

NaCl 胁迫对 3 个彩色树种的盐害及 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 器官分布的影响

杨升, 王金旺, 刘星, 李效文, 潘凤跃, 陈秋夏

(浙江省亚热带作物研究所, 浙江 温州 325005)

摘要: 为了研究彩色树种在 NaCl 胁迫下矿质离子的响应机制, 采用 0, 85, 170, 340, 510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 五种不同浓度 NaCl 溶液对金叶复叶槭 *Acer negundo* 'Aurea', 紫叶合欢 *Albizia* spp. 和金叶皂荚 *Gleditsia triacanthos* 'Sunburst' 2 年生苗进行胁迫处理, 50 天后, 根据其表型评判各树种盐害等级, 并测定其根、茎和叶中 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 含量, 计算各组织的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 值。结果表明, 在 340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下, 金叶复叶槭绝大部分叶片边缘焦枯, 盐害等级为 3, 紫叶合欢和金叶皂荚部分叶片焦枯, 盐害等级为 2, 而 510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下, 紫叶合欢盐害等级为 4 级, 而金叶皂荚的盐害等级为 3 级; 3 个树种根、茎和叶中 Na^+ 含量均随着盐浓度增加而增加, 而 K^+ 含量和 K^+/Na^+ 均显著下降 ($P < 0.05$), 并且金叶皂荚降幅少于金叶复叶槭和紫叶合欢; Ca^{2+} 含量均随着盐浓度增加呈下降趋势, 根和叶的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 在金叶皂荚中的降幅小于金叶复叶槭和紫叶合欢。因此, 在 NaCl 胁迫下, 金叶皂荚盐害等级低, 归因于其具有较强的拒 Na^+ 和保留 K^+ , Ca^{2+} 能力, 从而维持体内 K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 平衡。

关键词: 彩色树种; 耐盐性; NaCl 胁迫; 离子平衡

中图分类号: S713 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2019)06-0025-07

Effect of NaCl Stress on Injury and Na^+ , K^+ and Ca^{2+} Distribution in Three Color-leaved Tree Species

YANG Sheng, WANG Jin-wang, LIU Xing, LI Xiao-wen, PAN Feng-yue, CHEN Qiu-xia

(Zhejiang Institute of Subtropical Crops, Wenzhou 325005, China)

Abstract: Experiments were carried out on NaCl stress with 0, 85, 170, 340, 510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ on 3-year color-leaved tree species namely *Acer negundo* 'Aurea', *Albizia* spp., *Gleditsia triacanthos* 'Sunburst' in 2016. Content of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , value of K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ of root, stem and leaf and injuries of treated seedlings were measured 50 days later. The results demonstrated that *A. negundo* 'Aurea' showed injury of class 3, *A. spp.* and *G. triacanthos* 'Sunburst' class 2 under treatment of 340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl, while under treatment of 510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl, *A. negundo* 'Aurea' and *A. spp.* class 4, *G. triacanthos* 'Sunburst' class 3. The content of Na^+ in the tested organs of three species increased with NaCl concentration, but the content of K^+ and value of K^+/Na^+ decreased significantly. The content of Ca^{2+} had negative relation with the increase of NaCl concentration, and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ of *G. triacanthos* 'Sunburst' in root and leaf showed less decline. The experiment resulted that salt damage of *G. triacanthos* 'Sunburst' was the lowest under NaCl stress.

Keywords: color-leaved tree species; salt-tolerance; NaCl stress; ion balance

随着城市建设和城市园林绿化的不断发展, 园林绿化树种在创造优美的街道绿化景观和改善城市生态环境

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-09-22

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目“楠溪江彩叶健康林营建技术推广与示范”(2016-TS-08); 院院合作项目“海涂围垦区生态修复及耐盐桑树品种选育”(10102000316LL0005F); 所科研启动基金项目“耐盐碱彩色树种选育及快繁技术研究”(2014Y001)

作者简介: 杨升, 助理研究员, 从事植物耐盐生理生态学研究; E-mail: 271475095@qq.com。通信作者: 陈秋夏, 博士, 研究员, 从事森林生态学研究; E-mail: yzscqx@163.com。

方面发挥着愈来愈重要的作用。近几年来,彩色树种在上海、北京、天津、大连等大城市引种和栽植受到重视,它可代替开花植物的景观效果。2014年浙江省正式启动了“营造彩色森林,建设美丽通道”活动,全面打造升级“四边”绿化,并要求重点针对彩色树种新品种的适应性、生理特性、抗逆性开展评价^[1]。

