

咸水灌溉对土壤水盐分布及设施番茄产量和品质的影响

马嘉莹^{1,2}, 王兴鹏^{1,2}, 王洪博^{1,2}, 王海瑞^{1,2}, 王学成^{1,2}, 李朝阳^{1,2}

(1.塔里木大学水利与建筑工程学院,新疆阿拉尔 843300;2.塔里木大学现代农业工程重点实验室,新疆阿拉尔 843300)

摘要:为探明咸水灌溉对土壤水盐分布及设施番茄植株生长、产量和品质的影响,本试验以南疆地区设施番茄为研究对象,设置4个灌溉水矿化度,分别为 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T1)、 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T2)、 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T3)和 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T4),并以淡水灌溉为对照(CK),开展同一灌溉定额条件下设施番茄适宜灌溉水矿化度的研究。结果表明:不同生育期阶段土壤含水率基本表现为20~60 cm土层较高,表层及深层土壤含水率相对较低,土壤含水率随着灌溉水矿化度的增大逐渐增加;0~80 cm土层平均土壤含水率在生育期内逐渐降低,且深层土壤降幅显著;生育期初始阶段土壤含盐量主要积聚在0~40 cm土层,随着生育期的推进土壤盐分呈累积趋势且向深层土壤运移,生育期末主要积聚在0~60 cm土层;灌溉水矿化度小于 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时0~20 cm土层整体呈脱盐状态,其中CK处理平均脱盐率达27.79%,T1处理平均脱盐率达17.07%;灌溉水矿化度 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 促进了番茄植株生长,株高和茎粗相较CK分别增加5.32%~7.08%和8.23%~9.25%, $6\sim 8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 则起到了明显抑制作用;矿化度为 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水灌溉在保证番茄产量和灌溉水利用效率的同时可显著提高果实品质,其中可溶性固形物、硝酸盐和Vc含量较CK处理分别增加14.50%、119.38%和98.54%, $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉对果实品质无显著影响,但产量较CK处理减少51.61%, $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灌溉导致番茄产量和品质均显著降低。综合考虑产量和品质等指标,在淡水资源紧缺且地下咸水资源丰富的南疆地区,推荐采用 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿化度的咸水对设施番茄进行灌溉。

关键词:咸水灌溉;土壤盐分;土壤水分;设施番茄;产量;品质

中图分类号:S275.6;S274.1;S641.2 **文献标志码:**A

Effects of brackish water irrigation on soil water and salt distribution and yield and quality of facility tomatoes

MA Jiaying^{1,2}, WANG Xingpeng^{1,2}, WANG Hongbo^{1,2},
WANG Hairui^{1,2}, WANG Xuecheng^{1,2}, LI Zhaoyang^{1,2}

(1. Institute of Water Conservancy and Construction Engineering, Tarim University, Xinjiang 843300, China;

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering, Tarim University, Xinjiang 843300, China)

Abstract: To investigate the effects of saline water irrigation on soil water and salt distribution and the growth, yield and quality of facility tomato plants, this experiment was conducted with facility tomatoes in the southern border area of Xinjiang. Four irrigation water mineralization levels were set, $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T1), $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T2), $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T3) and $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (T4), and freshwater irrigation was used as the control group (CK) to study the appropriate irrigation water mineralization level of facility tomato under the same irrigation quota conditions. The results showed that the soil water content in different growth stages was basically higher in the 20~60 cm soil layer than the surface and deep soil water content. The soil water content gradually increased with the increase of irrigation salinity. The average soil water content of the soil layer from 0 cm to 80 cm gradually decreased during the growth period and with the depth of the soil decreased significantly. The soil salinity in the initial stage of the growth period mainly accumulated at 0~40 cm. As the growth period progressed, the soil salinity tended to accumulate and move toward

the deep layer, mainly in the 0~60 cm soil layer at the end of the growth period. When the salinity was less than $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the 0~20 cm soil layer was desalted. The average desalination rate of CK treatment was 27.79%, and desalination rate of T1 treatment was 17.07%. Irrigation salinity of $2\sim 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ promoted the growth of plant height and stem diameter of tomato plants. Compared with CK, plant height and stem diameter increased by 5.32%~7.08% and 8.23%~9.25%, respectively. Irrigation water salinity of $6\sim 8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ played a significant inhibitory effect. A mineralization level of $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ saline irrigation significantly improved fruit quality while ensuring tomato yield, and the contents of soluble solids, nitrate and Vc increased by 14.50%, 119.38% and 98.54% respectively, compared with CK. No significant effect of $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ irrigation salinity was found on fruit quality, but the yield was 51.61% lower than CK. Yield and quality of tomato decreased significantly under $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ irrigation salinity. Considering the yield and quality indicators, it is recommended to use salt water with salinity of $2\sim 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ to irrigate protected tomatoes in the southern Xinjiang where freshwater resources are scarce and underground saltwater resources are abundant.

Keywords: brackish water irrigation; soil salinity; soil moisture; facility tomato; yield; quality

随着全球淡水资源供需矛盾的日益突出,合理开发和利用咸水资源已经成为各国共同关注的问题。我国是农业大国,农业用水量约占总供水量的62%^[1],而区域性水资源短缺严重制约了灌溉农业的可持续发展。2017年《水利部关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见》明确指出,将咸水资源纳入水资源统一配置^[2-3]。据统计,在我国西北干旱地区地下咸水资源可开采量达到了42.39亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[4],其中新疆最高,占西北内陆地区咸水开采量的40.7%^[5]。南疆属于典型的极端干旱地区,蒸发强烈、降雨稀少、水资源匮乏,农业用水比例占总用水的95%左右^[6]。随着近年来南疆地区工农业的快速发展及人口数量的增加,水资源供需矛盾日益突出,因此,合理开发利用咸水资源进行灌溉将成为解决淡水资源危机的重要途径之一。

