

DOI: 10.5846/stxb201605311043

刘发林.草木灰对四种松属种子发芽和幼苗生长的影响.生态学报, 2017, 37(17): 5673-5680.

Liu F L. Response of four pine species to plant ash during germination and seedling growth. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5673-5680.

草木灰对四种松属种子发芽和幼苗生长的影响

刘发林*

中南林业科技大学, 长沙 410004

摘要:火干扰不仅影响森林生态系统的结构与功能,而且影响群落更新与演替。为了研究草木灰对 4 种松属种子萌芽和幼苗生长的影响,在湖南省株洲市黄丰桥林场采集马尾松、云南松、湿地松和火炬松种子,以马尾松次生林火烧迹地的草木灰为基质,设置对照和 3 个草木灰处理,进行播种试验及生长观测。结果表明:(1)草木灰处理下 4 个物种的种子发芽率比对照试验低,并呈现随草木灰含量的增加而降低的趋势,低草木灰含量处理马尾松种子发芽率不及对照一半,中、高草木灰含量处理发芽率更低;云南松、湿地松和火炬松种子发芽率规律类似于马尾松,而高草木灰含量处理发芽率为 0。(2)培养皿播种平均发芽时间比花盆播种长,无论草木灰处理还是培养条件(培养皿或花盆),马尾松和云南松种子平均发芽时间比湿地松和火炬松短。(3)4 个物种种子播种 14 周后,对照试验中马尾松和云南松幼苗死亡率最低,而火炬松和湿地松幼苗死亡率相对增加。(4)播种 14 周后不同试验处理 4 个物种幼苗生长差异不明显。火炬松、湿地松、云南松和马尾松幼苗的单株平均干重分别达 0.038、0.031、0.027、0.024 g。各物种叶干重按降序排列依次是火炬松(0.026 g)>湿地松(0.019 g)>云南松(0.017 g)>马尾松(0.016 g),根和茎的干重比重相当,约占对应物种幼苗叶干重的三分之一。研究表明以草木灰为培养基质,马尾松和云南松种子的发芽率较高,平均发芽时间较短,更适合作为火烧迹地植被恢复先锋树种,为火干扰后选择人工促进天然更新树种提供参考。

关键词:松属;发芽;幼苗生长;草木灰

Response of four pine species to plant ash during germination and seedling growth

LIU Falin*

Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Fire disturbance not only alters the structure and function of forest ecosystems but also affects community regeneration and succession of forest ecosystems. In the present study, we investigated the effects of plant ash on germination and seedling growth of four pine species (*Pinus massoniana*, *Pinus yunnanensis*, *Pinus elliottii*, and *Pinus taeda*) grown from seeds collected from the Huangfengqiao State Forest Farm, Zhuzhou, Hunan Province, China. We used plant ash collected locally from a forest fire site of a *P. massoniana* secondary forest. Four ash treatments consisting of low (4 kg/hm²), medium (8 kg/hm²), high (16 kg/hm²), and control were used. The seeds were sown with plant ash in Petri dishes and plant pots measuring 20 cm×20 cm×20 cm. There were three replicates of 30 seeds for each species in each treatment used in a completely randomized design. The experimental data were then analyzed using analysis of variance (ANOVA). The results of our experiments show that: 1) germination of all four studied species was more negatively affected in the plant ash treatments than in the control group, and the germination rates for all four species decreased with increasing in the quantities of plant ash. Germination of *P. massoniana* decreased by 60.16%, 91.63%, and 99.15% with low, medium, and high plant ash treatments, respectively. *P. yunnanensis*, *P. elliottii*, and *P. taeda* showed similar trends, but no germination was observed in high plant ash treatment. 2) On average, germination time was higher for medium ash treatment than for low ash treatment. In addition, the average germination time for *P. elliottii* and *P. taeda* was higher than

基金项目:国家自然科学基金(31470659)

收稿日期:2016-05-31; 网络出版日期:2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuf680@126.com

