

NaCl 胁迫对 3 个楸树无性系苗期根系特征的影响

吴统贵¹, 顾沈华², 颜福彬³, 吴敏霞³, 王 臣¹, 虞木奎^{1,①}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 嘉兴市林特技术推广总站, 浙江 嘉兴 314050;
3. 温岭市林业技术推广站, 浙江 温岭 317500)

摘要: 以 3 个楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Meyer) 无性系 (02-2-5, YQ1 和 07-1) 扦插苗为研究对象, 对质量浓度 0.00% (对照)、0.10%、0.20%、0.25%、0.30% 和 0.40% NaCl 胁迫条件下其细根 (直径 $\Phi < 2$ mm) 和粗根 ($\Phi \geq 2$ mm) 的长度、表面积和体积等形态学特征以及根系活力的变化规律进行了研究。结果表明: 随 NaCl 质量浓度的提高, 各无性系细根及粗根的长度、表面积和体积以及根系活力均逐渐降低, 且均明显低于对照, 部分处理与对照间的差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。在 NaCl 胁迫条件下, 各无性系间根长和根表面积降幅的差异不明显且无统计学意义 ($P > 0.05$); 但在中度 (NaCl 质量浓度 0.20% 和 0.25%) 及重度 (NaCl 质量浓度 0.30% 和 0.40%) 胁迫条件下, 无性系 02-2-5 根体积的降幅显著小于另外 2 个无性系; 而在 NaCl 胁迫条件下无性系 02-2-5 根系活力的降幅也显著小于另外 2 个无性系。研究结果显示: 在 NaCl 胁迫条件下 3 个楸树无性系扦插苗根系的生长均受到抑制, 但各无性系对 NaCl 胁迫的耐性有一定差异, 其中无性系 02-2-5 对 NaCl 胁迫的耐性较强; 此外, 根系活力或其降幅可作为楸树无性系耐盐能力的评价指标之一。

关键词: 楸树; NaCl 胁迫; 根系形态特征; 根系活力; 耐盐性

中图分类号: Q945.78; S792.99.04 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)02-0067-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.02.09

Effect of NaCl stress on root characteristics of three clones of *Catalpa bungei* at seedling stage

WU Tonggui¹, GU Shenhua², YAN Fubin³, WU Minxia³, WANG Chen¹, YU Mukui^{1,①} (1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China; 2. Forestry Technique Extension Department of Jiaxing, Jiaxing 314050, China; 3. Forestry Technique Extension Department of Wenling, Wenling 317500, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(2): 67-71

Abstract: Taking cutting seedlings of three clones (02-2-5, YQ1 and 07-1) of *Catalpa bungei* C. A. Meyer as experimental materials, change regularity of morphological characteristics including length, surface area and volume of fine root (diameter $\Phi < 2$ mm) and coarse root ($\Phi \geq 2$ mm) and root activity was studied under condition of NaCl stress with mass ratios of 0.00% (CK), 0.10%, 0.20%, 0.25%, 0.30% and 0.40%. The results show that length, surface area and volume of fine root and coarse root and root activity of three clones gradually decrease with rising of NaCl mass ratio, which are all obviously lower than those of the control and there is the statistical significance ($P < 0.05$) in differences of some treatments with those of the control. Under condition of NaCl stress, there is no obvious difference in decreasing range of root length and root surface area among three clones without statistical significance ($P > 0.05$). But under conditions of medium (NaCl mass ratio of 0.20% and 0.25%) and heavy (NaCl mass ratio of 0.30% and 0.40%) stresses, decreasing range of root volume of clone 02-2-5 is significantly lower than that of other two clones, and under NaCl stress, decreasing range of root activity of clone 02-2-5 is also significantly lower than that of other two clones. It is suggested that root growth of cutting seedlings of three clones of *C. bungei* all could be inhibited under NaCl stress, but the tolerance of three clones to NaCl stress is different, in which, the tolerance of clone 02-2-5 to NaCl stress is

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 浙江省科学技术厅重大科技专项(2011C12016); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12C16008)

作者简介: 吴统贵(1980—), 男, 山东莱芜人, 博士, 副研究员, 主要从事植物逆境生理生态学研究。

①通信作者 E-mail: yumukui@sina.com

stronger. Moreover, root activity or its decreasing range can be used as one of evaluating indexes for salt tolerance of *C. bungei* clones.