咸水灌溉不仅可以有效缓解区域降水量少、农田灌溉水资源短缺的现状,还可以在在一定程度上提高作物的产量和品质^[7]。国内外在咸水灌溉方面已经进行了大量研究,并取得了一些研究成果和生产经验。土壤水分与盐分的动态变化紧密联系,根据“盐随水来,盐随水去”的水盐运移规律,咸水灌溉带盐分进入土壤,但同样具有淋洗和压盐作用^[8]。Pasternak等^[9]经过连续2a的咸水灌溉发现土壤盐分主要分布在0~30cm土层,作物根区土壤容重、盐分、pH和含水率明显增加^[10-11]。咸水灌溉改变了土壤水盐环境进而对作物的生理特性、产量和品质产生影响。有关研究表明, $3.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 咸水灌溉可以保证向日葵产量的同时提高其品质^[12],枸杞在 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度咸水灌溉下生长良好^[13],棉花在 $1.35\sim 2.52 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度咸水灌溉下,其产量、马克隆值、纤维长度等品质指标达到最优值^[14], $1.6 \text{ g} \cdot$

L^{-1} 是辣椒最适宜灌水矿化度^[15]。以上研究结果证明,利用咸水进行灌溉在一定程度上可促进作物生长并提高作物品质。另外,在设施作物咸水灌溉方面,有研究认为^[16-19], $3\sim 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度对设施番茄株高及茎粗生长具有一定促进作用,可提高番茄果实含糖量和可溶性固形物含量,但叶片光合特性、产量及果实大小均随盐浓度增加逐渐降低。对于甜瓜和黄瓜等对盐分中等敏感的设施作物,咸水灌溉也能提高其品质^[20-22]。然而,上述研究主要集中在降雨量较高或土壤盐渍化程度相对较低的地区,对于极端干旱和土壤盐渍化程度较高的南疆地区,咸水灌溉方面的研究相对较少。本文针对南疆设施番茄开展咸水灌溉试验,研究不同矿化度咸水灌溉对土壤水盐分布、作物生长、品质和产量的影响,寻求南疆设施番茄适宜的灌溉水矿化度范围,以期为南疆地区合理利用咸水资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021年3—7月在南疆塔里木大学水利与建筑工程学院试验基地($40^{\circ}20'47''\sim 41^{\circ}47'18''\text{N}$, $79^{\circ}22'33''\sim 81^{\circ}53'45''\text{E}$)日光温室内进行,试验地区海拔1020m,为温暖带极端大陆性干旱荒漠气候,气候干燥,蒸发量大,降水量稀少。年均气温 $10.8\sim 14.5^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $40.1\sim 82.5 \text{ mm}$,年均蒸发量 $1976.6\sim 2558.9 \text{ mm}$ 。试验地土壤为砂壤土,各土层容重、田间持水率及土壤初始含盐量等土壤基本特性如表1所示。

1.2 试验设计

以番茄为研究对象,品种为‘秦岭蔬越’,于3月10日定植,7月10日拉秧。番茄生育期共计122

d, 生育期划分见表 2。设置 4 个不同矿化度梯度的咸水灌溉处理, 分别为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (T1)、 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2)、 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (T3) 和 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (T4), 并以淡水灌溉为对照 (CK)。每个处理设置 3 次重复, 共 15 个小区。番茄起垄种植, 垄肩宽 60 cm, 垄高 20 cm, 垄间距 60 cm, 每垄种植两行番茄, 株行距分别为 30、40 cm。采用滴灌方式进行灌溉, 滴灌带布设在番茄行间, 滴头间距 30 cm, 种植模式如图 1 所示。灌溉用水根据试验区地下咸水离子成分, 采取淡水和化学药品 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 、 NaCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 按质量比例 1 : 8 : 8 : 1 : 1 混合配制而成^[23]。番茄全生育期灌水量为 300 mm, 灌水 10 次且灌水定额相同^[24]。追肥采用水肥一体化, 营养生长期以平衡肥为主, 开花期和结果期以高钾肥 (N : P : K 为 12 : 6 : 40 的复合肥) 为主, 用量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。田间管理措施与当地生产实践保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水盐含量 采用烘干法测定土壤含水率; 移栽前 (3 月 10 日) 进行取样测定土壤初始含水

率和含盐量, 生育期内分别在开花期 (4 月 22 日)、开花结果期 (5 月 9 日)、开花结果盛期 (6 月 2 日) 和结果末期 (7 月 2 日) 灌水 24 h 后利用土钻在距离滴灌带水平距离 0、20、40 cm 和 60 cm 处进行取样, 取样深度为 10、20、40、60 cm 和 80 cm; 采用电导法测定土壤含盐量: 烘干土样, 经研磨后过 20 目筛, 制作水土比 5 : 1 浸提液并采用便携式电导仪 (DDP-210, 上海仪电科学仪器股份有限公司, 中国) 测定浸提液电导率 (EC), 最终利用烘干法标定出土壤含盐量与电导率的关系, 换算土壤含盐量。标定结果如图 2 所示。

表 1 试验地土壤基本特性

Table 1 Basic characteristics of soil in the test site

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水率 Field capacity /($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	土壤初始含盐量 Initial soil salinity /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~10	1.36	0.28	4.45
10~20	1.43	0.27	1.31
20~40	1.48	0.25	0.64
40~60	1.46	0.26	0.50
60~80	1.38	0.28	0.32