彩色树种是指在生长季植物整株或部分器官呈现非绿色的树木^[2-3]。在滨海盐碱地区优良绿化植物材料缺乏,彩色树种资源更为稀缺,造成滨海地区城市绿化美化及生态建设的质量和成效差。国内外学者在彩色植物资源调查、品种选育、栽培措施、园林应用等方面做了大量工作^[3-5]。在耐盐碱方面,主要集中在彩色树种的生长适应性^[2,6]、光合作用^[7-9]、生理特性^[10-11]等方面,对矿质离子的研究相对较少,尤其是乔木树种。盐胁迫下,矿质离子在植物体内分布情况,尤其是 Na^+ 和 K^+ ,可以反映植物潜在的耐盐能力,也是其重要的耐盐机理。大量研究表明盐胁迫会引起植物体内 Na^+ 含量增加和 K^+ , Ca^{2+} 含量减少,并且耐盐种质可以通过离子的选择性吸收和运输,更好的限制 Na^+ 积累,减少 K^+ , Ca^{2+} 的流失,从而维持体内的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 平衡^[12-14]。因此,本研究选取金叶复叶槭 *Acer negundo* 'Aurea', 紫叶合欢 *Albizia* spp.和金叶皂荚 *Gleditsia triacaanthos* 'Sunburst' 3个乔木彩色树种为材料,用不同浓度的NaCl溶液处理,调查树种的盐害症状表现,并测量根、茎和叶中 Na^+ , K^+ 和 Ca^{2+} 含量,以期从矿质离子方面探讨彩色植物耐盐机理的差异,为彩色树种研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所选试验材料,金叶复叶槭为2年生扦插苗、紫叶合欢和金叶皂荚为2年生嫁接苗,于2015年5月种植于规格为37 cm×34 cm(口径×高)的塑料花盆中,每盆1株,基质由黄泥土和草炭土按照1:2(体积比)的比例混合而成,每盆干土质量约为8.0 kg,用80%的多菌灵进行消毒处理。选取大小基本一致的苗木,于2016年5月在离茎基30 cm处进行截干处理,缓苗30天后,每棵树苗上保留3根萌芽条,进行NaCl胁迫处理。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计,参照杨升等^[15]和吴竹妍等^[16],设置5个NaCl浓度($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$):0(对照),85,170,340,510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,NaCl溶液用自来水配制,各个树种每个NaCl浓度处理30株。在处理的第1天,0浓度处理用自来水浇灌,85和170 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理用相应浓度NaCl溶液浇灌,而340和510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理先用170 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浇灌,340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理在第2 d用340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浇灌,510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理在第2天和第3天分别用340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和510 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浇灌,每次浇灌溶液量为2 L,浇透。当所有处理达到预设NaCl浓度后,在盆底垫塑料托盘,以便防止盐分流失。根据称重法,以后每隔10 d,浇自来水一次。每2周记录1次盐害症状表现。NaCl胁迫历时50 d后,分别采集根、茎、叶,烘干,测定矿质离子含量,每个处理重复4次。

1.3 试验方法

参照王业遴等^[17]和付晴晴等^[18]的标准进行盐害等级划分,0级:无盐害症状;1级:少量叶尖、叶缘或叶脉变黄,属于轻度盐害;2级:约1/2的叶片发生叶尖和叶缘焦枯,属于中度盐害;3级:绝大部分叶片的叶缘和叶尖焦枯,发生叶片脱落现象,属于重度盐害;4级:发生嫩枝干枯、落叶严重,直至死亡,属于极重度盐害。

Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 离子测定:采用消煮法^[19],称取0.100 g烘干样品,灰化后,加入消解液,经过消煮和定容后,用原子吸收分光光度计测定 Na^+ , K^+ 和 Ca^{2+} 含量。

1.4 数据处理

采用Excel2007和SPSS16.0软件进行数据整理和统计分析,并选用LSD法进行多重比较和显著性检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 NaCl胁迫下3个树种的盐害症状表现

由表 1 显示, 实验结束时, 金叶复叶槭在 340 mmol·L⁻¹NaCl 浓度下, 有 8 棵植株的中下部叶片完全脱落, 未凋落叶片绝大部分表现为边缘焦枯, 盐害等级为 3 级; 虽然紫叶合欢和金叶皂荚在 340 mmol·L⁻¹NaCl 浓度下, 均表现为部分叶片焦枯, 盐害等级属于 2 级, 但是紫叶合欢有 3 棵植株出现明显落叶。实验结束时, 在 510 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度下, 紫叶合欢有 13 棵植株的中下部叶片完全脱落, 大部分叶片也表现为边缘干枯, 而金叶皂荚仅有 7 棵植株的中下部叶片有明显脱落, 因此, 510 mmol·L⁻¹ 盐胁迫下, 紫叶合欢盐害等级为 4 级, 而金叶皂荚为 3 级。

表 1 不同 NaCl 浓度胁迫下 3 个树种的盐害症状
Table 1 Salt injury of tested species under different NaCl concentrations