that for *P. massoniana* and *P. yunnanensis* regardless of the quantities of plant ash or incubation conditions (in Petri dishes or in plant pots). 3) Seedling mortality differed between the four species at 14 weeks after sowing. *P. massoniana* and *P. yunnanensis* had lower seedling mortality rate than did *P. elliotii* and *P. taeda* in the control experiments. The mortality rate increased as the quantities of plant ash increased. 4) No significant differences of seedling growth were detected among the plant ash treatments of four species. *P. taeda* had the highest total dry weights of seedlings (0.038 g) at 14 weeks after sowing followed successively by *P. elliotii* (0.031 g), *P. yunnanensis* (0.027 g), and *P. massoniana* (0.024 g). The average dry weight of leaves was 0.026 g for *P. taeda*, 0.019 g for *P. elliotii*, 0.017 g for *P. yunnanensis*, and 0.016 g for *P. massoniana*. However, the average dry weights of roots and stems were similar and were approximately three times lesser than that of leaves. Our experiments did not show obvious promoting effects on germination and seedling growth of plant ash. Nonetheless, higher germination rates and shorter mean germination time were observed for the two native pine species, *P. massoniana* and *P. yunnanensis*, than for the other two species, *P. taeda* and *P. elliotii*, suggesting that the selection of the right tree species is important in order to aid in vegetation restoration in burned areas and natural regeneration after fire disturbance.

Key Words: *Pinus*; germination; seedling growth; plant ash

森林火灾不仅影响生态系统的结构与功能,而且影响群落更新^[1]。火干扰后森林地表覆盖一层灰烬,即植物(草本和木本植物)燃烧后的残余物,俗称草木灰,其质轻且呈弱碱性^[2-3]。草木灰是一种良好的无机肥料,具有消毒、增强植物抗逆性、促进植物发芽和生根及伤口愈合等作用。Raison^[4]调查发现稀树草原、森林燃烧后留下的草木灰达 100—12000 kg/hm², Carreira 和 Niell^[5] 研究地中海灌木林火烧后草木灰约 486 kg/hm², Soto^[6] 等研究大西洋灌丛火烧后草木灰约 87 kg/hm²。北半球松属植物生态系统经常遭受火灾^[7], 有学者对广泛分布于北半球的欧洲黑松(*Pinus nigra*)、欧洲红松(*Pinus sylvestris*)、海岸松(*Pinus pinaster*)的更新进行了研究,大多数松属植物不能萌芽更新,主要通过种子更新^[8-12], Agee 研究了英国部分松属植物种子萌发和生长对火干扰的响应^[13];国内有学者就水分胁迫、NaCl 胁迫、钙浸种和不同基质对马尾松(*Pinus massoniana*)或华山松(*Pinus armandii*)种子发芽及生长的影响进行过研究^[14-17],但关于草木灰对火炬松(*Pinus taeda*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)等松属种子萌芽和幼苗生长的研究未见报道。为了比较草木灰对马尾松、云南松、湿地松、火炬松种子萌发及幼苗生长的影响,在湖南省株洲市黄丰桥林场采集种子,收集该场马尾松次生林火烧迹地草木灰作为基质,设置 1 个对照与 3 个不同草木灰含量处理,观测 4 个物种种子萌发及幼苗生长,为火干扰后火烧迹地天然更新或人工促进天然更新提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

黄丰桥林场呈带状横跨于湖南省攸县东西部,以中低山貌为主,海拔介于 1270—115 m,坡度在 20°—35°之间。主要成土母岩为板页岩,土壤以板页岩发育而成的山地黄壤为主,土壤肥沃。林场属亚热带季风湿润气候区,年平均气温为 17.8℃,年降水量为 1410.8 mm,无霜期 292 d。境内森林茂盛,物种丰富,据考察有木本植物 430 余种,其中国家保护的珍稀濒危树种有南方红豆杉(*Taxus mairei*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、凤凰树(*Delonix regia*)等 10 余种,主要林分类型为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松、湿地松、火炬松和云南松等人工林,其次有马尾松次生林、针阔(如马尾松-櫟木(*Loropetalum chinensis*)针阔混交林)和阔叶混交林,林场培养了主要树种的母树林。受南方冰雪灾害的影响,2008 年以来林场发生森林火灾(含火警)14 次,受害面积共 8.4hm²。

1.2 试验设计

2013 年 12 月中旬在黄丰桥林场马尾松、湿地松、火炬松和云南松母树林采集成熟种子,将干燥种子用塑

料袋密封。种子纯度为 95% 时,马尾松、湿地松、火炬松和云南松种子千粒重分别为 10.95、29.45、20.12 g 和 16.99 g, 0—5℃ 低温下贮藏。2015 年 3 月 10 日进行播种前处理,采用水洗法选出饱满籽粒,用 45℃ 温水浸种 24 h,滤干后用 0.15% 的福尔马林溶液消毒 30 min,再用蒸馏水冲洗 3 次,备播种试验。试验均在实验室条件下进行,并测定不同草木灰使用量处理的发芽率。基质为马尾松次生林地地表火后的草木灰,火烧后收集地表草木灰并充分混合。

