



基于离子稳态的野生与栽培番茄 及其杂交 F_1 的耐盐性差异^{*}

敖 雁¹ 管永祥^{2†} 孙云贺³ 彭益全³ 吴 昊⁴ 乔 燕³ 郑青松³

(1 苏州健雄职业技术学院, 江苏太仓 215411)

(2 江苏省耕地质量保护站, 南京 210036)

(3 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095)

(4 江苏省农业环境监测与保护站, 南京 210036)

摘 要 以野生番茄-醋栗番茄D4-101 (*Solanum pimpinellifolium*) (WT)、自交系番茄栽培种7818D (*S. esculentum*) (CT) 及二者杂交产生的 F_1 代品系为材料, 探讨50、100及200 mmol L⁻¹ NaCl胁迫处理对番茄生物量和离子吸收分配的影响。结果表明: 盐胁迫下, 植株干重的降幅由大到小依次是: CT>WT> F_1 。随着盐胁迫程度加大, 三个品种(系)Na⁺含量均增高, 而K⁺含量显著降低。盐胁迫处理下三个品种(系)的K⁺/Na⁺比均显著降低, 而品种间降幅差异不大。盐胁迫强度的增加显著提高三个品种(系)根的K⁺、Na⁺的选择性比率($S_{K, Na}$), 其增幅由大到小依次是: WT> F_1 >CT。在茎部, 盐胁迫则显著降低了三个品种(系)的 $S_{K, Na}$, 但是盐处理之间WT茎的变化甚小, 而随着盐分强度的上升, CT茎 $S_{K, Na}$ 的降幅显著高于 F_1 的。盐胁迫下三个品种(系)叶片的 $S_{K, Na}$ 均增加, 但是随着盐度的增加, WT叶的 $S_{K, Na}$ 逐渐下降, 而CT和 F_1 的 $S_{K, Na}$ 逐渐上升, 且 F_1 的 $S_{K, Na}$ 上升显著高于CT的。综上所述, F_1 植株在维持离子稳态方面接近于野生亲本, 尤其是叶片, 导致 F_1 不仅长势好, 而且还具有较亲本更好的耐盐性。

关键词 野生番茄; 栽培番茄; 杂交种; 耐盐性; 离子稳态

中图分类号 S641.2 **文献标识码** A

土壤盐渍化是农业生态环境退化的重大问题之一, 不仅危害作物的生长, 而且会导致土壤退化, 严重降低土地利用效率^[1]。西北、华北、东北及沿海是我国盐渍土的主要分布地区, 耕地中也有大量盐渍化土壤分布^[2]。旱区土壤均存在着一定的盐渍化, 而大多数的中低产田都和盐渍及干旱有关, 挖掘这些中低产田的增产能力, 扩大粮食种植面积, 对保障中国粮食总产持续增长具有重要的意

义^[3-7]。为此前人研究了不同耐盐性作物对盐胁迫的响应^[7-9], 进而研究了利用各种措施调控盐胁迫对作物的影响^[10-11]。

番茄是人类消费的第二大蔬菜, 它提供维生素A和维生素C、人体必需的矿物质、酚类抗氧化剂和其他营养物质。番茄栽培或育种的目的主要是增加产量、提高感官和营养品质以及适应逆境的能力等^[12-13]。盐胁迫通常会引起植物光合能力下降、

^{*} 江苏省农业三新工程项目(SXGC[2015]291)、江苏省农业科技自主创新项目(CX(15)1044)和南京农业大学校级SRT计划项目(1513A12)共同资助 Supported by the “3-New” Agriculture Project of Jiangsu Province (No. SXGC[2015]291), the Jiangsu Independent Innovation Program of Agricultural Science and Technology (No. CX(15)1044) and the SRT Project of Nanjing Agricultural University (No. 1513A12)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gyx5598@163.com

作者简介: 敖 雁(1974—), 女, 内蒙古呼盟人, 博士, 副教授, 主要从事农业生物统计学和植物遗传育种研究。

E-mail: 350685056@qq.com

收稿日期: 2015-09-28; 收到修改稿日期: 2015-10-30; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2015-12-10