树种	NaCl 浓度/ (mmol·L ⁻¹)				
	0	85	170	340	510
金叶复叶槭	生长正常, 盐害等级 0 级	生长基本正常, 盐害等级 0 级	试验结束时, 少量叶片卷缩, 盐害等级 1 级	4 周时, 发生少量叶片脱落, 实验结束时, 有 8 棵植株中下部叶片完全脱落, 盐害等级 3 级	实验结束时, 有 19 棵植株中下部叶片完全脱落, 盐害等级 4 级
紫叶合欢	生长正常, 盐害等级 0 级	生长基本正常, 盐害等级 0 级	试验结束时, 少量叶片卷缩, 盐害等级 1 级	6 周时, 发生少量叶片脱落, 实验结束时, 有 3 棵植株中下部叶片脱落严重, 盐害等级 2 级	试验结束时, 有 13 棵中下部叶片完全干枯或脱落盐害等级 4 级
金叶皂荚	生长正常, 盐害等级 0 级	生长正常, 盐害等级 0 级	试验结束时, 少量叶片卷缩, 盐害等级 1 级	实验结束时, 有 2 棵植株中下部叶片脱落严重, 盐害等级 2 级	试验结束时, 有 7 棵中下部叶片完全干枯或脱落, 盐害等级 3 级

2.2 NaCl 胁迫下 3 个树种的 Na⁺含量

由表 2 可知, 随着盐浓度增加, Na⁺含量在 3 个树种根、茎和叶片中均呈现出显著增加 ($P<0.05$), 并且根和叶片中增加幅度较大。与对照相比, 在 170 mmol·L⁻¹NaCl 处理下, 金叶复叶槭根中 Na⁺含量增加幅度最大, 达到 293.82%, 紫叶合欢次之, 为 141.52%, 而金叶皂荚根中 Na⁺含量的增幅最小, 为 85.18%; 在茎中, 金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚在 170 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下, 与对照相比, Na⁺含量增幅分别为 23.11%, 26.29% 和 28.50%; 在 170 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下, 金叶复叶槭和紫叶合欢叶片中的 Na⁺含量比对照分别增加了 124.91% 和 64.69%, 而金叶皂荚仅增加了 35.95%。从不同营养器官来看, 在 NaCl 胁迫下, 金叶复叶槭 Na⁺含量为根>叶>茎, 但在 85 mmol·L⁻¹ 浓度下, 茎和叶 Na⁺含量差异不显著; 紫叶合欢根中 Na⁺含量显著高于茎和叶, 但在低盐浓度 (≤ 170 mmol·L⁻¹) 下, 茎、叶间差异不显著, 高盐浓度 (> 170 mmol·L⁻¹) 下, 叶片 Na⁺含量显著高于茎; 在 85 mmol·L⁻¹ 浓度下, 金叶皂荚 Na⁺含量为根>茎>叶, 当 NaCl 浓度升高, 叶片 Na⁺含量逐渐高于茎, 但差异不显著。由此可见, 植物 Na⁺主要分布在根部, 叶片中的含量相对最少, 但随着 NaCl 浓度逐渐升高, 叶片中含量升高, 并且逐渐高于茎。

表 2 不同 NaCl 浓度胁迫下 3 个树种 Na⁺含量
Table 2 Na⁺ content in three species under different NaCl concentrations

树种	组织	Na ⁺ 含量/ (mg·g ⁻¹)					
		NaCl 浓度	0	85/ (mmol·L ⁻¹)	170/ (mmol·L ⁻¹)	340/ (mmol·L ⁻¹)	510/ (mmol·L ⁻¹)
金叶复叶槭	根		0.36±0.01dA	0.96±0.05cA	1.41±0.05bA	1.44±0.02bA	2.99±0.03aA
	茎		0.09±0.00dC	0.12±0.00cB	0.11±0.01cC	0.16±0.01bC	0.20±0.00aC
	叶		0.14±0.01dB	0.16±0.01dB	0.32±0.02cB	0.51±0.04bB	0.98±0.07aB
紫叶合欢	根		1.09±0.11eA	1.78±0.10dA	2.62±0.07cA	3.32±0.23bA	3.81±0.06aA
	茎		0.13±0.00cB	0.13±0.00cB	0.17±0.01bB	0.16±0.00bC	0.19±0.01aC
	叶		0.11±0.01dB	0.11±0.00dB	0.18±0.01cB	0.48±0.02bB	0.68±0.06aB
金叶皂荚	根		1.16±0.01dA	1.76±0.07cA	2.15±0.20bA	2.02±0.06bA	2.76±0.01aA
	茎		0.21±0.00eB	0.26±0.01dB	0.27±0.01cB	0.32±0.01bB	0.41±0.00aB
	叶		0.14±0.02dC	0.15±0.02dC	0.19±0.01cB	0.33±0.02bB	0.51±0.05aB

注: 表中数据为“平均值±标准差”。同一行不同小写字母表示在不同 NaCl 浓度间差异显著 ($P<0.05$), 同一列同一树种不同大写字母表示不同营养器官间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

