

NaCl处理对真盐生植物盐地碱蓬根系特征及活力的影响

郭建荣*, 郑聪聪*, 李艳迪, 范海, 王宝山**

山东师范大学生命科学学院, 逆境植物重点实验室, 济南250014

摘要: 为探讨真盐生植物盐地碱蓬根系特征及活力与盐胁迫的关系, 在水培条件下, 分别研究了0、200、400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理对盐地碱蓬根系生物量、根系活力等生理指标的影响。结果表明: 随着NaCl处理浓度升高, 盐地碱蓬根系干重和鲜重、总长度、表面积、总体积及根尖数总体呈先升高后下降趋势, 其中, 最大值出现在200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下。200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系的干重和鲜重及总长度, 而600 mmol·L⁻¹ NaCl处理极显著抑制了盐地碱蓬根系干重和鲜重以及根尖数, 同时显著降低了根系的总长度、表面积和总体积。根系活跃吸收面积及游离脯氨酸含量随NaCl浓度的升高而增加, 600 mmol·L⁻¹ NaCl处理时达到最大值。这些结果表明, 较高浓度的NaCl处理可能通过增加盐生植物根系总长度、总吸收面积和根总体积促进盐地碱蓬根系生长来适应盐胁迫; 而过高盐浓度则通过降低根系总长度、总吸收面积和根总体积抑制根系生长。

关键词: 盐地碱蓬; 根系生长; 根系活力; NaCl; 吸收面积

土壤盐渍化是农业发展面临的重要问题之一, 目前, 世界上约20%的灌溉土壤受盐害影响(Zhu 2001)。我国为世界盐碱地大国, 盐渍土面积大、分布广, 总面积达9 913×10⁴ hm², 约占国土面积的1.03% (杨真和王宝山2015)。盐渍化土壤不仅严重制约着农作物的生长发育, 对农业生产造成很大的威胁, 而且会导致土壤退化, 严重降低土地利用率(Osmond和Popp 1983)。面对土壤退化、淡水匮乏、世界人口剧增的全球性生态问题, 如何开发和利用盐碱地将成为重要课题。因此, 了解植物的耐盐机理, 研究盐胁迫条件下植物的生理生化变化, 对探讨盐胁迫作用机理、发展盐碱地农业, 缓解粮食压力具有重要的实践意义。

在盐胁迫下, 根系是植物接受土壤中盐碱刺激的直接部位。植物根系作为植物吸收养分和水分的主要器官, 也是植物感受土壤逆境胁迫的首要部位, 根系在逆境条件下的形态特征及活力, 是植物有效吸收和利用土壤养分最直接的适应特征之一(Giehl等2014; Kellermeier等2014), 对植物的耐盐能力至关重要(Srinivasarao等2004; Galvan-Ampudia和Testerink 2011)。但是, 由于植物根系生长在土壤中难以观察和研究, 根系对盐胁迫的响应及机制研究较少。盐生植物是一类能够在相当于200 mmol·L⁻¹ NaCl及以上浓度含盐量的土壤中正常生活并完成生活史的植物, 其他均为非盐生植物(Flowers和Colmer 2008)。非盐生植物对盐敏感, 盐渍环境下, 非盐生植物会因为吸收了较多的盐离子而抑制其生长(王树凤等2014), 盐处理会显著降低甜土植物

豌豆和大豆的相对电子传递速率及光系统II (PSII) 的最大光化学效率, 从而显著抑制其地上部分的生长(Percey等2016)。同样, 盐渍环境会抑制非盐生植物根系的生长发育, 采用120 mmol·L⁻¹ NaCl处理一年生橄榄树扦插苗时, 发现NaCl处理显著抑制橄榄树的根系长度, 同时增加了其叶片中Na⁺的含量(Rossi等2015)。NaCl处理显著降低了非盐生植物草地早熟禾(*Poa pratensis*)的生物量, 同时其根冠比也显著降低(Gilbert和Fraser 2013)。50 mmol·L⁻¹ NaCl处理非盐生植物薄荷(*Mentha canadensis*)幼苗, 即可显著抑制薄荷的生物量、植株高度以及根的长度, 随着盐处理浓度的增加, 抑制程度随之增加(Yu等2015)。而盐生植物具有较强的耐盐性可能与盐生植物的根系形态学和生理学特征有关。一定浓度的盐处理可促进真盐生植物地上部分的营养生长(李存桢等2005; Duan等2007; 闫留华等2008; Song等2008; Katschnig等2013), 也有研究表明一定浓度的NaCl可以促进真盐生植物的生殖生长过程, 增加植株的开花数目(郭建荣和王宝山2014), 同时提高植株的种子产量、种子质量以及种子的活力等(Guo等2015; Zhou等2016)。盐渍环境下, 真盐生植物盐地碱蓬的耐盐机理可能与根系特征有关(冯中涛等2011), 但水培条件下, 不同浓度盐对真盐生植物盐地碱蓬根系生长及形态特征的研究还未见报道。