养分元素匮乏和能量过度消耗,同时也伴随着渗透胁迫,这些共同抑制了植物的正常生长,甚至会导致植物死亡^[14-15]。植物对盐胁迫的响应是复杂的,因盐渍离子的种类、盐胁迫的强度和植物种类的不同而不同。在盐渍环境,植物对 K^+ 的维持对其生存至关重要,Rao等^[16]研究得出,番茄维持地上部的干重和 K^+/Na^+ 比率是其在盐渍环境下生存的关键指标。体内 K^+ 与 Na^+ 的比例与培养液中比例的差异以及植株内不同器官间比例的差异(即 K^+ 、 Na^+ 的选择性比率, $S_{K,Na}$)反映了植物对离子吸收和运输的选择性, $S_{K,Na}$ 越大,植株对 K^+ 的选择性越大,从而维持植株体内离子稳态(Ion homeostasis)适应盐渍环境^[16-18]。在诸多耐盐机制中,植株维持 K^+ 的吸收,维持体内离子稳态是植物,尤其是淡土植物在盐渍土上生存很重要的一环^[19-20]。一些盐生植物还可以通过大量吸收 Na^+ 和 Cl^- ,并储存于液泡,进行渗透调节,来适应盐渍环境^[21]。经过人类长期高压选择,现代番茄栽培种的遗传背景已变得十分狭窄^[22]。而分布在起源地南美洲的番茄野生种或野生近缘种,却蕴藏着极其丰富的优良基因资源。一些野生种如醋栗番茄(*Solanum pimpinellifolium*)等可在盐碱含量较高的土壤中生存^[23]。这些野生种为了应对周围的逆境,自身演化形成了适应盐碱的特异机制,为番茄耐盐遗传改良提供了十分宝贵的资源材料^[24]。一些醋栗番茄表现良好的耐盐性,且醋栗番茄(*S. pimpinellifolium*)与栽培种番茄(*S. lycopersicum*)亲缘关系很近,可与其直接杂交,达到快速转育优良性状的目的^[25],可以显著提高产量和改进品质。番茄是自花授粉植物,杂种优势十分明显。番茄生产和研究能取得今天的进展,很大程度上得益于其杂种优势的利用^[23-25]。

植物在不同发育时期对盐的抗性是不同的,一般在萌发期和幼苗期对盐胁迫最敏感,相关研究多以栽培品种为材料在这个时期进行耐盐鉴定^[26]。张建华等^[27]比较了盐胁迫下野生番茄秘鲁番茄、潘那利番茄和栽培番茄幼苗酶带表达的差异。Martinez等^[14]研究了盐胁迫下栽培番茄和其野生亲缘智利番茄(*S. chilense*)生长、渗透调节和果实产量的变化。其他关于野生番茄和栽培番茄的耐盐差异性比较的研究并不多。对野生番茄、栽培番茄及两者杂交子一代(F_1)的耐盐性进行比较的更是匮乏。本研究以野生番茄、栽培番茄自交系和

他们杂交的 F_1 作为研究材料,探讨50、100和200 mmol L^{-1} NaCl胁迫对不同番茄品种生物量、 Na^+ 含量、 K^+ 含量、 K^+/Na^+ 比率和 K^+ 、 Na^+ 的选择性比率($S_{K,Na}$)等的影响。目的是探究这3种番茄的耐盐性差异,鉴别出杂交 F_1 是否具有杂种优势,耐盐性是否强于亲本,并从离子吸收和分配角度上,阐述其生理差异,为番茄耐盐性传统育种提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

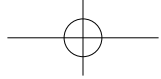
用野生番茄品种“醋栗番茄”D4-101(*Solanum pimpinellifolium*)(WT)、栽培番茄自交系品种7818D(*S. esculentum*)和他们杂交的 F_1 品种作为研究材料。材料均由浙江省农业科学院蔬菜研究所提供。

1.2 试验设计

将三个番茄品种的种子用5%的NaClO溶液进行消毒5 min后,用流动自来水冲洗,再在清水中浸泡24 h后,放在湿润的滤纸上,于黑暗的25℃培养箱中催芽2 d,期间保持培养箱中种子湿润。经催芽后选取长势一致的种子(胚轴长度约为2 cm)移栽到温室里装有石英砂的花盆中,花盆规格一致。每盆种植4棵幼苗,用Hoagland营养液浇灌,保持番茄品种生长环境相同。待幼苗长至四叶期,每盆保留两棵,进行分组处理,一共分为4组:(1)只浇灌1/2 Hoagland营养液,设为对照(Control);(2)浇灌含50 mmol L^{-1} NaCl的1/2 Hoagland营养液;(3)浇灌含100 mmol L^{-1} NaCl的1/2 Hoagland营养液;(4)浇灌含200 mmol L^{-1} NaCl的1/2 Hoagland营养液。每处理6个重复。整个过程在温室完成,温度控制在 $25.0 \pm 4.0^\circ C$ (白天), $20.0 \pm 4.0^\circ C$ (夜间),光照条件为自然光。每隔2 d换一次营养液,将所有处理液的pH均用1 mol L^{-1} HCl调至6.00。连续处理20 d,取样测定和分析。

1.3 测定项目与方法

番茄生物量的测定:将植株从石英砂盆中取出,用蒸馏水把植株清洗干净后吸干水分,将每棵植株分成根、茎和叶3部分,置于110℃烘箱中杀青10 min,再于75℃烘箱中烘干至恒重,称得其干重(DW),并计算其根冠比(R/S)。根冠比(R/



