

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)
- 两株具有芘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/stxb201209291363

王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 施翔, 潘红伟, 陈益泰. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响. 生态学报, 2014, 34(4): 1021-1029.

Wang S F, Hu Y X, Sun H J, Shi X, Pan H W, Chen Y T. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 1021-1029.

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¹, 胡韵雪², 孙海菁^{1,*}, 施翔¹, 潘红伟¹, 陈益泰¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400; 2. 四川成都勘测设计院, 成都 610072)

摘要:以低浓度(50 mmol/L)和高浓度(150 mmol/L) NaCl 处理弗吉尼亚栎(*Quercus virginiana*)和麻栎(*Quercus acutissima*)1年生幼苗,研究了2种栎树在盐胁迫下的生长、对盐分的敏感性和耐受性及其根系形态学参数变化以及根系对盐离子的吸收与积累。结果表明,高浓度盐胁迫明显抑制了2种栎树地上部生物量的积累($P < 0.05$),而低浓度盐胁迫对弗吉尼亚栎地上部干重的影响不明显,但显著抑制了麻栎地上部干重($P < 0.05$);2种栎树的根冠比在盐胁迫下呈增加趋势,特别是在高浓度盐胁迫下,2种栎树的根冠比明显增加($P < 0.05$),盐胁迫下增加生物量在根部的分配是植物应对盐胁迫的方式之一。2种栎树根部生物量积累在盐胁迫下变化不明显,但2种栎树根系形态学参数在盐胁迫下的响应不同,弗吉尼亚栎根系总长度、总表面积和总体积在盐胁迫下均有不同程度增加,特别是在低浓度盐胁迫下,根系形态学参数明显增加($P < 0.05$),但麻栎根系形态学参数有下降趋势,但与对照相比变化不明显;通过对不同径级根系总长的分析发现,弗吉尼亚栎根系总长度的增加主要是由于直径小于2 mm的细根总长的增加,细根长度的增加对于植物吸收水分和营养物质具有重要意义;通过对 Na^+ 和 Cl^- 在根系的含量分析表明,盐胁迫下2种栎树根系盐离子的积累均有明显增加,但弗吉尼亚栎根系盐离子的含量在低浓度和高浓度盐胁迫下的差异不明显,而麻栎在高浓度盐胁迫下根系盐离子的含量明显高于弗吉尼亚栎。综合2种栎树盐胁迫下的生物量分配策略和根系形态学响应以及盐离子的积累规律,证明2种栎树尽管在生物量分配策略方面具有相同的特点,但根系的响应策略截然不同,弗吉尼亚栎在盐胁迫下能够扩大根系吸收范围,维持较高的 K^+/Na^+ 比值,而麻栎在盐胁迫下根系由于吸收过多的盐离子,导致根系的生长发育受到抑制,影响了根系在逆境中的分布范围,从而在一定程度上避免了进一步的盐害。

关键词:盐胁迫;弗吉尼亚栎;麻栎;根系形态学

Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings

WANG Shufeng¹, HU Yunxue², SUN Haijing^{1,*}, SHI Xiang¹, PAN Hongwei¹, CHEN Yitai¹

1 Institute of Subtropical Forestry, China Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China

2 Chengdu Survey and Design Institute, Chengdu 610072, China

Abstract: It is well known that saline soil, which takes up about 25% of the whole land area, is one of the most widely distributed soils on Earth. In China, the saline area is over 34 million hm^2 , including one million hm^2 coastal saline soil. Soil salinity refrains the development and growth of most plant species, except for few species like halophytes. To understand the mechanism of salt tolerance, many studies have been carried out on the herbaceous halophytes, the tolerant woody plants and the sensitive and tolerant crop plants, but much less is known concerning the salt susceptibility and tolerance of oak trees. *Quercus virginiana* and *Quercus acutissima* are two different origin oak trees. *Q. virginiana*, is considered as a moderately sensitive tree species to soil salinity according to US Salinity Laboratory classification. It is one of the dominant tree species along southeastern coast of the United States and has the extreme tolerance to high concentration of salt fog. *Q. virginiana* acorn was introduced to China in 2000 for the first time, and its tolerance to salts has been confirmed

基金项目:浙江省“十二五”农业新品种选育竹木育种协作组课题资助项目(2012C12908-19);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(RISF2013003)

收稿日期:2012-09-29; **修订日期:**2013-05-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunhaijing@163.com

through the regional trial along the coastline of southeastern China. *Q. acutissima* is widely distributed in China and few researches are reported about its response on salt stress.

The response of plants to excess salt is complex and involves some changes in morphology, physiology and metabolism. Among these changes, the variations changes in the biomass allocation and root morphological characteristics of plants are two important adaptive mechanisms under salt stress. In this research, the changes of root morphology and biomass accumulation of 1-year-old seedlings of *Q. virginiana* and *Q. acutissima* were investigated under higher concentration (150 mmol/L) and lower concentration (50 mmol/L) of sodium chloride solution treatments. The results showed that the growth of shoots of two oak trees were significantly inhibited under higher concentration of salt stress, while no obvious changes were observed for the growth of shoots of *Q. virginiana* under lower concentrations of NaCl. The ratio of root to shoot for two oak trees increased under both concentration of NaCl, which was considered as a biomass allocation strategy for a certain class of plants under salt stress.