收稿 2016-12-12 修定 2016-12-23

资助 国家自然科学基金(31570251)。

* 共同第一作者。

** 通讯作者(E-mail: bswang@sdu.edu.cn)。

本文以真盐生植物盐地碱蓬为材料, 采用水培的方法, 通过测定不同浓度NaCl处理下根生长、吸收面积及脯氨酸含量的变化, 探讨盐生植物根系的耐盐特性, 为进一步揭示真盐生植物的耐盐性提供依据。

材料与方法

1 实验材料及其培养与处理

1.1 实验材料

实验以真盐生植物盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (L.) Pall.]为实验材料。

1.2 材料培养及处理

随机挑选饱满的盐地碱蓬种子(采自东营黄河三角洲)用0.1% HgCl₂消毒10 min, 用流水冲洗干净后播种于装有干净细砂的塑料盆。待幼苗长至6~8 cm时, 选取大小一致的幼苗, 用蒸馏水冲洗干净, 将幼苗移栽于干净的培养罐内(直径为10 cm, 高度为15 cm), 培养罐每罐内6株苗, 然后用含不同浓度NaCl的Hoagland溶液(均用去离子水配置, 1 mol·L⁻¹ KOH和H₂SO₄调节pH至6.3±0.1)进行水培。NaCl溶液设4个浓度: 0、200、400和600 mmol·L⁻¹, 每组3个重复。NaCl溶液每天以50 mmol·L⁻¹递增以避免盐冲击, 使所有盐浓度在同一天达到终浓度, 盐处理15 d后测定各相关生理指标。培养用人工气候箱(RZX-500C, 智能人工气候箱, 宁波江南仪器厂)的昼夜温度为(27±2)°C/(20±2)°C (白天/晚上), 每天光照16 h, 相对湿度60%~70%, 白天最高光照强度约800 μmol·m⁻²·s⁻¹, 每2天换一次培养液以保证根系的良好生长。

2 实验方法

2.1 盐地碱蓬根系生长指标的测定

2.1.1 植株根部鲜重和干重的测定

盐处理15 d后, 小心取出完整植株, 用去离子水将根部营养液轻轻漂去, 并用蒸馏水快速漂洗根部, 用吸水纸吸干表面水分后称量根部的鲜重(FW)。将已知鲜重的植物材料放入105°C的烘箱中杀青10 min, 再以70°C烘72 h至恒重, 称干重(DW), 每种处理3个重复。

2.1.2 根系形态和生长量测定

在不同浓度NaCl处理的培养罐中各取3棵盐地碱蓬植株, 小心取出完整植株后, 用蒸馏水快速

漂洗根部, 用吸水纸吸干表面水分, 然后将根部与地上部分从茎基切除, 将根部放入扫描仪上的托盘中, 托盘加入清水, 用镊子等工具使根部尽量完全展开, 利用根系分析系统(Win-RHIZO, Regent Instruments Inc., 加拿大)对根系进行扫描并分析。

2.2 盐地碱蓬根系生理指标的测定

2.2.1 根系活跃吸收面积测定

取样方法同2.1.1。用吸水纸吸干根系表面水分, 参照Bramley等(2009)方法, 采用甲烯蓝法测定根系活跃吸收面积。

2.2.2 根系脯氨酸含量测定

取样方法同2.1.1。用吸水纸吸干根系表面水分, 采用茚三酮比色法测定根系游离脯氨酸含量(Bates等1973)。

2.3 统计分析

实验数据均为3个重复的平均值。利用SPSS-17.0统计软件和Excel进行数据处理和作图。平均值之间的比较采用单因素方差分析方法(One-Way ANOVA)。

实验结果

1 NaCl处理对盐地碱蓬植株根系鲜重和干重的影响

采用不同浓度的NaCl处理盐地碱蓬时, 其幼苗的生长有很大不同, 为了分析不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系生长的影响, 我们对不同浓度NaCl处理下盐地碱蓬根系的鲜重和干重进行了统计分析。由图1可知, 随着NaCl处理浓度的升高, 盐地碱蓬根系鲜重和干重均呈先升高后下降的趋势, 其中200 mmol·L⁻¹ NaCl处理时达到最大值。200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系的鲜重和干重($P<0.05$), 与对照相比, 其根系的鲜重和干重分别增加了11.73%和20.92%。而400 mmol·L⁻¹ NaCl处理时, 盐地碱蓬根系的鲜重和干重与对照相比均有所下降, 但差异不显著($P>0.05$), 更高浓度的NaCl (600 mmol·L⁻¹ NaCl)处理极显著降低了盐地碱蓬根系的鲜重和干重($P<0.01$), 其分别为对照条件下的56.72%和51.31%。

