

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第4期 Vol.34 No.4 **2014**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 4 期      2014 年 2 月      (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展 ..... 叶琳琳,孔繁翔,史小丽,等 (779)
- 黄河下游平原农业景观中非农生境植物多样性 ..... 卢训令,梁国付,汤 茜,等 (789)

### 个体与基础生态

- 锰胁迫对杠板归细胞超微结构的影响 ..... 王 钧,邬 卉,薛生国,等 (798)
- 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累 ..... 吴 川,莫竞瑜,薛生国,等 (807)
- 弱光下水分胁迫对不同产地披针叶茴香幼苗生理特性的影响 ..... 曹永慧,周本智,陈双林 (814)
- 不同分枝数对桑树幼苗生长发育的影响 ..... 郇慧慧,胥 晓,刘 刚,等 (823)
- 斑膜合垫盲蝽若虫在国槐上的空间分布型及抽样技术 ..... 朱惠英,沈 平,吴建华,等 (832)
- 连作苹果园土壤真菌的 T-RFLP 分析 ..... 尹承苗,王功帅,李园园,等 (837)
- 棉隆对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响 ..... 刘恩太,李园园,胡艳丽,等 (847)
- 两株具有芫降解功能的植物内生细菌的分离筛选及其特性 ..... 孙 凯,刘 娟,李 欣,等 (853)

### 种群、群落和生态系统

- 温度对柑橘始叶螨实验种群生长发育繁殖的影响 ..... 李迎洁,王梓英,张国豪,等 (862)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响 ..... 贾婷婷,毛 亮,郭正刚 (869)
- 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析 ..... 赵学春,来利明,朱林海,等 (878)
- 岷江干旱河谷造林对土壤微生物群落结构的影响 ..... 王卫霞,罗 达,史作民,等 (890)
- 滩涂围垦和土地利用对土壤微生物群落的影响 ..... 林 黎,崔 军,陈学萍,等 (899)
- 福寿螺对稻田水生植物群落结构的影响 ..... 赵本良,章家恩,戴晓燕,等 (907)
- 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果 ..... 陈永华,吴晓芙,郝 君,等 (916)
- 基于静态箱式法和生物量评估海北金露梅灌丛草甸碳收支 ..... 李红琴,李英年,张法伟,等 (925)
- 初始 pH 值对碱性和酸性水稻土微生物铁还原过程的影响 ..... 吴 超,曲 东,刘 浩 (933)

### 景观、区域和全球生态

- 库姆塔格柽柳沙包年层稳定碳同位素与气候环境变化 ..... 张锦春,姚 拓,刘长仲,等 (943)

### 资源与产业生态

- 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子 ..... 张大龙,常毅博,李建明,等 (953)
- 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征 ..... 赵 昕,杨小菊,石 勇,等 (963)
- 普通鹿蹄草品质与根际和非根际土壤的关系 ..... 耿增超,孟令军,刘建军 (973)

作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析 ..... 方 斌,吴金凤 (983)

### 城乡与社会生态

城市河流健康评价指标体系构建及其应用 ..... 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等 (993)

西藏生态足迹与承载力动态分析..... 安宝晟,程国栋 (1002)

### 研究简报

三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征 ..... 马 朋,李昌晓,雷 明,等 (1010)

盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响..... 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等 (1021)

恒温和变温驯化对大蟾蜍蝌蚪热耐受性的影响 ..... 王立志 (1030)

### 学术信息与动态

国际生物土壤结皮研究发展态势文献计量分析..... 贺郝钰,侯春梅,迟秀丽,等 (1035)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 264 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-02



**封面图说:** 大蟾蜍蝌蚪群——大蟾蜍别名癞蛤蟆,体长达 10cm 以上,身体肥胖,四肢短,步态及齐足跳的姿势具特征性。其背部皮肤厚而干燥,通常有疣,呈黑绿色,常有褐色花斑,趾间具蹼。毒腺在背部的疣内,受惊后毒腺分泌或射出毒液。大蟾蜍早春在水中繁殖,可迁移至 1.5km 外或更远的适合繁殖的池塘,产卵量很大,产卵数天后蝌蚪即可孵出,1—3 个月后发育为蟾。大蟾蜍常作为实验动物或药用动物,其耳后腺和皮肤腺的白色分泌物可制成“蟾酥”,可治疗多种疾病。研究表明,大蟾蜍蝌蚪最高逃避温度和最高致死温度比最适温度产生的影响要大。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210091392

赵昕, 杨小菊, 石勇, 何明珠, 谭会娟, 李新荣. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征. 生态学报, 2014, 34(4): 963-972.  
Zhao X, Yang X J, Shi Y, He M Z, Tan H J, Li X R. Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 963-972.

## 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的 根茎叶中离子吸收与分配特征

赵 昕\*, 杨小菊, 石 勇, 何明珠, 谭会娟, 李新荣

(沙坡头沙漠试验研究站, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

甘肃省寒区旱区逆境生理生态重点实验室, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**西北荒漠地区 C<sub>3</sub> 小灌木红砂 (*Reaumuria soongorica*) 和 C<sub>4</sub> 半灌木珍珠猪毛菜 (*Salsola passerina*) 在特定环境下混生在一起, 分布面积广阔。以采自腾格里沙漠边缘荒漠地带的天然野生珍珠猪毛菜和红砂群落的幼苗为材料, 经 0、100、200、300、400 mmol/L NaCl 盐溶液共同胁迫 10 d, 检测它们的含水量、主要矿质离子在根茎叶的含量与分布, 揭示二者耐盐的共生协同的离子平衡适应机制。试验结果发现, 珍珠猪毛菜叶片具有“吸钾排钠的”的耐盐特征, 红砂叶片具备“吸钠排钾”的特征, 吸收利用无机矿质离子具备互补效应。二者耐盐 Cl、Ca 和 Si 离子吸收与累积能力存在很大差异: 随着盐胁迫程度加剧, 红砂的根茎叶中 Cl 离子含量持续增加, 并且为珍珠猪毛菜的 2—5 倍; 珍珠猪毛菜根中 Ca 离子含量为红砂的 2—3 倍, 但含量变化不显著; 红砂根中 Si 离子含量迅速降低后稳定, 并且是珍珠猪毛菜根的 3—5 倍, 其他器官变化差异较小。因此, 红砂与珍珠猪毛菜的共培养盐胁迫下根中吸收的离子侧重不同, 红砂以 Na、Cl、Si 为主, 珍珠猪毛菜以 K、Ca 为主。随着盐胁迫的程度加强, 离子选择吸收系数  $S_{k,Na}$  的变化趋势降低, 表明二者叶部对 Na 的选择性减小, K 的选择性吸收积累增大, 增强了它们的抗盐性, 最终使叶片所受盐害减小。总之红砂与珍珠猪毛菜共生的耐盐离子稳态机制显著不同, 离子吸收与分布具有互补互利的效应。

**关键词:**盐胁迫; 红砂; 珍珠猪毛菜; 离子; 吸收与分配

### Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress

ZHAO Xin\*, YANG Xiaojun, SHI Yong, HE Mingzhu, TAN Huijuan, LI Xinrong

Key Laboratory of Stress physiology and Ecology, Gansu Province; Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences (LPSEB CAREERI, CAS), Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Wild C<sub>3</sub> plant *Reaumuria soongorica* and C<sub>4</sub> plant *Salsola passerina* coexist mutually in some desert habitats and form large-scale communities distributed in northwestern China. In this study we collected their seedlings from the edge of the Tengger desert. Their seedlings were subjected to salt stress together by soaked in 0, 100, 200, 300 to 400 mmol/L NaCl solutions for 10 d. We examined their water contents and main mineral ion contents changes in their roots, stems, and leaves during salt stress. The experiment results indicated that *S. passerina* absorbed K and inhibited Na in leaves to adapt to high salt stress as NaCl concentration increased. By on the contrary, *R. soongorica* absorbed Na and inhibited K. Cl in its roots continuously increased two to five times higher than that in *S. passerina*'s roots. Ca content in *S. passerina* roots was two to three times higher than that in *R. soongorica* roots. Si content in *R. soongorica* roots was three to five times higher than that in *S. passerina*. Therefore, salt stress resistance in *R. soongorica* and *S. passerina* communities occurred via root

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30770343, 31000181)

收稿日期: 2012-10-09; 修订日期: 2013-06-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaox@lzb.ac.cn

absorption of different ions, and these ions were subsequently distributed to various organs. Based on salt ion selective absorption coefficient  $S_{Na(leaf/root)/K(leaf/root)}$  ratio value, the two plants foliar selectivity increased K absorption and decreased Na absorption, thereby reducing salt damage on the leaves. Thus, these plants mutually benefit from each other and cooperate to promote their resistance to salt stress.

