

# 盐分和母树大小对黑松海防林种子萌发和幼苗早期生长的影响<sup>\*</sup>

韩广轩<sup>1,2</sup> 毛培利 刘苏静 王光美 张志东 薛钦昭

(中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

**摘要** 研究了盐度 (0, 0.02, 0.04和 0.08 mol · L<sup>-1</sup>) 和黑松母树大小对山东半岛北部海防林的主要造林树种黑松种子萌发和幼苗早期生长的影响。结果表明: 盐度对黑松种子的发芽率有显著影响, 随着 NaCl浓度的升高, 种子萌发率逐渐下降; 盐分抑制黑松幼苗的早期生长, 随着盐浓度升高, 黑松幼苗的根长、芽长及根干质量均显著降低; 母树大小在总体上对种子萌发率没有影响, 但显著影响黑松幼苗的根长、芽长和芽干质量; 盐度和母树大小的相互作用显著影响黑松幼苗的根长和芽长, 而对黑松种子萌发率、幼苗根干质量和芽干质量的影响不显著。

**关键词** 海防林; 黑松; 盐度; 母树大小; 种子萌发; 幼苗早期生长

**中图分类号** S718.55 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)11-2171-06

**Effects of sea water salinity and mother tree size on the seed germination and seedling early growth of *Pinus thunbergii* coastal protection forest** HAN Guang-xuan, MAO Pei-li, LIU Su-jing, WANG Guang-mei, ZHANG Zhi-dong, XUE Qin-zhao (*Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2171-2176

**Abstract:** *Pinus thunbergii* is the main forestation tree species of coastal protection forests in northern Shandong Peninsula of China. Its seed germination and seedling early growth were studied under the conditions of different water salinity (0, 0.02, 0.04, and 0.08 mol · L<sup>-1</sup>) and mother tree sizes. With increasing sea water salinity, the seed germination rate, root- and plumule length, and the dry weights of root and plumule decreased significantly. Mother tree size had little effects on the seed germination rate, but affected the root- and plumule length and the plumule dry weight significantly. The interaction of sea water salinity and mother tree size affected the root- and plumule length significantly, but less affected the germination rate and the dry weights of root and plumule.

**Key words:** coastal protection forest; *Pinus thunbergii*; salinity; mother tree size; seed germination; seedling early growth

种子萌发是植物进入营养生长阶段的第一步 (Flores & Briones, 2001), 而幼苗是植物生活周期中个体生长最为脆弱、对环境变化最为敏感的时期 (Guariguata, 2000), 因而, 种子萌发和幼苗定居阶段是植物种群建立过程中的关键时期 (El-Keblawy & Al-Rawai, 2005), 决定着植物的分布和种群的自

更新, 直接影响植被的演替过程 (朱雅娟等, 2006)。对森林群落关键树种种子萌发和幼苗生长的研究, 既有助于了解种群幼苗的更新规律又能揭示群落的演替动态, 可为森林管理提供科学依据 (陈芳清等, 2008)。

黑松 (*Pinus thunbergii*) 海防林是山东半岛北部沙质海岸带典型的生态系统类型, 是抵御风暴潮、海蚀和风沙等自然灾害的生态屏障。由于黑松海防林处在陆海相互作用活跃的过渡地带, 滨海沙地地下水埋藏浅且矿化度高, 地下盐分易升至地表, 导致

<sup>\*</sup> 山东省科技攻关计划项目 (2007GG2QT06019)、烟台市科学技术发展计划项目 (2008155) 和中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所前沿领域资助项目 (A3J0708BX)。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: gxhan@yic.ac.cn

