

盐胁迫对 3 种华南园林植物元素特性的影响

邹晓君, 蔡金桓, 列志阳, 薛立*

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)

摘要: 为筛选耐盐园林植物, 研究了盐胁迫下狗牙花(*Ervatamia divaricate*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)和花叶假连翘(*Duranta erecta*)的养分积累和分配规律。结果表明, 盐胁迫增加了所有植物器官的 Na 和叶片 K 含量、狗牙花和红背桂各器官的 Cl 和 N 含量, 但降低了所有植物枝干、红背桂和花叶假连翘根的 K 含量; 各植物的 P 含量变化各异。盐胁迫增加了所有植物 Na 和 Cl 的积累量, 并富集于枝干和叶片; 狗牙花和花叶假连翘各器官的 N、P 和 K 积累量及红背桂各器官的 P 和 K 积累量随着 NaCl 的浓度增加而下降。总之, 盐胁迫使植物 Na 和 Cl 含量和积累量升高, 而各器官生物量以及 N、P 和 K 积累量下降。3 种植物中, 狗牙花和花叶假连翘能更好地适应华南地区盐胁迫环境。

关键词: 盐胁迫; 园林植物; 元素; 含量; 积累量; 华南地区

doi: 10.11926/jtsb.3808

Elemental Characteristics of Three Landscape Species under Salt Stress in South China

ZOU Xiao-jun, Cai Jin-huan, LIE Zhi-yang, XUE Li*

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to select landscape plants with salt resistance, the allocation and accumulation of nutrient of three landscape species, such as *Ervatamia divaricat*, *Excoecaria cochinchinensis* and *Duranta erecta*, were studied under salt stress. *Ervatamia divaricat*, *Excoecaria cochinchinensis* and *D. erecta* were planted in College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University. The results showed that Na content in all organs and K content in leaf, as well as Cl and N contents in all organs of *Ervatamia divaricat* and *Excoecaria cochinchinensis* increased, whereas K content in stems and branches of all plants and roots of *Excoecaria cochinchinensis* and *D. erecta* decreased under salt stress. P content of all plants varied irregularly. Na and Cl accumulations increased in three landscape species with salt stress, which enriched in stem and leaves. The N, P and K accumulations in different organs of *Ervatamia divaricat* and *D. erecta* and P and K accumulations in different organs of *Excoecaria cochinchinensis* decreased with salt stress. Therefore, NaCl stress increased Na and Cl contents and accumulations but decreased biomass of organ and N, P and K accumulations. Among the three species, *Ervatamia divaricate* and *D. erecta* were better landscape plants under salt stress in south China.

Key words: Salt stress; Landscape plant; Nutrient; Content; Accumulation; South China

土壤盐渍化是由自然或人类活动引起的一种主要环境风险^[1], 使土壤通气性、透水性变差, 养分有效性降低, 限制植物的生产力^[2]。我国盐渍化

土地分布广, 面积大, 将近 1/10 的耕地正遭受盐渍化的危害, 对许多地区农业及绿化建设造成困扰, 影响了生态环境和人类健康^[3]。当前已有研究证实,

收稿日期: 2017-08-16

接受日期: 2017-10-24

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目(2015-GDTK-07)资助

This work was supported by the Forestry Technology Popularization Demonstration Project of the Central Government (Grant No. [2015]GDTK-07).

作者简介: 邹晓君, 男, 硕士生, 主要从事风景园林和植物抗逆生理学研究。E-mail: 315686355@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

以生物措施治理盐渍化最为有效^[4-5], 可带来巨大的社会、经济和生态价值。

土壤中的养分含量反映了土壤的肥沃程度, 作为提供植物生长必需的能源基础, 一定程度上决定着植物中的营养含量和养分积累量^[6]。Na⁺和 Cl⁻是盐渍化土壤中的主要盐离子, 在高盐条件下, 土壤中溶解大量盐离子产生的高土壤溶质势必打破植株体内离子稳定, 可以通过干扰 N、P、K 等矿质元素的吸收而造成植株离子毒害^[7-8]; 但植物可通过体内矿物质离子对其进行分配转移, 可重建离子稳定, 减缓盐胁迫对植株的影响^[9-10]。因此, 植物需克服盐离子毒害、抵抗渗透胁迫和平衡元素吸收才能适应盐渍环境^[11]。

我国华南地区广泛栽植的狗牙花(*Ervatamia divaricate*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)和花叶假连翘(*Duranta erecta*)均为重要的园林植物, 已成为城市园林植物应用的主要灌木树种。我国目前已对农作物和林木的植物养分积累和分配规律进行了研究^[12-15], 而对以上3种植物的研究主要集中在生理及其光合和荧光特性^[16-18]、植物配置和景观营造^[19-20]等方面, 缺乏对其元素积累和分配规律方面的研究报道。由于盐胁迫可影响植物的生物量、元素特性等方面, 造成植物发育迟缓, 影响园林植物的景观效果和生态效益的发挥。因此, 本文通过人工模拟(配制 NaCl 溶液)盐胁迫的盆栽试验方法, 探究3种园林植物的元素积累和分配规律的变化机

制, 以期筛选耐盐园林植物提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概述

试验地位于广州市华南农业大学林学与风景园林学院, 属亚热带季风气候, 最热月(7月)和最冷月(1月)平均气温分别为 28.7℃ 和 13.5℃, 年降雨量约为 1736 mm, 集中于 4 至 6 月, 年均相对湿度 77%。

