关性分析,当交互作用显著时利用简单效应分析各处理间差异,当交互作用不显著时则利用主效应分析各处理间差异,采用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂、N₂O 排放通量

各处理土壤 CO₂ 排放模式类似,均表现为 CO₂ 的排放源,在生育期呈先增大后减小的趋势(图 2a、2b)。生育期内观测到 3 次 CO₂ 的排放峰值,均出现在 3 次追肥后 1~3 d, S1W1、S1W2、S1W3、S2W1、S2W2 和 S2W3 处理平均 CO₂ 排放峰值分别为 901.05、903.88、1018.87、965.08、893.05、992.07 mg/(m²·h),灌溉水含盐量与灌水量均未对平均 CO₂ 排放峰值产生显著影响($P > 0.05$),但 W3 处理在 S1 和 S2 盐分条件下平均 CO₂ 排放峰值均最高。S1W1、S1W2、S1W3、S2W1、S2W2 和 S2W3 处理生育期 CO₂ 累积排放量分别为 15.33、16.87、19.00、16.99、15.21、18.10 t/hm²(表 2)。灌溉水含盐量对土壤 CO₂ 累积排放量的影响不显著($P > 0.05$),灌水量显著影响了土壤 CO₂ 累积排放量($P < 0.05$)。在 S1 与 S2 灌溉水盐分条件下, W3 处

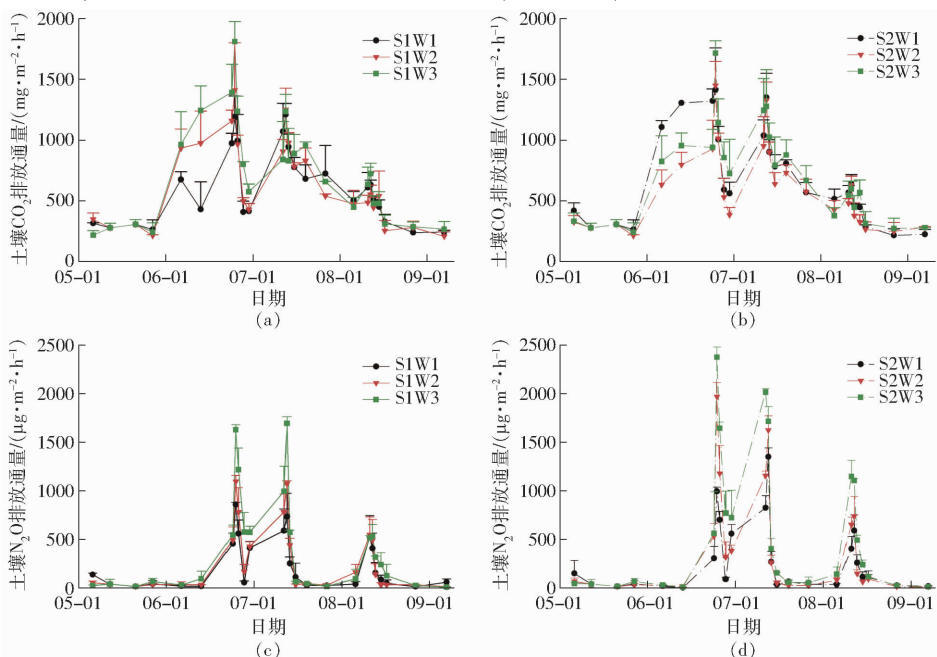


图2 春玉米生育期各处理土壤 CO₂、N₂O 排放通量变化曲线

Fig. 2 Change curves of soil CO₂ and N₂O emission fluxes under different treatments during growth period of spring maize

理土壤 CO₂ 累积排放量较 W1、W2 处理分别提高了 12.62% ~ 23.92% 和 6.56% ~ 18.98%。

各处理土壤 N₂O 排放模式类似,均表现为 N₂O 的排放源,在生育期整体呈先增大后减小的趋势(图 2c、2d)。春玉米生育期各处理监测到了 3 次 N₂O 的排放峰值,均出现在追肥后 1 ~ 3 d,在其他时期土壤 N₂O 排放通量均保持在较低水平。S1W1、S1W2、S1W3、S2W1、S2W2 和 S2W3 处理平均 N₂O 峰值分别为 502.43、649.00、891.00、631.41、917.44、1274.75 μg/(m²·h),灌溉水含盐量与灌水量均显著影响了 N₂O 的平均排放峰值($P < 0.05$)。整体来看,3 次 N₂O 排放峰值均随灌溉水含盐量与灌水量的增大而增大,随追肥次数的增多呈减小趋势。生育期土壤 N₂O 累积排放量在 S1W1、S1W2、S1W3、S2W1、S2W2 和 S2W3 处理条件下分别为 4.12、5.03、6.75、4.94、6.08、9.73 kg/hm²,灌溉水