收稿日期: 2009-03-19 接受日期: 2009-07-01

土壤盐渍化(朱教君等, 2002; 林学政等, 2006), 土壤含盐量较高可能会限制黑松种子萌发和幼苗生长。在沙质海岸上, 黑松以种子繁殖为主, 因此黑松种子在盐渍环境中萌发的能力以及幼苗对盐胁迫的适应性直接影响到黑松种群的定植与发展。除了环境条件(温度、水分、盐度等)的制约, 种子由潜在种群转化为现实种群的过程还受种子质量的影响(祝小科和朱守谦, 2003), 种子生理机能会影响种子的萌发时间和萌发率(Grayson *et al.*, 2002; Espahbodi *et al.*, 2007)。研究表明, 母树的年龄或径级大小是影响种子质量和生理机能的重要因素(Alvarez *et al.*, 2005; Espahbodi *et al.*, 2007)。例如, 与 28、38 和 43 cm 胸径的母树相比, 美洲短叶松(*Pinus echinata*) 中龄级母树(33 cm class)的种子萌发率最高(Grayson *et al.*, 2002); 花楸(*Sorbus torminalis*)母树胸径不同, 其种子的生理机能也可能不同, 中龄母树的种子休眠时间最短, 且能发育成更强壮的幼苗(Espahbodi *et al.*, 2007); 欧洲白桦(*Betula pendula*)平均胸径和树高与种子产量及萌发率之间存在着直接关系(Reyes *et al.*, 1997)。目前, 国内外关于黑松树木年龄或径级大小对种子萌发和幼苗生长影响的研究还未见报道。本文以山东半岛北部黑松海防林为研究对象, 分析不同盐度下黑松种子萌发和幼苗早期生长的生态学特性, 探讨其母树大小对种子萌发和幼苗早期生长的影响, 为阐明黑松防护林的天然更新机制及黑松沿海防护林的保育和可持续经营提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于山东半岛北部黑松分布区, 该分布区位于烟台市境内。所处区域属暖温带东亚季风型大陆性气候, 年均温度 11.5℃, 降水量 760 mm, 无霜期 200 d 左右, 年均绝对湿度 71%, 年均日照时数 2642.7 h, 日照率 60%。土壤为滨海砂地土壤, 机械组成以砂为主, 有机质含量很低, 一般不超过 1%。黑松林栽植于 20 世纪 50 年代, 大多为纯林, 黑松林下植被比较简单, 灌木主要由紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、单叶蔓荆(*Vitex trifolia* var. *simplicifolia*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和野蔷薇(*Rosa multiflora*)等树种组成; 草本层主要为羊胡子草(*Carex rigescens*)、虫实(*Corispermum*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica* var. *ruthenica*)、白茅(*Imperata cylindrica* var.

*major*)和马齿苋(*Portulaca oleracea*)等。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 种子采集** 试验地位于山东省烟台沿海防护林省级自然保护区内的牟平区姜格庄镇(37°26'59"N, 121°47'19"E)。在垂直于海岸线方向上, 每隔 200 m 设置 1 条样线, 共 3 条样线。沿每条样线每隔 50 m, 设置 10 m × 10 m 的样方 1 个, 每条样线 6 个样方, 共设置 18 个样方。在每个样方中对黑松种群进行每木检尺, 测量其胸径, 以确定黑松种群的胸径分布范围及比例。根据样地的群落结构调查结果和结实现状, 选择 5 个结实径级, 分别为径级 sc1(3.5 cm < DBH < 6.5 cm)、sc2(6.5 cm < DBH < 9.5 cm)、sc3(9.5 cm < DBH < 12.5 cm)、sc4(12.5 cm < DBH < 15.5 cm)和 sc5(15.5 cm < DBH < 18.5 cm)。在调查的所有样地中, 每个径级随机选择 12~25 株黑松, 每株母树随机采收 5~10 个形态完整的成熟球果, 按照径级混匀, 置于室内自然风干。

**1.2.2 种子萌发及幼苗早期生长实验** 山东省砂质海岸带土壤含盐量通常为 0.02~0.03 mol·L<sup>-1</sup>, 也有地段超过 0.08 mol·L<sup>-1</sup>(王仁卿和周光裕, 2000), 种子萌发预试验表明, 种子在盐浓度达到 0.16 mol·L<sup>-1</sup>时未发芽。因此, 本实验共设置 4 个 NaCl 浓度梯度, 分别为 0、0.02、0.04 及 0.08 mol·L<sup>-1</sup>。待球果风干至种鳞分离、种子自行脱出时, 选取成熟的种子选取成熟的种子进行消毒处理, 然后置于培养皿中浸湿的滤纸上萌发。5 个径级(sc1~sc5)的黑松种子分别设置 4 个盐度处理, 每个处理 3 个重复, 每个重复 50 粒种子。培养皿置于恒温培养箱中(25 ± 0.2℃)中, 培养 21 d, 萌发过程中每 24 h 观测 1 次, 检查水分状况, 定期补充适量的清水。当胚根突破种皮时, 即认为种子萌发(邹莉等, 2008), 记录种子萌发起始时间和每日萌发种子数量。培养 21 d 后, 测定种子萌发后形成的幼苗根长、芽长, 然后放在烘箱内(75℃, 24 h)烘干, 用万分之一天平称取各部位干质量。