2 NaCl处理对盐地碱蓬植株根系总长度、面积、平均直径、体积及根尖数的影响

根系是植物从土壤及培养介质中吸收水分和矿质营养的主要器官, 而根系的生长情况, 比如根

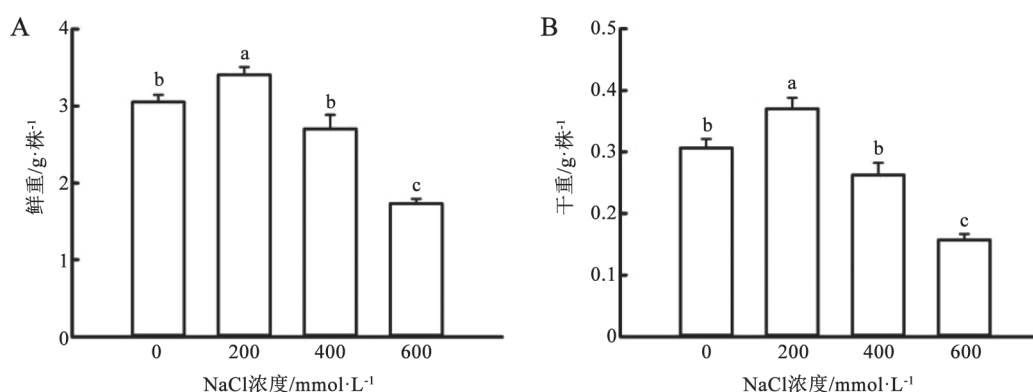


图1 不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系鲜重(A)和干重(B)的影响

Fig.1 Effects of different NaCl concentrations on the root fresh (A) and dry weight (B) of *S. salsa*

数据为平均数±标准误($n=3$),不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$); 下图同。

系的长度、面积、直径、体积及根尖数在一定程度上反映了植物的吸收能力。因此,为了分析不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系生长状态的影响,我们统计了不同浓度NaCl处理下盐地碱蓬根系的生理指标。

由图2-A可知,不同浓度NaCl处理影响到盐地碱蓬的根系总长度。盐地碱蓬根系的总长度随NaCl处理浓度的增加呈先升高后下降趋势,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系总长度,其根系总长度为对照条件下的117.86%。600 mmol·L⁻¹ NaCl处理则显著降低了盐地碱蓬根系总长度($P<0.05$),其仅为对照的81.06%。而400 mmol·L⁻¹ NaCl处理没有显著影响到盐地碱蓬根系的总长度,其与对照相比差异不显著($P>0.05$)。

根系表面积反映植物对土壤中水分和养分吸收能力的强弱,对不同浓度NaCl处理下的盐地碱蓬根系表面积进行统计分析,结果显示,随NaCl处理浓度的增加,盐地碱蓬根系表面积呈现先增加后降低的趋势,与对照相比,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系的表面积,其根系表面积为对照的123.94%。400 mmol·L⁻¹ NaCl处理与对照差异不显著,但更高浓度(600 mmol·L⁻¹ NaCl)处理显著降低了盐地碱蓬根系的表面积,为对照条件下的76.54% (图2-B)。

对不同浓度NaCl处理下的盐地碱蓬根系平均直径进行统计分析发现,高浓度NaCl处理没有显著影响盐地碱蓬根系的平均直径(图2-C),各处理之间差异不显著($P>0.05$)。但是,随着NaCl处理浓

度的增加,盐地碱蓬根系总体积呈现先增加后降低的趋势(图2-D),与对照相比,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系的总体积($P<0.05$),其根系体积为对照的143.88%。而400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理下,盐地碱蓬根系的总体积有下降的趋势,但差异不显著($P>0.05$),分别为对照条件下的78.76%和71.70%。

对不同浓度NaCl处理下的盐地碱蓬根系根尖数进行统计分析,结果显示,与对照相比,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理增加了盐地碱蓬根系根尖数,但未达到显著水平($P>0.05$),而400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理却显著降低了盐地碱蓬根系的根尖数($P<0.05$),分别为对照的73.75%和67.80% (图2-E)。

3 NaCl处理对盐地碱蓬植株根系活力和脯氨酸含量的影响

根系的活跃吸收面积直接反映了植物根系的吸收能力,对不同浓度NaCl处理下的盐地碱蓬根系活跃吸收面积进行统计分析,结果显示,盐地碱蓬根系活跃吸收面积随着NaCl处理浓度的增加呈现上升的趋势,与对照相比,400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系活跃吸收面积($P<0.05$),分别增加了41.51%和61.35%;而200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下,盐地碱蓬根系活跃吸收面积有所升高,但差异不显著($P>0.05$) (图3)。

在逆境条件下(如干旱、盐碱、热害、冷害、冻害),植物体内会显著积累脯氨酸(proline, Pro),以降低植物细胞的渗透势。植物体内脯氨酸的含量在一定程度上可以反映植物的抗逆性。对不同浓

