

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.035

井渠轮灌下秸秆还田对土壤含盐量与玉米产量的影响

鄂继芳 杨树青 娄 帅 刘 鹏 靳亚红
(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究井渠轮灌下不同秸秆还田的耕作模式对土壤含盐量及玉米产量的影响,设置“渠井渠”灌溉模式下无秸秆还田的常规耕作(CK)、秸秆表覆旋耕(BF)、秸秆深埋深翻(SM)和秸秆混拌旋耕(HB)4种处理,于2018年和2019年在河套灌区开展了井水与渠水轮灌下不同秸秆还田方式的田间试验。结果表明,井渠轮灌下各处理收获后1 m土体均积盐,秸秆还田处理均显著降低土壤积盐率($P < 0.05$),BF、SM和HB处理积盐率较CK处理分别下降8.7、12.4、6.9个百分点,SM处理积盐率最小,仅为3.2%,且在20~40 cm土层形成脱盐区;收获后CK处理不同土层饱和浸提液的钠吸附比(SAR)较初始值提高10.2%~53.3%,土壤钠质化风险很大;秸秆还田处理有效降低了SAR,SM处理收获后不同土层的SAR最小,较初始值下降了0.4%~73.0%,可有效缓解土壤钠质化。通径分析表明,玉米产量主要决策因子是穗长,限制因子是秃尖长。BF、SM和HB处理分别较CK增产11.2%、19.8%、11.6%,水分利用效率提高18.4%、36.1%、21.2%,SM处理综合效果较好。该研究可为河套灌区地下微咸水安全利用和秸秆资源化利用提供理论依据。

关键词: 玉米; 微咸水灌溉; 秸秆还田; 盐分; 产量; 井渠轮灌

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0336-10 **OSID:** 

Effects of Straw Returning to Field on Soil Salinity Content and
Maize Yield under Alternate Irrigation of Canal-well

E Jifang YANG Shuqing LOU Shuai LIU Peng JIN Yahong
(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Aiming to explore the effects of different straw returning methods on soil salinity content and summer maize yield under the alternate irrigation of canal-well, field experiments with different tillage modes were carried out in Hetao Irrigation District in 2018 and 2019. The experiment consisted of four different treatments. It included conventional tillage without straw returning (CK treatment), straw surface covering (BF treatment), straw deep buried (SM treatment) and straw mixing (HB treatment) to the field under the irrigation mode of brackish and fresh water. The results showed that salt accumulated in soil at 1 m after harvest under all treatments, and the treatments of straw returning reduced the salt accumulation rate significantly. Compared with CK treatment, the BF, SM and HB treatments decreased the salt accumulation rate by 8.7 percentage points, 12.4 percentage points and 6.9 percentage points, respectively. SM treatment had the minimum salt accumulation rate, with an average salt accumulation rate of 3.2% in two years, and the desalination zone was formed in the soil depth of 20~40 cm. After harvest, the sodium adsorption ratio (SAR) of saturated extracts of different soil layers treated with CK treatment was increased by 10.2%~53.3% compared with the initial value, with a high risk of soil sodification. The SAR was effectively reduced by straw returning measure. SM treatment had the minimum SAR of different soil layers after harvest, which was decreased by 0.4%~73.0% compared with the initial value. and could alleviate soil salinization. Path analysis showed that the main decision factor of summer maize yield was ear length and the limiting factor was bald pointed. Compared with CK, the BF, SM and HB treatments increased production by 11.2%, 19.8% and 11.6%, respectively, and increased WUE by 18.4%, 36.1% and 21.2%, respectively. The

comprehensive effect of SM treatment was better. The research could provide theoretical basis for safe utilization of brackish water and straw resource utilization in Hetao Irrigation District.

Key words: maize; brackish water irrigation; straw returned to field; salinity; yield; alternate irrigation of canal-well

0 引言

水资源的合理开发与利用对农业可持续发展至关重要^[1]。河套灌区属于旱半干旱地区,地下微咸水资源丰富,因政策性引黄水量锐减,合理开发利用地下微咸水资源已成为有效缓解灌区淡水资源供需矛盾的重要举措之一^[2]。但灌溉地下微咸水势必会增加耕地含盐量^[3],可溶性盐在表层聚集,造成耕作层及主根区含盐量显著上升^[4-5],引起盐分胁迫,影响作物生长,导致耕地盐碱化的潜在风险增大。因此,调和作物需水与土壤盐分聚集间的关系,采取有效措施调控土壤水盐分布成为安全利用地下微咸水的关键。

目前,针对微咸水安全利用已开展大量研究,其中咸淡水交替灌溉措施已被证实是一种有效的灌溉模式^[6]。研究表明,咸淡水交替灌溉应避免在玉米营养生长关键期(拔节期)灌溉微咸水^[7],马文军等^[8]发现,微咸水灌溉虽导致作物减产 10% 左右,但淡水资源节约 60% 以上。另外,合理的耕作措施可有效改善土壤水盐分布,为作物生长创造适宜的水土微环境^[9]。研究表明,深翻与秸秆还田的耕作措施有效降低土壤无效蒸发,打破犁底层,提高土壤蓄水能力和水分利用效率,改善土壤水盐的时空分布^[10-11];微咸水灌溉结合一定地面覆盖的措施能够有效抑制微咸水灌溉后盐分表聚,降低作物根层积盐,减轻微咸水灌溉对作物后期生长不良影响^[12-13],但增加了土壤深层的盐分^[14]。近年研究微咸水多侧重灌水水质、灌溉制度等对土壤盐分动态变化及作物生长效应的研究^[15],且研究结果也存在一定的差异。以井渠水交替灌溉下不同秸秆还田方式的耕作模式为切入点,研究井渠轮灌对土壤盐分分布及作物生长效应的影响鲜见报道。本研究基于井渠轮灌及不同秸秆还田方式,在河套灌区开展 2 年不同秸秆还田方式田间试验,探究在玉米生育期,井渠轮灌下不同耕作模式对土壤盐分分布、钠质化趋势、玉米产量及水分利用效率的影响,以期为河套灌区地下微咸水资源安全利用和秸秆资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区临河区双河镇九庄农