S) = 地下部分干重/地上部分干重

Na⁺、K⁺含量的测定及K⁺/Na⁺和S_{K, Na}的计算：将烘干的植物材料样品（根、茎和叶）研磨成粉末状磨碎后过40目不锈钢筛，采用HNO₃ : HClO₄ (v : v=3 : 1) 消化，利用ICP-OES原子发射光谱仪（Agilent 710，澳大利亚）测定并计算样品中的Na⁺和K⁺含量（mmol g⁻¹ DW），每个样品重复3次。计算K⁺/Na⁺比值，并按下列公式计算离子吸收和运输的K⁺、Na⁺的选择性比率（selectivity ratio）^[17-18]，即S_{K, Na}。根S_{K, Na} = (根K⁺/Na⁺) / (介质K⁺/Na⁺)，叶柄S_{K, Na} = (叶柄K⁺/Na⁺) / (根K⁺/Na⁺)，叶S_{K, Na} = (叶K⁺/Na⁺) / (根K⁺/Na⁺)。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2007和SPSS17.0软件进行数据的处理和统计分析。数据均为“平均数 ± 标准差”格式，采用Duncan新复极差测验法（*p* < 0.05）进行显著性分析。

2 结 果

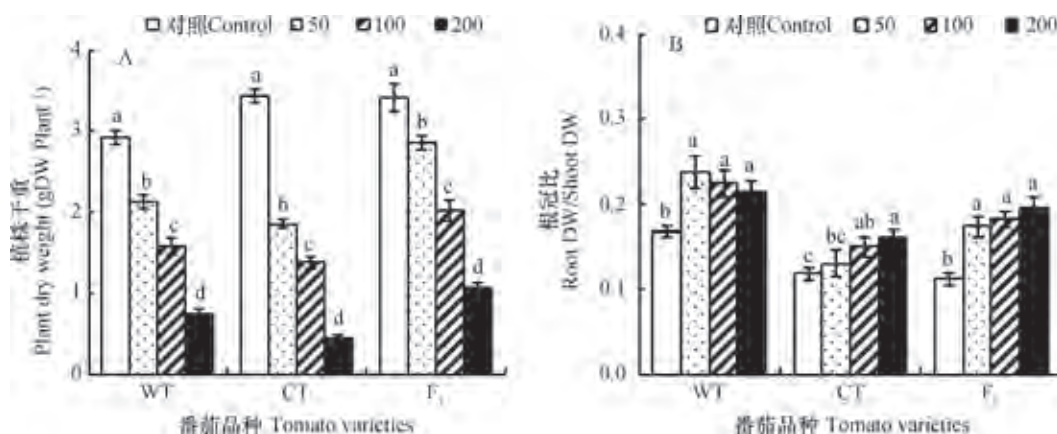
2.1 盐胁迫对不同番茄品种植株生长的影响

与对照相比，在盐胁迫下三个番茄品种生物量均显著下降，盐处理浓度越高，下降幅度越大。

野生番茄（WT）株高在50、100和200 mmol L⁻¹盐处理下干重分别下降27%、46%和74%；栽培番茄（CT）分别下降46%、60%和87%；其杂交种（F₁）分别下降16%、41%和69%（图1A）。图1B显示，三品种的根冠比在盐胁迫下均显著上升，随着盐胁迫强度的增加，WT的根冠比呈现逐渐下降趋势，但是差异不显著；而CT和F₁的根冠比随盐度增加而增加，但F₁的差异也不显著。

2.2 盐胁迫对不同番茄品种Na⁺和K⁺含量的影响

盐胁迫显著提高了三个番茄品种根、茎和叶中Na⁺的含量（表1）。与对照相比，50、100和200 mmol L⁻¹NaCl胁迫下，WT根中Na⁺含量分别是对照的3.63倍、7.89倍和8.16倍，CT根中Na⁺含量分别是对照的4.50倍、6.71倍和7.00倍；F₁根中Na⁺含量分别是对照的4.37倍、5.16倍和8.11倍；WT茎中Na⁺含量分别是对照的19.38倍、25.50倍和29.13倍；CT茎中Na⁺含量分别是对照的20.57倍、29.43倍和38.71倍；F₁茎中Na⁺含量分别是对照的19.29倍、27.00倍和35.43倍；WT叶Na⁺含量分别是对照的9.50倍、17.17倍和35.50倍；CT叶Na⁺含量分别是对照的15.20倍、30.20倍和44.60倍；F₁叶中Na⁺的含量分别是对照的17.00倍、21.50倍和43.50倍（表1）。



注：同簇不同的小写字母表示差异显著（*p* < 0.05），WT、CT和F₁分别是野生番茄品种“醋栗番茄”D4-101、栽培番茄自交系品种7818D和二者杂交的F₁品种，下同 Note: values affixed with different lowercase letter in the same cluster mean significant difference at the level of 5%. WT, CT and F₁ represent wild tomato *Solanum pimpinellifolium*, cultivated tomato (*S. esculentum*) and their hybrid F₁ generation, respectively. The same below

图1 不同浓度NaCl处理对不同番茄品种植株干重（A）和根冠比（B）的影响

Fig. 1 Effects of NaCl stress (50, 100 or 200 mmol L⁻¹) on dry weight (A) and Root DW/Shoot DW (B) of tomato plants relative to variety of tomato