For the two oak trees, salinity did not induce the significant change on the root biomass accumulation. While the root morphological responses under salt stress were different between two oak trees. For *Q. virginiana*, the total root length, root surface area and root volume were increased in various degrees under both lower and higher concentration of NaCl, and significant increase was observed under lower concentration of NaCl, especially for the stimulation of fine roots with the diameter less than 2mm. The fine roots are more effective than the thicker roots in nutrient and water absorption. For *Q. acutissima*, although its root development and expansion were inhibited under salt stress, no significant difference was observed when compared to that of control. It was also observed that the different patterns of accumulation of Na^+ and Cl^- in roots for two oak trees. Therefore, according to the biomass allocation strategy and root morphological responses and ions accumulation patterns of two oak trees under salt stress, it may be deduced that the both oak trees have the similar biomass allocation strategy when exposed to salinity, but have totally different responses on the root development and salt ions accumulation. *Q. virginiana* could expand the root scope for more effective nutrient absorption to relieve the toxicity of redundant salt ions, while *Q. acutissima* restricted the expanding of roots in salinity environment due to the redundant uptake of salt ions, and thus lessens the further damage to roots.

Key Words: salt stress; *Quercus virginiana*; *Quercus acutissima*; root morphology

盐碱土是地球陆地上分布最广的一种土壤类型之一,约占陆地总面积的 25%,仅我国,盐碱地的面积有 3400 多万公顷,其中滨海盐碱地有 100 万 hm^2 ^[1],加强沿海防护林体系建设,是开发利用海涂资源、改善滨海生态环境和实施防风减灾工程的重要举措^[2]。盐分是制约沿海防护林建设的重要非生物因子,因此,培育和筛选耐盐树种对沿海防护林建设具有重要意义。

在盐胁迫下,根系最早感受逆境胁迫信号,是最直接的受害部位,因此根部是应对盐胁迫的首要部位^[3]。根系在逆境下能够通过改变其形态与分布来适应不利环境^[4-5],所以,根的生长发育状况和活力对植物的耐盐能力至关重要。国内外在树木对盐分的生理生化^[6-7]、分子生物学响应机制^[8-9]方面做了大量研究工作,但对盐胁迫下不同植物根系的响应

策略研究不多^[10-11]。弗吉尼亚栎 (*Quercus virginiana*) 和麻栎 (*Quercus acutissima*) 均为壳斗科栎属树种,弗吉尼亚栎原产美国,能忍耐高强度的盐雾及土壤盐分,是美国沿海硬阔林和灌丛林地的顶级优势树种^[12]。2000 年引种至我国长江中下游地区,在浙江慈溪、上虞以及上海、江苏等地沿海滩涂表现出很强的适应能力^[13-14]。麻栎是我国南方山区硬阔林主要建群树种,具有抗风、护坡、保持水土的作用,目前有关麻栎对盐分响应方面的报道还不多,但有研究表明,麻栎能在含盐分的土壤中生长^[15]。国外很多研究也表明,栎树对盐胁迫具有不同的敏感性和耐受性^[16-17],因此,有必要对我国乡土树种——麻栎和引进耐盐树种——弗吉尼亚栎在盐胁迫下的生长及其盐分敏感性和耐受性进行评价和比较,以期 2 种栎树在沿海防护林建设中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与方法

选取生长一致的 1 年生弗吉尼亚栎和麻栎实生苗,采用盆栽砂培方法,营养钵直径 18 cm,高度 15.5 cm,于 2009 年 3 月移栽,每盆 1 株,采用随机区组试验设计,每个区组设低浓度和高浓度 2 个盐胁迫处理,共 3 个区组,每区组每个处理 10 株苗木,以 Hoagland 营养液培养。待苗木生长正常后,进行盐胁迫处理,采用含 50 mmol/L 和 150 mmol/L NaCl 的 Hoagland 营养液培养,对照以不加 NaCl 的 Hoagland 营养液培养,每 3d 浇灌 1 次培养液,灌前以去离子水充分淋洗基质,以确保试验设计的准确性。

1.2 测定方法

1.2.1 苗木生长和根系形态学参数测定

盐胁迫处理 3 个月后,以自来水冲松砂子,轻轻取出所有苗木,迅速带回实验室,以自来水冲洗根系和地上部,去除沙粒及其他表面杂物,再用去离子水洗净,吸干水分,将根系与地上部分开,分别称得鲜重;通过扫描仪(V700 Epson)将完整的根系图像扫描存入计算机,采用 WinRHIZO PRO 2007 根系分析系统软件(Regent Instruments Inc8, Canada)分析根长、表面积、体积以及不同径级根长和表面积等形态学参数。

根系形态分析完成以后,将植株根、茎、叶分开,于 105 °C 杀青 30 min,之后在 75 °C 下烘至恒重,称得干重,并根据公式计算根冠比:

$$\text{根冠比} = \text{根干重} / \text{地上部干重}$$

1.2.2 离子含量测定

将烘干的根样品磨碎,过 40 目筛,精确称取 0.5000 g 左右样品,浓 HNO₃-H₄ClO₄ 法消煮,火焰原子吸收光谱法测定组织中 Na⁺、K⁺ 含量;Cl⁻ 含量采用离子色谱法测定。

1.2.3 盐敏感指数 (SSI) 和盐耐受指数 (STI) 计算

根据 Molhtar^[18] 和 Khayat 等^[19] 文献中关于盐敏感指数和耐受指数的计算公式:

$$\text{SSI} = [(\text{DW}_{\text{NaCl}} - \text{DW}_{\text{control}}) / \text{DW}_{\text{control}}] \times 100$$

$$\text{STI} = (\text{DW}_{\text{NaCl}} / \text{DW}_{\text{control}}) \times 100$$