1.2 材料

试验于 2016 年 5 月开始, 选择华南地区常用的园林绿化植物, 且长势一致、生长良好的一年生狗牙花(*Ervatamia divaricate*)、红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)和花叶假连翘(*Duranta erecta*)幼苗于试验前 2 周移栽定植于直径 20 cm, 高 30 cm 的营养袋, 每盆 1 株, 盆内土壤为按 3:1 混合配制的黄心土和荷兰土。土壤的有机质、全氮、全磷、全钾和全钠含量分别为 77.14、2.00、0.91、14.17 和 1.38 g kg⁻¹, 碱解氮、有效磷、速效钾和速效钠分别为 146.68、45.65、134.88 和 71.92 mg kg⁻¹。幼苗基本概况见表 1。

1.3 方法

试验设置 3 个 NaCl 梯度: 分别为 0 (CK)、0.3% 和 0.6%, 以浇灌等量的无离子水为对照。对照及每

表 1 3 种园林植物的基本情况

Table 1 Basic index of three landscape species

树种 Species	科 Family	平均地径 (cm) Average ground diameter	平均苗高 (cm) Average height	平均冠幅 (cm) Average crown
狗牙花 <i>Ervatamia divaricate</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	0.82 ± 0.28a	30.5 ± 7.41a	35.4 ± 4.62a
红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	大戟科 Euphorbiaceae	0.35 ± 0.03b	20.3 ± 2.36b	20.8 ± 4.18b
花叶假连翘 <i>Duranta erecta</i>	马鞭草科 Verbenaceae	0.50 ± 0.05b	8.6 ± 7.72a	33.6 ± 7.66a

表 2 3 种园林植物的生物量

Table 2 Biomasses of three landscape species

树种 Species	NaCl	叶 Leaf (g)	枝干 Stem (g)	根 Root (g)	地上部分 Above ground (g)	总和 Total (g)
狗牙花 <i>Ervatamia divaricate</i>	CK	1.73	4.59	3.00	6.33	9.32
	0.3%	0.89	3.34	2.19	4.23	6.41
	0.6%	0.66	2.37	1.67	3.03	4.70
红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	CK	2.02	1.08	0.55	3.10	3.65
	0.3%	1.86	0.72	0.36	2.58	2.94
	0.6%	1.45	0.75	0.34	2.20	2.54
花叶假连翘 <i>Duranta erecta</i>	CK	1.70	2.09	1.36	3.79	5.15
	0.3%	1.59	1.71	1.05	3.30	4.35
	0.6%	0.82	0.80	0.49	1.62	2.10

个处理均 15 次重复。试验期间严格控制浇水量和时间, 即各盆每天下午四点浇水 50 mL, 以利于盐在干燥土壤中充分扩散。为恒定盆中盐分总量, 花盆底部用托盘承接, 并将盘内渗出水分及时返盆。

将试材样品烘干后研磨完全粉碎, 过 40 目筛, 精确称取各器官样品 0.5 g, 用于分析测定 Na、Cl、N、P 和 K 含量。采用原子吸收分光光度计法测定 Na 和 Cl; 全 N 采用重铬酸钾-浓硫酸消化后用半微量凯氏法测定; P、K 分析待测液用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后, 试液中的 P 采用钼锑抗比色法测定, K 用火焰光度法测定^[21]。每个样品重复 3 次, 结果取平均值。元素积累量根据植物干重与元素含量的乘积计算。

采用 Excel 2003 对数据进行处理并绘制图表。采用 SAS 9.3 统计分析软件对数据进行 Duncan 多重比较, 统计显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 盐胁迫下植物生物量分配的变化

从表 2 可知, 各器官的生物量随着盐浓度增加而降低。与对照相比, 盐浓度为 0.3% 和 0.6% 时, 狗牙花的叶、枝干和根的生物量分别降低了 49%、62%、27% 和 48%、19% 和 44%; 红背桂叶、枝干和根的生物量分别降低了 8%、29%、29% 和 30%、34% 和 38%; 花叶假连翘叶、枝干和根的生物量分别降低了 7%、52%、18% 和 62%、23% 和 64%。总体而言, 在 0.3% 和 0.6% 盐胁迫下, 大部分植物的地下部分生物量降幅高于地上部分生物量。

2.2 元素含量的变化

Na 含量 各植物不同器官的 Na 含量均随着

盐浓度的增加有显著差异($P < 0.05$)(图 1)。与对照相比, 0.3% 和 0.6% 盐胁迫下狗牙花叶、枝干和根的 Na 含量分别增加 551% 和 2 105%、401% 和 802%、516% 和 740%; 红背桂的分别增加 1 328% 和 4 344%、309% 和 466%、87% 和 93%; 花叶假连翘的分别增加 230% 和 1 324%、242% 和 873%、236% 和 424%。总体而言, 在盐胁迫下, 大部分植物器官的 Na 含量增幅为叶 > 枝干或根。

Cl 含量 除 0.3% 盐胁迫的花叶假连翘枝干外, 其他植物不同器官的 Cl 含量均随着盐浓度的增加而显著增加($P < 0.05$)(图 1)。与对照相比, 0.3% 和 0.6% 盐胁迫下狗牙花叶、枝干和根的 Cl 含量分别增加 444% 和 600%、277% 和 649%、1 289% 和 8 213%; 红背桂的分别增加 293% 和 751%、1 124% 和 1 083%、101% 和 148%; 花叶假连翘的叶和根增加了 154% 和 443%、235% 和 897%, 枝干在 0.3% 盐胁迫时减少 41%, 在 0.6% 盐胁迫时增加 63%。0.3% 和 0.6% 盐胁迫下的狗牙花和 0.6% 盐胁迫下的花叶假连翘各器官的 Cl 含量增幅为根 > 叶 > 枝干, 0.3% 和 0.6% 盐胁迫下红背桂各器官的 Cl 含量增幅为枝干 > 叶 > 根。

