

水盐胁迫下根系提水作用对土壤盐分与番茄产量的影响

卢佳¹ 邵光成¹ 章坤¹ 王志宇¹ 王静²

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 扬州市城市防洪管理处, 扬州 225002)

摘要: 为探究水盐胁迫下番茄根系发生提水作用的可能性及其对土壤盐分分布和番茄产量的影响, 利用上下桶分根装置, 设定上桶不同水分(W1、W2、W3表示土壤含水率为田间持水率的60%~70%、50%~60%、40%~50%)和盐分条件(S0、S1、S2表示NaCl添加量分别为干土质量的0、0.2%、0.4%), 监测分析了水盐胁迫下根系提水量、上桶盐分分布及番茄产量。结果表明: 随着生育期的推进, 根系提水量呈现先增加后减小的趋势, 其中盐分对番茄根系提水量影响显著, 在相同水分处理条件下, 盐分含量越高, 根系提水量越大; 水盐胁迫下, 上桶盐分含量与根系提水量呈线性正相关, 除W1S0处理外, 上桶土壤电导率在提水量达到最大时有所增加; 与对照处理W1S0相比, 水盐抑制了根系生长, 使根系活性显著下降, 同一水分处理下, 随着盐分的增加, 根长、根表面积及根体积减小; 盐分对番茄水分生产率有显著影响, 在相同水分条件下, 盐分越大, 水分生产率越大, 7种处理中W2S2水分生产率达到最大, 而其产量较对照并未显著减小, 生育期提水量占需水量的17.73%。本研究对进一步理解作物在“上干下湿”的土壤水盐胁迫下充分利用土壤剖面深层水分来维持上层根系生存和提高水分生产率具有科学价值。

关键词: 番茄; 根系提水; 盐分分布; 产量; 水分生产率

中图分类号: S152.7; S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)09-0249-09

OSID:



Effects of Root Hydraulic Lift on Soil Salt and Tomato Yield under Water and Salt Stress

LU Jia¹ SHAO Guangcheng¹ ZHANG Kun¹ WANG Zhiyu¹ WANG Jing²

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Yangzhou City Flood Control Management Office, Yangzhou 225002, China)

Abstract: Aiming to study the possibility of tomato root hydraulic lift and its effect on soil salt and yield under salt and water stress, different water levels (W1, W2 and W3 stands for soil moisture content was 60%~70%, 50%~60% and 40%~50% of field capacity, respectively) and salt levels (S0, S1 and S2 stands for NaCl addition was 0, 0.2% and 0.4% of dry soil weight, respectively) of upper pot was set to analyze the quantity of root hydraulic lift, salt distribution and yield in upper pot by a soil compartments with upper and lower pots. The results indicated that with the development of growth period, the root hydraulic lift quantity was increased first and then decreased, on which the salt had a significant effect, and under the same water level treatment, the higher the salt content was, the greater root hydraulic lift quantity was; under water and salt stress, there was a linear positive correlation between the salt content and root hydraulic lift quantity in the upper pot, and except for the control group, the electric conductivity of upper pot soil was increased when the hydraulic lift quantity reached the maximum value; compared with the control, water and salt inhibited the root growth, and thus significantly reduced the root activity, and under the same water level, root length, root surface area and root volume were decreased when salt content was increased; salt had a significant effect on tomato water productivity, and under the same water level treatment, the higher the salt content was, the greater the water productivity was, moreover, water productivity was the greatest under W2S2 in all treatments and root hydraulic lift quantity accounted for 17.73% of water demand, but yield was not significantly decreased compared with that of control. The research results had scientific and productive value for

收稿日期: 2019-11-13 修回日期: 2020-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879072)

作者简介: 卢佳(1992—), 女, 博士生, 主要从事农业水资源高效利用研究, E-mail: lj1825182@163.com

通信作者: 邵光成(1975—), 男, 教授, 主要从事农业水资源高效利用研究, E-mail: sgcln@126.com

further understanding that crop could make full use of the deep water of soil profile to maintain the survival of upper roots and improve the water productivity in “up dry and down wet” condition under water and salt stress.

Key words: tomato; root hydraulic lift; salt distribution; yield; water productivity

0 引言

干旱盐渍化环境下植物和水分的关系一直是农田水利与植物生理学领域研究的重点问题。在干旱盐渍化地区农作物生产中,耕层经常处于“上干下湿”的土壤环境。上部干燥的浅土层分布着作物大约70%的根系,聚集了作物生长和发育所需的大量营养物质。在浅土层处于干燥时,作物根系的伸长、生长受阻,相关微生物的活力下降,离子流动性减弱,形成严重的水分养分剖面空间错位,影响了作物对营养的吸收。因此,对易发生“上干下湿”的干旱盐渍区,高效调控土壤干层、提高水分生产率 and 作物产量,对提高作物对深层水分的利用能力、实现农业可持续发展具有重要意义。

在整个土壤-植物-大气连续体内,水分总是从高水势的地方向低水势的地方运动。通常情况下土壤水势高于植物体水势,而后者又高于大气水势,所以水分只能从土壤经由植物的蒸腾作用或直接的蒸发作用进入大气。但是,根土间存在着内在优化协调的动态机制,以更大限度地为土壤-植物-大气连续体(SPAC)提供水分,SCHOLZ等^[1]和BROOKS等^[2]研究发现,植物的水势不是总低于土壤的水势,有时根系水势会高于根系周围最干燥的土壤水势。CALDWELL等^[3]总结了前人研究成果,并深入开展试验探究,正式将这种现象命名为植物“根系提水作用”,它是指当蒸腾作用减弱或停止时,植物根系从深层土壤中吸收水分,通过主根向上运输,再由浅层侧根释放到表层较干的土壤中,从而改善表层土壤水分状况,保证植物自身的浅层根系或周围其他植物根系的水分供给。根系提水作用是一种生存机制,在干旱逆境下,根系通过夜间提水作用,上层土壤将水分暂时贮存,以满足白天蒸腾需要,从而减轻因气孔关闭导致同化能力的下降。