2.3 NaCl 胁迫下 3 个树种的 K⁺含量

由表3可看出,3个树种根、茎和叶片中 K^+ 含量随着盐浓度增加而显著减少。在 $170\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 浓度下,各器官中 K^+ 含量的下降幅度范围为 $9.50\% \sim 24.73\%$,其中,紫叶合欢根和茎中降幅最大,分别为 19.32% 和 24.73% ;金叶皂荚叶片 K^+ 含量下降量($2.94\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)略高于紫叶合欢($2.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和金叶复叶槭($2.65\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。但是当 NaCl 浓度达到 $510\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,金叶皂荚根、茎和叶片中 K^+ 含量,与对照相比,分别仅下降了 14.23% , 25.78% 和 28.61% ,均低于金叶复叶槭和紫叶合欢;紫叶合欢根和茎中 K^+ 含量下降幅度最大,分别为 50.06% 和 40.07% ,而金叶复叶槭叶片中 K^+ 含量下降幅度最大,达到 60.95% 。在不同营养器官间,在相同 NaCl 浓度下,金叶复叶槭和紫叶合欢的 K^+ 含量表现为茎>叶>根;金叶皂荚在 $85\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下,茎和叶的 K^+ 含量显著高于根,而 $170\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下,茎和根的 K^+ 含量显著高于叶($P<0.05$),当 NaCl 浓度高于 $340\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, K^+ 含量表现为茎>根>叶。

表3 不同 NaCl 浓度胁迫下3个树种 K^+ 含量
Table 3 K^+ content in three species under different NaCl concentrations

树种	组织	K^+ 含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)					
		NaCl 浓度	0	85/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	170/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	340/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	510/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
金叶复叶槭	根		$8.76\pm 0.17\text{aC}$	$8.15\pm 0.21\text{bC}$	$7.50\pm 0.39\text{cC}$	$7.05\pm 0.07\text{dC}$	$6.42\pm 0.02\text{eC}$
	茎		$20.02\pm 0.68\text{aA}$	$18.91\pm 0.02\text{bA}$	$16.88\pm 0.77\text{cA}$	$17.28\pm 0.34\text{cA}$	$12.72\pm 0.08\text{dA}$
	叶		$17.60\pm 0.96\text{aB}$	$17.13\pm 0.43\text{aB}$	$14.95\pm 0.85\text{bB}$	$9.13\pm 0.42\text{cB}$	$6.87\pm 0.32\text{dB}$
紫叶合欢	根		$11.05\pm 0.44\text{aC}$	$8.94\pm 0.01\text{bC}$	$8.91\pm 0.14\text{bC}$	$6.79\pm 0.12\text{cC}$	$5.52\pm 0.08\text{dC}$
	茎		$22.12\pm 0.03\text{aA}$	$19.19\pm 1.36\text{bA}$	$16.65\pm 0.29\text{cA}$	$17.16\pm 0.16\text{cA}$	$13.25\pm 0.13\text{dA}$
	叶		$15.13\pm 0.56\text{aB}$	$14.01\pm 0.79\text{bB}$	$12.79\pm 0.66\text{cB}$	$9.87\pm 0.60\text{dB}$	$8.46\pm 0.22\text{eB}$
金叶皂荚	根		$12.13\pm 0.11\text{aB}$	$11.37\pm 0.10\text{bB}$	$10.98\pm 0.12\text{bcA}$	$10.66\pm 0.14\text{cdB}$	$10.40\pm 0.58\text{dB}$
	茎		$15.26\pm 0.44\text{aA}$	$13.01\pm 0.85\text{bA}$	$11.83\pm 0.46\text{cA}$	$11.56\pm 0.45\text{cA}$	$11.33\pm 0.35\text{cA}$
	叶		$12.69\pm 0.57\text{aB}$	$13.30\pm 0.54\text{aA}$	$9.75\pm 1.04\text{bB}$	$8.65\pm 0.31\text{bC}$	$9.06\pm 0.45\text{bC}$