表1 NaCl胁迫下不同番茄品种各器官中Na⁺ 的含量

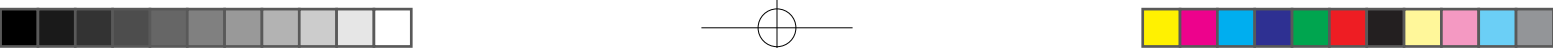
Table 1 Na ⁺ content in different organs of tomato under NaCl stress relative to tomato variety (mmol g ⁻¹)				
器官Organs	处理Treatment	WT	CT	F ₁
根 Roots	对照Control	0.19 ± 0.02 c	0.24 ± 0.03 c	0.19 ± 0.01 d
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.69 ± 0.04 b	1.08 ± 0.04 b	0.83 ± 0.04 c
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	1.50 ± 0.05 a	1.61 ± 0.04 a	0.98 ± 0.05 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	1.55 ± 0.08 a	1.68 ± 0.06 a	1.54 ± 0.08 a
茎 Stems	对照Control	0.08 ± 0.02 d	0.07 ± 0.01 d	0.07 ± 0.02 d
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	1.55 ± 0.07 c	1.44 ± 0.06 c	1.35 ± 0.04 c
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	2.04 ± 0.04 b	2.06 ± 0.08 b	1.89 ± 0.11 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	2.33 ± 0.08 a	2.71 ± 0.14 a	2.48 ± 0.08 a
叶 Leaves	对照Control	0.06 ± 0.02 d	0.05 ± 0.01 d	0.04 ± 0.01 d
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.57 ± 0.03 c	0.76 ± 0.04 c	0.68 ± 0.05 c
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	1.03 ± 0.06 b	1.51 ± 0.08 b	0.86 ± 0.07 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	2.13 ± 0.07 a	2.23 ± 0.05 a	1.74 ± 0.06 a

注：同列不同的小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，下同 Note: values affixed with different lowercase letter in the same column mean significant difference at the level of 5%.The same below

盐胁迫显著降低了三个番茄品种根、茎和叶中K⁺ 含量（表2）。与对照相比，50、100和200 mmol L⁻¹ NaCl胁迫下，WT根K⁺ 含量分别下降23%、29%和47%；CT根中K⁺ 含量分别下降57%、63%和65%；而F₁根中K⁺ 含量分别下降46%、55%和60%；WT茎K⁺ 含量分别下降20%、42%和60%；CT茎K⁺含量分别下降22%、42%和71%；F₁茎K⁺ 的含量分别下降19%、42%和63%；WT叶K⁺ 含量分别下降24%、37%和44%；CT叶K⁺ 含量分别下降31%、34%和42%；F₁叶K⁺ 的含量分别下降

表2 NaCl胁迫下不同番茄品种各器官中K⁺的含量

Table 2 K ⁺ content in organs of tomato under NaCl stress relative to tomato variety (mmol g ⁻¹)				
器官Organs	处理Treatment	WT	CT	F ₁
根 Roots	对照Control	0.55 ± 0.03 a	0.83 ± 0.04 a	0.67 ± 0.04 a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.43 ± 0.04 b	0.36 ± 0.03 b	0.36 ± 0.03 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	0.39 ± 0.03 b	0.31 ± 0.04 bc	0.30 ± 0.04 bc
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.29 ± 0.02 c	0.29 ± 0.02 c	0.27 ± 0.03 c
茎 Stems	对照Control	1.91 ± 0.08 a	2.03 ± 0.04 a	2.01 ± 0.05a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	1.53 ± 0.05 b	1.59 ± 0.06 b	1.62 ± 0.05 a
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	1.11 ± 0.03 c	1.18 ± 0.07 c	1.17 ± 0.09a
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.76 ± 0.04 d	0.58 ± 0.03a	0.74 ± 0.03a
叶 Leaves	对照Control	0.75 ± 0.04 a	0.93 ± 0.05b	0.68 ± 0.07b
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.57 ± 0.03 b	0.64 ± 0.03b	0.52 ± 0.02 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	0.47 ± 0.03 c	0.61 ± 0.04 b	0.49 ± 0.04 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.42 ± 0.02 d	0.54 ± 0.03a	0.45 ± 0.02 b



24%、28%和34%（表2）。

2.3 盐胁迫对不同番茄品种K/Na和S_{K, Na}的影响

盐胁迫显著降低三个番茄品种根、茎和叶K⁺/Na⁺（表3）。与对照相比，50、100和200 mmol L⁻¹ NaCl胁迫下，WT根K⁺/Na⁺分别下降76%、87%和91%，CT根K⁺/Na⁺分别下降91%、94%和95%，而F₁根K⁺/Na⁺分别下降86%、87%和94%；WT、CT和F₁茎K⁺/Na⁺的降幅相近，均分别下降96%、98%和99%；WT叶K⁺/Na⁺分别下降91%、96%和98%，CT叶K⁺/Na⁺分别下降96%、98%和99%，而F₁叶K⁺/Na⁺分别下降95%、97%和98%（表3）。