根系提水作用是根土系统对水分分异的根土环境中土壤水资源优化利用的过程,是植物根系所具有的一种普遍现象^[4-8]。MAGISTAD等^[9]在研究田间作物生长过程中发现,抑制蒸腾,干土室中土壤水分含量增加,据此提出深根系植物可能会利用深层土壤水分的观点。塔里木河流域气候干旱、温度较高,荒漠河岸森林植被仍能生长,HAO等^[10]研究了胡杨的根系提水过程及其生态效应,发现由于根系

提水作用,植物能通过主根吸收深层地下水,然后由侧根释放到浅层土壤中,缓解浅层土壤干旱状况。根系提水对植物生长有促进作用,可以将深层土壤水分运输到浅层土壤,避免地表上层根系因上层土壤水分供应不充足而死亡,从而增加了根系数量,延长了根系寿命。SCHOLZ等^[1]研究表明,根系提水能够维持菌根的活性以及固氮菌的固氮性能;QUEREJETA等^[11]发现,根系提水有利于外生菌根以及丛枝菌根,抵制土壤干燥;DAWSON^[12]发现,根系提水能提高根尖周围土壤水分,促进根系在干燥土壤中的生长。目前,根系提水研究多数针对非盐渍土,且集中于根系提水发生的条件、时间、提升水量及与植物蒸腾的关系等方面。水盐胁迫是困扰农业生产客观存在的问题,水盐联合胁迫后,土壤溶质势的变化对根系提水发生的土壤水分条件的影响,植物提水作用诱导的土壤水分变异如何间接影响盐分的时空分布,土壤水盐不均匀分布会对植物地下根系和地上冠层参数及产量产生的影响,这些均不明晰。因此,本文从根系提水与土壤水盐的作用过程入手,开展水盐胁迫对根系提水作用、土壤盐分分布及产量的研究,以期弥补水盐逆境下根系吸水过程机理研究的不足。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2018年2—8月在河海大学江宁校区节水园区试验场(31°57'N,118°50'E)内进行。采用自制的上下桶分根装置(图1),上干下湿分根测定法由VOLK^[13]于1947年首先采用。上桶规格为22.1 cm(上底直径)×18.5 cm(下底直径)×25 cm(高),下桶规格为50 cm(上底直径)×35 cm(下底直径)×70 cm(高)。为保证根系顺利扎入下层土壤,上桶无底,同时为切断上下桶土壤水分通过毛细管传输,在上下桶之间填2 cm厚砂砾层。文献[14-16]研究表明,上层土壤水分消耗导致上下层土壤之间存在水势梯度,从而驱动夜间根系从下层土壤提水,所以在此装置中,由于上下桶水势差的存在,上桶根系会穿过砂砾层扎到下桶中,下桶根系在夜间进行根系提水。下桶内垂直埋置一根半径为3 cm的PVC管用来灌水,上桶蒸发量利用埋置的小型蒸渗管进行测量。上下桶所用土壤一致,供试土壤取自河海

大学江宁校区节水园区试验场内,容重为 1.35 g/cm^3 ,田间持水率为 21.58% (质量含水率),pH 值为 7.2,上桶土壤填土深度为 15 cm,下桶土壤填土深度 40 cm。

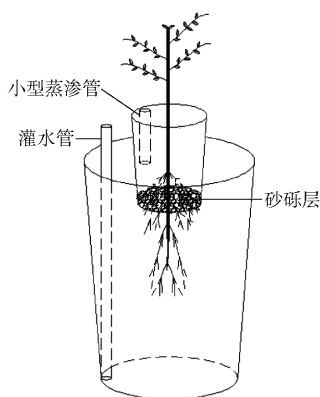


图1 根系提水作用测定装置示意图

Fig. 1 Device for measuring root hydraulic lift

供试番茄品种为“金粉低架王”,上桶设3个水分处理,正常水分处理(W1,土壤含水率为田间持水率的60%~70%),水分胁迫处理1(W2,土壤含水率为田间持水率的50%~60%),水分胁迫处理2(W3,土壤含水率为田间持水率的40%~50%),下桶土壤含水率始终保持在田间持水率的70%~80%;3个初始盐分处理,无NaCl添加(S0),NaCl添加量为干土质量的0.2%(S1),NaCl添加量为干土质量的0.4%(S2),另设一个对照组(W1S0),一共7个处理组,分别为W1S0、W1S1、W1S2、W2S1、W2S2、W3S1、W3S2,3次重复,共21桶,随机排列。

番茄于2018年2月23日在河海大学江宁校区节水园区温室大棚内用仿陶瓷塑料花盆进行育苗,育苗用营养土孔隙率为60%,土壤pH值为6.8,土壤速效磷、速效氮、速效钾与土的质量配比为1:10,育苗用花盆底径7 cm,口径10 cm,高9 cm。待番茄出现3片真叶时,选择长势一致的良好幼苗于4月1日进行移栽,移栽时将番茄根系埋在距土面8 cm的位置,此时番茄根系密而小,主根尚不明显,分布在上桶土壤中,移栽时施用复合肥(N、P₂O₅、K₂O质量配比为15:15:15)400 kg/hm²。番茄整个生育期分3个阶段:苗期,4月1日—5月4日;开花坐果期,5月5日—6月7日;成熟采摘期,6月8日—7月15日。番茄进入开花坐果期进行上桶控水处理。上下桶土壤含水率通过取土法测量控制,控制上桶为相对干旱层;下桶土壤含水率较高,为相对湿润层。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 根系提水量