**Key Words:** salt stress; *Reaumuria soongorica*; *Salsola passerina*; ion; absorption and distribution

土壤盐渍化是限制农作物生长、发育和产量最严重的非生物胁迫之一,而且随着水资源的日趋减少、化肥的大量应用和工业污染的加重,干旱和盐害越来越严重,全球 20% 的耕地和近半数的灌溉土地都不同程度地受到了盐害的影响。开展对盐渍土地的改造和利用主要采取两种措施:一是通过工程措施来改良土壤盐碱;虽然取得了一定效果,但是由于耗资巨大,并且治理效果难以长久保持;二是开展生物治理和开发利用,通过生物技术的手段培育耐盐的作物品种或是基因工程的手段对一些本身具有优质、高产的作物品种加以改造赋予其耐盐的特性,最终达到改良和利用盐碱地的目的<sup>[1]</sup>。

目前对植物抗盐机理的研究已经成为基础植物生物学的重要组成部分。而近年来大量生物化学和分子生物学实验技术手段(如功能基因组学、蛋白组学、蛋白互作分析、转基因技术等)的应用,使人们对植物抗盐性的研究逐步深入到了分子水平,对植物与盐胁迫之间的关系有了更深的认识<sup>[2]</sup>。目前主要研究成果多局限在拟南芥、水稻等模式植物上,而大量荒漠、沙生植物生长在极端恶劣的环境中,多数为超旱生、盐生荒漠半灌木或小灌木,对维护荒漠生态环境稳定性具有不可替代的作用,有关它们的抗逆机制的研究较少。它们在亿万年的进化过程中,形成了很多特有的抗逆机制,为深入开展抗逆生理生化、分子生物学研究提供了宝贵资源。

珍珠猪毛菜为藜科猪毛菜属的植物。半灌木,高 15—30 cm,植株密生丁字毛,自基部分枝;老枝木质,灰褐色,伸展;小枝草质,黄绿色,短枝缩短成球形。属于  $C_4$  植物,分布于蒙古以及中国大陆的宁夏、内蒙古、青海、甘肃等地,生长于海拔 2600 m 至 3200 m 的地区,常生长在山坡或砾质滩地,目前尚未由人工引种栽培。西部荒漠地区常与  $C_3$  植物红砂相伴混合形成红砂-珍珠群落。早在 1983 年刘家琼<sup>[3]</sup>研究了珍珠猪毛菜超旱生的形态解剖学特征。珍珠猪毛菜具有一系列的抗旱性特征。珍珠叶子密

被表皮毛(图 1)、表皮细胞的叶子肉质化、气孔深而中空、蓄水组织发达,未发现泌盐特征。在整个生长季节,保持非常低水势(-49.94bar),总水束缚水含量非常高(310.0%—300.7%的干重),束缚水/自由水比值非常高,甚至达 15.04。达到水势平衡状态需要 369 h。其蒸腾速率很低(683.8—1649.3  $\text{mg h}^{-1} \text{g}^{-1}$ 干重)。这些数据显示珍珠高度适应极端环境,因此珍珠在沙漠地带广泛分布。其他研究内容局限在珍珠猪毛菜群落土壤异质性<sup>[4-5]</sup>、放牧耐受强度<sup>[6]</sup>、有效活性成分<sup>[7]</sup>、ISSR 分子标记的遗传多样性研究等<sup>[8]</sup>。而其抗旱耐盐的程度与内在调控机制尚未有详细的研究与报道。根据前人研究成果,珍珠猪毛菜叶片肉质化,液泡巨大,其为稀盐盐生植物,通过将盐离子聚集在液泡中,使其他原生质体、叶绿体、线粒体免受盐离子毒害,为其独特的离子区隔化机制,进而质膜和液泡膜蛋白必然参与了离子转运、外排的调控。这些推测假设都需要进一步研究验证。

红砂又名琵琶柴,是我国温带荒漠、草原化荒漠和荒漠草原地区主要的植被类型之一。我国产 4 种 2 变种,在西北、内蒙高原和东北平原的荒漠、荒漠草原及草原中占有显著地位,成为该地带植被中的主要建群种、共建种和主要伴生种。它东自鄂尔多斯西部,经阿拉善、河西、山北地区、柴达木盆地,西到准噶尔盆地和塔里木盆地边沿,生于海拔 500—3200 m 的山地丘陵、剥蚀残丘、山麓淤积平原,山前砂砾和砾质洪积扇。红砂属植物均生活在荒漠中,其生态型适应了温带酷热、干旱、大风及强烈的太阳辐射,年降水量在 100—250 mm 的生境条件,在该条件下形成的植株高度在 20—40 cm 之间。正是由于红砂在荒漠化草原和草原化荒漠区的广泛分布而具有重要的生态保护作用、经济价值和用途,特别近年来,随着我国高度重视和加强荒漠化治理和生态建设,对红砂的研究工作越来越受到重视<sup>[9-10]</sup>。

红砂的抗旱耐盐机制研究已经很多了。刘家琼等<sup>[9]</sup>对红砂和其它中生、旱生植物对比测试发现,红

砂的水势最低;自由水含量仅为 4.37%,束缚水/自由水比值最高,水分亏缺高达 45.85%,证明红砂保水能力极强,表现出对严酷生境的高度适应。红砂成熟植株当叶片水势下降到 $-1.3\text{ MPa}$ 时,叶片死亡并随后脱落,但茎中仍然保持光合作用能力。随后植物进入休眠状态,复水后茎复活植株又长出新叶。因此,红砂具有剪去叶片而减少水分丢失并维持茎细胞的活力来度过极端干旱的能力<sup>[10]</sup>。马茂华等<sup>[11]</sup>和赵可夫<sup>[1]</sup>等认为,红砂是多细胞盐腺型结构的泌盐植物;红砂富集 K、Na、Cl 和  $\text{SO}_4^{2-}$  等离子。作为植物抗逆性(旱、盐、冻等)指标的脯氨酸含量高达 0.32%,明显高于同一生境的其它 8 种盐生植物。李小明<sup>[12]</sup>、黄培佑等<sup>[13]</sup>、崔大方<sup>[14]</sup>、顾峰雪<sup>[15]</sup>以电导率、易溶性盐含量、pH 值作为盐渍化程度的指标,研究表明,红砂建群或共建群落主要分布在总盐量 0.5%—2.0%、电导率 1.7—5.5 ms/cm、pH 值 7.5—9.5 的微碱性中盐渍土-碱性强盐渍土上。李景平等<sup>[16]</sup>对红砂体内主要渗透调节物质的含量及其分配特征的研究表明:Na 含量最高,还原糖的含量最低,其余介于两者之间。渗透调节物质对渗透调节的贡献平均趋势分别为:地上部分  $\text{Na}>\text{K}>\text{Mg}>\text{Ca}>$ 可溶性总糖>脯氨酸>还原糖,地下部分  $\text{Na}>\text{K}>\text{Ca}>$ 可溶性总糖>Mg>脯氨酸>还原糖,其中以 Na 对渗透调节的贡献最大。主要渗透调节物质在植物体内的分配基本趋势为地上部分大于地下部分,总含量平均地上部分为地下部分的 2.5 倍。通过电镜照片证实红砂叶片的泌盐特性(图 2)。

自然界中红砂群落和珍珠群落常镶嵌分布,由红砂和珍珠所组成的植物群落在自然地理上是相当重要的,已故的著名植物学家刘慎谔教授曾将由红砂和珍珠组成的超旱生小半灌木层片所形成的植物群落作为中国荒漠东部和荒漠草原区中的顶级植物群落。腾格里沙漠边缘  $\text{C}_3$  植物红砂与  $\text{C}_4$  植物珍珠猪毛菜共生并且形成大规模群落分布,必然存在一些生理生态学适应机制<sup>[17-19]</sup>。尤其是二者同为超旱生、盐生植物,它们可能存在相互依存、互利互惠的抗逆协调机制;珍珠猪毛菜耐盐性是否具有“吸钾拒钠”机制?而红砂发现有“吸钠排钾”的现象,它们二者是否有共生的互利互惠的效应。因此深入研究珍珠猪毛菜耐盐机制及其与红砂共生理,对为进一步了解珍珠猪毛菜的适应能力和适应机制,以及

