

# 旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响

罗帅<sup>1,3</sup>, 冯浩<sup>1,2</sup>, 李成<sup>1,3</sup>, 舒方瑜<sup>1,3</sup>, 董勤各<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了研究垄膜沟灌系统下不同灌水量对河套灌区土壤水盐运移规律及春玉米生长特性的影响,于 2019 年 4—10 月在河套灌区曙光试验站开展田间试验,通过布设 5 个典型灌水量(T1, 200 mm; T2, 275 mm; T3, 350 mm; T4, 425 mm; T5, 500 mm),深入研究垄膜沟灌土壤水盐运移特征及其对春玉米产量和水分利用效率(WUE)的影响,尝试寻求轻度盐渍化农田的垄膜沟灌适宜灌水量。结果表明:T4 与 T5 处理 0—120 cm 土层的土壤贮水量接近,T5 处理的玉米耗水量显著高于其他处理。T1~T5 处理垄上平均储盐量分别为 48.37, 26.84, 19.34, 21.38, 22.79 t/hm<sup>2</sup>。T1、T2 和 T5 处理垄体储盐量较播种前分别增加 27.33, 1.54, 5.88 t/hm<sup>2</sup>, T3 和 T4 分别减少 10.04, 3.42 t/hm<sup>2</sup>, 积盐量呈先减少后增加的“V”形变化;200, 275 mm 灌水量下土壤严重缺水,储盐量高,350 mm 处理的土壤水盐环境适宜,WUE 最高,且产量与 T4 和 T5 处理无显著差异,425, 500 mm 的深层渗漏大,积盐量有逐渐升高的趋势。因此,在引黄水量减少前提下,河套灌区使用垄膜沟灌 350 mm 的灌水量可达到节水控盐增产的目标。

**关键词:** 垄膜沟灌; 土壤盐渍化; 节水控盐; 春玉米; 灌溉定额优化

中图分类号:S274.1; S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0259-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.036

## Effects of Different Irrigation Amounts on Soil Water and Salt and Yield of Spring Maize Under Ridge with Film Mulching and Furrow Irrigation in Arid Area

LUO Shuai<sup>1,3</sup>, FENG Hao<sup>1,2</sup>, LI Cheng<sup>1,3</sup>, SHU Fangyu<sup>1,3</sup>, DONG Qin'ge<sup>1,2</sup>

(1.College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Water and Soil Conservation, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Key Laboratory of Agricultural Water and Soil

Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to explore the effect of different irrigation amount on soil water and salt transport and growth characteristics of Spring Maize in Hetao Irrigation District (HID) under ridge with film mulching-furrow irrigation system, field experiments were carried out in Shuguang experimental station of HID from April to October, 2019. Five typical irrigation amounts (T1: 200 mm, T2: 275 mm, T3: 350 mm, T4: 425 mm, T5: 500 mm) were arranged to study the characteristics of soil water and salt transport under ridge with film mulching-furrow irrigation and its effects on yield and water use efficiency (WUE) of spring maize. The results showed that the soil water storage of 0—120 cm soil layer in T4 and T5 treatments was close, and the water consumption of maize in T5 treatment was significantly higher than that in other treatments. The average salt storage in T1~T5 treatments were 48.37, 26.84, 19.34, 21.38, and 22.79 t/hm<sup>2</sup>, respectively. The salt storage quantity of T1, T2, and T5 treatments increased by 27.33, 1.54, and 5.88 t/hm<sup>2</sup> respectively, and T3 and T4 decreased by 10.04 and 3.42 t/hm<sup>2</sup> so that the salt accumulation showed a "V-shaped" change. With the increase of irrigation amount, WUE first increased and then decreased, and the yield increased first and then stabilized. Under the irrigation amount of 200 mm and 275 mm, the soil was seriously short of water, and

收稿日期:2020-12-18

资助项目:国家自然科学基金项目(51609237, 51879224);国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0400205);陕西省重点研发计划一般项目(2019NY-190)

第一作者:罗帅(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 13007506208@163.com

通信作者:董勤各(1982—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事节水灌溉方法与技术、土壤水盐运移调控与模拟研究。E-mail: qgdong2011@163.com

the salt storage was high. The soil water and salt environment of 350 mm treatment was suitable, where the yield and water use efficiency were high, and the deep layer leakage of 425 and 500 mm was large, and the salt storage quantity tended to increase gradually. Therefore, on the premise of reducing the amount of water diversion from the Yellow River, the irrigation amount of 350 mm under ridge with film mulching-furrow irrigation can achieve the goal of water saving, salt control and yield increase in HID.

**Keywords:** furrow irrigation and ridge with film mulching; soil salinization; water saving and salt control; spring maize; irrigation quota optimization

河套灌区位于我国西北旱区,干旱少雨,土壤盐渍化较为严重<sup>[1]</sup>,因此引黄灌溉对当地农业发展至关重要。然而,当地农户常采用的大水漫灌易造成引黄水资源严重浪费<sup>[2]</sup>,显著抬高地下水位,加重土壤次生盐渍化,并且灌溉退水和农田排水带走大量土壤养分,致使灌区下游水体水质变差<sup>[3]</sup>。同时,黄委会将河套灌区的引黄配额从 50 亿  $m^3$  削减至 40 亿  $m^3$ <sup>[4]</sup>,形势要求灌区必需采用合理的灌溉耕作方式解决上述问题,缓解其紧迫状况。因此,将灌水资源最大化利用而将盐渍危害程度降低到最小,是目前河套灌区农田灌溉耕作方法和技术方面面临的一个重要挑战。