**1.2.3 数据处理** 发芽率和日发芽率计算公式如下(邹莉等, 2008):

$$\text{发芽率} = (\text{正常发芽种子粒数} / \text{种子总粒数}) \times 100\%$$

$$\text{日发芽率} = (\text{当日萌发种子粒数} / \text{种子总粒数}) \times 100\%$$

分别以盐度和树木径级为变量, 种子萌发率、幼苗根长和芽长、幼苗根干质量和芽干质量为因变量进行方差分析; 为分析盐度对种子萌发及幼苗早期生长的影响, 将盐度分别与种子萌发率、幼苗根长和

芽长、幼苗根干质量和芽干质量进行回归分析。数据分析采用 SPSS 11.0 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 盐度对种子萌发和幼苗早期生长的影响

2.1.1 盐度对种子萌发的影响 单因素方差分析表明,盐度对黑松种子的发芽率有显著影响 ( $F = 12.109, P < 0.001$ ),随着 NaCl 浓度的升高,种子萌发率逐渐下降(图 1)。CK、0.02 和 0.04 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,黑松种子的发芽率分别为 90.9%、87.5% 和 85.1%,0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,发芽率仅为 52.9%,为 CK 发芽率的 58.2%。统计分析表明,0.02 和 0.04 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下种子发芽率与 CK 的差异性不显著,说明黑松种子在较低盐浓度下有较高的萌发率,具有一定的耐盐性;但是,0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下的种子萌发率与 CK 存在着显著差异 ( $F = 10.799, P = 0.002$ ),说明高盐度会显著抑制黑松种子萌发。

从黑松种子萌发进程上看,高盐度延迟了种子的初始萌发时间,CK、0.02 和 0.04 mol · L<sup>-1</sup> NaCl

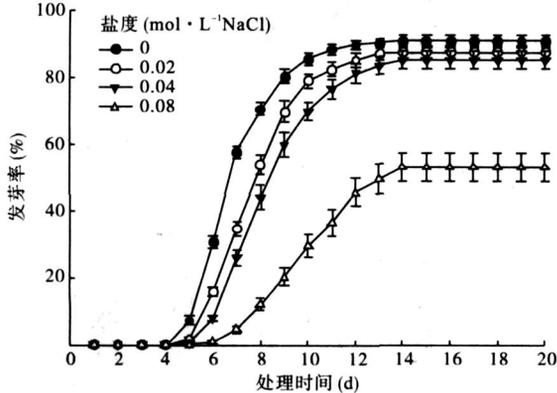


图 1 不同盐度处理下黑松种子的萌发进程  
Fig 1 Germination process of Pinus thunbergii seeds under different salinity treatments  
数据为平均值 ± 标准误。下同。

表 1 不同盐度梯度下 5 个径级母树的种子萌发率的单因素方差分析

Tab 1 ANOVA of seed germination percentage of different seed trees (5 diameter classes) under different salinity treatments

树木径级	0 mol · L <sup>-1</sup> NaCl			0.02 mol · L <sup>-1</sup> NaCl			0.04 mol · L <sup>-1</sup> NaCl			0.08 mol · L <sup>-1</sup> NaCl		
	GP (%)	F值	P值	GP (%)	F值	P值	GP (%)	F值	P值	GP (%)	F值	P值
sc1	93 ±1	0.295	0.935	85 ±5	1.825	0.263	93 ±3	2.670	0.146	50 ±1	4.833	0.184
sc2	90 ±5			87 ±2			83 ±2			59 ±5		
sc3	83 ±1			84 ±2			71 ±6			44 ±9		
sc4	95 ±3			95 ±4			87 ±6			66 ±11		
sc5	93 ±1			87 ±3			91 ±3			46 ±15		