业示范基地(40°42'N、107°24'E,海拔 1 040 m),地处河套灌区中上游,地势平坦,属典型干旱半干旱大陆性气候,年均降水量 130 mm 左右,年均蒸发量 2 330 mm,夏玉米生育期多年平均地下水埋深在 1.5 m 以下。试验于 2018 年 4 月—2019 年 10 月在示范区开展,试验用微咸水取自示范基地地下水,淡水源自引黄渠水。示范区耕地为偏中度盐渍土壤,供试土壤类型按照土壤质地三角图划分为粉砂壤土,平均容重 1.482 g/cm³,平均田间持水率 22.57%,有机质质量比 12.69 g/kg,全氮质量比 0.71 g/kg,全磷质量比 0.34 g/kg,速效磷质量比 9.35 mg/kg,速效钾质量比 214.92 mg/kg。2018 年和 2019 年研究期试验区气温及降雨量变化如图 1 所示。

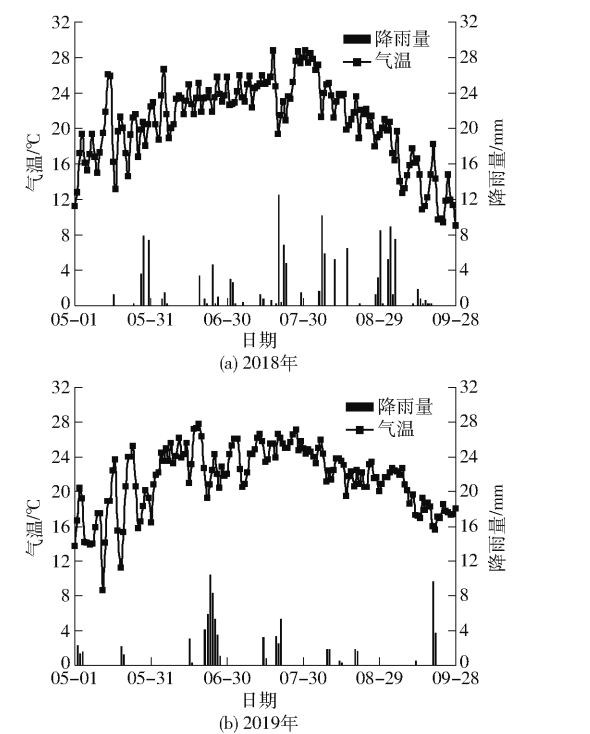


图 1 玉米生育期内气温及降雨量

Fig. 1 Air temperature and rainfall during growing period of summer maize

1.2 试验设计

试验设无秸秆还田的常规耕作(CK)、秸秆表覆旋耕(BF)、秸秆深埋深翻(SM)和秸秆混拌旋耕(HB)4种处理,3次重复,共12个小区,随机区组排列。试验小区面积约90 m²,各小区间有2.5 m宽的保护带,在小区四周种植2行保护行,并在小区四周用聚乙烯塑料薄膜隔开,薄膜埋深1.2 m,且顶部预

留不少于30 cm,防止小区间水肥互窜,减少影响。供试的玉米品种为钧凯 918,机械覆膜播种(各处理采用普通白色地膜,膜厚 0.01 mm,幅宽 80 cm),株距 0.35 m,行距 0.45 m,5 月初播种,9 月底收获。播种前浅耙整平,各处理采用统一施肥水平(当地水平):氮肥为尿素,施氮量225 kg/hm²(以纯 N 计算,施用时需换算成尿素质量);磷肥为磷酸二铵,施磷量150 kg/hm²(以 P₂O₅计);钾肥为氯化钾,施钾量 45 kg/hm²(以 K₂O 计)。全部磷肥、钾肥与

50% 氮肥在播种时作为基肥一次施入,剩余氮肥在第 1 次灌水前施入。试验用秸秆来源于当地玉米收获后粉碎的秸秆(秸秆长度不超过 8 cm),秸秆用量为 1.5 kg/m²,厚5 cm,多余秸秆清理干净。玉米生育期灌水 3 次,灌溉模式采用团队优化的“渠井渠”轮灌模式(研究期井水和渠水的主要性质如表 1 所示),单次灌水量 90 mm^[16]。试验小区田间管理按照当地农业生产管理进行,具体试验设计如表 2 所示,3 种秸秆还田方式示意图如图 2 所示。

表 1 灌溉水主要性质

Tab. 1 Main properties of irrigation water

水质	含盐量/ (g·L ⁻¹)	pH 值	钠吸附比/ (mmol ¹ / ₂ ·L ⁻¹ / ₂)	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
				质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)
渠水	0.608	7.33	1.23	61.69	153.21	136.42	2.11	72.71	124.21	57.71
井水	2.431	8.18	8.30	539.73	265.50	224.47	16.57	129.93	824.70	430.40

表 2 试验处理

Tab. 2 Treatments of experiment

处理	轮灌顺序			灌溉定额	具体描述
	拔节期	抽雄期	灌浆期		
CK	Q	J	Q	玉米生育期灌溉 25 cm,第 2 年浅耙压实、覆膜种植	常规耕作,无秸秆还田,秋收后清理干净耕地残余秸秆,秋浇前翻耕约 25 cm,第 2 年机械浅耙压实、覆膜种植
BF	Q	J	Q	3 次,单次灌水量 90 mm,采用汽油泵从水渠或水井定量抽取浇灌	秋收后清理干净耕地残余秸秆,秋浇前翻耕约 25 cm,第 2 年机械浅耙压实、覆膜种植后在无膜行间表覆 1.5 kg/m ² 、厚 5 cm 粉碎秸秆
SM	Q	J	Q		秋收后清理干净耕地残余秸秆,秋浇前用深翻犁翻耕约 35 cm,人工铺设 1.5 kg/m ² 、厚 5 cm 粉碎玉米秸秆,第 2 年浅耙压实、覆膜种植
HB	Q	J	Q		翻耕前按照 1.5 kg/m ² 、厚 5 cm 的秸秆用量均匀平铺,机械翻耕 25 cm,将秸秆与耕作层土壤混拌,第 2 年浅耙压实、覆膜种植

