

不同植物生长促进剂对喷播灌木发芽及幼苗生长的影响

刘寒晓¹, 朱立娟², 王英宇², 杨 华², 史常青¹, 赵 斌², 赵廷宁¹, 谢 千²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市首发天人生态景观有限公司, 北京 102600)

摘要: 北京高速公路边坡喷播绿化后多出现灌草竞争问题, 无法实现以灌木为主的目标群落。为在一定程度上提高灌木竞争力, 选择促进剂浸种催芽的方法, 进行了植物生长促进剂浸泡灌木种子的发芽试验和播种试验, 以期发现“提早种子发芽时间, 促进幼苗生长”的促进剂种类及质量浓度。应用不同质量浓度植物生长促进剂溶液对灌木种子进行浸泡处理, 观测植物生长促进剂溶液对种子发芽时间及幼苗生长的影响。将发芽试验结果进行单因素方差分析和 Dunnett *t* 检验 ($P < 0.05$) 后发现: ①植物生长促进剂对灌木种子发芽势有提高作用, 能使灌木种子在短期内尽可能多发芽, 可增强灌木种子自身的竞争力。②对发芽高峰和发芽持续时间, 不同灌木种子影响不一, 延长和缩短的范围一般在 2~3 d。将播种试验结果利用 R 语言进行因子分析, 并结合发芽试验结果进行促进剂质量浓度筛选, 结果通用质量浓度促进剂筛选结果为萘乙酸 10^{-8} mg·L⁻¹, 专用质量浓度促进剂筛选结果为紫穗槐 *Amorpha fruticosa*-复硝酚钠 6 mg·L⁻¹, 胡枝子 *Lespedeza bicolor*-赤霉素 160 mg·L⁻¹, 荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*-赤霉素 100 mg·L⁻¹。研究结果可在一定程度上解决边坡喷播中出现的灌草竞争问题, 促进以灌木为主的目标群落的形成。图 2 表 11 参 18

关键词: 植物学; 植物生长促进剂; 喷播; 灌木; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S722.1; S731.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)04-0637-10

Plant growth accelerators for germination and seedling growth of shrubs

LIU Hanxiao¹, ZHU Lijuan², WANG Yingyu², YANG Hua², SHI Changqing¹, ZHAO Bin²,
ZHAO Tingning¹, XIE Qian²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Corporation Limited, Beijing 102600, China)

Abstract: Nowadays, competition between shrubs and herbs often appears after spraying seeds for slope greening of Beijing highways, such that forming a shrub-based plant community cannot be achieved leading to unstable slopes which could collapse causing landslides. Therefore, the best concentration of plant growth accelerators to shorten germination time and accelerate seedling growth in order to strengthen the competitiveness of shrubs and to build a solid sloping landscape, was determined using different densities of plant growth accelerator solutions to soak shrub seeds. Analysis was conducted with an ANOVA and Dunnett's test, and the R program software's Factor Analysis was used to select the best kind and concentration of plant growth accelerator. Results of germination ($P < 0.05$) showed that (1) plant growth accelerators improved seed germination potential, led to more germination in a shorter time, and strengthened its competitiveness. (2) Plant growth accelerators prolonged or shortened germination time by 2-3 d, the results for different shrubs are different. The germination time results can be used to guide the setting of the watering time after spraying. Combining germination test results and factor analysis results of the sowing test using the R program software revealed that (3) the best plant growth accelerator was naphthylacetic acid at 10^{-8} mg·L⁻¹. Also, (4) the best concentration for spe-

收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-12-30

作者简介: 刘寒晓, 从事水土保持与荒漠化防治、高速公路边坡植被恢复和工程绿化等研究。E-mail: kenaxiaoer@bjfu.edu.cn。通信作者: 赵廷宁, 教授, 博士生导师, 从事水土保持环境监测、生态修复和工程绿化理论等研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

cific shrubs was *Amorpha fruticosa*-compound sodium nitrophenolate, $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; *Lespedeza bicolor*-gibberellin, $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; and *Vitex negundo* var. *heterophylla*-gibberellin, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. These results can be used in soaking seeds before spraying to strengthen the competitiveness of shrubs [Ch, 2 fig. 11 tab. 18 ref.]