地面灌溉技术是当今世界各国应用最普遍的灌溉技术,其中沟灌比畦灌节水,并有利于保持土壤结构,避免田面土壤板结,减少土面蒸发损失<sup>[5]</sup>,适合在盐渍化程度较高的河套地区使用。因沟灌减少地面湿润面积,增加土壤的通透性,所以能够提高宽行距作物如春玉米的产量<sup>[6]</sup>。利用沟灌方式还可以节约灌溉水量抑制土壤盐分积累<sup>[7]</sup>。覆膜可以减少土壤蒸发,增加土壤储水量,提高作物产量<sup>[8]</sup>。垄膜沟灌则有助于改善灌水性能,控制耕层盐分积累,具有较好的节水增温增产效果<sup>[9]</sup>。与覆膜畦灌相比,垄膜沟灌深层渗漏量少、水分利用效率高<sup>[10]</sup>。与膜下滴灌相比,其操作简单、实施成本低。有研究<sup>[10-11]</sup>表明,随灌水量的增加,垄膜沟灌土壤剖面脱盐量呈增加趋势,使得产量和水分利用效率增高;但也有研究<sup>[12]</sup>发现,高灌水量处理土壤剖面中的电导率均高于低灌水量处理;灌溉量高的土壤表层盐分积累量少但亏缺灌溉能提升作物产量和水分利用效率<sup>[13]</sup>;灌溉量小达不到洗盐效果,而灌水量较大则导致洗盐效率降低,造成水资源的浪费<sup>[14]</sup>。目前,虽然研究灌水量对土壤水盐运移影响的成果较多,但针对盐碱地条件下考虑水盐和产量优化的垄膜沟灌适宜灌水量问题尚未系统探讨,需要深入研究不同灌水量条件下土壤水盐之间的交互特征及其对春玉米产量的影响,从而为河套灌区垄膜沟灌模式的示范应用提供理论依据和技术支撑。因此,本文主要针对垄膜沟灌下考虑土壤水盐有效管控的适宜灌溉定额及其对春玉米产量和水分利用效率的影响,推荐适合轻度盐渍灌区春玉米农

田的垄膜沟灌灌溉定额。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验位于内蒙古自治区巴彦淖尔市水利科学研究所曙光试验站( $40^{\circ}46'N, 107^{\circ}24'E$ ),海拔 1 039 m,属于旱半干旱气候区,降雨量集中,蒸发强烈,空气干燥,昼夜温差较大。试验区多年平均气温  $6.9^{\circ}C$ ,降水量 142.1 mm,蒸发量 2 307 mm,无霜期 160 天,年日照时间 3 189 h,生育期内降雨和日平均气温见图 1。试验区土壤属于黄河灌淤土,质地主要为粉砂壤土。耕层平均土壤容重  $1.43 g/cm^3$ ,有机质  $7.26 g/kg$ ,全氮  $105.36 mg/kg$ ,速效磷  $55.82 mg/kg$ ,速效钾  $120.49 mg/kg$ ,土壤盐分  $1.19 g/kg$ 。多年平均地下水埋深 2.5 m,具体土壤性质见表 1。

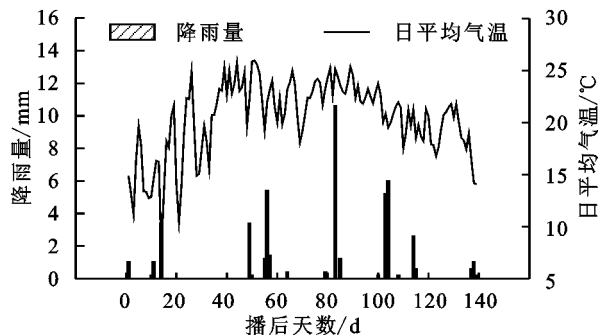


图 1 生育期内降雨与日平均气温

### 1.2 试验设计与田间管理

试验于 2019 年 4—10 月开展。供试作物春玉米,品种为“金萃 628”,播种时间为 4 月 28 日。按照当地农户传统灌溉定额 500 mm 为基础,并依次减少 15% 灌水量作为其他 4 个处理,则试验处理共为 5 个水平的灌水量,分别为 200, 275, 350, 425, 500 mm,记为 T1、T2、T3、T4、T5,分 4 次等量灌入。4 次灌水时间分别为 6 月 1 日、7 月 4 日、7 月 28 日和 8 月 15 日(分别为播后 35, 68, 92, 110 天),灌溉用水为黄河水。试验区区域均匀施入  $P_2O_5$   $150 kg/hm^2$  和 N  $300 kg/hm^2$ ,其中磷肥为磷酸二铵,在播种前施入,氮肥为尿素分 2 次在播种前和灌浆期等量施入,每个小区的面积为  $12 m \times 3.6 m$ 。试验小区采用完全随机排列,每个处理设 3 个重复,重复间设有 2 m 宽缓冲带。

### 1.3 观测指标与测定方法

1.3.1 土壤水分 在播前 1 天及播后 20, 34, 40, 67, 91, 100, 139 天采集土样, 烘干法测量土壤质量含水量并计算土壤贮水量。沟内根层土样采集深度为

0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm; 垄体根层土样采集深度为 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120 cm, 具体垄沟示意图及采样位置见图 2。

表 1 试验田土壤剖面基本性质、饱和浸提液电导率、pH

土层深度/cm	粒径分布/%			土壤质地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	田间持水量/(g·g <sup>-1</sup> )	电导率/(dS·m <sup>-1</sup> )	pH
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~2 mm					
0—10	19.64	49.60	30.76	粉壤土	1.34	0.30	5.96	8.18
10—20	20.35	53.38	26.27	粉壤土	1.34	0.31	5.77	8.31
20—40	23.85	50.29	25.86	壤土	1.43	0.32	5.45	8.49
40—60	21.62	32.12	46.26	壤土	1.46	0.32	4.92	8.73
60—80	16.93	24.67	58.40	壤土	1.44	0.31	4.33	8.93
80—100	14.01	30.31	55.68	砂壤土	1.48	0.30	3.98	8.87
100—120	7.55	10.42	82.03	砂壤土	1.48	0.26	4.51	8.89

土壤贮水量  $H$ (mm) 计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^{6/7} (Q_i \times \rho_i \times l_i \times 10) \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  层的土壤质量含水量(g/g);  $\rho_i$  为第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $l_i$  为第  $i$  层土层深度(cm)。