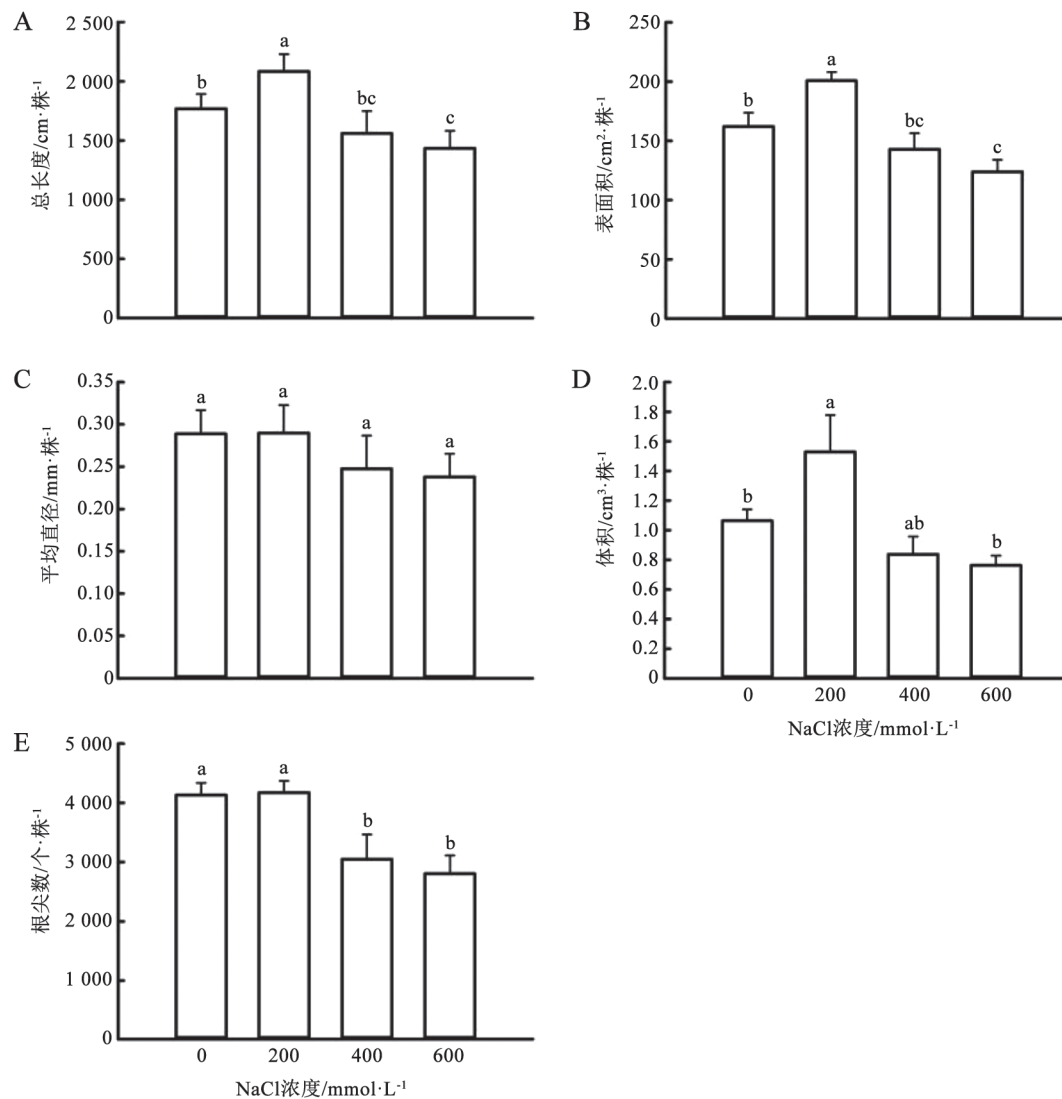


图2 不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系总长度(A)、表面积(B)、平均直径(C)、体积(D)和根尖数(E)的影响
Fig.2 Effects of different NaCl concentrations on the total length (A), surface area (B), average diameter (C), total volume (D) and number of root tips (E) of *S. salsa* roots

度NaCl处理下的盐地碱蓬根系游离脯氨酸含量进行统计分析的结果表明,盐地碱蓬根系中脯氨酸含量随着NaCl处理浓度的升高而增加,且盐处理均显著增加了盐地碱蓬根系中的脯氨酸的含量($P < 0.05$)。与对照相比,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理为对照的2.06倍;而400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理时,其根中脯氨酸含量与对照相比分别增加了1.96和4.64倍(图4)。

讨 论

植物生长量是植物对盐胁迫反应的综合体现

及对盐胁迫的综合适应,也是植物耐盐性的直接指标(李悦等2011)。盐地碱蓬为典型的稀盐型盐生植物,一定浓度的NaCl对其生长和肉质化有明显的促进作用(Wang等2001; Mori等2006, 2008)。Wang等(2012)的研究表明NaCl显著促进盐生植物海马齿苋(*Sesuvium portulacastrum*)的生长,使其叶片肉质化并促进茎的发育。杨明峰等(2002)的研究发现对盐地碱蓬进行盐处理时,肉质化只发生在地上部分,其根系不出现肉质化现象,根系通过离子转运,把大量离子转运到地上部分,避免根部积累过多无机盐离子。弋良朋等(2006)发现梭梭、