Key words: botany; plant growth accelerator; slope spraying; shrub; seed germination; seedling growth

北京高速公路边坡植被恢复多采用喷播的方法, 常用植物种子为灌草种子的搭配, 原因是灌草搭配有利于形成稳定的植被群落并有固定坡面的作用^[1], 但植被恢复过程中常出现灌木竞争力不如草本的问题。李义强等^[2]研究发现, 草本植物比例较高、苗期覆盖度较大, 对灌木苗生长空间影响很大, 有些灌木出苗后由于被草本覆盖, 生长停滞或出现死亡。为解决植被恢复过程中出现的上述问题, 必须提高灌木种子的竞争力, 而提早灌木种子发芽时间、促进灌木幼苗生长是解决问题的一个思路。植物生长调节物质对种子萌发和幼苗生长具有延缓、抑制或促进作用^[3]。赤霉素(GA), 萘乙酸(NAA), 复硝酚钠等是常用植物生长促进剂。GA 浸泡甜橙 *Citrus sinensis* 种子可以加速发芽且会使种苗叶子变长^[4]。对小麦 *Triticum aestivum* 发芽耐冷的研究发现, 被一氧化氮(NO)和 GA 浸泡过的小麦种子发芽率和发芽指数显著提高且发芽时间缩短^[5]。不同质量浓度赤霉素处理均能促进格氏栲 *Castanopsis kawakamii* 种子萌发^[6]。 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的赤霉素浸泡紫穗槐 *Amorpha fruticosa* 种子 2 h 可以促进种子脱皮, 提高出苗率^[7]。水浸 2 d 后用质量分数 0.8%GA 处理 4 h 的荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla* 种子发芽效果最理想^[8]。 $10^{-8} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NAA 处理哈密瓜 *Cucumis melo* var. *saccharinus* 种子效果最好, 但在 $10^{-4} \sim 10^0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内会强烈抑制幼苗生长^[9]。 $10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 萘乙酸对燕麦 *Avena sativa* 培根胚芽长度的促进作用最好, 而 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有抑制作用^[10]。用 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 复硝酚钠对大豆 *Glycine max* 种子浸种 24 h 可提高其发芽能力^[11]。用 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 复硝酚钠对决明子 *Cassia obtusifolia* 浸种效果最好^[12]。综上, 促进剂浸种可提早种子发芽时间、促进幼苗生长, 但针对喷播用灌木种子的研究较少, 且一般发芽试验的观测指标为发芽率、发芽势, 甚少集中在发芽时间上, 而本研究弥补了这一不足。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试种子紫穗槐、胡枝子 *Lespedeza bicolor* 和荆条由北京市首发天人生态景观有限公司提供; 植物生长促进剂赤霉素(GA, $\text{C}_{19}\text{H}_{22}\text{O}_6$, 质量分数 $\geq 90\%$, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 储存, 白色结晶), 萘乙酸(NAA, $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}_2$, 质量分数 $\geq 98\%$, 密封阴凉保存, 白色针状结晶)购自国药化学试剂北京有限公司; 复硝酚钠($\text{C}_7\text{H}_6\text{NO}_4\text{Na}$, 质量分数 $\geq 98\%$, 密封阴凉保存)购自山东省威海市天福办公公司。

1.2 试验方法

1.2.1 发芽试验 试验时间在 2015 年 5–6 月, 于北京林业大学水土保持工程重点实验室进行。选取足量饱满的灌木种子用质量分数为 0.5%的次氯酸钠溶液浸泡 15 min, 清水冲洗阴干后, 均匀放于 100 mL 烧杯中, 加配置好的 9 种质量浓度(赤霉素 100, 200, 300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 萘乙酸 10^{-8} , 10^{-6} , $10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 复硝酚钠 2, 4, 6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的促进剂浸泡 12 h, 清水冲洗后置床, 以清水浸种 12 h 为对照。以铺垫 3 层湿润滤纸的 9 cm 塑料培养皿作为发芽床, 用镊子均匀摆放 50 粒种子 \cdot 皿 $^{-1}$, 加清水后(以种子周围不出现水膜为准)放于温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度 70%, 光照 12 h(800 lx)的培养箱中进行发芽试验。以置床日期作为发芽试验的第 1 天。14 d 后统计种子发芽数, 根据发芽时间 3 个指标(发芽势、发芽高峰时间、发芽持续时间)的结果, 细化促进剂质量浓度(表 1)。用配置好的各质量浓度促进剂再次进行发芽试验, 并以清水

表 1 2 次发芽试验植物生长促进剂质量浓度

Table 1 Concentration of plant growth accelerators of the second germination test

