

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202106059

袁锋, 罗倩, 夏心慧, 等. 2023. 盐磷胁迫对木麻黄和台湾相思种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 广西植物, 43(4): 587-595.
YUAN F, LUO Q, XIA XH, et al., 2023. Effects of salt and phosphorus stress on seed germination and seedling growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* [J]. *Guihaia*, 43(4): 587-595.



盐磷胁迫对木麻黄和台湾相思种子萌发及幼苗生长的影响

袁 锋^{1,2}, 罗 倩^{1,2}, 夏心慧^{1,2}, 潘国营^{1,2}, 李茂瑾³,
江传阳⁴, 苏亲桂³, 陈 灿^{1,2*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 森林生态系统过程与经营福建省高校重点实验室, 福州 350002;
3. 福建省惠安赤湖国有防护林场, 福建 惠安 362100; 4. 福建省晋江垵头国有防护林场, 福建 泉州 362200)

摘 要: 恶劣环境下, 人工海防林因面临养分胁迫而经营困难。为探讨盐、磷胁迫对主要海防林树种木麻黄和台湾相思种子萌发及生长的影响, 该研究分别用不同浓度的 NaCl (盐) 和 KH_2PO_4 (磷) 溶液处理种子和浇灌幼苗, 测定种子萌发和幼苗生长指标。结果表明: (1) 高盐胁迫显著抑制种子萌发, 对幼苗生长有一定影响, 但两种植物影响程度不同; 台湾相思种子萌发耐盐性高于木麻黄, 前者相对盐害率最大值为 23.03%, 后者为 89.15%; 随着盐浓度增加, 木麻黄和台湾相思种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均降低, 对应最大值分别为 38.70%、34.67%、18.70、0.055 和 76.67%、62.22%、48.46、6.11。(2) 两种植物的株高和根长随盐浓度增加而降低, 木麻黄和台湾相思株高分别为 12.29~6.01 mm 和 48.27~17.33 mm, 根长分别为 8.57~1.45 mm 和 33.41~5.88 mm; 台湾相思根、茎、叶生物量及根冠比均随盐浓度的增加逐渐减小, 木麻黄各处理差异较小。(3) 台湾相思的种子和幼苗较木麻黄更耐低磷环境, 二者最适磷浓度存在差异; 木麻黄种子发芽率(49.33%)、发芽指数(23.12%)、活力指数(0.093)及根茎叶生物量最大值均在 0.1 mmol·L⁻¹ 磷处理; 台湾相思种子发芽率(81.11%)、发芽势(62.22%)、发芽指数(38.23)、活力指数(5.07)、株高(54.48 mm)及根长(37.16 mm)最大值均在 5 mmol·L⁻¹ 磷处理, 10 mmol·L⁻¹ 磷处理抑制其萌发。因此, 播种海防林种子或种植幼苗时须根据土壤盐和磷的含量选择播种或种植方式。

关键词: 养分胁迫, 木麻黄, 台湾相思, 种子萌发, 幼苗生长

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2023)04-0587-09

Effects of salt and phosphorus stress on seed germination and seedling growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa*

YUAN Feng^{1,2}, LUO Qian^{1,2}, XIA Xinhui^{1,2}, PAN Guoying^{1,2}, LI Maojin³,
JIANG Chuanyang⁴, SU Qingui³, CHEN Can^{1,2*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Collegiate Key Lab of Forest-Ecosystem Process and Management in Fujian, Fuzhou 350002, China; 3. Hui'an Chihu State-Owned Forest Shelter Farm of Fujian, Hui'an 362100, Fujian, China; 4. Diantou State-Owned Protective Forest Farm of Jinjiang, Fujian Province, Quanzhou 362200, Fujian, China)

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(42071132); 福建省林业科技项目(2021FKJ22); 福建农林大学优秀研究生学位论文资助基金(1122YS01010)。

第一作者: 袁锋(1996-), 硕士研究生, 主要从事植物地理学研究, (E-mail) yf177614@163.com。

*通信作者: 陈灿, 博士, 副教授, 主要从事海岸带森林与环境研究, (E-mail) canchen@fafu.edu.cn。

Abstract: Artificial coastal protection forests are difficult to manage because of nutrient stress in harsh environment. To explore the effects of salt and phosphorus stress on the seed germination and seedling growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa*, we respectively watered the seeds and seedlings of the two kinds of plants with the solutions of NaCl (salt) and KH_2PO_4 (phosphorus) in different concentrations, and then determined their growth indicators, respectively. The results were as follows: (1) High salt concentration solutions significantly inhibited seed germination and had a certain effect on the growth of seedlings, however, the effects of salt stress on seed germination and growth were different. The salt tolerance of *Acacia confusa* seed germination was higher than that of *Casuarina equisetifolia*. The biggest relative salt damage rate of *Acacia confusa* was 23.03% and that of *Casuarina equisetifolia* was 89.15%. As the concentration of NaCl increased, the germination rate, germination potential, germination index and vitality index of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* seeds decreased. And the maximums of the four germination indexes of *Casuarina equisetifolia* seed were 38.70%, 34.67%, 18.70 and 0.055, and of *Acacia confusa* seeds were 76.67%, 62.22%, 48.46 and 6.11, respectively. (2) The height and root length of the plants decreased with the increase of salt concentration. The plant heights of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* were 12.29 to 6.01 mm and 48.27 to 17.33 mm, and the root lengths were 8.57 to 1.45 mm and 33.41 to 5.88 mm, respectively. The biomass of root, stem and leaf as well as root shoot ratio of *Acacia confusa* gradually decreased with the increase of salt concentration, but the differences between the treatments of *Casuarina equisetifolia* were not obvious. 0.6% and 0.4% salt stress were the thresholds for seed germination and seedling growth of the two plants, respectively. (3) The seed and seedling of *Acacia confusa* were more tolerant to low-phosphorus environment than *Casuarina equisetifolia*, and there was a difference in the optimum phosphorus concentration between the two. When the phosphorus concentration was $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the seed germination rate (49.33%), germination index (23.12%) and vitality index (0.093) of *Casuarina equisetifolia*, as well as the biomass of root, stem and leaf, all reached the maximum. In the $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ treatment, the maximums of germination rate (81.11%), germination potential (62.22%), germination index (38.23), vitality index (5.07), plant height (54.48 mm) and root length (37.16 mm) of *Acacia confusa* seeds all appeared, while their germination was inhibited in the treatment of $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Therefore, when sowing the seed of coastal defense forest or planting its seedling, the sowing or planting mode must be selected according to the soil salt and phosphorus contents.