GP:种子萌发率(平均值 ± 标准误)。

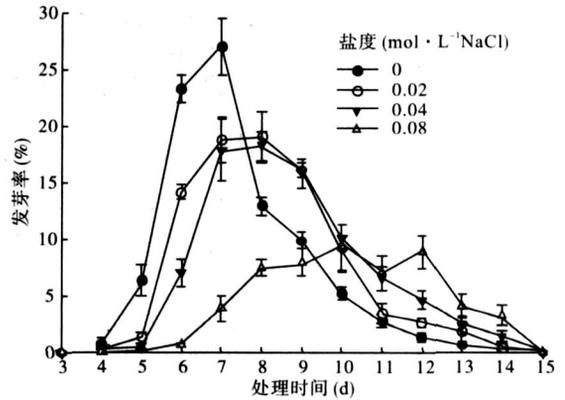


图 2 不同盐度浓度处理下黑松种子的日发芽率  
Fig 2 Daily germination percentage of Pinus thunbergii seeds under different salinity treatments

浓度下,第 4 天就有种子萌发,而 0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,第 6 天才种子萌发。在各盐度处理中,黑松种子日平均发芽率皆表现为单峰型,但盐度可以推迟黑松种子萌发速率曲线的高峰并降低峰值(图 2)。CK 发芽高峰为第 7 天,发芽率为 13.5%;0.02 和 0.04 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,发芽率高峰皆为第 9 天,分别为 9.5% 和 9.1%;0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,发芽率高峰为第 10 天,萌发速率为 4.7%。

2.1.2 盐度对幼苗早期生长特征的影响 黑松幼苗的根长 ( $F = 65.658, P < 0.001$ )、芽长 ( $F = 145.571, P < 0.001$ )、根干质量 ( $F = 15.712, P < 0.001$ ) 或芽干质量 ( $F = 20.407, P < 0.001$ ) 在 4 个盐度梯度下均存在显著差异,表明盐度影响黑松幼苗早期生长。黑松幼苗在对照条件下生长最好,根长、芽长及根干质量均达到最大值,随着盐浓度升高,黑松幼苗的根长、芽长及根干质量均呈直线递减 ( $P < 0.05$ ) (图 3)。在 0.02、0.04 和 0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度下,黑松幼苗的根长分别是对照组的 72.5%、58.2% 和 30.2%;芽长分别是对照组的 77.6%、56.1% 和 25.2%;根干质量分别是对照组

表 2 盐度和母树大小以及两者的相互作用对黑松种子萌发率、幼苗根长、芽长、根干质量和芽干质量影响的双因素方差分析  
Tab 2 Two-way ANOVA analysis of effects of salinity, tree size and their interaction on the germination percentage, root length, root dry weight, plumule length and plumule dry weight of *Pinus thunbergii* seedlings

变差来源	自由度	萌发率 (%)		根长 (cm)		芽长 (cm)		根干质量 (g)		芽干质量 (g)	
		F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值	F值	P值
盐度	3	11.537	0.000	10.176	0.000	17.683	0.000	5.709	0.001	8.151	0.000
径级	4	1.040	0.388	57.548	0.000	113.701	0.000	23.924	0.000	30.870	0.000
盐度 × 径级	12	0.097	1.000	5.417	0.000	4.591	0.000	1.870	0.069	1.009	0.459