2.4 NaCl 胁迫下3个树种的 Ca^{2+} 含量

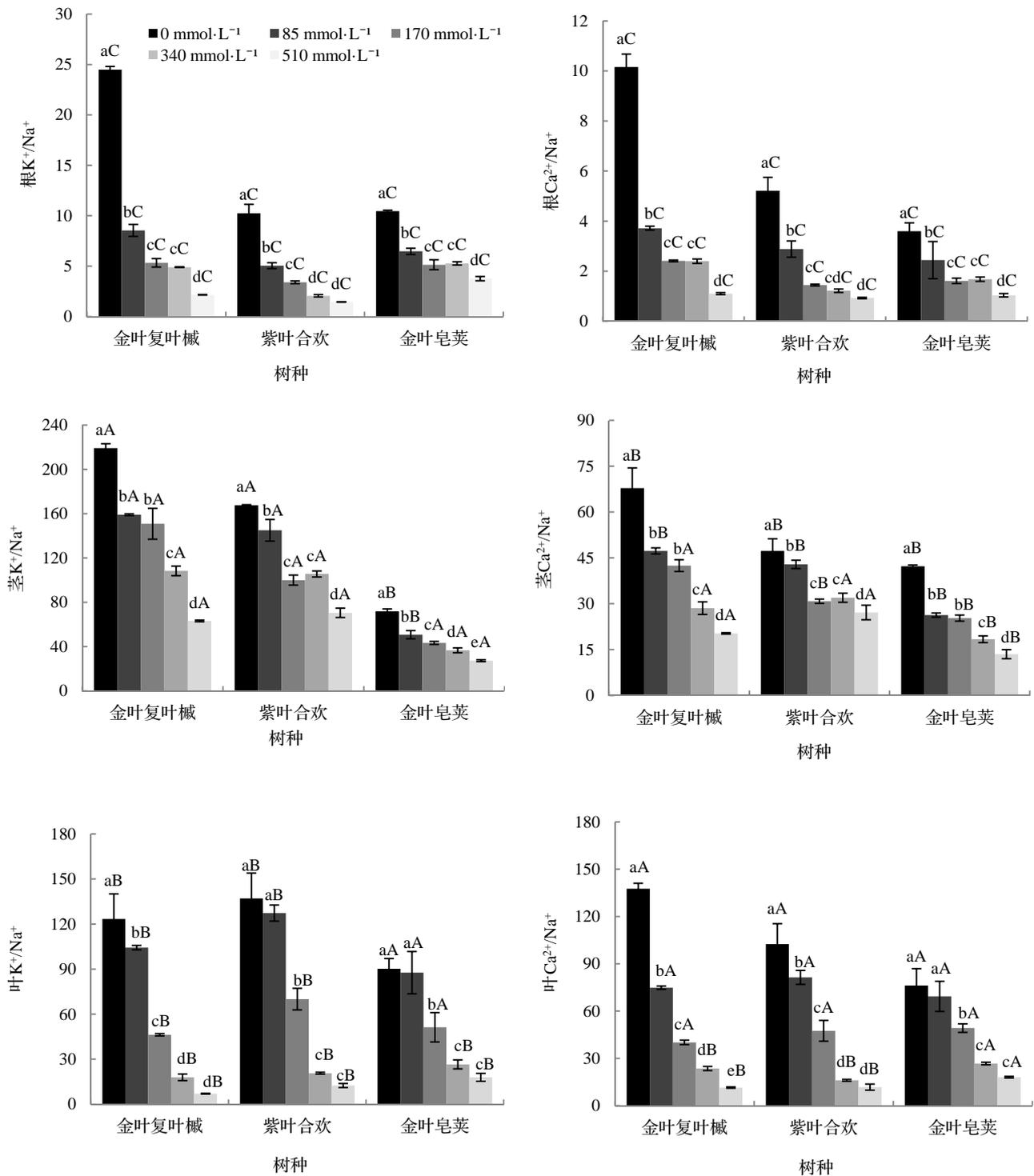
从表4可以看出,盐胁迫引起金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚的根、茎和叶片中 Ca^{2+} 含量均呈下降趋势。紫叶合欢根中的 Ca^{2+} 含量在 $170\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 浓度下,与对照相比,下降了 32.62% ,高于金叶皂荚(17.24%)和金叶复叶槭(6.45%)。在茎中,与对照相比,紫叶合欢 Ca^{2+} 含量下降量为 17.59% ,低于金叶复叶槭(23.05%)和金叶皂荚(23.04%)。在 $170\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 处理下,金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚叶片中的 Ca^{2+} 含量分别下降了 34.48% , 23.41% 和 11.53% 。在 $510\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaCl}$ 胁迫下,3个树种根、茎和叶片中 Ca^{2+} 含量下降幅度进一步加大。在相同 NaCl 浓度下,金叶复叶槭和金叶皂荚各器官中 Ca^{2+} 含量均为叶>茎>根;紫叶合欢在 $85\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下,叶片 Ca^{2+} 含量显著高于茎和根,而茎和根差异不显著,当 NaCl 浓度高于 $170\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Ca^{2+} 含量表现为叶>茎>根。

表4 不同 NaCl 浓度胁迫下3个树种 Ca^{2+} 含量
Table 4 Ca^{2+} content in three species under different NaCl concentrations

树种	组织	Ca^{2+} 含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)					
		NaCl 浓度	0	85/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	170/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	340/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	510/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
金叶复叶槭	根		$3.63\pm 0.11\text{aC}$	$3.55\pm 0.16\text{abC}$	$3.40\pm 0.11\text{bcC}$	$3.45\pm 0.15\text{abcC}$	$3.30\pm 0.14\text{cC}$
	茎		$6.19\pm 0.50\text{aB}$	$5.62\pm 0.09\text{bB}$	$4.76\pm 0.18\text{cB}$	$4.55\pm 0.16\text{cB}$	$4.09\pm 0.01\text{dB}$
	叶		$19.77\pm 1.53\text{aA}$	$12.29\pm 0.50\text{bcA}$	$12.95\pm 0.33\text{bA}$	$12.03\pm 0.41\text{bcA}$	$11.23\pm 0.43\text{cA}$
紫叶合欢	根		$5.62\pm 0.01\text{aB}$	$5.09\pm 0.30\text{bB}$	$3.79\pm 0.03\text{dC}$	$4.03\pm 0.06\text{cC}$	$3.54\pm 0.06\text{cC}$
	茎		$6.23\pm 0.52\text{aB}$	$5.68\pm 0.17\text{bB}$	$5.14\pm 0.21\text{cB}$	$5.20\pm 0.31\text{cB}$	$5.09\pm 0.11\text{cB}$
	叶		$11.31\pm 0.44\text{aA}$	$8.96\pm 0.62\text{bA}$	$8.66\pm 0.69\text{bcA}$	$7.68\pm 0.59\text{cA}$	$7.96\pm 0.85\text{bcA}$
金叶皂荚	根		$4.17\pm 0.37\text{abC}$	$4.26\pm 1.13\text{aC}$	$3.45\pm 0.12\text{abcC}$	$3.40\pm 0.10\text{bcC}$	$2.87\pm 0.19\text{cC}$
	茎		$8.97\pm 0.08\text{aB}$	$6.74\pm 0.17\text{bB}$	$6.90\pm 0.18\text{bB}$	$5.79\pm 0.24\text{cB}$	$5.59\pm 0.57\text{cB}$
	叶		$10.67\pm 0.28\text{aA}$	$10.54\pm 0.23\text{aA}$	$8.76\pm 0.60\text{bA}$	$9.21\pm 0.58\text{bA}$	$9.72\pm 0.87\text{bA}$