50、100和200 mmol L⁻¹ NaCl胁迫对不同番茄品种不同器官中S_{K, Na}的影响见表4，盐胁迫下三个番茄品种根的S_{K, Na}均显著增加。与各自对照相比，随着NaCl胁迫强度的上升，WT根S_{K, Na}的增幅最大，其次是F₁，而CT根S_{K, Na}的增幅最小。盐胁迫显著降低三个品种番茄茎的S_{K, Na}，随着盐度的增加，WT茎的S_{K, Na}的变化甚小，盐处理之间S_{K, Na}差异未达显著水平；随着盐度的增加，CT茎S_{K, Na}的降幅要显著高于F₁的。50 mmol L⁻¹ NaCl胁迫

表3 NaCl胁迫对不同番茄品种各器官中K⁺/Na⁺的影响

Table 3 Effects of NaCl stress on K ⁺ /Na ⁺ ratio in organs of tomato relative to tomato variety				
器官Organs	处理Treatment	WT	CT	F ₁
根 Roots	对照Control	2.81 ± 0.12 a	3.51 ± 0.16 a	3.47 ± 0.11 a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.68 ± 0.04 b	0.31 ± 0.04 b	0.47 ± 0.04 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	0.36 ± 0.05 c	0.21 ± 0.04 b	0.34 ± 0.04 c
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.24 ± 0.03 c	0.19 ± 0.03 b	0.22 ± 0.03 c
茎 Stems	对照Control	21.56 ± 1.23 a	30.45 ± 1.56 a	29.54 ± 1.85 a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	0.92 ± 0.07 b	1.15 ± 0.08 b	1.32 ± 0.10 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	0.49 ± 0.04 b	0.61 ± 0.05 b	0.69 ± 0.05 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.32 ± 0.03 b	0.24 ± 0.03 b	0.31 ± 0.03 b
叶 Leaves	对照Control	13.12 ± 1.02 a	19.43 ± 1.66 a	16.03 ± 1.33 a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	1.24 ± 0.08 b	0.79 ± 0.06 b	0.73 ± 0.06 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	0.51 ± 0.04 b	0.37 ± 0.03 b	0.54 ± 0.04 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.21 ± 0.03 b	0.26 ± 0.04 b	0.33 ± 0.04 b

表4 NaCl胁迫对不同番茄品种各器官中S_{K, Na}的影响

Table 4 Effects of NaCl stress on S _{K, Na} in organs of tomato relative to tomato variety				
器官Organs	处理Treatment	WT	CT	F ₁
根 Roots	对照Control	0.03 ± 0.01 d	0.04 ± 0.01 d	0.04 ± 0.02 d
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	5.76 ± 0.12 c	2.41 ± 0.08 c	3.97 ± 0.14 c
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	6.08 ± 0.18 b	3.59 ± 0.14 b	5.75 ± 0.15 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	8.03 ± 0.22 a	6.23 ± 0.17 a	7.33 ± 0.18 a
茎 Stems	对照Control	7.78 ± 0.21 a	8.82 ± 0.18 a	8.45 ± 0.24 a
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	1.37 ± 0.08 b	3.85 ± 0.12 b	2.91 ± 0.12 b
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	1.35 ± 0.06 b	2.96 ± 0.14 c	2.13 ± 0.10 c
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	1.34 ± 0.09 b	1.12 ± 0.08 d	1.51 ± 0.12 d
叶 Leaves	对照Control	0.61 ± 0.05 c	0.64 ± 0.08 b	0.54 ± 0.04 c
	50 mmol L ⁻¹ NaCl	1.35 ± 0.09 a	0.67 ± 0.06 b	0.55 ± 0.04 c
	100 mmol L ⁻¹ NaCl	1.04 ± 0.07 b	0.72 ± 0.05 b	0.78 ± 0.06 b
	200 mmol L ⁻¹ NaCl	0.66 ± 0.04 c	0.95 ± 0.08 a	1.06 ± 0.08 a

下, WT叶 $S_{K, Na}$ 显著上升, 随着盐度进一步增加, 叶 $S_{K, Na}$ 逐步显著下降; 而随着盐度的增加, CT和 F_1 叶 $S_{K, Na}$ 均逐渐增加, F_1 增幅显著高于CT。

3 讨 论

番茄属的一些野生材料表现出对逆境的良好适应, 而野生番茄和栽培番茄有着很近的亲缘关系。因此, 关于他们对盐渍和干旱等生理适应的研究就显得迫切。但关于野生番茄和栽培番茄的耐盐差异性研究的文献较少, 张建华等^[27]从非盐胁迫和盐胁迫下野生番茄和栽培番茄酶带表达上存在差异入手进行研究。Martinez等^[14]从芽的生物量、叶子中水分含量和果实的重量等方面研究了栽培番茄 (*Solanum lycopersicum* var. *Cerasiforme*) 和来自智利北部地区的野生亲缘种番茄 (*Solanum chilense* Dun.) 对于盐胁迫的反应差异。但他们均未将番茄的盐胁迫反应与子一代进行比较, 本研究中, 从生物量积累上看出 F_1 植株干重与对照相比下降最小, 表现优于亲本野生番茄, 而盐胁迫下生物量与对照相比下降最大的是栽培番茄。可见, F_1 的耐盐性在野生番茄之上。