试验 1:在直径 9 cm 双层滤纸上进行试验,滤纸置于培养皿上,以不用草木灰试验为对照(CK),3 种不同草木灰含量的试验处理为:Low(低 4 kg/hm²)、Medium(中 8 kg/hm²)和 High(高:16 kg/hm²),按试验处理量将草木灰均匀的铺在滤纸上,植物种子放置在草木灰上,每个处理播种 30 粒,重复 3 次。用 10 mL 蒸馏水滴于培养皿,培养期间根据需要喷洒蒸馏水以保持种子湿润。2015 年 3 月 13 日开始播种,以 45 d 为 1 周期,每两天观测发芽数(以胚根超出皮外 1 mm 以上为准)^[18],45 d 后每周观测 1 次。根据观测数据计算发芽率、平均发芽时间和发芽时间分布,平均发芽时间计算公式:

$$t_m = \frac{N_1 T_1 + N_2 T_2 + \dots + N_n T_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}$$

式中, N_1 为时间 T_1 的发芽数, N_2 为时间 T_1 与 T_2 之间的发芽数,依次类推^[18]。

试验 2:试验置于 20 cm×20 cm×20 cm 花盆,草木灰铺放在花盆内土壤(黄心土 48%、菌根土 20%、火烧土 30%、过磷酸钙 2%)表面,花盆底部铺一层珍珠岩避免种子霉变。草木灰试验处理、播种时间、重复次数和观测方法等与试验 1 相同;此外,试验 2 中每周观测幼苗高 1 次,直到播种后第 14 周,根据存活苗数计算死亡率,而后幼苗被连根拔起,去泥土后放置于 60℃ 干燥箱直至恒重,测量幼苗的根、茎和叶的重量与长度。

1.3 统计分析

观测数据输入 Excel 存储,通过平方根的反余弦对发芽率观测数据进行转换,通过以常用对数对幼苗高度数据进行对数转换,采用 SAS 软件进行统计分析^[19],以物种和处理为独立变量,对各试验数据进行多元方差分析。因此,对物种之间及物种与处理之间相互作用进行差异性分析,对培养皿及花盆中的发芽率、发芽时间、死亡率、各物种的幼苗高度、幼苗总重量及各器官的重量进行单变量方差分析,当试验处理之间存在显著差异,再进行 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 种子发芽率

试验 1,培养皿播种 4 个物种种子发芽率随草木灰含量增加而减少(图 1),低草木灰含量处理马尾松发芽率不及对照一半,中、高草木灰含量处理发芽率更低;云南松种子发芽率规律类似于马尾松,而高草木灰含量处理发芽率为 0;湿地松种子对草木灰更敏感,低、中、高草木灰含量处理下发芽率分别为 13%、2% 和 0;火炬松种子低草木灰含量处理发芽率仅 4%,而中、高草木灰含量处理发芽率均为 0。方差分析结果表明,物种($P<0.05$)之间和处理($P<0.05$)之间均存在显著差异,物种与处理之间的相互作用非常显著($P<0.01$),表明种子发芽率对草木灰处理的响应取决于物种。

试验 2,花盆播种 4 个物种种子发芽率在 19.13%—76.14% 之间变动(图 2)。除湿地松对照试验播种比培养皿播种种子发芽率低外,草木灰处理下种子发芽率呈现随草木灰含量增加而降低的趋势。方差分析表明,物种之间和草木灰处理之间种子发芽率存在极显著差异($P<0.01$),物种与处理之间差异显著($P<0.01$);单变量方差分析表明各物种种子发芽率差异较小。高草木灰含量处理云南松种子发芽率最高,与其他处理之间存在显著差异($P<0.05$)。马尾松和火炬松种子发芽率在高草木灰处理与对照试验之间存在显著差异,但高、中、低草木灰含量处理之间差异不显著。

2.2 平均发芽时间

试验 1,4 种松属物种种子的平均发芽时间不同,马尾松和云南松种子比湿地松和火炬松种子发芽快

(图1),经方差分析表明,物种之间差异显著($P<0.01$),而草木灰处理之间差异不显著。

试验2,花盆播种平均发芽时间比培养皿长(图2)。马尾松和云南松种子平均发芽时间介于20—38 d,而湿地松和火炬松介于48—57 d,物种之间存在极显著差异($P<0.01$),草木灰处理之间存在显著差异($P<0.05$),物种与处理之间的交互作用不显著。处理之间湿地松和火炬松种子发芽时间没有显著差异,而高草木灰处理与其他3种处理之间云南松种子发芽时间差异显著,对照试验中马尾松种子发芽时间与其他3种草木灰处理之间存在差异。