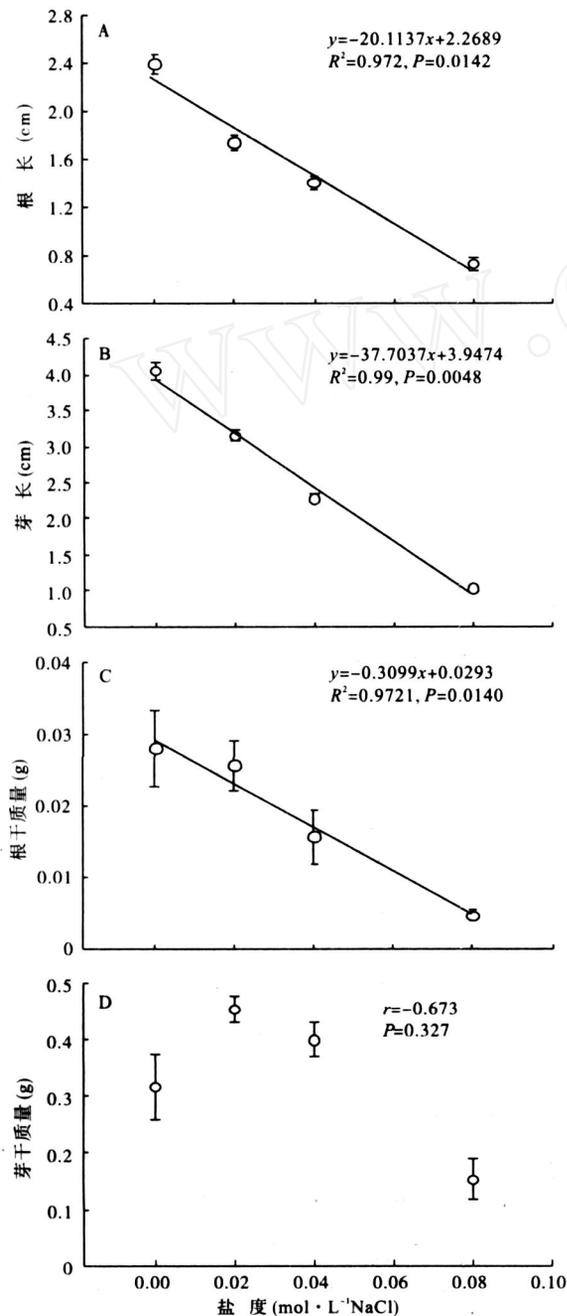


图 3 盐分对黑松幼苗根长 (A)、芽长 (B)、根干质量 (C) 和芽干质量 (D) 的影响

Fig 3 Effect of salinity on length of root (A), length of plumule (B), dry weight of root (C) and dry weight of plumule (D) of *Pinus thunbergii* seedlings

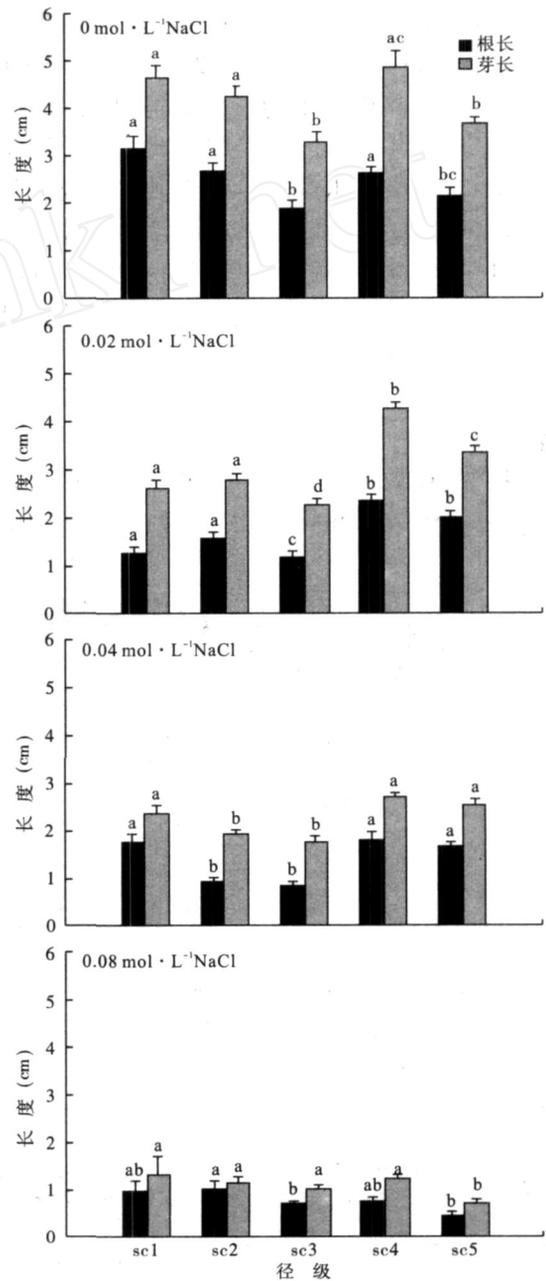


图 4 不同盐分浓度下黑松母树大小对幼苗根长和芽长的影响

Fig 4 Effect of seed tree size (diameter at breast height) on root length and plumule length of *Pinus thunbergii* seedlings under different salinity treatments