式中, DW_{NaCl} 表示盐处理下植株干重, DW_{control} 表示对照植株干重。

1.3 数据处理方法

所有数据均采用 Excel 2003 和 Origin7.5 进行绘图,采用 DPS 软件进行数据方差分析及显著差异性检验。

2 结果与分析

2.1 盐分对 2 种栎树植株生长和根系生物量的影响

从表 1 可以看出,高浓度盐胁迫显著抑制了弗吉尼亚栎和麻栎地上部的生长 ($P < 0.05$),抑制率分别达 74.3% 和 81.8%;而在低浓度盐胁迫下,2 种栎树地上部的生长表现不同,弗吉尼亚栎地上部生物量虽有所下降,但与对照相比差异不显著,而麻栎在低浓度盐胁迫下地上部生物量明显下降;说明低浓度盐胁迫对弗吉尼亚栎地上部生长的影响不明显,而对麻栎地上部生长影响较大。不同浓度盐胁迫下,麻栎根系生物量均有所下降,但与对照相比差异不明显;盐胁迫对弗吉尼亚栎根系生长的影响也不明显,但在低浓度盐胁迫下,弗吉尼亚栎根系生物量有增加趋势,由此可见,一定浓度的盐胁迫能够刺激弗吉尼亚栎根系的生长。研究表明^[20],一定浓度的盐分对一些盐生植物的生长具有促进作用,很多树种也表现出类似的特性,如杨树等^[21]。弗吉尼亚栎属于典型的滨海树种,其自然分区主要集中在美国东南沿海^[12],因此,低浓度盐胁迫对根系生长具有促进作用也不难理解。

表 1 盐胁迫对 2 种栎树地上部和根生物量的影响

Table 1 Effects of salt treatment on the dry weight of above ground and roots of two oak trees

NaCl 浓度/(mmol/L) NaCl concentration	地上部干重/(g/株) Dry weight of the above ground part		根干重/(g/株) Dry weight of roots	
	弗吉尼亚栎 <i>Quercus virginiana</i>	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	弗吉尼亚栎 <i>Quercus virginiana</i>	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>
	0	22.2±2.7a	22.5±2.6a	2.2±0.3a
50	16.5±2.8a	15.0±3.1b	2.8±0.4a	2.5±0.3a
150	5.7±1.1b	4.1±0.6c	2.0±0.5a	1.7±0.4a

小写字母 a、b、c 表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

根冠比反映了植物在逆境条件下的生物量分配策略,由于植物不同部位对盐分的敏感性不同,导致了生物量分配的变化^[11]。从图 1 可以看出,盐胁迫下,2 种栎树的根冠比均呈增加趋势,高浓度盐胁迫下的根冠比明显高于对照。由于盐胁迫下 2 种栎树根系生物量变化不明显,因此可以推断,盐胁迫下根冠比的增加主要是由于地上部生物量的减少引起的。

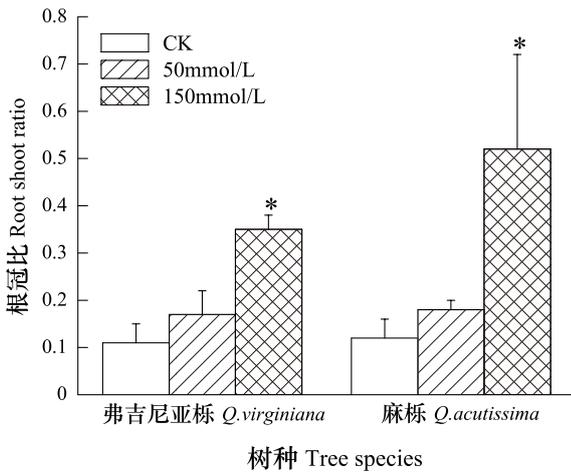


图 1 盐胁迫对 2 种栎树根冠比的影响

Fig.1 Effects of NaCl on root shoot ratio of two oak trees

* 表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

2.2 两种栎树对盐分的敏感性和耐受性

植物不同器官的盐敏感指数可以在一定程度上也反映盐分对植物不同部位生长影响的大小^[18],某一部位敏感指数越小,该部位对盐胁迫越敏感。由图 2 我们可以看出,2 种栎树不同部位对盐胁迫的敏感性呈相似的趋势,都表现出根部的敏感性要低于地上部,这可能也是盐胁迫下 2 种栎树根系生物量变化不明显的原因之一。对整株植物的盐耐性指数分析发现(图 3),2 种栎树对盐分的耐受性不同,弗吉尼亚栎对盐胁迫的耐受性要高于麻栎。

由图 2、图 3 还可以看出,随着 NaCl 浓度的增加,2 种栎树的盐敏感指数和耐性指数均下降,特别是耐性指数,在 150 mmol/L 浓度下明显下降,说明在高浓度盐胁迫下,2 种栎树的敏感性增加,相应的盐耐性降低。