灌木	第 1 次试验									第 2 次试验								
	赤霉素/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			萘乙酸/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			复硝酚钠/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			赤霉素/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				萘乙酸/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				复硝酚钠/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
紫穗槐	100	200	300	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	2	4	6	160	180	220	240	10^{-10}	10^{-9}	1	7	
胡枝子	100	200	300	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	2	4	6	20	40	60	80	10^{-3}	10^{-2}	8	10	
荆条	100	200	300	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	2	4	6	140	160	180	220	10^{-7}	10^{-5}	8	10	

浸种 12 h 为对照，14 d 后统计数据。

1.2.2 播种试验 试验时间在 2015 年 7–10 月，于北京林业大学水土保持工程重点实验室进行。在室内温度 25~30 ℃条件下，用长 50 cm，宽 20 cm，高 12 cm 的矩形花盆栽植，光照 2 000 lx，人工浇适量水分(保证光照、水分等条件不对幼苗生长造成胁迫)。用发芽试验挑选出的较优质量浓度促进剂对种子进行浸泡后，播种 25 粒·盆⁻¹，记录出苗率、成活率，隔 3 d 测量 1 次植株高度，连续测量 30 d。生长期满 90 d 后，对幼苗进行采收。采用全挖法，挖出后清洗擦干，剪成地上和地下 2 部分，丈量植株高度和主根长。对地上枝干、叶片、地下 3 部分，分别称取鲜质量，放入烘箱内烘干，105 ℃杀青 0.5 h，后 80 ℃烘至恒量，取出后记录干质量。

1.3 数据处理方法

发芽势=(发芽数达到高峰时的发芽总数/供试种子总数)×100%，发芽高峰=发芽数达到高峰时的发芽天数，发芽持续时间=从种子开始发芽到发芽结束的累计天数，出苗率=(出苗总数/播种种子数)×100%。成活率=(30 d 时成活幼苗数/播种种子数)×100%，植株高度=茎根交界处至顶芽的高度。主根长=茎根交界处至主根第 1 个分支处的长度。

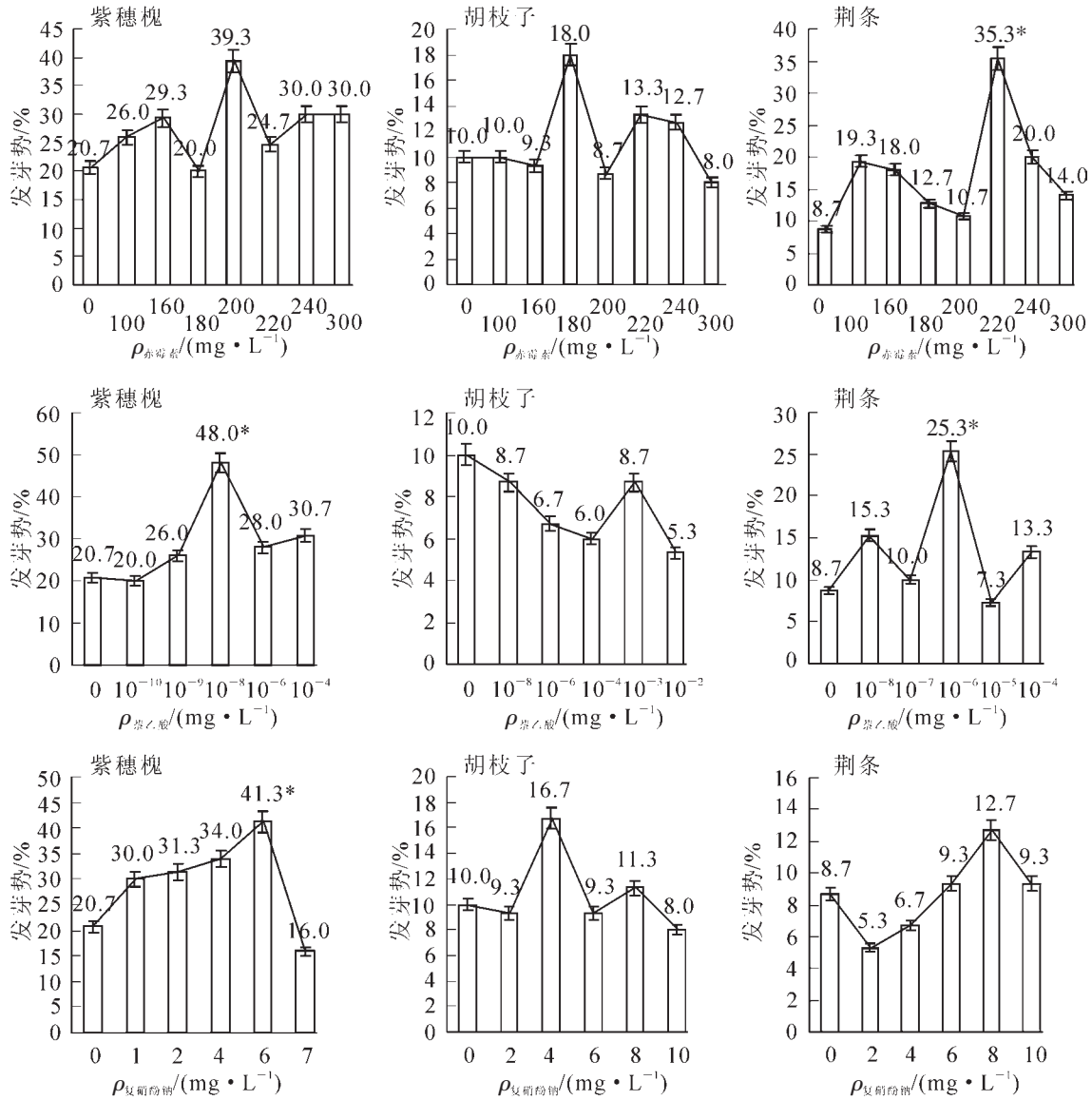
将种子的发芽势结果利用 SPSS 软件，以清水处理为“控制类别”进行 Dunnett 显著性检验(置信度为 95%)，绘制发芽势均值图；将种子的发芽高峰和发芽持续时间数据进行单因素方差分析，绘制发芽高峰和发芽持续时间的直方图。将幼苗生长的各项指标结果用 R 语言进行因子分析，列出因子载荷矩阵，建立因子模型并利用模型对灌木幼苗综合情况进行排序。

