

盐碱胁迫对滴灌加工番茄生理生长和干物质积累的影响

张继峰^{1,2}, 王振华^{1,2}, 张金珠¹, 赵娣^{1,2}, 窦允清^{1,2}, 任作利¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为探讨盐碱胁迫对加工番茄生理生长和干物质积累的影响, 采用桶栽试验方法, 人工配制不同盐碱程度的土壤(CK: 1.5 g/kg, S1: 4 g/kg, S2: 7 g/kg, S3: 10 g/kg), 研究滴灌条件盐碱胁迫下加工番茄生长指标、生理指标、干物质积累和产量的变化规律。结果表明: S1 处理对加工番茄的生长指标、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶片水分利用效率及叶绿素含量均有一定程度的促进作用, 但与 CK 处理无显著性差异($P > 0.05$); S2 与 S3 处理对以上指标均有一定的抑制性, 最小值均出现在 S3 处理, 但在生育后期, S2 与 S3 这 2 个高盐碱处理下, 加工番茄的气孔限制值降低, 普遍低于 S1 与 CK 处理($P < 0.01$), 说明在生育后期高盐碱胁迫下加工番茄光合能力的下降主要是由高盐碱胁迫导致叶片气孔关闭的非气孔限制因素造成的; S1 处理使加工番茄增产 2.1%, 而 S2 与 S3 处理因抑制加工番茄生长, 使其分别减产 18.7% 和 65.4%; 果实膨大一期是加工番茄生长发育的一个非常重要时期, 此时, 加工番茄长势迅速, 干物质积累加快, 达到全生育期的最大值。研究结果为新疆盐碱地加工番茄栽培管理技术提供理论依据。

关键词: 盐碱胁迫; 加工番茄; 滴灌; 生长特性; 光合作用; 干物质积累; 产量

中图分类号: S278; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0270-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.042

Effects of Saline Alkali Stress on Physiological Growth and Dry Matter Accumulation of Processing Tomato Under Drip Irrigation

ZHANG Jifeng^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHANG Jinzhu¹,

ZHAO Di^{1,2}, DOU Yunqing^{1,2}, REN Zuoli¹

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to investigate the effects of salt and alkali stress on growth and dry matter accumulation of processing tomato, different salt content soils (CK: 1.5 g/kg, S1: 4 g/kg, S2: 7 g/kg and S3: 10 g/kg) were prepared by barrel planting test, the growth index, physiological index, dry matter accumulation and yield of processing tomato under saline alkali stress and drip irrigation condition were studied. The results show that the treatment of S1 promoted the growth index, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, leaf water use efficiency and chlorophyll content of processing tomato, but there was no significant difference between this treatment and CK ($P > 0.05$). S2 and S3 treatments had a certain degree of inhibition on the above indicators, most of the maximum or minimum values appeared in S3 treatment, however, at the later growth stage, the stomatal limitation values of processing tomato decreased in the high salinity treatments of S2 and S3, which were generally lower than those of S1 and CK treatments ($P < 0.01$), indicating that the decline of photosynthetic capacity of processing tomato under high saline alkali stress at the later growth stage was mainly caused by the stomatal closure of the leaves, and which was caused by high saline alkali stress. S1 treatment increased the yield of processing tomato by 2.1%, while S2 and S3 treatments reduced the growth of processing tomato by 18.7% and 65.4% respectively. The first stage of fruit expansion was a very important period for the growth and development of processing tomato. At this stage, the processing tomato grew rapidly and the accumulation rate of dry matter was accelerated, reaching the maximum value of the whole growth period. The research results could provide theoretical basis for cultivation and

收稿日期: 2018-07-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201506)

第一作者: 张继峰(1991-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: Federjavan@163.com

通信作者: 王振华(1979-), 男, 河南扶沟人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wzh2002027@163.com

management techniques of processing tomato in saline alkali soil of Xinjiang.

Keywords: saline alkali stress; processing tomato; drip irrigation; growth characteristics; photosynthesis; dry matter accumulation; yield

土壤盐渍化是限制全球农业发展的主要非生物胁迫之一^[1],在新疆现有 $347.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的耕地中,约有 1/3 土地产生盐渍化,已经严重阻碍了新疆农业的可持续发展^[2]。在新疆,加工番茄是其主要的经济作物,且大部分属于较为不耐盐作物^[3],基本不适宜在盐碱地种植。