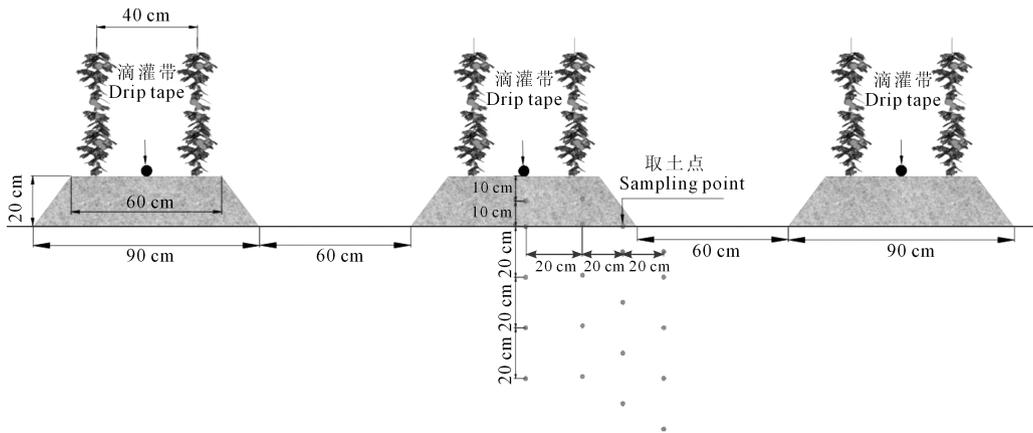


图 1 种植模式

Fig.1 Planting patterns

表 2 番茄生育期划分

Table 2 Duration of tomato growth period

生育期 Growth period	起止时间 (m-d) Start and end date	移栽后时期/d Duration
苗期 Seedling period	03-10—04-19	1~40
开花期 Blooming period	04-20—04-26	41~47
开花结果期 Blooming and fruit period	04-27—05-30	48~81
开花结果盛期 Blooming and fruit flourishing period	05-31—06-30	82~112
结果末期 Late period	07-01—07-10	113~122

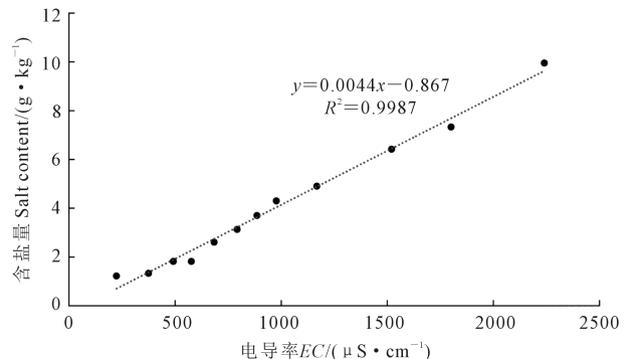


图 2 烘干法标定结果

Fig.2 Calibration results of drying method

1.3.2 植株生长指标 株高和茎粗:移栽后在每个试验小区内随机选择10株长势一致的番茄植株,监测苗期(4月12日)、开花期(4月22日)、开花结果期(5月6日)、开花结果盛期(6月2日)、结果末期(7月2日)株高和茎粗。从植株基部用卷尺测量株高;用电子游标卡尺测量茎粗并采用十字交叉法读数,取其平均值。

1.3.3 番茄品质及产量 在开花结果盛期(6月29日)各处理随机采6个鲜果样测定番茄果实的品质。用手持折射仪(ATAGO,日本)测定可溶性固形物含量,用斐林试剂法测定还原性糖含量^[25];用硫酸-水杨酸法测定硝酸盐含量^[26];用二氯酚靛酚滴定法测定Vc含量^[27]。在设施番茄进入采摘期后,每2~5d人工摘收一次测定产量。每次收获时,每个小区番茄按行摘收并称重。

1.3.4 灌溉水利用效率 灌溉水利用效率(*IWUE*)计算公式为^[27]

$$IWUE = Y/I \quad (1)$$

式中,*Y*为番茄产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);*I*为生育期内的灌溉水补给量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理及分析

采用Microsoft Excel 2018对数据进行整理分析,使用Origin 2018进行绘图,应用SPSS20.0-Duncan's法检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉对土壤水盐分布的影响

2.1.1 生育期内土壤含水率分布变化 不同灌水矿化度下番茄生育期内0~80cm土壤含水率动态变化如图3所示,各处理不同生育期阶段垂直方向的变化趋势基本相同,0~40cm深度范围内土壤含水率随土层深度增加而增加,表现为T4处理最大,T3、T2、T1处理次之,CK处理最低;40~80cm深度范围内随深度增加含水率逐渐降低,各处理间差异规律与0~40cm土层一致,20~60cm土层含水率较高,表层及深层土壤含水率相对较低;各处理土壤平均含水率均随着生育期的推进逐渐减小,生育期末60~80cm土壤含水率显著下降,但T3和T4处理0~80cm含水率减小趋势较T1和T2处理更为缓慢,含水率在开花期最大;移栽前期与开花期各处理土壤含水率降幅较小且比较稳定,开花期至结果盛期土壤含水率降幅较大,结果盛期至结果末期土壤含水率在植株根区(20~60cm)较高。

综合对比各处理土壤含水率分布情况,在同一

灌水定额下,灌溉水矿化度对土壤含水率影响显著。分析认为咸水灌溉使作物对水分的吸收受到一定限制,导致部分水分滞留土壤中不能被吸收利用,土壤含水率随着灌溉水矿化度的提高逐渐增大;各处理含水率随生育期的变化与各时期植株生长消耗土壤水分有关,移栽前期至开花期植株生长缓慢消耗土壤水分较少,开花期至结果盛期植株生长较快消耗土壤水分较多,结果盛期至结果末期植株生长趋于稳定;当灌溉水矿化度大于 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对番茄根系吸水抑制作用的影响较为显著。

2.1.2 生育期内土壤含盐量分布变化 不同灌水矿化度下番茄生育期内0~80cm土壤含盐量动态变化如图4所示,各处理土壤含盐量分布规律基本相同,开花期和开花结果期含盐量主要积聚在0~40cm土层,在40~80cm土层内随着深度增加含盐量逐渐减小,随着生育期推进土壤含盐量呈累积趋势且向深层土壤运移,开花结果盛期和结果末期土壤含盐量主要积聚在0~60cm,土壤平均含盐量与灌水矿化度成正比;CK和T1处理表层(0~20cm)土壤受淋洗作用影响处在脱盐状态,脱盐率分别为28.06%和17.40%,盐分主要积聚在20~60cm土层,T2处理表层土壤积盐率较小为4.79%,T3和T4处理0~80cm土壤均处在积盐状态,灌水矿化度与积盐率和积盐深度均呈正比关系。

综上可知,灌水矿化度越高对土壤的淋洗效果越差并加速土壤的积盐。分析认为,咸水灌溉对浅层土壤盐分具有不同程度淋洗作用,部分盐分运移至深层,当灌水矿化度达到 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时由于土壤整体含水率增大,20~60cm土层土壤在饱和状态下更易发生下渗将盐分带入深层(60~80cm)土壤,因此T3和T4处理深层土壤积盐率显著增加,分别达到910.86%和1145.99%。