含盐量与灌水量对土壤 N₂O 累积排放量存在显著的交互作用($P < 0.05$,表 2):在 W1、W2 和 W3 灌水量条件下,S2 处理土壤 N₂O 累积排放量分别较 S1 处理提高了 19.86%、20.82% 和 44.21%,但仅在 W3 灌水量条件下,灌溉水含盐量对土壤 N₂O 累积排放量具有显著影响($P < 0.05$)。S1 和 S2 灌溉水盐分条件下,N₂O 累积排放量由大到小均表现为 W3、W2、W1,W3 处理较 W1、W2 处理分别显著提高了 34.08% ~ 63.74% 和 60.02% ~ 97.01% ($P < 0.05$)。

各处理春玉米生育期全球增温潜势如表 2 所示。灌溉水含盐量对全球增温潜势并未产生显著影响($P > 0.05$),但灌水量显著影响了全球增温潜势($P < 0.05$):W3 灌水量条件下全球增温潜势较 W1、W2 灌水量处理显著提高,在 S1 和 S2 灌溉水盐分条件下,W3 处理全球增温潜势较 W1、W2 处理分别提高了 14.19% ~ 26.57% 和 13.03% ~ 22.91%。

表 2 春玉米生育期各处理土壤 CO₂、N₂O 累积排放量与全球增温潜势

Tab. 2 Cumulative CO₂ and N₂O emissions and global warming potential under different treatments during growth period of spring maize

参数	处理	W1	W2	W3	平均值
CO ₂ 累积排放量/(t·hm ⁻²)	S1	15.33	16.87	19.00	17.07 ^A
	S2	16.99	15.21	18.10	16.77 ^A
	平均值	16.16 ^b	16.04 ^b	18.55 ^a	
N ₂ O 累积排放量/(kg·hm ⁻²)	S1	4.12 ^{Ab}	5.03 ^{Ab}	6.75 ^{Ba}	5.30
	S2	4.94 ^{Ac}	6.08 ^{Ab}	9.73 ^{Aa}	6.92
	平均值	4.53	5.56	8.24	
全球增温潜势/(t·hm ⁻²)	S1	16.43	18.21	20.79	18.47 ^A
	S2	18.30	16.82	20.68	18.60 ^A
	平均值	17.36 ^b	17.52 ^b	20.73 ^a	

注:同列数字不同大写字母表示不同盐分处理间差异显著($P < 0.05$),同行数字不同小写字母表示不同灌水量处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 土壤理化性质

各处理土壤含水率变化趋势类似,在春玉米生育期呈逐渐降低的趋势,但 S2 各处理含水率下降趋势较 S1 各处理更为缓慢(图 3a、3b)。灌溉水含盐量与灌水量均显著影响了土壤含水率($P < 0.05$,表 3),含水率随灌溉水含盐量与灌水量增大显著增大($P < 0.05$,表 3)。由相关性分析可知(表 4),土壤含水率与土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$)。

生育期各处理土壤电导率整体呈增大的趋势,随灌水施肥呈一定的波动,但 S1 各处理土壤电导率增长趋势较 S2 各处理更为缓慢(图 3c、3d)。灌溉水含盐量与灌水量对土壤电导率存在显著的交互作用($P < 0.05$,表 3):在 W1、W2、W3 灌水量条件下,S2 处理较 S1 处理土壤电导率显著提高了 50.79% ~ 77.64%;在 S1 灌溉水盐分条件下,W2 处理电导率

较 W1 和 W3 处理分别减小了 10.82% 和 4.28%,且 W2 处理与 W1 处理差异显著;在 S2 灌溉水盐分条件下,W2 处理电导率较 W1 和 W3 处理分别减小了 4.07% 和 12.59%,且 W2 处理与 W3 处理差异显著。

生育期各处理土壤 pH 值随灌水施肥呈波动提高的趋势(图 3e、3f)。灌溉水含盐量与灌水量对土壤 pH 值具有显著的交互作用($P < 0.05$,表 3),土壤 pH 值随灌溉水含盐量与灌水量增大显著增大。

各处理生育期土壤铵态氮含量呈波动型减小的趋势(图 3g、3h)。灌溉水含盐量显著地减小了土壤铵态氮含量($P < 0.05$,表 3),S2 处理条件下,W1、W2 和 W3 处理铵态氮含量较 S1 相应处理分别减小了 14.77%、18.02% 和 5.85%,但灌水量对土壤铵态氮含量并未产生显著影响($P > 0.05$)。土壤铵态氮含量与 CO₂ 排放通量呈极显著的正相关关系,与

