西北林学院学报 2019,34(5):49-56
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.05.08

分根区盐胁迫下绒毛白蜡盐离子分配和渗透调节物质积累特征

段丽君,李国元,汪殿蓓

(湖北工程学院 生命科学技术学院,湖北 孝感 432000)

摘　要:局部盐胁迫条件下植物不同器官中离子的分配和渗透调节物质的积累对耐盐性有重要影响,为揭示根区盐分异质性分布条件下植物对盐离子的积累和分配特征,通过分根的方式控制不同根区盐分的浓度,对绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)幼苗根、茎和叶中的 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 Cl^- 的分配以及叶中可溶性糖和脯氨酸积累进行研究。结果表明,绒毛白蜡在局部盐胁迫时,盐胁迫根系中的 Na^+ 和 Cl^- 含量略高于无盐胁迫的根系;叶中的 Na^+ 和 Cl^- 含量显著低于均匀盐胁迫处理,但是显著高于对照;局部盐胁迫处理提高了盐胁迫根系中的 K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,提高了叶片 K^+/Na^+,而对叶中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的影响不明显。局部盐胁迫显著降低了叶中的脯氨酸的含量,而对可溶性糖的影响不明显。因此在局部盐胁迫条件下,绒毛白蜡能够显著降低叶片中 Na^+ 和 Cl^- 的积累,提高了叶片 K^+/Na^+,降低脯氨酸的积累,有助于缓解局部盐胁迫。

关键词:盐胁迫;分根;离子积累;渗透调节;绒毛白蜡

中图分类号:S792.99　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)05-0049-08

Distribution of Salt Ions and the Accumulation of Osmatic Adjustment Substances in Velvet Ash under Heterogeneous Salt Stress

DUAN Li-jun, LI Guo-yuan, WANG Dian-bei

(*Institute of Biological Technology and Sciences, Hubei Engineering University, Xiaogan* 432000, *Hubei, China*)

Abstract: The distribution of salt ions and the accumulation of osmotic substances in the woody plant under partial salt stress are key prosperities for plant salt resistance. To better understand these features, in this study, taking the seedlings of velvet ash (*Fraxinus velutina*) as materials, the distribution of salt ions (such as Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} and Cl^-) in the roots, stems and leaves, and the accumulation of soluble sugar and proline in the leaves were examined by root-splitting method from which the salt concentrations in different root-zones was regulated. The results showed that the contents of Na^+ and Cl^- in the partial salt stressed roots were slightly higher than those without salt stress, and the contents of Na^+ and Cl^- contents in the partial salt stressed leaves were significantly lower than those of the uniform salt stress, and significantly higher than those of the control. Partial salt stress increased the contents of K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} in the roots and the ratio of K^+/Na^+ in the leaves, and exhibited no significant differences for the contents of Ca^{2+} and Mg^{2+} contents in the leaves. Also, the partial salt stress significantly decreased the proline content in the leaves, while showed no significant impacts on soluble sugar. It was concluded that under partial salt stress, the accumulation of Na^+ and Cl^- in the leaves decreased, the ratio of K^+/Na^+ increased, and the accumulation of proline decreased to alleviate the salt stress.

Key words: salt stress; split root; ion accumulation; osmatic adjustment; velvet ash

收稿日期:2018-04-26　**修回日期**:2018-08-01
基金项目:湖北工程学院大学发展与改革研究中心项目(HGFGZX201801);湖北工程学院小城镇科研项目(2016k001)。
作者简介:段丽君,女,硕士,副教授,研究方向:园林植物研究和园林设计。E-mail:46362782@qq.com

盐胁迫是盐渍土中植物生长最主要的限制因子。盐胁迫对植物的伤害主要有离子毒害和渗透胁迫[1]。植物吸收和积累 Na^+ 会破坏细胞膜的结构，影响离子的跨膜运输，引起离子失衡，导致细胞功能紊乱。Na^+ 和 Cl^- 在植物体内过量积累对植物的生长有限制作用，而 K^+ 可以缓解盐胁迫[2]。盐胁迫下植物体内盐离子的积累和分配对耐盐性有重要的影响[3-4]。

由于受到微地形、植被、土壤质地和结构以及覆盖、灌溉等措施等环境因子影响[5]，盐渍土中盐分的空间分布并不是均匀的，具有空间异质性[5]。在盐分非均匀分布的土壤中，植物可以通过调整根系的分配格局，避开含盐量较高的土壤[6]，提高植物对盐生环境的耐受能力[7]，在根区盐分差异性分布条件下，植物通过降低离子在关键器官的分配以适应局部盐胁迫[8-9]。根区盐分差异分布条件下，只要部分根系在盐分较低的区域，即使另一部分在盐分较高的区域中，叶的 Na^+ 和 Cl^- 含量仍然保持在适中的水平[10]。棉花(*Gossypium hirsutum*)的根系在高盐侧吸收大量 Na^+，转运到低盐区的根系积累，促进低盐区根系的水分吸收；在器官水平上，根区盐分差异分布诱导盐离子在地下部的积累 Na^+ 增多，而地上部 Na^+ 显著减少[11-12]。

乔木树种具有发达的根系，因此易受到土壤盐分异质性的影响，但是尚未有对局部盐胁迫条件下乔木树种盐离子的分配策略和渗透调节物质积累展开研究。绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)具有较强的耐盐能力，是滨海盐碱地造林使用量最大的乔木树种[13]。本研究通过分根试验对局部盐胁迫条件下绒毛白蜡幼苗离子分配和叶片中渗透调节物质进行分析，以阐明绒毛白蜡在局部盐胁迫条件下的离子分配策略和渗透调节作用，为理解盐分非均匀胁迫条件下的植物生理调节机制提供参考。

1 材料与方法

采用塑料管(直径 25 cm，长度 35 cm)和塑料板(厚度 4 mm)，按照图 1 的结构制作分根培养桶[10]。分根培养桶每一侧填装 10 kg 直径约 1 mm 的水洗沙。绒毛白蜡幼苗为春季播种的实生苗，在 6 月初，平均株高 10 cm，将幼苗移栽在小管中(直径 7 cm，长度 8 cm)，待幼苗生长 10 d 后，选择生长一致的幼苗，将栽有幼苗的小管放在分根桶隔板中间，小管中白蜡的根系与分根培养桶的两侧有相等的接触面积。