深入探讨干旱区荒漠植被群落的稳定性维持机制具有重要的科学价值和广泛的实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 珍珠猪毛菜与红砂共生群落自然气候特征

腾格里沙漠东南缘海拔约 1339 m,属草原化荒漠,也是荒漠与草原的过渡区域。该区天然植被覆盖度仅约为 1%。格状新月形沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布,主梁呈新月形沙丘链,相对高差 15—20 m。在气候上受蒙古高压的影响,加之地势高(海拔 1200—1300m),经常遭受西北寒风的袭击;东南又有秦岭、六盘山之阻,湿润的季风难以深入,因此,在气候上具有寒冷、干燥、多风的特点。年平均气温  $10.6\text{ }^\circ\text{C}$ ;1 月平均气温最低,为 $-6.3\text{ }^\circ\text{C}$ ;7 月平均气温最高,为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。绝对最高气温  $38.1\text{ }^\circ\text{C}$ ;绝对最低气温 $-25.1\text{ }^\circ\text{C}$ ;沙面最高温度达  $74\text{ }^\circ\text{C}$ 。大于  $10\text{ }^\circ\text{C}$  积温  $3017\text{ }^\circ\text{C}$ ,起止日期为 5 月 10 日—9 月 28 日。初霜期出现在 9 月下旬,终霜期在 4 月中旬,植物生长期为 150—180 d。平均降水量  $180.2\text{ mm}$  (1955—2005),降水年变幅大。最多年降水(1978 年)达  $495.8\text{ mm}$ ,最少年降水(2005 年)仅  $88.3\text{ mm}$ ,年较差达  $407.5\text{ mm}$ 。在季节分配上,以夏季(6—8 月)降水为主,占年降水总量的 57.2%;冬季(12 月—翌年 2 月)仅占 3.9%;生长季节(4—10 月)降水量占 91.4%。年潜在蒸发量高达  $3000\text{ mm}$  以上,为降雨量的 20 倍左右。相对湿度低,平均 40%左右,空气相当干燥。流沙地未生长植物的沙层稳定含水量为 2—3%,凋萎含水量 0.6%,可供植物利用的水 1.4%—2.4%。地下水埋深 80 m,不能为植物直接利用,降雨成为该区植物生长的唯一水分来源<sup>[20]</sup>。

### 1.2 珍珠猪毛菜和红砂幼苗栽培方法

珍珠猪毛菜和红砂幼苗采自甘肃省景泰县孟家湾村的腾格里沙漠边缘荒漠地带(图 3)。将生长大小长势均一的多年生幼苗挖出,移栽到室内培养间。培养间栽培条件为保持在  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下 16 h 光照、 $16\text{ }^\circ\text{C}$  8 h 黑暗的昼夜循环。光照强度为  $300\text{ }\mu\text{mol 量子 m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。二者都栽种在蛭石为 3:1 的土壤中生长期 10 d,之后培养在不同盐浓度溶液中进行胁迫处理。

### 1.3 植株盐胁迫处理

盐胁迫处理,按照 Volkov<sup>[21]</sup>的方法对珍珠猪毛菜和红砂植株共同盐溶液胁迫。将高 20cm 左右植

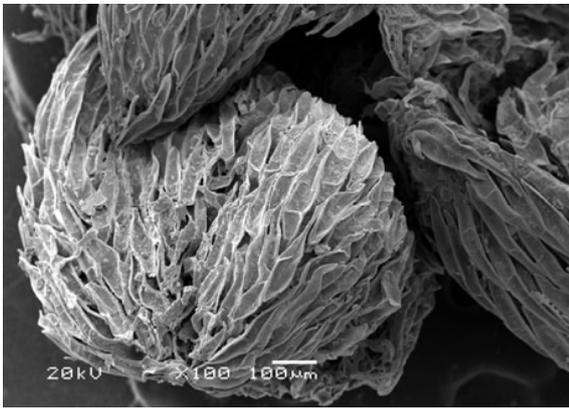


图1 盐胁迫下珍珠猪毛菜叶表面密被表皮毛(100×扫描电镜图)

Fig.1 *Salsola passerina* leaves surface densely covered with epidermal hair (100× Scanning electron micrograph)

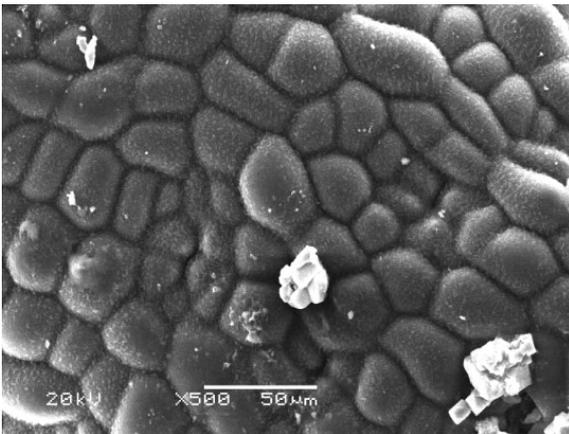


图2 红砂叶表面盐腺分泌出盐结晶(500×扫描电镜图)

Fig.2 *Reaumuria soongorica* leaves surface salt crystallization secreted from salt gland cells (500 × scanning electron micrograph)



图3 珍珠猪毛菜与红砂共生灌丛

Fig.3 *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* Symbiotic scrubs

株从土壤中挖出,用蒸馏水小心冲洗掉根上黏附的土,将两者植株按照 1:1 的比例共两株一起放入塑料水桶(直径 30 cm,深 50 cm)内,同时进行营养液培养一段时间(1/2MS 营养液配置盐溶液)。保持幼苗根部浸泡在培养液中,用加氧泵在培养液中通入充足的空气。采用逐渐增加盐浓度的方法,每隔 1d 增加 100 mmol/L 的办法逐渐增强盐浓度,直至 0、100、200、300、400 mmol/L 的 NaCl 胁迫终浓度。然后保持盐溶液胁迫持续 10 d。每组处理 3 个重复。

#### 1.4 植株含水量测定

在 NaCl 溶液处理 10 d 后,收获全部植株,用蒸馏水洗干净根系泥土和盐水后放在吸水纸上吸干植株表面水分,将植株分成根系、茎和叶,分别称其植株的鲜重(FW)后放入烘箱,经 105 °C 杀青 10 min,80 °C 烘干至恒重,称其各部分的干重(DW),计算出植物含水量(WC):

$$\text{含水量(WC, \%)} = (\text{FW} - \text{DW}) / \text{FW} \times 100\%$$

#### 1.5 珍珠猪毛菜和红砂根茎叶主要离子含量测定

将烘干至恒重的样品用玛瑙研钵研磨粉碎混匀。称取植物样品 0.2g 放入消解管中(内罐),加入 65%—68% 的硝酸溶液 8mL,静置 10min 左右,盖上扩好的密封盖,手动拧紧排气螺杆。然后将消解罐放入到保护杯内(外罐)并盖好,把转子放入 Multiwave 3000 微波消解仪内,密闭微波消解。消解结束定容液体样本,利用 Optima 7000DV 电感耦合等离子体发射光谱仪分析消解完全且定容好的样品。测定条件为微型矩管,轴向观测,氦气气压 0.7MPa,高频功率 1.2 kW,等离子体流量 15 L/min,载气流量 0.80 L/min,辅助气体流量 0.20 L/min,样品流量 1.5L/min,循环冷却水 20°C 50Psi。试剂为硝酸(优级纯),30%过氧化氢。1.000 g/L 钠、氯、钾、钙、硅标准溶液由上海市计量测试技术研究院提供。本实验用水皆为纯水。

#### 1.6 数据处理

采用 Oneway ANOVA 方法比较均值之间的差异,若差异显著,则采用 Turkey's test 进行多重比较( $P = 0.05$ )。利用 Origin 8.0 软件完成所有统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 NaCl 胁迫对珍珠猪毛菜和红砂植株