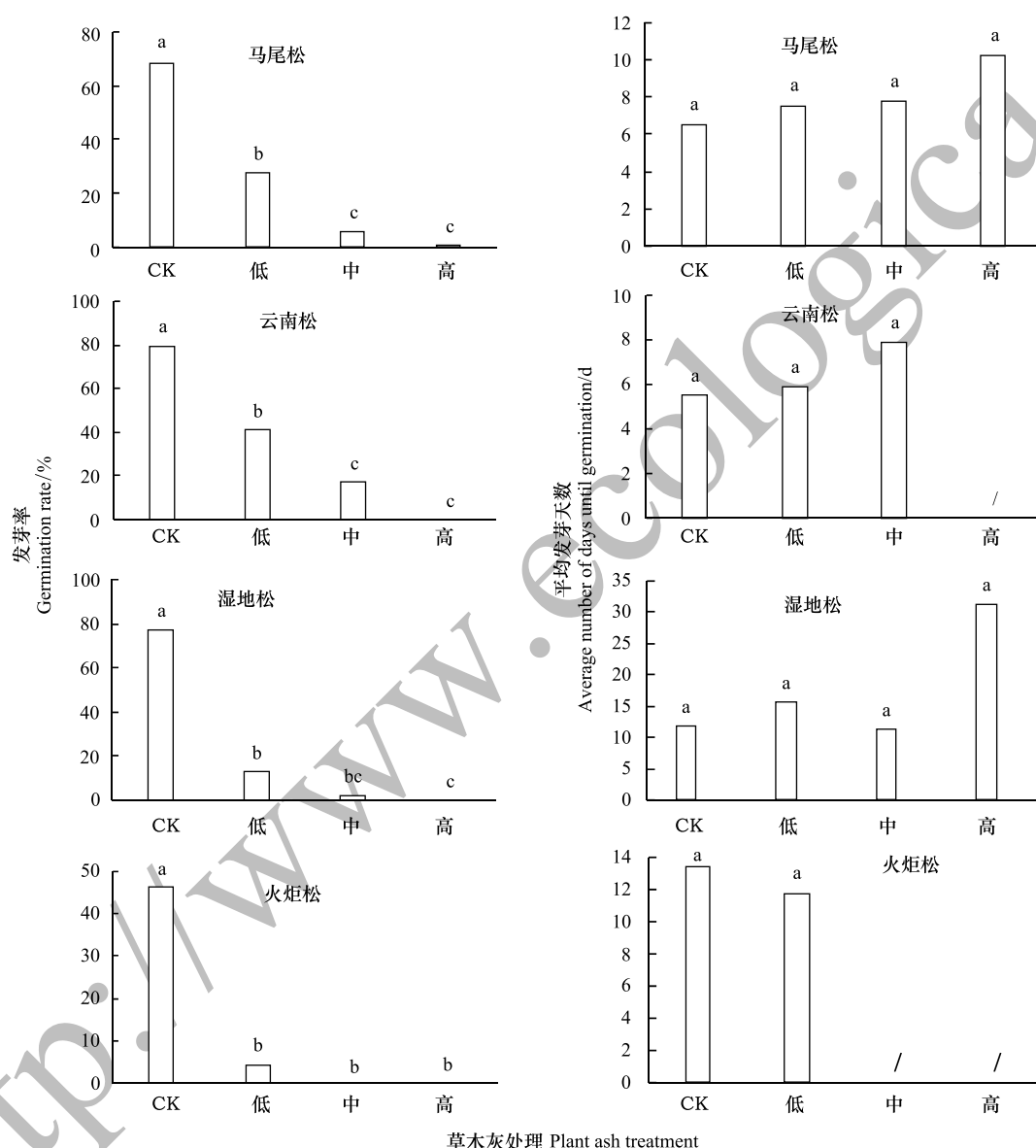


图1 培养皿播种后4种松属物种种子发芽率和平均发芽天数

Fig.1 Germination rate and average number of days until germination for four *Pinus* species sown in Petri dishes

2.3 幼苗死亡率

4个物种种子播种14周后幼苗死亡率存在差异(图3),不同处理之间云南松幼苗死亡率介于27.06%—61.58%、马尾松幼苗死亡率介于14.35%—47.91%;而湿地松幼苗死亡率介于36.28%—65.81%、火炬松幼苗死亡率介于31.46%—62.15%。方差分析表明,物种之间和处理之间均存在极显著差异($P<0.01$),但物种与处理之间的交互作用不显著。马尾松幼苗死亡率明显比其他3个物种低。低、高草木灰含量处理存在显著差