Key words: nutrient stress, *Casuarina equisetifolia*, *Acacia confusa*, seed germination, seedling growth

种子顺利萌发、成苗是植物能否完成生活史的前提,除受种子自身大小、质量等因素影响外,还受制于土壤养分等环境因素(Rajjou et al., 2012)。盐渍化土中的植物种子萌发和正常生长均十分困难(齐琪等,2020),在盐渍化和低养分恶劣生境中,种子能够萌发成苗是植物适应此类恶劣环境的表现(张建锋等,2003;沈振荣等,2006)。然而,盐胁迫在一定程度上抑制了植物种子的萌发及生长,植物种子的活力指数、发芽指数、发芽势等萌发指标及幼苗生长均随着盐浓度的升高呈降低趋势(李云等,1997;沈振荣等,2006;韩广轩等,2009;卢艳敏,2012)。此外,磷含量也是影响种子萌发和幼苗生长的重要因素。农业上重视抗低磷基因和品种等研究(吕春雨和沙爱华,2017),林业上有学者发现低浓度磷添加可以促进种子萌发及幼苗生长,而高浓度磷有一定的抑制作用(唐敏,2007),不同磷源会对种子萌发等产生影响(戴开结等,2009)。中国盐碱地总面积超过 9 913 万 hm^2 ,其中滨海盐碱地约占 842.6 万 hm^2 (朱建峰

等,2018),中国东部及南部沿海地区土壤除盐渍化外,全磷和有效磷含量均较低(汪涛等,2008),只有少数树种能存活下来,由它们组成的沿海海防林构成了沿海地区的重要生态安全屏障。因此,研究海防林主干植物种子和幼苗对土壤盐碱化和低磷等恶劣环境的适应性具有重要意义。虽然抗盐植物可以通过形态、生理和生化调节提高自身对单一恶劣环境的适应能力,但多因素的叠加效应可能大幅度限制或降低这种能力。因此,开展海防林树种抵抗盐渍和低磷的阈值以及二者同时作用对海防林植物种子萌发和幼苗生长影响程度的研究,将有助于探索和揭示海防林天然更新的机制和提高海防林经营管理水平,特别是对海防林的主要树种更是如此。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)是木麻黄科(Casuarinaceae)木麻黄属(*Casuarina* Adans.)植物,20世纪50年代大规模引种到中国东南沿海地区,成为主要防护林树种(袁锋等,2020)。台湾相思(*Acacia confusa*)是豆科(Leguminosae)金合欢属

(*Acacia*) 速生树种, 具有根系发达、抗风、萌芽力强、耐干旱贫瘠等特点, 与木麻黄相似, 均能适应恶劣的海岸环境。因此, 生产上常将二者进行混植(陈青霞, 2011)。木麻黄种子萌发研究表明水分(王玉等, 2020)、高浓度盐胁迫(武冲等, 2010)、铬胁迫(周希群和李裕红, 2004)、镉胁迫及铅胁迫(陈怀宇等, 2007)均会抑制种子的萌发及生长, 而磷胁迫对木麻黄种子萌发影响及盐、磷胁迫对台湾相思种子萌发和生长影响的研究未见报道, 同时盐、磷胁迫对两种植物种子萌发的影响阈值还未确定。因此, 为探讨海防林植物在种子萌发和萌发后的幼苗生长这两个脆弱期对高盐低磷的适应能力, 本研究开展不同浓度盐磷胁迫对木麻黄、台湾相思的种子萌发及幼苗生长影响实验, 确定影响萌发阈值以及影响幼苗生长的指标, 以期海防护林植被更新及可持续经营提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料

木麻黄、台湾相思的种子由福建省惠安赤湖国有防护林场提供, 晾晒后选取颗粒饱满的种子于 2020 年 11 月进行萌发实验, 木麻黄的千粒重、纵径、横径分别为 (0.43 ± 0.07) g、 (3.74 ± 0.13) mm、 (1.58 ± 0.08) mm, 台湾相思的分别为 (32.3 ± 1.31) g、 (5.86 ± 0.21) mm、 (4.21 ± 0.22) mm。采用 TTC 法(刘有军等, 2019)测定种子活力, 木麻黄、台湾相思的种子活力分别在 60%、80% 以上。

1.2 实验设计

实验在人工气候箱(RTOP-500Y)中进行, 设置恒温 25 °C、湿度 75%、光照强度 $2\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (昼夜各 12 h)。采用砂培法进行种子实验, 在培养皿(直径 14.5 cm)内放置石英砂(粒径 ≤ 0.5 mm、厚度 1 cm), 使用前用盐酸(5%)浸泡 1 h 后用清水冲洗干净, 恒温烘干。为确定盐、磷影响阈值, 分别用 NaCl 和 KH_2PO_4 配置成 0%(CK)、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 和 0(CK)、0.1、0.5、1、5、10 mmol $\cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的溶液(曲东等, 1998; 韩广轩等, 2009)。对种子用 KMnO_4 (浓度 1%)浸泡 20 min 消毒, 用蒸馏水洗净后, 木麻黄用 45 °C 温水, 台湾相思用 70 °C 热水浸种, 自然冷却后用相应浓度的溶液浸种 24 h 后播种。每个培养皿中均匀放木麻黄种子 50 粒、台湾相思种子 30 粒, 每个处理 3 个重复, 用相应浓度的溶液浸透石英砂, 后续定期测定质量, 并用蒸馏水补充流失的水分以保持

恒重。以培根漏出种皮超过种子长度作为种子萌发的标准(王玉等, 2020), 每天记录种子的萌发数, 连续 5 d 无种子萌发后结束实验, 木麻黄、台湾相思分别于 14、10 d 结束实验。