采用水量平衡法计算玉米耗水量  $ET$  (evapotranspiration, mm)

$$ET = \Delta W + P + I + G - R - F \quad (2)$$

式中:  $\Delta W$  为播种前与收获后土壤储水量之差(mm);  $P$  为生育期有效降水量, 为总降雨量的 40.2%<sup>[14]</sup> (mm)。  $I$  为春玉米生育期的灌水量(mm);  $G$  为生育期地下水对作物根系的补给量(mm);  $R$  为生育期地表径流量(mm);  $F$  为试验区渗漏量(mm)。渗漏和地下水补充量的总和记为  $Q$  利用达西公式进行计算:

$$Q = -K(\theta) \left( \frac{d\varphi}{dz} + 1 \right) = -K(\theta) \left( \frac{\varphi_{120} - \varphi_{80}}{z_{120} - z_{80}} + 1 \right) \quad (3)$$

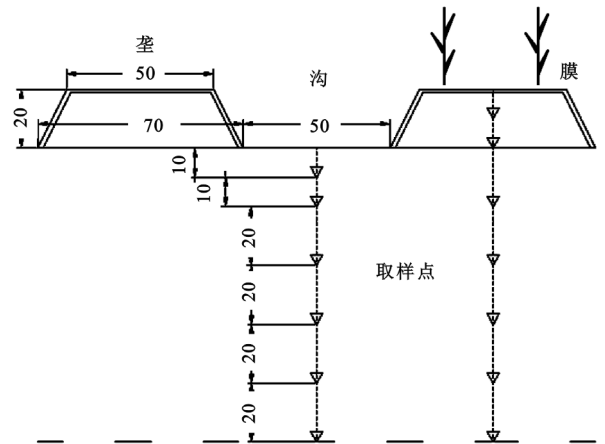
$$K(\theta) = K_s \theta_e^l [1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (4)$$

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} (n > 1) \quad (6)$$

式中:  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率  $\varphi_{120}$  和  $\varphi_{80}$  为 110, 90 cm 的土壤基质势(kPa);  $\theta$  为土壤含水率(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_e$  为土壤相对饱和度;  $\theta_r, \theta_s$  为残余土壤含水率、饱和土壤含水率(%);  $K_s$  为土壤饱和导水率(cm/d);  $h$  为土壤水势(cm);  $n, m, \alpha$  为经验参数;  $l$  为孔隙关联度参数。利用 RETC 软件中的 Rosetta 模块进行神经网络预测, 输入土壤粒径组成和土壤容重, 得到 100—120 cm 土层各项参数:  $\theta_r$  为 0.043 6 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,  $\theta_s$  为 0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,  $\alpha$  为 0.039,  $n$  为 1.760 8,  $l$  为 0.5,  $K_s$  为 140.68 cm/d, 最后利用已知参数拟合土壤水分特征曲线, 得到土壤贮水量与土壤水吸力(土壤基质势)的关系, 计

算每天的水量交换, 负值作为渗漏量, 正值则作为地下水补充量。



注: 单位为 cm。

图 2 垄沟规格示意

1.3.2 土壤盐分 测量土壤盐分所需土样取土时间和深度与测定土壤水分相同。采集土样自然风干、磨碎后过 1 mm 筛备用, 将处理后土样制备 1:5 土水浸提液混合后振荡、过滤, 用电导率仪 (DDS-11A, 上海济成分析仪器有限公司) 测定提取液电导率 (electrical conductivity, EC)。土壤电导率转化为土壤全盐量的计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$S_t = EC_{1:5} \times 3.7657 - 0.2405 \quad (7)$$

式中:  $S_t$  和  $EC_{1:5}$  的单位分别为 g/kg 和 dS/m。土壤储盐量  $S_a$  (t/hm<sup>2</sup>) 计算公式为:

$$S_a = \sum_{i=1}^{6/7} \left( \frac{S_{ti} \times \rho_i \times l_i}{10} \right) \quad (8)$$

式中:  $\rho_i$  为第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $l_i$  为第  $i$  层土层深度(cm)。

1.3.3 作物生长指标与产量 每个小区随机选取 5 株玉米进行标定, 钢尺测量不同生育阶段春玉米株高, 测定玉米叶片长度和最大宽度, 利用公式长×宽×0.75 计算叶面积。收获时, 每个小区随机选取

20 株玉米,测定穗粒数、百粒重、穗行数、穗长、穗粗等性状,人工脱粒测干重,计算产量。玉米产量水分利用效率(WUE)计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (9)$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/(hm<sup>2</sup>·mm));Y 为单位面积产量(kg/hm<sup>2</sup>);ET 为玉米耗水量(mm)。

1.3.4 气象数据 采用站内自动气象站观测气象资料,每 15 min 自动记录 1 组数据。气象资料包括空气相对湿度、风速、风向、气压、最高气温、最低气温和降雨量等。

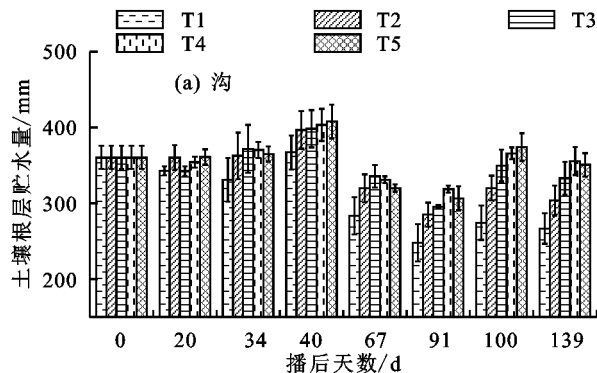
#### 1.4 统计分析方法

采用 Excel 2010 记录并计算数据, Sigmaplot 14.0 软件作图,运用 SPSS 23.0 统计分析软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),采用 LSD 法检验差异显著性( $P < 0.05$ ),使用成对样本 *T* 检验分析对象处理前后的显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水量对土壤水分时空分布特征的影响