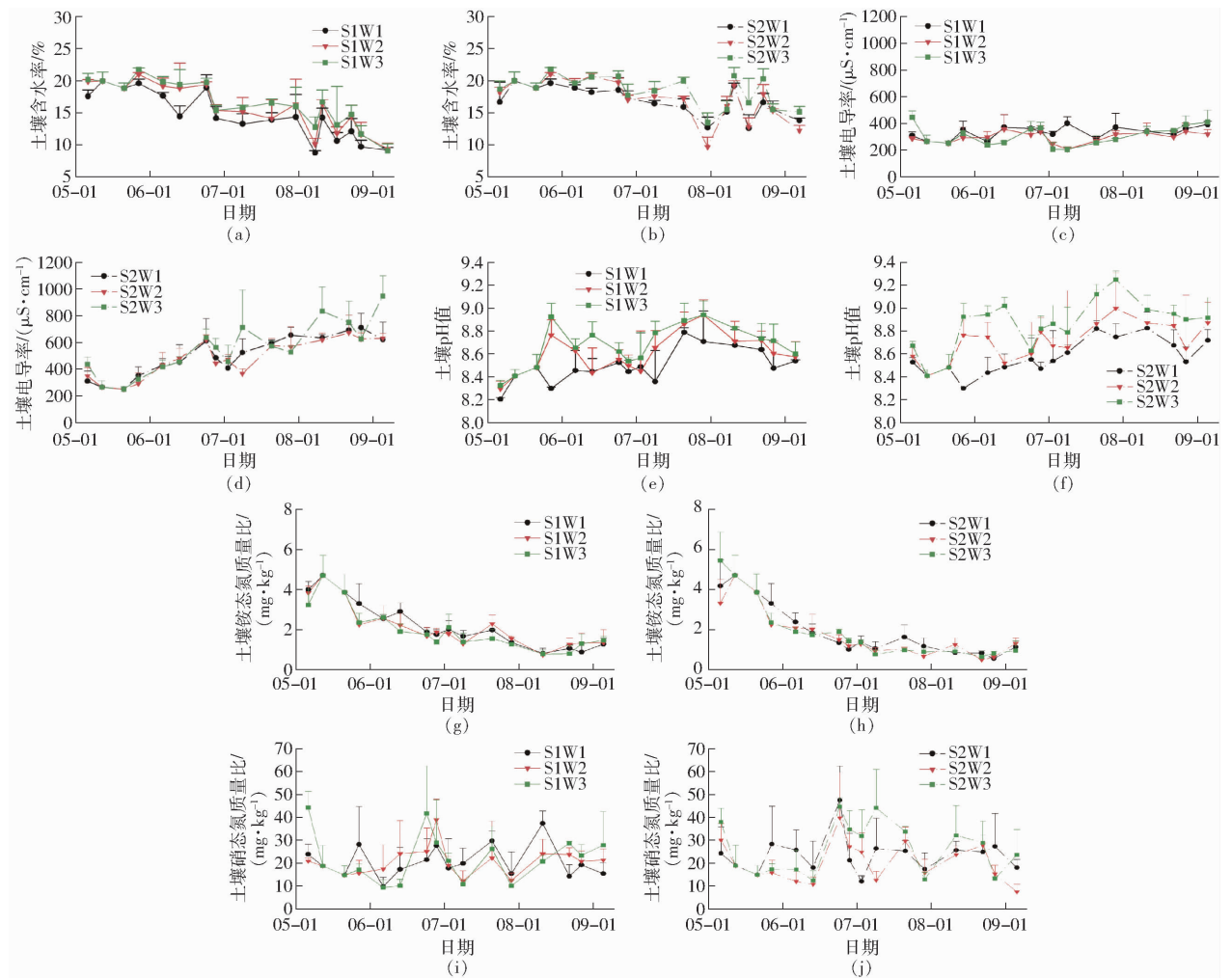


图3 春玉米生育期各处理土壤含水率、电导率、pH值与无机氮含量变化曲线

Fig.3 Change curves of soil moisture content, electrical conductivity, pH value and inorganic nitrogen content under different treatments during growth period of spring maize

表3 春玉米生育期各处理平均土壤含水率、电导率、pH值与无机氮含量

Tab.3 Soil moisture content, electrical conductivity, pH value and inorganic nitrogen content under different treatments during growth period of spring maize