2.5 NaCl 胁迫下3个树种的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$

由图1可知,随着 NaCl 浓度的增加,3个树种根、茎、叶中的 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 均呈现出逐渐下降的趋势。在 $340\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下,金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚根中 K^+/Na^+ 分别为对照的 20.00% , 20.07% 和 50.48% ,而叶片中 K^+/Na^+ 分别为对照的 14.56% , 15.10% 和 29.37% 。与对照相比,在 $85\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫下,金叶复叶槭叶片中 K^+/Na^+ 显著减少,而紫叶合欢和金叶皂荚无显著性差异。



图中数据为“平均值 \pm 标准差”。不同小写字母表示同一树种同一器官在不同 NaCl 浓度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一树种同一 NaCl 浓度不同营养器官间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 NaCl 胁迫对 3 个树种不同组织中 K^+/Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 的影响

Figure 1 Effect of NaCl stress on K^+/Na^+ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in different organs of three species

与对照相比,根中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 在 340 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下,金叶复叶槭和紫叶合欢分别下降了 76.39% 和 76.63%, 金叶皂荚下降了 53.23%, 而叶片 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 的下降幅度增加, 分别达到 82.86%、84.29% 和 64.97%。在 85 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

胁迫下,与对照相比,金叶皂荚叶片中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 无明显差异,而金叶复叶槭和紫叶合欢显著减少。在茎中,3个树种 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 的变化幅度差异相对较小,金叶复叶槭和金叶皂荚在 $340 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下,均在 50% 左右,而紫叶合欢分别为 62.99% 和 67.65%。从不同营养器官来看,金叶复叶槭和紫叶合欢 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 均为茎>叶>根;金叶皂荚在低于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下, $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 为叶>茎>根,当高于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,表现为茎>叶>根。金叶复叶槭 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 在低于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下,为叶>茎>根,而高于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,表现为茎>叶>根;紫叶合欢 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 在低于或等于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下,为叶>茎>根,而高于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,表现为茎>叶>根;金叶皂荚 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 在盐胁迫下均表现为叶>茎>根。

3 讨论

3.1 盐胁迫下 3 个树种的耐盐性生长表现

在盐胁迫下,生长状况是植物耐盐能力最直观的体现,通常随着盐浓度和胁迫时间增加,表现出生长抑制、叶片干枯脱落,甚至植株死亡^[20,21],但耐盐能力强的树种,其症状表现相对较轻或者延迟^[15,22]。在本试验中,在 $340 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 浓度下,金叶复叶槭的盐害等级为 3 级,而紫叶合欢和金叶皂荚为 2 级,当 NaCl 浓度增加到 $510 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,金叶复叶槭和紫叶合欢的盐害等级为 4 级,金叶皂荚为 3 级。金叶复叶槭和紫叶合欢耐盐阈值基本相同,但是它们在 $340 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的盐害等级不同,这可能与两者选择的评价指标不同有关,也可能与植物本身生长特性有关。蒋海月^[23]和莫海波^[24]研究显示皂荚 *Gleditsia sinensis* 耐盐性强于栲叶槭(又名复叶槭) *Acer negundo* 和合欢 *Albizia julibrissin*。因此,可以推断金叶皂荚耐盐性强于金叶复叶槭和紫叶合欢。

3.2 盐胁迫下 3 个树种矿质离子特性

本研究中,随着盐浓度增加, Na^{+} 含量在 3 个树种根、茎和叶片中均呈现出显著增加,这与复叶槭^[23]、合欢^[24]、皂荚^[15]的研究结果一致。但是吴竹妍^[16]研究显示合欢各组织 Na^{+} 含量随盐浓度增加而先升后降,而蒋海月^[23]研究发现美国皂荚 *G. triacantho* 茎、叶中 Na^{+} 含量随盐浓度增加呈现出先升后降再升的规律。在盐胁迫下,金叶皂荚各器官中的 Na^{+} 含量增幅显著低于金叶复叶槭和紫叶合欢,并且 Na^{+} 主要分布在根部,而金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚分别在 $85 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $340 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 表现出根>叶>茎。根系拒盐是植物适应盐渍环境的一个重要机理,减少 Na^{+} 进入植物体内,尤其是控制 Na^{+} 向叶片运输,抗性强的树种可以更好的控制叶片中 Na^{+} 含量^[13,25-26]。