N 含量 狗牙花和红背桂各器官的 N 含量均随盐胁迫浓度增加而显著升高($P < 0.05$)(图 1)。与对照相比, 0.3% 和 0.6% 盐胁迫下狗牙花的叶、枝干和根分别增加 14% 和 11%、41% 和 44%、33% 和 44%; 红背桂的分别增加 33% 和 40%、31% 和 40%、22% 和 30%; 花叶假连翘的叶增加 27% 和 40%, 枝干的 N 含量在 0.3% 盐胁迫下无明显变化, 但受 0.6% 盐胁迫后增加 16%, 根的 N 含量基本不变。0.3% 和 0.6% 盐胁迫下狗牙花的 N 含量增幅为枝干或根 > 叶, 0.3% 盐胁迫下的红背桂和 0.6% 盐胁迫下的红背桂和花叶假连翘的 N 含量增幅为叶 > 枝干 > 根。

表 2 3 种园林植物的生物量

Table 2 Biomasses of three landscape species

树种 Species	NaCl	叶 Leaf (g)	枝干 Stem (g)	根 Root (g)	地上部分 Above ground (g)	总和 Total (g)
狗牙花 <i>Ervatamia divaricate</i>	CK	1.73	4.59	3.00	6.33	9.32
	0.3%	0.89	3.34	2.19	4.23	6.41
	0.6%	0.66	2.37	1.67	3.03	4.70
红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	CK	2.02	1.08	0.55	3.10	3.65
	0.3%	1.86	0.72	0.36	2.58	2.94
	0.6%	1.45	0.75	0.34	2.20	2.54
花叶假连翘 <i>Duranta erecta</i>	CK	1.70	2.09	1.36	3.79	5.15
	0.3%	1.59	1.71	1.05	3.30	4.35
	0.6%	0.82	0.80	0.49	1.62	2.10

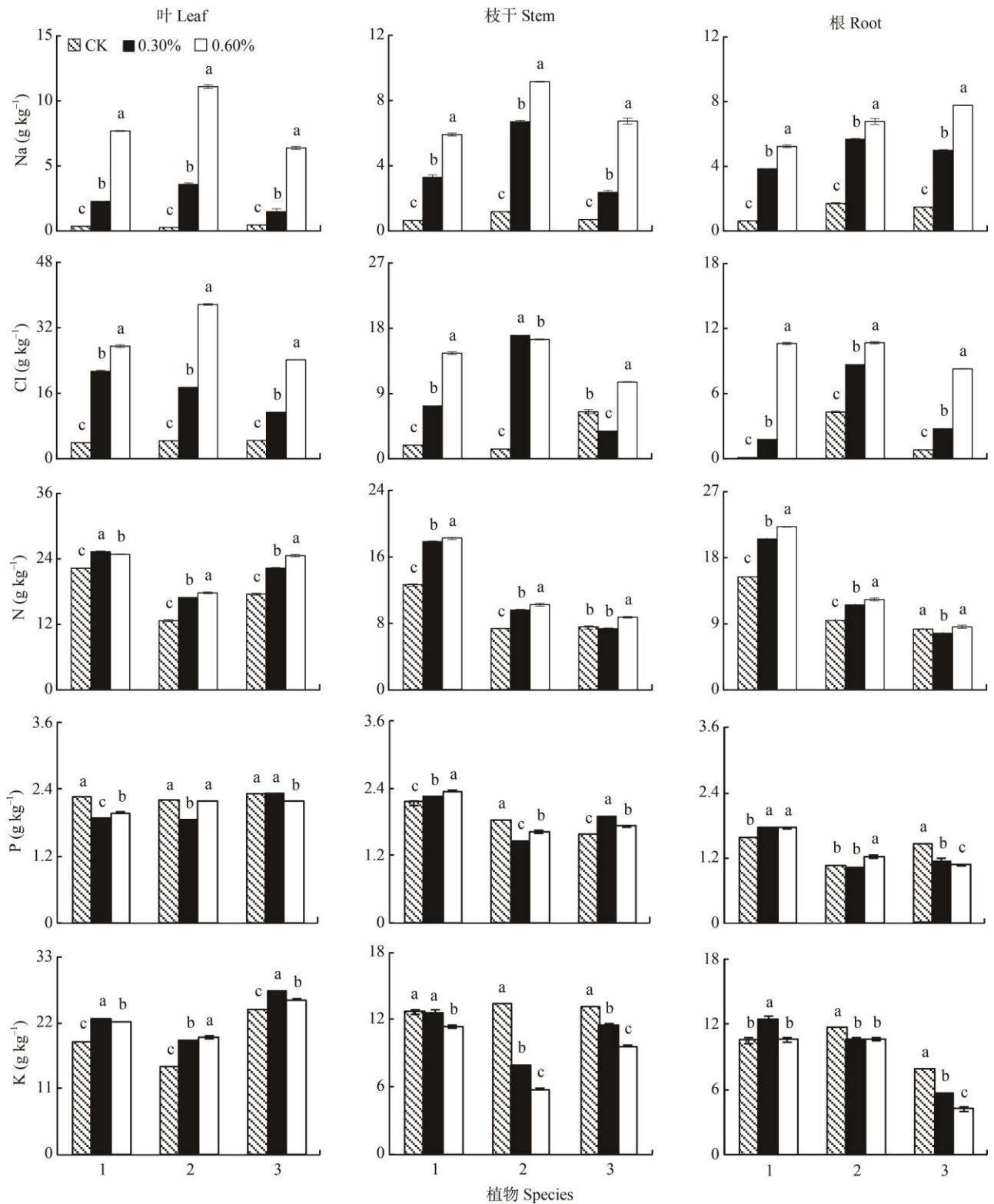


图1 盐胁迫下3种植物不同器官的元素含量。1: 狗牙花; 2: 红背桂; 3: 花叶假连翘。柱上不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下图同。

Fig. 1 Nutrient contents in different organs of three species under salt stress. 1: *Ervatamia divaricate*; 2: *Excoecaria cochinchinensis*; 3: *Duranta erecta*. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level among treatments. The same is following Figure.