参数	处理	W1	W2	W3	平均值
土壤含水率/%	S1	14.46	15.91	16.51	15.63 ^B
	S2	16.73	17.16	18.37	17.42 ^A
	平均值	15.60 ^c	16.54 ^b	17.44 ^a	
土壤电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	S1	332.15 ^{Ba}	296.20 ^{Bb}	309.44 ^{Bab}	312.60
	S2	500.85 ^{Ab}	480.46 ^{Ab}	549.69 ^{Aa}	510.33
	平均值	416.50	388.33	429.56	
土壤pH值	S1	8.49 ^{Bc}	8.60 ^{Bb}	8.67 ^{Ba}	8.59
	S2	8.57 ^{Ac}	8.71 ^{Ab}	8.85 ^{Aa}	8.71
	平均值	8.53	8.65	8.76	
土壤铵态氮质量比/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	S1	2.26	2.15	2.01	2.14 ^A
	S2	1.93	1.76	1.89	1.86 ^B
	平均值	2.09 ^a	1.95 ^a	1.95 ^a	
土壤硝态氮质量比/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	S1	20.61	20.66	22.08	21.11 ^A
	S2	23.30	20.19	25.98	23.16 ^A
	平均值	21.95 ^a	20.43 ^a	24.03 ^a	

N_2O 排放通量呈负相关关系,但相关性不显著(表4)。

各处理生育期土壤硝态氮含量随灌水施肥呈波

动型变化,施肥后各处理土壤硝态氮含量迅速升高,随后逐渐回落至施肥前水平(图3i、3j)。灌溉水含

盐量与灌水量均未显著影响土壤硝态氮含量($P > 0.05$)。由相关性分析(表4)可知,土壤硝态氮含量

与 CO_2 排放通量呈正相关关系,但相关性不显著,与 N_2O 排放通量呈极显著的正相关关系。

表4 土壤 CO_2 、 N_2O 排放通量与土壤理化性质的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients among soil CO_2 emission flux, N_2O emission flux and soil properties

参数	CO_2 排放通量	N_2O 排放通量	含水率	电导率	pH 值	铵态氮含量	硝态氮含量
CO_2 排放通量	1						
N_2O 排放通量	0.657**	1					
含水率	0.686**	0.398**	1				
电导率	-0.247	0.195	0.091	1			
pH 值	-0.081	0.043	0.050	0.332**	1		
铵态氮含量	0.524**	-0.161	0.374**	-0.516**	-0.398**	1	
硝态氮含量	0.216	0.539**	0.173	0.228	-0.138	-0.149	1

注:**表示变量间极显著相关($P < 0.01$)。

2.3 春玉米生长指标

灌溉水含盐量与灌水量对春玉米株高、叶面积指数与干物质量具有显著影响(表5)。相同灌水量条件下,S2处理较S1处理春玉米的株高、叶面积指数与干物质量显著减小($P < 0.05$),分别减小了

9.85% ~ 12.44%、33.97% ~ 83.71%和9.93% ~ 16.15%。在S1和S2灌溉水盐分条件下,W3处理春玉米收获期的株高、叶面积指数与干物质量均最高,分别较W1、W2处理提高了2.98% ~ 6.18%、20.33% ~ 508.79%和6.10% ~ 41.79%。

表5 灌溉水含盐量和灌水量对春玉米生长的影响

Tab.5 Effects of irrigation water salinity and irrigation water amount on spring maize growth

参数	处理	W1	W2	W3	平均值
株高/cm	S1	288.17	283.80	301.33	291.10 ^A
	S2	256.20	255.83	263.83	258.62 ^B
	平均值	272.18 ^b	269.82 ^b	282.58 ^a	
叶面积指数	S1	0.83	1.04	1.25	1.04 ^A
	S2	0.14	0.68	0.83	0.55 ^B
	平均值	0.48 ^b	0.86 ^a	1.04 ^a	
干物质量/(t·hm ⁻²)	S1	18.95	25.33	26.88	23.72 ^A
	S2	17.07	21.24	22.54	20.28 ^B
	平均值	18.01 ^b	23.28 ^a	24.71 ^a	
产量/(t·hm ⁻²)	S1	11.24	14.28	14.18	13.23 ^A
	S2	7.04	9.46	9.80	8.77 ^B
	平均值	9.14 ^b	11.87 ^a	11.99 ^a	
灌溉水利用效率/(kg·m ⁻³)	S1	5.35	5.60	4.73	5.23 ^A
	S2	3.35	3.71	3.27	3.44 ^B
	平均值	4.35 ^a	4.66 ^a	4.00 ^a	

灌溉水含盐量和灌水量对春玉米产量的影响效应不一致(表5)。在相同灌水量条件下,S2处理春玉米产量较S1处理显著减小了30.88% ~ 37.32% ($P < 0.05$)。在S1与S2灌溉水盐分条件下,W2、W3处理春玉米产量较W1处理显著提高($P < 0.05$),分别提高了26.15% ~ 27.07%和34.29% ~ 39.11%,但W2与W3处理间差异不显著($P > 0.05$)。

灌溉水含盐量显著减小了春玉米的灌溉水利用效率(表5),在W1、W2和W3灌水量条件下,S2较S1处理灌溉水利用效率分别减小了37.32%、33.75%和30.88%。尽管灌水量没有对春玉米的