Key words: *Catalpa bungei* C. A. Meyer; NaCl stress; morphological characteristics of root; root activity; salt tolerance

根系是植物的重要器官,其主要功能之一就是环境中吸收水分和养分以供植物生长发育^[1]。根系是植物与土壤环境接触的主要界面,对土壤环境变化甚为敏感^[2],是土壤盐碱危害中植物最直接的受害部位^[3],因此,逆境胁迫下植物根系形态特征和根系活力将直接影响植物的适应能力。了解盐胁迫条件下植物根系形态及根系活力的变化特征对研究盐胁迫条件下植物的响应与适应机制具有重要意义^[4]。

楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Meyer) 属紫葳科 (Bignoniaceae) 梓树属 (*Catalpa Scopoli*), 是中国特有的珍贵优质用材树种和著名园林观赏树种, 主要分布区为河南西部, 中国东部沿海地区也有零星分布^[5]; 其材质优良、树体高大且树姿优美, 深受园林工作者青睐。在前期研究工作中, 作者所在课题组对 9 个楸树无性系的耐盐能力进行了比较^[6-7]。在此基础上, 作者选择耐盐能力不同的 3 个楸树无性系为研究对象, 对 NaCl 胁迫条件下各无性系根系形态和根系活力的变化规律进行分析, 旨在探明各无性系对盐胁迫的适应性差异, 为楸树优良耐盐无性系的筛选提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验于 2010 年 6 月 20 日至 9 月 7 日在位于浙江省富阳市的中国林业科学研究院亚热带林业研究所三桥基地的大棚内进行, 地理坐标为北纬 29°54′、东经 119°30′。气候温暖, 雨量充沛; 年均温度 16.3 °C, 年绝对最高温度 40.7 °C, 年绝对最低温度 -9.9 °C; 年均降水量 1 452.5 mm, 年均蒸发量 1 235 mm, 年均空气相对湿度 68%, 年均无霜期 248 d。土壤为疏松红黄壤, 肥力中等且排水良好, pH 5.5 ~ pH 6.6。

实验材料系全国楸树协作组 2008 年春提供的 3 个楸树无性系 02-2-5、YQ1 和 07-1; 经前期实验, 无性系 02-2-5 耐盐性较强, 无性系 YQ1 耐盐性中等, 无性系 07-1 耐盐性较弱。供试的 3 个楸树无性系幼苗均为当年生扦插苗, 平均苗高 38 cm、平均地

径 0.62 cm。在硬质塑料盆(直径和高均为 18 cm)中装入 W(黄土):W(河沙):W(泥炭)=10:3:1 的干栽培基质 3 kg, 选择生长一致的扦插苗分别栽入盆中, 每盆 1 株, 备用。

1.2 方法

1.2.1 NaCl 胁迫处理方法 实验设置 5 个 NaCl 处理组和 1 个对照组, NaCl 质量浓度(干土中 NaCl 的质量分数)分别为 0.10%、0.20%、0.25%、0.30% 和 0.40%, 对照(CK)则不加 NaCl(质量浓度 0.00%)。处理前根据每盆栽培基质的质量计算 NaCl 的加入量, 然后将 NaCl 固体分 3 次溶于 500 mL 水中并浇入栽培盆中, 每 3 d 浇 1 次; 栽培盆下垫托盘, 可接收渗出的处理液并重新浇回栽培盆中, 以保持各处理 NaCl 浓度水平的基本恒定。处理 9 d 后每 2 d 浇 1 次自来水, 使基质含水量保持在田间持水量的 70% 左右。每处理 3 次重复, 每重复 3 株幼苗, 随机区组排列。