1.3 指标测定

木麻黄、台湾相思每个处理分别选取 5、10 棵测定其株高、根长及根茎叶鲜重。种子萌发及生长指标计算公式(张大鹏等, 2008; 刘有军等, 2019): 发芽率 = (发芽种子数/供试种子数) $\times 100\%$; 发芽势 = (种子萌发高峰期种子数/供试种子数) $\times 100\%$; 发芽指数 = $\sum G_t/D_t$, 式中, G_t 为在 t 天的发芽数, D_t 为发芽天数; 活力指数 = 鲜重 \times 发芽指数; 相对盐害率 = (对照发芽率 - 处理发芽率)/对照发芽率 $\times 100\%$; 根冠比 = 地下鲜重/地上鲜重。

1.4 数据处理

采用 Excel、SPSS 25 软件进行数据处理, 在单因素方差分析的基础上, 利用最小显著差异法进行处理间差异显著性检验, 利用双因素方差分析盐、磷交互作用对种子萌发及生长的影响, 采用 Origin 2018 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 盐、磷胁迫对种子萌发及存活的影响

NaCl 处理下木麻黄种子由 0% ~ 1% 浓度首次萌发时间逐渐延长, 由第 3 天延迟到第 6 天, 萌发高峰期相应由第 3 天延迟到第 9 天, 1% 处理萌发率极低。台湾相思首次萌发时间均在第 1 天, 萌发高峰期集中在第 3 天。磷处理下木麻黄种子均在第 3 天萌发, 高峰期均在第 4 天, 台湾相思首次萌发均在第 1 天, 高峰期在第 2 天或第 3 天。

高 NaCl 浓度对种子萌发产生显著抑制作用(图 1, 图 2, 表 1, 表 2)。木麻黄种子随着 NaCl 浓度增加, 发芽率由 38.67% 降到 4.00%, 发芽指数由 18.70 降到 0.78, 活力指数由 0.055 降到 0.001, 相对盐害率由 4.66% 增加到 89.15%, 发芽势由 0%(26.67%) 增加到 0.2%(34.67%) 后逐渐降到 2.00%。总体上, 0% 和 0.2% 处理间差异不显著, 其他处理间差异显著($P < 0.01$)。0.2% NaCl 浓度对台湾相思种子萌发具有促进作用, 萌发指标均为最大值且显著高于 0%, 发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数分别为 76.67%、62.22%、48.46、6.11; NaCl 浓度大于 0.2% 后, 萌发指标开始下降, 相对盐害率不断增加, 最大盐害率为 23.03%。

不同磷浓度处理对种子萌发影响存在差异, 适

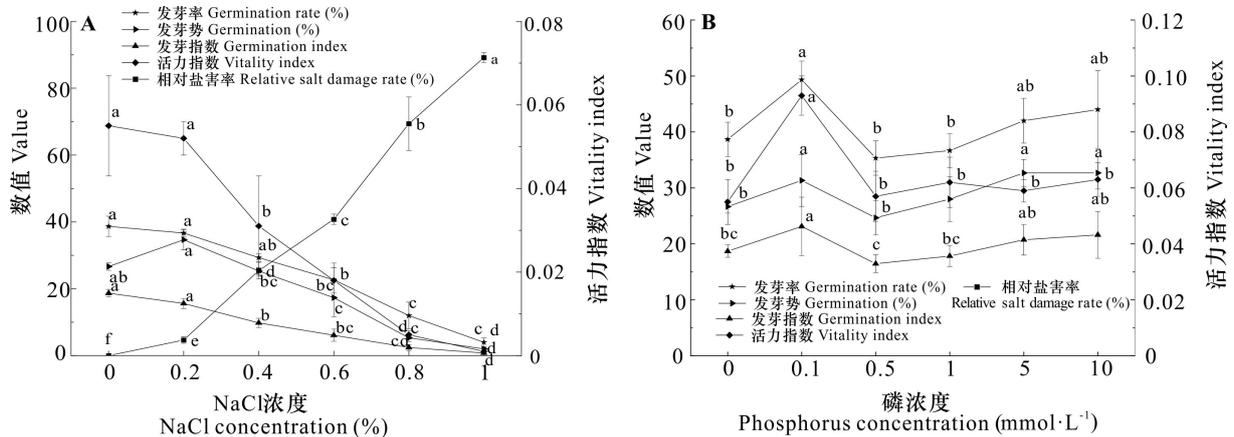


图 1 不同盐、磷处理下木麻黄种子的萌发指标

Fig. 1 Germination index of *Casuarina equisetifolia* seeds treated under different salt and phosphorus

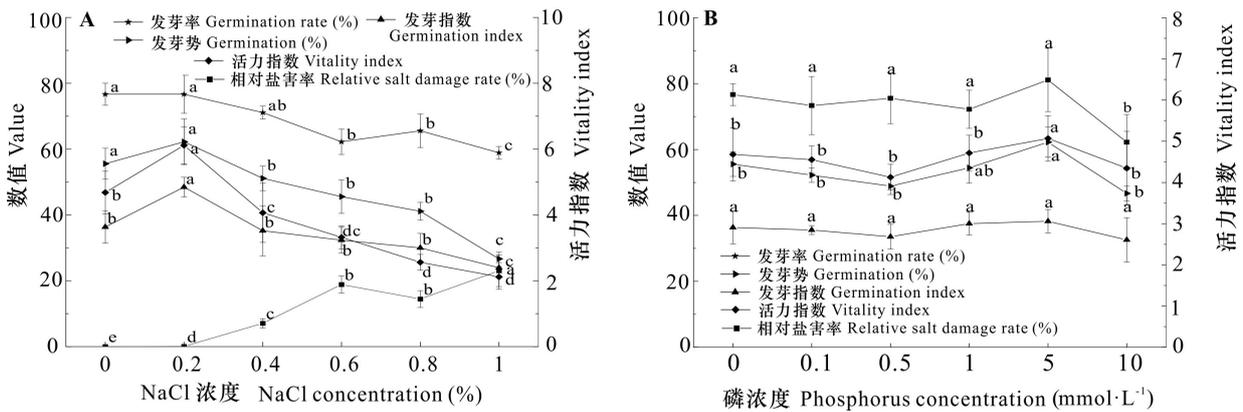


图 2 不同盐、磷处理下台湾相思种子的萌发指标

Fig. 2 Germination index of *Acacia confuse* seeds treated under different salt and phosphorus