2.3 盐胁迫对 2 种栎树根系分布的影响

根系总长度、根系表面积、体积等形态学参数是决定根系养分吸收范围、吸收强度的重要指标^[22]。由表 2 可以看出,2 种栎树的根系形态学参数在盐胁迫

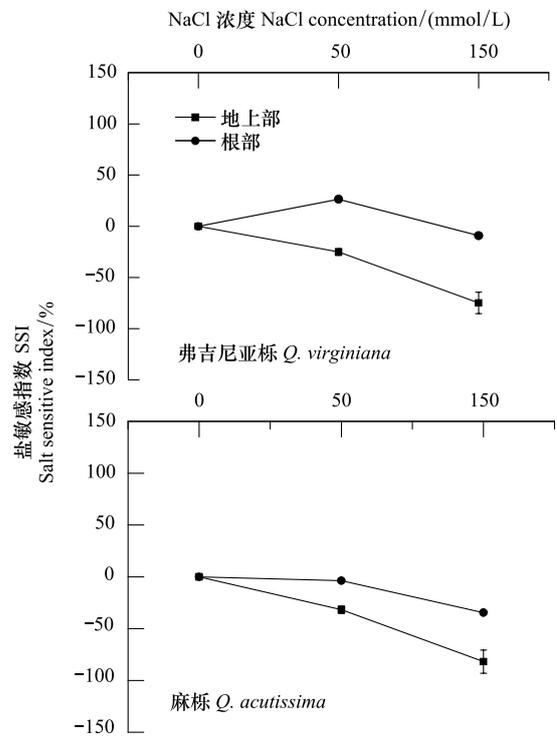


图 2 盐胁迫下 2 种栎树的盐敏感指数

Fig.2 Salt sensitive index of two oak trees under salt stress

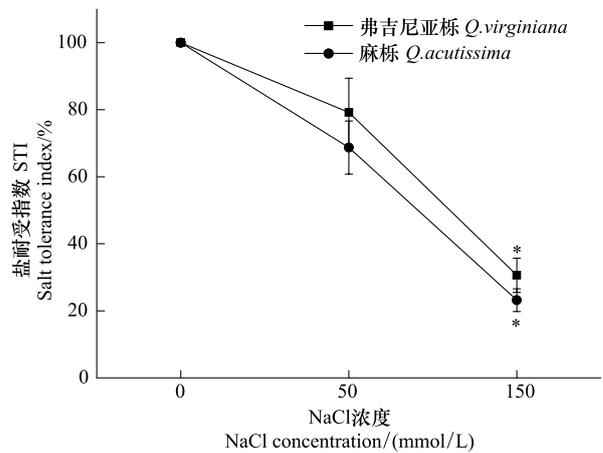


图 3 盐胁迫下 2 种栎树的盐耐受指数

Fig.3 Salt tolerance index of two oak trees under salt stress

* 表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

胁迫下的变化不同,其中麻栎的根系总长、总表面积以及总体积在盐胁迫下变化不明显,但总体有下降趋势,说明麻栎在盐胁迫下根系生长受到抑制;通过分析直径不同的各级根系总长度发现(表 3),盐胁迫下麻栎大于 4 mm 的根系长度明显降低($P < 0.05$),而其他各级根系的总长在盐胁迫下虽有所下降,但与对照相比差异不明显。一般情况下,植物根系径级较大的根系主要承担支撑、运输和贮藏等功能,而

吸收功能主要由径级较小的细根承担^[22],这说明盐胁迫对麻栎明显抑制了麻栎粗根的伸长,而对径级较小的根系生长影响不大,这不仅可以缩小盐分对

根系的影响范围,而且在一定程度上保证了根系对营养物质的吸收。

表 2 盐胁迫对 2 种栎树根系主要分布特征的影响

Table 2 Effects of salt stress on the root morphological characteristic of two oak trees

NaCl 浓度 NaCl concentration /(mmol/L)	根总长度/cm Total length of roots		根总表面积/cm ² Total area of roots		根总体积/cm ³ Total volume of roots	
	弗吉尼亚栎 <i>Q. virginiana</i>	麻栎 <i>Q. acutissima</i>	弗吉尼亚栎 <i>Q. virginiana</i>	麻栎 <i>Q. acutissima</i>	弗吉尼亚栎 <i>Q. virginiana</i>	麻栎 <i>Q. acutissima</i>
	0	1269.9±156.7b	364.4±66.3a	171.8±15.3b	94.5±12.8a	2.4±0.6b
50	2279.3±262.3a	278.0±67.0a	352.9±30.9a	92.9±13.0a	5.2±0.6a	2.0±0.3a
150	1365.2±233.3b	183.0±61.5a	223.2±29.5b	62.7±13.2a	3.4±1.0ab	1.9±0.3a

小写字母 a、b、c 表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著

而弗吉尼亚栎根系形态学参数在盐胁迫下发生了很大变化,与对照相比,盐胁迫下根系总长、总表面积和总体积均呈增加趋势,其中低浓度盐胁迫下,根系总长、总表面积和总体积明显增加 ($P<0.05$) (表 2),这表明,一定浓度的盐分促进了弗吉尼亚栎根系的生长,特别是 50 mmol/L 的 NaCl 处理对弗吉尼亚栎根系生长的促进作用明显 ($P<0.05$),总根长比对照高出 1 倍多,总表面积高出对照 2 倍多。对各级根系长度分析发现,弗吉尼亚栎各级根系在盐胁迫下的响应与麻栎不同,由表 3 可以看出,盐胁迫下,弗吉尼亚栎大于 2 mm 的各级根系总长变化不