郑青松等^[28]研究表明, 盐胁迫下, 维持体内较高的 K^+/Na^+ 比率和 $S_{K, Na}$ 是油菜“南盐油11号”耐盐性高于“宝杂油1号”的重要原因。盐胁迫下外加硅, 显著降低了黄瓜叶片的 Na^+ 含量, 提高了叶片的 K^+ 含量, 显著促进了植株对 K^+ 的选择性运输, 从而明显提高黄瓜幼苗的抗盐性^[29]。本研究中, 盐胁迫明显提高了番茄体内的 Na^+ , 同时明显降低了体内 K^+ 含量, 导致 K^+/Na^+ 比率下降, 植株的生长受到了抑制。与亲本相比, F_1 植株在盐胁迫下, 茎和叶始终维持较低的 Na^+ 含量, 这表明, 其地上部的拒盐能力很强, 而栽培番茄在盐胁迫下, 尤其是高盐胁迫下, 地上部 Na^+ 含量偏高。盐胁迫下, 野生番茄根和茎维持 K^+ 的能力最强, 其叶维持 K^+ 的能力不如 F_1 , 而栽培番茄盐渍下维持 K^+ 的能力不如野生番茄和 F_1 。 $S_{K, Na}$ 越高, 显示植株吸收或者运输 K^+ 的能力强^[28-30], 盐胁迫下野生番茄根的 $S_{K, Na}$ 增幅最大, 其次是 F_1 , 均显著高于栽培番茄的, 显示野生番茄的根系对 K^+ 有较高的选择性吸收能力, 而 F_1 根系对 K^+ 的选择性吸收能力介于双亲之间; 同样, 盐胁迫下野生番茄叶中的 $S_{K, Na}$ 增幅最小, 栽培番茄的增幅最大, F_1 叶片对 K^+ 的选择性运输能力

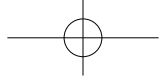
介于双亲之间。结合 Na^+ 分配的数据表明, 具有较高耐盐性的野生番茄叶片积累较多的 Na^+ , 很可能与其叶片液泡对 Na^+ 的封存能力较强有关; 栽培番茄维持较高的叶片 $S_{K, Na}$ 去适应盐渍环境; 而 F_1 叶片在盐渍下保持较低的 Na^+ 运输和更高的 $S_{K, Na}$, 从而积极地维持叶片中的离子稳态, 继而维护叶片的光合作用和蒸腾作用等生理功能。

4 结 论

与栽培番茄相比, 野生番茄耐盐性更强的原因是其对钾的吸收具有较高的选择性, 维持体内较低的 Na^+ , 因而维持更好的离子稳态。而 F_1 植株在维持离子稳态方面的能力接近于野生亲本, 尤其是叶片, 导致 F_1 不仅长势好, 而且还具有较亲本更好的耐盐性。自然条件下各种生物因素和环境因素错综复杂, 因此, 对不同基因型番茄耐盐性评定的研究应该建立在生产实践的基础上, 并找出与生理变化有密切联系的耐盐性鉴定方法。目前, 耕地次生盐渍化问题日益严重, 急需进一步加强研究各种番茄作物对盐渍环境的适应机理以及如何提高番茄耐盐性和品质, 进一步加强野生番茄的耐盐基因的筛选和转化工作, 做到科研与生产相结合, 进而快速有效地利用盐渍土资源, 推进番茄生产的全面发展。

参 考 文 献

- [1] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125—130
Yang Z, Wang B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China (In Chinese). Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125—130
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837—845
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837—845
- [3] 宋楠, 杨思存, 刘学录, 等. 不同种植年限盐碱荒地土壤盐分离子分布特征. 土壤学报, 2014, 51(3): 660—664
Song N, Yang S C, Liu X L, et al. Distribution characteristic of soil salt ions in saline land relative to cultivation history (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 660—664
- [4] 王媛华, 段增强, 董金龙, 等. 可溶性盐对土壤pH测