### 含水量的影响

如图 4 所示,红砂植株的含水量随着 NaCl 盐浓度的增加,从 0 到 300 mmol/L 含水量变化不显著,而珍珠猪毛菜在盐浓度增加到 100 mmol/L 时,含水量先增加,差异显著,随后随着盐浓度的增加迅速降低,差异显著。可能由于珍珠猪毛菜的肉质化程度高,未胁迫前含水量高于红砂植株,盐胁迫后失水较快,而红砂植株叶片松针状,肉质化程度低本身含水量较低,因而含水量变化不大。

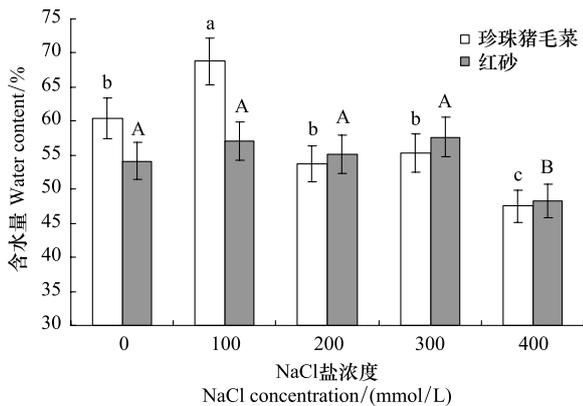


图 4 不同浓度的 NaCl 胁迫对红砂与珍珠猪毛菜植株含水量的影响

Fig.4 Changes of water content on Reaumuria and Salsola plant under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

### 2.2 Na 在不同浓度 NaCl 胁迫下珍珠猪毛菜和红砂植株根茎叶中的分布

如图 5 所示,随着 NaCl 盐浓度的增加,Na 离子在红砂的根茎叶中持续增加,差异显著。但是珍珠猪毛菜的钠离子在根中与红砂的变化相同,持续增加;茎中开始有变化,100 mmol/L 前增加,200 mmol/L 之后开始降低,差异显著;叶中 100 mmol/L 之后持续降低,表现出排出 Na 离子的特征(图 5)。

### 2.3 K 在不同浓度 NaCl 胁迫下珍珠猪毛菜和红砂植株根茎叶中的分布

如图 6 所示,随着 NaCl 盐浓度的增加,K 离子含量在红砂的根茎叶中持续降低,高浓度胁迫处理间差异不显著。但是珍珠猪毛菜的根茎中持续降低,处理间差异不显著。叶中转变为持续增加,差异显著(图 6)。综合图 5 与图 6 结果,表明珍珠猪毛菜具有“吸收钾排出钠的耐盐特征,而红砂具备吸收钠

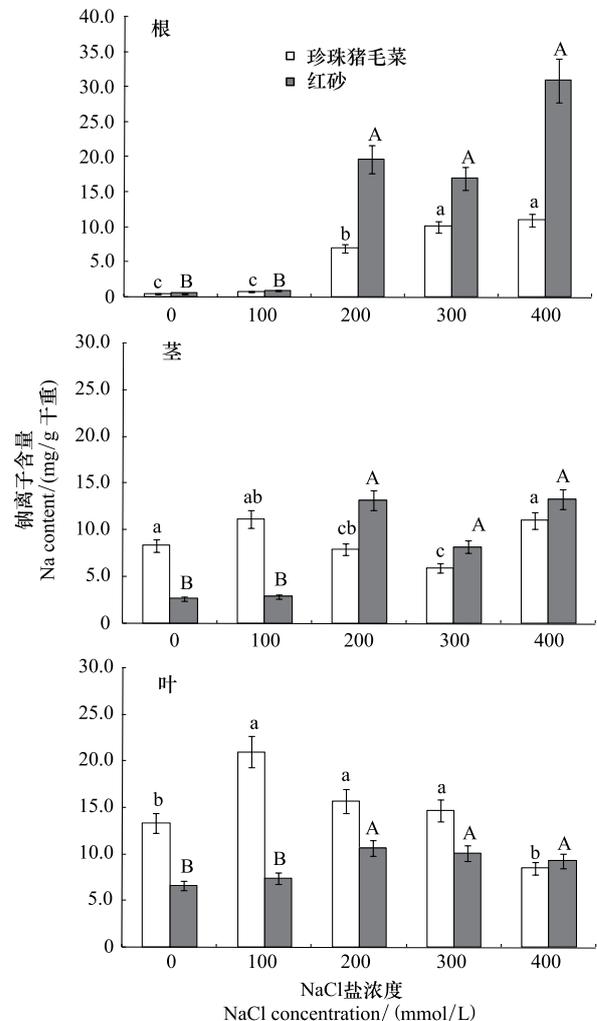


图 5 NaCl 盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜根、茎、叶中钠离子含量的影响

Fig.5 Changes of Na content in Reaumuria and Salsola Root, Stem and Leaf under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

排出钾的特征。

### 2.4 Cl 在不同浓度 NaCl 胁迫下珍珠猪毛菜和红砂植株根茎叶中的分布

如图 7 所示,随着 NaCl 盐浓度的增加,Cl 离子含量在红砂的根中持续增加,为珍珠猪毛菜的 2—5 倍,差异显著。0—200 mmol/L 浓度下茎叶继续增加,大于 200 mmol/L 浓度 Cl 含量降低,差异显著。但是珍珠猪毛菜中 Cl 离子含量远远低于红砂植株中的,表现为根中增加,茎中持平,叶中降低的动态趋势,差异显著(图 5)。表明红砂积累 Cl,珍珠猪毛菜排出 Cl 的互利效应。

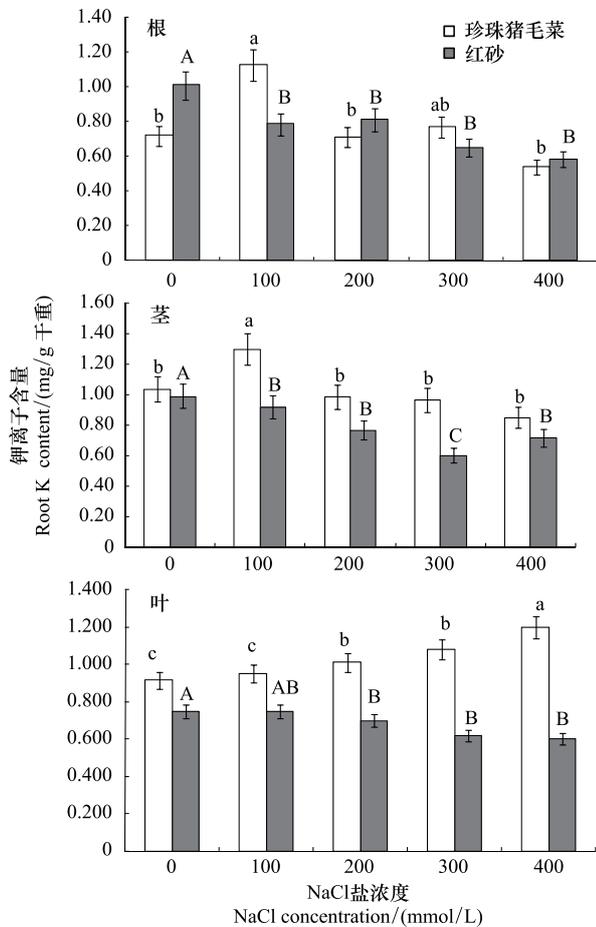


图6 NaCl 盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜根、茎、叶中钾离子含量的影响

Fig.6 Changes of K content of Reaumuria and Salsola Root, Stem and Leaf under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

2.5 Ca 在不同浓度 NaCl 胁迫下珍珠猪毛菜和红砂植株根茎叶中的分布

如图 8 所示,随着 NaCl 盐胁迫程度增强,红砂珍珠猪毛菜中 Ca 含量变化趋势相同。图 6 中看出珍珠猪毛菜根中 Ca 离子含量为红砂的 2—3 倍,变化差异不显著。而茎叶中含量变化趋势相似,以 200 mmol/L NaCl 浓度为转折点,含量先降低然后又升高的特征。

2.6 Si 在不同浓度 NaCl 胁迫下珍珠猪毛菜和红砂植株根茎叶中的分布

如图 9 所示,随着 NaCl 盐浓度的增加,图 9 红砂的根中 Si 含量迅速降低然后稳定变化不大,差异不显著;珍珠猪毛菜根中 Si 略有上升,差异不显著。而且红砂的根中 Si 含量是珍珠猪毛菜的 3—5 倍。