2.2 咸水灌溉对设施番茄生长的影响

不同处理下番茄株高和茎粗的变化如图5所示,苗期至开花期未有灌水处理,处理间株高和茎粗无显著差异。开花期后采用咸水灌溉,处理间植株生长指标差异逐渐明显。生育期内各处理番茄株高和茎粗均表现为前期生长缓慢,开花结果期快速增长,结果盛期后基本趋于稳定。与CK相比,T1和T2处理的番茄株高略有增加,但无显著差异,T3和T4处理番茄株高显著下降,随着生育期的推进,该现象愈加明显。生育期末T1和T2处理株高相较CK分别增加5.32%和7.08%,T3和T4处理分别减少15.26%和42.14%;T1和T2处理茎粗变化规律

与株高基本一致,生育期后期均显著高于 CK,分别增加了 8.23%和 9.25%,而 T3 和 T4 与 CK 相比无显著差异。整体而言,T1 和 T2 处理促进了番茄的植株生长,T3 和 T4 处理则起到了抑制作用,表明适宜矿化度的咸水灌溉对作物的生长较为有利。

2.3 咸水灌溉对设施番茄产量、品质及灌溉水利用效率的影响

由表 3 可知,各处理番茄产量随灌溉水矿化度的增加呈先增加后降低的变化规律,T1 处理较 CK 增加了 9.09% ($P < 0.05$),T2、T3 和 T4 处理相比 CK 则