1.2.2 各指标测量方法 NaCl 胁迫处理 80 d 后, 在不同无性系各处理中均选择中等大小的植株 1 株, 用自来水冲洗干净后收集全部新生根, 吸干表面水分后称取 1~2 g, 参照文献[8]的方法测定根系活力; 剩余根系根据直径分为粗根(直径 $\Phi \geq 2$ mm)和细根($\Phi < 2$ mm) 2 部分, 用 Win RHINO 扫描仪 (Regent Instruments Inc., Canada) 分别测定单株的根长、根表面积和根体积。

1.3 数据处理和分析

采用 Excel 2003 软件对实验数据进行计算和统计分析, 方差分析采用 SPSS 17.0 统计分析软件中的 ANOVA 模块完成。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对 3 个楸树无性系根长的影响

经不同质量浓度 NaCl 胁迫处理 80 d 后 3 个楸树无性系扦插苗根长的变化见表 1。由表 1 可见: 随 NaCl 质量浓度的提高, 3 个无性系扦插苗细根和粗根的根长均呈逐渐降低的趋势, 在部分处理组间其差异具有统计学意义 ($P < 0.05$), 但各无性系根长的降幅

存在一定差异。

从细根长度的变化看,与对照相比较,轻度 NaCl (质量浓度 0.10%) 胁迫处理条件下无性系 YQ1 扦插苗细根长度的降幅仅为 28.54%,其降幅显著小于另外 2 个无性系(降幅均在 50% 以上);在中度(质量浓度 0.20% 和 0.25%)及重度(质量浓度 0.30% 和 0.40%)NaCl 胁迫条件下 3 个无性系扦插苗细根长度

的降幅基本相同。从粗根长度的变化看,与对照相比较,3 个无性系扦插苗粗根长度的降幅差异不大,尽管在重度 NaCl 胁迫条件下无性系 02-2-5 扦插苗粗根长度的降幅小于无性系 YQ1 和 07-1,但差异不具有统计学意义($P>0.05$)。此外,在质量浓度 0.40% NaCl 胁迫条件下无性系 07-1 扦插苗死亡,因而缺少其相关指标的测定数据。

表1 NaCl胁迫对3个楸树无性系扦插苗根长的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Effect of NaCl stress on root length of cutting seedlings of three clones of *Catalpa bungei* C. A. Meyer ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

NaCl 质量 浓度/% Mass ratio of NaCl	各无性系的细根长度/cm Fine root length of different clones			各无性系的粗根长度/cm Coarse root length of different clones		
	02-2-5	YQ1	07-1	02-2-5	YQ1	07-1
	0.00 (CK)	6 231.61±636.11a	4 053.61±323.19a	4 021.82±312.34a	169.21±34.26a	113.97±22.05a
0.10	2 953.29±607.38b	2 896.79±383.18b	1 850.65±539.84b	121.13±15.06ab	83.78±19.32ab	91.85±39.67ab
0.20	2 555.82±229.43bc	2 231.65±450.76b	986.42±212.31c	100.50±20.78ab	69.54±10.04b	54.67±14.87b
0.25	1 569.76±216.42c	1 169.74±362.41c	1 050.18±307.65bc	82.11±23.90b	64.82±14.38b	45.13±14.23b
0.30	1 096.53±23.62cd	1 393.42±236.53c	853.54±136.46c	54.85±11.48bc	14.59±3.87c	29.66±5.18c
0.40	806.96±83.55c	635.51±33.42d	-	19.49±2.41c	8.94±1.11c	-

¹⁾ 细根直径 $\Phi < 2$ mm, 粗根直径 $\Phi \geq 2$ mm Fine root diameter $\Phi < 2$ mm, coarse root diameter $\Phi \geq 2$ mm. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). -: 无测定数据 Without determination datum.