度磷添加具有促进作用(图 1, 图 2)。随着磷浓度增加, 萌发指标表现为先增加后降低再增加的趋势, 浓度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 木麻黄种子发芽率 (49.33%)、发芽指数 (23.12%) 和活力指数 (0.093) 均最大, 发芽势最大值 (32.67%) 位于 5 、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理。台湾相思种子发芽率 (81.11%)、发芽势 (62.22%)、发芽指数 (38.23) 和活力指数 (5.07) 最大值均位于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理。从总体来看, 前 5 个处理差异不显著, $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理萌发指标明显低于 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2), 与其他处理差异显著 ($P < 0.01$), 说明等于及大于此处理后对种子萌发具有抑制作用。方差分析表明, 磷对台湾相思种子萌发影响较小, 盐、磷双因素对木麻黄种子萌发影响显著, 对台湾相思种子影响较小(表 1, 表 2)。

2.2 盐、磷胁迫对幼苗株高、根长的影响

不同 NaCl 浓度处理对幼苗株高和根生长表现为显著抑制作用。随着浓度增加株高及根长均逐渐降低, 木麻黄株高由 12.29 mm 降到 6.01 mm , 根长由 8.57 mm 降到 1.45 mm , 0% 和 0.2% 处理间差异不显著; 台湾相思株高由 48.27 mm 降到 17.33 mm , 根长由 33.41 mm 降到 5.88 mm , 根长 0% 、 0.2% 、 0.4% 处理间无显著差异(图 3, 表 1, 表 2)。

磷处理对木麻黄株高影响不显著, 对根长影响显著(图 3, 表 1), 株高、根长最大值位于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理, 分别为 13.41 、 9.79 mm 。磷处理对台湾相思株高影响显著, 对根长影响不显著(图 3, 表 2), 株高、根长最大值位于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理, 分别为 54.48 、 37.16 mm 。

表 1 盐、磷及其交互作用对木麻黄种子萌发、生长特征影响的方差分析

Table 1 Variance analysis of the influence of salt, phosphorus and their interaction on seed germination and growth characteristics of *Casuarina equisetifolia* seeds

指标 Index	盐 NaCl		磷 Phosphorus		交互 Interactive	
	F	P	F	P	F	P
发芽率 Germination rate (%)	15.173	<0.001	1.815	0.184	20.890	<0.001
发芽势 Germination (%)	16.557	<0.001	1.097	0.411	14.443	<0.01
发芽指数 Germination index	45.698	<0.001	1.898	0.168	27.192	<0.001
活力指数 Vitality index	30.042	<0.001	3.548	<0.05	55.218	<0.001
相对盐害率 Relative salt damage rate (%)	18.221	<0.001	—	—	—	—
株高 Plant height (mm)	21.199	<0.001	1.266	0.340	9.894	<0.01
根长 Root length (mm)	148.642	<0.001	3.537	<0.05	14.583	<0.01
根生物量 Root biomass (g)	10.749	<0.001	8.521	<0.01	30.012	<0.001
茎生物量 Stem biomass (g)	4.728	<0.05	3.502	<0.05	51.766	<0.001
叶生物量 Leaf biomass (g)	6.184	<0.01	2.026	0.147	44.556	<0.001
总生物量 Total biomass (g)	10.673	<0.001	8.466	<0.01	92.024	<0.001
根冠比 Root shoot ratio	13.509	<0.001	3.924	<0.05	20.445	<0.001

表 2 盐、磷及其交互作用对台湾相思种子萌发、生长特征影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the influence of salt, phosphorus and their interaction on seed germination and growth characteristics of *Acacia confuse* seeds

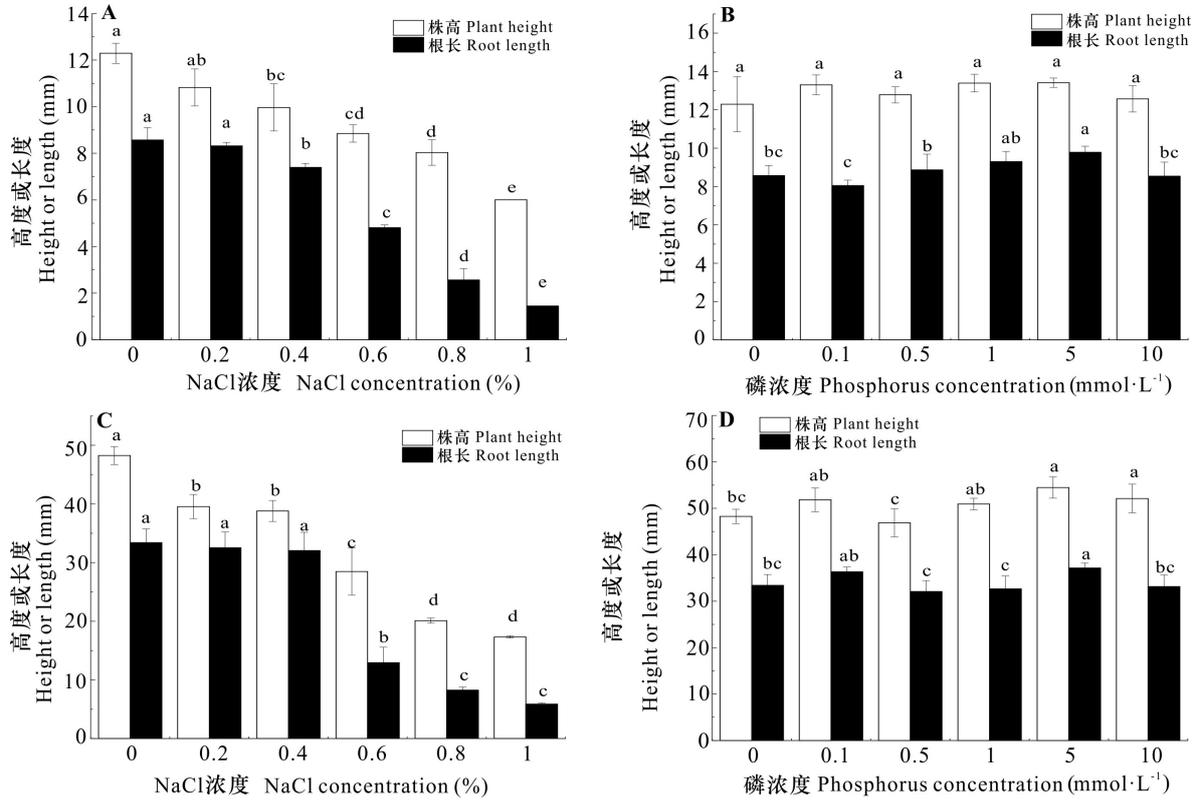
指标 Index	盐 NaCl		磷 Phosphorus		交互 Interactive	
	F	P	F	P	F	P
发芽率 Germination rate (%)	10.912	<0.001	3.903	<0.05	0.316	0.735
发芽势 Germination (%)	15.492	<0.01	2.411	0.098	3.130	0.081
发芽指数 Germination index	9.037	<0.001	0.222	0.946	3.238	0.075
活力指数 Vitality index	21.460	<0.001	0.293	0.908	7.201	<0.01
相对盐害率 Relative salt damage rate (%)	54.275	<0.001	—	—	—	—
株高 Plant height (mm)	220.806	<0.001	4.043	<0.05	71.160	<0.001
根长 Root length (mm)	105.690	<0.001	2.957	0.058	93.160	<0.001
根生物量 Root biomass (g)	29.341	<0.001	0.355	0.869	21.634	<0.001
茎生物量 Stem biomass (g)	80.394	<0.01	16.230	<0.001	10.452	<0.01
叶生物量 Leaf biomass (g)	7.500	<0.001	12.772	<0.001	1.240	0.324
总生物量 Total biomass (g)	136.518	<0.001	2.445	0.095	5.148	<0.05
根冠比 Root shoot ratio	24.647	<0.001	1.266	0.340	5.940	<0.05