大,而小于 2 mm 的各级根系长度在低浓度盐胁迫下明显增加 ($P<0.05$),分别为对照的 1.77 倍 ($\Phi \leq 1.00$) 和 2.90 倍 ($1.00 < \Phi \leq 2.00$);高浓度盐胁迫下,小于 1 mm 的根系总长降低,1—2 mm 之间的根系总长增加,但降低和增加的程度均不明显。这说明,盐胁迫对弗吉尼亚栎粗根的影响不明显,而低浓度盐分对根系生长的促进主要体现在明显促进了直径小于 2 mm 的细根的发育,从而扩大了根系吸收的范围,而根系对矿质离子吸收的增加在一定程度上可以缓解盐离子过度吸收造成的细胞毒害^[23-24]。

表 3 盐胁迫对 2 种栎树不同径级根系总长的影响

Table 3 Effects of salt stress on total length of roots for different diameters in two oak trees

树种 Tree species	NaCl 浓度 NaCl concentration /(mmol/L)	不同径级根系总长 Total length of roots with different diameters/cm				
		$\Phi \leq 1.00$	$1.00 < \Phi \leq 2.00$	$2.00 < \Phi \leq 3.00$	$3.00 < \Phi \leq 4.00$	$\Phi > 4.00$
		弗吉尼亚栎 <i>Q. virginiana</i>	0	1174.2±154.4b	59.2±8.3b	22.0±4.4a
	50	2078.9±250.6a	142.7±19.1a	21.1±3.1a	15.1±6.7a	14.8±1.6a
	150	928.5±65.2b	84.6±11.8b	25.6±2.9a	18.8±6.4a	16.8±8.1a
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	0	309.4±57.6a	31.3±8.3a	5.3±1.5a	3.2±1.7a	19.3±3.2a
	50	217.2±57.3a	32.7±8.4a	4.9±1.9a	3.2±1.0a	12.9±1.8ab
	150	145.5±51.1a	23.5±9.7a	3.3±1.6a	2.2±0.1a	11.2±0.5b

小写字母 a、b、c 表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著

2.4 两种栎树根系对盐离子的吸收和积累

由图 4 可以看出,与对照相比,盐胁迫下 2 种栎树根组织中 Na^+ 和 Cl^- 的含量均明显增加 ($P<0.05$),说明盐胁迫促进了 2 种栎树根系对盐离子的吸收;特别是麻栎,随着盐浓度的增加,根组织中 Na^+ 和 Cl^- 的含量也明显增加;而弗吉尼亚栎根系对盐离子的吸收规律与麻栎不同,在低浓度盐胁迫下,根系

Na^+ 和 Cl^- 的含量明显增加,而高浓度盐胁迫下,根系盐离子的含量并未出现极大的增加,特别是 Cl^- ,在低浓度和高浓度盐胁迫下,含量变化并不明显,这与作者在 2010 年^[14]的研究结果一致。由此说明,弗吉尼亚栎在高浓度盐胁迫下,其根系存在某种机制限制其吸收过多的盐离子,以降低盐离子对细胞的损伤。通过对 2 种栎树根部 K^+/Na^+ 比值(图 5)的研究

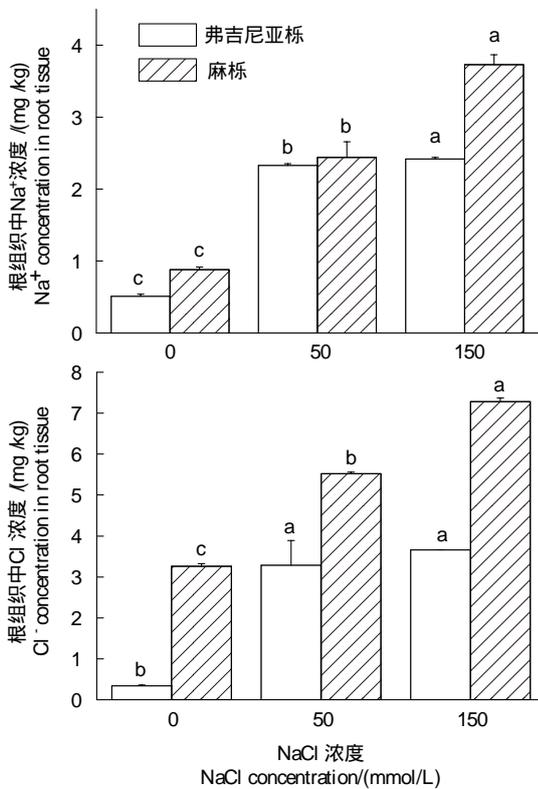


图4 弗吉尼亚栎和麻栎根系对Na⁺和Cl⁻的吸收和积累

Fig.4 Uptake and accumulation of Na⁺ and Cl⁻ in root tissues of *Q. virginiana* and *Q. acutissima*

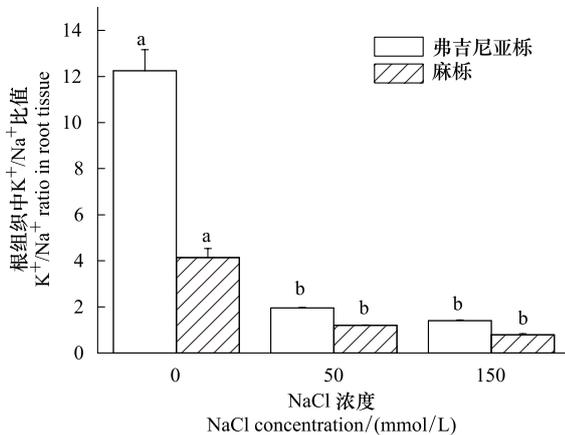


图5 盐胁迫下2种栎树根系K⁺/Na⁺比值

Fig.5 K⁺/Na⁺ ratio in root tissues of two oaks

发现,弗吉尼亚栎根部K⁺/Na⁺比值明显高于麻栎,而K⁺/Na⁺比值是反映植物耐盐能力的一个重要指标^[5,18],因此,根部具有较高的K⁺/Na⁺比值也是弗吉尼亚栎对盐胁迫耐受性高于麻栎的重要因素。