注:Q 表示渠水,源自黄河水;J 表示井水,源自地下微咸水。

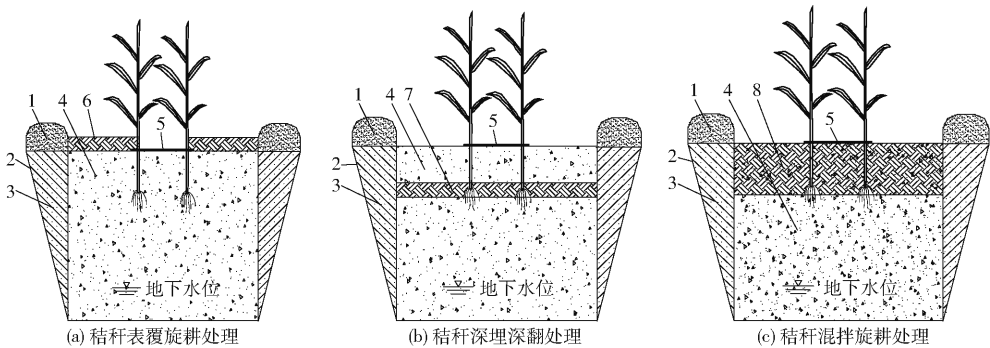


图 2 不同秸秆还田示意图

Fig. 2 Schematics of different straw returning to field

1. 土埂 2. 塑料薄膜 3. 试验小区压实薄膜的填土 4. 正常翻耕的土壤 5. 地膜 6. 秸秆覆盖层 7. 秸秆隔层 8. 秸秆与土壤混拌层

1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤电导率及含盐量

在玉米播种前、一水到三水前、后及成熟期分层取土样,分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 共 5 层。每小区采用对角及中点取样法,共 5 钻土样,用干燥法测量各层土壤质量含水率;并取 5 钻各土层混合形成测盐土样,自

然风干、研磨、过筛,配制土水质量比为 1:5 的土壤浸提液,采用上海雷磁有限公司生产的 DDS-307 型电导仪测定各土层浸提液电导率。

土壤含盐量与土壤浸提液电导率 EC_{1:5}(mS/cm)之间的经验统计关系为

$$S_i = 2.599EC_{1:5,i} + 0.468 \quad (R^2 = 0.997) \quad (1)$$

式中 S_i——第 i 层土壤含盐量,g/kg

钠吸附比(Sodium adsorption ratio,SAR)是表征土壤碱化的重要指标,计算式为

$$SAR = \frac{L_{Na^{+}}}{\left(\frac{L_{Ca^{2+}} + L_{Mg^{2+}}}{2}\right)^{1/2}} \quad (2)$$

式中 $L_{Na^{+}}$ 、 $L_{Ca^{2+}}$ 、 $L_{Mg^{2+}}$ —— Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度,mmol/L

各离子含量测定方法: Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法; Na^{+} 采用阴阳离子平衡法。

1.3.2 考种测产及水分利用效率

玉米收获后,对玉米进行考种。每个小区随机选取 10 株玉米,测量穗长、穗粗、穗粒数等指标,对收获的籽粒进行称量,随机选取 100 粒,3 个重复,各自称量取平均值计算百粒质量;玉米籽粒干燥后称总质量并计算单位面积产量。作物耗水量(Evaporation and transpiration,ET,mm)计算式为

$$ET = P + I + W_g - D - R - \Delta W \quad (3)$$

式中 P ——生育期降雨量,mm
 I ——生育期玉米灌溉量,mm
 W_g ——生育期地下水补给量(采用定位通量法计算),mm
 D ——渗漏水量,mm,该示范区研究期地下水位较高,渗漏水量远小于地下水补给量, D 可忽略不计
 R ——地表径流量,mm,该示范区属于干旱地区,降雨或地面灌溉不能形成径流, R 可忽略不计

ΔW ——研究期末与期初土壤储水量的变化量,mm

土壤储水量计算式为

$$W = 10 \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \theta_i \quad (4)$$

式中 W ——土壤储水量,mm
 θ_i ——第 i 层土壤质量含水率,%
 ρ_i ——第 i 层土壤容重, g/cm^3
 h_i ——第 i 层土层厚度,cm

水分利用效率(Water use efficiency,WUE)计算式为

$$WUE = Y/ET \quad (5)$$

式中 Y ——玉米产量, kg/hm^2

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010 处理数据和制图,应用 SPSS 20.0 进行方差分析和相关性分析,采用最小显著差异法(Least significant difference method,LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 井渠轮灌下秸秆还田方式对土壤含盐量的影响

2 年各处理不同灌水时期土壤平均含盐量分布如图 3 所示。播前不同耕作模式下各土层含盐量差异不显著,均随土层深度加深而降低。播种后,天气逐渐转暖,土壤蒸发逐渐增强,不同程度返盐。