在番茄整个生育期,采用干燥法每5 d测量一

次上桶质量含水率,时间为前一天20:00和第二天06:00,并用小型蒸渗管测量上桶夜间蒸发量,夜间植物蒸腾速率较小,蒸腾量可忽略不计,计算番茄每天根系的提水量

$$G = M(\theta_{AM} - \theta_{PM}) + m$$

式中 G ——根系提水量, g

M ——上桶干土质量, g

θ_{AM} ——第二天06:00上桶质量含水率, %

θ_{PM} ——前一天20:00上桶质量含水率, %

m ——上桶夜间蒸发量, g

1.2.2 土壤电导率

电导率(EC)于整个生育期每隔10 d左右测定一次,上层小桶土壤分中间层(7.5 cm)和底层(15 cm)两层取土。土壤电导率测定分提取和测定两部分。样液提取采用水土质量比为5:1浸提法提取,土样为风干土,用研钵碾碎,过1 mm筛,称量放入离心试管中,加入5倍去二氧化碳蒸馏水,振荡3 min,离心5 min,采用DDS-307A型电导率仪测定,每次EC测定重复读数3次。

1.2.3 根系特征参数

于番茄成熟采摘期末从土壤中取出番茄根系,冲洗干净后低温保存。用EPSON Perfection V700型扫描仪和WinRHIZO型根系系统测定总根长度、总根表面积和总根体积,并用直尺测量主根长。

1.3 数据处理与分析

试验数据和图表采用Excel、SPSS 19.0和Origin 2017软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 水盐胁迫对根系提水作用下番茄根系特征的影响

根系特征是影响番茄根系提水作用的重要因素。由图2(图中不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同)可知,番茄总根长在对照W1S0处理下最大,W3S2处理下最小,同一水分处理下,总根长随盐分增大而减小,但盐分对总根长影响不显著,S2盐分处理下,W2、W3与W1水分处理间番茄总根长差异显著。相同W2水分处理下,W2S1、W2S2两个处理总根表面积之间存在显著差异;S1盐分处理下,3个水分处理间总根表面积差异显著,而S2盐分处理下,只有W1水分胁迫和W2水分胁迫下总根表面积显著不同。总根体积与总根长及总根表面积的变化规律相似,但处理间差异不显著,只在S2处理下,W1水分胁迫和W3水分胁迫条件下总根体积存在显著差异。由图2可知,番茄主根长均超过20 cm,大于上桶填土深度(15 cm),

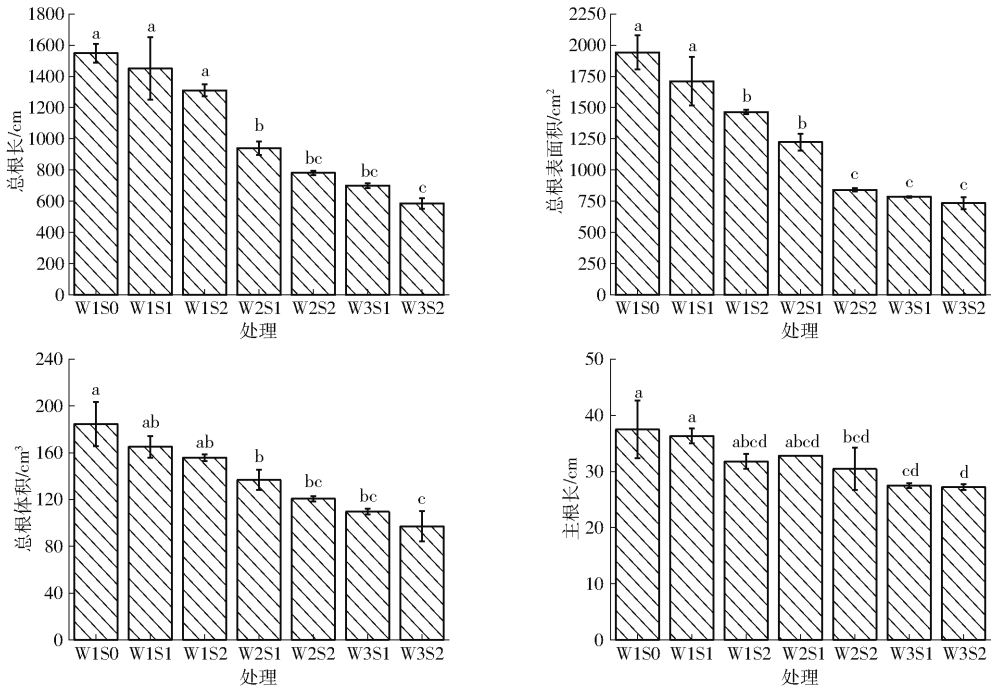


图2 根系提水作用下不同处理对番茄根系特征的影响

Fig.2 Effects of different treatments on characteristics of tomato root system under root hydraulic lift

说明在水势差存在的条件下,番茄根系为了吸收更多水分,扎入下桶土壤中。在本试验设定条件下,番茄大部分须根分布在上桶中,下桶土壤较上桶土壤湿润,导致主根生长较为发达。成熟采摘期后取根时发现,上桶部分番茄须根较多,除了主根扎到下桶中,还有部分较粗壮的根也扎到下桶中,须根较上桶少一些。W3S2处理的主根长最小,而且与W1S0处理差异显著。相同水分条件下,S2处理下的主根长均小于S1处理下的主根长,但处理间差异不显著。由图3可以看出,相对于对照W1S0处理,水盐胁迫抑制了根系生长,使根系活性显著下降。