P 含量 不同盐胁迫下, 所有植物的 P 含量变化无明显规律(图 1)。与对照相比, 在 0.3% 和 0.6%

盐胁迫下, 狗牙花叶的 P 含量降低 16% 和 12%, 枝干增加 5% 和 10%, 根均增加 11%; 红背桂的叶、

枝干和根分别减少 15%和 0%、20%和 12%、2%和 16%；花叶假连翘叶的 P 含量基本不变，枝干增加 22%和 10%，根减少 21%和 26%。0.3%盐胁迫下的红背桂的 P 含量降幅为枝干>叶>根，0.6%盐胁迫时为根>枝干>叶；而 0.3%和 0.6%盐胁迫的狗牙花和花叶假连翘各器官的 P 含量增降幅度各异。

K 含量 盐胁迫使植物叶的 K 含量增加，而枝干、红背桂和花叶假连翘根的 K 含量下降($P<0.05$) (图 1)。与对照相比，在 0.3%和 0.6%盐胁迫下，狗牙花叶的 K 含量分别增加了 20%和 17%，在 0.3%盐胁迫下枝干的基本不变，但在 0.6%盐胁迫后减少 11%，在 0.3%盐胁迫下根的增加 18%，在 0.6%盐胁迫下基本不变；红背桂叶的增加 30%和 33%，枝干减少 40%和 57%，根均减少 9%；花叶假连翘叶的增加 12%和 6%，枝干减少 13%和 27%，根减少 28%和 47%。总而言之，0.3%和 0.6%盐胁迫下，各植物叶片的 K 含量增加，大部分植物枝干和根的下降。

2.3 元素积累量的变化

Na 积累量 随着盐胁迫加剧，各器官的 Na 积累量及总积累量均增加，且红背桂和花叶假连翘叶和枝干的 Na 积累量均随盐浓度的增加有显著差异($P<0.05$) (图 2)。与对照相比，0.3%和 0.6%盐胁迫的狗牙花增加 290%和 408%，红背桂 398%和 830%，花叶假连翘增加 176%和 240% (图 2)。各植物器官 Na 积累量的分配规律不同，狗牙花在不同盐浓度下均为枝干>根>叶；红背桂对照为枝干和根>叶，在 0.3%和 0.6%盐胁迫下为叶>枝干>根；花叶假连翘对照和 0.3%盐胁迫下为根>枝干>叶，在 0.6%盐胁迫下为叶和枝干>根。

Cl 积累量 随着盐浓度的增加，所有植物的 Cl 总积累量均增加，且红背桂叶和狗牙花枝干的 Cl 积累量均随盐浓度的增加有显著差异($P<0.05$) (图 2)。与对照相比，0.3%和 0.6%盐胁迫的狗牙花增加 193%和 337%，红背桂增加 273%和 450%，花叶假连翘增加 23%和 45%。除花叶假连翘枝干 Cl 积累量减少外，各植物器官的 Cl 积累量在盐胁迫下均高于对照，狗牙花对照和 0.3%盐浓度下为枝干>叶>根，0.6%浓度下为枝干>叶和根；红背桂对照为叶>根>枝干，0.3%和 0.6%盐胁迫下为叶>枝干>根；花叶假连翘对照为枝干>叶>根，0.3%和 0.6%盐胁迫下为叶>枝干>根。

N 积累量 随着盐浓度的增加，除了红背桂

的 N 总积累量在 0.3%盐胁迫下稍微增加，其他植物的 N 总积累量减少。与对照相比，0.3%和 0.6%盐胁迫的狗牙花减少 11%和 32%，红背桂增加 10%和减少 3%，花叶假连翘减少 1%和 45% (图 2)。各植物大部分器官的 N 积累量逐渐减少，红背桂和花叶假连翘的 N 积累量均为叶或枝干大于根，狗牙花为枝干>根>叶。

P 积累量 盐胁迫下所有植物的 P 总积累量和各器官的 P 积累量均低于对照 (图 2)。与对照相比，在 0.3%和 0.6%盐胁迫下，狗牙花的 P 总积累量分别减少 30%和 47%，红背桂的分别减少 30%和 31%，花叶假连翘的分别减少 11%和 60%。不同盐浓度下，红背桂和花叶假连翘的 P 积累量均为叶>枝干>根；狗牙花的为枝干>根>叶。

K 积累量 盐胁迫下植物的 K 总积累量及各器官的 K 积累量均低于对照，且狗牙花和花叶假连翘的枝干 K 积累量均随着盐浓度的增加有显著差异($P<0.05$) (图 2)。与对照相比，在 0.3%和 0.6%盐胁迫下，狗牙花的 K 总积累量减少 27%和 52%，红背桂减少 11%和 28%，花叶假连翘减少 14%和 61%。不同盐浓度下，红背桂和花叶假连翘的 K 积累量均为叶>枝干>根，狗牙花对照的为枝干>叶>根，0.3%和 0.6%盐浓度下为枝干>根>叶。

3 讨论

3.1 盐胁迫下植物的生物量分配格局

生物量是生态系统最基本的数量特征，是盐胁迫对植物生长影响程度的重要体现和植物耐盐性的直接指标^[22]。王树凤等^[23]的研究表明，高浓度盐胁迫明显抑制了植物生物量的积累。本研究结果表明，3 种园林植物的总生物量、地上和地下部分生物量均随着盐浓度的升高而降低，其中，狗牙花的地上部分下降幅度低于地下部分，而红背桂和花叶假连翘反之。植物可以通过减少生物量在根系的分配以降低对盐分的吸收和减少吸收水肥能耗，同时也减少了盐分向地上部分运输^[23]。并且不同植物的不同部位对盐分的敏感性不同，导致植物地上部分和地下部分生物量分配存在差异。