在一水前各处理土壤含盐量不同程度增加,增加幅度随土层深度加深而减小,CK 处理的各土层平

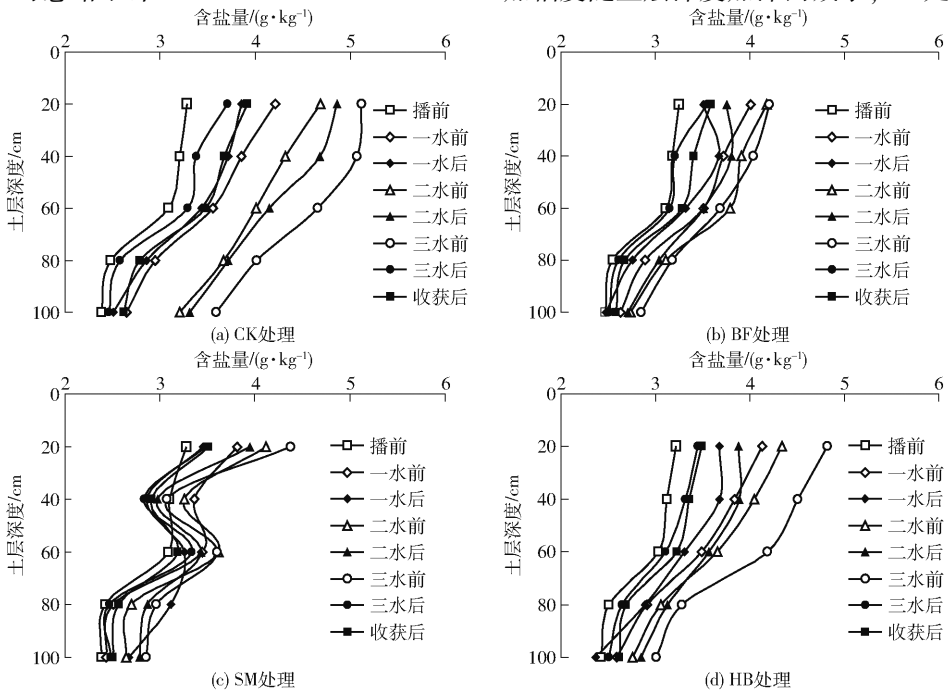


图 3 2 年各处理的土壤剖面平均含盐量

Fig. 3 Average soil salinity content under different treatments in two years

均含盐量较播前提高 11.3%~31.7%,较其他 3 个处理显著增大($P<0.05$),其中 SM 处理增幅最小,平均含盐量提高 3.1%~13.4%,且对 40 cm 以下土层影响较小。玉米生育期一水灌溉渠水,对各处理土壤盐分具有淋洗的作用,将耕层盐分淋洗到深层土壤,淡化了玉米根层。相比一水前土壤剖面平均含盐量,一水后各处理土壤平均含盐量大幅下降,随土层深度加深降幅逐渐变缓,CK 处理降幅最大,为 4.7%~24.8%,BF 和 HB 处理趋势基本类似,说明灌溉或有效降雨主要淋洗上层土壤盐分,对深层土壤影响不显著;而 SM 处理与其他处理存在差异:在 0~40 cm 土层含盐量降低 8.5%~11.8%,而在 40~60 cm 土层平均含盐量增加了 2.1%,大于 60 cm 土层平均含盐量仅降低 3.8%,这是因为耕作层盐分被淋洗时,秸秆隔层改变了水盐运移路径,部分盐分滞留在秸秆隔层附近,导致 40~60 cm 土层平均含盐量有所增加,同时秸秆隔层增大蓄水量,相对减少了入渗水量,导致大于 60 cm 土层盐分淋洗不彻底,含盐量下降幅度较小。

二水前,土壤蒸发作用较强,除 SM 处理外,其他处理土壤含盐量变化趋势与一水前类似,但此时期土壤平均含盐量较一水前提高 5.1%~16.3%,CK 处理提高幅度最大,BF 处理在 0~20 cm 土层含盐量增加仅 3.7%,有效缓解大量盐分表聚;HB 处理也有缓解盐分表聚趋势,但效果不显著;与一水前相比,SM 处理在 0~20 cm 土层含盐量较 CK 处理仅降低 4.7%,差异不显著($P>0.05$),但在 20~40 cm 土层 SM 处理含盐量较一水前降低了 5.1%,为作物根层创造了低盐环境,淡化根层,有利于玉米生长。玉米生育期的二水灌溉地下微咸水,二水后各处理土壤剖面含盐量变化趋势与一水后存在较大差异:相比二水前,CK 处理在 0~60 cm 土层含盐量增加 1.2%~8.3%,在大于 60 cm 土层含盐量降低,但较一水后降幅显著减小($P<0.05$);秸秆还田的 3 个处理土壤剖面含盐量均降低,降幅较小,在大于 40 cm 土层降幅减缓,说明微咸水中盐分直接增加了土壤含盐量,井水淋洗作用主要影响 0~40 cm 土层,在大于 40 cm 土层含盐量降幅均小于 4.2%,淋洗作用不显著。三水前、后土壤平均含盐量变化趋势与一水前、后基本一致。

从玉米整个生育期看,各处理在 60~100 cm 土层平均含盐量变化比较平稳,而 0~40 cm 土壤平均含盐量差异较大。除 CK 处理,其他 3 个处理的 0~20 cm 土层平均含盐量在夏玉米生育期内出现 3 个峰值,分别在一水前、二水前和三水前,但二水前到二水后土层含盐量降幅较小;CK 处理仅出现 2 个峰

值,在二水后含盐量略增,增幅为 2.4%,各生育期秸秆还田的 0~20 cm 土层含盐量均较 CK 处理不同程度降低,说明秸秆还田可有效抑制盐分表聚。除 SM 处理外,其他处理的 20~40 cm 土层平均含盐量在生育期出现 2 次峰值,分别在一水前和三水前,三水前峰值较一水前提高 19.2%;SM 处理的 20~40 cm 土层平均含盐量在整个生育期未出现峰值,却在一水后和三水后出现低谷,较播前的该土层平均含盐量下降 10.8%以上,其他时期含盐量变化较平稳,说明秸秆隔层可在 20~40 cm 土层形成低盐土层,有效淡化根层。除 CK 处理外,其他处理的 40~60 cm 土层在灌溉后土壤含盐量均下降,下降幅度差异不显著($P>0.05$);CK 处理在一水和三水后,40~60 cm 土层平均含盐量均迅速下降,但二水灌溉微咸水后该土层含盐量增加,增幅平均为 4.2%。

2.2 井渠轮灌下秸秆还田方式对土壤积盐率的影响

为进一步探究研究期灌溉井水对不同秸秆还田方式下土壤含盐量的影响,采用玉米收获后与播前各土层含盐量的变化来定量分析各土层积盐情况(表 3)。由表 3 可知,各处理在 0~20 cm 土层均积盐,CK 处理积盐率最大,2 年平均积盐率为 21.4%,秸秆还田的 3 个处理显著降低($P<0.05$)表层积盐率,其中 BF 积盐率最小,2 年平均为 8.7%,说明相比传统耕作,秸秆还田有效地调控表层盐分布,抑制盐分表聚,BF 处理效果较好。除 SM 处理,其他处理在 20~40 cm 土层均积盐,CK 处理积盐率最高,2 年平均为 16.2%;BF 和 HB 处理平均积盐率为 8.5%和 8.8%,二者差异不显著($P>0.05$);SM 处理有脱盐趋势,2 年脱盐率平均为 6.8%。在 40~100 cm 土层各处理均积盐,积盐率随土层加深逐渐减小,CK 处理积盐率最高,SM 处理积盐率最小。2 年各处理的 1 m 土体在研究期均积盐,其中 CK 处理平均积盐率最高,为 15.6%,BF、SM 和 HB 处理平均积盐率较 CK 处理下降 8.7、12.4、6.9 个百分点,分别为 6.9%、3.2%和 8.7%,显著低于 CK 处理的积盐率($P<0.05$)。说明井渠轮灌下秸秆还田耕作模式可调控土体盐分分布,有效降低玉米生育期 1 m 土体的积盐率,其中秸秆深埋 SM 处理的效果较好,能够保持夏玉米生育期 1 m 内土体的盐分平衡,有利于作物生长。