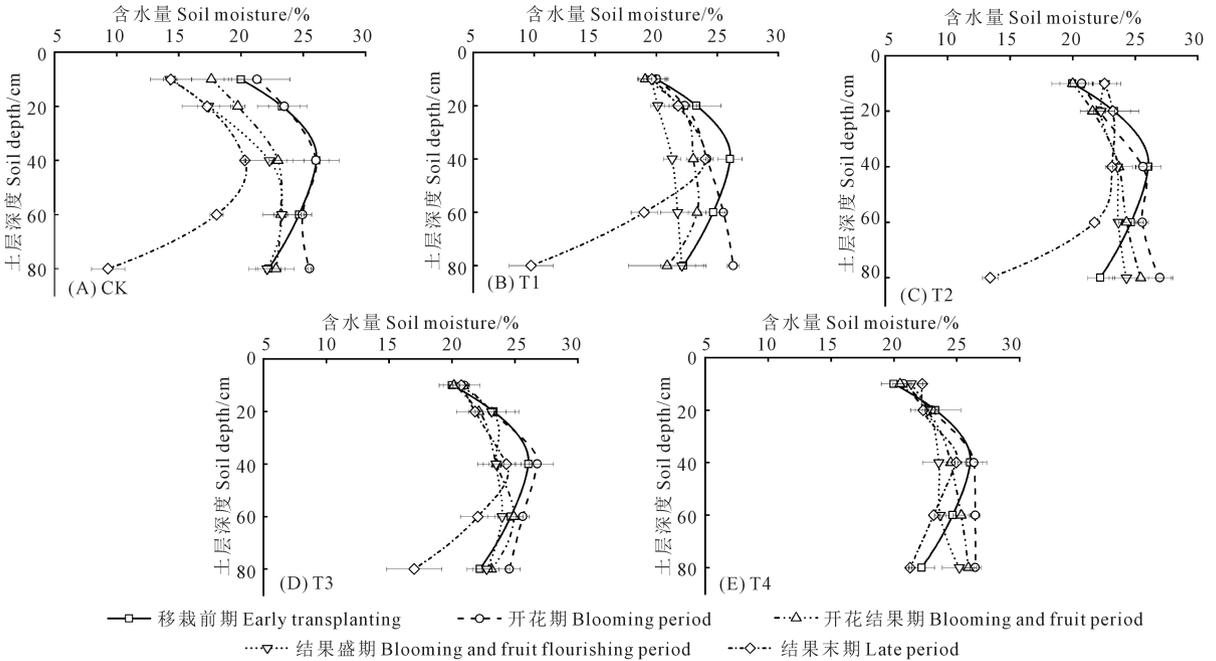


图 3 番茄全生育期土壤含水率变化

Fig.3 Changes of soil water content during the whole growth period of tomato

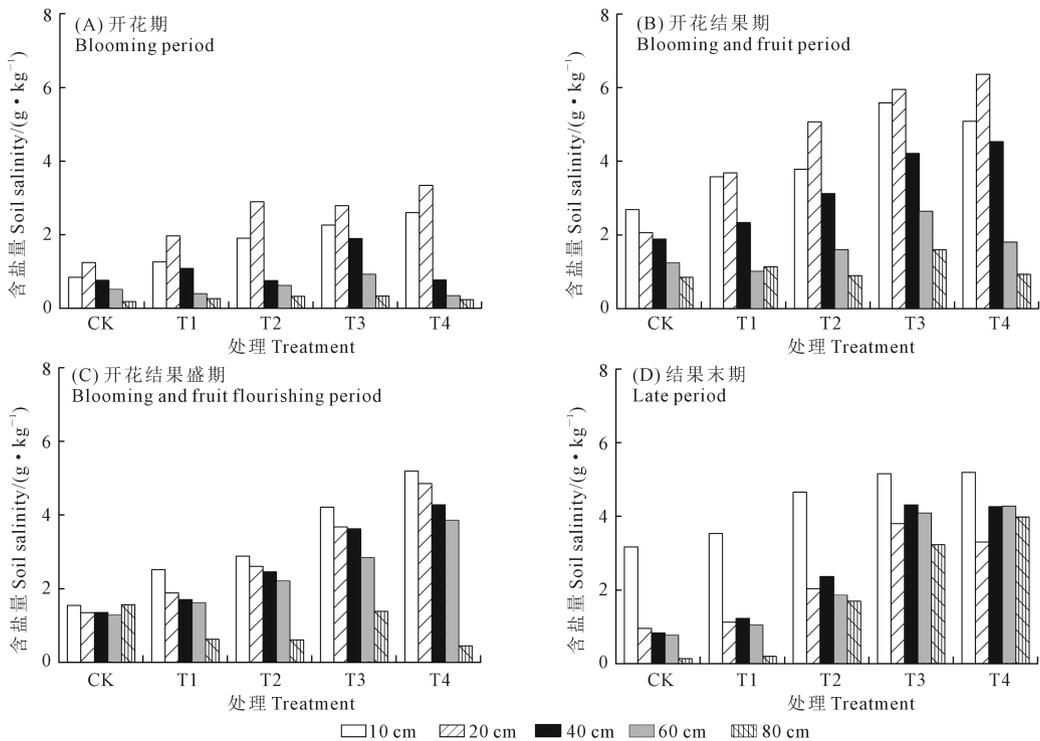


图 4 番茄全生育期土壤含盐量变化

Fig.4 Changes of soil salinity during the whole growth period of tomato

显著降低 ($P<0.05$); T2 处理可溶性固形物含量、硝酸盐含量和 V_c 含量较 CK 处理分别增加 14.50%、119.38% 和 98.54% ($P<0.05$); 还原糖含量表现为 T3 处理最高, 较 CK 处理增加了 27.60% ($P<0.05$); $IWUE$ 随灌水矿化度增加呈先增加后减小趋势, T1 处理 $IWUE$ 达到峰值 ($12.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。上述分析表明, 与淡水相比, 矿化度为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 咸水灌溉可显著

提高番茄产量, 且对植株吸收利用水分起到促进作用; $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 灌溉水可显著提高番茄果实品质, 但番茄产量有所下降; $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理番茄品质差异相对较小, 但番茄产量显著下降; $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理番茄产量和品质均显著降低。综合考虑番茄产量和果实品质, $2\sim 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 矿化度的咸水灌溉有利于番茄品质和产量提高。

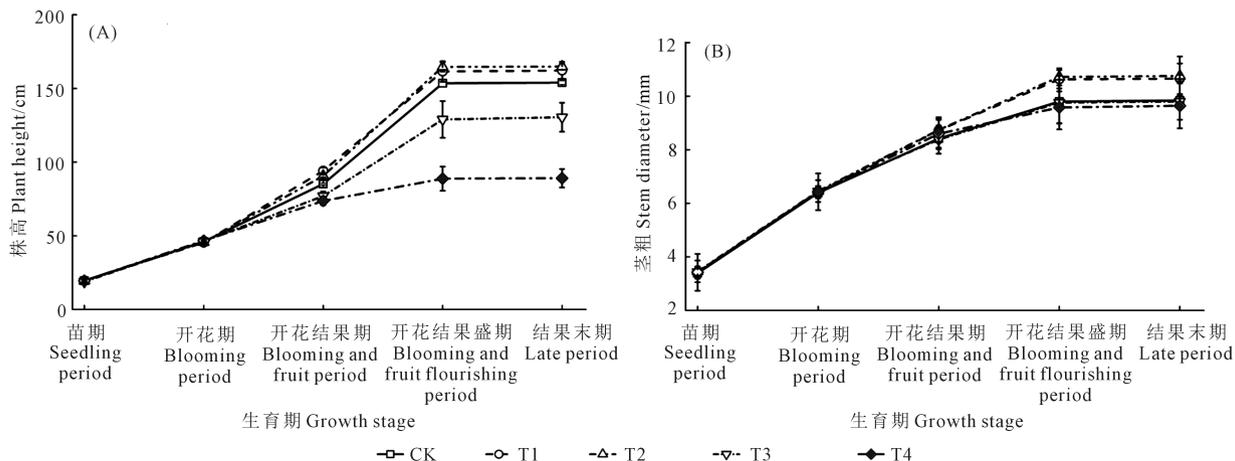


图5 全生育期株高和茎粗变化

Fig.5 Changes of plant height and stem diameter during whole growth period

表3 不同处理番茄的品质指标及产量等指标

Table 3 Quality and yield indexes of tomato under different treatments

处理 Treatment	可溶性固形物 Soluble solid/%	还原糖 Reducing sugar/%	硝酸盐 Nitrate/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	V_c /%	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水利用效率 IWUE/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	总干物质量 Gross dry mass/g
T1	$3.94 \pm 0.05b$	$23.16 \pm 1.23b$	$15.78 \pm 1.20b$	$4.42 \pm 0.42b$	$36046.90a$	$12.01 \pm 0.05a$	$110.00 \pm 1.16b$
T2	$4.50 \pm 0.08a$	$24.65 \pm 0.92b$	$27.41 \pm 2.30a$	$8.11 \pm 0.36a$	$31093.40c$	$10.36 \pm 0.32b$	$85.48 \pm 0.60c$
T3	$3.40 \pm 0.29bc$	$28.21 \pm 1.92a$	$16.37 \pm 0.77b$	$4.42 \pm 0.17b$	$21954.14d$	$7.31 \pm 0.38c$	$55.32 \pm 0.55d$
T4	$3.10 \pm 0.08c$	$18.05 \pm 1.09c$	$11.55 \pm 1.76b$	$3.22 \pm 0.83c$	$15855.83e$	$5.28 \pm 0.02d$	$30.49 \pm 0.28e$
CK	$3.93 \pm 0.38b$	$22.10 \pm 1.33b$	$12.49 \pm 3.13b$	$3.91 \pm 0.21bc$	$32772.02b$	$10.92 \pm 0.38b$	$122.39 \pm 0.30a$

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

2.4 灌水矿化度与产量、灌溉水利用效率、总干物质量和土壤积盐率的关系

如图6所示, 以灌水矿化度为自变量, 设施番茄产量和水分利用效率为因变量, 分别建立一元二次回归方程, 拟合曲线均呈抛物线分布, 决定系数均为0.9510, 产量和灌溉水利用效率均在 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 灌溉处理下达到峰值; 干物质积累与灌水矿化度呈负线性相关, 决定系数为0.9987; 土壤积盐率与灌水矿化度呈正线性相关关系, 决定系数为0.9623。