2.2 水盐胁迫对番茄根系提水作用的影响

由图4a可看出,番茄根系提水量呈单峰状,随着生育期的推进,呈先增大后减小的趋势,于6月22日达到最大值。水盐胁迫处理下番茄于开花坐果期第7天开始能测定到明显的根系提水量。在各

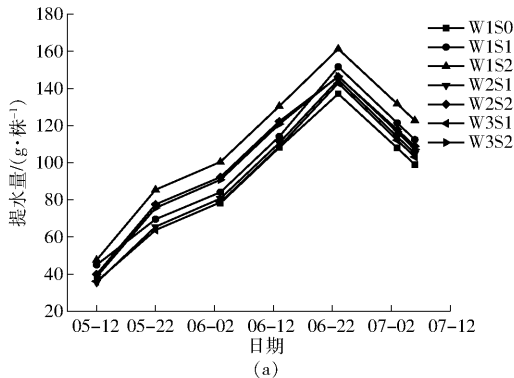


图4 番茄根系全生育期提水量

Fig.4 Quantity of tomato root hydraulic lift in whole growth stage

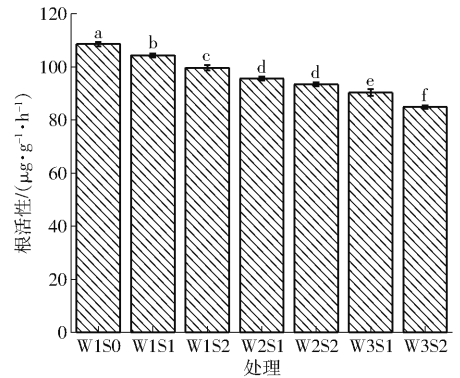
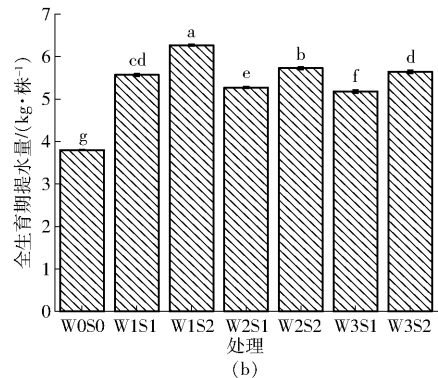


图3 水盐胁迫对根系提水作用下番茄根系活性的影响

Fig.3 Effects of water and salt stress on root activity of tomato under root hydraulic lift

个水盐胁迫处理中,W1S2处理下的根系提水量在各个生育阶段达到最大值,且整个生育期根系提水量累积量也是最大。结合图4a、4b发现,相同水分处理条件下,盐分含量越高,各生育期根系提水量越



多,说明盐分对番茄根系提水量有一定影响,同一盐分处理下,W2水分胁迫处理下的根系提水量大于W3,这可能与W3水分处理下根系生长受到抑制、吸水量减少有关。

2.3 根系提水作用下上桶土壤电导率的变化规律

由图5可知,对照处理W1S0中间层和底层土壤电导率逐渐降低,到整个生育期末(6月22日)开始增加,而其他处理电导率都是逐渐降低,基本在6月22日达到峰值后降低。在整个生育期末电导率的增加,是因为生育期末番茄的果实基本成熟采摘,需水量减小,气温升高,土壤蒸发增加,蒸发返盐导致上桶电导率增加。在5月12日,W1水分处理下,除S0盐分处理,中间层和底层土壤电导率都有

增加,S1处理下,7.5 cm和15 cm土层电导率分别增加了10.72%和5.58%,S2盐分下分别增加14.16%和9.12%,且W1S1和W1S2两种处理电导率变化波动较其他两个水分处理大,电导率在5月2日开始增加,到5月12日又开始逐渐减小,除W1S2中间层土壤,其他土层电导率在6月2日又开始增加,较其他处理早。S2处理下,W2、W3处理15 cm土壤电导率在6月2—22日有一段增长期。在生育期末,电导率虽然会增加,但是较生育期初都是减小的,除W1S0和W1S2处理,其他处理电导率都降低50%以上。从表1可看出,上桶盐分与提水量呈线性正相关,且开始有提水量(5月12日)时相关性较小,盐分的变化受根系提水量的影响。