3.2 盐胁迫下植物的元素含量及其分配格局

植物元素含量及分配格局直接影响生长、元素循环和土壤肥力，是衡量元素收支水平的一个重要

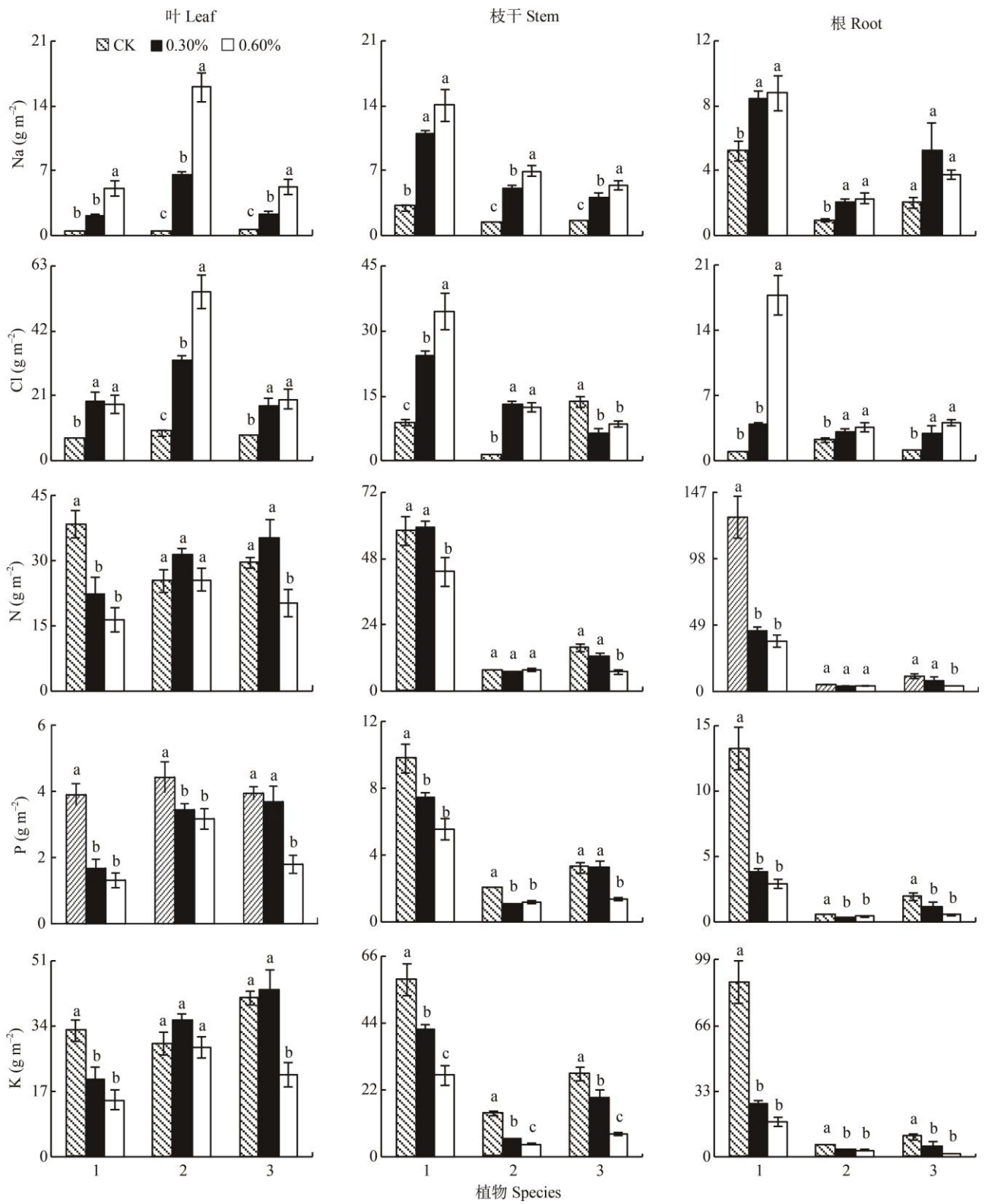


图2 盐胁迫下3种植物不同器官的元素积累量

Fig. 2 Nutrient accumulation in different organs of three species under salt stress

指标^[14]。植物体内元素平衡状态的维持对植株的正常生长至关重要^[24-25]，但是盐渍化生境会阻碍植物

对营养元素的选择性吸收和运输，导致细胞内离子失衡，产生离子毒害，影响植物的正常生长^[13]。

本研究中,随着盐浓度加剧,所有植物器官的 Na 含量均大幅度增加,且地上部分的 Na 含量增幅较根系大,这与李先婷等^[26]报道盐胁迫对啤酒大麦 (*Hordeum vulgare*) 的影响结果一致。植株在盐渍化生境,体内已富集大量的 Na,将盐离子向地上部分转运从而大量累积,以维持根系相对较低的盐浓度。同时,叶片盐离子含量的提高降低了叶片的渗透势,有利于水分向地上部分的运输^[27]。本研究结果表明,大部分植物器官的 Cl 含量均随着盐浓度的增加而增加,其中 Cl 富集于根系部分,说明在盐胁迫下改变了 Cl 在体内的分配模式,降低 Cl 在地上部分的分配比例,而将相对较多的 Cl 积累在根系中,使根细胞水势下降,以保证水分吸收,这与赵昕等^[28]报道珍珠猪毛菜 (*Salsola passerina*) 矿物质离子分配的结果一致。