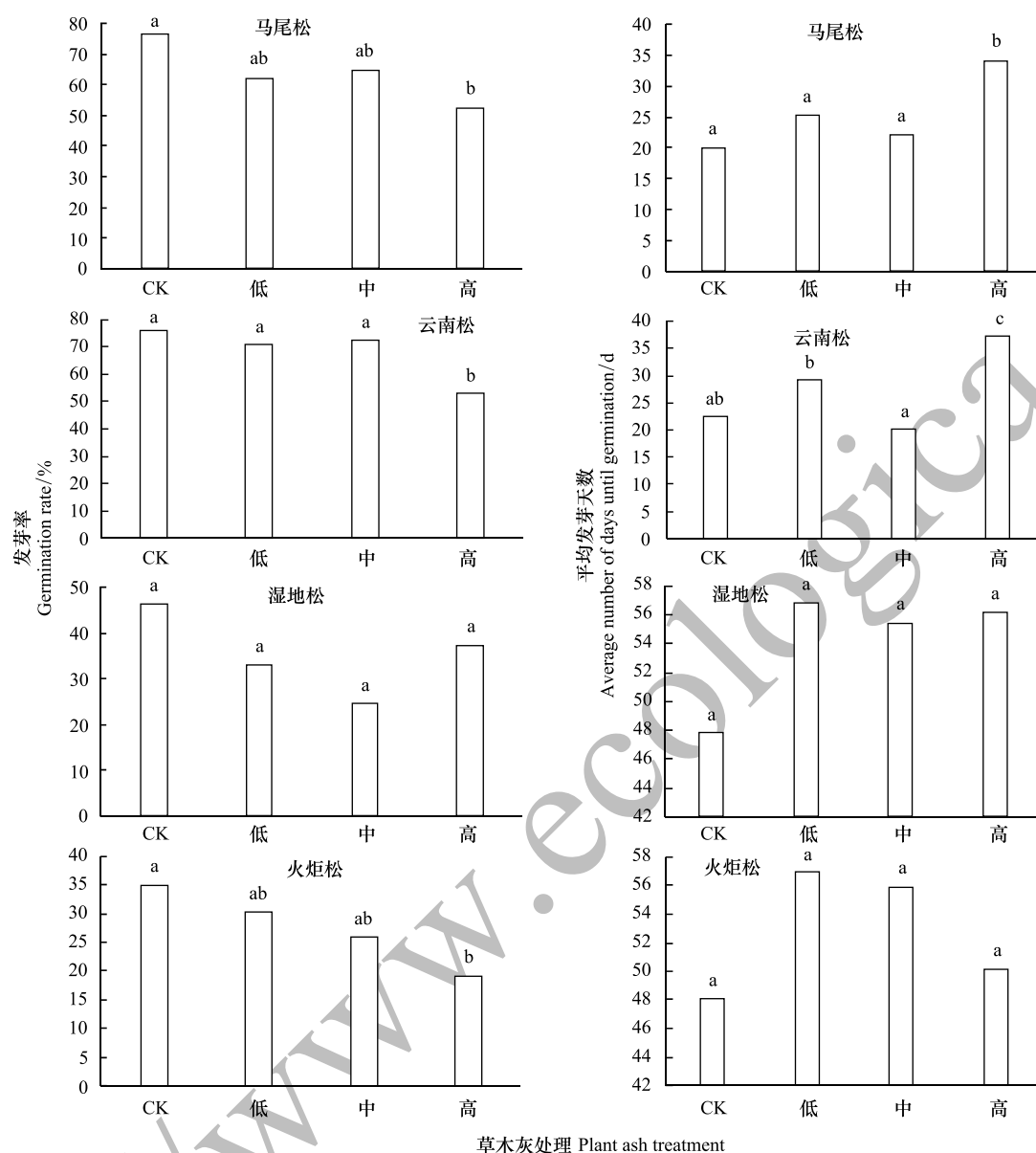


图2 花盆播种后4种松属物种种子发芽率和平均发芽天数

Fig.2 Germination rate and average number of days until germination for four *Pinus* species sown in plant pots

异,而中草木灰含量处理与对照和低草木灰含量处理相似。处理之间湿地松和火炬松幼苗死亡率不存在显著差异。

2.4 幼苗重量

播种14周后,火炬松、湿地松、云南松和马尾松幼苗的单株平均干重分别达0.038、0.031、0.027、0.024 g (表1),湿地松和火炬松幼苗比马尾松和云南松重,马尾松和云南松幼苗与湿地松和火炬松间的差异没有发芽率、平均发芽时间和死亡率显著。物种间存在显著差异($P=0.0024$),但试验处理间的差异不显著。