由图 3 可知,播后 35 天内玉米处于苗期,沟内 0—100 cm 土层土壤贮水量因地形和根系不发达的原因基本不变。在整个生育期内,T1~T5 的沟内平均贮水量分别为 309.16~355.75 mm,垄上为 342.69~392.31 mm,T1 和 T2 处理的沟垄各土层平均贮水量



显著低于其他处理( $P < 0.05$ )。第 1 次灌水 5 天后(播后 40 天),各处理沟内 0—100 cm 位置土层土壤贮水量较灌前 1 天(播后 34 天)分别增加 36.30~42.74 mm, 垄体 0—120 cm 贮水量分别提升 16.41~62.25 mm, 土壤贮水量增加量随灌水量的增加而逐步增加, 配对样本检验发现, 沟垄贮水量均有显著提升( $P < 0.01$ ), 且沟内的显著性高于垄体。第 3 次灌水 7 天后(播后 100 天), T1<T5 处理沟内土壤贮水量较灌前 1 天(播后 91 天)增加 1.22%~3.86%, 垄体贮水量增加 0.22%~4.60%。相比于从 50~69 mm 的灌水量显著增加 18.16 mm 的沟垄平均土壤贮水量, 从 106~125 mm 的灌水量导致沟垄平均贮水量增加 10.92 mm, 增加幅度显著降低( $P < 0.05$ )。在播后 40 到 67 天内, 玉米处于拔节期, 5 个处理的沟垄土壤平均贮水量分别下降 98.58, 84.58, 76.83, 96.97, 105.74 mm, 耗水呈现由高到低再到高的趋势。从整个生育期来看, 收获后(播后 139 天)与播种前的垄体 0—120 cm 土壤贮水量相比, T1~T5 处理分别减少 32.64%, 24.52%, 8.16%, 6.25% 和 11.34%; 而沟内土壤贮水量, T1~T3 分别减少 21.32%, 12.46%, 4.05%, T4 和 T5 储量分别增加 2.80% 和 1.47%。配对检验发现, 灌水量对播前与收获后的沟内土壤贮水量变化无显著差异, 对垄上贮水量有显著差异( $P < 0.05$ ), 其中 T1 和 T2 处理的减少量显著高于其他处理( $P < 0.05$ ), T3、T4 和 T5 之间无明显差异。

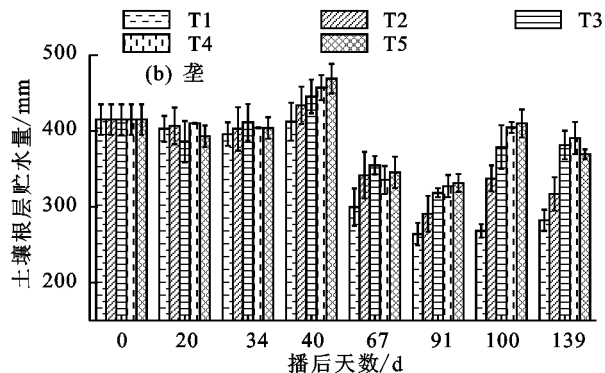


图 3 春玉米生育期内土层根层沟(0—100 cm)、垄(0—120 cm)贮水量随时间变化特征

图 4 为第 3 次灌溉前 1 天和 7 天后各处理不同土层含水量的差异情况,通过对不同处理间的配对比较发现,T3、T4 和 T5 处理对沟 0—100 cm 和垄 0—120 cm 含水量的影响显著高于 T1 和 T2( $P < 0.05$ )。灌溉 7 天后 T1~T5 处理沟内 0—40 cm 和垄体 0—60 cm 的土壤贮水量比灌前分别增加 4.22%~8.58% 和 0.77%~6.02%, 沟内 40—100 cm 和垄体 60—120 cm 的土壤贮水量增加 0.75%~6.92% 和 0.06%~11.86%。沟垄 2 个土层含水量变化虽然并不相同, 但经配对检验发现, 5 个灌水处理对沟垄各自的 2 个土层灌溉前后的含水量增量影响均为极显著, 且属同

一水平( $P < 0.01$ )。

### 2.2 灌水量对土壤盐分时空分布特征的影响

沟垄在整个生育期根层的储盐量变化趋势见图 5。沟内土壤储盐量范围为 12~36 t/hm<sup>2</sup>, 而垄体储盐量在 16~89 t/hm<sup>2</sup>, 沟内土壤盐分变化幅度低于垄体。各处理整个生育期的沟内平均储盐量为 18.34~29.17 t/hm<sup>2</sup>, 垄上平均储盐量为 19.34~48.37 t/hm<sup>2</sup>, T1 处理的沟垄平均土壤储盐量均显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。

第 1 次灌溉后 5 天(播后 40 天)与灌前 1 天(播后 34 天)相比, T1~T5 处理沟内 0—100 cm 土壤储盐量减少 10.60%~60.17%, 垄体 0—120 cm 储盐



量除 T1 升高 24.18% 之外, T2~T5 处理分别减少 32.77%~46.76%, T2 沟垄储盐量与灌前相比差异不显著, 其他处理均极显著 ( $P < 0.01$ )。第 3 次灌溉追肥后 7 天(播后 100 天)与灌前 1 天(播后 91 天)相比, T1~T4 处理沟内 0—100 cm 储盐量减少

2.50%~11.23%, 但不显著, T5 处理显著增加 22.70% ( $P < 0.05$ ); 垄体 0—120 cm 储盐量除 T4 处理减少 15.94% 外, 其他处理增加 0.49%~88.38%, 灌溉前后垄体储盐量 T2 和 T4 处理无显著变化, T3 处理显著增加 ( $P < 0.05$ ), 而 T1 和 T5 处理极显著增加 ( $P < 0.01$ )。