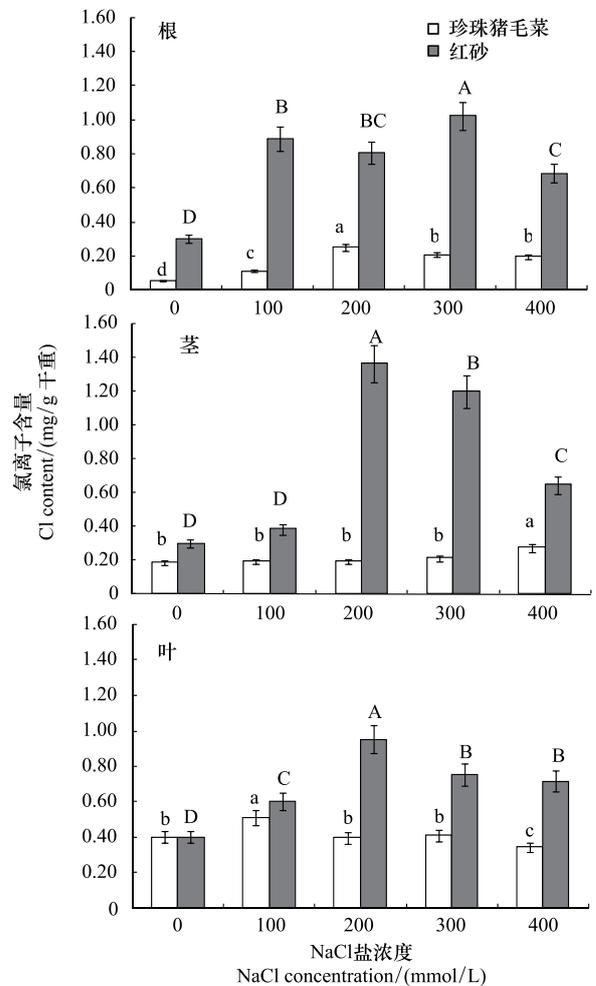


图7 NaCl 盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜根、茎、叶中氯离子含量的影响

Fig.7 Changes of Cl<sup>-</sup> content of Reaumuria and Salsola Root, Stem and Leaf under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

图 7 中红砂与珍珠猪毛菜的 Si 含量都是先增加后降低的趋势,差异显著;珍珠猪毛菜叶的 Si 含量没有明显变化,红砂的叶的 Si 含量变化也不明显,只是在最高浓度时有降低。显示出 Si 离子通过增强茎中含量参与二者抗盐作用。

2.7 盐胁迫对红砂与珍珠猪毛菜不同器官矿物质离子选择性吸收和运输能力的影响

如图 10 所示,随着 NaCl 盐浓度的增加,红砂与珍珠猪毛菜的 K/Na 表现出截然相反地趋势,珍珠猪毛菜增强,红砂降低。珍珠猪毛菜叶片吸钾排钠,红砂叶片吸钠排钾,差异明显。

图 11 中随着 NaCl 盐浓度的增加,红砂与珍珠猪毛菜的  $S_{Na(叶/根)/K(叶/根)}$  的比值迅速降低,其中珍珠

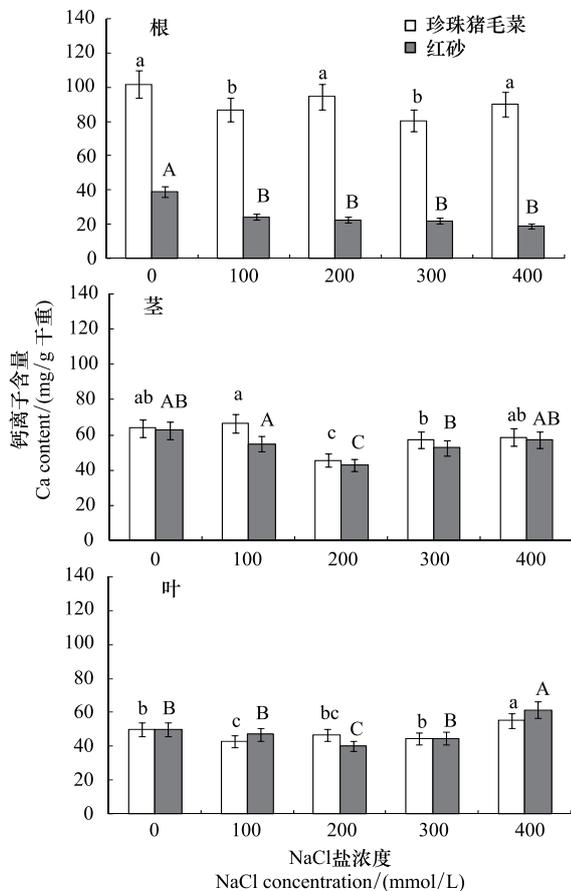


图8 NaCl盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜根、茎、叶中钙离子含量的影响

Fig.8 Changes of Ca content of Reaumuria and Salsola Root, Stem and Leaf under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

猪毛菜的下降幅度比红砂的更大。 $S_{Na,K} = Na$  (叶/根)/ $K$  (叶/根)<sup>[30]</sup>,  $S_{Na,K}$  可反映盐分胁迫下植物体对  $K$ 、 $Na$  的吸收和向上运输的选择性, 并认为  $S_{Na,K}$  值越大, 植物体地上部对  $Na^+$  的选择性越大, 则植物抗盐性越小, 所受盐害越大。意味着  $NaCl$  盐胁迫下红砂与珍珠猪毛菜的叶部对  $Na$  的选择性减小,  $K$  的选择性吸收积累增大, 增强了植物的抗盐性, 最终使植物所受盐害减小。因此珍珠猪毛菜的  $K$  的选择性吸收更强, 比红砂的耐盐性更强。

### 3 讨论

近年来关于珍珠猪毛菜与红砂混合灌丛的共生机制报道不多。多年来沙坡头站的科学家<sup>[22-23]</sup> 研究发现它们都可以在极低的水势条件下保证其生命活动, 低的水势可能与渗透调节物质(如大量的脯氨

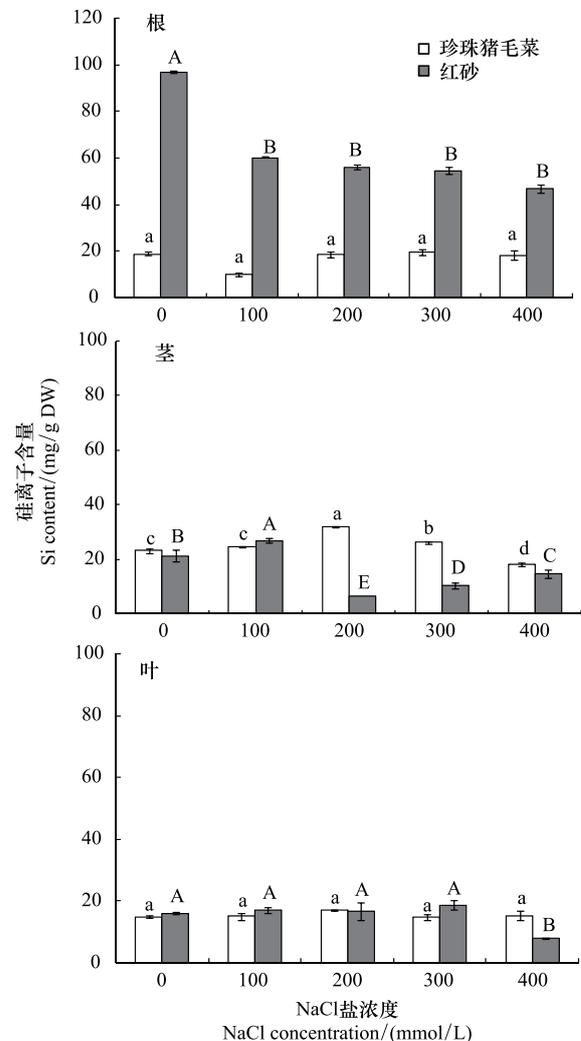


图9 NaCl盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜根、茎、叶中硅离子含量的影响

Fig.9 Changes of  $Si^+$  content of Reaumuria and Salsola Root, Stem and Leaf under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