不同小写字母表示各组处理间差异性显著 ( $P < 0.001$ )。

的 91.2%、55.5%和 16.4%,而黑松幼苗的芽干质量与盐浓度的关系不显著 ( $r = -0.673$ ;  $P = 0.327$ ) (图 3)。

2.2 母树大小对种子萌发和幼苗早期生长的影响

2.2.1 母树大小对种子萌发的影响 单因素方差分析表明,不同径级母树的种子萌发率之间没有显著差异 ( $F = 0.952$ ,  $P = 0.435$ ),说明母树大小在总体上对种子萌发率没有影响。在 4 个盐度处理中, sc1 ~ sc5 母树种子的平均发芽率分别为 80.5%、79.5%、70.7%、85.7%和 79.2%,但是各个盐度处理下,不同径级母树的种子萌发率均不存在组间差异 (表 1)。

2.2.2 径级对幼苗早期生长特征的影响 方差分析表明,不同径级黑松母树的幼苗根长 ( $F = 16.693$ ,  $P < 0.001$ )或芽长 ( $F = 27.017$ ,  $P < 0.001$ )之间存在着显著差异,说明黑松母树大小影响幼苗早期生长。在 4 个盐度梯度下, sc1 ~ sc5 母树幼苗的平均根长和芽长均存在组间差异 (图 4)。sc1 ~ sc5 母树幼苗的平均根长分别为 1.8、1.5、1.1、1.9 和 1.6 cm;平均芽长分别为 2.7、2.5、2.1、3.3 和 2.6 cm,黑松幼苗的平均根长和芽长均表现为 sc4 > sc1 > sc5 > sc2 > sc3。

方差分析表明,母树径级总体上显著影响幼苗芽干质量 ( $F = 3.098$ ,  $P = 0.023$ ),但不影响幼苗根干质量 ( $F = 2.339$ ,  $P = 0.066$ )。除 0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理外,不同径级母树的幼苗根干质量在其他盐度梯度下均分别存在组间差异;在 0、0.08 mol · L<sup>-1</sup> NaCl 浓度梯度下,不同径级母树的幼苗芽干质量均分别存在组间差异 (图 5)。在 sc1 ~ sc5 母树中, sc1 母树的幼苗根干质量和芽干质量均最小, sc5 母树的幼苗根干质量和芽干质量均最大,但黑松幼苗的根干质量或芽干质量与对应的母树径级之间并不存在明显的相关关系。

2.3 盐度和径级交互作用对种子萌发和幼苗早期生长的影响

双因素方差分析表明,盐度和母树大小的相互作用显著影响黑松幼苗的根长 ( $F = 5.417$ ,  $P < 0.001$ )和芽长 ( $F = 4.591$ ,  $P < 0.001$ ),但对黑松种子萌发率 ( $F = 0.097$ ,  $P = 1.000$ )、幼苗根干质量 ( $F = 1.870$ ,  $P = 0.069$ )和芽干质量 ( $F = 1.009$ ,  $P = 0.459$ )的影响不显著 (表 2)。

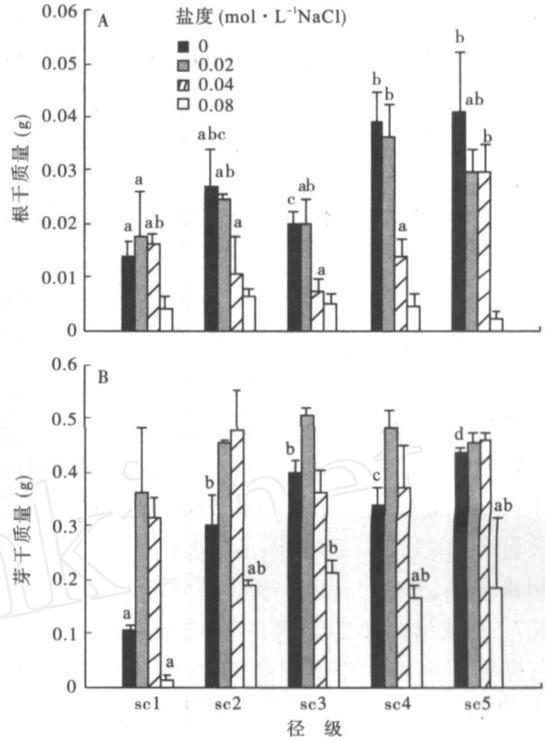


图 5 不同盐分浓度下黑松母树大小对幼苗根干质量和芽干质量的影响

Fig 5 Effect of seed tree size (diameter at breast height) on root dry weight (A) and plumule dry weight (B) of *Pinus thunbergii* seedlings under different salinity treatments