2.3 盐、磷胁迫对幼苗生物量分配的影响

不同 NaCl 浓度处理木麻黄根生物量 0.2% (0.001 4 g)、0.4% (0.001 2 g) 处理高于 CK (0.001 0 g), 大于 0.4% 后逐渐降低且均低于 CK, 茎、叶生物量各处理差异较小, 茎生物量为 0.000 6~0.000 8 g, 叶生物量为 0.000 9~0.001 3 g, 总生物量大于 0.6% 后逐渐降低, 根冠比 0.2% (0.68)、0.4% (0.63) 处理同样高于 0% (0.53), 其他处理均显著低于 CK, 1% 处理为 0.07, 根、叶生物量和根冠比最大值位于 0.2% 处理 (图 4)。台湾相思的根、茎、叶生物量及

根冠比均随 NaCl 浓度增加逐渐减小, 0%、0.2%、0.4% 处理间差异较小, 浓度大于 0.4% 时各指标明显下降, 表明 0.4% 为阈值 (图 5)。

随着磷浓度增加木麻黄根生物量和根冠比均呈先增加后降低的趋势 (图 4), 最大值为 0.001 6 g、0.70。茎生物量为 0.000 7~0.000 9 g, 叶生物量为 0.001 1~0.001 5 g, 茎、叶生物量各处理间差异不显著, 根、茎、叶生物量的最大值位于 0.1 mmol · L⁻¹ 处理。总体上, 磷对台湾相思幼苗生物量分配影响较小。台湾相思根生物量



A,B. 木麻黄; C,D. 台湾相思。
 A,B. *Casuarina equisetifolia*; C,D. *Acacia confuse*.

图3 不同盐、磷处理对幼苗株高和根长的影响

Fig. 3 Effects on seedling plant height and root length under different salt and phosphorus treatments

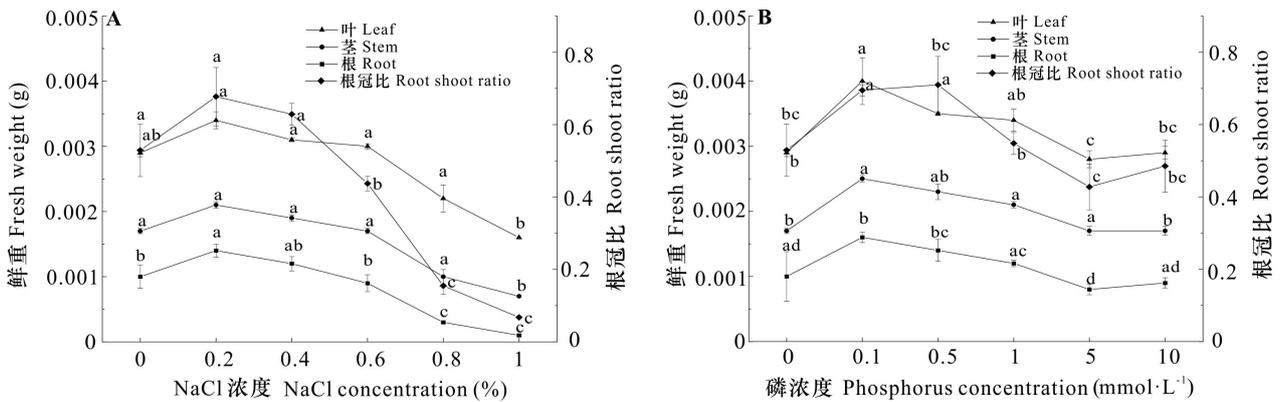


图4 不同盐、磷处理下木麻黄幼苗的生物量分配差异

Fig. 4 Differences in biomass allocation of *Casuarina equisetifolia* seedlings under different salt and phosphorus treatments

为 0.017~0.019 g, 处理间差异不显著; 茎生物量为 0.028~0.039 g, 叶生物量为 0.072~0.078 g, 根冠比为 0.15~0.18。方差分析发现, 盐、磷交互作用对根、茎生物量及根冠比的影响显著(表 1, 表 2)。