由上述可以推断,尽管麻栎与弗吉尼亚栎对盐分都有一定的耐受性,但2种栎树根系对盐分的响

应机制不同,主要表现在:弗吉尼亚栎在低浓度盐胁迫下,扩大了根系生长范围和细根根吸收面积以应对盐离子的毒害作用,而在高浓度盐胁迫下,根部通过某种机制限制对盐离子的过度吸收以维持较高的K⁺/Na⁺比值,而这种限制机制可以通过调控对营养元素的吸收来达到^[14];而麻栎根系在高浓度盐胁迫下缺乏对盐离子吸收的控制,导致根部盐离子浓度过高,进而抑制了根系的生长发育,而对根系生长的抑制可以减少根系在盐胁迫环境中的分布,以降低盐分对根系的损伤。除此以外,根系的分布和深度对植物的耐盐性也有一定影响,戈良朋等在研究滨海植物根系分布与耐盐性的过程中发现,深根型植物较浅根型植物具有较强的耐盐能力^[25]。从表2也可以看出,无论有无盐分胁迫,弗吉尼亚栎的根系总长和总表面积均高于麻栎,说明在相同的培养条件下,根系发达的植物往往具有较强的抗逆能力,这与戈良朋等的研究结论一致。

3 讨论

生物量分配策略是植物在盐胁迫下的适应机制之一^[26],不同植物可通过不同的生物量分配模式来适应高盐环境,有些植物通过减少生物量在根系的分配以降低盐分的吸收,同时也减少了盐分向地上部的运输,如芦苇(*Phragmites australis*)^[27],在高盐条件时其地上部分尤其是茎的生物量分配比例增加,而地下部分如根和根状茎的比例减少;而另一些植物的生物量分配模式与芦苇刚好相反,如石南叶白千层(*Melaleuca ericifolia*)在盐胁迫下增加了生物量在根系的分配^[28],这种分配模式的积极意义在于增加了根对水分和营养的获取,从而增强了植物体的生长能力,也稀释了细胞内的盐分。从弗吉尼亚栎和麻栎的根冠比(图1)来看,盐胁迫下2种栎树的根冠比明显增加,特别是高浓度盐胁迫下,根冠比明显高于对照,可以说明,两者的生物量分配策略属于后者,但此类植物在吸收营养物质的同时如何避免对盐分的过度吸收仍需进一步研究。王树凤等^[14]对弗吉尼亚栎在盐胁迫下矿质离子吸收的研究表明,弗吉尼亚栎吸收的盐离子大多贮存于根系,向地上部运输的很少,表明弗吉尼亚栎在增加对盐离子吸收的同时,同时降低了盐离子向地上部的运输,这与耐盐杨树对盐离子的吸收和运输方式具有

相似的特点^[29];而麻栎是如何避免盐分过度吸收的研究目前还没有报道。

植物在盐胁迫下生物量分配模式之所以会发生变化,主要是由于植物不同部位对盐分的敏感性不同而引起的^[18]。对一些滨海盐生植物的研究发现,滨海植物的根系对盐胁迫的敏感程度要高于地上部,如碱蓬,盐角草等^[25],因此,在高盐胁迫下,盐生植物的根冠比降低。然而大量研究表明,盐胁迫下,植物根系生长的敏感性要低于地上部,因此盐胁迫下根冠比增加^[11],本研究也得出了类似的结果。根据对 2 种栎树盐敏感性的分析,弗吉尼亚栎和麻栎在盐胁迫下根系的敏感程度要低于地上部,这与典型的盐生植物不同。有研究发现,植物的茎是贮存 Na^+ 的主要器官^[30],因此,盐生植物通过将盐离子贮存于对盐分不敏感的茎部,以减少对盐分敏感的根部的毒害。由此可见,无论是盐生植物还是非盐生植物,根系吸收的盐分都倾向于贮存在对盐分不敏感的部位,这可能是植物在长期进化过程中所形成的适应机制。

盐胁迫下植物根系功能的调整与权衡对植物的耐盐性具有重要意义^[26],盐渍条件下,植物可通过减少根系表面积、增加根系直径,发展通气组织等来限制盐离子的过分吸收和缓解盐胁迫带来的缺氧损害^[31]但这种调节模式对于根系发挥其他生理功能如水分和营养的获取是不利的。可见,植物对盐胁迫的适应与植物根系其他功能的正常发挥存在矛盾,且这种矛盾能否合理的解决直接影响到物种的生存和分布。因此,植物如何通过根系结构、形态和生理的调整,达到既能抵抗盐胁迫又能维持正常生理功能有待进一步研究。在自然条件下,土壤逆境条件的分布大多具有斑块性,因此,耐性植物与敏感植物根系在逆境土壤中的生长和分布具有不同的响应机制^[32],一般来讲,耐性植物通常会通过主动扩大根系分布以适应逆境条件,而敏感植物则主要采取避性机制,通过减少根的分布以最大限度的降低逆境条件对植物的毒害^[33]。大多数研究表明,盐胁迫可以抑制根系的伸长和侧根发育,使根系总长、表面积、体积等参数有所下降^[5,34];但也有研究表明,盐胁迫能够刺激侧根的发生^[35],因此,不同的植物材料以及植物材料的年龄、生理状态不同,盐胁迫对根系生长发育的影响不同。Bolun 等^[36]对低浓度和