酸)的存在有关, 这类物质增加了植物的吸水能力; 红砂和珍珠的光抑制程度较其他沙生植物要高得多, 且光抑制的产生已对两种灌木光合色素产生了破坏, 然而在条件稍好的早晚光抑制可得到恢复。苏培玺<sup>[24]</sup> 研究  $C_3$  与  $C_4$  植物共生耐旱机制发现, 红砂的净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $E$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 均要高于珍珠; 而珍珠的水分利用效率 ( $WUE$ ) 则要高于红砂。红砂通过维持较高净光合速率和较高蒸腾速率来生存; 而珍珠则通过高水分利用效率生存。表明珍珠和红砂在水分匮乏的荒漠生境下采取了不同的生存策略。那么红砂与珍珠猪毛菜耐盐性机制是否也具备类似不同机制? 本文的试验结果表明红

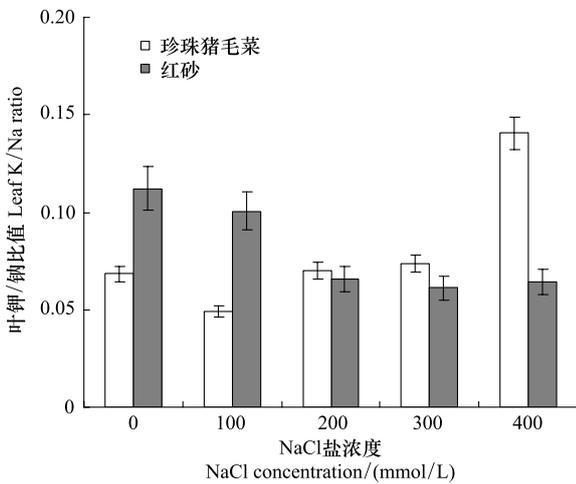


图 10 NaCl 盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜 K/Na 比值的影响  
 Fig.10 Changes of K/Na ratio of Reaumuria and Salsola under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

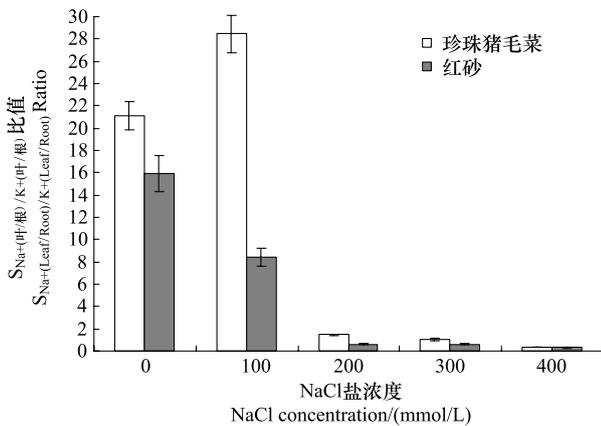


图 11 NaCl 盐胁迫对红砂珍珠猪毛菜  $S_{Na(叶/根)}/K(叶/根)$  比值的影响  
 Fig.11 Changes of  $S_{Na(leaf/root)}/K(leaf/root)$  ratio of Reaumuria and Salsola under NaCl stress

相同颜色的柱子上标有不同字母者表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著

砂与珍珠猪毛菜根系的 Na、红砂叶中 Na、红砂的根中的 Cl、珍珠猪毛菜根中的 Ca 等离子大量积累,都可能参与了抵抗盐胁迫的降低水势与渗透调节作用,并且二者侧重不同器官积累不同元素的策略。同时与李景平等<sup>[16]</sup>对红砂体内主要渗透调节物质的含量及其分配特征的结果  $Na^+$  含量最高的结论相一致。

叶片扫描电镜图片可以看到表面密被表皮毛,

没有明显的盐离子析出,未发现泌盐结构(图 1)。虽然猪毛菜属的大部分种类柴达木猪毛菜、青海猪毛菜、刺沙蓬和蔷薇猪毛菜都为泌盐盐生植物,但是通过电镜观测始终未发现珍珠猪毛菜叶表面的盐结晶和盐腺结构。可知珍珠猪毛菜有别于其他同属植物的独特耐盐机制,其为典型的稀盐盐生植物。而红砂由于具备盐腺结构(图 2),可以直接将盐离子排出叶表面,因此积累叶片大量 Na 盐也没有影响其正常生长(图 2)。属于典型超旱生盐生植物。从组织器官功能来看,珍珠猪毛菜具备叶细胞液泡的吸收和区域化耐盐机制。而红砂叶片不仅趋于肉质化,而且特化的泌盐组织结构更加强了它的耐盐性主动性。

Na 在  $C_4$  植物光合作用的一些生化反应中为必需微量元素,Cl 是植物的光合作用中水的分解的必需微量元素<sup>[25-26]</sup>。珍珠猪毛菜为典型  $C_4$  藜科植物,其生理代谢过程中是否如其他盐生植物丙酮酸向磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)的转化必需 Na,以及 Cl 是否参与光合作用等有待于进一步试验证实。

一般来说对 K 的选择性吸收和对其向地上部分的运输能力反映了植物的耐盐性强弱。K/Na 比已经成为植物耐盐性的重要指标。试验结果表明珍珠猪毛菜叶片中 K/Na 比值升高,“吸钾排钠”的特征显著,显示很强的耐盐性。但是红砂反其道而为之,叶片中 K/Na 比值随胁迫程度加剧而降低,表现为“吸钠排钾”特征,显示红砂有别于珍珠猪毛菜的重要耐盐机制,显然二者盐离子吸收作用具备选择性互利效应。

盐离子的区隔化作用是盐生植物维持细胞内的离子平衡的途径之一<sup>[27]</sup>。陈少良<sup>[28]</sup>研究发现,盐胁迫下胡杨改变了 Cl 在体内的分配模式,降低了 Cl 在叶片的分配比例,而将相对较多的 Cl 积累在根系中,有利于使根细胞水势下降,以保证水分吸收,是胡杨适应盐胁迫的主要机制。本实验中盐胁迫下 Cl 含量与 Na 含量在植株各器官的分配不一致,Cl 在根和茎中的含量几乎大于叶片,红砂根系保持较高 Cl 浓度,既可以保持根部较低的水势,有利于根系吸收水分,也减少了盐离子在叶片积累造成的伤害。研究结果表明红砂和珍珠猪毛菜的根都积累大量 Na,是它们共同的耐盐特征。而珍珠猪毛菜根茎叶积累 Cl 远远低于红砂,显示了他们离子区隔化作

用的差别。

贾晓红等<sup>[17]</sup>野外针对特格里沙漠植被格局的研究发现:珍珠的单优群落基本是分布在山前冲积地段,而红砂的单优群落基本在冲积地的前缘质地较粗。红砂种群性状与土壤资源的关系中,多度与水分和养分有较强的相关性,生物量仅与阳离子交换量有显著的相关关系。珍珠与土壤剖面水分、盐分、速效磷和速效钾含量有密切关系。本实验中盐胁迫下红砂增加较多的是 Na、Si 等阳离子, Mg 离子也有一些增加(数据未列出),而珍珠猪毛菜植株累积较多的是 K、Ca、P(数据未列出)实验室中测定与野外试验结果珍珠猪毛菜吸收钾离子耐盐的结果相符。

钙作为一种重要的细胞膜保护物质,在植物的抗盐性方面起着重要的作用,关于 Ca 增强植物抗盐性的机理主要表现在能够增强质膜的稳定性和钙信号系统的正常发生和传递阻止细胞内 K 的外流,抑制 Na 的吸收,促进 Na 跨质膜外流,有效地控制 Na、K 在植物中选择性积累,维持细胞内离子平衡,以提高植物对 NaCl 胁迫的抗性<sup>[29-30]</sup>。本试验结果显示,盐胁迫明显增加了而珍珠猪毛菜根中 Ca 增加,提高了对 K 的吸收,抑制了对 Na、Cl 的累积,参与珍珠猪毛菜耐盐作用。但是红砂根中 Ca 含量远远低于珍珠猪毛菜的含量,导致了 Na 的累积,抑制了对营养元素 K<sup>+</sup>的吸收,参与耐盐作用较小。