盐分胁迫会阻碍番茄根部摄取土壤中水分和养分,导致番茄的株高下降、茎粗减小、根长降低^[4]。冯棣等^[5]的研究发现,棉花苗期的株高,蕾期的株高、叶面积和茎粗的增长量及成铃数表现为低盐促进、高盐抑制。杨凤军等^[6]研究表明,盐分胁迫会造成叶片光合色素含量降低,光合速率降低。刘胜尧等^[7]开展咸水负压渗灌番茄试验,认为适量咸水灌溉与保持一定土壤基质势,对促进根系干质量与番茄产量、降低耗水量提高水分利用效率具有显著作用,同时得出了采收期产量对盐分浓度反应不敏感,可以用较高浓度咸水灌溉的结论。Campos 等^[8]通过研究不同电导率梯度和 Na : Ca : Mg 当量比的咸水灌溉对番茄产量品质的影响,得出了盐分浓度的增加会分别造成经济效益和总产量减少 11.9% 和 11.0%,可溶性固物和可滴定酸度分别增加 13.9% 和 9.4% 的结论。不同作物对咸水灌溉的反映存在差异,并不一直都是低盐促进高盐抑制。因此,探寻适合加工番茄种植的土壤盐含量,为新疆加工番茄在盐碱地种植提供科学的理论和技术依据,具有十分重大的现实意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验于 2017 年 4—9 月在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站 ($86^{\circ}03'47'' \text{ E}, 44^{\circ}18'28'' \text{ N}$) 进行。试验站地处准噶尔盆

地西南缘天山北麓中段,属于温带大陆性气候,海拔 451 m,平均地面坡度为 6%,地下水埋深大于 5 m。多年平均降水量为 210 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 3 463.5 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温为 2 960.0 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 170 d(图 1)。

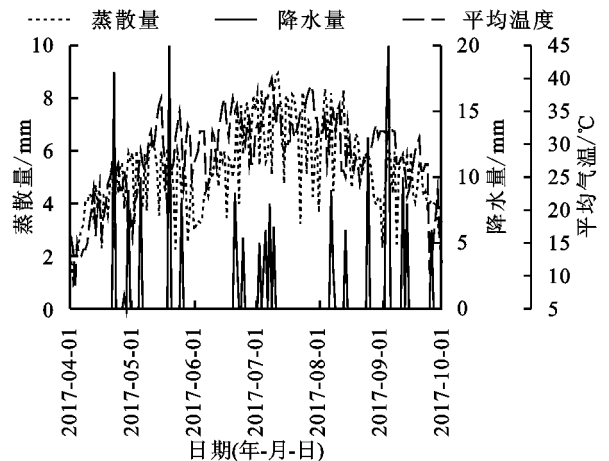


图 1 试验期间降水、蒸散和平均气温分布

1.2 试验设计

试验选取当地加工番茄品种“3166”作为供试品种,采取桶栽试验,试验用塑料桶规格为 0.52 m \times 0.45 m \times 0.35 m(桶顶高 \times 顶部内径 \times 底部内径)。供试土样分别取自石河子市 121 团场盐碱地(土层平均含盐量质量分数为 24.84 g/kg,土壤盐化程度为盐土)和石河子大学节水灌溉试验站(土层平均含盐量质量分数为 1.15 g/kg,土壤盐化程度为常土),采取自然晾干、碾碎、过筛、去除碎石块等杂物的方法,采用比重法测定土壤颗粒含量,环刀法测定土壤干容重,具体理化性质见表 1。将 2 份供试土样按比例掺和,设计 3 种不同土壤含盐量水平 4,7,10 g/kg(分别记为 S1、S2、S3,表示轻度、中度、重度)及 1 个对照组 1.5 g/kg(CK,表示非盐碱土),各水平下设 3 个重复,每种种植加工番茄 4 株。

表 1 土壤理化性质

土层深度/cm	土壤质地	干容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	田间体积持水率/%
0—20	壤土	1.29	0.58	0.82	7.1	29.24	418.59	30.65
20—40	壤土	1.31	0.67	0.79	8.0	28.72	407.26	28.64

试验用肥料分别为尿素 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (N 质量分数 46.4%)、磷酸一铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (P_2O_5 质量分数 60.5%) 和氯化钾 KCl (K_2O 质量分数 57%)。由于供试番茄品种对钾肥和磷肥的需求高于氮肥,所以根据加工番茄品种特性,施肥量定为尿素 300 kg/hm^2 ,磷酸一铵和氯化钾均 225 kg/hm^2 ,各处理施肥量均相同。灌水量根据陈秀香等^[9]研究的灌溉制度并结合当地生产实践,定为

4 500 m^3/hm^2 ,使用塑胶软管和螺旋止水夹模拟滴灌条件,精确控制每个桶的灌水量,滴头流量 1.8 L/h。全生育期灌水 9 次,施肥 8 次,肥随水入(表 2)。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 株高与茎粗 分别在加工番茄的各个生育期末,每个处理各选 3 株具有代表性植株进行标记,用卷尺测量株高(cm),游标卡尺测量茎粗(mm)。

表 2 灌水施肥设计

生育期	处理时间 (月-日)	水处理		施肥处理			
		灌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌水 次数	尿素/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	磷酸一铵/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氯化钾/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥 次数
苗期	05-03—05-31	500	1	37.5	28.125	28.125	1
开花坐果期	06-01—06-21	1500	3	112.5	84.375	84.375	3
果实膨大一期	06-22—07-09	1000	2	75.0	56.250	56.250	2
果实膨大二期	07-10—07-31	1000	2	75.0	56.250	56.250	2
收获期	08-01—08-20	500	1	0	0	0	0
全生育期	05-03—08-20	4500	9	300.0	225.000	225.000	8