为了使预处理的幼苗根系在分根桶两侧均匀生长，先浇灌 1/2 浓度的 Hoagland 营养液。10 d 后进行盐处理，以 1/2 浓度的 Hoagland 营养液为基础配制不同浓度的 NaCl 溶液，进行灌溉。试验共设置 4 个处理，对照、均匀盐胁迫、局部低盐胁迫和局部高盐胁，不同处理浇灌的 NaCl 浓度见表 1，每个处理重复 5 次。每 5 d 灌溉 1 次，每次浇灌营养液 600 mL，含有盐分的营养液从渗透孔浸出，对沙子淋洗 1 次，避免盐分在桶内的积累[10]。试验在湖北工程学院生命科学技术学院试验基地的温室中进行，温度 20～32℃，空气相对湿度 60%～80%。

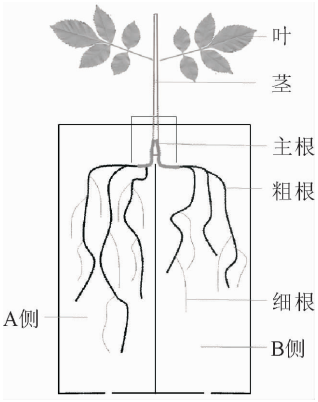


图 1 分根培养桶和绒毛白蜡幼苗的不同器官结构示意

Fig. 1 Structure of the sands cultured split root pot and different parts of velvet ash seedlings

表 1 不同处理分根培养桶两侧浇灌的营养液 NaCl 浓度

Table 1 NaCl concentration of the nutrition irrigated into the split root pot (mmol·L^{-1})

根区	对照	均匀盐胁迫	局部低盐胁迫	局部高盐胁迫
A 侧	0	100	0	0
B 侧	0	100	100	200

9 月初，收取地上部茎、叶。用自来水冲洗地下部分，获得完整的根系；地下部分为主根(在小桶中生长的主根部分，不属于分根桶任何一侧)、A 侧根系(粗根和细根)、B 侧根系(粗根和细根)，不同部分的分配见图 1，根系按照直径分为粗根和细根，直径＞1 mm 的为粗根，直径＜1 mm 的为细根。各部分烘干、研磨，用 1 mol·L^{-1} 的 HCl 溶液浸提，用原子吸收分光光度仪测定白蜡叶中 Na^+、K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量；采用 $AgNO_3$ 滴定法测定 Cl^- 含量，用蒽酮法测定可溶性糖的含量，用茚三酮比色法测定脯氨酸的含量。数据采用 SPSS16.0 进行显著性分析，用 SigmaPlot11.0 绘图。

2 结果与分析

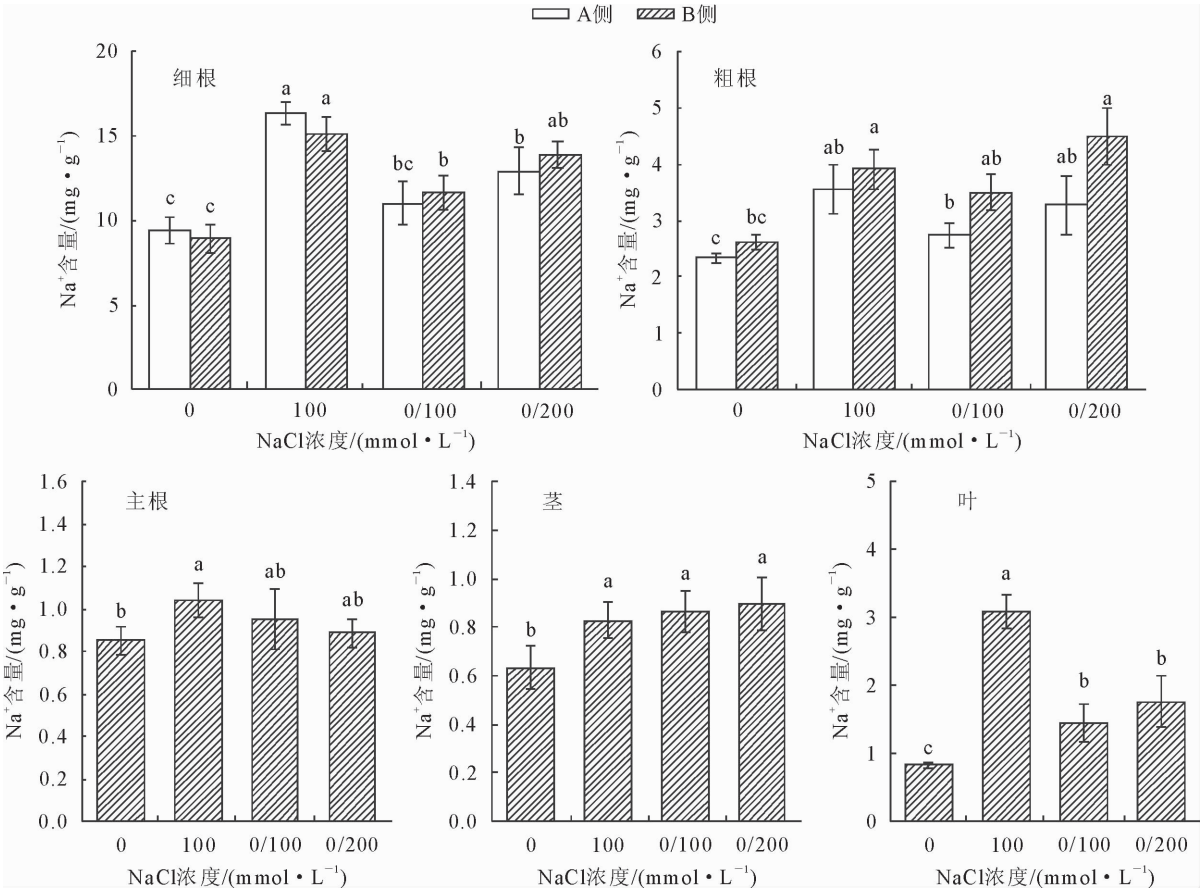
2.1 Na^+ 的分配

不同处理绒毛白蜡植物的 Na^+ 含量见图 2。在

不同器官的平均 Na^+ 含量中,细根最高,粗根和叶中的含量次之,主根和茎最低。不同处理细根的 Na^+ 含量中,均匀盐胁迫处理最高,对照最低,2 个局部盐胁迫的处理介于均匀盐胁迫和对照之间。在同一处理两侧的细根根之间,虽然盐胁迫细根的 Na^+ 含量高于无胁迫的细根,但是 4 个处理两侧的细根之间均无显著差异;粗根中的 Na^+ 含量以局部高盐胁迫最高,盐胁迫的粗根均高于无盐胁迫的粗根,与细根相同,4 个处理的两侧粗根之间并无显著差异;主根 Na^+ 含量以均匀盐胁迫处理最高,显著>对照,但是盐胁迫的 3 个处理之间无显著差异;茎的 Na^+ 含量中,盐胁迫的 3 个处理显著>对照,而均匀盐胁迫和局部盐胁迫处理之间均无显著差异;叶的 Na^+ 含量以均匀盐胁迫处理最高,显著>其他处理,对照最低,显著<其他处理,局部低盐胁迫和局部高盐处理处于对照和均匀盐胁迫之间,但是两者之间无显著差异。这表明局部盐胁迫较均匀盐胁迫可以显著降低叶的 Na^+ 积累,且局部盐胁迫的盐分浓度对叶的 Na^+ 积累影响不明显。