K^{+} 在植物生理调节和物质构成中发挥重要作用,但在盐碱环境中,植物对 K^{+} 的吸收受到 Na^{+} 的竞争作用,耐盐较强的植物表现出更强选择性吸收 K^{+} 或者保留 K^{+} 能力^[27-29]。本试验中,随着盐浓度的增加,各器官中 K^{+} 含量均显著减少,这与其近源种合欢^[24]、栲叶槭^[30]、皂荚^[24]的研究结果有所不同。皂荚吸收或保留 K^{+} 能力强于合欢^[24],美国皂荚强于复叶槭^[23],本研究随着盐浓度的增加,金叶皂荚各器官中 K^{+} 含量降幅小于紫叶合欢和金叶复叶槭,而且金叶复叶槭和紫叶合欢 K^{+} 含量均为茎>叶>根,而金叶皂荚随盐浓度增加变为茎>根>叶,因为根中 K^{+} 含量增加可以遏制 Na^{+} 的吸收^[28]。

本研究中,随着盐浓度的增加,3 个树种各器官中 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 均呈下降趋势,金叶皂荚降幅少于金叶复叶槭和紫叶合欢,这与栲叶槭^[31]、美国皂荚^[33]、野皂荚 *Gleditsia microphylla*^[26]、合欢^[24]的研究结果不一致。维持体内的 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 平衡是植物的一个重要耐盐机制,植物可以通过阻隔 Na^{+} 进入,或将 Na^{+} 排出到体外,或将 Na^{+} 进行区隔化,并且调整 K^{+} 的吸收等途径来实现^[14,32-33]。金叶复叶槭和紫叶合欢 $\text{K}^{+}/\text{Na}^{+}$ 均为茎>叶>根,而金叶皂荚在盐浓度高于 $170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,为茎>叶>根,这与合欢^[24]、皂荚^[24]、野皂荚^[26]的研究结果不同。研究已证实, Ca^{2+} 通过参与离子毒害和渗透胁迫的调控途径,降低植物 Na^{+} 含量,维持离子平衡^[34]。本研究发现,3 个树种根、茎和叶的 Ca^{2+} 含量均随着盐浓度增加呈下降趋势,并且在器官中的含量均为叶>茎>根,这与栲叶槭^[30]、美国皂荚^[23,35]的研究结果均有所不同,也有研究显示,盐胁迫也会引起某些器官中 Ca^{2+} 含量增加或者先升后降^[8,22,36]。根和叶的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 在金叶皂荚中的降幅小于金叶复叶槭和紫叶合欢,并且金叶皂荚营养器官中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 为叶>茎>根,而金叶复叶槭和紫叶合欢在低盐浓度 ($\leq 170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 为叶>茎>根,高盐浓度 ($>170 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 为茎>叶>根。有报道认为耐盐能力较强的树种或品种能够更好的维持组织中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$, 尤其是叶片^[21-22,37]。

在不同研究中,Na⁺、K⁺和Ca²⁺的不同表现可能有两个方面原因,一方面是树种材料不同,由于遗传差异,造成植物抗逆性差异,这在常越霞^[8]、周琦^[22]、胡晓立^[11]的研究中得到证实;另一方面试验处理方法不同,包括盐浓度、施盐方式、胁迫时间等。路斌^[26]、吴竹妍^[16]、支欢欢^[30]均采用土壤含盐量,一次性施盐胁迫约30d,而莫海波^[24]采用逐级递增施盐方式,胁迫40d,本研究选用NaCl溶液摩尔浓度,逐级递增施盐,胁迫50d。具体原因还有待进一步证实。

4 结论

综上所述,在盐胁迫下,金叶复叶槭、紫叶合欢和金叶皂荚均受到不同程度的盐害,而离子平衡能力差异是一个重要原因。金叶皂荚表现出较强的耐盐能力,金叶复叶槭和紫叶合欢两者耐盐能力差异不明显,因为在NaCl胁迫下,金叶皂荚根系具有较强的拒Na⁺能力,并且各器官能够更好的保留K⁺和Ca²⁺,从而维持体内K⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺平衡。

参考文献:

- [1] 李燕,何晓玲. 建彩色健康森林绘浙江生态美景[N]. 中国绿色时报, 2014-12-01(001).
- [2] 杨永利,张连城,程耀民. 彩色树种在天津滨海盐碱地引种试验及适应性[J]. 天津农业科学, 2012, 18(3): 164-168.
- [3] 梁杰. 北美彩色树种在北京地区的应用及其适应性评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [4] 刘媛,杨立新. 沈阳公园彩叶植物调查及景观评价分析[J]. 北方园艺, 2016(14): 78-83.
- [5] 袁丽丽,王瑞. 新优彩叶植物引种栽培及其园林应用[J]. 黑龙江农业科学, 2016(10): 95-97.
- [6] 戴文,邱国金,史云光,等. 盐胁迫对金森女贞的生长与生理特性的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2017, 37(3): 183-188.
- [7] WANG Y, MENG Y L, ISHIKAWA H, *et al.* Photosynthetic Adaptation to Salt Stress in Three-Color Leaves of a C4 Plant *Amaranthustricolor* [J]. *Plant Cell Physiol*, 1999, 440(7): 668-674.
- [8] 常越霞. 盐胁迫对金叶白蜡生理生化特性的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [9] 聂文鑫,徐晓芳,杨林. NaCl胁迫对3种李属彩叶植物光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 243-245.
- [10] 史云光,宋刚,朱艳,等. 6种园林彩叶植物的耐盐性评价[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(5): 109-111.
- [11] 胡晓立,李彦慧,陈东亮,等. 3种李属彩叶植物对NaCl胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2010(2): 370-376.
- [12] KUSVURAN A, KIRAN S U, NAZLI R I, *et al.* Morphological response and ion regulation in maize (*Zea mays* L.) varieties under salt stress[J]. *Fresen Environ Bull*, 2015, 24(1): 124-131.
- [13] 杨升,张华新,刘涛,等. NaCl胁迫下沙枣幼苗的离子代谢特性[J]. 林业科学研究, 2016, 29(1): 140-146.
- [14] ALMEIDA D M, OLIVEIRA M M, SAIBO N J M. Regulation of Na⁺ and K⁺ homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants[J]. *Genet Mol Biol*, 2017, 40(1): 326-345.
- [15] 杨升,张华新,刘涛. 16个树种盐胁迫下的生长表现和生理特性[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(5): 744-754.
- [16] 吴竹妍,蔡静如,钱塘璜,等. 盐胁迫下5种华南乡土植物的反应特性及耐盐性评价[J]. 江西农业学报, 2015, 27(12): 19-24.
- [17] 王业遴,马凯,姜卫兵,等. 五种果树耐盐力试验初报[J]. 中国果树, 1990(3): 8-12.
- [18] 付晴晴,孙鲁龙,翟衡,等. 葡萄种间杂交砧木育种F1代植株耐盐性分析[J]. 植物学报, 2017, 52(6): 733-743.
- [19] 杨升. NaCl胁迫下不同种源沙枣幼苗耐盐性差异生理机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [20] 江远芳,王竞红,薛菲. 3种碱性盐胁迫对紫穗槐形态和生理的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(8): 30-34.
- [21] 於朝广,李颖,谢寅峰,等. NaCl胁迫对中山杉幼苗生长及离子吸收、运输和分配的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(9): 1379-1388.
- [22] 周琦,祝遵凌. NaCl胁迫对2种鹅耳枥幼苗生长及离子吸收、分配与运输的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 9-19.
- [23] 蒋海月,支欢欢,刘伟娜,等. 盐胁迫对8种乔木实生苗生长和生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(4): 27-32.
- [24] 莫海波,殷云龙,芦治国,等. NaCl胁迫对4种豆科树种幼苗生长和K⁺、Na⁺含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1156-1161.
- [25] 王树凤,胡韵雪,李志兰,等. 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿质离子吸收、运输和分配的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 4609-4616.
- [26] 路斌,侯月敏,常越霞,等. 野皂荚对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3293-3299.
- [27] KUSVURAN S, ELLIALTI O G L U S, YASAR F, *et al.* Effects of salt stress on ion accumulation and activity of some antioxidant enzymes in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. *J Food Agr Environ*, 2007, 5(2): 351-354.
- [28] SHABALA S, CUIN T A. Potassium transport and plant salt tolerance[J]. *Physiol Plant*, 2008, 133(4): 651-669.
- [29] 杨升,张华新,陈秋夏,等. 沙枣幼苗根尖离子流对NaCl胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(4): 489-496.
- [30] 支欢欢,杨敏生,张华新,等. 3种园林植物耐盐性对比分析[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(3): 71-75.
- [31] 杨倩,衡静. 盐胁迫条件下不同苗木耐盐能力的嫡权系数评价[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 135-137.
- [32] PARIDA A K, JHA B. Salt tolerance mechanisms in mangroves: a review[J]. *Trees*, 2010, 24: 199-217.
- [33] WANG W, YAN Z, YOU S, *et al.* Mangroves: obligate or facultative halophytes: a review[J]. *Trees*, 2011, 25: 953-963.
- [34] 王芳,万书波,孟庆伟,等. Ca²⁺在植物盐胁迫响应机制中的调控作用[J]. 生命科学研究, 2012, 16(4): 362-367.
- [35] 杨升,张华新,刘涛. 盐胁迫对16种幼苗渗透调节物质的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 269-277.
- [36] 宁建凤,郑青松,杨少海,等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325-330.
- [37] 王汐妍,裴波音,刘玉姣,等. 盐胁迫对不同耐盐性棉花幼苗生长与生理及无机离子器官分布的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2017, 43(3): 273-280.