1.3.2 叶面积指数与光合势 加工番茄苗期至收获期同株高与茎粗测量时间一致,每个处理测量代表性植株叶面积指数 LAI 计算公式为:

$$\text{LAI} = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (1)$$

式中:0.75 为校正系数; P 为加工番茄种植密度(株/ m^2); a 和 b 分别为叶片的长和宽(cm); i 为叶片数(片)。

然后由公式(2)求得光合势 LAD:

$$\text{LAD} = \sum_{i=1}^n (\text{LAI}_i \times D_i) \quad (2)$$

式中: LAI_i 为第 i 个生育阶段的平均叶面积指数; D_i 为第 i 个生育阶段所持续的时间(d)。

1.3.3 光合特性及叶绿素参数 于 2017 年 7 月 15 日(10:00—18:00)进行光合指标和叶绿素参数测定(于 2017 年 7 月 20 日 10:00—18:00 进行验证测量)。使用 Li-6400 型光合作用测定系统(Li-COR 6400)对已标记单株叶片(第 3 枝从上往下数第 3 羽状复叶的中部裂叶)的光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i 的日变化进行测定。叶片 $\text{WUE} = \text{净光合速率} / \text{蒸腾速率}$ 。

叶绿素使用叶绿素测定仪(SPAD-502Plus)估算叶片叶绿素含量(SPAD 值),选取 4 片新的完全展开的叶片,各测量 5 个点,取平均值代表植物叶绿素含量。

1.3.4 产量与干物质质量的积累 加工番茄在 8 月 1 日进入收获期后,每 7 天人工采收 1 次,每次采收时,每桶单独计数并称质量。从开花坐果期开始,每个生育期末每个处理选取 3 株,用刀沿着土层水平面切断加工番茄以获取地上部,到收获期正好全部取完,用于测量各生长指标的特定株放到收获期选取,然后将所有样品于 105°C 下杀青 1 h 后,在 75°C 下烘 24 h 至完全烘干后称其重量,测定其干物质积累量。

加工番茄地上部总干物质和茎、叶片的动态积累均符合作物的“S”形生长曲线,因此选用 Logistic 生长函数模型进行模拟。

Logistic 生长函数模型形式及其性质^[10]:

$$W = \frac{W_m}{1 + e^{-a+bt}} \quad (3)$$

式中: W 为加工番茄干物质或养分积累量($\text{g}/\text{株}$); t 为苗期后的天数(d); W_m 为加工番茄 W 的理论积累上限($\text{g}/\text{株}$); a 、 b 、 W_m 为 3 个待定系数。对公式(2)求二阶导数可得,当 $t = t_0 = -a/b$ 时,有 $d_{2w}/d_{t^2} = 0$,此时 W 的一阶导数最大,即干物质或养分的积累速率达到最大值 V_m :

$$V_m = d_w/d_t = -bW_m/4 \quad (4)$$

式中: t_0 表示干物质或养分积累速率达到的最大时刻,此时的 V_m 又叫作“速度特征值”(g/(d·株));对函数求三阶导数,可以得到:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\ln(2+\sqrt{3}-a)}{b} \\ t_2 = \frac{\ln(2-\sqrt{3}-a)}{b} \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_1 和 t_2 分别代表生长曲线上的 2 个拐点,它们将曲线分成了 3 个部分,在 $0 \sim t_1$ 时段内,干物质或养分的积累呈缓慢上升趋势,在 $t_1 \sim t_2$ 时段内,干物质或养分的积累与时间基本呈直线上升趋势,过了 t_2 以后,干物质或养分的积累又减缓了下来,使得最终 W 趋于 W_m ; $\Delta t = t_2 - t_1$,称作“时间特征值”,反映了加工番茄干物质或养分积累的一个快速时期,也叫作物的旺盛生长期。

1.4 数据处理方法

本文数据采用 SPSS 22 软件进行分析,Origin 2017 软件进行数据绘图,Excel 2016 软件进行表格制作。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对加工番茄生长性状的影响

由图 2 可知,加工番茄各个生育期株高与茎粗增长量均为 $S1(\text{CK}) > S2 > S3$, $S1$ 与 CK 二者之间并无显著性差异;在果实膨大 2 期之前,株高与茎粗处于快速增长阶段,在果实膨大 1 期, $S1$ 的株高增长速度为 $0.82 \text{ cm}/\text{d}$,明显快于 CK 的 $0.79 \text{ cm}/\text{d}$, $S2$ 和 $S3$ 的增长速度分别为 $0.57, 0.53 \text{ cm}/\text{d}$,茎粗的增长速度分别为 $0.21, 0.19, 0.17, 0.20 \text{ mm}/\text{d}$,增长情况与株高相近, $S2$ 和 $S3$ 对加工番茄的生长均有不同程度的抑制作用, $S3$ 抑制均为最严重。