2.3 井渠交替灌溉下秸秆还田方式对玉米收获后土壤钠质化的影响

钠吸附比(SAR)表征土壤钠质化的程度,土壤中 Na^+ 含量过高会减少黏粒含量,分散团聚体,降低土壤水渗透性^[17]。玉米收获后土壤剖面浸提液钠

表 3 2 年不同处理的土壤含盐量变化

Tab.3 Changes in soil salinity content under different treatments in two years

土层深度/ cm	参数	2018 年				2019 年			
		CK	BF	SM	HB	CK	BF	SM	HB
0 ~ 20	播前土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.281	3.282	3.251	3.218	3.293	3.283	3.256	3.261
	收获后土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.921	3.514	3.590	3.492	4.061	3.619	3.649	3.650
	积盐率/%	19.5 ^d	7.1 ^a	10.4 ^c	8.5 ^b	23.3 ^c	10.2 ^a	12.1 ^b	11.9 ^b
20 ~ 40	播前土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.211	3.183	3.111	3.122	3.232	3.212	3.141	3.151
	收获后土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.672	3.403	2.918	3.360	3.813	3.532	2.912	3.468
	积盐率/%	14.4 ^c	6.9 ^b	-6.2 ^a	7.6 ^b	18.0 ^c	10.0 ^b	-7.3 ^a	10.1 ^b
40 ~ 60	播前土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.090	3.114	3.093	3.032	3.121	3.141	3.161	3.060
	收获后土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	3.480	3.289	3.252	3.223	3.644	3.313	3.269	3.351
	积盐率/%	12.6 ^c	5.6 ^{ab}	5.1 ^a	6.3 ^b	16.8 ^d	5.5 ^b	3.4 ^a	9.5 ^c
60 ~ 100	播前土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	2.483	2.549	2.493	2.511	2.505	2.574	2.454	2.535
	收获后土壤含盐量/(g·kg ⁻¹)	2.789	2.678	2.573	2.689	2.892	2.681	2.533	2.774
	积盐率/%	12.3 ^d	5.1 ^b	3.2 ^a	7.1 ^c	15.5 ^d	4.2 ^b	3.2 ^a	9.4 ^c
0 ~ 100	积盐率/%	13.8 ^d	6.2 ^b	3.9 ^a	7.5 ^c	17.3 ^d	7.5 ^b	2.5 ^a	9.8 ^c

注：积盐率上角标的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

吸附比与初始值(播前)的变化情况如图 4(图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$))所示。各处理的 SAR 均随土层深度加深呈降低趋势,且各个秸秆还田处理较 CK 处理显著降低 SAR ($P < 0.05$)。研究期,HB 和 BF 处理在 0 ~ 60 cm 土层的 SAR 差异不显著 ($P > 0.05$),且二者在 0 ~ 40 cm 土层 SAR 超过初始值 10.0% ~ 26.4%,有钠质化趋势,土壤碱化风险较大;在大于 40 cm 土层二者 SAR 较初始值小,土壤不会出现钠质化,土壤碱化风险小;SM 处理各土层 SAR 均不超过初始值,较初始值平均下降了

0.4% ~ 73.0%,说明井渠轮灌下秸秆深埋处理的土壤在玉米生育期内不会出现钠质化趋势,土壤碱化风险较小。CK 处理的土壤 SAR 平均值超过初始值 10.2% ~ 53.3%,尤其表层土壤超过初始值 53.3%,钠质化程度最大,土层碱化风险很大。从年际间分析,2019 年各处理土壤的 SAR 较 2018 年提高 0.2% ~ 11.9%,CK 处理增幅最大,SM 处理增幅最小,可能是因为 2019 年降雨较小导致的,这也说明了井渠轮灌模式下,秸秆还田可有效减缓土壤钠质化趋势,降低土壤碱化风险,SM 处理效果较好。

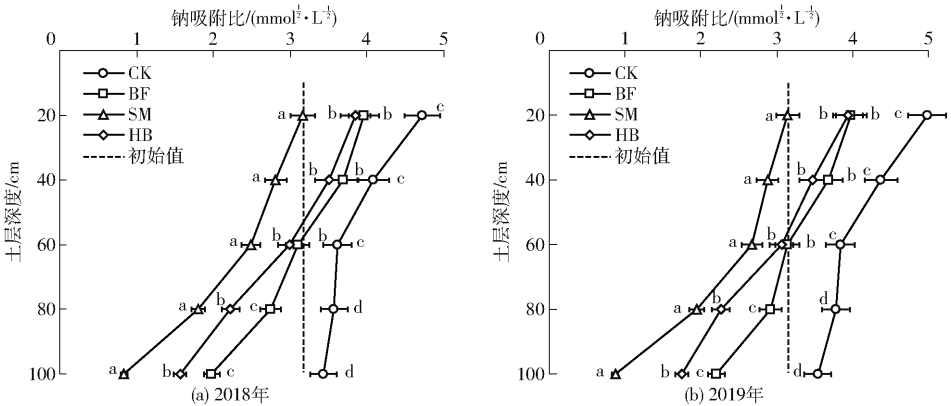


图 4 2 年玉米收获后土壤剖面浸提液钠吸附比变化曲线

Fig.4 Change curves of sodium adsorption ratio of soil profile after summer maize harvest in two years

2.4 井渠轮灌下秸秆还田方式对玉米产量及水分利用效率的影响

2.4.1 玉米产量及其构成因素、水分利用效率的响应

井渠轮溉下不同秸秆还田方式对玉米产量的构成因素产生不同程度影响,进而影响各处理的玉米产量(表 4)。2 年 SM 处理穗长和穗粗最大,较其他处理平均提高 6.1% ~ 19.3% ($P < 0.05$);BF 和 HB

处理的穗长和穗粗差异不显著 ($P > 0.05$),但较 CK 处理平均提高 4.0% ~ 8.3%。2 年 SM 处理的秃尖长较其他处理显著短 ($P < 0.05$),BF 和 HB 处理秃尖长差异不显著 ($P > 0.05$),分别较 CK 处理降低 54.1%、38.6% 和 39.1%;2 年各处理单株地上干物质量间差异不显著 ($P > 0.05$)。2018 年 BF、HB 和 CK 处理的百粒质量差异不显著 ($P > 0.05$),而 2019

年仅 BF 和 HB 处理的百粒质量差异不显著 ($P > 0.05$),且较 CK 处理分别提高 9.5% 和 11.3% ($P < 0.05$);2 年均以 SM 处理的百粒质量最大,较其他处理提高 9.9% ~ 25.2% ($P < 0.05$)。2 年各处理

以 SM 处理产量最高,BF 和 HB 处理的产量差异不显著($P > 0.05$),三者分别较 CK 处理增产 19.8%、11.2% 和 11.6% ($P < 0.05$)。说明相比传统耕作,秸秆还田耕作模式可显著提高玉米产量。