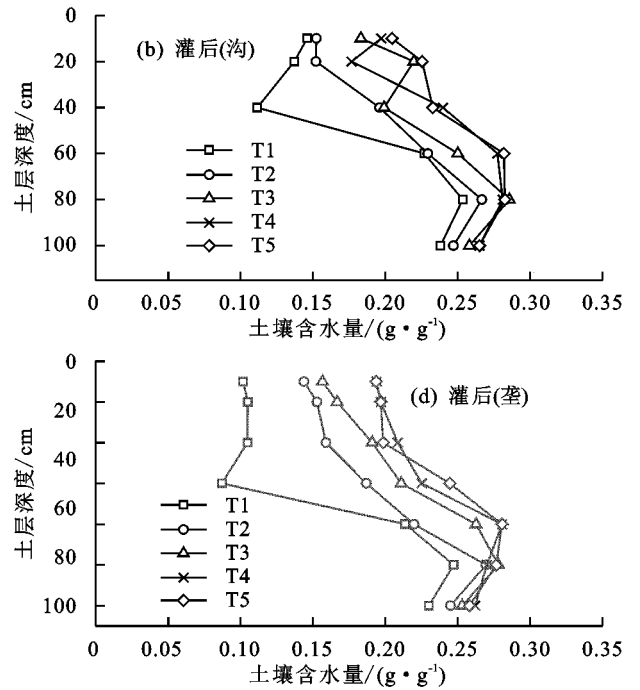
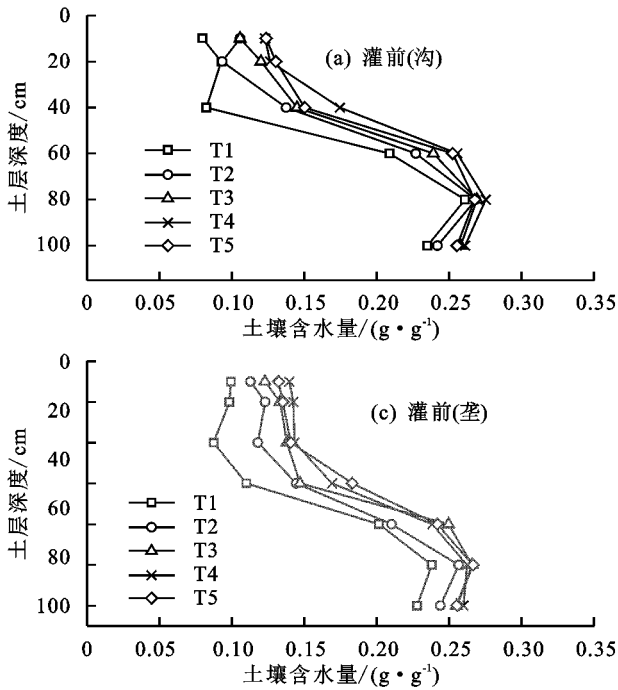


图 4 第 3 次灌溉前后各深度贮水量变化

从第 1 次灌后 5 天(播后 40 天)到第 2 次灌前 1 天(播后 67 天), 由于土壤反盐, 各处理沟内 0—100 cm 土壤储盐量增加 0.81%~103.69%, 除 T2 无显著差异外其他处理均显著 ( $P < 0.05$ ); 垄体 0—120 cm 的土壤储盐量增加 2.73%~130.46%, 除 T3 和 T4 无显著差异外其他处理均极显著 ( $P < 0.01$ )。播后第 139 天与播种前 1 天相比, T1 和 T2 处理的沟内 0—100 cm 土壤储盐量分别增加 53.42% 和 5.27%, 垄上 0—120 cm 土壤储盐量分别增加 108.24% 和

0.06%; T3 和 T4 处理沟内土壤储盐量分别减少 20.40% 和 1.43%, 垄上减少 55.95% 和 24.77%; T5 处理沟内减少 22.91%, 垄上增加 20.05%, 除 T2 的沟垄和 T4 沟内储盐量与播前相比无显著差异外, 其他处理均显著; 播后 139 天收获时 T1 处理沟垄根层土壤储盐量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); T3 和 T5 处理沟内储盐量显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 各处理垄上土壤储盐量的差异显著, 高低顺序为 T1 > T5 > T2 > T4 > T3 ( $P < 0.05$ )。

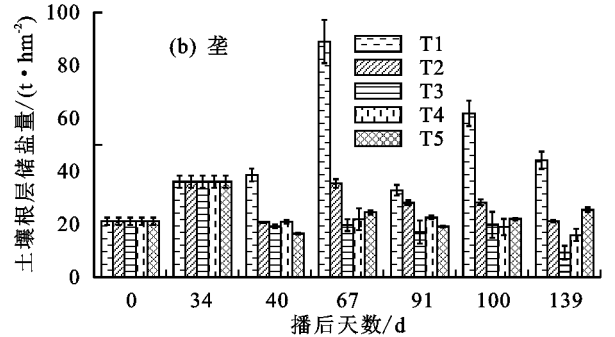
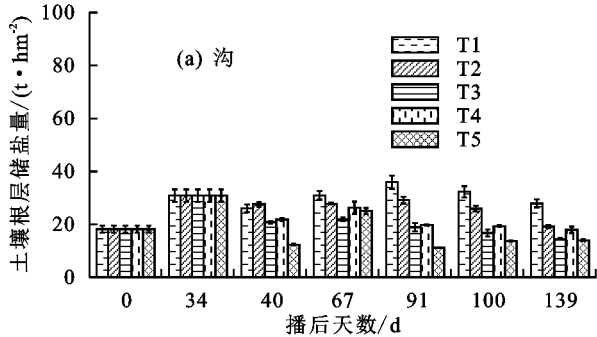


图 5 生育期内沟(0—100 cm)和垄(0—120 cm)储盐量变化

不同处理下播后 139 天较播前 1 天不同深度的土壤储盐量的增减见图 6。T1 处理在沟垄各土层位置的储盐量均高于播前, 且均显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 且盐分主要在垄体 0—40 cm 位置积累。与播前相比, T1 处理沟内 0—40 cm 的土壤储盐量增加 5.92 t/hm<sup>2</sup>, T2~T5 处理减少 3.05~4.77 t/hm<sup>2</sup>, 沟