灌溉水利用效率产生显著影响,但在S1和S2灌溉水盐分条件下,W2处理的灌溉水利用效率均高于W1和W3处理,分别提高了4.65% ~ 18.51%和10.59% ~ 13.57%。

3 讨论

3.1 灌溉水盐分和灌水量对土壤理化性质和春玉米生长的影响

水分是植株生长的必要条件,适宜的灌水量在满足作物生长的条件下,既能减少水分与养分的流失,又能避免土壤盐分的累积。研究结果表明,在不同灌溉水盐分条件下,土壤含水率均随灌水量增大

呈增大趋势,但土壤盐分含量随灌水量的变化趋势与含水率不同。在地下水灌溉条件下,土壤盐分含量由大到小表现为 W1、W3、W2;而在微咸水灌溉条件下,土壤盐分含量由大到小表现为 W3、W1、W2。在 2 种灌溉水盐分条件下,W2 处理土壤盐分累积均较小,这可能是由于当灌水量较小时,水分对盐分的淋洗作用相对较小,且由于耕层较强的蒸发作用,土壤盐分会出现“表聚”现象^[2];在灌水量较高时,虽然水分对盐分的淋洗作用增强,但水分携带的盐分也相应增多,且土壤蒸发时被淋洗的深层土壤盐分也会随水分进入表层土壤。此外,W1 和 W3 处理在不同灌溉水盐分条件下土壤盐分的累积情况不同。这可能是由于当灌溉水含盐量较小时,水分对盐分主要表现为淋洗作用,灌水量较小时会使土壤的盐分淋洗不完全;当灌溉水盐分较大时,较高的灌水量携带进入土壤的盐分较多,使土壤盐分含量在生育期内始终维持在较高水平。当灌水量提高时,灌溉水携带的 Na^+ 通过增大土壤钠吸附比,进而提高了土壤 pH 值^[3]。尽管春玉米株高、叶面积指数与干物质质量随灌水量增大而增大,但在 W2 灌水量条件下,春玉米灌溉水利用效率最高,且产量与 W3 处理差异不显著。综合考虑土壤盐分累积与春玉米生长,W2 处理是河套灌区适宜采用的灌溉水平。

微咸水灌溉显著增大了土壤耕层盐分含量,当土壤盐分含量增大时土壤的渗透势会相应改变,进而影响作物吸水;与此同时,土壤盐分含量增大减小了土壤大孔隙含量、增大了土壤小孔隙含量,导致土壤导水率与入渗速率减小;且微咸水携带的 Na^+ 使土壤的钠吸附比增大,进而提高土壤 pH 值^[3,21]。春玉米生长过程中对 Na^+ 的抗斥能力较差,微咸水带入土壤中的 Na^+ 会对植株造成离子毒害,盐分胁迫也会降低叶片的光合速率、蒸腾速率与气孔导度,同时导致叶片的叶绿素含量下降,这些因素都会影响春玉米植株生长与干物质积累^[22-23]。本文研究结果也表明,利用微咸水灌溉时,春玉米各生长指标、产量与灌溉水利用效率较地下水灌溉均显著降低,且土壤含水率高于地下水灌溉处理。这是由于当植株受到盐分胁迫时,土壤的水分消耗也会相应减小,根系吸收的水分会优先分配给植株蒸腾与植株生长,其次才被分配给籽粒生长^[24]。

3.2 土壤 CO_2 、 N_2O 排放的日变化规律

土壤呼吸和微生物分解是农田土壤 CO_2 产生的重要途径,土壤酶和微生物参与的硝化和反硝化作用是农田土壤 N_2O 产生的主要途径。研究结果表明,春玉米生育期土壤 CO_2 和 N_2O 排放具有明显

的季节性变化特征。土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量与空气温度变化趋势一致,在春玉米生育期整体呈先增大后减小的趋势,这与王帅杰等^[25]的结论一致。随春玉米生长与大气温度升高,土壤呼吸作用与酶和微生物活性也会相应增高,使得土壤 CO_2 和 N_2O 排放相应呈增大趋势。同时,在追肥后 1~3 d 土壤 CO_2 、 N_2O 出现了排放峰值,这可能是由于在追肥后 1~3 d 尿素就基本完成水解,在这期间土壤无机氮含量较施肥前显著增大,这不但能够促进土壤根际呼吸,还为土壤的硝化与反硝化作用提供了充足的反应基质^[26-27]。相关性分析结果表明,土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量与土壤含水率、无机氮含量的相关性较好,表明土壤含水率和无机氮含量是影响土壤 CO_2 与 N_2O 排放的重要因素,这与之前大多数田间试验得出的研究结果一致^[28-29]。