硅是多数植物需要的大量有益元素,可以缓解植物受到的生物和非生物胁迫的伤害,例如可以提高植物耐盐碱性<sup>[30-31]</sup>。红砂根中 Si 含量是珍珠猪毛菜的 3—5 倍。红砂与珍珠猪毛菜的茎中 Si 含量都是先增加后降低的趋势,差异显著;珍珠猪毛菜叶的 Si 含量没有明显变化,红砂叶的 Si 含量变化也不明显,只是在最高浓度时有降低。可见 Si 更多参与到红砂的耐盐适应中。而且 Si 通过增强茎中含量参与二者抗盐作用。

许多研究和实践表明植物耐盐性与植株地上部对 Na 累积的限制力有关<sup>[27]</sup>。盐离子选择吸收系数  $S_{Na,K} = Na(叶/根)/K(叶/根)$ <sup>[32]</sup>可反映盐分胁迫下植物体对 K、Na 的吸收和向上运输的选择性,并认为  $S_{Na,K}$  值越大,植物体地上部对 Na 的选择性越大,则植物抗盐性越小,所受盐害越大。意味着 NaCl 盐胁迫下红砂与珍珠猪毛菜的叶部对 Na<sup>+</sup>的选择性减

小,K 的选择性吸收积累增大,增强了植物的抗盐性,最终使植物所受盐害减小。虽然从叶片累积的结果表现不同,红砂“吸钠排钾”、珍珠猪毛菜“吸钾排钠”的特征,但是从 K、Na 的吸收和向上运输的选择性结果来看,二者都具备植株地上部分 Na 的选择性减小,K 的选择性吸收积累增大,增强了植物的抗盐性。其中珍珠猪毛菜的选择性强于红砂。

综上所述,红砂与珍珠猪毛菜共生的耐盐机制显著不同,离子吸收与分布具有互补互利的效应。

## References:

- [1] Zhao K F, Li F Z. Chinese Halophyte. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] Zhu J K. Plant salt tolerance. Trends in Plant Science, 2001, 6(2): 66-71.
- [3] Liu J Q. Character of morphology, anatomy and physiology of water about extreme xerophytes, *Salsola passerina*. Acta Ecologica Sinica, 1983, 3(1): 15-20.
- [4] Li X R, Jia X H. Association between vegetation patterns and soil properties on the southeastern edge of the Tengger Desert. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(S1): 37-43.
- [5] Zheng J, He M, Li X, Chen Y, Li X, Liu L. Effects of *Salsola passerina* shrub patches on the microscale heterogeneity of soil in a montane grassland, China. Journal of Arid Environments, 2008, 72(3): 150-161.
- [6] Zhang M, Wang H J, Yu C Q. Response of *Salsola passerina* rangeland to simulated grazing intensity. Pratacultural Science, 2010, 27(8): 125-128.
- [7] Ren F, Liu Q. Antifungal activity against plant pathogens of the extracts from *Salsola passerina*. Guihaia, 2009, 29(1): 132-135.
- [8] Gao T P, Gao H N, Zhang Y, Xu S J, An L Z. Genetic diversity of *Salsola passerina* populations in northwestern China based on inter-simple sequence repeat (ISSR). Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2009, 45(2): 66-74.
- [9] Liu J Q, Qiu M X, Pu J C, Lu Z M. The typical extreme xerophyte—*Reaumuria soongorica* in the desert of China. Journal of Integrative Plant Biology, 1982, 24(5): 485-488.
- [10] Liu Y B, Zhang T G, Li X R, Wang G. Protective mechanism of desiccation tolerance in *Reaumuria soongorica*: leaf abscission and sucrose accumulation in the stem. Science in China Series C: Life Sciences, 2007, 50(1): 15-21.
- [11] Ma M H, Kong L S. The bio-ecological characteristics of *Reaumuria soongorica* on the border of oasis at Hutubi, Xinjian. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(3): 237-244.
- [12] Li X M. Effect of soil factor on *Haloxylon ammodendron*, *Haloxylon Persicum* and *Reaumuria soongorica* Distribution restriction in Mosuo Bay area. Arid Zone Resarch. 1986, 3(1): 30-33.
- [13] Huang P Y, Nie X P, Yu X D, Wang X L, Bie J H. Study on the habitat of *Reaumuria soongorica* community in Zhungger basin. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 1988, 5(3): 66-71.
- [14] Cui D F. Preliminary Study on classification, distribution, ecological and morphological anatomy of *Reaumuria*. Arid Zone Research. 1988, 5(1): 65-69.

- [15] Gu F X, Zhang F X, Pan X L, Chu Y, Zhang L J. Correlation between soil salinisation and community diversity: the case of Fukang oasis. *Resources Science*, 2002, 24(3): 42-48.
- [16] Li J P, Yang X G, Fu H, Zhang B L. The content and distribution characteristics of some osmotic adjusting materials in three species of desert plants in Alashan Desert of Northwest China. *Pratacultural Science*, 2005, 22(9): 35-38.
- [17] Jia X H. The Response of Vegetation Patterns on Soil Resources in the Southeastern edge of Tengger Desert. Doctoral dissertation, 2006.
- [18] Tan H J, Li X R, Zhao X, Liu Y B. Study on mechanisms of osmo regulation of *Reaumuria soongorica* callus in adapting to salt stress. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1119-1123.
- [19] Tan H J, Jia R L, Liu Y B, Zhao X, Li X R. Characters of Ions Accumulation in *Reaumuria soongorica* Callus under Salt Stress. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(6): 1305-1310.
- [20] Shi Y. The response mechanisms of *Didymodon vinealis* and *Bryum argenteum* of biological soil crusts in Tengger Desert to gradual drought stress. Master Dissertation. 2012.
- [21] Volkov V, Wang B, Doming P J, Fricke W, Amtmann A. *Thellungiella halophila*, a salt-tolerant relative of *Arabidopsis thaliana*, possesses effective mechanisms to discriminate between potassium and sodium. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 27(1): 1-14.
- [22] Jia R L, Zhou H Y, Tan H J, Fan H W, Zhang Z S. Preliminary studies on diurnal variances of physio-ecological characteristics of photosynthesis of two extreme xerophytes — *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina*. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(4): 631-636.
- [23] Zhou H Y, Tan H J, Zhang Z S, Jia X H, Fan H W, Yuan J L. Physiological responses and adjustment mechanisms of the dominate species of natural vegetation of Eastern Tengger Desert. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2010, 2(5): 455-463.
- [24] Su P X, Yan Q D, Xie T T, Zhou Z J, Gao S. Associated growth of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> desert plants helps the C<sub>3</sub> species at the cost of the C<sub>4</sub> species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(6): 2057-2068.
- [25] Zhao K F, Fan H. Halophytes and its adaptation physiology mechanisms in salted habitat. Beijing: Science Press, 2005.
- [26] Wang B S, Zou Q, Zhao K F. Effect of NaCl stress on Ionic Contents in different organs of *Sorghum Plants*. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 845-850.
- [27] Zhao X, Zhao M G, Tan H J, Liu Y B. Compare of K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> content absorption in leaves and roots of *Thellungiella halophila* and *Arabidopsis thaliana* under NaCl stress. *Acta Pratacultural Sinica*, 2007, 16(4): 21-24.
- [28] Chen S L, Li J K, Yi W L, Wang S S, Fritz E, Polle A, Ttermann A H. Tissue and cellular K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> of poplar under saline salt stress conditions. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 83-87.
- [29] Zheng Q S, Wang R L, Liu Y L. Effects of Ca<sup>2+</sup> on absorption and distribution of ions in salt-treated cotton seedlings. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2001, 27(4): 325-330.
- [30] Epstein E. How calcium enhances plant salt tolerance. *Science*, 1998, 280(5371): 1906-1917.
- [31] Epstein E. Annual review of plant physiology and plant molecular biology. *Silicon*, 1999, 50: 641-664.
- [32] Pitman M G. Transport across the root and shoot/root interaction // Staples R C, Toenniessen G H, eds. *Salinity Tolerance in Plant—Strategies for Crop Improvement*. New York: Wiley, 1984: 93-123.