3 讨论

在灌水、植株蒸腾、土壤蒸发、水源携带盐分及土壤盐分空间分布差异等诸多因素的影响下, 土壤盐分始终处于一个积累与淋洗的动态变化过程^[28]。

李晓彬等^[29]研究表明不同咸水灌溉土壤盐分空间分布表现出较大的差异, 但总体上由于滴灌水分扩散特性, 会将部分盐分淋洗到作物根系分布范围以外, 从而体现出一定的洗盐效果。本试验结果表明, $0\sim 80 \text{ cm}$ 土层范围内土壤含水率随着土层深度的增加呈先增加后减少的趋势, 且与淡水灌溉相比, 咸水灌溉土壤含水率显著增加, 与郭安安等^[30]研究结果一致, 这是因为随着灌水矿化度的提高, 土壤含盐量明显升高, 间接降低了作物根系吸水能力, 土壤水分未能被充分利用而在土体中积聚。李丹等^[31]研究认为, 微咸水滴灌蕃茄条件下土壤含水率随生育期的推进略有降低, 这与本研究结果基本一致, 但其研究认为咸水灌溉并没有增加土体的盐分, 只是盐分在土体内进行了重新分布, 这与本研究结果存在差异, 分析认为是其试验区位于滨海地

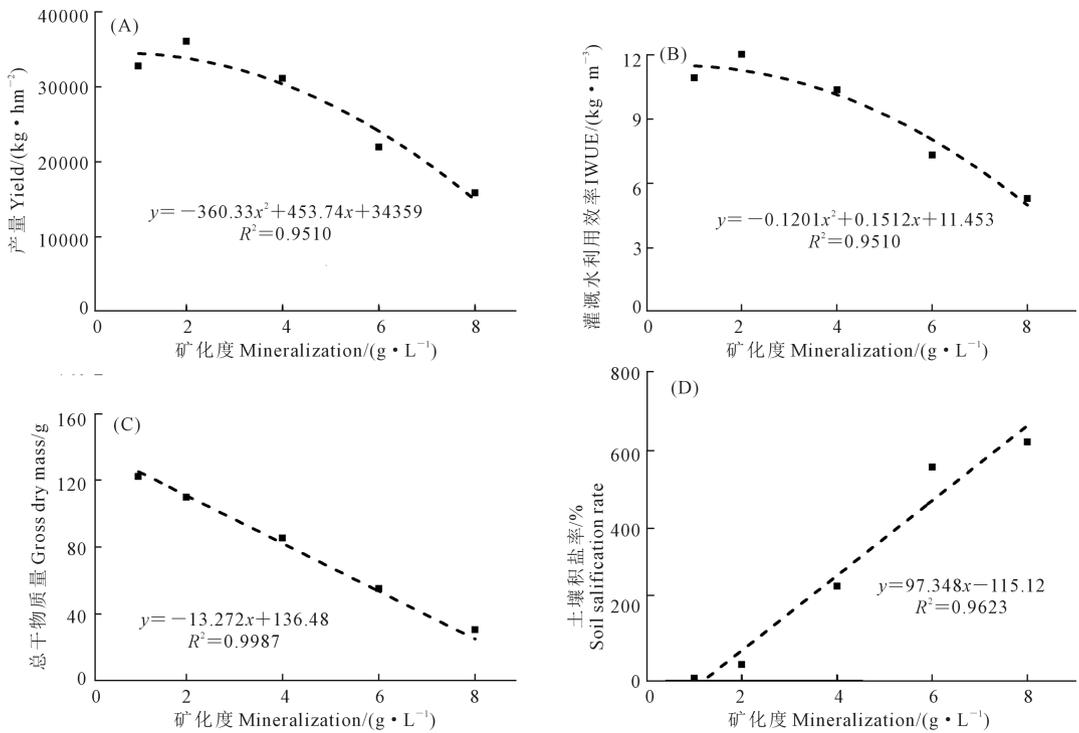


图 6 各项指标与灌水矿化度之间的关系

Fig.6 Relationship between various indexes and irrigation salinity

区,降水量高达 554.9 mm,降雨对咸水灌溉后的根区土壤进行了有效的淋洗,土壤盐分被淋洗至取样控制深度以外;而本试验是在气候极端干旱的南疆地区进行,蒸发强烈,降雨稀少,且试验是在日光温室内进行,未受到降雨影响,经过多次咸水灌溉后,土壤含盐量显著增加。

利用咸水灌溉尤其是高频咸水滴灌条件下,作物根区一定范围内土壤溶液的含盐量主要受灌溉水带入盐分的影响^[31],经过连续咸水灌溉后,灌水矿化度的不同会导致土壤盐环境出现明显差异,进而对作物生长、品质和产量产生不同程度的影响^[32]。本试验结果表明,灌水矿化度 2~4 g·L⁻¹促进了番茄植株的株高和茎粗生长,6~8 g·L⁻¹则起到了明显抑制作用,研究结果与前人对番茄、黄瓜、向日葵的研究结论基本一致^[12,33-34],说明适宜的灌溉水矿化度可以促进作物生长,而过高矿化度的咸水灌溉导致作物根区土壤溶液渗透势下降,抑制作物根系对水分的吸收,从而阻碍作物生长并导致减产。一定程度的盐分胁迫有利于提高番茄产量和果实品质,Magún 等^[35]研究表明,盐浓度增加提高了番茄果实可溶性固体物质含量和有机酸含量,但当盐浓度超过阈值后,番茄总产量和经济效益均随其增大而降低。本试验结果同样发现,2~4 g·L⁻¹

矿化度的咸水灌溉可以提高果实的可溶性固形硝酸盐和 Vc 含量及蕃茄产量,与其他研究结果基本一致^[16,26,34]。Wan 等^[36]研究表明,黄秋葵的水分利用效率随灌水矿化度的升高而降低;姚玉涛等^[37]研究咸水滴灌对松花菜水分利用效率的影响发现,灌水量相同条件下,松花菜的产量在咸水胁迫下显著下降。本研究同样发现随着灌水矿化度提高,灌溉水利用效率和干物质累积量逐渐降低,说明适宜矿化度的咸水灌溉在保证作物产量的同时,还可以显著提高果实的品质。杨文杰等^[33]研究认为,1~3 g·L⁻¹咸水促进番茄生长,株高和茎粗生长趋势基本一致,即在开花结果期生长迅速,在生育期末趋于平稳;当灌水矿化度达到 5 g·L⁻¹时,株高和茎粗则明显降低,这与本研究结果一致;但其研究认为灌水矿化度对番茄的产量没有显著影响,这与本研究结果有所不同,可能是由于其灌溉方式为膜下滴灌,灌水后盐分淋洗至深层土壤和垄间,而覆膜有效抑制了土壤蒸发,削弱了盐分在作物根区积聚程度,弱化了灌水矿化度对作物的影响;另外,其灌水最大矿化度设置相对较低,仅为 5 g·L⁻¹,可能未找到灌水矿化度对作物产量的影响阈值,加上供试番茄品种不同,存在耐盐程度的差异,进而导致研究结果有所不同。