2.2　Cl^- 的分配

绒毛白蜡幼苗不同器官中的 Cl^- 含量见图 3。细根的 Cl^- 含量中,均匀盐胁迫处理最高,对照最低,2 个局部盐胁迫处理的细根 Cl^- 含量介于均匀盐胁迫和对照之间,盐胁迫细根的 Cl^- 含量显著高于无盐胁迫的细根,而对照和均匀盐胁迫处理的两侧细根之间无显著差异。不同处理的主根和茎的 Cl^- 含量之间均无显著差异。叶的 Cl^- 含量以均匀盐胁迫最高,显著高于局部盐胁迫和对照,对照最低,显著低于局部盐胁迫的处理,局部低盐胁迫低于局部高盐处理,但是两者之间无显著差异。



注:不同字母表示处理之间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

图 2　不同处理绒毛白蜡幼苗各器官中 Na^+ 含量

Fig. 2　The Na^+ content in different organs of velvet ash seedlings for different salinity treatments

2.3　K^+ 的分配

绒毛白蜡幼苗各器官的 K^+ 含量见图 4。不同器官中,叶的 K^+ 含量最高,随后依次为细根、茎、粗根、主根。相对 Na^+ 而言,植株中的 K^+ 含量变化范围较小。细根的 K^+ 含量以对照最高,显著高于均匀盐胁迫;局部盐胁迫处理中,盐胁迫细根的 K^+ 含量均高于无胁迫的细根,高盐胁迫处理中盐胁迫细根显著高于无盐胁迫的细根。不同处理的主根和粗根的 K^+ 含量基本持平,且各处理之间无显著差异。茎的 K^+ 含量以低盐胁迫处理最高,显著高于其他处理,而对照最低,显著低于其他处理。叶的 K^+ 含量以局部低盐胁迫最高,显著高于局部高盐胁迫和均匀盐胁迫 2 个处理。

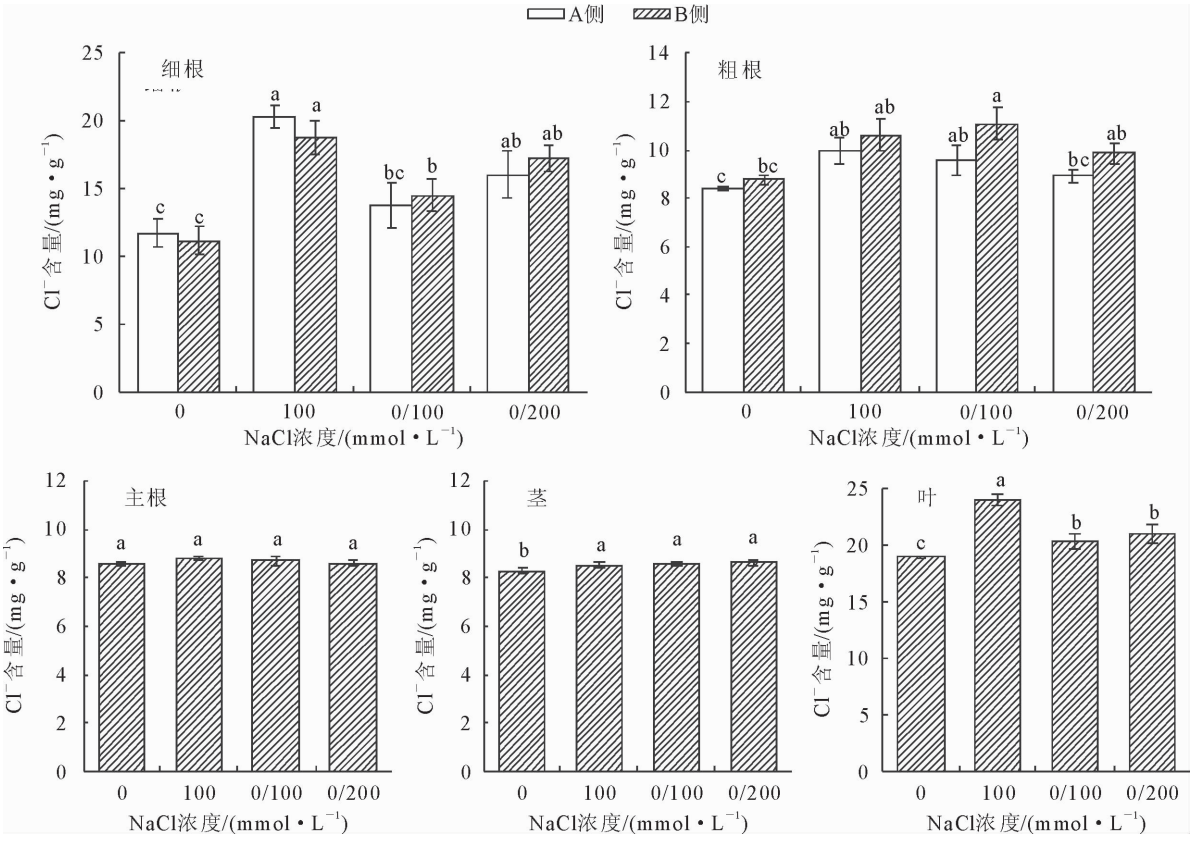


图 3 不同处理白蜡幼苗各器官中 Cl^- 含量

Fig. 3 The Cl^- content in different organs of velvet ash seedlings for different salinity treatments