## 参考文献:

- [1] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 刘家琼. 超旱生植物——珍珠的形态解剖和水分生理特征. *生态学报*, 1983, 3(1): 15-20.
- [4] 李新荣, 贾晓红. 腾格里沙漠东南缘荒漠植被格局与土壤资源的关系. *草地学报*, 2005, 13(S1): 37-43.
- [6] 张溢, 王慧娟, 于长青. 珍珠草原对不同模拟放牧强度的响应. *草业科学*, 2010, 27(8): 125-128.
- [7] 任芳, 刘强. 珍珠柴粗提物对 13 种植物病原菌的抑制活性. *广西植物*. 2009, 29(1): 132-135.
- [9] 刘家琼, 邱明新, 蒲锦春, 鲁作民. 我国荒漠典型超旱生植物——红砂. *植物学报*, 1982, 24(5): 485-488.
- [10] 刘玉冰, 张腾国, 李新荣, 张丽静, 白琰, 安黎哲, 王刚. 红砂 (*Reaumuria soongorica*) 忍耐极度干旱的保护机制: 叶片脱落和茎中蔗糖累积. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2006, 36(4): 328-333.
- [11] 马茂华, 孔令韶. 新疆呼图壁绿洲外缘的琵琶柴生物生态学特性研究. *植物生态学报*, 1998, 22(3): 237-244.
- [12] 李小明. 莫索湾地区土壤因子对梭梭柴、白梭梭、红砂分布制约的初步研究. *干旱区研究*, 1986, 3(1): 30-33.
- [13] 黄培佑, 聂湘萍, 周建民, 于晓东, 王新立, 别剑华. 准噶尔盆地中部琵琶柴 (*Reaumuria soongorica*) 群落的生境研究. *新疆大学学报: 自然科学版*, 1988, 5(3): 66-71.
- [14] 崔大方. 中国琵琶柴属分类、分布、生态和形态解剖学的初步研究. *干旱区研究*, 1988, 5(1): 65-69.
- [15] 顾峰雪, 张远东, 潘晓玲, 初雨, 张林静. 阜康绿洲土壤盐渍化与植物群落多样性的相关性分析. *资源科学*, 2002, 24(3): 42-48.
- [16] 李景平, 杨鑫光, 傅华, 张宝林. 阿拉善荒漠区 3 种旱生植物体内主要渗透调节物质的含量和分配特征. *草业科学*, 2005, 22(9): 35-38.
- [17] 贾晓红. 腾格里沙漠东南缘植被格局对土壤资源的响应 [D]. 博士论文, 2006.
- [18] 谭会娟, 李新荣, 赵昕, 刘玉冰. 红砂愈伤组织适应盐胁迫的渗透调节机制研究. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1119-1123.
- [19] 谭会娟, 贾荣亮, 刘玉冰, 赵昕, 李新荣. NaCl 胁迫下红砂愈伤组织中主要离子累积特征的研究. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1305-1310.
- [20] 石勇. 腾格里沙漠生物土壤结皮中土生对齿藓与真菌对逐渐干旱胁迫的适应机理 [D]. 硕士论文, 2012.
- [22] 贾荣亮, 周海燕, 谭会娟, 樊恒文, 张志山. 超旱生植物红砂与珍珠光合生理生态日变化特征初探. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 631-636.
- [25] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理. 北京: 科学出版社, 2005.
- [26] 王宝山, 邹琦, 赵可夫. NaCl 胁迫对高粱不同器官离子含量的影响. *作物学报*, 2000, 26(6): 845-850.
- [27] 赵昕, 赵敏桂, 谭会娟, 刘玉冰. NaCl 胁迫对盐芥和拟南芥 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 吸收的影响. *草业学报*, 2007, 16(4): 21-24.
- [28] 陈少良, 李金克, 尹伟伦, 王沙生, Fritz E, Polle A, Ttermann A H. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5-6): 83-87.
- [29] 郑青松, 王仁雷, 刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响. *植物生理学报*, 2001, 27(4): 325-330.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.4 Feb., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes ..... YE Linlin, KONG Fanxiang, SHI Xiaoli, et al (779)

Plant species of the non-agricultural habitats in the lower reaches of the Yellow River plain agro-landscape .....  
..... LU Xunling, LIANG Guofu, TANG Qian, et al (789)

### Autecology & Fundamentals

Manganese stress on the ultrastructures of a manganese tolerant plant, *Polygonum perfoliatum* L. ....  
..... WANG Jun, WU Hui, XUE Shengguo, et al (798)

Characteristics of arsenic (As) tolerance and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different radial oxygen loss .....  
..... WU Chuan, MO Jingyu, XUE Shengguo, et al (807)

Effects of water stress on physiological characteristics of different *Illicium lanceolatum* ecotypes under low light intensity .....  
..... CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin (814)

Effect of branch number on the growth and development of *Morus alba* saplings ... HUAN Huihui, XU Xiao, LIU Gang, et al (823)

Spatial distribution pattern and sampling technique for *Orthotylus (O.) sophorae* nymphs on *Sophora japonica* .....  
..... ZHU Huiying, SHEN Ping, WU Jianhua, et al (832)

Assessment of fungal diversity in apple replanted orchard soils by T-RFLP analysis .....  
..... YIN Chengmiao, WANG Gongshuai, LI Yuanyuan, et al (837)

Effects of dazomet on edaphon and growth of *Malus hupehensis* rehd. under continuous apple cropping .....  
..... LIU Entai, LI Yuanyuan, HU Yanli, et al (847)

Isolation, identification, and performance of two pyrene-degrading endophytic bacteria ..... SUN Kai, LIU Juan, LI Xin, et al (853)

### Population, Community and Ecosystem

Effects of different temperatures on the growth and development of *Eotetranychus Kankitus* (Ehara) .....  
..... LI Yingjie, WANG Ziyang, ZHANG Guohao, et al (862)

Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the  
Qinghai-Tibet Plateau ..... JIA Tingting, MAO Liang, GUO Zhenggang (869)

Correlation between characteristics of *Reaumuria soongarica* communities and soil factors in the Sangong River basin .....  
..... ZHAO Xuechun, LAI Liming, ZHU Linhai, et al (878)

Effects of afforestation on soil microbial community structure in the arid valley of Minjiang River .....  
..... WANG Weixia, LUO Da, SHI Zuomin, et al (890)

Effects of reclamation on tidal flat and land use on soil microbial community .....  
..... LIN Li, CUI Jun, CHEN Xueping, FANG Changming (899)

Effects of *Pomacea canaliculata* on aquatic macrophyte community structure in paddy fields .....  
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jiaen, DAI Xiaoyan, et al (907)

The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment .....  
..... CHEN Yonghua, WU Xiaofu, HAO Jun, et al (916)

Carbon budget of alpine *Potentilla fruticosa* shrubland based on comprehensive techniques of static chamber and biomass harvesting ...  
..... LI Hongqin, LI Yingnian, ZHANG Fawei, et al (925)

Effect of initial pH value on microbial Fe (III) reduction in alkaline and acidic paddy soils ... WU Chao, QU Dong, LIU Hao (933)

### Landscape, Regional and Global Ecology

Climate environmental change and stable carbon isotopes in age layers of *Tamarix* sand-hillocks in Kumtag desert .....  
..... ZHANG Jinchun, YAO Tuo, LIU Changzhong, et al (943)

**Resource and Industrial Ecology**

The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse ..... ZHANG Dalong, CHANG Yibo, LI Jianming, et al (953)

Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress .....  
 ..... ZHAO Xin, YANG Xiaojun, SHI Yong, et al (963)

The relationship between selected rhizosphere and non-rhizosphere soil properties and the quality of *Pyrola decorata* .....  
 ..... GENG Zengchao, MENG Lingjun, LIU Jianjun (973)

Spatial variation analysis of soil organic matter and nutrient factor for before and after planting crops .....  
 ..... FANG Bin, WU Jinfeng (983)

**Urban, Rural and Social Ecology**

Establishment and application of the index system for urban river health assessment .....  
 ..... DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin, et al (993)

Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of tibet ..... AN Baosheng, CHENG Guodong (1002)

**Research Notes**

Responses of soil microorganisms and soil enzyme activities to different land use patterns in the water-level-fluctuating zone of  
 the Three Gorges Reservoir region ..... MA Peng, LI Changxiao, LEI Ming, et al (1010)

Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings .....  
 ..... WANG Shufeng, HU Yunxue, SUN Haijing, et al (1021)

The effects of constant and variable thermal acclimation on thermal tolerance of the common giant toad tadpoles (*Bufo gargarizans*) ...  
 ..... WANG Lizhi (1030)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 董 鸣 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 4 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 4 (February, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元