表 4 不同处理对玉米产量构成因素及水分利用效率的影响

Tab.4 Effects of different treatments on yield constitute factors and WUE of summer maize

年份	处理	穗长/ cm	穗粗/ cm	秃尖长/ cm	单株地上 干物质质量/g	百粒质量/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2018	CK	21.1 ^a	5.1 ^a	2.29 ^c	423.67 ^a	36.1 ^a	11 851.4 ^a	22.7 ^a
	BF	22.9 ^{ab}	5.3 ^{ab}	1.46 ^b	432.76 ^a	38.5 ^a	13 065.3 ^{ab}	26.2 ^b
	SM	24.2 ^b	5.7 ^b	1.09 ^a	401.24 ^a	45.2 ^b	14 174.6 ^b	28.9 ^c
	HB	22.8 ^{ab}	5.3 ^{ab}	1.43 ^b	401.23 ^a	38.9 ^a	13 107.9 ^{ab}	26.9 ^b
2019	CK	19.7 ^a	4.9 ^a	2.56 ^c	399.49 ^a	33.7 ^a	10 896.2 ^a	23.8 ^a
	BF	20.8 ^{ab}	5.2 ^{ab}	1.51 ^b	395.46 ^a	37.5 ^{ab}	12 213.7 ^b	28.9 ^b
	SM	23.5 ^b	5.6 ^b	1.13 ^a	389.32 ^a	41.2 ^b	13 492.8 ^c	34.5 ^c
	HB	21.4 ^{ab}	5.1 ^{ab}	1.52 ^b	388.28 ^a	36.9 ^{ab}	12 275.4 ^b	29.5 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

年际间玉米产量构成因素存在不同程度的差异。除 2019 年各处理秃尖长较 2018 年增加 3.4% ~ 11.8% (CK 处理增幅最大) 外,各处理的其他产量构成因素较 2018 年降低 2.9% ~ 8.8%,其中 CK 减产最多,达到 8.1% ($P < 0.05$)。SM 处理仅减产 4.8% ($P > 0.05$)。可见,井渠轮灌下少雨年份(2019 年)因受耕层水盐的双重胁迫,导致夏玉米秃尖变长,降低其他性状,但结合秸秆还田,可缓解因水盐胁迫对夏玉米造成的不利影响,达到稳产的目的,以秸秆深埋 SM 处理效果较好。

2 年 BF 和 HB 处理的水分利用效率(WUE)差异不显著 ($P > 0.05$),但较 CK 处理平均提高 18.4% 和 21.2% ($P < 0.05$);SM 处理的 WUE 最

高,较 CK 提高 36.1% ($P < 0.05$)。2019 年(少雨年份)各秸秆还田处理的 WUE 较 2018 年提高了 9.7% ~ 19.3%,而 CK 处理仅提高 4.8% ($P > 0.05$)。说明井渠轮灌下秸秆还田在少雨年份可有效提高 WUE,秸秆深埋还田方式效果较好。

2.4.2 玉米主要性状与产量的相关性

采用 SPSS 及通径分析法进行玉米主要性状因子间的相关性分析(表 5)发现,产量与穗长、穗粗和百粒质量呈极显著正相关($P < 0.01$),与秃尖长极显著负相关($P < 0.01$),与单株地上干物质质量相关性未达到显著水平($P > 0.05$)。除单株地上干物质质量,其余性状因子间也呈不同程度的显著相关性,说明玉米主要性状因子间也相互影响,且间接对产量产生不同的影响。

表 5 玉米产量与主要性状因子的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient between yield and main trait factors of summer maize

指标	穗长	穗粗	秃尖长	单株地上干物质质量	百粒质量	产量
穗长	1					
穗粗	0.950 ^{**}	1				
秃尖长	-0.639 ^{**}	-0.554 [*]	1			
单株地上干物质质量	0.020	0.255	0.381 [*]	1		
百粒质量	0.936 ^{**}	0.948 ^{**}	-0.695 ^{**}	0.020	1	
产量	0.934 ^{**}	0.747 ^{**}	-0.736 ^{**}	0.004	0.965 ^{**}	1

注:** 表示差异极显著($P < 0.01$),* 表示差异显著($P < 0.05$)。

为进一步明晰主要性状因子对玉米产量的直接或间接影响,采用通径分析方法对其进行分析^[18]。玉米主要性状因子作为自变量,分别定义:穗长为 X_1 、穗粗为 X_2 、秃尖长为 X_3 、单株地上干物质质量为 X_4 、百粒质量为 X_5 ;玉米产量 Y 作为因变量。经正态性检验,因变量(产量 Y)服从正态分布,可进行回

归分析。通径分析结果见表 6,通过决策系数可得到玉米主要性状因子对产量影响的综合排序由大到小依次为:穗长、百粒质量、穗粗、单株地上干物质质量、秃尖长。其中,穗长、百粒质量、穗粗对玉米产量的贡献起显著促进作用,穗长 X_1 为主要决策因子,因为穗长直接决定作用最大(0.809),且通过穗粗

表 6 玉米产量与主要性状因子的通径分析

Tab.6 Path analysis between yield and main trait factors of summer maize

自变量	相关系数	直接通径 系数	间接通径系数					决策系数
			$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_5 \rightarrow Y$	
X_1	0.934	0.809		0.265	-0.190	-0.002	0.332	0.824
X_2	0.747	0.279	0.769		-0.165	-0.031	0.336	0.339
X_3	-0.736	0.298	-0.517	-0.155		-0.046	-0.246	-0.527
X_4	0.004	-0.121	0.016	0.071	0.114		0.007	-0.016
X_5	0.965	0.354	0.757	0.264	-0.207	-0.002		0.558

X_2 (0.265) 和百粒质量 X_5 (0.332) 协助穗长 X_1 增加夏玉米产量,起积极的促进作用,受单株地上干物质质量 X_4 的限制较小(-0.002),对玉米产量影响较小;受秃尖长 X_3 限制较大(-0.190),对玉米产量的贡献起显著抑制作用,为产量限制因子,直接作用较大,通过其他因子影响产量的间接作用均为负。因此,欲在井渠轮灌结合秸秆还田方式下提高玉米产量,须提高穗长 X_1 ,限制秃尖长 X_3 ,基本保障百粒质量 X_5 和穗粗 X_2 ,单株地上干物质质量 X_4 可不必过多考虑。