3 讨论与结论

种子保持活力及幼苗正常生长是植物在高盐环境下存活的关键。相关研究表明, 渗透、离子效

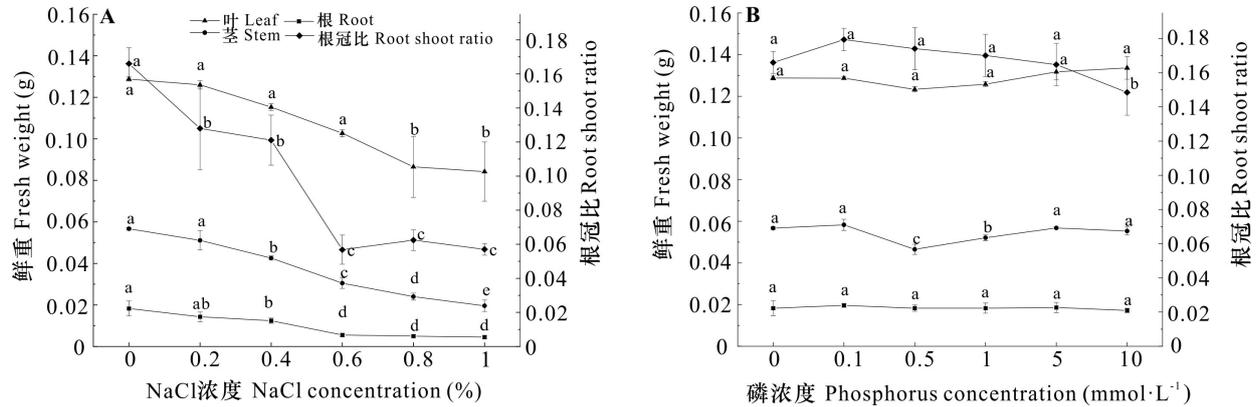


图 5 不同盐、磷处理下台湾相思幼苗的生物量分配差异

Fig. 5 Differences in biomass allocation of *Acacia confuse* seedlings under different salt and phosphorus treatments

应是盐胁迫下影响种子萌发及生长的主要因素,主要表现为种子的萌发速度变慢、萌发率降低以及延缓幼苗的生长等,高盐甚至导致种子失活或幼苗死亡(齐琪等,2020)。本研究发现,高盐环境对木麻黄、台湾相思的种子萌发及生长抑制作用明显,发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、株高、根长、生物量及根冠比均随 NaCl 浓度升高而下降,这与大多数研究结果一致(李云等,1997;韩广轩等,2009;武冲等,2010),但盐胁迫下种子发芽率也可能与其品种有关(武冲等,2010)。木麻黄发芽率、发芽指数、活力指数、株高、根长、根和叶生物量最大值均位于 0%,根冠比、发芽势均位于 0.2% 处理,各指标 0% 与 0.2% 之间差异不显著,其他处理间差异显著,表明低于 0.2% 处理对木麻黄种子萌发影响较小,1% 处理下种子基本不萌发,王玉等(2020)对木麻黄种子进行 0~0.1% NaCl 浓度胁迫同样得出无显著影响的结论。本研究还发现木麻黄种子的耐盐性低于成苗的耐盐性,苏祖荣(1999)研究表明 1 a 生幼苗在 0.6% 浓度盐胁迫下造林成活率大于 60%,耐盐率为 0.767%,成林最大耐盐率为 3.141%。本研究中,台湾相思种子萌发指标最大值均为 0.2% 浓度且明显大于 CK,生长指标株高、根长、根冠比及根和茎生物量最大值均位于 CK,但 0%、0.2%、0.4% 处理之间差异性较小,萌发及生长指标表明 0.2% NaCl 浓度有助于台湾相思种子的萌发,原因可能为此浓度下离子效应为正效应(齐琪等,2020),当浓度大于 0.4% 后各指标下降,与 CK 间差异显著,说明 0.4% 浓度为台湾相思种子萌发的阈值。本研究从相对盐害率来看,木麻黄种子在 4.66%~89.15% 之间,台湾相

思种子在 0.07%~23.03% 之间,盐胁迫对台湾相思种子萌发的影响明显低于木麻黄,台湾相思种子萌发的耐盐性更强,原因可能为台湾相思种子有一层坚硬的外壳。在不同 NaCl 浓度处理下,根生物量变化幅度远大于茎叶生物量,并且随着浓度增加根冠比逐渐减小,根长同样逐渐变短,表明盐胁迫对根的生长影响大,这与韩广轩等(2009)对黑松研究结果一致。Jose 等(2017)研究认为耐 NaCl 的植物通过形态学、生理学和生化等方面的调节来适应盐度,防止盐离子毒性以维持水的状态,从而达到限制水分流失等目的,如改变根冠比,但上述调节要在一定范围内。

盐影响海防林两种植物种子萌发及生长的原因主要包括以下方面:第一,不同 NaCl 浓度造成种子周围水势及细胞膜损害程度差异,水势影响种子吸水,浓度越大水势越低,种子内外水势差增大,种子吸水不足,进而抑制呼吸作用及物质运输,导致萌发困难(王娟娟和张文辉,2011;齐琪等,2020)。第二,细胞膜损害改变通透性,造成离子(K⁺、Na⁺等)含量、植物体内的保护酶系统中各种酶含量(SOD、POD、CAT等)及 MDA 含量相应存在差异,进而影响种子萌发及生长(张大鹏等,2008;王娟娟和张文辉,2011;陈意兰等,2021)。第三,离子应力和质膜电位改变影响种子萌发和生长。Assaha 等(2017)研究认为离子应力是盐度中最重要的组成部分之一,是由过量的 Na⁺ 积累引起的,Na⁺ 干扰 K⁺ 稳态,两者失衡进而引起质膜(PM)电位变化等差异。

本研究结果表明,低、中浓度的磷添加对种子的萌发及生长影响较小或有促进作用,高磷有一

定的抑制作用,这与前人(唐敏,2007;宋红丽等,2012)研究结果基本一致。木麻黄种子萌发指标在 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理均最高,其次为 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,生长指标中株高、根长的最大值均在 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理,根、茎、叶生物量及根冠比的最大值均在 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理,表明 0.1 、 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理对木麻黄种子萌发及生长具有促进作用。台湾相思种子萌发指标在前5个处理差异不显著, $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理萌发指标明显低于CK且与其他处理差异显著,最大值在 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理。株高、根长最大值均在 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理,根、茎、叶生物量以及根冠比各处理之间差异不显著,表明磷对台湾相思种子萌发及生长影响较小, $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理对其萌发和生长有一定的促进作用,同时 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理萌发指标明显低于CK且与其他处理差异显著,表明高磷对种子萌发及生长具有抑制作用,这与唐敏(2007)对马尾松(*Pinus massoniana*)研究结果一致。