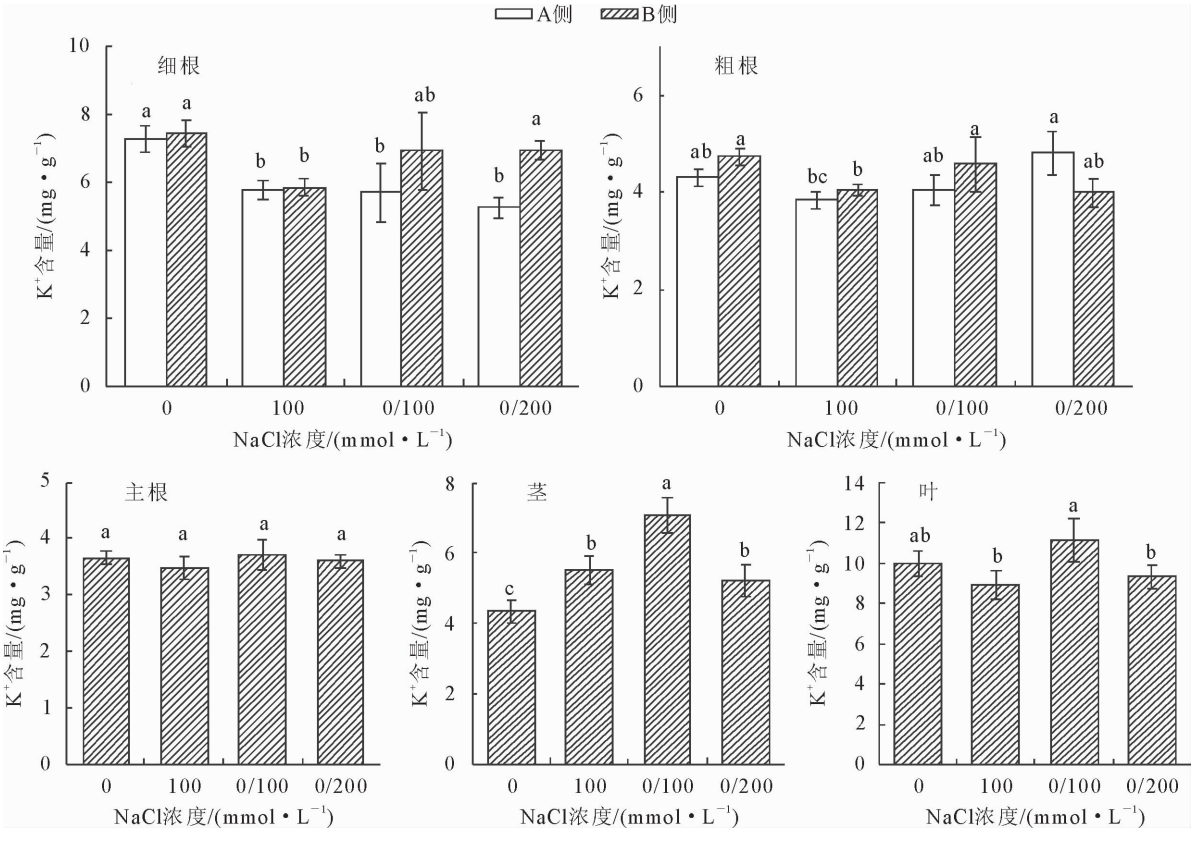


图 4 不同处理白蜡幼苗各器官中 K^+ 含量

Fig. 4 The K^+ content in different organs of velvet ash seedlings for different salinity treatments

2.4　不同器官的 K^+/Na^+

绒毛白蜡幼苗不同器官的 K^+/Na^+ 见图 5。不同的器官中,叶的 K^+/Na^+ 最高,细根最低。细根中的 K^+/Na^+ 以对照最高,显著>均匀盐胁迫。局部盐胁迫处理中盐胁迫细根的 K^+/Na^+ 均高于无胁迫的细根,其中,高盐胁迫处理两侧细根差异显著。对于不同处理的粗根 K^+/Na^+,对照最高,均匀盐胁迫最低。局部盐胁迫处理的无盐胁迫粗根高于盐胁迫的粗根,其中,局部高盐胁迫处理的盐胁迫粗根 K^+/Na^+ 显著低于无胁迫的粗根。均匀盐胁迫处理的主根 K^+/Na^+ 显著低于其他处理;茎中 K^+/Na^+ 以低盐胁迫处理最高显著高于其他处理,而局部高盐胁迫处理最低,显著低于其他处理;对于叶的 K^+/Na^+,对照最高,均匀盐胁迫最低,局部盐胁迫的 2 个处理介于两者中间。

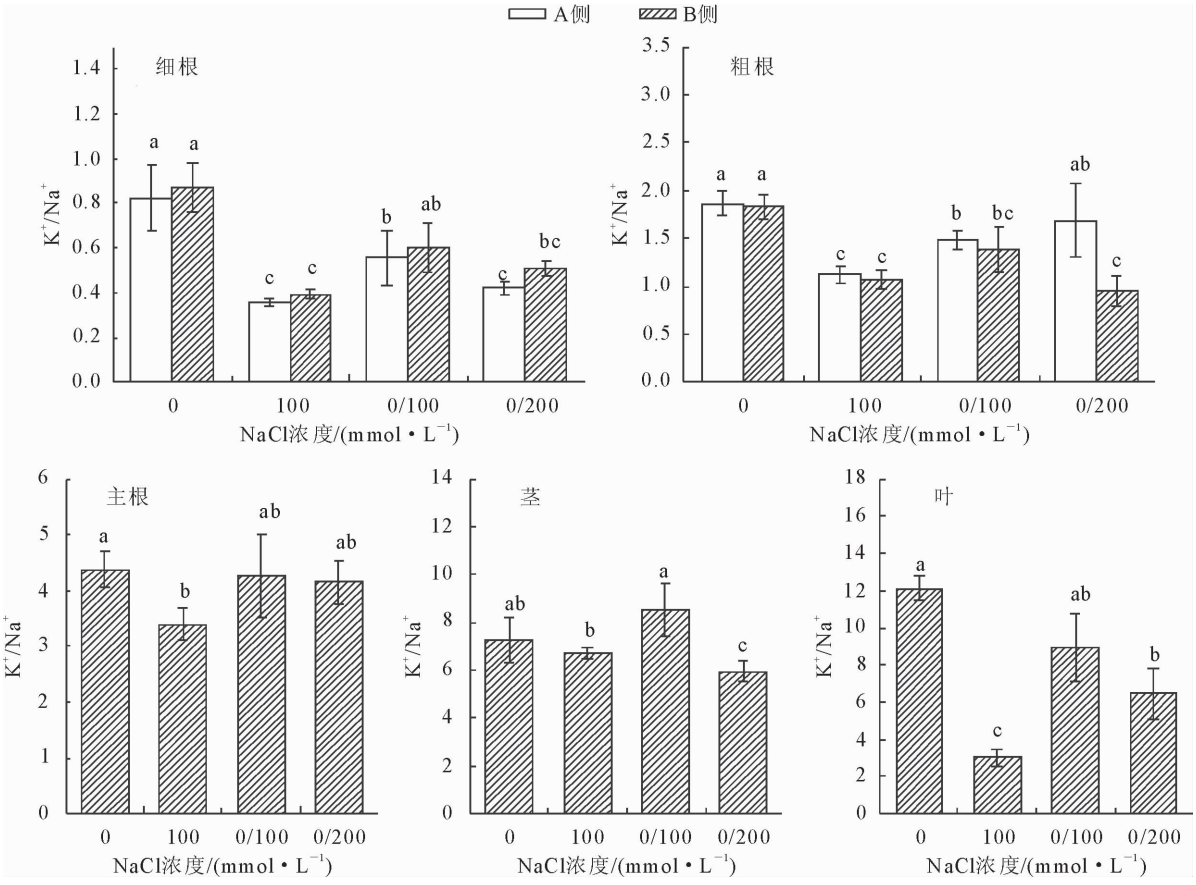


图 5　不同处理白蜡幼苗不同器官中的 K^+/Na^+

Fig. 5　The K^+/Na^+ in different organs of velvet ash seedlings for different salinity treatments