2.2 NaCl胁迫对3个楸树无性系根表面积的影响

经不同质量浓度 NaCl 胁迫处理 80 d 后 3 个楸树无性系扦插苗根表面积的变化见表 2。由表 2 可以看出:随 NaCl 质量浓度提高,3 个无性系扦插苗细根和粗根的表面积均呈逐渐降低的趋势,其差异在部分处理间具有统计学意义($P < 0.05$),但各无性系根表面积降幅存在一定差异。总体上看,在中度(质量浓度 0.20% 和 0.25%)及重度(质量浓度 0.30% 和

0.40%)NaCl 胁迫条件下 3 个无性系扦插苗根表面积显著小于对照,其差异总体上具有统计学意义。

在轻度和中度 NaCl 胁迫条件下,无性系 YQ1 扦插苗细根和粗根表面积降幅均比另外 2 个无性系低 10% 以上;但在重度 NaCl 胁迫条件下,无性系 02-2-5 扦插苗细根和粗根表面积降幅则最小。方差分析结果显示各无性系间根表面积降幅的差异不具有统计学意义($P > 0.05$)。

表2 NaCl胁迫对3个楸树无性系扦插苗根表面积的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of NaCl stress on root surface area of cutting seedlings of three clones of *Catalpa bungei* C. A. Meyer ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

NaCl 质量 浓度/% Mass ratio of NaCl	各无性系的细根表面积/cm ² Fine root surface area of different clones			各无性系的粗根表面积/cm ² Coarse root surface area of different clones		
	02-2-5	YQ1	07-1	02-2-5	YQ1	07-1
	0.00 (CK)	1 185.69±183.62a	748.65±89.67a	720.97±30.56a	143.29±18.96a	91.02±22.31a
0.10	580.65±91.45b	521.65±105.68ab	330.65±80.84b	101.25±17.83ab	67.87±8.03ab	110.46±14.20a
0.20	495.84±30.62b	390.85±80.69b	185.26±71.59b	81.57±7.30b	61.57±12.10ab	48.37±3.97b
0.25	295.62±41.61c	226.33±63.55b	191.56±61.58b	68.95±9.47b	42.35±3.51b	38.59±3.35b
0.30	205.31±9.96c	211.59±63.65bc	83.76±12.81c	42.67±8.08b	8.02±1.57c	19.17±2.67b
0.40	106.56±11.98d	88.71±9.99c	-	11.80±2.35c	5.39±0.28c	-

¹⁾ 细根直径 $\Phi < 2$ mm, 粗根直径 $\Phi \geq 2$ mm Fine root diameter $\Phi < 2$ mm, coarse root diameter $\Phi \geq 2$ mm. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). -: 无测定数据 Without determination datum.

2.3 NaCl胁迫对3个楸树无性系根体积的影响

经不同质量浓度 NaCl 胁迫处理 80 d 后 3 个楸树

无性系扦插苗根体积的变化见表 3。由表 3 可以看出:随 NaCl 质量浓度提高,3 个楸树无性系扦插苗细

根和粗根的体积均呈逐渐降低的趋势,其变化规律与根长和根表面积的变化规律基本一致,其差异在部分处理间具有统计学意义($P < 0.05$),但3个无性系根体积的降幅存在一定差异。总体上看,在中度(质量浓度0.20%和0.25%)及重度(质量浓度0.30%和0.40%)NaCl胁迫条件下3个无性系扦插苗的根体积显著小于对照,其差异总体上具有统计学意义。

表3 NaCl胁迫对3个楸树无性系扦插苗根体积的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of NaCl stress on root volume of cutting seedlings of three clones of *Catalpa bungei* C. A. Meyer ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 质量 浓度/% Mass ratio of NaCl	各无性系的细根体积/cm ³ Fine root volume of different clones			各无性系的粗根体积/cm ³ Coarse root volume of different clones		
	02-2-5	YQ1	07-1	02-2-5	YQ1	07-1
0.00 (CK)	24.83±2.51a	16.56±4.81a	16.96±2.34a	11.36±1.27a	6.03±1.12a	7.26±0.37a
0.10	13.26±2.56b	11.56±3.84ab	7.53±1.55b	7.22±1.41b	4.12±1.02ab	8.23±1.41a
0.20	11.83±1.55b	8.06±2.85ab	4.17±2.62bc	5.93±1.30bc	4.17±1.43ab	3.14±1.12b
0.25	6.53±2.51c	5.13±2.05b	5.61±1.39bc	5.23±0.31bc	3.26±0.23b	2.44±1.22b
0.30	4.95±1.01c	4.90±2.41b	2.91±0.90c	2.82±0.06c	0.33±0.01c	1.28±0.01b
0.40	2.55±0.51c	1.36±0.41c	-	0.94±0.18d	0.10±0.00c	-