狗牙花和红背桂的各器官 N 含量均随盐浓度增加而升高,仅 0.3% 盐胁迫下的花叶假连翘枝干和根的 N 含量下降。N 含量在枝叶处明显增加,可能是由于土壤酶活性高,促进有机质分解,导致土壤 N 有效元素的释放^[29],从而导致 N 含量的升高。各植物受胁迫后不同器官的 P 含量变化没有一致规律,这可能是由于植物体内盐分过高,导致植株体内生理变化,影响各器官对元素的吸收分配和对 P 的转运能力^[30]。本研究中,盐胁迫使各植物叶的 K 含量增加,而枝干、红背桂和花叶假连翘根的 K 含量下降。相关研究也表明,受盐胁迫的植物会增加向叶片输送 K^{+} ^[31-32],这是由于植物叶片的细胞质膜上与离子跨膜运输有关的酶活性增强和质子跨膜梯度的形成,促进了细胞质膜上 Na^{+}/H^{+} 交换体的激活和 K^{+} 通道效率的提高以及 K^{+} 的选择性吸收速率的加快,从而有效防止了营养的亏缺,增强了植物自身的耐盐性^[33]。

3.3 盐胁迫下植物各器官的元素积累量特征

元素积累量是植物元素收支平衡的重要指标,其大小变化由元素含量决定。本研究中,随着盐胁迫的增强,Na 和 Cl 的总积累量和在大多数植物器官的积累量大幅度增加,与 Na 和 Cl 含量的变化趋势大致相同,说明元素积累量与元素含量的变化规律大致相同,故元素含量决定元素积累量的变化,这与郭洋等^[34]报道 3 种盐生植物元素吸收特征一致。龚江等^[35]的研究表明,盐胁迫会抑制植物的元素积累,这与本研究结果一致。N、P 和 K 的积累量都随着盐

浓度的升高而下降,总体上,3 种植物叶片的元素积累量最大,根的最小,程小琴等^[36]的研究也有相似结论,说明叶片富集元素和干物质积累的能力最强,所以叶片是重要的元素贮存库^[6,37]。

综合分析,3 种园林植物器官、地上和地下部分生物量以及总生物量均随着盐浓度的升高而降低,且地上部分>地下部分。同时,盐胁迫使植物的 Na 和 Cl 含量增加和 K 含量降低,也使植物 Na 和 Cl 积累量大幅度增加及 N、P 和 K 积累量下降,其变化大小与元素含量和生物量的变化相关。一般来说,随着盐胁迫的增加植物体内 Na 和 Cl 含量升高,K 含量下降会造成矿物质营养胁迫,最终影响植物正常生长^[15]。本研究中,除 0.3% 盐胁迫红背桂叶的 Cl 含量低于狗牙花的外,在相同的盐胁迫下,红背桂的 Na 和 Cl 绝对含量都高于狗牙花和花叶假连翘,而 K 绝对含量反之。由此可知,红背桂的耐盐性较狗牙花和花叶假连翘弱。本研究仅分析盐胁迫对 3 种植物元素特性的影响,今后应加强盐胁迫对以上 3 种园林植物指标的协同性进行探讨,进一步了解 3 种园林植物的耐盐特性,以便为盐渍地区育种以及选取优良的耐盐植物提供理论依据。

参考文献

- [1] ZHU J F, LIU J T, LU Z H, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(15): 5140–5146. doi: 10.5846/stxb201312182981.
朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 等. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5140–5146. doi: 10.5846/stxb201312182981.
- [2] YIN Q R. Effect of salinization on physical and hydrodynamics characteristics [D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University, 2011: 2–3.
尹勤瑞. 盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 2–3.
- [3] GU Y, SONG Y Y, FANG J W, et al. Experimental study on effect of salt stress to the physiological characteristics of *Photinia* Red Robin [J]. Ecol Sci, 2017, 36(2): 152–157. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.02.022.
谷月, 宋盈颖, 方敬雯, 等. 盐胁迫对红叶石楠红罗宾生理特征影响的实验研究 [J]. 生态科学, 2017, 36(2): 152–157. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.02.022.
- [4] YAO J, LIU X B, CUI X, et al. Effects of NaCl stress on substances linked to osmotic adjustment and on photosynthetic physiology of