4 结 论

1) 番茄不同生育期阶段 20~60 cm 土层土壤含水率较高,表层及深层土壤含水率相对较低;0~80 cm 土层平均土壤含水率随着生育期推进逐渐降低,灌水矿化度越低,降低幅度越大。生育期初土壤含盐量主要积聚在 0~40 cm 处,随着生育期的推进土壤盐分呈累积趋势且向深层土壤运移,灌水矿化度越高,该现象越明显。

2) 番茄株高和茎粗均表现为前期生长缓慢,开花结果期快速增长,结果盛期之后基本趋于稳定;2~4 g·L⁻¹的咸水灌溉对番茄生长具有一定的促进作用,6~8 g·L⁻¹抑制作用明显。

3) 2~4 g·L⁻¹的咸水灌溉在保证番茄产量和水分利用效率的同时可显著提高果实品质,6 g·L⁻¹对果实品质无显著影响,但产量明显下降,8 g·L⁻¹则导致番茄产量和品质均显著降低;推荐 2~4 g·L⁻¹为适宜灌水矿化度可对设施番茄进行灌溉。

参 考 文 献:

- [1] 孙炳华,刘兰芳.咸淡混浇技术在沧州农田灌溉中的应用与探讨[J].节水灌溉,2010,(3):50-51.
SUN B H, LIU L F. Application and discussion of salt-light mixed irrigation technology in farmland irrigation in Cangzhou[J]. Water Saving Irrigation, 2010,(3): 50-51.
- [2] 刘春成,崔丙健,胡超,等.微咸水与再生水混灌对作物生理特性的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):327-333,348.
LIU C C, CUI B J, HU C, et al. Mixed irrigation of brackish water and reclaimed water affects crop physiological characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 327-333, 348.
- [3] 朱珠,姚宝林,李勇,等.微咸水灌溉条件下土壤残膜对棉花苗期氮平衡指数与耗水量的影响[J].北方农业学报,2020,48(6):68-75.
ZHU Z, YAO B L, LI N, et al. Effects of soil film residue on nitrogen balance index and water consumption of cotton at seedling stage under brackish water irrigation[J]. Journal of Northern Agriculture, 2020, 48(6): 68-75.
- [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 Q J, SHAN Y Y. 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] 徐秉信,李如意,武东波,等.微咸水的利用现状和研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(36):13914-13916,13981.
XU B X, LI R Y, WU D B, et al. Utilization status and research progress of brackish water[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 13914-13916, 13981.
- [6] 何雨江,汪丙国,王在敏,等.棉花微咸水膜下滴灌灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2010,26(7):14-20.
HE Y J, WANG B G, WANG Z M, et al. Study on irrigation scheduling of cotton under mulch drip irrigation with brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 14-20.
- [7] 王喜,谭军利.中国微咸水灌溉的实践与启示[J].节水灌溉,2016,(7):56-59.

- WANG X, TAN J L. Practices and enlightenment of brackish water irrigation in China[J]. Water Saving Irrigation, 2016,(7): 56-59.
- [8] 陈秀龙,胡顺军,李修仓.膜下滴灌条件下不同矿化度水对土壤水盐动态及棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):7-12.
CHEN X L, HU S J, LI X C. Effects of irrigation with saline water on soil water-salt transport features and cotton yield [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 7-12.
- [9] PASTERNAK D, SAGIH M, DEMALACH Y, et al. Irrigation with brackish water under desert conditions XI. salt tolerance in sweet-corn cultivars[J].Agricultural Water Management, 1995, 28(4): 325-334.
- [10] 周永学,李美琪,黄志杰,等.长期咸水滴灌对灰漠土理化性质及棉花生长的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):12-20.
ZHOU Y X, LI M Q, HUANG Z J, et al. Effects of long-term saline water drip irrigation on physicochemical properties and cotton growth in grey desert soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 12-20.
- [11] 贺文君.微咸水灌溉对滨海盐碱土水盐分布和金银花生长的影响[D].烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所),2021.
HE W J. Effect of brackish water irrigation on soil water and salt distribution and honeysuckle (Lonicera japonicaThunb.) growth in coastal saline land [D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [12] 王瑞萍,夏玉红,刘雅君,等.微咸水灌溉模式对向日葵产量和品质的影响[J].节水灌溉,2021,(7):14-20.
WANG R P, XIA Y H, LIU Y J, et al. Impact of brackish water irrigation on yield and quality of sunflower[J]. Water Saving Irrigation, 2021, (7): 14-20.
- [13] 尹志荣,张永宏,桂林国,等.微咸水滴灌对枸杞产量及土壤水盐运动的影响[J].西北农业学报,2011,20(7):162-167.
YIN Z R, ZHANG Y H, GUI L G, et al. Characteristics of Soil water and salt movement under drip irrigation with brackish water on Chinese wolfberry[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(7): 162-167.
- [14] 马凯,王振华,王天宇,等.氮盐交互对膜下滴灌棉花产量及品质的影响[J].干旱区资源与环境,2021,35(11):165-171.
MA K, WANG Z H, WANG T Y, et al. Interactive effects of nitrogen and salt on yield and quality of cotton in condition of under film drip irrigation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 165-171.
- [15] 陶君.宁夏日光温室辣椒、甜瓜不同微咸水膜下滴灌灌溉制度研究[D].银川:宁夏大学,2014.
TAO J. Study on irrigation scheduling of peppers and melons under mulch drip irrigation with brackish water in Ningxia greenhouse [D]. Yinchuan: NingXia University, 2014.
- [16] 姚玉涛,张国新,孙叶烁,等.微咸水灌溉对设施番茄生长以及产量和品质的影响[J].河北农业科学,2021,25(1):48-53.
YAO Y T, ZHANG G X, SUN Y S, et al. Effects of brackish water irrigation on growth, yield and quality of tomato in facility[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2021, 25(1): 48-53.
- [17] 张国新,姚玉涛,丁守鹏,等.微咸水滴灌对滨海区基质栽培番茄生长及品质的影响[J].安徽农业科学,2021,49(16):200-202,213.
ZHANG G X, YAO Y T, DING S P, et al. Effects of brackish water drip irrigation on the growth and quality of tomato grown in substrate cultivation in coastal area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(16): 200-202, 213.
- [18] GAWAD G A, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999-2002) [J].Agricultural Water