4个物种树叶干重占幼苗总干重比例最大,叶干重按降序排列依次为:火炬松(0.026 g)>湿地松(0.019 g)>云南松(0.017 g)>马尾松(0.016 g),根和茎的干重相当,约占对应物种幼苗叶干重的三分之一。多元方差分析表明物种和处理间不存在显著交互差异,而物种之间存在极显著差异($P<0.01$)。马尾松幼苗干重与其他3个物种有显著差异。分别对各物种进行分析发现,茎和地上部分干重没有显著差异,而根的干重差异显著。高草木灰含量处理马尾松幼苗根干重明显低于其他处理。

2.5 幼苗长

播种 14 周后,4 个物种的幼苗长几乎没有差异(表 1),平均长按降序依次为:湿地松(15.75 cm)>火炬松(15.25 cm)>云南松(13.72 cm)>马尾松(12.33 cm),方差分析显示不同处理、不同物种整株幼苗长的差异不显著,物种与处理之间的交互作用没有显著差异。平均根长度按降序排列分别为:湿地松(9.86 cm)>火炬松(8.18 cm)>云南松(8.01 cm)>马尾松(6.78 cm);茎长度按降序排列分别为:火炬松(4.23 cm)>云南松(3.95 cm)>湿地松(3.87 cm)>马尾松(3.59 cm);幼苗叶长度按降序排列分别为:火炬松(2.75 cm)>湿地松(2.01 cm)>马尾松(1.96 cm)>云南松(1.70 cm)。

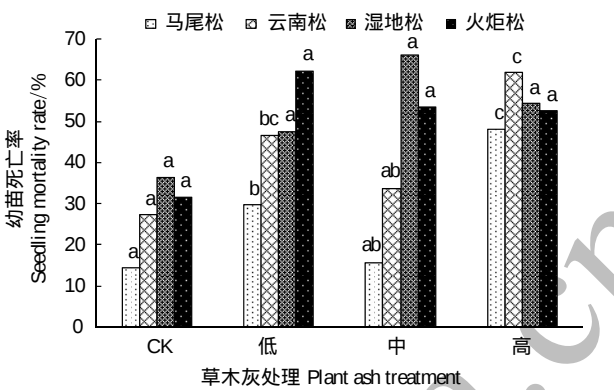


图 3 花盆播种后 4 种松属物种幼苗死亡率
Fig. 3 Seedling mortality rate of four *Pinus* species sown in plant pots

表 1 花盆播种后 4 种松属物种幼苗平均长和平均重
Table 1 Average length and weight of four *Pinus* species sown in plant pots

物种 Species	器官 Organ	项目 Project	草木灰处理 Plant ash treatment			
			CK	低 Low	中 Medium	高 High
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	叶	重量/g	0.016 a	0.015 a	0.018 a	0.014 a
		长度/cm	1.82 a	2.13 a	1.99 a	1.91 a
	茎	重量/g	0.004 a	0.005 a	0.005 a	0.004 a
		长度/cm	3.52 a	3.60 a	3.66 a	3.58 a
	根	重量/g	0.004 a	0.005 a	0.004 a	0.003 b
		长度/cm	7.89 a	6.45 a	6.67 a	6.11 a
	整株	重量/g	0.024 a	0.025 a	0.027 a	0.021 a
		长度/cm	13.23 a	12.18 a	12.32 a	11.60 a
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	叶	重量/g	0.016 a	0.016 a	0.019 a	0.016 a
		长度/cm	1.65 a	1.91 a	2.01 a	1.48 a
	茎	重量/g	0.006 a	0.006 a	0.006 a	0.005 a
		长度/cm	3.85 a	4.20 a	3.91 a	3.84 a
	根	重量/g	0.005 a	0.006 a	0.006 a	0.005 a
		长度/cm	8.44 a	7.85 a	8.55 a	7.21 a
	整株	重量/g	0.027 a	0.028 a	0.031 a	0.026 a
		长度/cm	13.94 a	13.96 a	14.47 a	12.53 a
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	叶	重量/g	0.019 a	0.017 a	0.020 a	0.021 a
		长度/cm	1.94 a	1.91 a	1.98 a	2.23 a
	茎	重量/g	0.005 a	0.006 a	0.006 a	0.006 a
		长度/cm	4.02 a	3.79 a	3.55 a	4.12 a
	根	重量/g	0.007 a	0.009 a	0.006 a	0.006 a
		长度/cm	11.64 a	10.45 a	8.21 a	9.16 a
	整株	重量/g	0.031 a	0.032 a	0.032 a	0.033 a
		长度/cm	17.60 a	16.15 a	13.74 a	15.51 a
火炬松 <i>Pinus taeda</i>	叶	重量/g	0.024 a	0.027 a	0.026 a	0.026 a
		长度/cm	2.49 ab	3.21 a	1.95 a	3.38 c
	茎	重量/g	0.007 a	0.007 a	0.008 a	0.007 a
		长度/cm	4.61 a	3.72 a	4.25 a	4.36 a
	根	重量/g	0.007 a	0.007 a	0.008 a	0.009 a
		长度/cm	8.62 a	8.21 a	7.89 a	8.01 a
	整株	重量/g	0.038 a	0.040 a	0.041 a	0.042 a
		长度/cm	15.72 a	15.14 a	14.09 a	15.75 a