不同小写字母表示各组处理间差异性显著 ( $P < 0.05$ )。

3 讨论

研究表明,随着 NaCl 浓度的升高,黑松种子萌发率逐渐下降。对大多数种子来说,盐分对种子萌发起抑制作用,并且发芽率与盐分浓度呈显著负相关 (黄振英等, 2001; Gulzar & Khan, 2001)。另外,随着 NaCl 浓度的升高,黑松幼苗的根长、芽长及根干质量均呈直线递减,与其他植物在盐胁迫下的萌发和生长规律相似 (El-Keblawy & Al-Rawai, 2005; Song *et al*, 2008)。例如,盐度可以降低摩洛哥坚果 (*Argania spinosa*) 的种子萌发率,并明显影响胚根长度和干质量 (Bani-Ameur & Sipple-Michnerhuizen, 2001); 盐度明显延迟花生种子的萌发时间、降低种子萌发率,幼苗出土、胚根长度、植株高度和干质量等也随着盐度的增加而降低 (Mensah *et al*, 2006); 当 NaCl 浓度高于 0.16 mol · L<sup>-1</sup> 时,盐节木 (*Halocnemum strobilaceum*) 种子萌发率随浓度升高而降低 (高瑞如等, 2007)。

在海边频繁遭受潮汐侵袭的林分,会导致物种多样性的下降以及更新苗的缺失 (Desantis *et al*,

2007)。本研究表明, 0.02和 0.04 mol·L<sup>-1</sup>NaCl浓度下黑松种子发芽率与对照条件下的差异性不显著, 说明黑松种子在较低盐浓度下有较高的萌发率, 具有一定的耐盐性。山东省砂质海岸带土壤含盐量通常为 0.02 ~ 0.03 mol·L<sup>-1</sup> (王仁卿和周光裕, 2000), 因此, 盐度可能不是限制黑松海防林种子萌发的主要因素。

除了水分、温度、光照、土壤养分和土壤盐分等外界环境条件, 母树特征 (年龄、大小) 也会影响种子产量、种子萌发和幼苗生长。许多森林树种, 如欧洲白蜡 (*Fraxinus excelsior*)、欧洲白桦等在中年期能产生数量较多且质量较好的种子 (Espahbodi *et al.*, 2007), 高加索冷杉 (*Abies nordmanniana*) 种子生产的最佳年龄为 30 ~ 40 年, 也处在树木的中年期 (Vidakovich, 1991); 用径级代替年龄, Espahbodi等 (2007) 发现母树年龄显著的影响种子的萌发率; 欧洲白桦种群树木大小明显影响种子的萌发率 (Reyes *et al.*, 1997)。本研究表明, 不同径级黑松母树的种子萌发率之间并不存在显著差异, 说明树木年龄或大小在总体上对种子萌发率没有影响, Alvarez等 (2005) 也得出相似结论, 发现西班牙海岸松 (*Pinus pinaster*) 母树年龄对种子萌发率无显著影响。但是, 不同径级黑松母树的幼苗根长或芽长之间存在着显著差异, 黑松幼苗的平均根长和芽长均表现为 sc4 > sc1 > sc5 > sc2 > sc3, 说明母树大小会影响幼苗的生长特征, 例如, 不同摩洛哥坚果 (*Argania spinosa*) 母树间的种子萌发率、胚根长度和干质量之间存在着明显差异 (Bani-Aameur & Sipple-Michmerhuizen, 2001); 花楸 (*Sorbus torminalis*) 母树胸径不同, 其幼苗的生长特征也存在差异 (Espahbodi *et al.*, 2007)。

从实验结果来看, 母树大小和盐度的相互作用显著影响黑松幼苗早期生长, 因此, 在揭示森林天然更新规律时, 不仅要考虑环境因子的变化, 同时也要考虑母树对种子活力和幼苗生长的影响。