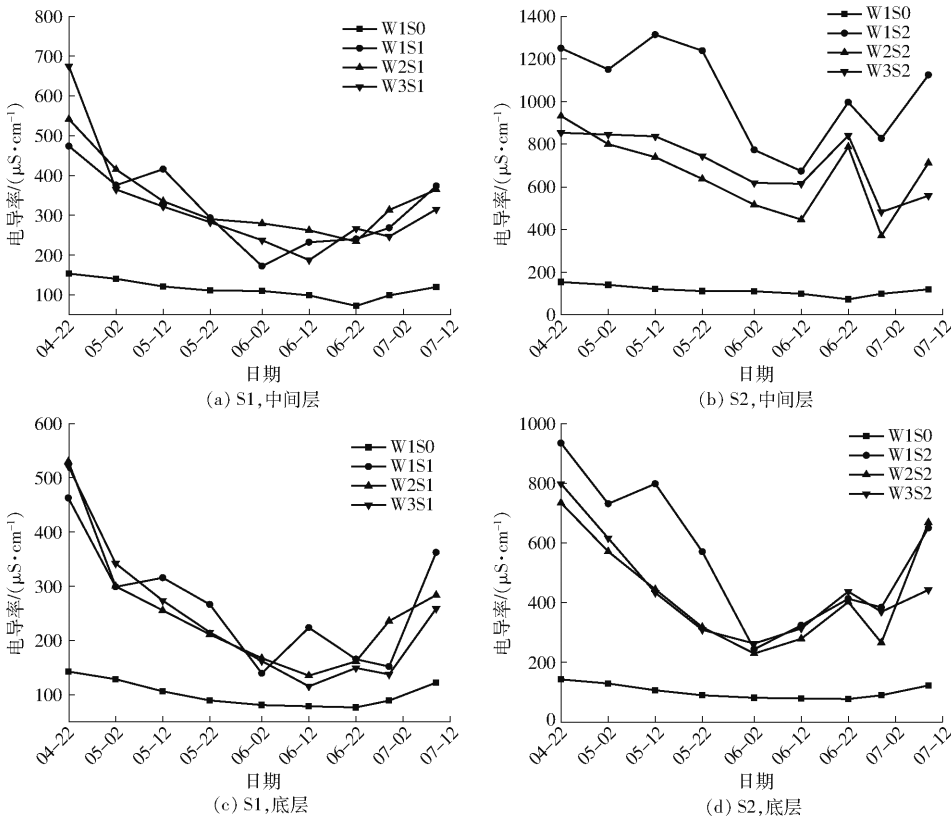


图5 上桶土壤全生育期电导率变化曲线

Fig. 5 Change curves of electric conductivity of upper pot in whole growth stage

表1 上桶盐分与提水量相关性

Tab. 1 Correlation between salt content and quantity of root hydraulic lift of upper pot

日期	土层位置	Pearson 相关系数	P
2018年5月12日	上桶中间层7.5 cm处	0.644**	0.004
	上桶底层15 cm处	0.716**	0.001
2018年5月22日	上桶中间层7.5 cm处	0.945**	<0.001
	上桶底层15 cm处	0.918**	<0.001
2018年6月2日	上桶中间层7.5 cm处	0.936**	<0.001
	上桶底层15 cm处	0.821**	<0.001
2018年6月12日	上桶中间层7.5 cm处	0.935**	<0.001
	上桶底层15 cm处	0.929**	<0.001
2018年6月22日	上桶中间层7.5 cm处	0.570**	<0.001
	上桶底层15 cm处	1**	<0.001

注:**表示在0.01水平(双尾)相关性显著。

2.4 根系提水作用下番茄需水量及水分生产率对水盐胁迫的响应规律

从表2可看出,对照处理W1S0需水量最大,相同水分处理下,S1处理需水量较S2处理需水量大,S1盐分处理下,W3水分胁迫处理下需水量最大,S2盐分处理下,W1水分胁迫处理下需水量最大。水分与盐分交互作用对番茄全生育期提水总量和需水量都有显著影响,但对番茄产量和水分生产率没有显著影响。在7种处理中W3S2处理的番茄产量最小,而且与W1S0处理差异显著。同一水分处理下,S1盐分处理比S2盐分处理产量高,同一盐分处理

下,产量随着水分胁迫加重而减小。盐分处理对水分生产率有显著影响,但是水分处理影响并不显著。W2S2 处理下水分生产率最大,同一水分处理,盐分越大,水分生产率越大。提水量占番茄需水量的百

分比在 5.11% ~ 17.73% 之间,W2S2 处理所占的百分比最大,说明番茄在 W2 水分处理和 S2 盐分处理下,提水潜力较大,能更好利用深层根系提水以满足自身生理生长需要。

表 2 不同水分盐分对番茄根系提水总量和水分生产率的影响

Tab.2 Effects of different water and salt conditions on tomato total root hydraulic lift quantity and water productivity

处理	需水量/ (kg·盆 ⁻¹)	产量/ (g·株 ⁻¹)	水分生产率/ (kg·m ⁻³)	全生育期提水总量/ (kg·株 ⁻¹)	提水量占需水量 百分比/%
W1S0	(74.34 ± 1.637) ^a	(947.82 ± 117.341) ^a	(12.81 ± 1.751) ^{cde}	(3.80 ± 0.006) ^g	(5.11 ± 0.118) ^f
W1S1	(58.91 ± 0.300) ^b	(904.33 ± 9.859) ^a	(15.35 ± 0.198) ^{bcde}	(5.57 ± 0.026) ^{cd}	(9.45 ± 0.013) ^{cde}
W1S2	(45.70 ± 0.265) ^c	(884.38 ± 6.476) ^a	(19.35 ± 0.252) ^{ab}	(6.27 ± 0.015) ^a	(13.73 ± 0.041) ^b
W2S1	(65.80 ± 1.277) ^b	(813.43 ± 28.791) ^{ab}	(12.39 ± 0.662) ^{de}	(5.27 ± 0.019) ^e	(8.02 ± 0.135) ^{de}
W2S2	(32.53 ± 1.852) ^d	(783.61 ± 85.411) ^{ab}	(24.52 ± 3.803) ^a	(5.73 ± 0.028) ^b	(17.73 ± 0.881) ^a
W3S1	(66.86 ± 4.372) ^{ab}	(799.58 ± 24.017) ^{ab}	(12.10 ± 1.072) ^e	(5.18 ± 0.036) ^f	(7.80 ± 0.429) ^e
W3S2	(36.20 ± 5.311) ^d	(696.11 ± 5.911) ^b	(19.94 ± 2.437) ^{ab}	(5.64 ± 0.030) ^d	(16.18 ± 2.000) ^{ab}
水分处理					*
盐分处理	*	*	*	*	*
水分处理 × 盐分处理	*			*	*

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$), * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