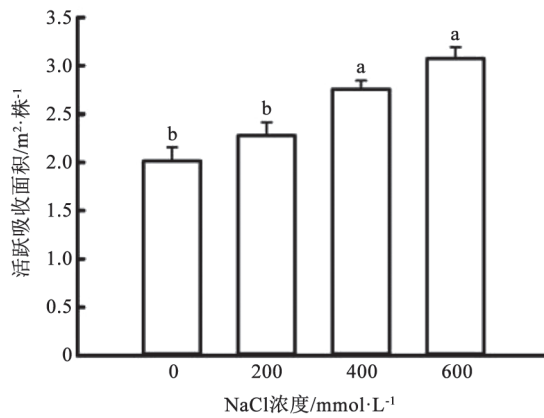


图3 不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系活跃吸收面积的影响

Fig.3 Effects of different NaCl concentrations on the root active absorbing area of *S. salsa*

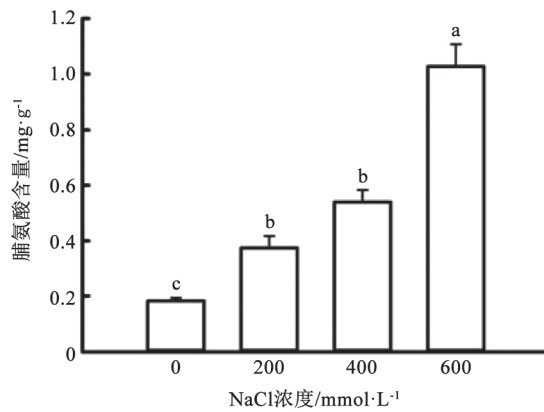


图4 不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系游离脯氨酸含量的影响

Fig.4 Effects of different NaCl concentrations on the root free proline content of *S. salsa*

囊果碱蓬、钠猪毛菜根系的生物量在240 mmol·L⁻¹ NaCl处理下有所降低,但差异不显著。但是更高浓度(480 mmol·L⁻¹)的NaCl处理时,3种植物根系的生物量大幅度降低,其降低幅度明显高于地上部分,均达到了显著水平。我们的实验结果表明:与对照相比,200 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系干重和鲜重,同时显著增加了盐地碱蓬根系的总长度、表面积和根系体积($P<0.05$),表明在200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下,盐地碱蓬的根系生长良好,这与200 mmol·L⁻¹ NaCl可显著促进盐地碱蓬地上部分的生长相一致(Lu等2002, 2003)。400 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著降低了盐地碱蓬的根尖数

($P<0.05$),同时其根系的鲜重、干重、总长度、表面积和总体积也降低,但未达到显著水平($P>0.05$)。当采用更高浓度的NaCl (600 mmol·L⁻¹)处理时,盐地碱蓬根系鲜重、干重、根系总长度、表面积和根尖数显著降低($P<0.05$),说明此时已显著影响盐地碱蓬根系的生长。不同浓度NaCl处理均没有显著影响到盐地碱蓬根系平均直径($P>0.05$),但随着NaCl处理浓度的增加有减小的趋势,这与弋良朋和王祖伟(2011)研究结果基本一致。这些结果表明,一定浓度的NaCl (比如200 mmol·L⁻¹)能够显著促进盐地碱蓬根系的生长,尤其是根系鲜重和干重,同时增加了盐地碱蓬根系的总长度、表面积及根系体积,根系这些指标的增加可能是200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下盐地碱蓬地上部分生长良好的基础(Lu等2002, 2003)。但是更高浓度NaCl处理,特别是600 mmol·L⁻¹的NaCl处理下,盐地碱蓬的根系生长受到显著抑制。

根系活力是植物根系的吸收能力、合成能力、氧化能力和还原能力等的综合反映,是一种能够较客观地反映植物根系生命活动和活力水平的重要生理指标(斯琴巴特尔和吴红英2001)。林莺和范海(2013)的研究发现随着盐处理浓度的升高,二色补血草的根系活力先升高后降低,最大值出现在100 mmol·L⁻¹ NaCl处理组。但也有研究表明,稀盐型盐生植物囊果碱蓬的根系活力随着盐处理浓度的升高而持续升高(弋良朋等2007)。植物根系的活跃吸收面积则可以从另一方面反应根系的活力情况。盐渍环境下,盐胁迫主要通过影响根系的吸收能力从而影响植株的生长(卞阿娜等2015)。本实验通过甲烯蓝法测定了不同浓度NaCl处理下盐地碱蓬根系的活跃吸收面积来了解不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬根系活力及吸收能力的影响。结果发现,盐地碱蓬根系的活跃吸收面积随NaCl处理浓度的升高而增加。400和600 mmol·L⁻¹ NaCl处理显著增加了盐地碱蓬根系的活跃吸收面积($P<0.05$),而200 mmol·L⁻¹ NaCl处理下盐地碱蓬根系的活跃吸收面积增加不显著。说明在高浓度盐胁迫条件下,真盐生植物盐地碱蓬的根系可能通过提高其根系活力来适应盐渍环境。但是较高浓度(600 mmol·L⁻¹) NaCl处理下,盐地碱蓬根系的生长受到极大的抑制,其根系鲜重和干重以及根系的长度和面积等都显著低于对照,这可能是由