内 0—40 cm 的盐分淋洗程度随灌水量的增加而增强; 而 60—100 cm 的储盐量较播前有所增加, 表现为积盐。各处理在垄体不同土层均有淋洗发生, T1、T2 和 T5 处理垄体 0—120 cm 储盐量较播种前分别增加 27.33, 1.54, 5.88 t/hm<sup>2</sup>, 其中 0—40 cm 的积盐量占积盐总量的百分比为 73.70%, 94.59% 和 94.14%;

T3 和 T4 分别减少 10.04, 3.42 t/hm<sup>2</sup>, 垄体根层积盐

量呈现先减少后增加的“V”形变化。

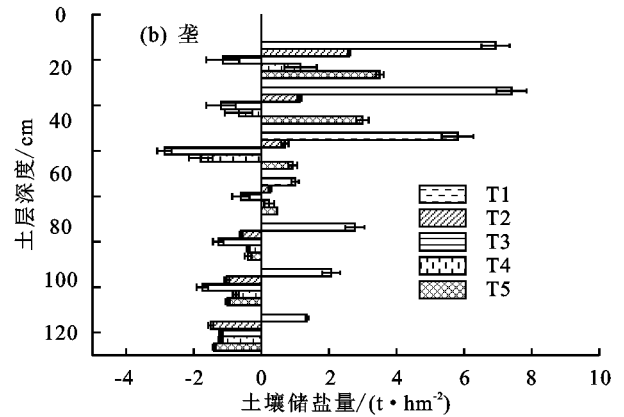
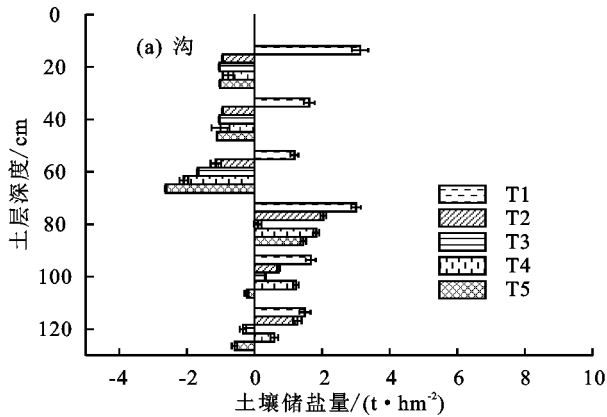


图 6 不同土层生育期末较生育期初的储盐量增减变化

### 2.3 春玉米生长特征、水分利用和产量构成

由图 7 可知,各处理春玉米叶面积指数(LAI)随时间呈先增加后逐渐减少的趋势。整个生育期内 T5 处理的 LAI 高于其他处理。在播后 128 天, T5 处理分别比 T4~T1 的 LAI 高 6.10%~48.32%, 除 T5 显著高于 T1 ( $P<0.05$ ) 外, 其他处理间的 LAI 差异均不显著。T1 和 T2 处理的玉米单株干物质随播后天数增加先增加后稳定, 而 T3、T4 和 T5 处理则逐渐增加; 播后 128 天, T5 处理较 T4 至 T1 的干物质重量分别增加 9.63%~79.26%, T5 显著高于 T1 和 T2 处理 ( $P<0.05$ ), 而与其他处理差异不显著。

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

由表 3 可知, T5 处理的籽粒产量较 T4~T1 处理增加 0.46%~29.42%。T5 处理的产量与 T3、T4 的差异不显著但均显著高于 T1、T2 处理 ( $P<0.05$ )。WUE 随灌水量升高呈现先增加后减少的趋势, 在 350 mm 达到最大值。T5 处理耗水量显著地高, 虽然产量略高, 但与 T3、T4 差异不显著, 水分利用效率最低。T3 处理的产量相对 T4、T5 分别减少 3.12% 和 3.55%, 但其 WUE 分别较之增加 13.13% 和 28.53%。

表 3 玉米产量构成要素及水分利用效率

处理	穗行数/ 行	行粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	WUE/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
T1	16.1b	38.3b	328.8c	11507.9c	33.79a
T2	16.4ab	39.8b	333.2c	12833.1b	34.55a
T3	17.1ab	42.4a	364.5b	14364.6a	34.98a
T4	17.4a	43.4a	371.3a	14826.5a	30.92b
T5	17.5a	43.6a	372.5a	14894.0a	27.21c

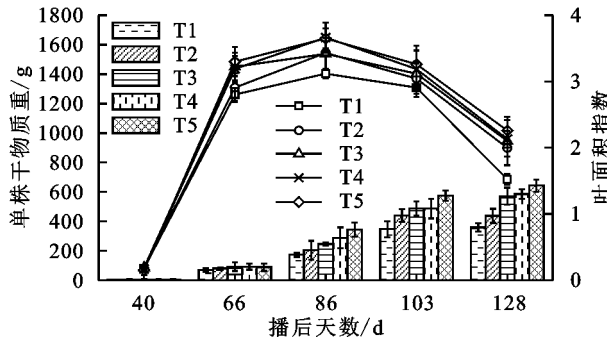


图 7 叶面积指数和单株干物质重随时间变化

由水量平衡计算表(表 2)可知, T1 消耗的土壤贮水量显著高于其他处理 ( $P<0.01$ ), T3 与 T4、T5 的贮水量之差无显著差异。随灌水量增加, 深层渗漏和地下水补给均有所增加, T5 的高灌水量造成显著高的深层渗漏, 但是地下水补给量也显著得高。玉米实际耗水量(ET)随灌水量的增加而增加, T4、T5 处理显著高于其他处理 ( $P<0.05$ ), T2 处理与 T1、T3 处理差异不显著。