3 讨论

3.1 根系提水作用下番茄根系特征对水盐胁迫的响应规律

根系作为植物吸收土壤水分和养分的重要器官,是植物地上部分赖以生存的基础,与土壤水分的吸收、利用及根系提水作用有着密切关系。本试验中,水分对根长、根表面积、根体积和根活性 4 个指标都有一定影响,表明水分是限制根系生长的重要因素,这与前人的研究结论一致^[17]。对照处理 W1S0 的根系生长较好,主要是由于根系没有受到水盐胁迫,其生长未受到抑制。不同盐分处理下,根系的变化趋势基本一致,随着水分胁迫程度加大,根系指标都减小。盐分对根表面积和根系活性有一定影响,原因可能是随着 NaCl 浓度升高,水分有效性降低,番茄根系细胞分裂生长受到抑制。姚静等^[18]研究表明,番茄根系形态指标受到盐胁迫的抑制,谢德意等^[19]研究发现,高浓度盐胁迫导致棉花幼苗主根变短,侧根数量变少。而番茄主根长的范围为 27.20 ~ 37.50 cm,在同一水分下,盐分对主根长存在一定影响,但影响不显著,W3S1 处理下的主根长与 W1S1 下的主根长差异显著,而 W2S1 处理下的主根长与这两个处理差异均不显著,说明在 S1 盐分条件下,水分能够影响番茄主根生长,但有一定的水分阈值,李波等^[20]通过研究不同供水条件对温室番茄根系的影响,发现土壤水分范围对番茄花期根系特征参数存在一定影响。可见,水盐是影响根系生长较为关键的因素。

3.2 水盐胁迫对番茄根系提水的影响

不同环境下,植物根系吸收水分方式会有所不同。在干旱环境下,降水量不能满足蒸发量,土壤上层水分较少,植物为了满足自身生长需求,很可能会利用深层根系吸取深层土壤水分或地下水^[21]。土壤水势是决定根系提水作用的重要因子,本试验中,3 种上桶水分处理下土壤含水率均小于下桶土壤含水率,导致上下桶间存在水势差,在夜间蒸腾作用较弱的情况下,下桶根系会吸收水分、输送并释放到较干的上桶土壤中,从而产生根系提水现象。张扬等^[22]利用上下桶装置,通过设置不同土壤水分状况,发现只有在上层干旱下层湿润条件下,玉米才有根系提水现象,说明根系提水与上下桶的水势差有关,这与本试验结果一致。MCMICHAEL 等^[6]利用左右分根装置研究棉花根系提水现象,发现当装置一个容器保持湿润状态,一个容器保持干燥状态下,水分能通过根系从湿润的容器中输送到干燥的容器中,与本试验发现根系处在不同的土壤水势中才可能产生根系提水现象的结果一致。由图 4 可看出,番茄的提水作用到了开花坐果期末才出现,一方面是因为番茄的根系在前期并没有扎到下层土壤,另一方面是因为虽然受到水分和盐分胁迫,番茄的生长受到抑制,但是根系吸水量还基本能满足其生长需求。番茄提水量在进入开花坐果期后随时间先增加后减少,这与番茄需水量的变化规律大致相似。植物根系提水量与根系所处水分条件有关系,图 4 表明,除 W1S0 处理,在同一盐分条件下,W1 处理根系提水量较 W2、W3 处理大,这个结论与沈玉芳

等^[23]研究上层土壤不同水分胁迫下冬小麦根系提水量,发现W3水分胁迫下根系提水量少于W1正常水分下的结论相一致。同一水分条件下,S2盐分处理下番茄根系提水量较S1盐分处理下大,是因为根系提水量受诸多因素影响,如植物的种类^[24]、施肥情况^[25]、种植方式^[26]、土壤盐分含量会影响番茄根系生长^[27],而根系生长情况又与根系提水作用密切相关。

3.3 番茄根系提水作用下水盐胁迫对上桶土壤电导率的影响

干旱和土壤盐渍化是盐渍地区农业发展的制约因素,明晰干旱盐渍化环境下盐分运动过程对合理利用盐碱地资源,充分发挥植物适应干旱盐分胁迫的潜能具有重要意义,现有研究主要集中在灌排技术改良土壤^[28]、正常根系栽培条件下水盐运移规律^[29-30]、运用现代信息技术对盐碱地进行管理^[31]等方面,但很少有研究关注根系提水作用下的土壤盐分运移规律。由图5可知,所有处理的盐分基本都是向下桶运动,对照组电导率在6月22日开始升高,其他处理下电导率基本在6月22日达到峰值后又开始降低。结合图4,各处理在6月22日根系提水量达到最大,说明电导率的增加可能是由于夜间根系提水,土壤中盐离子随着根系提水再分配的过程中把下桶土壤中的盐分带到了上桶土壤中,致使上桶土壤电导率在6月22日达到峰值,而对照处理根系提水量较小,土壤盐分浓度较其他处理的增加有滞后。W1S1和W1S2处理下,中间层和底层电导率在5月12日均有所增加,这是因为这两个处理较其他处理根系提水量大,根系提水增加的盐分大于灌水淋洗的盐分,且电导率变化波动较其他两个水分处理大,除W1S2中间层土壤,其他土层电导率在6月2日又开始增加,较其他处理早,可能是根系提水量大对土层盐分的影响较大。可见,根系提水作用会对土壤盐分运移有一定的影响。除了W1S0和W1S2处理,其他处理电导率较生育期初期均降低50%以上,表明较高的上桶水分对盐分的运移不一定有利。根系提水作用能够改善土壤的含水率及营养元素的分布^[32],CALDWELL等^[3]研究发现提水作用能够改善生物地球化学循环过程,能够提高根系对表层营养元素的吸收,QUEREJETA等^[33]研究发现根系提水能够提高根系活性。如何发挥植物根系提水潜能,改善盐分过高情况,提高作物产量还需要在今后进一步研究。