高浓度水溶液中培养的灰杨(*Populus canescens*)根系发育的研究发现,在 25 mmol/L NaCl 处理下,杨树根长度增加,而高浓度(100 mmol/L) NaCl 处理下根长度明显降低,本文也得出了类似的结果,盐胁迫下弗吉尼亚栎根系总长、表面积、体积均有不同程度增加,特别是直径小于 2 mm 的细根总长度的增加,这对盐胁迫下补偿水分和养分的吸收是非常有利的,具有耐性植物的特点。而麻栎根系的响应策略表现出敏感植物的特性,盐胁迫下根系形态学参数均有所下降,特别是粗根长度明显下降。由此可见,盐胁迫下弗吉尼亚栎与麻栎根系在对盐胁迫的形态学响应方面表现出 2 种不同的机制。

4 结论

(1) 供试的 2 种栎树对盐胁迫均具有一定的耐受性,而弗吉尼亚栎的耐受性要高于麻栎,特别是在高盐浓度胁迫下,麻栎叶片受害症状明显,叶片变黄、落叶较多,而弗吉尼亚栎未出现叶片明显伤害,在推广过程中需考虑这一因素。

(2) 盐胁迫下,2 种栎树的根系敏感程度要低于地上部,但两者根系的生长与分布存在不同的响应策略,弗吉尼亚栎表现出耐性植物的特点,而麻栎更倾向于敏感植物;而且,弗吉尼亚栎各级根系的发育要优于麻栎,发达的根系对植物的支撑作用更强大,因此,在沿海防护林建设中,除考虑耐盐性以外,树种的抗风性也是重要因素。

(3) 在生物量分配策略方面,2 种栎树具有相同的模式,均表现出增加生物量在根系的分配,这一分配模式对增加根系对水分和营养的获取,增强植物体的生长能力具有重要意义。

致谢:感谢中国林业科学研究院亚热带林业研究所张建锋研究员对本文提出的建议以及对写作的帮助。

References:

- [1] Zhang J F. Principles and Technology of Ecological Rehabilitation in Saline Soil. Beijing: China Forestry Press, 2008: 14-15.
- [2] Zhang H X, Liu Z X, Liu Q F. Seedling growth and salt tolerance of tree species under NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (5): 2263-2271.
- [3] Cramer G R, Läuchli A, Epstein E. Effects of NaCl and CaCl_2 on ion activities in complex nutrient solutions and root growth of