- Melilotoides ruthenicain* the seedling stage [J]. *Acta Pratac Sin*, 2015, 24(5): 91–99. doi: 10.11686/cyxb20150511.
- 姚佳, 刘信宝, 崔鑫, 等. 不同 NaCl 胁迫对苗期扁蓊豆渗透调节物质及光合生理的影响 [J]. *草业学报*, 2015, 24(5): 91–99. doi: 10.11686/cyxb20150511.
- [5] SONG J, CHEN M, FENG G, et al. Effect of salinity on growth, ion accumulation and the roles of ions in osmotic adjustment of two populations of *Suaeda salsa* [J]. *Plant Soil*, 2009, 314(1/2): 133–141. doi: 10.1007/s11104-008-9712-3.
- [6] WANG Z M, LIU X C, XUE L, et al. Leaf element and soil nutrient of garden plants and their stoichiometry in Nansha, Guangzhou [J]. *J SW For Univ*, 2017, 37(2): 95–102. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2017.02.016.
- 王卓敏, 刘小川, 薛立, 等. 广州南沙园林植物叶片与土壤养分及化学计量特征研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2017, 37(2): 95–102. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2017.02.016.
- [7] LI J Y, ZHAO C Y, YAN Y Y, et al. Effect of salinity on growth, ionic homeostasis in organs of *Populus euphratica* seedlings [J]. *Arid Land Geogr*, 2016, 39(3): 613–620. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.019.
- 李菊艳, 赵成义, 闫映宇, 等. 盐分对胡杨(*Populus euphratica*)幼苗生长和离子平衡的影响 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 613–620. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.019.
- [8] ZHOU P, ZHANG M. Effects of salt stress on ionic distribution of shrub willow [J]. *J CS Univ For Technol*, 2017, 37(1): 7–11, 26. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.01.002.
- 周鹏, 张敏. 盐胁迫对灌木柳体内离子分布的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(1): 7–11, 26. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.01.002.
- [9] SHABALA S, BOSE J, HEDRICH R. Salt bladders: Do they matter? [J]. *Trends Plant Sci*, 2014, 19(11): 687–691. doi: 10.1016/j.tplants.2014.09.001.
- [10] ZHANG J L, LI H R, GUO S Y, et al. Research advances in higher plant adaptation to salt stress [J]. *Acta Pratac Sin*, 2015, 24(12): 220–236. doi: 10.11686/cyxb2015233.
- 张金林, 李惠茹, 郭妹媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展 [J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 220–236. doi: 10.11686/cyxb2015233.
- [11] YONG Y H, ZHANG X, WANG S M, et al. Salt accumulation in vegetative organs and ecological stoichiometry characteristics in typical halophytes in Xinjiang, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, 40(12): 1267–1275. doi: 10.17521/cjpe.2016.0146.
- 雍艳华, 张霞, 王绍明, 等. 新疆典型盐生植物营养器官盐分积累与生态化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1267–1275. doi: 10.17521/cjpe.2016.0146.
- [12] WANG Y F, XUE Y W, YANG K J, et al. Effects of NaCl stress on ion contents in different organs of maize (*Zea mays* L.) seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 2011, 30(8): 1654–1661. doi: 10.13292/j.1000-4890.2011.0247.
- 王玉凤, 薛盈文, 杨克军, 等. NaCl 胁迫对玉米幼苗不同器官离子含量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1654–1661. doi: 10.13292/j.1000-4890.2011.0247.
- [13] DONG F, CAO J, LI X T, et al. Effects of various types of salt stress on ion absorption, accumulation and transportation in pea (*Pisum sativum*) seedlings [J]. *Acta Pratac Sin*, 2016, 25(11): 66–75. doi: 10.11686/cyxb2016019.
- 董放, 曹靖, 李先婷, 等. 不同盐分类型胁迫对豌豆幼苗离子吸收、累积及运输的影响 [J]. *草业学报*, 2016, 25(11): 66–75. doi: 10.11686/cyxb2016019.
- [14] LIE Z Y, LI J, ZHOU T T, et al. Density effect on nutrient content and accumulation of *Michelia chapensis* plantations [J]. *Hunan For Sci Technol*, 2016, 43(1): 44–47. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2016.01.008.
- 列志阳, 李洁, 周彤彤, 等. 密度对乐昌含笑幼苗养分积累的影响 [J]. *湖南林业科技*, 2016, 43(1): 44–47. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2016.01.008.
- [15] ZHANG X, HE K N, SHI C Q, et al. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Tamarix chinensis* and *Nitraria tangutorum* seedlings [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2017, 45(1): 105–111. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.01.015.
- 张雪, 贺康宁, 史常青, 等. 盐胁迫对柽柳和白刺幼苗生长与生理特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 105–111. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.01.015.
- [16] ZHENG X Y, LI P F, XUE L, et al. Studies on salt resistance of three garden species [J]. *J CS Univ For Technol*, 2017, 37(9): 62–67. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.09.011.
- 郑欣颖, 李鹏飞, 薛立, 等. 3种园林植物的抗盐生理研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 62–67. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.09.011.
- [17] CAI J H, DU C L, XUE L, et al. Photosynthetic characteristics of three garden plants in response to salt stress [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2017, 44(2): 272–276. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20170419.002.
- 蔡金桓, 都成林, 薛立, 等. 3种园林植物的抗盐光合特性 [J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(2): 272–276. doi: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20170419.002.
- [18] SHE H J, LI P F, XUE L, et al. Chlorophyll fluorescence of three garden species responses to salt stress [J]. *J CS Univ For Technol*, 2017, 37(8): 54–59. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.08.010.