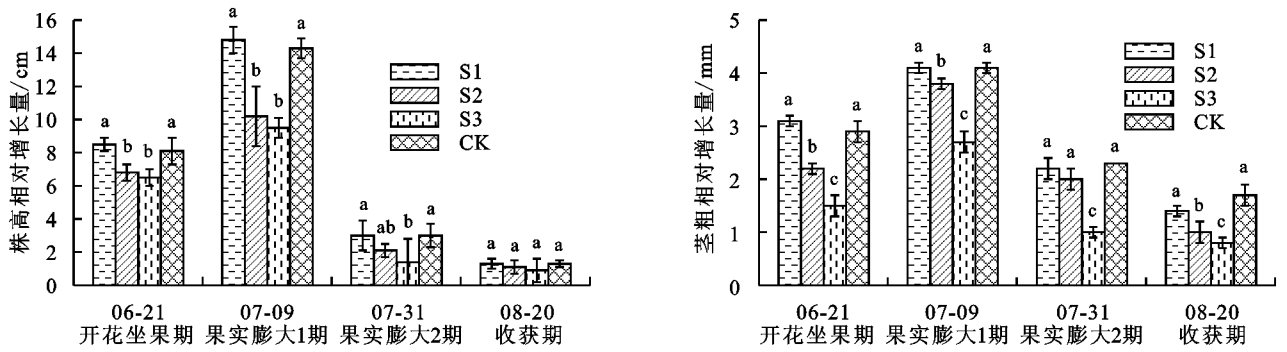


图 2 盐碱胁迫程度对滴灌加工番茄生长的影响

2.2 盐碱胁迫下加工番茄叶面积指数及光合势动态

就全生育期平均叶面积指数而言(表 3),S1 与 CK 差异不显著,S1 较 CK 提高了 0.78%,S2、S3 较 CK 分别显著降低了 7.0%和 16.9%($P < 0.05$),以 S3 处理降低最为显著;在苗期至果实膨大 1 期(5 月 3 日—7 月 9 日),LAI 的差异不显著(图 3),S1 较 CK 仅提高了 0.9%,S2、S3 较 CK 仅降低了 4.9%和 14.2%,到了果实膨大 2 期(7 月 31 日),S2、S3 较 CK 显著降低了 8.9%和 20.5%,说明 S1 具有良好的保持加工番茄生育期光合源的功能,S2 和 S3 对保持光合源功能均有较大的抑制作用,果实膨大 1 期后保持和抑制作用逐渐显著。S1 处理无法显著提高加工番茄总光合势,与 CK 基本无差异(表 3);S2 与 S3 的全生育期总光合势较 CK 分别降低了 6.9%和 16.4%,均

达到显著水平($P < 0.05$);光合势各个生育期呈现与 LAI 一致的趋势,表现为:膨大 2 期>收获期>膨大 1 期>开花坐果期>苗期,在膨大 1 期至膨大 2 期(7 月 9 日—7 月 31 日)各处理均达到最大速率,分别为 3.85,3.32,2.77,3.83(S1、S2、S3 和 CK)。

表 3 不同盐碱胁迫程度下加工番茄全生育期平均单株叶面积、平均叶面积指数及总光合势

盐分处理	平均单株叶面积/cm ²	平均叶面积指数	总光合势
S1	690.67±22.35a	5.18±0.027a	537.91±20.12a
S2	636.80±20.81b	4.78±0.021b	498.38±18.59b
S3	568.90±18.58c	4.27±0.018c	447.54±25.41c
CK	686.06±20.15a	5.14±0.025a	535.50±23.52a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示在 $P = 0.05$ 水平差异显著。下同。