- cotton. *Plant Physiology*, 1986, 81(3): 792-797.
- [4] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, Ghulam J. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, 9(5): 427-434.
- [5] Srinivasarao C H, Benzioni A, Eshel A, Waisel Y. Effects of salinity on root morphology and nutrient acquisition by Faba beans (*Vicia faba* L.). *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2004, 52(2): 184-191.
- [6] Sun J, Chen S L, Dai S X, Wang R G, Li N Y, Shen X, Zhou X Y, Lu C F, Zheng X J, Hu Z M, Zhang Z K, Song J, Xu Y. NaCl-Induced alternations of cellular and tissue ion fluxes in roots of salt-resistant and salt-sensitive poplar species. *Plant Physiology*, 2009, 149(2): 1141-1153.
- [7] Hernandez J A, Campillo A, Jiménez A, Alarcón J J, Sevilla F. Response of antioxidant systems and leaf water relations to NaCl stress in pea plants. *New Phytologist*, 1999, 141(2): 241-251.
- [8] Zhao Q, Dai S J. Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 274-283.
- [9] Teakle N L, Tyerman S D. Mechanisms of Cl⁻ transport contributing to salt tolerance. *Plant, Cell and Environment*, 2010, 33(4): 566-589.
- [10] Sun H G, Chen Y T. Root growth patterns of four coastal shelter forest tree species in response to salt stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12): 2365-2372.
- [11] Bernstein N, Meiri A, Zilberstaine M. Root growth of Avocado is more sensitive to salinity than shoot growth. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2004, 129(2): 188-192.
- [12] Harms W R. *Quercus virginiana* Mill. live oak//Burns R M, Honkala B H, eds. *Silvics of North America*. Vol. 2 Hardwoods. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, 1990: 751-754.
- [13] Chen Y T, Chen Y C, Huang Y Q, Sun H J, Chen D F. Preliminary study on *Quercus virginiana* introduction in Eastern China. *Forest Research*, 2007, 20(4): 542-546.
- [14] Wang S F, Hu Y X, Li Z L, Sun H J, Chen Y T. Effects of NaCl stress on growth and mineral ion uptake, transportation and distribution of *Quercus virginiana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4609-4616.
- [15] Wang B, Yu M K, Sun H J, Cheng X R, Shan Q H, Fang Y M. Photosynthetic characters of *Quercus acutissima* from different provenances under effects of salt stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1817-1824.
- [16] Thornton F C, Schaedle M, Raynal D J. Sensitivity of red oak (*Quercus rubra*.) and America beech (*Fagus grandifolia* Ehrh.) seedlings to sodium salts in solution culture. *Tree Physiology*, 1988, 4(2): 167-172.
- [17] Alaoui-Sossé B, Sehmer L, Barnola P, Dizengremel P. Effect of NaCl salinity on growth and mineral partitioning in *Quercus robur* L., a rhythmically growing species. *Trees*, 1998, 12(7): 424-430.
- [18] Molhtar R, Mohamed V A, Arbi G, Mohamed N. Effect of NaCl on the growth and the ionic balance K⁺/Na⁺ of two populations of *Lotus creticus* (L.) (Papilionaceae). *Lotus Newsletter*, 2006, 36(2): 34-53.
- [19] Khayat P N, Jamaati-e-Somarin S, Aabihu-e-Mahmoodabad R, Yari A, Khayatnezhad M, Gholamin R. Screening of salt tolerance Canola cultivars (*Brassica napus* L.) using physiological markers. *World Applied Sciences Journal*, 2010, 10(7): 817-820.
- [20] Vicente O, Boscaiu M, Naranjo M Á, Estrelles E, Bellés J M, Soriano P. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae). *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(4): 463-481.
- [21] Chen S L, Li J K, Yin W L, Wang S S. Tissue and cellular K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ of poplar under saline salt stress conditions. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 84-88.
- [22] Bonser A M, Lynch J P, Snapp S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist*, 1996, 132(2): 281-288.
- [23] Sun J, Dai S X, Wang R G, Chen S L, Li N Y, Zhou X Y, Lu C F, Shen X, Zheng X J, Hu Z M, Zhang Z K, Song J, Xu Y. Calcium mediates root K⁺/Na⁺ homeostasis in poplar species differing in salt tolerance. *Tree Physiology*, 2009, 29(9): 1175-1186.
- [24] Abdolzadeh A, Shima K, Lambers H, Chiba K. Change in uptake, transport and accumulation of ions in *Nerium oleander* (Rosebay) as affected by different nitrogen sources and salinity. *Annals of Botany*, 102(5): 735-746, 2008.
- [25] Ge L P, Wang Z W. Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1195-1202.
- [26] Li F, Xie Y H, Qin Y Y. Adaptive strategies of wetland plants in salt stress environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(2): 314-321.
- [27] Mauchamp A, Mésleard F. Salt tolerance in *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes. *Aquatic Botany*, 2001, 70(1): 39-52.
- [28] Salter J, Morris K, Bailey P C E, Boon P I. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings. *Aquatic Botany*, 2007, 86(3): 213-222.
- [29] Chen S, Polle A. Salinity tolerance of *Populus*. *Plant Biology*, 2010, 12(2): 317-333.
- [30] Naidoo G, Kift J. Responses of the saltmarsh rush *Juncus kraussii* to salinity and waterlogging. *Aquatic Botany*, 2006, 86(3): 217-225.

- [31] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(1): 17-36.
- [32] Keller C, Hammer D, Kayser A, Richner W, Brodbeck M, Sennhauser M. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil*, 2003, 249(1): 67-81.
- [33] Day S D, Wiseman P E, Dickinson S B, Harris J R. Tree root ecology in the Urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2010, 36(5): 193-205.
- [34] Yao J, Shi W M. Effect of salt stress on structure and growth of tomato seedling roots. *Soils*, 2008, 40(2): 279-282.
- [35] He X J, Mu R L, Cao W H, Zhang Z G, Zhang J S, Chen S Y. AtNAC2, a transcription factor downstream of ethylene and auxin signaling pathways, is involved in salt stress response and lateral root development. *The Plant Journal*, 2005, 44(6): 903-916.
- [36] Bolu W H, Polle A. Growth and stress reactions in roots and shoots of a salt-sensitive poplar species (*Populus x canescens*). *Tropical Ecology*, 2004, 45(1): 161-171.
- [2] 张华新, 刘正祥, 刘秋芳. 盐胁迫下树种幼苗生长及其耐盐性. *生态学报*, 2009, 29(5): 2263-2271.
- [8] 赵琪, 戴绍军. 蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制. *生态学报*, 2012, 32(1): 274-283.
- [10] 孙洪刚, 陈益泰. 沿海防护林四个树种根系分布对盐胁迫的响应. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2365-2372.
- [13] 陈益泰, 陈雨春, 黄一青, 孙海菁, 陈丹凤. 抗风耐盐常绿树种弗吉尼亚栎引种初步研究. *林业科学研究*, 2007, 20(4): 542-546.
- [14] 王树凤, 胡韵雪, 李志兰, 孙海菁, 陈益泰. 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. *生态学报*, 2010, 30(17): 4609-4616.
- [15] 王标, 虞木奎, 孙海菁, 成向荣, 单奇华, 方炎明. 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1817-1824.
- [21] 陈少良, 李金克, 尹伟伦, 王沙生. 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): 84-88.
- [25] 弋良朋, 王祖伟. 盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布. *生态学报*, 2011, 31(5): 1195-1202.
- [26] 李峰, 谢永宏, 覃盈盈. 盐胁迫条件下湿地植物的适应策略. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 314-321.
- [34] 姚静, 施卫明. 盐胁迫对番茄根形态和幼苗生长的影响. *土壤*, 2008, 40(2): 279-282.

参考文献:

- [1] 张建锋. 盐碱地生态修复原理与技术. 北京: 中国林业出版社, 2008: 14-15.

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