对各物种幼苗各器官长度进行统计分析,发现仅树叶长度在物种间差异显著($P<0.01$)、物种与处理间的交互作用差异显著($P<0.014$)。火炬松幼苗树叶比其他 3 个物种的长,高草木灰含量试验处理下火炬松幼苗树叶比对照和中草木灰含量试验处理显著增长($P<0.05$),其他 3 个物种幼苗长度在草木灰试验处理间没有显著差异,幼苗的根和茎长在物种间、试验处理间差异不显著,在物种与试验处理间的交互作用也不显著。

3 结论与讨论

以马尾松次生林火烧迹地草木灰进行试验,对 4 种松属物种的种子发芽及幼苗生长进行观测,发现火炬松和湿地松种子在高草木灰含量试验处理下发芽率最低,除对照处理外,花盆试验处理种子发芽率比培养皿中的高,估计与花盆中土壤可以稀释草木灰和降低抑制发芽的碱性物质浓度有关,因为低浓度碱性物质有利于植物种子发芽,而高浓度碱性物质对种子发芽起抑制作用^[20]。无论草木灰处理还是培养条件(培养皿或花盆),马尾松和云南松种子平均发芽时间比湿地松和火炬松短。

对照试验中马尾松和云南松幼苗死亡率最低,而火炬松和湿地松幼苗死亡率相对增加,但增加不显著,死亡率随草木灰含量的增加而明显上升,表明火炬松和湿地松幼苗生长比马尾松和云南松对草木灰更敏感。

播种 14 周后 4 种松属物种幼苗的生长差异不明显,因为 4 个物种的胚胎可以供给幼苗生长所需的营养,幼苗的生长并不需要从草木灰或土壤中获取营养成分。有学者对其他物种进行试验研究,发现 2.5 a 后高草木灰含量火烧迹地更新植物高是对照样地的 2 倍^[21-22]。火炬松和湿地松在中、高草木灰含量试验中能生长良好,说明有些物种能适应非酸性土壤,这也正好说明了地中海松为何能在地中海碱性土壤下发芽和生长^[23-24]。研究显示马尾松和云南松在草木灰处理试验中发芽率比湿地松和火炬松高,这与湿地松和火炬松属国外引种松属有关,因马尾松和云南松属本地物种,更适合在研究区更新,也是火烧迹地天然更新中的先锋树种之一。

曾经松树被认为是防火物种^[25],而如今学者认为松树不是防火树种^[12, 26-27],因为松属植物含有大量的松脂且松针属细小可燃物,有利于林火的发生和蔓延。森林火灾高温对松属种子的发芽促进作用不明显^[12, 28-29]。总体来看,马尾松和云南松比湿地松和火炬松的适应性更强,主要还是因为前者的种子体积小和重量轻,便于种子传播。

研究结果发现,低草木灰含量试验处理的 4 个松属种子的发芽率均比对照低,因此今后对 0—4 kg/hm² 之间的浓度梯度进行试验,筛选更适宜的草木灰浓度。

参考文献 (References):