种子萌发受磷影响的原因可能为磷添加提高了淀粉酶活性(曲东等,1998),或者用低、中浓度磷浸种的种子电导率降低,有助于种子膜结构修复(唐敏,2007)。高磷胁迫下,种子电导率升高,破坏膜结构的完整性,对种子造成伤害,并且极低磷和高磷的逆境环境均使得SOD、POD及CAT等抗逆性酶活性及MDA含量升高。刘庆艳等(2013)研究表明随着磷养分由低-中-高浓度的输入,兴凯湖沼泽土壤种子库种子萌发数为减小-增加-显著减小的变化趋势,并且不同植物对磷养分适应性存在差异,适量的磷添加有助于植物种子萌发。植物有限的吸收表面积可能是高磷抵制生长的重要原因,过量的磷包围、改变细胞内外磷离子浓度、占据膜表面电子位,极可能影响其他元素的吸收,进而影响幼苗的生长。因此,即使种子萌发对磷的依赖度低,幼苗生长也需要补充适量的磷元素,而过量则起反作用。

本研究发现,盐、磷交互作用对种子萌发及生长可能产生一定的影响,而此类研究目前却较少。宋红丽等(2012)研究表明,盐胁迫下添加磷对碱蓬(*Suaeda glauca*)种子萌发及生长影响复杂,但在高盐胁迫下,添加低浓度磷却有利于碱蓬种子萌发及生长,原因可能是盐胁迫改变种子和根系细胞膜表面离子浓度和电子平衡环境,进而影响植物对磷元素的吸收,而磷元素是植物光合作用中光合磷酸化所必需的营养物质,阻碍或抵制了光合作用,进而影响植物的初级生产力及分配(宋

红丽等,2012;李玲,2015)。盐磷互作对种子萌发及生长的报道较少,其对种子萌发、幼苗生长影响及生理机制还需进一步研究。

综上所述,高盐胁迫对木麻黄种子萌发表现为显著抑制甚至完全抑制作用, 0.2% NaCl处理促进台湾相思种子萌发及生长, 0.6% 、 0.4% NaCl分别为木麻黄、台湾相思的种子萌发及生长的阈值,其中盐胁迫对根的生长影响显著,随着NaCl浓度的增加,根生物量、长度、根冠比等指标逐渐降低。 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理对木麻黄种子萌发及生长存在促进作用,低、中浓度磷处理对台湾相思种子萌发及生长影响不显著, $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理对台湾相思种子萌发及生长存在抑制作用。同时,木麻黄种子的耐盐性低于成苗,在采用种子进行种植时应检测土壤盐、磷的含量,木麻黄、台湾相思的盐度应分别在 0.6% 、 0.4% 范围内,木麻黄可施加适量的磷肥,台湾相思不施加。

参考文献:

- ASSAHA DVM, UEDA A, SANEOKA H, et al., 2017. The Role of Na^+ and K^+ transporters in salt stress adaptation in glycophytes [J]. *Front Physiol*, 8: 509.
- CHEN HY, LI YH, LIN YC, 2007. Effects of Cd^{2+} and Pb^{2+} on seed germination and fastness physiological characteristics of *Casuarina equisetifolia* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 23(8): 229-232. [陈怀宇, 李裕红, 林元灿, 2007. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对木麻黄种子萌发及抗性生理特性的影响[J]. *中国农学通报*, 23(8): 229-232.]
- CHEN QX, 2011. Study on mixed forest of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia taiwanensis* in sandy land of Hui'an County [J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 17(9): 158-159. [陈青霞, 2011. 惠安县沙地木麻黄台湾相思混交林研究[J]. *安徽农学通报*, 17(9): 158-159.]
- CHEN YL, LI X, ZHAO WZ, et al., 2021. Physiological response of *Thuarea involuta* under salt stress [J]. *Guihaia*, 41(2): 225-232. [陈意兰, 李昕, 赵文忠, 等, 2021. 蕲雷草对盐胁迫的生理响应[J]. *广西植物*, 41(2): 225-232.]
- DAI KJ, HE F, SHEN YX, et al., 2009. Effects of different phosphorus on growth and P absorption of *Pinus yunnanensis* Franch. seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 29(8): 4078-4083. [戴开结, 何方, 沈有信, 等, 2009. 不同磷源对云南松幼苗生长和磷吸收量的影响[J]. *生态学报*, 29(8): 4078-4083.]
- HAN GX, MAO PL, LIU SJ, et al., 2009. Effects of sea water salinity and mother tree size on the seed germination and seedling early growth of *Pinus thunbergii* coastal protection forest [J]. *Chin J Ecol*, 28(11): 2171-2176. [韩广轩, 毛培利, 刘苏静, 等, 2009. 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[J]. *生态学杂志*, 28(11): 2171-2176.]