- 定的影响及消除初探. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1298—1308
- Wang A H, Duan Z Q, Dong J L, et al. Effect of soluble salts on determination of soil pH and its elimination (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (6): 1298—1308
- [5] 张润霞, 王益权, 解迎革, 等. 盐分对土壤电阻率的影响研究. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (2): 208—213
- Zhang R X, Wang Y Q, Xie Y G, et al. Influence research of salts on the soil resistivity properties (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33 (2): 208—213
- [6] 缙倩倩, 韩致文, 屈建军, 等. 秦王川灌区农田土壤盐分离子特征分析. 土壤, 2014, 46 (1): 100—106
- Gou Q Q, Han Z W, Qu J J, et al. Analysis of farmland soil salinity ions in Qinwangchuan irrigated regions (In Chinese). Soils, 2014, 46 (1): 100—106
- [7] 谢文军, 张衍鹏, 张森, 等. 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系. 土壤学报, 2015, 52 (2): 461—466
- Xie W J, Zhang Y P, Zhang M, et al. Relationships between soil physicochemical properties and wheat production in coastal saline soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (2): 461—466
- [8] 刘春卿, 杨劲松, 陈德明, 等. 不同耐盐性作物对盐胁迫的响应研究. 土壤学报, 2005, 42 (6): 993—998
- Liu C Q, Yang J S, Chen D M, et al. Responses to salt stress of crops different in salt tolerance (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (6): 993—998
- [9] Ruiza M S, Yasuor H, Ben-Galb A, et al. Salinity induced fruit hypodermis thickening alters the texture of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill) fruits. Scientia Horticulturae, 2015, 192: 244—249
- [10] 杜振宇, 马丙尧, 刘方春, 等. 盐胁迫下冬枣幼苗对土壤施钾的响应. 土壤, 2015, 47 (1): 68—73
- Du Z Y, Ma B Y, Liu F C, et al. Response of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Zhanhua) to potassium applied into soil under salt stress (In Chinese). Soils, 2015, 47 (1): 68—73
- [11] 张建兵, 杨劲松, 李英荣, 等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析. 土壤学报, 2014, 51 (1): 184—188
- Zhang J B, Yang J S, Li F R, et al. Effects of farmyard manure and mulching on soil water and salinity in severe salinized tide flat soil of north Jiangsu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (1): 184—188
- [12] Bhatnagar-Mathur P, Palit P, Sharma K K. Chapter 5 Horizontal gene transfer through genetic transformation// Pratap A, Kumar J. Alien gene transfer in crop plants, volume 1 Innovations, methods and risk assessment. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2014: 105—142
- [13] 李蒙, 束胜, 郭世荣, 等. 24-表油菜素内酯对樱桃番茄光合特性和果实品质的影响. 西北植物学报, 2015, 35 (1): 138—145
- Li M, Shu S, Guo S R, et al. Effect of 24-brassinolides on photosynthetic characteristics and fruit quality of cherry tomato (In Chinese). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35 (1): 138—145
- [14] Martinez J P, Aatuneez A, Araya H, et al. Salt stress differently affects growth, water status and antioxidant enzyme activities in *Solanum lycopersicum* and its wild relative *Solanum chilense*. Australian Journal of Botany, 2014, 62: 359—368
- [15] 刘冉, 石峰, 刘伟成, 等. 不同形态氮素对盐胁迫下番茄细胞超微结构与光合作用的影响. 园艺学报, 2015, 42 (3): 471—479
- Liu R, Shi F, Liu W C, et al. Effect of nitrogen forms on cell ultra-structure and photosynthesis of tomato under salinity (In Chinese). Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42 (3): 471—479
- [16] Rao E S, Kadirvel P, Symonds R C, et al. Relationship between survival and yield related traits in *Solanum pimpinellifolium* under salt stress. Euphytica, 2013, 190: 215—228
- [17] 马梅, 刘冉, 郑春芳, 等. 油菜素内酯对盐渍下油菜幼苗生长的调控效应及其生理机制. 生态学报, 2015, 35 (6): 1837—1844
- Ma M, Liu R, Zheng C F, et al. Regulation of exogenous brassinosteroid on growth of salt-stressed canola seedlings and its physiological mechanism (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (6): 1837—1844
- [18] Flower T J, Yeo A R. Ion relation of salt tolerance// Baker D D, Hall J L. Solute transport in cells and tissue. New York: John Wiley and Sons, 1988: 392—416
- [19] Yang Y, Zheng Q S, Liu M, et al. Difference in sodium spatial distribution in the shoot of two canola cultivars under saline stress. Plant and Cell Physiology, 2012, 53 (6): 1083—1092
- [20] 阳燕娟, 郭世荣, 于文进. 嫁接对盐胁迫下西瓜幼苗体内离子和内源激素含量与分布的影响. 西北植物学报, 2015, 35 (3): 500—507