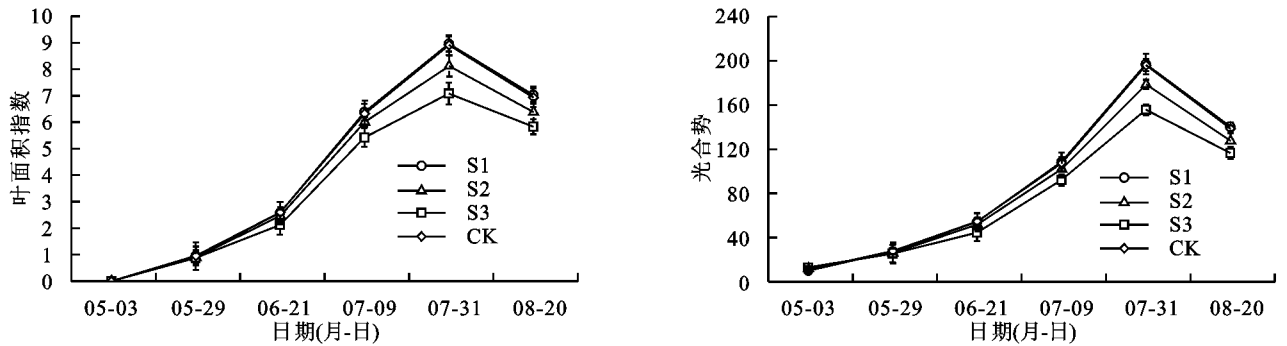


图 3 不同盐碱胁迫程度下加工番茄叶面积指数和光合势变化

2.3 盐碱胁迫对加工番茄光合特性和叶绿素参数的影响

2.3.1 盐碱胁迫对加工番茄净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)日变化的影响 由表 4 可知,加工番茄 P_n 与 T_r 各处理均随着时间的推移先增大后减小,在 12:00 左右 P_n 达到全天的最大值, P_n 在 10:00—12:00 期间随着光照强度的升高而快速增大,12:00 之后,各处理随着光强的继续增加而出现降低趋势,在 14:00 左右,加工番茄的 P_n 进入明显的“午休”现象,进入 16:00 后 P_n 有一定的回升,之后随着光强和温度的降低在 18:00 达到最低值; T_r 的变化趋势与 P_n 相近,在 14:00 左右达到极大值,之后 14:00—18:00 的 T_r 随着光照强度的降低而降低,10:00 左右的 T_r 为全天的最小值。除了 S1 处

理,其他各处理对加工番茄 P_n 和 T_r 均存在极显著差异($P < 0.01$);随着盐碱胁迫程度的增加,加工番茄 P_n 和 T_r 均呈不同程度的下降,以一天中达到最大值的时刻为例(P_n 为 12:00, T_r 为 14:00),S2 处理较 CK 分别降低了 5.2,0.91 mmol/(m²·s),S3 较 CK 分别降低了 10.01,1.23 mmol/(m²·s),S3 降低程度最为明显,对加工番茄盐碱胁迫程度最为严重。

2.3.2 盐碱胁迫对加工番茄气孔导度 G_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i 及叶片水分利用效率 WUE 的影响 由表 4 可知, G_s 全天各处理在 12:00 左右为最大值,最小值出现在 10:00 左右, G_s 与 P_n 趋势基本一致, G_s 增大,有利于加工番茄进行光合作用。 C_i 全天中 18:00 为最大值时刻,但数值与 10:00 无显著性差异($P >$

0.05),此后随着光照强度的增大, C_i 随之降低,最小值出现在 12:00 左右,14:00—16:00 时间段各处理 C_i 变化比较稳定,无显著性差异。植株叶片水分利用效率 WUE 是一个综合性指标,受多种因素影响。由表 4 可知,随着光照强度和温度的上升,WUE 逐渐降低,在 14:00 左右达到最低值,此后随着时间的推移,植株蒸腾速率及其他生理指标开始降低,WUE 开始逐渐变大,但各处理变化并不显著。 G_s 全天变化趋势基本表现为 $S1 > CK > S2 > S3$,全天中的最大

值出现在 S1 处理($0.31 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);在 G_s 达到一天中最大值的时刻,S2 和 S3 处理较 CK 分别降低了 24.1%和 41.4%,对 G_s 的抑制作用非常显著($P < 0.01$)。 C_i 变化趋势与其他光合指标不尽相同:基本为 $S3 > S2 > CK > S1$,S3 处理下 C_i 最大可以达到 $234.23 \mu\text{mol}/\text{mol}$,而 S1 处理最大只能达到 $217.55 \mu\text{mol}/\text{mol}$,最小可达 $207.15 \mu\text{mol}/\text{mol}$,表明随着盐碱程度的增加,加工番茄胞间 CO_2 浓度 C_i 增大,光合能力变弱,生长受到抑制。