3.4 番茄根系提水作用下水盐胁迫对番茄需水量及水分生产率的影响

对照处理下,番茄需水量最大,这是由于其他处理根系受到土壤水盐胁迫,叶片气孔导度减小,导致

叶面蒸腾强度低于正常水分条件下蒸腾强度^[34]。此外,水分胁迫会抑制叶面光合速率,减少光合产物的形成及其向叶片的运移和转换,蒸腾面积相应减小,从而导致蒸发蒸腾量减少^[35]。同一水分处理下,盐分高的处理需水量小于盐分低的处理,是因为番茄遭受盐分胁迫时,植株生长受到抑制,这与已有研究结果一致^[36-37]。盐分胁迫对根系提水量有显著影响,是因为一般植物在受盐分胁迫的情况下会出现生理干旱^[38],但是在本试验条件下,由于上下桶水势梯度的存在,植物会进行自身生理调节,夜间吸收下桶水分再释放出来,相同水分下,盐分越大,植物夜间提水会更多缓解上层土壤水势的降低;而W1S2条件下,根系提水量最大,可能是由于水分跟盐分的相互作用,使得W2跟W3两种水分水平的胁迫较W1的严重,根系生长受到抑制,影响了根系活动,导致根系提水减少。盐分对水分生产率有显著影响,从表2可知,同一水分处理下,S2的水分生产率较S1大,是由于各处理间产量没有显著差异,但盐分大的处理需水量较盐分小的处理降低,所以水分生产率提高了。W3S2处理虽然盐分大,水分生产率和提水量占需水量百分比降低,是因为植物虽然有适应机制,但是这种适应能力也是有限的^[39-40],今后可以对番茄在提水作用下的耐盐耐旱阈值作深入探究。综合考虑,W2S2节水潜力较大,根系既能较大地利用深层土壤水分,水分生产率最大,且产量没有显著降低。

4 结论

(1)盐分对根表面积及根系活性有一定影响,盐分越大,根表面积和根系活性越低;水分胁迫越重,除主根长外,根系各项指标都逐渐减小,W3S1、W3S2处理下的根系各项指标与对照组差异显著。

(2)番茄于开花坐果期末才有明显的提水作用,提水量呈单峰状,且受水分和盐分共同作用。同一水分处理下,S2盐分处理提水量大,说明盐分对提水量有显著影响;同一盐分处理下,水分胁迫越轻,提水量越大。

(3)根系提水与上桶土壤盐分含量呈线性正相关。根系提水量达到最大值时,除W1S0处理外,其他处理盐分有所增加,W1水分处理中间层土壤电导率较生育初期的减小幅度小于其他处理,且其中间层和底层土壤盐分在根系开始有明显提水作用时有所增加。

(4)在根系提水作用下,盐分处理对番茄产量和水分生产率有显著影响,而水分处理及其与盐分交互作用对番茄产量和水分生产率无显著影响;

W2S2 处理水分生产率最大,产量较对照组并未显著减小,提水量占需水量的 17.73%,说明该处理根系提水潜力较大,能够利用深层土壤水分来满足自身生长需要。

参 考 文 献

- [1] SCHOLZ F G, BUCCI S J, GOLDSTEIN G, et al. Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(9): 603–612.
- [2] BROOKS J R, MEINZER F C, COULOMBE R, et al. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(15–16): 1107–1117.
- [3] CALDWELL M M, RICHARDS J H. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake deep roots [J]. *Oecologia*, 1989, 79(1): 1–5.
- [4] MOREIRA M Z, SCHOLZ F G, BUCCI S J, et al. Hydraulic lift in a neotropical savanna [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17(5): 573–581.
- [5] WAN C G, XU W W, SOSEBEE R E, et al. Hydraulic lift in drought-tolerant and -susceptible maize hybrids [J]. *Plant and Soil*, 2000, 219(1–2): 117–126.
- [6] MCMICHAEL B L, LASCANO R J. Evaluation of hydraulic lift in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) germplasm [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68(1): 26–30.
- [7] XU X D, BLAND W L. Reverse water flow in sorghum roots [J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(2): 384–388.
- [8] 阿拉木萨, 蒋德明, 骆永明. 植物根系水力提升作用研究进展综述[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(2): 236–241.
A Lamusa, JIANG Deming, LUO Yongming. Review on study progress of hydraulic lift in plant roots [J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(2): 236–241. (in Chinese)
- [9] MAGISTAD O C, BREAZEALE J F. Plant and soil relations at and below the wilting percentage [J]. *Technical Bulletin*; University of Arizona, Agricultural Experiment Station, 1929, 25: 1–36.
- [10] HAO X M, CHEN Y N, LI W H, et al. Hydraulic lift in *Populus euphratica* Oliv. from the desert riparian vegetation of the Tarim River Basin [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(8): 905–911.
- [11] QUEREJETA J I, EGERTON-WARBUUTON L M, ALLEN M F. Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California oak savanna [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(2): 409–417.
- [12] DAWSON T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions [J]. *Oecologia*, 1993, 95: 565–574.
- [13] VOLK G M. Significance of moisture translocation from soil zones of low moisture tension to zones high moisture tension by plant roots [J]. *Agronomy Journal*, 1947, 39(2): 93–106.
- [14] WILLIAMS K, CALDWELL M M, RICHARDS J H. The influence of shade and clouds on soil water potential: the buffered behavior of hydraulic lift [J]. *Plant and Soil*, 1993, 157(1): 83–95.
- [15] EMERMAN S H, DAWSON T E. Ecological implications of soil macropores [C] // MOREL-SEYTOUX H J. Fifteenth American geophysical union hydrology days. Hydrology Days Publication, Atherton, 1995: 33–47.
- [16] DAWSON T E. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance, and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift [J]. *Tree Physiology*, 1996, 16(1–2): 263–272.
- [17] 赵国靖, 徐伟洲, 郭亚力, 等. 达乌里胡枝子根系形态特征对土壤水分变化的响应 [J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 484–490.
ZHAO Guojing, XU Weizhou, GUO Yali, et al. Responses of root system of *Lespedeza davurica* L. to soil water change [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(3): 484–490. (in Chinese)
- [18] 姚静, 施卫明. 盐胁迫对番茄根形态和幼苗生长的影响 [J]. *土壤*, 2008, 40(2): 279–282.
YAO Jing, SHI Weiming. Effect of salt stress on structure and growth of tomato seedling roots [J]. *Soils*, 2008, 40(2): 279–282. (in Chinese)
- [19] 谢德意, 王惠萍, 王付欣, 等. 盐胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *中国棉花*, 2000, 27(9): 12–13.
XIE Deyi, WANG Huiping, WANG Fuxin, et al. Effects of cotton seeds germination and seedling growth under salt stress [J]. *China Cotton*, 2000, 27(9): 12–13. (in Chinese)
- [20] 李波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 39–44.
LI Bo, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impacts of different water supply on tomato root distribution and yield in greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 39–44. (in Chinese)
- [21] NIE Y P, CHEN H S, WANG K L, et al. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 341(1–2): 399–412.
- [22] 张扬, 沈玉芳, 李世清. 施肥对干旱胁迫下夏玉米根系提水的调节作用研究 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 535–541.
ZHANG Yang, SHEN Yufang, LI Shiqing. Regulation of different fertilizer treatments on hydraulic lift of summer maize under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 535–541. (in Chinese)
- [23] 沈玉芳, 李世清. 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征及提水作用的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然*