表 2 水量平衡计算 单位: mm

处理	$\Delta W$	有效降雨	灌水量	渗漏	地下水补充	ET
T1	106.55a	25.30	200	19.84c	28.56c	340.57d
T2	63.90b	25.30	275	20.72bc	27.95c	371.43cd
T3	20.82c	25.30	350	27.57b	42.10b	410.65c
T4	7.14c	25.30	425	31.61b	53.69b	479.52b
T5	19.10c	25.30	500	67.04a	70.08a	547.44a

## 3 讨论

T1 处理的沟、垄土壤贮水量在生育期末比生育期初减少 20.80% 和 32.21%, 贮水量与播前之差 ( $\Delta W$ ) 为 106.55 mm, 说明 T1 处理的玉米不能仅通过吸收灌溉水和雨水满足其生长发育的需要, 还要利用土壤初始水量, 长此以往可能会导致土壤干燥化, 危及玉米生长<sup>[16]</sup>。随灌水量的增加,  $\Delta W$  逐渐减少, 且 T3、T4 和 T5 的  $\Delta W$  无显著差异, 说明 350 mm 以上灌水量处理均能保存较多土壤水分。播后 92 天进行第 3 次灌溉, 当灌水量从 50 mm 上升到 106 mm 时, 沟垄土壤贮水量均有显著提升, 但 106 mm 与 125 mm 灌水量下的土壤贮水量增量无显著差异, 由此可推知, 125 mm 灌水量下的土壤水分处于过饱和状态, 易发生渗漏。通过达西定律计算可知, T5 的渗漏量显著高于其他处理。因此, 灌溉时要考虑土壤持水能力上限, 不可盲目通过增加单次灌水量来补充土壤水分, 低灌水量能够有效减少深层渗漏的发生。

沟内 0—40 cm 土壤脱盐量随灌水量的增加而增加,各处理垄体 0—20 cm 的盐分积累量显著高于沟内相同深度,这与王增丽等<sup>[11]</sup>的“垄顶土层盐分累积效应明显高于沟底土层”的结果一致。地膜覆盖抑制积盐效果与地膜可营造稳定的膜内小环境有关<sup>[17]</sup>,T1 处理在整个生育期的垄上土壤储盐量及变化幅度显著高于其他处理,垄作覆膜抑盐效果低,但当总灌水量从 200 mm 逐步增加到 275,350 mm 时,播后 139 天的垄体 0—120 cm 的储盐量与播前 1 天相比的增加量分别较 T1 减少 99.93% 和 151.69%,说明灌水是影响盐分分布的决定因素,灌水量的适当增加能显著抑制土壤盐分的积累<sup>[18]</sup>。T1 处理一方面灌水头低,机械淋盐能力差;另一方面,低灌水量下的土壤贮水量低,为满足玉米生长需求,根系需要吸收土壤原始水分<sup>[19]</sup>,导致盐分在根层积聚的现象。T2 和 T3 处理的灌水量较多,盐随水走,淋盐能力较强,而灌溉来水又能够满足玉米生长需要,无需过多消耗播前水,能抑制土壤反盐,因此每次灌水后储盐量均有所降低,且收获时 T3 处理的储盐量显著低于其他处理。T4 和 T5 处理水量大,水分渗漏量高,沟内脱盐率显著高于其他处理,但与此同时,土壤蒸发强度与表层土壤含水率呈指数相关的关系<sup>[20]</sup>,T4 和 T5 处理的土表贮水量高,因此不仅土表蒸发强烈,地下水补给量也显著地高,深层土壤水由下而上运动,把大量盐分带入根区,使得土层内的土壤盐分增加,导致 T4 和 T5 处理播后 139 天的土壤储盐量虽显著低于 T1 处理,但相比 T3 处理显著提高。因此,过多灌水量不仅不利于压盐,反而促进土壤盐分向上运动,使根层的土壤含盐量增加。Zheng 等<sup>[21]</sup>提出盐分胁迫的阈值为  $EC_e = 2.5$  dS/m,转换成储盐量为  $24$  t/hm<sup>2</sup>,而本研究各处理垄上根层生育期平均储盐量分别为 48.37,26.84,19.34,21.38,22.79 t/hm<sup>2</sup>。因此,T1 处理高浓度的盐分环境造成强烈的盐分胁迫。肖国举等<sup>[22]</sup>研究发现,盐分积累能够降低土壤渗透势,减小作物根系内外部水势差,从而影响土壤水分的有效性。故 T1 处理严重抑制作物对土壤水分的吸收利用,土壤耗水量最低,T2 处理有一定的盐分胁迫,而其他处理对土壤水分有效性的影响程度较低。

玉米实际耗水量(ET)随灌水量的增加而增加,T4 和 T5 处理显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),是因为 T5 处理的高 LAI 虽然能减小阳光入射率降低土壤蒸发,但由于土壤蒸发减少,水分多用于光合作用促进光合产物积累,而光照面积增加导致叶温上升也促进玉米蒸腾,最终导致玉米消耗更多土壤水分。播后 128 天与 103 天相比,T1 和 T2 处理的单株干物质重无显著提升,可能是受水分胁迫,灌浆期较其他处理

提前且缩短<sup>[23]</sup>,灌浆效果差。成熟期 T5 处理的单株干物质重量显著高于 T1 和 T2 处理,表明玉米干重受灌水量影响较大,灌水量的增加能显著促进玉米干重的增加。但成熟期 T3、T4 和 T5 处理的单株干物质重量无显著差异,说明灌水量对玉米生长的促进作用存在上升阈值,过量灌溉不但不会显著促进作物生长,而且可能会造成作物减产。