3 讨论

盐分胁迫影响作物正常生长,是盐渍化灌区农业发展的主要障碍^[19]。微咸水灌溉有效缓解淡水资源短缺的压力,但增加了土壤盐分含量,影响作物生长和耕地质量。因此,采取适宜的措施调控土壤盐分分布成为微咸水安全利用的关键。微咸水灌溉结合适宜的地面覆盖可有效降低作物主根层积盐程度,抑制深层土壤返盐^[12-13],这与本研究结果类似。本研究发现,井渠轮灌与秸秆还田结合显著降低表层(0~20 cm)积盐,收获后 BF 处理效果较佳,较 CK 处理平均下降 10.6%;SM 处理显著减缓深层土壤返盐,在根层区 20~40 cm 土层形成脱盐区,而其他处理均积盐。这是因为秸秆自身具有大于土壤的孔隙率,使得 SM 处理秸秆隔层吸持周围土壤水分,降低了附近土壤的含水率^[20],进而促进地下水上升,但秸秆隔层在土壤中形成的毛细管障碍层破坏了土壤结构的连续性^[21],导致上部土层没有水分的持续供给,从而有效抑制地下水上升而引起土壤返盐,在 20~40 cm 土层形成脱盐区,2 年平均脱盐率为 6.9%,但由于上部土层持续蒸发导致大量盐分在 0~20 cm 土层聚集,2 年平均积盐率为 11.3%,因此 SM 处理可抑制深层土壤返盐,但不能抑制表层土壤蒸发而导致积盐。秸秆表覆(BF)处理减少耕作层蒸发有限,在强蒸发作用下,地下水仍会上升而引起表层土壤积盐,2 年平均积盐率为 8.7%,但积盐程度较 CK 处理下降 12.7%;HB 处理的秸秆混合层并未与土壤完全充斥,不会切断土体间的联系,

与 BF 处理类似,仍会引起地下水上升而土壤返盐,但积盐程度较 CK 显著减小,下降了 11.2%。

二水灌溉微咸水后,CK 处理的 0~60 cm 土层含盐量增加 1.2%~8.3%,这与朱成立等^[22]研究结果类似,但与秸秆还田措施结合的各处理在 0~60 cm 土层含盐量较 CK 处理显著降低。一方面因为秸秆自身具有丰富的微孔隙,且灌溉微咸水,二者共同作用,提高了土壤入渗性能,促进盐分淋洗;另一方面,秸秆还田形成的秸秆-土壤结构可有效抑制土壤蒸发,减少土壤返盐,进一步缓解了耕作层积盐,SM 处理灌溉井水,未显著增加玉米根层土壤含盐量,效果较优。本研究发现,秸秆还田处理的 0~100 cm 土体在收获后仍积盐,但河套灌区每年大水秋浇,此时将耕作层大部分盐分淋洗到土壤深层,秋浇后 SM 处理的秸秆隔层可有效阻碍盐分因潜水蒸发上移至耕作层,从而在播种前减少耕作层含盐量;另外,作物生育期主要调控一次灌溉井水带入的盐分,因井水矿化度为 2.0~2.5 g/L,属于微咸水,且井水中的矿物质在一定程度可以刺激作物生长,不会产生严重的盐分胁迫;第三,2 年收获期土壤平均积盐率分别为 8.7%、6.9%和 3.2%,均较 CK 处理(积盐率为 16.2%)显著降低积盐率,缓解了试验土体的积盐,特别是 SM 处理可在 20~40 cm 土层形成脱盐层,淡化根层,这对作物生长非常有利。因此,通过秋浇淋盐、井水灌溉和秸秆阻盐的方式调控试验土体盐分分布,保障了土壤盐分平衡。

钠吸附比(SAR)是表征土壤盐碱化重要指标,是限制灌区地下微咸水资源利用的主要因子^[17]。灌溉微咸水主要影响土壤的交换性钠含量和溶解性盐,SAR 随着土壤中 Na⁺ 含量增多而增大,逐渐引起土壤团粒的破坏和胶体的分散,而钙镁离子含量的增加有利于团粒结构和胶体的形成^[23-24]。试验结果表明,收获后 CK 处理 SAR 超过初始值,尤其表层 2 年平均超过初始值 53.3%,土壤钠质化风险很大。相比传统耕作模式,秸秆还田可显著降低 SAR,有效缓解井渠轮灌下土壤碱化程度,降低土壤碱化风险。一方面因为玉米秸秆自身富含钙镁等元素^[25],本试验将粉碎的秸秆提前还田,经过近半年的时间降解,在一定程

度上增加了土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子含量,促进土壤形成大量的水稳性团粒结构,增加土壤孔隙度^[2,26],有利于置换并淋洗土壤中的 Na^+ ,降低 Na^+ 对耕作层的不利影响,缓解耕地钠质化;另外,灌溉的井水中也含有少量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子(表1),灌溉井水改变了耕作层阳离子分布,也能够置换出一部分 Na^+ ,降低了 SAR。在各处理中,以秸秆深埋 SM 处理效果较好,玉米收获后能够实现土壤水盐平衡^[27],有效缓解土壤钠质化。

耕作层含盐量与作物产量密切相关,灌浆期是玉米籽粒形成的关键期,需适宜的水土环境及充足的养分^[28],且籽粒形成期对外界的影响高度敏感,耕作层盐分胁迫影响成粒率而导致减产^[29]。本研究在灌浆期灌溉渠水,淋洗耕作层盐分,降低耕作层含盐量,缓解了二水(微咸水)的盐分胁迫,有利于玉米籽粒的形成。但三水后 CK 处理耕作层含盐量仍比较高,盐分胁迫强烈,影响光合同化物的生产与运输,造成籽粒营养不足及减产,而秸秆还田各处理有效降低耕作层含盐量,缓解盐分胁迫,SM 处理效果较好。SM 处理的秸秆隔层抑制深层土壤返盐,在 20~40 cm 的主根区形成脱盐区,显著提高深层根系密度^[30],增强深层根提水作用,充分利用深层土壤水分^[31],促进玉米后期生长,较 CK 处理平均增产 19.8%,水分利用效率平均提高 36.1%。此外,在玉米灌浆期,CK 处理的肥效基本耗尽,影响玉米灌浆期的生殖生长及籽粒的质量,而秸秆富含碳氮