- 余汉基, 李鹏飞, 薛立, 等. 3 种园林植物响应盐胁迫的荧光特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(8): 54–59. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.08.010.
- [19] LIN M Y, LI D J. Vertical greening design in Guangzhou Haizhu Children's Park [J]. Guangdong Landsc Arch, 2016, 38(3): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2016.03.008.
- 林敏仪, 李定涓. 广州海珠儿童公园立体绿化的景观营造 [J]. 广东园林, 2016, 38(3): 29–32. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2016.03.008.
- [20] WEI Y K, LI Q J, TAN G W. Garden plants landscape construction of four terrains in residential areas of the Pearl River Delta [J]. Guangdong Landsc Arch, 2017, 39(1): 65–70. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2017.01.014.
- 韦怡凯, 李秋静, 谭广文. 珠三角居住区 4 种地形的园林植物景观营造探析 [J]. 广东园林, 2017, 39(1): 65–70. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2017.01.014.
- [21] DENG T F, LIU Y, YANG Q X, et al. Mechanical composition and soil nutrient characteristics and their relationships in typical *Lonicera cinfusa* soil of Guizhou [J]. J Soil Water Conserv, 2014, 28(5): 209–214. doi: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2014.05.037.
- 邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 等. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 209–214. doi: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2014.05.037.
- [22] VICENTE O, BOSCAIU M, NARANJO M Á, et al. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae) [J]. J Arid Environ, 2004, 58(4): 463–481. doi: 10.1016/j.jaridenv.2003.12.003.
- [23] WANG S F, HU Y X, SUN H J, et al. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(4): 1021–1029. doi: 10.5846/stxb201209291363.
- 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021–1029. doi: 10.5846/stxb201209291363.
- [24] LIU Y F, CHEN S L, LI Y C, et al. Effect of long-term flooded conditions on nutrient stoichiometric characteristics of *Phyllostachys rivalis* rhizome roots [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2015, 35(2): 350–355. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2015.02.0350.
- 刘玉芳, 陈双林, 李迎春, 等. 长期淹水对河竹鞭根养分化学计量特征的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(2): 350–355. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2015.02.0350.
- [25] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, NAVEED M, et al. Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize [J]. Funct Plant Biol, 2015, 42(8): 770–781. doi: 10.1071/FP15054.
- [26] LI X T, CAO J, WEI X J, et al. Effect of extended exposure to NaCl stress on the growth, ion distribution and photosynthetic characteristics of malting barley (*Hordeum vulgare*) [J]. Acta Pratac Sin, 2013, 22(6): 108–116. doi: 10.11686/cyxb20130614.
- 李先婷, 曹靖, 魏晓娟, 等. NaCl 渐进胁迫对啤酒大麦幼苗生长、离子分配和光合特性的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22(6): 108–116. doi: 10.11686/cyxb20130614.
- [27] YANG S H, JI J, WANG G. Effects of salt stress on plants and the mechanism of salt tolerance [J]. World Sci Technol Res Dev, 2006, 28(4): 70–76. doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2006.04.012.
- 杨少辉, 季静, 王罡. 盐胁迫对植物的影响及植物的抗盐机理 [J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(4): 70–76. doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2006.04.012.
- [28] ZHAO X, SHI Y, ZHANG J W, et al. Response on *Salsola passerina* seedlings root, stem and leaf's ionic homeostasis under NaCl salt stress [J]. Arid Zone Res, 2014, 31(6): 1086–1092. doi: 10.13866/j.azr.2014.06.16.
- 赵昕, 石勇, 张继伟, 等. 盐胁迫下珍珠猪毛菜根茎叶矿质离子的吸收与分配响应 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1086–1092. doi: 10.13866/j.azr.2014.06.16.
- [29] CAO Q, CAO H S, WEI X L, et al. Effect of salt stress on carbon and nitrogen of microbial biomass and activity of enzyme in greenhouse soil [J]. J Soil Water Conserv, 2015, 29(4): 300–304. doi: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.04.054.
- 操庆, 曹海生, 魏晓兰, 等. 盐胁迫对设施土壤微生物量碳氮和酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 300–304. doi: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.04.054.
- [30] WU D Z, SHEN Q F, CAI S G, et al. Ionomic responses and correlations between elements and metabolites under salt stress in wild and cultivated barley [J]. Plant Cell Physiol, 2013, 54(12): 1976–1988. doi: 10.1093/pcp/pct134.
- [31] MO H B, YIN Y L, LU Z G, et al. Effects of NaCl stress on the seedling growth and K⁺- and Na⁺-allocation of four leguminous tree species [J]. Chin J Appl Ecol, 2011, 22(5): 1155–1161. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0191.
- 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): 1155–1161. doi: 10.13287/j.1001-9332.2011.0191.
- [32] GONG X W, LÜ G H, MA Y, et al. Ecological stoichiometry characteristics in the soil under crown and leaves of two desert halophytes with soil salinity gradients in Ebinur Lake Basin [J]. Sci Silv Sin, 2017, 53(4): 28–36. doi: 10.11707/j.1001-7488.20170404.
- 龚雪伟, 吕光辉, 马玉, 等. 艾比湖流域 2 种典型荒漠盐生植物冠下土与叶片的生态化学计量特征 [J]. 林业科学, 2017, 53(4): 28–36.

- doi: 10.11707/j.1001-7488.20170404.
- [33] ZHOU Q, ZHU Z L. Effects of NaCl stress on seedling growth and mineral ions uptake, distribution and transportation of two varieties of *Carpinus* L. [J]. J Beijing For Univ, 2015, 37(12): 7-16. doi: 10.13332/j.1000-1522.20140043.
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): 7-16. doi: 10.13332/j.1000-1522.20140043.
- [34] GUO Y, SHENG J D, CHEN B L, et al. Study on dry matter accumulation and nutrition absorption of three halophytes under artificial planting condition [J]. Arid Zone Res, 2016, 33(1): 144-149. doi: 10.13866/j.azr.2016.01.18.
郭洋, 盛建东, 陈波浪, 等. 3种盐生植物干物质积累与养分吸收特征 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 144-149. doi: 10.13866/j.azr.2016.01.18.
- [35] GONG J, LÜ N, RU S B, et al. Effects of soil salinity on nutrients and ions uptake in cotton with drip irrigation under film [J]. Plant Nutri Fert Sci, 2009, 15(3): 670-676. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2009.03.027.
龚江, 吕宁, 茹思博, 等. 滴灌条件下盐分对棉花养分及盐离子吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 670-676. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2009.03.027.
- [36] CHENG X Q, HAN H R, KANG F F. Biomass, carbon accumulation and its partitioning of a *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Shanxi Province, China [J]. Chin J Ecol, 2012, 31(10): 2455-2460. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0355.
程小琴, 韩海荣, 康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2455-2460. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0355.
- [37] WEN S Z, WANG C Y, YANG L L, et al. Seasonal variation, distribution and biological cycling of nutrient element of plantation in *Alnus cremastogyne* [J]. J Soil Water Conserv, 2012, 26(6): 96-101. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2012.06.058
文仕知, 黄采艺, 杨丽丽, 等. 桤木人工林营养元素的季节动态、空间分布与生物循环研究 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 96-101. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2012.06.058.