本研究中,籽粒产量随灌水量的增大先增加后稳定(图 8),灌水量与水分利用效率(WUE)近似先增加后减少的二次曲线关系,取得最高籽粒产量和最高 WUE 的灌水量不一致。生育期末的土壤积盐量随灌水量呈先减后增的“V”形变化,在 350 mm 达到最低值。T5 处理的籽粒产量虽然最高,但与 T3 处理的籽粒产量没有显著差异。籽粒产量的增加主要是由于行粒数和千粒重的增加<sup>[13]</sup>,T3 处理的行粒数和千粒重显著高于 T1、T2 处理,因而籽粒产量也相应增加。尽管 T5 处理的玉米耗水量显著高于 T3 处理,促进作物的营养生长,但播后 100 天之后较高的盐分胁迫( $24.75$  t/hm<sup>2</sup>)降低水分的有效性,灌浆期并未显著提高行粒数和千粒重,因此籽粒产量没有显著提升,WUE 也显著低于 T3 处理。

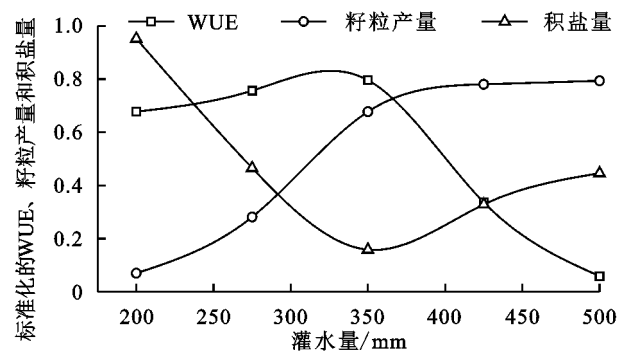


图 8 标准化的 WUE、籽粒产量和平均积盐量随灌水量的变化趋势

综合分析产量、WUE、积盐量与灌水量之间的关系可知,不同灌水量对产量和 WUE 及土壤积盐量影响差异显著。200,275 mm 处理由于灌水量少,玉米严重缺水,盐分含量显著高于其他处理,植株出现“早衰”现象,穗行数和行粒数减小,影响籽粒产量形成;350 mm 处理土壤贮水量较高,储盐量显著低于其他处理,促进籽粒产量和 WUE 的提升;425,500 mm 灌水量下的玉米耗水量高,但由于储盐量较高,影响籽粒行粒数和千粒重的进一步增加,籽粒产量与 350 mm 相比没有显著提升,导致 WUE 显著低于其他处理。因此,针对河套灌区,在引黄水量日益减少的前提下,依靠大水漫灌洗盐而获得增产的方式已变得不可持续,建议选用垄膜沟灌下 350 mm 的灌水量,以兼顾节水、洗盐与增产的耕作灌溉目的。



## 4 结论

引黄灌溉对河套灌区农业生产和发展至关重要。垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐迁移和春玉米产量的影响显著。对河套灌区而言,垄膜沟灌 200, 275 mm 的灌水量消耗播前土壤贮水量,盐分胁迫较高,严重抑制作物对土壤水分的吸收利用;350 mm 的灌水量适宜的水盐环境能显著促进玉米籽粒产量的形成;425, 500 mm 灌水量下的土壤贮水量过饱和,导致渗漏量的增加和盐分的积累,籽粒产量没有显著提高。因此,为在缓解盐分胁迫稳定产量的同时有效地提升 WUE,建议在河套灌区盐碱地采用垄膜沟灌方式下 350 mm 的灌水量。

### 参考文献:

- [1] 郝远远,徐旭,任东阳,等.河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS - EPIC 模型分布式模拟[J].农业工程学报,2015,31(11):110-116.
- [2] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J].农业工程学报,2010,26(2):31-36.
- [3] 余根坚,黄介生,高占义.基于 HYDRUS 模型不同灌水处理模式土壤水盐运移模拟[J].水利学报,2013,44(7):826-834.
- [4] Xu X, Huang G H, Qu Z Y, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2): 301-313.
- [5] 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等.交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理[J].水利学报,2002(3):64-68.
- [6] 刘玉春,刘连涛,孙红春,等.沟灌灌水量和沟深对棉花耗水量和水氮利用效率的影响[J].节水灌溉,2015(8):20-25,28.
- [7] 余根坚.节水灌溉条件下水盐运移与用水管理模式研究[D].武汉:武汉大学,2014.
- [8] 冯浩,刘匣,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):192-202.
- [9] 李成,冯浩,罗帅,等.垄膜沟灌对旱区农田土壤盐分及硝态氮运移特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):268-275.
- [10] Dong Q G, Yang Y C, Zhang T B, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 268-277.
- [11] 王增丽,朱兴平,温广贵,等.垄作沟灌条件下灌溉定额对土壤水盐分布和制种玉米耗水的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):50-54.
- [12] 吴漩,郑子成,李廷轩,等.不同灌水量下设施土壤水盐运移规律及数值模拟[J].水土保持学报,2014,28(2):63-68.
- [13] Liu H J, Wang X M, Zhang X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 144-157.
- [14] 史海滨,郭珈玮,周慧,等.灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J].农业机械学报,2020,51(4):268-278.
- [15] 童文杰.河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D].北京:中国农业大学,2014.
- [16] Wang N J, Ding D Y, Malone R W, et al. When does plastic-film mulching yield more for dryland maize in the Loess Plateau of China? A meta-analysis[J/OL]. Agricultural Water Management, 2020, 240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106290>.
- [17] 王婧,逢焕成,任天志,等.地膜覆盖与秸秆深埋对河套灌区盐渍土水盐运动的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):52-59.
- [18] 谭军利,王西娜,田军仓,等.不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):100-108.
- [19] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 40-47.
- [20] 孙景生,康绍忠,王景雷,等.沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(11):20-24.
- [21] Zheng J H, Huang G H, Jia D D, et al. Responses of drip irrigated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield, quality and water productivity to various soil matric potential thresholds in an arid region of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129: 181-193.
- [22] 肖国举,张强,李裕,等.气候变暖对宁夏引黄灌区土壤盐分及其灌水量的影响[J].农业工程学报,2010,26(6):7-13.
- [23] Zhang H M, Xiong Y W, Huang G H, et al. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 205-214.