2.5　Ca^{2+} 的分配

不同处理绒毛白蜡幼苗植株的 Ca^{2+} 含量见图 6。叶的 Ca^{2+} 含量最高,其次为细根,粗根、主根和茎中的 Ca^{2+} 含量较低,且三者之间差异不明显。细根 Ca^{2+} 含量中,对照最高,均匀盐胁迫处理最低,2 个处理两侧根系无显著差异,而局部盐胁迫的处理,盐胁迫的细根 Ca^{2+} 含量高于无盐胁迫的细根;叶的 Ca^{2+} 含量中,均匀盐胁迫处理最高,对照最低,但是不同处理之间无显著差异,表明局部盐胁迫对绒毛白蜡叶中的 Ca^{2+} 影响不明显。

2.6　Mg^{2+} 的分配

Mg^{2+} 的含量见图 7。不同器官中,细根最高,其次为叶,粗根、主根和茎中量均较低,三者持平。盐胁迫细根和粗根中的 Mg^{2+} 含量之间无显著差异,但是盐胁迫细根中的 Mg^{2+} 含量略高于无盐胁迫的细根。对于主根的 Mg^{2+} 含量而言,不同处理之间无显著差异;同样,不同处理的茎 Mg^{2+} 含量也无显著差异。叶的 Mg^{2+} 含量以均匀盐胁迫最高,局部低盐最低,但是各处理之间均无显著差异。

2.7　叶片渗透调节物质的含量

绒毛白蜡幼苗叶中的可溶性糖和脯氨酸含量见图 8。对于叶片的可溶性糖含量,局部高盐胁迫最高,而均匀盐胁迫的处理最低,但是 4 个处理之间无显著差异。对照和均匀盐胁迫处理的脯氨酸含量较高,显著高于 2 个局部盐胁迫的处理,而均匀盐胁迫和对照之间无差异,2 个局部盐胁迫的处理之间无显著差异。证明局部盐胁迫可以降低叶片中脯氨酸的积累。

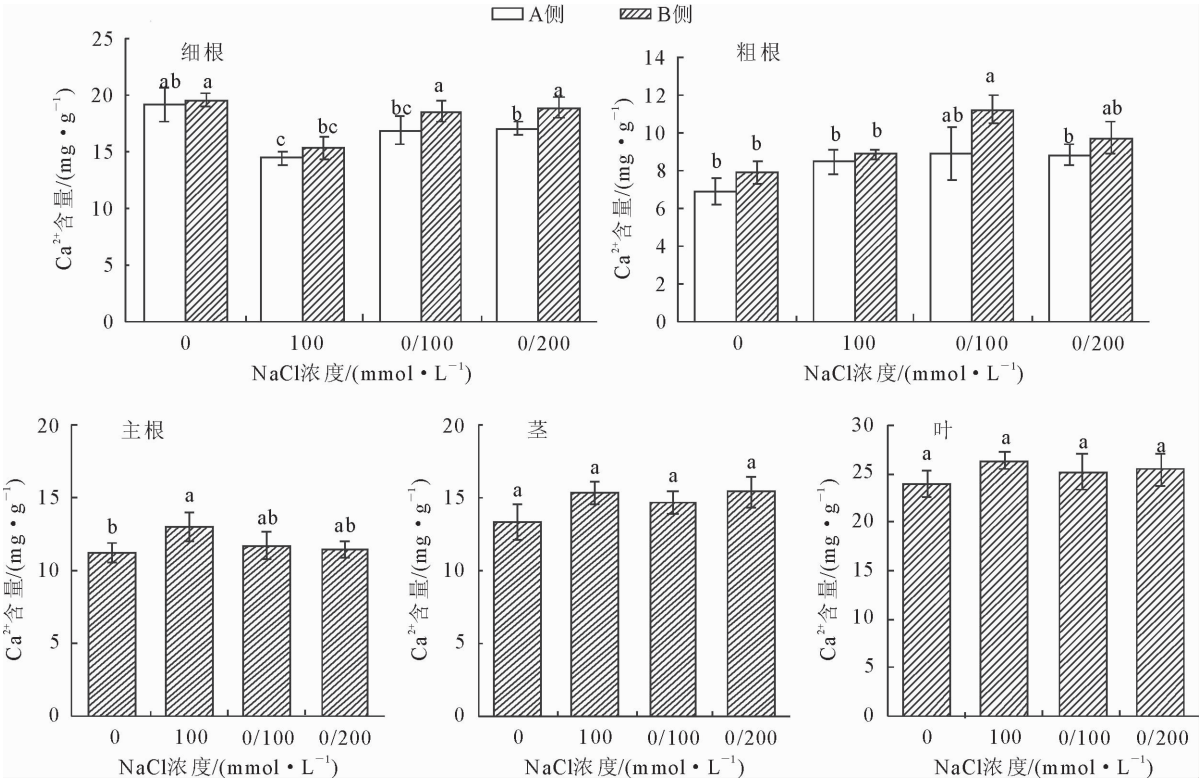


图 6 不同处理白蜡幼苗不同器官中 Ca^{2+} 含量

Fig. 6 The Ca^{2+} content in different organs of velvet ash seedlings for different salinity treatments