- JOSE RA, MARIA FO, AGUSTINA B, et al., 2017. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms [J]. *Agronomy*, 7(1): 1-38.
- LI Y, ZHENG DZ, LIAO BW, et al., 1997. Effect of salinity and temperature on seed germination of mangrove *Sonneratia apetala* Buch. Ham. [J]. *For Res*, 10(2): 30-35. [李云, 郑德璋, 廖宝文, 等, 1997. 盐度与温度对红树植物无瓣海桑种子发芽的影响 [J]. *林业科学研究*, 10(2): 30-35.]
- LÜ CY, SHA AH, 2017. Response to phosphorus deficiency regulated by microRNA168 in soybean plant [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 39(3): 321-325. [吕春雨, 沙爱华, 2017. 大豆 microRNA168 调控植物低磷胁迫响应 [J]. *中国油料作物学报*, 39(3): 321-325.]
- LU YM, 2012. Effects of different saline stress on seed germination of tall fescue [J]. *Pratac Sci*, 29(7): 1088-1093. [卢艳敏, 2012. 不同盐胁迫对高羊茅种子萌发的影响 [J]. *草业科学*, 29(7): 1088-1093.]
- LIU YJ, LIU SZ, KANG CZ, et al., 2019. Comparative adaptation of seed germination and seedling growth to environmental factors in two *Picea* plant species [J]. *Acta Ecol Sin*, 39(2): 611-619. [刘有军, 刘世增, 康才周, 等, 2019. 两种云杉种子萌发和幼苗生长对环境因子的适应性 [J]. *生态学报*, 39(2): 611-619.]
- LIU QY, JIANG M, WANG GD, et al., 2013. Effect of exogenous phosphorus inputs on seed germination of soil seed bank in marshes in Xingkai Lake [J]. *Wetl Sci*, 11(1): 41-47. [刘庆艳, 姜明, 王国栋, 等, 2013. 外源磷输入对兴凯湖沼泽土壤种子库种子萌发的影响 [J]. *湿地科学*, 11(1): 41-47.]
- LI L, 2015. Effects of different phosphorus levels on the growth of *Kosteletzkya virginica* under NaCl stress [D]. Jinan: Shandong Normal University: 31-41. [李玲, 2015. 不同磷素水平对盐胁迫下海滨锦葵生长的影响 [D]. 济南: 山东师范大学: 31-41.]
- QI Q, MA SR, XU WD, 2020. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance [J]. *Mol Plant Breed*, 18(8): 2741-2746. [齐琪, 马书荣, 徐维东, 2020. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展 [J]. *分子植物育种*, 18(8): 2741-2746.]
- QU D, WANG BL, BAI HY, et al., 1998. Effect of seed pretreatment with phosphorus on seed germination and seedling growth [J]. *Acta Univ Agric Boreal-occident*, 26(1): 8-12. [曲东, 王保莉, 白红英, 等, 1998. 磷浸种对种子萌发和生长的影响 [J]. *西北农业大学学报*, 26(1): 8-12.]
- RAJJOU L, DUVAL M, GALLARDO K, et al., 2012. Seed germination and vigor [J]. *Ann Rev Plant Biol*, 63: 507-533.
- SHEN ZR, YANG WR, XU XM, 2006. Effect of salt stress on germination of alfalfa seeds Fengmei [J]. *Seed*, 25(4): 34-37. [沈振荣, 杨万仁, 徐秀梅, 2006. 不同盐分胁迫对苜蓿种子萌发的影响 [J]. *种子*, 25(4): 34-37.]
- SONG HL, SUN ZG, SUN JK, et al., 2012. Effects of nitrogen and phosphorus on seed germination and seedling growth of *Suaeda salsa* under different growth conditions of the Yellow River Estuary [J]. *Acta Pratac Sin*, 21(6): 30-41. [宋红丽, 孙志高, 孙景宽, 等, 2012. 氮、磷输入对黄河河口滩涂湿地不同生境下碱蓬种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. *草业学报*, 21(6): 30-41.]
- SU ZR, 1999. Experimental study on salt tolerance of *Casuarina equisetifolia* and salt reduction technology [J]. *Prot For Sci Technol*, 38(1): 17-19. [苏祖荣, 1999. 木麻黄抗盐能力及降盐技术试验研究 [J]. *防护林科技*, 38(1): 17-19.]
- TANG M, 2007. Study on effect of phosphorus to germination and seedling of different provenances [D]. Guiyang: Guizhou University: 17-25. [唐敏, 2007. 磷对不同种源马尾松种子及幼苗影响的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学: 17-25.]
- WANG T, YANG YH, MA WH, 2008. Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in China [J]. *Acta Sci Nat Univ Pekin*, 44(6): 945-952. [汪涛, 杨元合, 马文红, 2008. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 44(6): 945-952.]
- WANG JJ, ZHANG WH, 2011. Effects of activities of protective enzymes and seed germination in *Atriplex canescens* under NaCl and Na₂CO₃ stress [J]. *Sci Silv Sin*, 47(2): 154-160. [王娟娟, 张文辉, 2011. NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫对四翅滨藜种子萌发及保护酶活性的影响 [J]. *林业科学*, 47(2): 154-160.]
- WU C, ZHANG Y, TANG SM, et al., 2010. Effect of NaCl stress on *Casuarina* seed germination [J]. *Seed*, 29(4): 30-33. [武冲, 张勇, 唐树梅, 等, 2010. 盐胁迫对木麻黄种子萌发的影响 [J]. *种子*, 9(4): 30-33.]
- WANG Y, YANG B, HAO QY, 2020. Limiting ecological factors for seed germination of *Casuarina equisetifolia* [J]. *Guihaia*, 40(3): 403-411. [王玉, 杨彬, 郝清玉, 2020. 木麻黄种子萌发的限制生态因子 [J]. *广西植物*, 40(3): 403-411.]
- YUAN F, WANG YY, LI MJ, et al., 2020. Dynamic characteristics of metal element content and return of *Casuarina equisetifolia* litter at different distances to the coastline [J]. *Chin J Plant Ecol*, 44(8): 819-827. [袁锋, 王艳艳, 李茂瑾, 等, 2020. 不同海岸距离上木麻黄凋落叶金属元素含量及归还量动态特征 [J]. *植物生态学报*, 44(8): 819-827.]
- ZHU JF, CUI ZR, WU CH, et al., 2018. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China [J]. *World For Res*, 31(4): 70-75. [朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等, 2018. 我国盐碱地绿化研究进展与展望 [J]. *世界林业研究*, 31(4): 70-75.]
- ZHANG DP, CAO BH, JIA B, et al., 2008. Germination and physiological response of *Albizia julibrissin* seeds under alkali-salt stress [J]. *Sci Silv Sin*, 44(9): 157-161. [张大鹏, 曹帮华, 贾波, 等, 2008. 盐碱胁迫下合欢种子的抗逆萌发生理 [J]. *林业科学*, 44(9): 157-161.]
- ZHANG JF, LI JY, XING SJ, et al., 2003. Seed germination of *Chionanthus retusa* and *Cedrela sinensis* under salinity stress [J]. *J Beijing For Univ*, 25(4): 80-83. [张建锋, 李吉跃, 邢尚军, 等, 2003. 流苏和香椿种子在盐分胁迫下的发芽研究 [J]. *北京林业大学学报*, 25(4): 80-83.]
- ZHOU XQ, LI YH, 2004. The physiological and ecological responses of the seed germination of *Casuarina equisetifolia* to chromic stress [J]. *Chin J Eco-Agric*, 12(1): 58-60. [周希琴, 李裕红, 2004. 木麻黄种子萌发对铬胁迫的生理生态响应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 12(1): 58-60.]