3.3 灌溉水盐分和灌水量对土壤 CO_2 、 N_2O 排放的影响

土壤水分含量是影响土壤 CO_2 和 N_2O 排放的重要因素,而灌水量直接影响了土壤水分含量。已有研究表明,当土壤含水率小于田间持水率时,土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量随土壤含水率的增大呈增大趋势^[12,18]。本研究结果表明,土壤 CO_2 和 N_2O 累积排放量在 W3 灌水量条件下高于 W1 和 W2 处理。这是因为土壤含水率增大时,土壤可溶性基质与微生物接触也相应增加,从而提高土壤酶和微生物活性,进而促进了土壤 CO_2 的排放^[17];与此同时,当土壤含水率增大时,土壤 O_2 含量会相应减小,这在一定程度上会促进土壤硝化细菌脱氮与反硝化作用,进而促进土壤 N_2O 的排放^[30]。

灌溉水盐分可能通过影响土壤性质(含水率、盐分含量、pH 值和无机氮含量)、土壤酶和微生物活性,进而影响土壤 CO_2 和 N_2O 排放。郭慧楠等^[26]和王国栋等^[31]研究表明,利用微咸水连续灌溉土壤 10 年后,土壤酶活性、微生物生物量、有机质含量和全氮含量较淡水灌溉显著降低,土壤 N_2O 排放也会显著减小。WANG 等^[32]认为利用微咸水灌溉后,土壤异养微生物活性减小,土壤 CO_2 排放也相应减小。而本研究结果表明,短期利用微咸水灌溉后,灌溉水盐分并不会显著影响土壤 CO_2 排放。这可能是由于土壤具有缓冲性,当短期利用微咸水灌溉时,土壤尚未达到盐碱土的水平(平均电导率均小于 $700 \mu\text{S}/\text{cm}$),微生物能够通过提高自身的代谢效率适应盐分的干扰^[33]。本研究结果还表明,在同等灌水量条件下,S2 处理土壤 N_2O 累积排放量均高于 S1 处理,且在高灌水量条件下差异显著。这可能是由于微咸水灌溉通过减小土壤蒸发、抑制作物

吸水使土壤含水率提高,进而促进了土壤 N_2O 排放。ZENG 等^[34] 研究表明,土壤盐分含量对土壤硝化和反硝化速率的影响存在阈值,当土壤电导率小于 $1\ 130\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 时,土壤硝化和反硝化速率随土壤盐分含量的增大而增大,而本次试验所测量的电导率均在 $205.60\sim 947.67\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,表明盐分可能促进了土壤的硝化和反硝化速率。土壤电导率与土壤 pH 值呈正相关关系(表 4),CHENG 等^[35] 在森林与草地的研究表明,土壤 pH 值增加促进了土壤的硝化作用和 N_2O 排放。这与本研究结果类似,本研究结果表明土壤电导率、土壤 N_2O 排放通量均与土壤铵态氮含量呈负相关关系,而与土壤硝态氮含量呈正相关关系,这表明土壤盐分增大可能通过促进硝化作用来促进土壤 N_2O 排放。利用微咸水灌溉后还会导致土壤的 Na^+ 、 K^+ 含量和 pH 值升高,进而提高土壤的盐析能力,降低 N_2O 的溶解度,从而促进土壤 N_2O 排放^[36]。当土壤盐分增大后,还有可能会抑制土壤 N_2O 还原酶活性,减少 N_2O 向 N_2 还原,进而导致土壤 N_2O 累积^[37]。

4 结论

(1) 土壤含水率、pH 值随灌溉水含盐量和灌水量的增加而显著增大,土壤铵态氮含量随灌溉水含盐量增加而减小,土壤电导率随灌溉水含盐量的增加而增大。在地下水(含盐量 $1.1\ \text{g}/\text{L}$)灌溉条件下,土壤电导率由大到小表现为低灌水量($210\ \text{mm}$)、高灌水量($300\ \text{mm}$)、中灌水量($255\ \text{mm}$);在微咸水(含盐量 $5.0\ \text{g}/\text{L}$)灌溉条件下,土壤电导率由大到小表

现为高灌水量($300\ \text{mm}$)、低灌水量($210\ \text{mm}$)、中灌水量($255\ \text{mm}$)。

(2) 灌溉水含盐量对土壤 CO_2 排放并未产生显著影响,但灌水量显著影响了土壤 CO_2 排放。在地下水与微咸水灌溉条件下,高灌水量土壤 CO_2 累积排放量较低灌水量和中灌水量分别提高了 $12.62\%\sim 23.92\%$ 和 $6.56\%\sim 18.98\%$ 。灌溉水盐分整体促进了土壤 N_2O 排放,在不同灌水量下,微咸水灌溉的土壤 N_2O 累积排放量较地下水灌溉处理提高了 $19.86\%\sim 44.21\%$;灌水量显著影响了土壤 N_2O 排放,在地下水与微咸水灌溉条件下,高灌水量时的 N_2O 累积排放量较低灌水量和中灌水量处理分别提高了 $34.08\%\sim 63.74\%$ 和 $60.02\%\sim 97.01\%$ 。