- 科学版), 2019, 47(4): 71-79.
- SHEN Yufang, LI Shiqing. Effect of fertilization depth on root characteristics and hydraulic lift of winter wheat under different water treatment [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 71-79. (in Chinese)
- [24] 李亚杰. 不同马铃薯品种根系提水能力与抗旱性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [25] 黄洁, 张扬, 沈玉芳, 等. 施肥对水分胁迫下冬小麦根系提水及养分利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 353-357.
- HUANG Jie, ZHANG Yang, SHEN Yufang, et al. Effect of fertilization on winter root hydraulic lift and nutrient use efficiency under water stress [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(2): 353-357. (in Chinese)
- [26] 黄洁. 栽培条件对作物生长及根系提水作用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [27] 曹荷莉, 丁日升, 薛富岚. 不同水盐胁迫对番茄生长发育和产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 29-35.
- CAO Heli, DING Risheng, XUE Fulan. Growth and yield of tomato as impacted by salinity stress [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 29-35. (in Chinese)
- [28] 王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
- WANG Jiali, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673-684. (in Chinese)
- [29] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants [J]. Soil Science, 1960, 89(2): 63-73.
- [30] 刘亚平. 稳定蒸发条件下土壤水盐运动的研究[C]//国际盐渍土改良学术讨论会论文集, 北京, 1985.
- [31] 汪凤珠, 赵博, 王辉, 等. 基于 ZigBee 和 TCP/IP 的盐碱地田间监控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 207-213.
- WANG Fengzhu, ZHAO Bo, WANG Hui, et al. Design and experiment of field monitoring system in alkaline land based on ZigBee and TCP/IP [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 207-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.032. (in Chinese)
- [32] 李凤玲. 锦鸡儿属 (*Caragana* Fabr.) 三种植物水分关系与抗旱性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
- [33] QUEREJETA J I, EGERTON-WAABURTON L M, ALLEN M F. Direct nocturnal water transfer from oaks to their mycorrhizal symbionts during severe soil drying [J]. Oecologia, 2003, 134(1): 55-64.
- [34] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分生产率利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.
- LI Jianming, PAN Tonghua, WANG Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis yield and water use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 82-90. (in Chinese)
- [35] 李欢欢, 刘浩, 孙景生, 等. 水肥耦合对温室番茄产量、水分生产利用效率和品质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 886-891.
- LI Huanhuan, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, water use efficiency and quality of tomato in greenhouse [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 886-891. (in Chinese)
- [36] 冯棣, 张俊鹏, 孙池涛, 等. 不同生育阶段盐分胁迫对棉花生长和水分生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1195-1199.
- FENG Di, ZHANG Junpeng, SUN Chitao, et al. Responses of cotton growth and water physiological indices to salt stress at different growing stages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1195-1199. (in Chinese)
- [37] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮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?flag=1&file_no=20190125&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.025. (in Chinese)
- [38] BARTELS D, SUNKAR R. Drought and salt tolerance in plants [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2005, 24(1): 23-58.
- [39] 李文娆, 张岁岐, 丁彦彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- LI Wenrao, ZHANG Suiqi, DING Shengyan, et al. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5140-5150. (in Chinese)
- [40] 牛文全, 古君, 梁博惠, 等. 水分亏缺条件下毛管理深对番茄生长、产量及品质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 279-287.
- NIU Wenquan, GU Jun, LIANG Bohui, et al. Effects of lateral depths on growth, yield and quality of tomato under water deficit condition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 279-287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170335&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.035. (in Chinese)