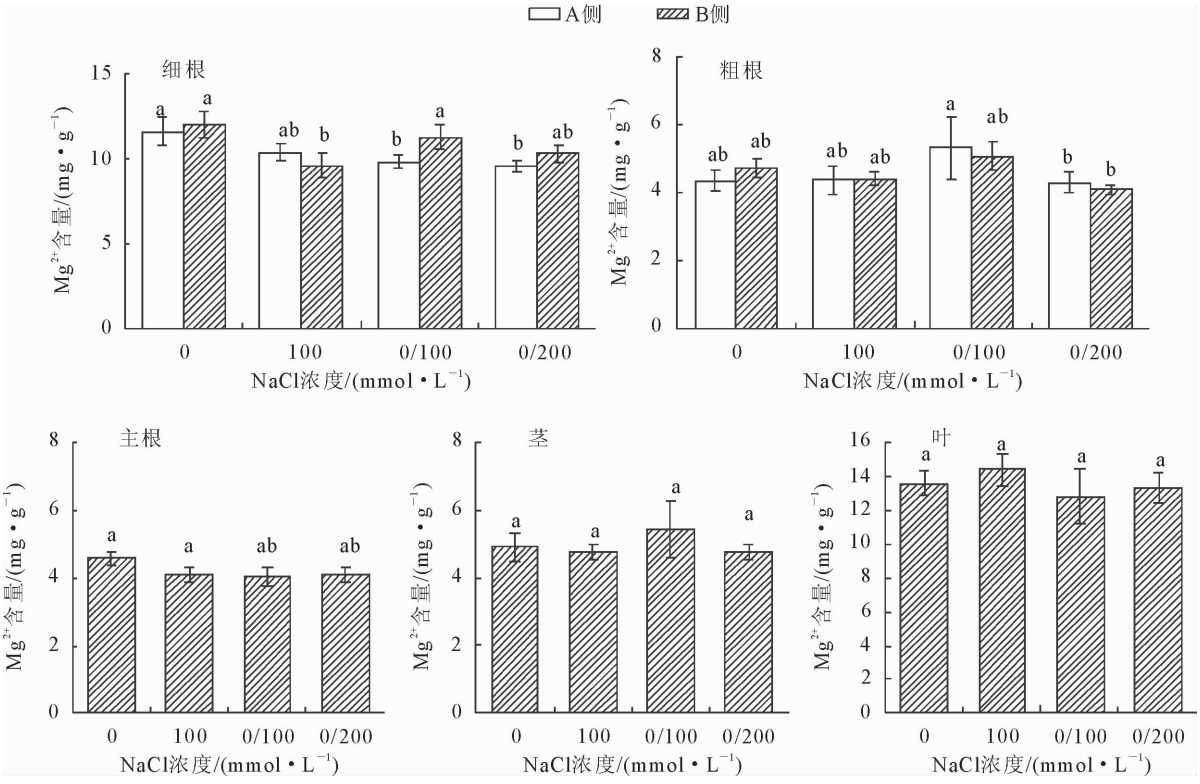


图 7 不同处理白蜡幼苗各器官中 Mg^{2+} 含量

Fig. 7 The Mg^{2+} content in different organs ofvelvet ash seedlings for different salinity treatments

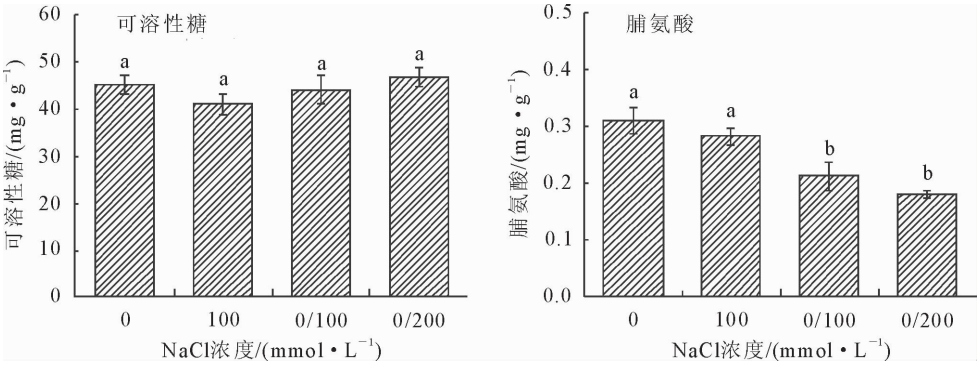


图 8　不同处理绒毛白蜡幼苗叶片中的可溶性糖和脯氨酸含量

Fig. 8　The leaf soluble sugar and proline content of velvet ash seedlings for different salinity treatments

2.8　叶片中盐离子和渗透调节物质的相关性

绒毛白蜡幼苗叶中的盐离子、可溶性糖和脯氨酸的相关性如表 2。Na^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}三者之间呈正相关,表明盐胁迫条件下,随着叶片中 Na^+的增加会伴随着 Ca^{2+}和 Mg^{2+}增加;Na^+与 K^+呈负相关,但是不显著。Ca^{2+}和 Mg^{2+}的含量之间显著正相关。Na^+与 Cl^-之间显著正相关 Cl^-。可溶性糖的含量与 Na^+含量呈显著负相关。脯氨酸含量与 K^+和 Mg^{2+}的含量显著正相关,而与可溶性糖的含量显著负相关。

表 2　绒毛白蜡幼苗叶中离子含量与渗透调节物质之间的关系

Table 2　Relationship between the leaf ions, soluble sugar and proline contents

物质类型	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	可溶性糖
K^+	−0.378					
Ca^{2+}	0.565**	0.119				
Mg^{2+}	0.350	0.234	0.845**			
Cl^-	0.589**	−0.212	0.113	0.133		
可溶性糖	−0.266	−0.355	−0.339	−0.453*	0.031	
脯氨酸	0.049	0.575**	0.320	0.482*	−0.135	−0.643**

注:* 表示相关性显著,$P<0.05$,** 表示相关性极显著,$P<0.01$,$n=20$。

3　结论与讨论

3.1　结论

分根区盐胁迫能够降低 Na^+和 Cl^-在叶片中的积累,提高叶片 K^+/Na^+, Na^+从盐胁迫根系向和无胁迫的根系转运,盐胁迫根系中的 K^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}增加,降低了叶片中脯氨酸的积累,这有助于缓解局部盐胁迫对绒毛白蜡的抑制作用。

3.2　讨论

离子毒害是盐胁迫对植物造成的伤害之一。Na^+过多积累不仅影响了叶细胞的水分平衡,也破坏了叶片细胞膜的离子平衡,不利于植物生长。研究表明,盐胁迫下绒毛白蜡各个器官中的离子积累有较大差异,其中,根系的 Na^+含量最高,叶次之,茎最低[14]。本研究中也有相同的结果,细根中的 Na^+含量最高,其次为叶,粗根、主根和茎中的 Na^+含量基本持平。细根是直接吸收水分和养分的器官,受到环境中的盐分含量影响较大,而粗根、主根和茎是盐离子向上运输的通道,故 Na^+含量最低,而叶片是离子运输的最终库,因此叶中的 Na^+含量最高。这与胡杨在盐胁迫下的离子分配特征相似[15]。