于在高浓度盐胁迫条件下,植物根系活力增加是植物对逆境的适应过程中发生的反应,是一个极度耗能的过程,要消耗大量营养物质,因此,会导致植株根系生物量的下降。

盐胁迫对植物的伤害主要通过盐离子的直接作用(离子胁迫)和间接的脱水作用(渗透胁迫)(Munns 2002)。脯氨酸被认为是许多盐生植物在逆境条件下积累的重要渗透调节物质之一(Stewart和Lee 1974),而且脯氨酸含量的多少可作为植物抗渗透胁迫大小的指标。植物体内积累脯氨酸既是植物对环境的适应,又是细胞功能和结构受到损伤的表现,游离脯氨酸不仅可以协调外界与细胞的渗透压平衡,还可以保持细胞膜结构的完整性(Ashraf和Foolad 2007)。赵可夫和范海(2000)发现随NaCl处理浓度的升高,盐地碱蓬体内大部分有机渗透调节剂浓度下降,只有季胺化合物和脯氨酸随NaCl浓度升高而上升。在本实验中,用不同浓度的NaCl处理15 d后,盐地碱蓬根系中脯氨酸的含量均显著增加,且NaCl处理浓度越高,盐地碱蓬根系中的脯氨酸含量越显著($P < 0.05$)。表明在NaCl胁迫下,盐地碱蓬根系能主动积累渗透调节物质来降低细胞渗透势,增强细胞的保水能力,来适应盐渍环境下的低水势及保护细胞结构。

综上所述,随着NaCl处理浓度的升高,盐地碱蓬根系干重和鲜重、总长度、表面积、总体积及根尖数呈现先升高后下降的趋势,最大值出现在 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl处理组; $600 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl处理显著地降低了盐地碱蓬根系的鲜重和干重、根尖数、根系的总长度、表面积和总体积,却增加了盐地碱蓬根系活跃吸收面积及游离脯氨酸含量。这些结果表明盐地碱蓬对盐胁迫有较强的适应能力,一定浓度的NaCl处理可能通过促进总长度、表面积和总体积促进盐地碱蓬根系的生长以满足地上部分生长对水分和必需元素的需要。而更高浓度的NaCl处理抑制了盐地碱蓬根系生长,其原因可能是为完成正常的生命活动,抵抗高盐胁迫,盐生植物通过增加根系活跃吸收面积及根系有机渗透物质积累等来响应和适应盐胁迫,从而增加了营养物质的消耗而导致根系的生物量减少。

参考文献

Ashraf M, Foolad M (2007). Roles of glycine betaine and proline in

improving plant abiotic stress resistance. *Environ Exp Bot*, 59 (2): 206–216

Bates L, Waldren R, Teare I (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39 (1): 205–207

Bian AN, Lin M, Wang WQ (2015). Effects of salt treatment on growth and compartmental allocation of mineral elements in *Eriobotrya japonica* seedlings. *Plant Physiol J*, 51 (3): 273–279 (in Chinese with English abstract) [卞阿娜, 林鸣, 王文卿(2015). 根系与叶片盐处理对枇杷幼苗生长及体内矿质元素分布的影响. *植物生理学报*, 51 (3): 273–279]

Bramley H, Turner NC, Turner DW, Tyerman SD (2009). Roles of morphology, anatomy, and aquaporins in determining contrasting hydraulic behavior of roots. *Plant Physiol*, 150 (1): 348–364

Duan DY, Li WQ, Liu XJ, Yang HO, An P (2007). Seed germination and seedling growth of *Suaeda salsa* under salt stress. *Ann Bot Fennici*, 44 (3): 161–169

Feng ZT, Wang D, Yuan F, Chen M, Wang BS (2011). Preliminary study on the role of root border cells in salt tolerance of euhalophyte *Suaeda salsa* L. *Plant Physiol J*, 47 (10): 976–982 (in Chinese with English abstract) [冯中涛, 王殿, 袁芳, 陈敏, 王宝山(2011). 真盐生植物盐地碱蓬根系边缘细胞在耐盐中的作用初探. *植物生理学报*, 47 (10): 976–982]

Flowers TJ, Colmer TD (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytol*, 179 (4): 945–963

Galvan-Ampudia CS, Testerink C (2011). Salt stress signals shape the plant root. *Curr Opin Plant Biol*, 14 (3): 296–302

Giehl RFH, Gruber BD, von Wirén N (2014). It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals. *J Exp Bot*, 65 (3): 769–778

Gilbert AA, Fraser LH (2013). Effects of salinity and clipping on biomass and competition between a halophyte and a glycophyte. *Plant Ecol*, 214 (3): 433–442

Guo J, Suo S, Wang BS (2015). Sodium chloride improves seed vigour of the euhalophyte *Suaeda salsa*. *Seed Sci Res*, 25 (3): 335–344

Guo JR, Wang BS (2014). Effects of NaCl treatments on flower number, Na^+ and K^+ contents of *Suaeda salsa*. *Plant Physiol J*, 50 (6): 861–866 (in Chinese with English abstract) [郭建荣, 王宝山(2014). NaCl处理对盐地碱蓬开花及 Na^+ 、 K^+ 含量的影响. *植物生理学报*, 50 (6): 861–866]