(3) 微咸水灌溉抑制了春玉米生长,降低了春玉米产量和水分利用效率。在相同灌水量条件下,微咸水灌溉后春玉米株高、叶面积指数、干物质量和产量分别较地下水灌溉处理减小了 $9.85\%\sim 12.44\%$ 、 $33.97\%\sim 83.71\%$ 、 $9.93\%\sim 16.15\%$ 和 $30.88\%\sim 37.32\%$ 。灌水量的增加显著促进了春玉米的生长,但整体来看,中灌水量处理与高灌水量处理对春玉米生长并未产生显著影响。

(4) 本试验条件下,地下水和微咸水灌溉在灌水量 $255\ \text{mm}$ 时能够得到较高的春玉米产量和灌溉水利用效率,在此基础上,土壤电导率、 CO_2 和 N_2O 累积排放量、全球增温潜势相对较低,可作为灌区地下水和微咸水灌溉时的最优灌溉定额。本研究可为河套灌区制定春玉米地下水与微咸水膜下滴灌灌溉定额提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 史海滨,杨树青,李瑞平,等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):1-17. SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetiao Irrigation District: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2020,39(8):1-17. (in Chinese)
- [2] 李金刚,屈忠义,黄永平,等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):217-223. LI Jin'gang, QU Zhongyi, HUANG Yongping, et al. Effects of control lower limit of saline water mulched drip irrigation on water salt movement and corn yield in saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(1):217-223. (in Chinese)
- [3] WEI C, LI F, YANG P, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N_2O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation[J]. Water, 2019, 11(8):1548.
- [4] WEI C, YANG P, REN S, et al. Effects of irrigation methods and salinity on CO_2 emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J]. Science of the Total Environment, 2021, 752:141639.
- [5] 王全九,蔡丽娜,孙燕,等. 增氧淡水与微咸水对小麦萌发特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):274-282. WANG Quanjiu, GOU Li'na, SUN Yan, et al. Effects of oxygenated fresh water and brackish water on germination characteristics of wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7):274-282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200731&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.031. (in Chinese)
- [6] 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):117-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151217&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017. (in Chinese)
- [7] DUXBURY J M, HARPER L A, MOSIER A R. Contributions of agroecosystems to global climate change[J]. Contributions of

Agroecosystems to Global Climate Change, 1993, 55:1 - 18.

- [8] WEI Q, XU J, LIAO L, et al. Water salinity should be reduced for irrigation to minimize its risk of increased soil N₂O emissions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(10): 2114.
- [9] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus Series B—Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81 - 99.
- [10] MALLA G, BHATIA A, PATHAK H, et al. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors[J]. Chemosphere, 2005, 58(2): 141 - 147.
- [11] LI Z, ZHANG R, WANG X, et al. Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in northwestern China: effects of plastic mulching and drip irrigation[J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 178 - 185.
- [12] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 111 - 117.
- CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 111 - 117. (in Chinese)
- [13] 迟雁冰, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水配以不同氮肥对冬小麦土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 94 - 101.
- CHI Yanbing, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Effects of reclaimed water irrigation with different nitrogen fertilizers on gas emission in winter wheat field[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 94 - 101. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [15] KONTOPOULOU C, BILALS D, PAPPA V A, et al. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emissions from a common bean crop[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 183: 48 - 57.
- [16] MARTON J M, HERBERT E R, CRAFT C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils[J]. Wetlands, 2012, 32(2): 347 - 357.
- [17] HOU H, YANG Y, HAN Z, 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): 5401 - 5408.
- [18] LINN D M, DORAN J W. Effect of water-filled pore-space on carbon-dioxide and nitrous-oxide production in tilled and nontilled soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(6): 1267 - 1272.
- [19] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273 - 281.
- YANG Peiling, WANG Yu, REN Shumei, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273 - 281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200629&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.029. (in Chinese)
- [20] LI J, QU Z, CHEN J, et al. Effect of different thresholds of drip irrigation using saline water on soil salt transportation and maize yield[J]. Water, 2018, 10(12): 1855.
- [21] YANG G, LI F, TIAN L, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104592.
- [22] 朱成立, 强超, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 253 - 261.
- ZHU Chengli, QIANG Chao, HUANG Mingyi, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and slight saline water on physiological growth of summer maize in coastal reclamation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 253 - 261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181231&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.031. (in Chinese)
- [23] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡水灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226 - 234.
- ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226 - 234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190125&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.025. (in Chinese)
- [24] REINA-SANCHEZ A, ROMERO-ARANDA R, CUARTERO J. Plant water uptake and water use efficiency of greenhouse tomato cultivars irrigated with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1-2): 54 - 66.
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 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): 2455 - 2467.
- 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): 2455 - 2467. (in Chinese)
- [27] QIU W, LIU J, LI B, et al. N₂O and CO₂ emissions from a dryland wheat cropping system with long-term N fertilization and their relationships with soil C, N, and bacterial community[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 8673 - 8683.