局部盐胁迫条件下绒毛白蜡叶的 Na^+含量显著<均匀盐胁迫,又显著>对照,且叶的 Na^+积累并非取决于局部盐分的浓度,表明局部根区的淡化环境可以减少叶中 Na^+的积累,缓解盐胁迫。根系的分布决定了其养分吸收能力[16],在盐胁迫区域细根的生物量较少,而在非盐胁迫区细根的生物量较大,占多数的非盐胁迫的细根的吸收了植株所需的水分和养分,降低了盐胁迫的根系对 Na^+的吸收和在叶片中的积累。绒毛白蜡根系在无盐胁迫一侧吸收水分和养分增加,而盐胁迫区域的水分和养分吸收较少,Na^+的吸收和运输也较低,这样也降低了 Na^+叶中积累,降低了盐胁迫的程度。苜蓿(*Medicago sativa*)、大洋洲滨藜(*Atriplexnummularia*)、枸杞(*Lyciumchinense*)等植物在局部盐胁迫条件下均表现出 Na^+在叶中积累显著低于全部盐胁迫。

局部盐胁迫条件下,绒毛白蜡细根中 Na^+含量在盐胁迫一侧和非盐胁迫的一侧基本持平,表明 Na^+在不同区域细根之间存在转运作用,非盐胁迫

区的根系中积累了与盐胁迫区细根中的 Na^+ 含量无显著差异，这样可以保持非盐胁迫区域较低的水势，促进根系在低盐区域中的水分吸收，这与棉花的研究结果相似[17]。同样，局部盐胁迫的小麦(*Triticumaestivum*)盐胁迫根系吸收的 Na^+ 向非盐胁迫的根系运输，盐胁迫根系的 Na^+ 含量比全部胁迫处理(150 mmol·L^{-1})减少 12.1%[18]。

Cl^- 在不同处理绒毛白蜡植株中的积累特征与 Na^+ 相似，Cl^- 在细根和叶片中的含量最高，而茎、主根和粗根中的 Cl^- 含量较低。在叶片中的积累对植物的危害较重[19]。同样局部盐胁迫的处理叶片中的 Cl^- 含量显著低于均匀盐胁迫处理，而显著高于对照，表明局部盐胁迫降低 Cl^- 在叶片中的积累也受到根区盐分的影响。

K^+ 在盐胁迫条件下能够缓解盐胁迫程度，但是高浓度的 Na^+ 影响植物对 K^+ 的吸收[8]。K^+ 和 Na^+ 有非常相近的水合半径，细胞膜上的 K^+ 转运载体无法把 Na^+ 和 K^+ 区分出来，过多的 Na^+ 进入细胞内部会竞争性的抑制 K^+ 的吸收[20]，导致植物组织中的 K^+ 含量降低。因此在本研究中，局部盐胁迫处理细根中的 Na^+ 增加，K^+ 降低，进而 K^+/Na^+ 较均匀盐胁迫的处理增加。均匀盐胁迫和局部高盐胁迫 2 个处理的叶片 K^+ 含量较低，Na^+ 含量较高导致 K^+ 含量较低。本研究中，相对于均匀盐胁迫，局部盐胁迫提高了叶片的 K^+/Na^+，一方面是由于局部盐胁迫降低了叶片 Na^+ 的含量，另一方面是由于叶片 K^+ 的含量提高所导致。与全部根系盐胁迫相比，局部盐胁迫能够显著降低 Na^+ 在叶中的积累，提高了 K^+ 的积累[18]。

Ca^{2+} 对生物膜的完整性和选择性具有重要作用[3]，盐胁迫下添加 Ca^{2+} 可以缓解盐胁迫[21]。不同处理的绒毛白蜡幼苗叶的 Ca^{2+} 含量差异较小，表明局部盐胁迫对绒毛白蜡叶片中生物膜的影响也较小。局部盐胁迫处理中受胁迫的根系 Ca^{2+} 含量较高，表明在盐胁迫下，绒毛白蜡的根系增加 Ca^{2+} 的积累，有利于对 Na^+ 的选择性吸收。Mg^{2+} 作为叶绿素分子的重要组成部分，在植物的叶片中 Mg^{2+} 含量最高[22]，不同处理绒毛白蜡的叶片中的 Mg^{2+} 含量变化不明显，局部盐胁迫对 Mg^{2+} 的积累影响较小。

渗透调节是植物适应盐胁迫的重要生理过程。研究表明，耐盐白蜡品种在盐胁迫下的可溶性糖积累显著高于普通白蜡[23]。而本研究中，局部盐胁迫对绒毛白蜡叶片中可溶性糖影响不明显，表明可溶性糖对局部盐胁迫处理的响应不明显。局部盐胁迫影响绒毛白蜡叶片中的脯氨酸积累，可能是由于局部盐胁迫条件下叶片生成脯氨酸较少，但是深层次的原因需要进一步深入研究。

参考文献：

[1] 陈敏，彭建云，王宝山. 整株水平上 Na^+ 转运体与植物的抗盐性[J]. 植物学通报，2008，24(4)：381-391.

[2] 刘炳响，王志刚，梁海永，等. 盐胁迫对不同生境白榆生理特性与耐盐性的影响[J]. 应用生态学报，2012，23(6)：1481-1489.

[3] 陈少良，李金克，尹伟伦，等. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化[J]. 北京林业大学学报，2002，24(5)：88-92.
CHEN S L，LI J K，YIN W L，*et al*. Tissue and cellular K^+，Ca^{2+} and Mg^{2+} of poplar under saline salt stress conditions[J]. Journal of Bejing Forestry University，2002，24(5)：88-92. (in Chinese)

[4] 田菊，朱嘉磊，王永福，等. NaCl 胁迫下小胡系杨树的离子吸收规律与分配特征研究[J]. 西北林学院学报，2016，31(6)：65-70.
TIAN J，ZHU J L，WANG Y F，*et al*. Regularities of the ion uptake and allocation characteristics for *Populus simonii* × *P. euphratica* varieties under NaCl stress[J]. Journal of Northwest Forestry University，2016，31(6)：65-70. (in Chinese)

[5] BAZIHIZINA N，BARRETT-LENNARD E G，COLMER T D. Plant growth and physiology under heterogeneous salinity [J]. Plant and Soil，2012，354(1/2)：1-19.

[6] BAZIHIZINA N，BARRETT-LENNARD E G，COLMER T D. Plant responses to heterogeneous salinity：growth of the halophyte *Atriplex nummularia* is determined by the root-weighted mean salinity of the root zone[J]. Journal of Experimental Botany，2012，63(18)：6347-6358.

[7] BAZIHIZINA N，COLMER T D，BARRETT-LENNARD E G. Response to non-uniform salinity in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia*：growth，photosynthesis，water relations and tissue ion concentrations[J]. Annals of Botany，2009，104(4)：737-745.