表 4 盐碱胁迫程度对加工番茄光合特性的影响

测定时刻	盐分处理	叶绿素 SPAD 值	净光合速率 $P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 $T_r/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 $G_s/$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 $C_i/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	气孔限制值 L_s	水分利用效率 WUE/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)
10:00	CK	58.74a	21.59a	3.05a	0.12a	217.45b	0.49a	7.08b
	S1	58.47a	21.41a	2.98a	0.11a	217.02b	0.49a	7.18b
	S2	52.21b	14.89b	1.58b	0.07b	224.54ab	0.47ab	9.42a
	S3	47.16c	10.15c	1.15c	0.04c	232.22a	0.45b	8.83ab
12:00	CK	70.78a	26.22ab	4.02a	0.29b	209.47b	0.51a	6.52a
	S1	71.01a	27.01a	4.11a	0.31a	207.15b	0.51a	6.56a
	S2	64.12b	21.02b	3.54b	0.22c	217.89a	0.49ab	5.94b
	S3	60.25c	16.21c	2.98c	0.17d	220.24a	0.48b	5.44b
14:00	CK	61.78b	22.15a	6.12a	0.21a	215.87b	0.49a	3.62a
	S1	62.00a	22.35a	6.21a	0.22a	216.45b	0.49a	3.60a
	S2	56.21c	15.56b	5.21b	0.14b	224.16ab	0.47ab	2.99b
	S3	50.35d	10.29c	4.89c	0.11c	231.23a	0.46b	2.10c
16:00	CK	67.58a	23.23a	4.11a	0.23a	214.67b	0.49a	5.56a
	S1	67.47a	23.22a	4.16a	0.23a	212.67b	0.50a	5.59a
	S2	61.24b	16.95b	3.64b	0.18b	220.02ab	0.48a	4.08b
	S3	57.43c	12.26c	3.03c	0.13c	228.01a	0.46b	4.04b
18:00	CK	62.24a	20.87a	3.54a	0.19b	218.46c	0.49a	5.90ab
	S1	62.01a	21.01a	3.65a	0.21a	217.55c	0.49a	5.76b
	S2	56.12b	14.26b	2.15b	0.15c	225.00b	0.47ab	6.63a
	S3	51.48c	9.21c	1.98b	0.11d	234.23a	0.45b	4.65c

2.3.3 盐碱胁迫对加工番茄叶绿素 SPAD 值的影响

叶片叶绿素相对值与叶绿素含量呈显著正相关,叶片 SPAD 能够反映叶绿素含量的高低^[11],同时叶绿素含量也是作物光合能力的一个重要表述指标。由表 4 可知,12:00 左右各处理 SPAD 值均达到最大值,14:00 左右加工番茄出现“午休”现象,此后随着时间的推移,SPAD 值缓慢上升。SPAD 值全天的变化趋势为 $S1(CK) > S2 > S3$,各处理除了 S1 较 CK 未达到显著性水平($P > 0.05$),其他处理均达到显著水平($P < 0.05$)。

2.4 盐碱胁迫对滴灌加工番茄干物质积累的影响

加工番茄的干物质质量积累符合 Logistic 生长函数模型。由表 5 可知,S1 处理下,茎、叶和地上部干物质的积累基本都在苗期后的第 25 天开始进入直线上升的快速阶段,地上部干物质的快速积累时间最长,茎的最短,从最大积累速率 V_m 能看出,S1 处理下,地上部干物质质量单株一天增长可达 5.29 g,叶片和茎的分别是 3.04,3.06 g;S3 处理的茎、叶和地上部干物质质量积累进入快速积累的时间均比其他处理早,分别快于 S1、S2 和 CK 12,8,12 天,说明了高盐碱胁迫情况下,加工番

茄会迫使自己更早进入快速积累阶段,随着有害离子的持续毒害,叶片反映明显,会较早结束快速积累阶段,而离子毒害对茎的影响没有叶片显著($P > 0.05$);S3 处理的茎、叶和地上部干物质质量的单株最大积累速率只有 0.53,2.13,2.65 g/d,较 CK 处理分别降低了 83.7%,26.6%,50.4%,表明盐碱胁迫达到 10 g/kg 后,土壤环境已经极不利于加工番茄的生长发育。

2.5 盐碱胁迫对滴灌加工番茄产量及经济效益分析

通过对土壤含盐量不同水平下的加工番茄产量记录,根据石河子市加工番茄与肥料的市场报价,计算得到产量的效益(表 6)。盐碱胁迫程度为 4 g/kg 时的产量和产值分别为 98 290 kg/hm² 和 39 316 元/hm²,略高于 1.5 g/kg 时的 96 305 kg/hm² 和 38 522 元/hm²,相比对照增产 2.1%;7,10 g/kg 时,相比对照的增产为负值,即减产 18.7%和 65.4%。通过建立盐分—产量效应回归曲线,得出方程的驻点(此时即极大值点) $x = 2.65$,说明在盐碱胁迫程度为 2.65 g/kg 时,加工番茄的产量最高,效益最好,此时产量为 98 300 kg/hm²,产值为 39 320 元/hm²。