等营养元素、微空隙多及比表面积大^[25],还田后可吸持更多水分和养分,在玉米生育中后期逐渐释放,供其生长所需,一定程度上可实现产量与耕层养分的平衡。通过玉米产量与 5 个主要性状因子间的通径分析发现,百粒质量对产量的直接正效应最大,而秃尖长通过百粒质量间接对产量产生负效应最强。因此,在井渠轮灌及秸秆还田下,应采取积极的措施保证百粒质量、穗长和穗粗,并减小秃尖长,从而实现咸淡水资源优化配置及提高玉米产量的双重目标。

4 结束语

本研究揭示了井渠轮灌下不同秸秆还田方式对土壤盐分时空分布、土壤钠质化、玉米产量及水分利用效率的影响规律。与传统耕作模式相比,秸秆深埋还田(SM 处理)有效缓解盐分表聚,抑制深层土壤返盐,降低土壤钠质化风险,有效调控耕作层盐分时空分布,在 20~40 cm 土层形成脱盐区,淡化根层,为玉米根系生长构建低盐微环境,增产 19.8%,水分利用效率提高 36.1%,达到提高水分利用效率及增产的目的。因此,井渠轮灌下秸秆深埋还田可为河套灌区缓解淡水资源短缺与合理安全利用微咸地下水提供参考,但仍需进一步开展长期的定位试验,更好地从土壤结构及水力学特性改变、补充土壤钙镁碳氮等营养元素等方面揭示河套灌区井渠轮灌与秸秆还田间内部的依存关系与机理。

参 考 文 献

- [1] OSTER J D, QADIR M. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 323(1/3): 1-19.
- [2] 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?flag=1&file_no=20151217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017. (in Chinese)
- [3] 刘昌明,魏忠义. 华北平原农业水文及水资源[M]. 北京:科学出版社,1989:38-39.
- [4] 吴忠东. 微咸水畦灌对土壤水盐分布特征和冬小麦产量影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
WU Zhongdong. Study on the effect of soil water and salt distribution characteristics and winter wheat yield by saline water border irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] 赵志强,徐征和,闫良国,等. 惠民县微咸水灌溉区土壤水盐运移数值模拟及分析[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(1): 33-39.
ZHAO Zhiqiang, XU Zhenghe, YAN Liangguo, et al. Numerical simulation and analysis of the transport of soil water and salt in brackish water irrigation area of Huimin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(1): 33-39. (in Chinese)
- [6] PATEL R M, PRASHER S O, GOEL P K, et al. Brackish water sub-irrigation for vegetables[J]. *Irrigation and Drainage*, 2003, 52(2): 121-132.
- [7] 闵勇,朱成立,舒慕晨,等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(3): 9-17.
MIN Yong, ZHU Chengli, SHU Muchen, et al. Effects of alternate fresh and brackish water irrigation on the diurnal variation of photosynthesis of summer maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(3): 9-17. (in Chinese)
- [8] 马文军,程琴娟,李良涛,等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 73-80.
MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 73-80. (in Chinese)
- [9] 刘继龙,李佳文,周延,等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333-339.

- LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333 – 339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190736&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036. (in Chinese)
- [10] 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):62 – 67.
HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Sub-soiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62 – 67. (in Chinese)
- [11] 张万锋,杨树青,靳亚红,等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2021, 52(1):228 – 237.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, JIN Yahong, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 228 – 237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210126&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.026. (in Chinese)
- [12] 毕远杰,王全九,雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油葵产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):83 – 89.
BI Yuanjie, WANG Quanjiu, XUE Jing. Effects of ground coverage measure and water quality on soil water salinity distribution and helianthus yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 83 – 89. (in Chinese)
- [13] 郑九华,冯永军,于开芹,等. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉棉花试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):26 – 31.
ZHENG Jiuhua, FENG Yongjun, YU Kaiqin, et al. Irrigation with brackish water under straw mulching[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 26 – 31. (in Chinese)
- [14] 李新举,张志国,刘勋玲,等. 秸秆覆盖对土壤水盐运动的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2000,31(1):38 – 40.
LI Xinju, ZHANG Zhiguo, LIU Xunling, et al. Effects of straw mulch on soil water and salt moving[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science), 2000, 31(1): 38 – 40. (in Chinese)
- [15] 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 Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1 – 17. (in Chinese)
- [16] 潘春洋. 盐渍化农田不同水源灌溉及秸秆还田联合模式试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
PAN Chunyang. Experiment study on irrigation with different water sources and straw returned joint model in salinized farmland [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [17] 李小刚,崔志军,王玲英,等. 盐化及有机质含量对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响[J]. 土壤学报,2002, 39(4):550 – 559.
LI Xiaogang, CUI Zhijun, WANG Lingying, et al. Effects of salinization and organic matter on soil structural stability and Atterberg Limits[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(4): 550 – 559. (in Chinese)
- [18] 杜家菊,陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报,2010,45(2):4 – 6.
DU Jiaju, CHEN Zhiwei. The method of path analysis using SPSS linear regression[J]. Biology Bulletin, 2010, 45(2): 4 – 6. (in Chinese)
- [19] XIE X F, PU L J, WANG Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1419 – 1427.
- [20] 陆培榕,张展羽,冯根祥,等. 秸秆排水体埋深对盐渍土水盐分布的影响及排水抑盐效果[J]. 农业工程学报,2017, 33(5):115 – 121.
LU Peirong, ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, et al. Effect of straw draining piece depth in soil on water-salt distribution in saline soil and its drainage-salt inhibiting performance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 115 – 121. (in Chinese)
- [21] 李芙蓉,杨劲松,吴亚坤,等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. 土壤,2013,45(6):1101 – 1107.
LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in North Jiangsu Province[J]. Soil, 2013,45(6): 1101 – 1107. (in Chinese)
- [22] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(10): 220 – 228,201.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):220 – 228,201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171027&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.027. (in Chinese)
- [23] FEIGEN A, RAVINA I, SHALHEBET J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment[M]// Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Berlin: Springer Verlag, 1991: 34 – 116.
- [24] BASILE A, BUTTAFOCO G, MELE G, et al. Complementary techniques to assess physical properties of a fine soil irrigated with saline water[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(7): 1797 – 1807.
- [25] 杨志谦,王维敏. 秸秆还田后碳、氮在土壤中的积累与释放[J]. 土壤肥料,1991(5):43 – 46.
YANG Zhiqian, WANG Weimin. Accumulation and release of carbon and nitrogen in soil after straw returning[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 1991(5): 43 – 46. (in Chinese)
- [26] 吴忠东,王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(1):231 – 236.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231 – 236. (in Chinese)