Katschnig D, Broekman R, Rozema J (2013). Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss: growth, morphology and physiology. *Environ Exp Bot*, 92: 32–42

Kellermeier F, Armengaud P, Seditas TJ, Danku J, Salt DE, Amtmann A (2014). Analysis of the root system architecture of *Arabidopsis* provides a quantitative readout of crosstalk between nutritional signals. *Plant Cell*, 26 (4): 1480–1496

Li CZ, Liu XJ, Yang YM, Liu CY (2005). The effects of saline condition on the germination and seedling growth of *Suaeda salsa*. *Chin Agri Sci Bull*, 21 (5): 209–212 (in Chinese with English abstract) [李存桢, 刘小京, 杨艳敏, 刘春雨(2005). 盐胁迫对盐地碱蓬种子萌发及幼苗生长的影响. *中国农学通报*, 21 (5): 209–212]

Li Y, Chen ZL, Wang J, Xu SN, Hou W (2011). Effects of salt stress on *Suaeda heteroptera* Kitagawa growth and osmosis-regulating

- substance concentration. *Chin J Ecol*, 30 (1): 72–76 (in Chinese with English abstract) [李悦, 陈忠林, 王杰, 徐苏南, 侯伟 (2011). 盐胁迫对翅碱蓬生长和渗透调节物质浓度的影响. *生态学杂志*, 30 (1): 72–76]
- Lin Y, Fan H (2013). Effects of salt stress on root activity of *Limonium bicolor* (Bunge) Kuntze. *Agr Sci Technol*, 14 (6): 832–834 (in English with Chinese abstract) [林莺, 范海(2013). 盐胁迫对二色补血草根系活力的影响. *农业科学与技术(英文版)*, 14 (6): 832–834]
- Lu C, Qiu N, Lu Q, Wang B, Kuang T (2002). Does salt stress lead to increased susceptibility of photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda salsa* grown outdoors? *Plant Sci*, 163 (5): 1063–1068
- Lu C, Qiu N, Wang B, Zhang J (2003). Salinity treatment shows no effects on photosystem II photochemistry, but increases the resistance of photosystem II to heat stress in halophyte *Suaeda salsa*. *J Exp Bot*, 54 (383): 851–860
- Mori S, Kobayashi N, Arao T, Higuchi K, Maeda Y, Yoshida M, Tadano T (2008). Enhancement of nitrate reduction by Cl application in *Suaeda salsa* (L.) Pall. *Soil Sci Plant Nutr*, 54 (6): 903–909
- Mori S, Yoshida M, Tadano T (2006). Growth response of *Suaeda salsa* (L.) Pall to graded NaCl concentrations and the role of chlorine in growth stimulation. *Soil Sci Plant Nutr*, 52 (5): 610–617
- Munns R (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ*, 25 (2): 239–250
- Osmond CB, Popp M (1983). The balance of malate synthesis and metabolism in response to ion uptake in excised wheat roots. *Plant Sci Lett*, 32 (1–2): 115–123
- Percey WJ, McMinn A, Bose J, Breadmore MC, Guijt RM, Shabala S (2016). Salinity effects on chloroplast PSII performance in glycophytes and halophytes. *Funct Plant Biol*, 43 (11): 1003–1015
- Rossi L, Francini A, Minnocci A, Sebastiani L (2015). Salt stress modifies apoplastic barriers in olive (*Olea europaea* L.): a comparison between a salt-tolerant and a salt-sensitive cultivar. *Scia Hort*, 192: 38–46
- Sechenbater, Wu HY (2001). Effect of different stress on roots activity and nitrate reductase activity in *Zea mays* L. *Agr Res Arid Areas*, 19 (2): 67–70 (in Chinese with English abstract) [斯琴巴特尔, 吴红英(2001). 不同逆境对玉米幼苗根系活力及硝酸还原酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 19 (2): 67–70]
- Song J, Fan H, Jia YH, Du XH, Wang BS (2008). Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland. *Aquat Bot*, 88 (4): 331–337
- Srinivasarao CH, Benzioni A, Eshel A, Waisel Y (2004). Effects of salinity on root morphology and nutrient acquisition by faba beans (*Vicia faba* L.). *J Indian Soci Soil Sci*, 52 (2): 184–191
- Stewart GR, Lee TA (1974). The role of proline accumulation in halophytes. *Planta*, 120: 279–289
- Wang BS, Lttge U, Ratajczak R (2001). Effects of salt treatment and osmotic stress on V-ATPase and V-PPase in leaves of the halophyte *Suaeda salsa*. *J Exp Bot*, 52 (365): 2355–2365
- Wang DY, Wang HY, Han B, Wang B, Guo AP, Zheng D, Liu CJ, Chang LL, Peng M, Wang XC (2012). Sodium instead of potassium and chloride is an important macronutrient to improve leaf succulence and shoot development for halophyte *Sesuvium portulacastrum*. *Plant Physiol Bioch*, 51: 53–62
- Wang SF, Hu YX, Sun HJ, Shi X, Pan HW, Chen YK (2014). Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings. *Acta Ecol Sin*, 34 (4): 1021–1029 (in Chinese with English abstract) [王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 施翔, 潘红伟, 陈益泰(2014). 盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响. *生态学报*, 34 (4): 1021–1029]
- Yan LH, Chen M, Wang BS (2008). Osmotic and ionic effect on the seed germination of two phenotypes of *Suaeda salsa* L. under NaCl stress. *Acta Bot Boreali-Occidentalia Sin*, 28 (4): 718–723 (in Chinese with English abstract) [闫留华, 陈敏, 王宝山(2008). NaCl胁迫对2种表型盐地碱蓬种子萌发的渗透效应和离子效应研究. *西北植物学报*, 28 (4): 718–723]
- Yang MF, Yang C, Hou WL, Zhang QF, Wang BS (2002). Effects of NaCl and KCl stress on the roots and shoots of *Suaeda*. *J Shandong Normal Univ (Nat Sci)*, 17 (1): 68–72 (in Chinese with English abstract) [杨明峰, 杨超, 侯文莲, 张秋芳, 王宝山(2002). NaCl和KCl胁迫对碱蓬根和地上部分生长的效应. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 17 (1): 68–72]
- Yang Z, Wang BS (2015). Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China. *Shandong Agr Sci*, 47 (4): 125–130 (in Chinese with English abstract) [杨真, 王宝山(2015). 中国盐渍土资源现状及改良利用对策. *山东农业科学*, 47 (4): 125–130]
- Yi LP, Ma J, Li Y (2006). Effects of salt stress on the root characteristics and vitality of three desert halophytes. *Sci China Ser. D Earth Sci*, 36 (A02): 86–94 (in Chinese) [弋良朋, 马健, 李彦(2006). 盐胁迫对3种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响. *中国科学D辑*, 36 (A02): 86–94]
- Yi LP, Ma J, Li Y (2007). The comparisons of root system and root hair morphological characteristics among three desert halophytes. *Bull Bot Res*, 27 (2): 204–211 (in Chinese with English abstract) [弋良朋, 马健, 李彦(2007). 3种荒漠盐生植物根系及根毛形态特征的比较研究. *植物研究*, 27 (2): 204–211]
- Yi LP, Wang ZW (2011). Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes. *Acta Ecol Sin*, 31 (5): 1195–1202 (in Chinese with English abstract) [弋良朋, 王祖伟(2011). 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布. *生态学报*, 31 (5): 1195–1202]
- Yu X, Liang C, Chen J, Qi X, Liu Y, Li W (2015). The effects of salinity stress on morphological characteristics, mineral nutrient accumulation and essential oil yield and composition in *Mentha canadensis* L. *Sci Hort*, 197: 579–583
- Zhao KF, Fan H (2000). Comparative study on osmotic and their contributions to osmotic adjustment in eu-halophytes and recretohalophytes. *Chin J Appl Environ Biol*, 6 (2): 99–105 (in Chinese with English abstract) [赵可夫, 范海(2000). 盐胁迫下真盐生植物与泌盐植物的渗透调节物质及其贡献的比较研究. *应用与环境生物学报*, 6 (2): 99–105]
- Zhou JC, Fu TT, Sui N, Guo JR, Feng G, Fan JL, Song J (2016). The role of salinity in seed maturation of the euhalophyte *Suaeda salsa*. *Plant Biosyst*, 150 (1): 83–90
- Zhu JK (2001). Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci*, 6 (2): 66–71