表 5 加工番茄干物质积累的 Logistic 模型及其特征值

项目	盐分处理	$\Delta t/d$	t_0/d	t_1/d	t_2/d	$V_m/(g \cdot d^{-1} \cdot 株^{-1})$	方程	R^2	F
茎	S1	21	36	25	46	3.06	$y=95.32/(1+\exp(4.5796-0.1284t))$	0.99	363.0**
	S2	21	31	21	42	1.65	$y=52.12/(1+\exp(3.9629-0.1267t))$	0.98	221.3**
	S3	26	26	13	39	0.53	$y=20.67/(1+\exp(2.6484-0.1027t))$	0.98	255.0**
	CK	18	35	25	44	3.25	$y=90.32/(1+\exp(4.9827-0.1439t))$	0.99	687.2**
叶	S1	28	40	26	54	3.04	$y=128.40/(1+\exp(3.8227-0.0947t))$	0.97	139.0**
	S2	20	36	26	46	3.10	$y=93.57/(1+\exp(4.7465-0.1327t))$	0.96	106.4**
	S3	21	36	26	47	2.13	$y=66.94/(1+\exp(4.6288-0.1270t))$	0.99	943.9**
	CK	29	42	27	56	2.90	$y=126.57/(1+\exp(3.8251-0.0916t))$	0.98	203.5**
地上部	S1	34	44	27	61	5.29	$y=270.06/(1+\exp(3.4417-0.0783t))$	0.97	96.6*
	S2	22	36	25	47	5.12	$y=170.83/(1+\exp(4.2670-0.1200t))$	0.96	96.5*
	S3	25	36	24	49	2.65	$y=100.34/(1+\exp(3.8419-0.1058t))$	0.99	502.3**
	CK	31	42	27	58	5.34	$y=251.95/(1+\exp(3.5980-0.0847t))$	0.96	107.1**

注: t 为加工番茄出苗期后的天数(d); y 为番茄干物质积累量(g/株); t_0 为干物质积累速率最大时刻, 此时的最大积累速率记作 V_m ; t_1 和 t_2 分别为 Logistic 生长函数的 2 个拐点; Δt 被称为“时间特征值”, $\Delta t = t_2 - t_1$; * 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

表 6 盐碱胁迫对滴灌加工番茄产量及经济效益分析

盐分处理	经济产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	增产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	增产率/ %	产值/ ($元 \cdot hm^{-2}$)	肥料成本/ ($元 \cdot hm^{-2}$)	纯收益/ ($元 \cdot hm^{-2}$)	盐分—产量效应回归曲线				
							方程表达式	R^2	F 值	驻点	
CK	96305b			38522	5400	33122					
S1	98290a	1985	2.1	39316	5400	33916	$y = -989.46x^2 + 5239.14x + 91365.39$	0.98	1351.34**	2.65	
S2	77920c	-18385	-18.7	31168	5400	25768					
S3	45340d	-50965	-65.4	18136	5400	12736					

3 讨论

光合作用是加工番茄生长发育过程中一个非常重要的生理活动,是植物体内重要的代谢过程,其强弱对植物的生长、产量及其抗逆性具有重要影响^[12]。本研究表明,轻度盐碱胁迫对加工番茄的光合作用存在一定的促进作用,但并不显著;7,10 g/kg 的盐碱胁迫对加工番茄的光合指标有不同程度的抑制作用,但胞间 CO_2 浓度随着盐碱胁迫的程度增加而显著提高,气孔限制值较对照与轻度盐碱胁迫处理均有所下降,说明此时作物净光合速率等生理指标的降低主要由非气孔因素造成的。叶绿素是光合作用的光敏催化剂,其含量反映了植物光合能力和对环境因子改变的生态适应能力^[13]。本研究表明,轻度盐碱胁迫叶绿素的合成无抑制作用,随着盐碱程度的增加,叶绿素含量开始逐渐降低,在 10 g/kg 时,叶绿素含量降为最小值,抑制作用达到最大,这与张芬等^[14]的研究结果一致。

盐胁迫会抑制作物生长,但不同程度的盐胁迫作物的反映情况不尽相同。本研究表明,除 4 g/kg 的盐碱处理促进加工番茄生长,7,10 g/kg 的盐碱处理均抑制生长,且盐碱胁迫程度越高,抑制作用越明显。通过建立的 Logistic 方程可知,随着土壤盐碱胁迫程度的增加,加工番茄地上部干物质质量的积累量呈下降趋势,这与刘浩等^[15]的研究结果一致。当加工番茄处于果实膨大一期时,地上部的茎、叶干物质质量均处于快速增长阶段,进入收获阶段后,地上部干物质质量的增长速度普遍放缓,盐碱程度越高,放缓速度越显著。盐胁迫会显著抑

制作物正常生长发育,最终导致作物产量降低^[12]。由分析结果可知,7,10 g/kg 的中、重度盐碱土使加工番茄减产,同时,由盐分—产量效应回归曲线方程的驻点结合各指标的分析结果,建议在盐碱含量为 1.5~4.0 g/kg 的盐碱土上种植加工番茄。

4 结论

(1) 4 g/kg 以下的盐碱胁迫,可以保证加工番茄的生长甚至可以小幅度提高加工番茄的光合能力、干物质积累能力及产量;4 g/kg 以上的盐碱胁迫,加工番茄的生长与生理指标均有显著降低,尤其当土壤的盐碱程度达到 10 g/kg 时,加工番茄的生长及生理的绝大部分指标均大幅降低,作物出现大幅减产现象。说明 10 g/kg 的盐碱土壤非常不利于加工番茄的生长,建议在 4 g/kg 以下的轻度盐碱土壤种植加工番茄,有利于作物增产。