- wheat plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 160(1): 120 – 130.
- [17] QIN X H, WANG Z Y, YAO J P, et al. Using a one-dimensional convolutional neural network with a conditional generative adversarial network to classify plant electrical signals[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105464.
- [18] SHABALA S, NEWMAN I. Light-induced changes in hydrogen, calcium, potassium, and chloride ion fluxes and concentrations from the mesophyll and epidermal tissues of bean leaves. Understanding the ionic basis of light-induced bioelectrogenesis[J]. *Plant Physiology*, 1999, 119(3): 1115 – 1124.
- [19] LI J, YUE Y, WANG Z, et al. Illumination/darkness-induced changes in leaf surface potential linked with kinetics of ion fluxes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1407.
- [20] 王子洋, 范利锋, 王永千, 等. 基于信号特征分析的植物体表电信号记录模式选择[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 137 – 143.
- WANG Ziyang, FAN Lifeng, WANG Yongqian, et al. Selection of recording pattern of plant surface electrical signal based on analysis of electrical characteristics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 137 – 143. (in Chinese)
- [21] HSU C W, LIN C J. A comparison of methods for multiclass support vector machines[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, 13(2): 415 – 425.
- [22] LIU Y, BI J W, FAN Z P. A method for multi-class sentiment classification based on an improved one-vs-one (OVO) strategy and the support vector machine (SVM) algorithm[J]. *Information Sciences*, 2017, 394: 38 – 52.
- [23] TREBACZ K, ZAWADZKI T. Light-triggered action potentials in the liverwort *Conocephalum conicum* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1985, 64(4): 482 – 486.
- [24] 王子洋. 植物电信号检测方法研究及其在作物耐盐性识别中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- WANG Ziyang. Research of plant electrical signal detection method and its application in salt tolerance identification in crops [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] STOELZLE S, KAGAWA T, WADA M, et al. Blue light activates calcium-permeable channels in *Arabidopsis* mesophyll cells via the phototropin signaling pathway[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(3): 1456 – 1461.
- [26] MARTEN I, DEEKEN R, HEDRICH R, et al. Light-induced modification of plant plasma membrane ion transport[J]. *Plant Biology*, 2010, 12: 64 – 79.
- [27] HUANG L, WANG Z Y, ZHAO L L, et al. Electrical signal measurement in plants using blind source separation with independent component analysis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71: S54 – S59.
- [28] MAFFEI M E, MITHÖFER A, BOLAND W. Before gene expression: early events in plant-insect interaction[J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12(7): 310 – 316.
- [29] LI J H, FAN L F, ZHAO D J, et al. Plant electrical signals: a multidisciplinary challenge[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 261: 153418.

(上接第 260 页)

- [28] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 127 – 134.
- DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(16): 127 – 134. (in Chinese)
- [29] 杜世宇, 薛飞, 吴汉卿, 等. 水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 476 – 484.
- DU Shiyu, XUE Fei, WU Hanqing, et al. Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 476 – 484. (in Chinese)
- [30] WRAGE N, VELTHOF G L, VAN BEUSICHEM M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12 – 13): 1723 – 1732.
- [31] 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 CSAE*, 2009, 25(11): 44 – 48. (in Chinese)
- [32] WANG Y, YANG P, REN S, et al. CO_2 and N_2O 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): 2669.
- [33] 张前前, 王飞, 刘涛, 等. 微咸水滴灌对土壤酶活性、 CO_2 通量及有机碳降解的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2743 – 2750.
- ZHANG Qianqian, WANG Fei, LIU Tao, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO_2 flux and organic matter decomposition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2743 – 2750. (in Chinese)
- [34] ZENG W, XU C, WU J, et al. Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2013, 20(3): 519 – 530.
- [35] CHENG Y, CAI Z, CHANG S X, et al. Effects of soil pH and salt on N_2O production in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada [J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2013, 13(5): 863 – 868.
- [36] HEINCKE M, KAUPENJOHANN M. Effects of soil solution on the dynamics of N_2O emissions: a review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 55(2): 133 – 157.
- [37] MENYAILO O V, STEPANOV A L, UMAROW M M. The transformation of nitrous oxide by denitrifying bacteria in solonchaks [J]. *Eurasian Soil Science*, 1997, 30(2): 178 – 180.