Effects of NaCl treatment on root system characteristics and activity of the euhalophyte *Suaeda salsa*

GUO Jian-Rong*, ZHENG Cong-Cong*, LI Yan-Di, FAN Hai, WANG Bao-Shan**

Key Laboratory of Plant Stress Research, College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

Abstract: To investigate the role of salinity in root characteristics and activity of euhalophyte *Suaeda salsa*, root biomass, vitality and other physiological indicators were determined under the conditions of solution culture containing 0, 200, 400 and 600 mmol·L⁻¹ NaCl. The results showed that the dry and fresh weights, total length of root, surface area, total volume and root tip number of *S. salsa* increased as increasing of NaCl concentration, and the maximal values were at 200 mmol·L⁻¹ NaCl treatment compared with the control. However, 600 mmol·L⁻¹ NaCl treatment significantly reduced the root dry and fresh weights, and root tip number. The root active absorbing area and free proline content in the roots of *S. salsa* increased with the increasing of the NaCl concentration until to 600 mmol·L⁻¹ NaCl. These results suggest that high concentration of NaCl (in a range of 200 mmol·L⁻¹ NaCl) significantly enhanced the root growth of *S. salsa* possibly via increasing the total length, active absorbing area and the total volume of roots to adapt salt stress, while excess salt reduced the root growth of *S. salsa* possibly via decreasing these parameters.

Key words: *Suaeda salsa*; root growth; root vitality; NaCl; absorbing area

Received 2016-12-12 Accepted 2016-12-23

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31570251).

*Co-first author.

**Corresponding author (E-mail: bswang@sdunu.edu.cn).