(2) 7,10 g/kg 的高盐碱胁迫使加工番茄的气孔导度不断降低,此时的胞间 CO_2 浓度随之增加,气孔限制值降低,可能是随着生育期的推移,作物体内的 PECP、Rubisco 等卡尔文循环酶的活性受到的抑制程度加强,作物叶肉细胞光合活性变弱,此时加工番茄光合作用的降低是由于高盐碱胁迫导致叶片气孔关闭的非气孔限制因素造成的。

(3) 果实膨大 1 期是加工番茄各器官快速发育的 1 个重要阶段,较高盐碱胁迫下的加工番茄会较其他水平提前进入这个阶段,一般提前 7 天左右,膨大 1 期结束后,作物的各器官对盐碱胁迫逐渐敏感,生长

进入缓慢增长阶段,建议在这个时期要保证加工番茄充足的水分和养分,同时要预防病虫害的发生,给加工番茄提供一个良好的生长环境。

参考文献:

- [1] 张喜洋. 盐碱土壤胁迫对菊芋萌芽块茎的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2016.
- [2] 谷海斌,盛建东,武红旗,等. 灌区尺度土壤盐渍化调查与评价:以石河子灌区和玛纳斯灌区为例[J]. 新疆农业大学学报,2010,32(2):95-100.
- [3] 陈玉姬,王伟,李焯,等. 加工番茄幼苗品种间的耐盐性比较研究[J]. 新疆农业大学学报,2012,35(6):457-462.
- [4] 姜森. 番茄盐胁迫下的生理生化特性及耐盐性 QTL 定位[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [5] 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.
- [6] 杨凤军,李天来,藏忠娟,等. 渗 NaCl 干旱胁迫对番茄幼苗光合特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2588-2596.
- [7] 刘胜尧,范凤翠,李志宏,等. 咸水负压渗灌对番茄生长和土壤盐分的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(22):108-117.
- [8] Campos C A B, Dantas F P, Raj G H, et al. Yield and

fruit quality of industrial tomato under saline irrigation [J]. *Scientia Agricola*, 2006, 63(2): 146-52.

- [9] 陈秀香,马富裕,方志刚,等. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. 节水灌溉,2006(4):1-4.
- [10] 汤明尧,张炎,胡伟,等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(5):1238-1245.
- [11] Bielinis E, Józwiak W, Robakowski P. Modelling of the relationship between the SPAD values and photosynthetic pigments content in *Quercus petraea* and *Prunus serotina* leaves. [J]. *Dendrobiology*, 2015, 73:125-134.
- [12] 朱延凯,王振华,李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(2):298-305.
- [13] 万梦丹,刘小刚,徐航,等. 不同灌水和光强条件下小粒咖啡叶片光响应及光合生理特征[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(9):795-803.
- [14] 张芬,张波,田丽萍,等. 盐胁迫对番茄幼苗叶片光合特性及叶绿素和 β -胡萝卜素含量的影响[J]. 北方园艺,2014(11):15-20.
- [15] 刘浩,左青松,刘婧怡,等. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(22):19-23.

(上接第 269 页)

- [8] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(13):2489-2503.
- [9] 林涛,郭仁松,崔建平,等. 滴灌频率对新疆棉田水分蒸散特征及 WUE 的影响[J]. 新疆农业科学,2015,52(7):1224-1229.
- [10] Salah E E, Essam A A, Mohamed S A. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(5): 836-844.
- [11] 王肖娟,龙常州,陈林. 不同灌溉频率对滴灌棉花生长及产量的影响研究[J]. 新疆农垦科技,2014,37(7):55-58.
- [12] 张琼,李光永,柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J]. 水利学报,2004(9):123-126.
- [13] 朱文新,高聚林,孙继颖,等. 深松耕作下不同灌水次数对春玉米根层土壤特性及耗水规律的影响[J]. 北方农业学报,2016,44(5):15-20.
- [14] 蔡丽君,边大红,田晓东,等. 耕作方式对土壤理化性状及夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 华北农学报,2014,29(5):232-238.
- [15] 张西超,邹洪涛,张玉龙,等. 灌溉方法对设施土壤理化

性质及番茄生长状况的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(6):143-147,153.

- [16] Nawaz M F, Bourrie G, Trolard F. Soil compaction impact and modeling: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 291-309.
- [17] 吴争光,虎胆·吐马尔白,张金珠,等. 不同灌水频率棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律研究[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(4):50-54.
- [18] 余美,杨劲松,刘梅先,等. 膜下滴灌灌水频率对土壤水盐运移及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):18-23,28.
- [19] 吴立峰,张富仓,周罕冕,等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(20):137-146.
- [20] Fernandez U O, Virto I, Bescansa P. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation prone, semiarid soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 29-35.
- [21] 祁琳,柏新富,牛玮浩,等. 根际通气状况对盐胁迫下棉花幼苗生长的影响[J]. 植物学报,2016,51(1):16-23.
- [22] 王伟,李光永,曾德超. 滴灌水质与灌溉频率对高含盐土壤棉花苗期生长的影响[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):37-40.