- Management, 2005, 78(1/2): 39-53.
- [19] 张国新, 姚玉涛, 孙叶烁, 等. 水分调控对滨海盐碱地设施番茄及土壤盐分的影响[J]. 北方园艺, 2021, (11): 57-62.
ZHANG G X, YAO Y T, SUN Y S, et al. Effects of water regulation methods on greenhouse tomato and Soil salt in coastal saline alkali land [J]. Northern Horticulture, 2021, (11): 57-62.
- [20] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 30-35.
WAN S Q, KANG Y H, WANG D, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 30-35.
- [21] 江雪飞, 乔飞, 邹志荣. 不同生育期咸水灌溉对砂培甜瓜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 87-90.
JIANG X F, QIAO F, ZOU Z R. Effects of brackish irrigation on fruit yield and quality of melon in sand culture [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(10): 87-90.
- [22] 高阳, 邵光成, 陈昌仁, 等. 渍害条件下生物炭对番茄生长及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12): 1284-1289.
GAO Y, SHAO G C, CHEN C R, et al. Effects of biochar on growth and yield of tomato under waterlogging [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(12): 1284-1289.
- [23] 黄丹, 王春霞, 何新林, 等. 微咸水膜下滴灌时序对土壤盐分及作物产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 7-11.
HUANG D, WANG C X, HE X L, et al. The impact of irrigation timing on soil salinity and crop yield under mulched drip irrigation with brackish water [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 7-11.
- [24] 李金刚, 王少丽, 何平如, 等. 河套灌区番茄微咸水灌溉定额探讨[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 327-335.
LI J G, WANG S L, HE P R, et al. Discussion on saline water irrigation quota for tomato in Hetao irrigation zone [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 327-335.
- [25] 杨林娥, 彭晓光, 杨庆文, 等. 斐林试剂法测定还原糖方法的改进[J]. 中国酿造, 2010, (5): 160-161.
YANG L E, PENG X G, YANG Q W, et al. Improvement of the determination of reducing sugar with Fehling's reagent method [J]. China Brewing, 2010, (5): 160-161.
- [26] 杨俊雪, 王冲, 石如岳, 等. 基质栽培对番茄产量和品质影响的 Meta 分析[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(6): 47-53.
YANG J X, WANG C, SHI R Y, et al. Effects of substrate culture on the yield and quality of tomato: a Meta-analysis [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(6): 47-53.
- [27] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.
LI J M, PAN T H, WANG L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 82-90.
- [28] 王洪博, 赵栗, 高阳, 等. 新疆无膜滴灌棉田灌溉模式及耗水规律研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 153-160.
WANG H B, ZHAO L, GAO Y, et al. Study on irrigation mode and water consumption of cotton drip irrigation without film in south Xinjiang [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 153-160.
- [29] 李晓彬, 康跃虎. 滨海重度盐碱地微咸水滴灌水盐调控及月季根系生长响应研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 112-121.
LI X B, KANG Y H. Water-salt control and response of Chinese rose (Rosa chinensis) root on coastal saline soil using drip irrigation with brackish water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 112-121.
- [30] 郭安安, 王梦琴, 王为木, 等. 微咸水滴灌对土壤水盐运移影响的研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(12): 118-121.
GUO A A, WANG M Q, WANG W M, et al. Study on the effects of brackish water drip irrigation on soil water and salt movement [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(12): 118-121.
- [31] 李丹, 万书勤, 康跃虎, 等. 滨海盐碱地微咸水滴灌水盐调控对番茄生长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 39-50.
LI D, WAN S Q, KANG Y H, et al. Effects of water-salt regulation on tomato growth and quality under drip irrigation with brackish water in coastal saline-alkali soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 39-50.
- [32] 刘婷娜, 高艳明, 李建设. 不同矿化度微咸水入渗下土壤水盐运移特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 68-72.
LIU T S, GAO Y M, LI J S. Characteristics of sand soil water and salt movement under brackish water infiltration with different mineralization degrees [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 68-72.
- [33] 杨文杰, 王振华, 任作利, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤水盐分布及加工番茄产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 117-123, 131.
YANG W J, WANG Z H, REN Z L, et al. Effects of drip irrigation under brackish water mulch on soil water and salt distribution and processing tomato yield [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 117-123, 131.
- [34] 高聪帅, 邵立威, 闫宗正, 等. 不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 809-820.
GAO C S, SHAO L W, YAN Z Z, et al. Annual soil salt balance and crop performance under brackish water irrigation during the winter wheat season [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 809-820.
- [35] MAGÁN J J, GALLARDO M, THOMPSON R B, et al. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9): 1041-1055.
- [36] WAN S Q, KANG Y H, WANG D, et al. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (Lycopersicon esculentum Mill) yield and water use in semi-humid area [J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1/2): 63-74.
- [37] 姚玉涛, 张国新, 刘雅辉, 等. 微咸水胁迫对松花菜生理品质指标及水分利用效率的影响[J]. 北方园艺, 2019, (3): 55-59.
YAO Y T, ZHANG G X, LIU Y H, et al. Effect of brackish water stress on growth, quality index and water use efficiency of cauliflower [J]. Northern Horticulture, 2019, (3): 55-59.