[8] 孙娟娟，于林清，赵金梅，等. 盐分不均匀分布对紫花苜蓿生长和离子特征的影响[J]. 中国农业科学，2017，50(22)：4299-4306.
SUN J J，YU L Q，ZHAO J M，*et al*. Effects of heterogeneous root zone salinity on plant growth and ion characteristic in alfalfa[J]. Scientia Agricultura Sinica，2017，50(22)：4299-4306. (in Chinese)

[9] 孙娟娟，张英俊. 植物对盐分空间不均匀分布的形态和生理响应研究进展[J]. 生态学报，2017，37(23)：7791-7798.
SUN J J，ZHANG Y J. A review of plant morphology and physiological response to spatially heterogeneous salinity[J]. Acta Ecologica Sinica，2017，37(23)：7791-7798. (in Chinese)

[10] FENG X，AN P，GUO K，*et al*. Growth，root compensation and ion distribution in *Lycium chinense* under heterogeneous salinity stress[J]. Scientia Horticulturae，2017，226(Supp. C)：24-32.

[11] KONG X，LUO Z，DONG H，*et al*. Effects of non-uniform root zone salinity on water use，Na^+ recirculation，and Na^+ and H^+ flux in cotton[J]. Journal of Experimental Botany，2012，63(5)：2105-2116.

(下转第 121 页)

报,1999,12(2):82-84.

[16] 李川江,冉鸣.土壤汞污染与土壤汞污染防治[J].重庆三峡学院学报,2009,25(117):67-69.

[17] 满稳宁.我国部分地区土壤的铬背景值及其富集的规律性[J].环境科学丛刊,1987,8(8):27-31.

[18] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J].环境科学,1991,12(4):12-19.

[19] 郭世财,杨文权.重金属污染土壤的植物修复技术研究进展[J].西北林学院学报,2015,30(6):81-87.
GUO S C,YANG W Q. Research progress of phytoremediation technology to remediate heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):81-87. (in Chinese)

[20] 张茂林,傅大放.江苏省高速公路路域土壤铅污染现状与评价[J].现代交通技术,2007,4(6):79-80,91.

[21] 杨燕娜,温小乐.土壤汞污染及其治理措施的研究综述[J].能源与环境,2006(3):9-11.

[22] 纪冬丽,孟凡生,薛浩,等.国内外土壤砷污染及其修复技术现状与展望[J].环境工程技术学报, 2016(1):90-99.
JI D L,MENG F S,XUE H,*et al*. Situation and prospect of soil arsenic pollution and its remediation techniques at home and abroad[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2016,6(1):90-99. (in Chinese)

[23] 魏复盛,杨国治,蒋德珍,等.中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J].中国环境监测,1991,7(1):1-6.

[24] 朱月珍.中国土壤中元素的地域背景值[J].中国环境监测,1992,8(3):21-22.

[25] 冉烈,李会合.土壤镉污染现状及危害研究进展[J].重庆文理学院学报:自然科学版,2011,30(4):69-73.

[26] 林爱军,王凤花,谢文娟,等.土壤铜污染对植物的毒性研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(35):21740-21742,21847.

[27] 杨苗苗,李孟楼.花椒栽培与管理[J].农业网络信息,2006(3):105-107.

[28] 王海涛,王庆九,崔志强,等.南通城郊土壤重金属背景值和元素间相关性分析[J].安徽农业科学,2011,39(23):14062-14064.

[29] 杜俊平,廖超英,田联会,等.太白山自然保护区土壤重金属含量及其分布特征研究.西北林学院学报,2007,22(3):84-87.
DU J P,LIAO C Y,TIAN L H,*et al*. Distribution and contents of heavy metals in soils of taibaishan nature reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(3):84-87. (in Chinese)

[30] 龚子同,陈鸿昭,王鹤林.中国土壤系统分类高级单元的分布规律[J].地理科学,1996,16(4):289-297.

[31] 辛蕊,张思冲,周晓聪,等.大庆城区土壤重金属污染及相关性分析[J].中国农学通报,2008,24(9):416-420.

(上接第 56 页)

[12] DONG H,KONG X,LUO Z,*et al*. Unequal salt distribution in the root zone increases growth and yield of cotton[J]. European Journal of Agronomy,2010,33(4):285-292.

[13] 董玉峰,王月海,韩友吉,等.黄河三角洲地区耐盐植物引种现状分析及评价[J].西北林学院学报,2017,32(4):117-119.
DONG Y F,WANG Y H,HAN Y J,*et al*. Present situation analysis and evaluation of salt tolerant plant introduction in the Yellow River Delta area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):117-119. (in Chinese)

[14] 王友平,刘德玺,孙明高,等.绒毛白蜡营养器官中 Na^+、K^+、Cl^- 的分布[J].石河子大学学报:自然科学版,2009,27(1):27-29.

[15] 王新英,史军辉,刘茂秀.NaCl 胁迫对胡杨和新疆杨幼苗体内 K^+、Na^+ 和 Cl^- 分布的影响[J].中国沙漠,2013,33(1):126-132.

[16] ALVAREZ-FLORES R,WINKEL T,NGUYEN-THI-TRUC A,*et al*. Root foraging capacity depends on root system architecture and ontogeny in seedlings of three *Andean Chenopodium* species[J]. Plant and Soil,2014,380(1/2):415-428.

[17] KONG X,LUO Z,DONG H,*et al*. Effects of non-uniform root zone salinity on water use,Na^+ recirculation,and Na^+ and H^+ flux in cotton[J]. Journal of Experimental Botany,2012,63(5):2105-2116.

[18] 杨婷,谢志霞,喻琼,等.局部根系盐胁迫对冬小麦生长和光合特征的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1074-1078.

[19] 江雪飞,乔飞,邹志荣.咸水灌溉对砂培甜瓜各器官生长和盐离子分布的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(8):114-120.
JIANG X F,QIAO F,ZOU Z R. Effects of brackish water irrigation on growth and distribution of salty ions in different organs of melon under sand culture[J]. Jour nal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed. , 2007, 35 (8): 114-120. (in Chinese)

[20] 董轲,许亚萍,崔冰,等.盐胁迫下不同钾素水平对海滨锦葵生长和光合作用的影响[J].植物生理学报,2015,51(10):1649-1657.
DONG K,XU Y P,CUI B,*et al*. Effects of different potassium levels on the growth and photosynthesis of *Kostelezkya virginica* under salt stress[J]. Plant Physiology Journal,2015,51(10):1649-1657. (in Chinese)

[21] 张振兴,孙锦,郭世荣,等.钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响[J].园艺学报,2011,38(10):1929-1938.

[22] 任志彬,王志刚,聂庆娟,等.盐胁迫对锦带花幼苗生长及不同部位 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子质量分数的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(5):24-26.

[23] 刘海曼,封晓辉,刘毅,等.绒毛白蜡对 NaCl 胁迫的生理响应[J].北方园艺,2016(10):70-75.