¹⁾ 细根直径 $\Phi < 2$ mm, 粗根直径 $\Phi \geq 2$ mm. Fine root diameter $\Phi < 2$ mm, coarse root diameter $\Phi \geq 2$ mm. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$). Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). -: 无测定数据 Without determination datum.

2.4 NaCl胁迫对3个楸树无性系根系活力的影响

经不同质量浓度NaCl胁迫处理80 d后3个楸树无性系扦插苗根系活力的变化见表4。由表4可见:随NaCl质量浓度提高,3个楸树无性系扦插苗的根系活力均呈逐渐降低的趋势。

在对照条件下,3个无性系的根系活力基本相同,无性系02-2-5、YQ1和07-1的根系活力分别为259.36、250.57和259.27 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;随NaCl质量浓度提高,3个无性系的根系活力均逐渐降低但降幅存在较大差异,在NaCl质量浓度0.10%、0.20%、0.25%、0.30%和0.40%胁迫条件下,无性系02-2-5根系活力的降幅依次为2.1%、5.4%、11.2%、15.2%和32.6%;无性系YQ1根系活力的降幅依次为28.4%、30.2%、48.0%、53.7%和63.4%;无性系07-1根系活力的降幅基本上大于另外2个无性系,在质量浓度0.30% NaCl胁迫条件下降幅达60%以上。

方差分析结果显示:耐盐能力较强的无性系02-2-5扦插苗的根系活力在NaCl质量浓度大于0.25%的胁迫条件下与对照的差异具有统计学意义,而无性系YQ1和07-1扦插苗的根系活力分别在NaCl质量浓度大于0.10%和0.20%的胁迫条件下与对照的差异具有统计学意义($P < 0.05$)。多重比较分析结果也

与对照相比,在NaCl胁迫条件下无性系07-1扦插苗根体积的降幅均明显大于无性系02-2-5和YQ1,其差异具有统计学意义($P < 0.05$);在轻度(质量浓度0.10%)和重度NaCl胁迫条件下无性系02-2-5和YQ1扦插苗根体积的降幅差异不明显,而在重度NaCl胁迫条件下无性系YQ1扦插苗根体积的降幅明显大于无性系02-2-5。

表4 NaCl胁迫对3个楸树无性系扦插苗根系活力的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 4 Effect of NaCl stress on root activity of cutting seedlings of three clones of *Catalpa bungei* C. A. Meyer ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 质量 浓度/% Mass ratio of NaCl	各无性系的根系活力/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ Root activity of different clones		
	02-2-5	YQ1	07-1
0.00 (CK)	259.36±18.75a	250.57±19.60a	259.27±4.13a
0.10	253.83±17.80a	179.35±9.98b	205.48±20.28ab
0.20	245.36±19.58ab	174.83±5.76b	134.28±15.18b
0.25	230.32±17.70b	130.24±10.50c	120.27±10.50b
0.30	220.04±24.37b	115.92±5.27c	80.25±10.02b
0.40	174.85±10.32c	91.64±6.79d	-

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$). Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). -: 无测定数据 Without determination datum.