- [1] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 胡远满, 柳生吉, 荆国志, 赵增福. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子. 生态学报, 2012, 32(11): 3303-3312.
- [2] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统的碳循环. 生态学报, 2005, 25(10): 2734-2743.
- [3] 韩春兰, 邵帅, 王秋兵, 李甄, 孙仲秀, 毛伟伟. 兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化. 生态学报, 2015, 35(9): 3023-3033.
- [4] Raison R J. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review. Plant and Soil, 1979, 51(1): 73-108.
- [5] Carreira J A, Niell F X. Mobilization of nutrients by fire in a semiarid gorse-scrubland ecosystem of Southern Spain. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1995, 9(1): 73-89.
- [6] Soto B, Basanta R, Diaz-Fierros F. Effects of burning on nutrient balance in an area of gorse (*Ulexeuropaeus L.*) scrub. Science of the Total Environment, 1997, 204(3): 271-281.
- [7] Richardson D M, Rundel P W. Ecology and Biogeography of *Pinus*: an introduction // Richardson DM, ed. Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998: 3-46.
- [8] Naveh Z. The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. Vegetation, 1975, 29(3): 199-208.
- [9] Purdie R W, Slatyer R O. Vegetation succession after fire in *sclerophyll* woodland communities in South-Eastern Australia. Austral Ecology, 1976, 1(4): 223-236.
- [10] Trabaud L. Fire adaptation strategies of plants in the French Mediterranean area // Margaritis NS, Arianoutsou-Faraggitaki M, Oechel WC, eds.

- Being alive on land. Proceedings of the International Symposium on Adaptations to the Terrestrial Environment. The Hague, The Netherlands; Dr W Junk Publishers, 1984: 63-69.
- [11] Keeley J E, Zedler P H. Evolution of life histories in *Pinus*//Richardson DM, ed. Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998: 219-250.
- [12] Martínez-Sánchez J J, Marín A, Herranz J M, Ferrandis P, Heras J D. Effects of high temperatures on germination of *Pinus halepensis* Mill. And *P. pinaster* Aiton subsp. *Pinaster* seeds in southeast Spain. *Vegetation*, 1995, 116(1): 69-72.
- [13] Agee J K. Fire and pine ecosystems // Richardson DM, ed. Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000: 193-218.
- [14] 施积炎, 丁贵杰. 水分胁迫对不同种源马尾松种子发芽的影响. *山地农业生物学报*, 2000, 19(5): 332-337.
- [15] 王瑞苓, 汪元超, 刘建祥, 汪梦婷. NaCl 胁迫对华山松种子发芽和幼苗生长的影响. *湖北农业科学*, 2013, 52(8): 1859-1863.
- [16] 韦小丽, 廖明. 钙浸种对马尾松种子发芽的影响. *种子*, 2005, 24(4): 34-36.
- [17] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 马华明, 林明平. 不同基质对柚木种子发芽与幼苗生长的影响. *种子*, 2009, 28(10): 86-87, 90-90.
- [18] Côme D. Les obstacles à la Germination. Paris, France: Masson, 1970.
- [19] SAS Institute. SAS user's guide. 6th ed. Cary, NC: SAS Institute, 1995.
- [20] 潘多锋, 申忠宝, 王建丽, 高超, 李道明, 张瑞博. 碱性盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响. *北方园艺*, 2015, (14): 67-70.
- [21] Kutiel P, Kutiel H. Effects of a wildfire on soil nutrients and vegetation in Aleppo pine, on Mount Carmel, Israel. *Pirineos*, 1989, 134: 59-74.
- [22] Neéman G, Meir I, Neéman R. The effect of ash on the germination and early growth of shoots and roots of *Pinus*, *Cistus* and annuals. *Seed Science and Technology*, 1993, 21(2): 339-349.
- [23] Thanos C A, Skordilis A. The effects of light, temperature and osmotic stress on the germination of *Pinus halepensis* and *P. brutia* seeds. *Seed Science and Technology*, 1987, 15: 163-174.
- [24] Shiller G, Waisel Y. Among-provenance variation in *Pinus halepensis* in Israel. *Forest Ecology and Management*, 1989, 28(2): 141-151.
- [25] Naveh Z. Effects of fire in the Mediterranean region // Kozłowski TT, Ahlgren CE, eds. *Fire and Ecosystems*. New York, USA: Academic Press, 1974: 401-434.
- [26] Trabaud L. Survie de jeunes plantules de pin d'alep apparues après incendie. *Studia Oecologica*, 1988, 5: 161-170.
- [27] Reyes O, Casal M. Germination of *Pinus pinaster*, *P. radiata* and *Eucalyptus globulus* in relation to the amount of ash produced in forest fires. *Annales des Sciences Forestières*, 1998, 55: 837-845.
- [28] Reyes O, Casal M. Germination behaviour of 3 species of the genus *Pinus* in relation to high temperatures suffered during forest fires. *Annales des Sciences Forestières*, 1995, 52(4): 385-392.
- [29] Escudero A, Barrero S, Pita J M. Effects of high temperatures and ash on seed germination of two Iberian pines (*Pinus nigra* ssp *salzmannii*, *P. sylvestris* var *iberica*). *Annales des Sciences Forestières*, 1997, 54(6): 553-562.