## 参考文献

- 陈芳清, 梅光舟, 曾旭, 等. 2008. 三峡地区柏木种子萌发和幼苗更新的研究. 热带亚热带植物学报, 16(1): 69-74.
- 高瑞如, 赵瑞华, 张双凤, 等. 2007. 盐分和温度对盐节木种子萌发的影响. 西北植物学报, 27(11): 2281-2285.
- 黄振英, Gutteman Y, 胡正海, 等. 2001. 白沙蒿种子萌发特性的研究. 环境因素的影响. 植物生态学报, 5(2): 240-246.
- 林学政, 陈靠山, 何培青, 等. 2006. 种植盐地碱蓬改良滨海盐渍土对土壤微生物区系的影响. 生态学报, 26(3): 801-807.
- 王仁卿, 周光裕. 2000. 山东植被. 济南: 山东科技出版社.
- 朱教君, 李凤芹, 松崎健, 等. 2002. 间伐对日本黑松海岸林更新的影响. 应用生态学报, 13(11): 1361-1367.
- 朱雅娟, 董鸣, 黄振英. 2006. 种子萌发和幼苗生长对沙丘环境的适应机制. 应用生态学报, 17(1): 137-142.
- 祝小科, 朱守谦. 2003. 光皮桦种子千粒重、寿命及生命力研究. 林业科学, 39(4): 168-172.
- 邹莉, 李庆梅, 谢宗强. 2008. 巴山冷杉的种实特性及其种子萌发力. 生物多样性, 16(5): 509-515.
- Alvarez R, Valbuena L, Calvo L. 2005. Influences of tree age on seed germination response to environmental factors and inhibitory substances in *Pinus pinaster*. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 277-284.
- Bani-Aameur F, Sipple-Michmerhuizen J. 2001. Germination and seedling survival of Argan (*Argania spinosa*) under experimental saline conditions. *Journal of Arid Environments*, 49: 533-540.
- Desantis LRG, Bhotika S, Williams K, *et al.* 2007. Sea-level rise and drought interactions accelerate forest decline on the gulf coast of florida, USA. *Global Change Biology*, 13: 2349-2360.
- El-Keblawy A, Al-Rawai A. 2005. Effects of salinity, temperature and light on germination of invasive *Prosopis juliflora* (Sw.) D. C. *Journal of Arid Environments*, 61: 555-565.
- Espahbodi K, Hosseini SM, Mirzaie-Nodoushan H, *et al.* 2007. Tree age effects on seed germination in *Sorbus torminalis*. *General and Applied Plant Physiology*, 33: 107-119.
- Flores J, Briones O. 2001. Plant life-form and germination in Mexican inter-tropical desert: Effects of soil water potential and temperature. *Journal of Arid Environments*, 47: 485-497.
- Grayson KJ, Wittwer RF, Shelton MG. 2004. Cone characteristics and seed quality 10 years after an uneven-aged regeneration cut in shortleaf pine stands. General Technical Report, SRS-48. Asheville, NC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 310-314.
- Guariguata MR. 2000. Seed and seedling ecology of tree species in neotropical secondary forest: Management implications. *Ecological Applications*, 10: 145-154.
- Gulzar S, Khan MA. 2001. Seed germination of a Halophytic grass, *Aeluropus lagopoides*. *Annals of Botany*, 87: 319-324.
- Mensah JK, Akomeah PA, Kihagiagbe B, *et al.* 2006. Effects of salinity on germination, growth and yield of five groundnut genotypes. *African Journal of Biotechnology*, 5: 1973-1979.
- Reyes O, Casal M, Traubad L. 1997. The influence of population, fire and time of dissemination on the germination of *Betula pendula* seeds. *Plant Ecology*, 133: 201-208.
- Song J, Fan H, Zhao YY, *et al.* 2008. Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland. *Aquatic Botany*, 88: 331-337.
- Vidakovich M. 1991. Conifers: Morphology and Variation. Zagreb: Graficki Zavod Hrvatske.

作者简介 韩广轩,男,1978年生,博士,副研究员。主要从事陆地生态系统碳循环与碳收支、植物生态学研究,发表论文 16 篇。E-mail: gxhan@yic.ac.cn  
责任编辑 王伟