- Yang Y J, Guo S R, Yu W J. Effect of rootstock-grafting on the contents and distribution of ions and endogenous hormones in watermelon seedlings under NaCl stress (In Chinese). *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35 (3): 500—507
- [21] Hammou K A, Rubio L, Fernández J A, et al. Potassium uptake in the halophyte *Halimione portulacoides* L. Aellen. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107: 15—24
- [22] Shirasawa K, Isobe S, Hirakawa H, et al. SNP discovery and linkage map construction in cultivated tomato. *DNA Research*, 2010, 17 (6): 381—391
- [23] Tal M, Shannon M C. Salt tolerance in the wild relatives of the cultivated tomato: Responses of *Lycopersicon esculentum*, *L. cheesmanii*, *L. peruvianum*, *Solanum pennellii* and F₁ hybrids to high salinity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1983, 10: 109—117
- [24] 孙玉燕, 刘磊, 郑峥, 等. 番茄耐旱和耐盐遗传改良的研究进展及展望. *园艺学报*, 2012, 39 (10): 2061—2074
- Sun Y Y, Liu L, Zheng Z, et al. A review and perspectives on genetic improvement of salt and drought tolerance in tomato (In Chinese). *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39 (10): 2061—2074
- [25] 李涛, 刘磊, 郑峥, 等. 醋栗番茄的研究与利用现状. *园艺学报*, 2014, 41 (1): 178—186
- Li T, Liu L, Zheng Z, et al. Characterizations and its application of wild tomato Species *Solanum pimpinellifolium* (In Chinese). *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41 (1): 178—186
- [26] Martinez J P, Antunez A, Pertuze R, et al. Effects of saline water on water status, yield and fruit quality of wild (*Solanum chilense*) and domesticated (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) tomatoes. *Explore Agriculture*, 2012, 48 (4): 573—586
- [27] 张建华, 刘凤荣, 陈火英. 野生番茄和栽培番茄的耐盐差异性比较研究. *上海交通大学学报 (农业科学版)*, 2006, 24 (6): 533—540
- Zhang J H, Liu F R, Chen H Y. Comparative studies on salt tolerance of tomato wild species and cultivar (In Chinese). *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agriculture Sciences)*, 2006, 24 (6): 533—540
- [28] 郑青松, 刘海燕, 隆小华, 等. 盐胁迫对油菜幼苗离子吸收和分配的影响. *中国油料作物学报*, 2010, 32 (1): 65—70
- Zheng Q S, Liu H Y, Long X H, et al. Effects of salt stress on ionic absorption and distribution of rape seedlings (In Chinese). *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32 (1): 65—70
- [29] 刘媛, 王仕稳, 殷俐娜, 等. 硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的生理机制研究. *西北植物学报*, 2014, 34 (5): 988—994
- Liu Y, Wang S W, Yin L N, et al. Studies on physiological mechanism of salt resistance improved by silicon in cucumber (In Chinese). *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34 (5): 988—994
- [30] Fan M L, Bie Z L, Krumbein A, et al. Salinity stress in tomatoes can be alleviated by grafting and potassium depending on the rootstock and K-concentration employed. *Scientia Horticulturae*, 2011, 30 (3): 615—623

A Comparative Study on Salt Tolerance of Wild, Cultivated and their Hybrid F₁ Tomato Seedlings Based on the Ion Homeostasis

AO Yan¹ GUAN Yongxiang^{2†} SUN Yunhe³ PENG Yiquan³ WU Hao⁴ QIAO Yan³ ZHENG Qingsong³

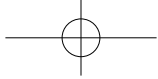
(1 Suzhou Chien-Shiung Institute of Technology, Taicang, Jiangsu 215411, China)

(2 Station of Land Protection of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

(3 College of Resources and Environmental Science, Key Laboratory of Marine Biology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(4 Jiangsu Station of Agro-Environmental Monitoring and Protection, Nanjing 210036, China)

Abstract An experiment was conducted to study effects of salinity, varying in level, 50, 100 or 200 mmol L⁻¹ NaCl, on plant growth, ion absorption and distribution of wild tomato *Solanum pimpinellifolium* (WT), cultivated tomato (*S. esculentum*) (CT) and their hybrid F₁ generation. Results showed that dry weight (DW) of the three tomato varieties decreased significantly under salt stress, either 50, 100



or 200 mmol L⁻¹NaCl, displaying a descending order of CT > WT > F₁. With rising salt stress, Na⁺ content increased, while K⁺ content decreased significantly in all the tomato plants. Besides, under salt stress, K⁺/Na⁺ decreased significantly in all the tomato plants and the decreases in the plants, regardless of variety, were similar in extent. With rising salt stress, the roots of the plants of either variety enhanced their K⁺ or Na⁺ selectivity ratio ($S_{K, Na}$), but the enhancement varied slightly in extent with variety, showing an order of WT > F₁ > CT. However, salt stress decreased stem $S_{K, Na}$ in all the tomato plants by a similar degree. But with rising salt stress, the drop in CT was much bigger than that in F₁. Salt stress increased leaf $S_{K, Na}$ of all the tomato plants, but with rising salt stress, leaf $S_{K, Na}$ declined in WT, while it kept increasing gradually in CT and F₁ and the rise in F₁ was more significant than that in CT. To sum up, the F₁ generation is similar to its wild parents in maintaining ion balance, especially in their leaves, which makes F₁ generation better in growth and higher in salt tolerance than its parents.

Key words Wild tomato variety; Cultivated tomato variety; Hybrid tomato variety; Salt tolerance; Ion homeostasis

(责任编辑：陈荣府)