显示:无性系02-2-5扦插苗的根系活力在各处理条件下显著大于无性系YQ1和07-1,其差异具有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨论和结论

林木根系在植物系统能量流动和物质循环中具有重要作用,是植物吸收水分和养分的重要器官^[9]。根系对环境胁迫的响应非常敏感^[10],外部胁迫很容易引起根细胞线粒体结构和功能的显著变化^[11],可

直接诱导根系产生防御反应或启动细胞死亡程序,并直接导致根系形态特征的变化^[12],如降低根系长度、表面积和体积等^[13-14]。在本研究中,随 NaCl 质量浓度提高,3 个楸树无性系扦插苗细根和粗根的长度、表面积和体积均逐渐下降,且各处理组与对照间均有差异,说明轻度 NaCl 胁迫即可对楸树根系形态特征产生明显影响。同时,供试的 3 个楸树无性系对 NaCl 胁迫的耐性存在较大差异,其中无性系 02-2-5 的耐性较强,这与作者所在课题组的前期实验结果^[6-7]相一致。

根系活力是判断植物对环境(特别是逆境)适应能力的一个优良指标^[15-16],也是衡量树种抗盐能力的可靠指标^[17]。对 3 个楸树无性系根系活力的研究表明:随 NaCl 质量浓度提高,3 个楸树无性系扦插苗的根系活力均逐渐降低,其中 NaCl 胁迫对无性系 07-1 根系活力的影响最大,对无性系 02-2-5 根系活力的影响最小;在供试的 3 个楸树无性系中,耐盐性强的无性系 02-2-5 在质量浓度 0.25% NaCl 胁迫条件下根系活力显著低于对照,而无性系 YQ1 和 07-1 分别在质量浓度 0.10% 和 0.20% NaCl 胁迫条件下根系活力显著低于对照,且无性系 07-1 根系活力的降幅基本上都大于无性系 YQ1。由此可见:植物的根系活力与其耐盐性密切相关,根系活力的大小或者盐胁迫条件下根系活力的降幅可以作为评价楸树无性系耐盐能力的有效指标之一。

参考文献:

- [1] 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[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2365-2372.
- [2] ASHRAF M, ATHAR H, HARRIS P, et al. Some prospective strategies for improving salt tolerance [J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 97: 45-110.
- [3] ASHRA M, OZTURK M, ATHAR H R. Salinity and Water Stress [M]. *Osnabrueck: Springer*, 2009: 37-43.
- [4] 吴敏,薛立,李燕. 植物盐胁迫适应机制研究进展[J]. *林业科学*, 2007, 43(8): 111-117.
- [5] 麻文俊,王军辉,张守攻,等. 楸树无性系苗期氮素分配和氮素效率差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1256-1261.
- [6] 王臣,虞木奎,王宗星,等. 9 个楸树无性系对盐胁迫的差异化响应[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 20-24.
- [7] 王臣,虞木奎,张翠,等. 盐胁迫下 3 个楸树无性系光合特征研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(4): 537-543.
- [8] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 91.
- [9] 史建伟,王孟本,陈建文,等. 柠条细根的空间分布特征及其季节动态[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 726-733.
- [10] 权伟,徐侠,王丰,等. 武夷山不同海拔高度植被细根生物量及形态特征[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1095-1103.
- [11] 卫星,王政权,张国珍. 干旱胁迫下水曲柳苗木细根线粒体的形态及活性变化[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1454-1462.
- [12] DAT J F, PELLINEN R, BEECKMAN T, et al. Changes in hydrogen peroxide homeostasis trigger active cell death process in tobacco[J]. *Plant Journal*, 2003, 33: 621-632.
- [13] 陈瑛,李延强,杨肖娥. 镉对不同基因型小白菜根系生长特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 170-176.
- [14] YUAN J F, FENG G, MA H Y, et al. Effect of nitrate on root development and nitrogen uptake of *Suaeda physophora* under NaCl salinity[J]. *Pedosphere*, 2010, 20: 536-544.
- [15] 齐曼·尤努斯,木合塔尔·扎热,塔衣尔·艾合买提. 干旱胁迫下尖果沙枣幼苗的根系活力和光合特性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1789-1795.
- [16] 刘雁丽,史萍,夏研,等. Cu 和丹皮酚磺酸钠处理对凤丹根系生长、丹皮酚含量及 H⁺-ATPase 活性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2012, 21(1): 20-27.
- [17] 李国雷. 盐胁迫下 13 个树种反应特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学林学院, 2004: 91-96.

(责任编辑: 惠红)