2 结果与分析

2.1 发芽试验结果分析

2.1.1 3 种植物生长促进剂对灌木种子发芽势的影响 由图 1 可见：发芽势大体呈现先增加后降低的趋势，每种灌木种子对应的每种植物生长促进剂的均值图中都有一个峰值存在，但不是每个处于峰值处的处理组与清水组都有显著差异，说明不是每种植物生长促进剂的效果都有显著的作用。应当选择均值图中处于峰值且在 Dunnett *t* 检验中与清水处理具有显著性差异的为最优生长促进剂。根据图 1 的横向和纵向对比可得出：①紫穗槐的最佳处理为赤霉素的 200 mg·L⁻¹ 组，萘乙酸的 10⁻⁸ mg·L⁻¹ 组，复硝酚钠的 6 mg·L⁻¹ 组；三者相比，发芽势最高的为萘乙酸的 10⁻⁸ mg·L⁻¹ 组。②胡枝子的最佳处理为赤霉素 160 mg·L⁻¹ 组，萘乙酸的 10⁻³ mg·L⁻¹ 组，复硝酚钠的 4 mg·L⁻¹ 组；三者相比，发芽势最高的为赤霉素的 160 mg·L⁻¹ 组。③荆条的最佳处理为赤霉素的 100 mg·L⁻¹ 组，萘乙酸的 10⁻⁶ mg·L⁻¹ 组，复硝酚钠的 8 mg·L⁻¹ 组；三者相比，发芽势最高的为萘乙酸的 10⁻⁶ mg·L⁻¹ 组。

2.1.2 3 种植物生长促进剂对灌木种子发芽时间的影响 植物生长促进剂对灌木种子发芽时间的影响从发芽高峰出现时间和发芽持续时间 2 个方面分析。图 2 显示：不同促进剂对紫穗槐发芽时间影响：①对发芽高峰基本呈延缓作用。赤霉素对发芽高峰出现时间无影响；萘乙酸对发芽高峰大体呈延缓作用，其中 10⁻⁸ mg·L⁻¹ 处理相比清水处理差异显著，延缓了 1.3 d；复硝酚钠对发芽高峰的延缓作用明显，其中 4, 6 mg·L⁻¹ 的处理组相比清水处理差异显著，延缓了 2.0 d。②对发芽持续时间的影响不一。赤霉素对发芽持续时间有缩短作用，范围为 0.3~2.6 d，220 和 240 mg·L⁻¹ 的处理效果最好；萘乙酸对发芽持续时间呈先延长后缩短的作用，自 10⁻⁶ mg·L⁻¹ 起呈缩短作用，范围为 0.6~1.0 d，10⁻⁶ mg·L⁻¹ 处理缩短效果最好；复硝酚钠对发芽持续时间的的作用规律不明显，随质量浓度增加无固定规律。不同促进剂对胡枝子发芽时间影响：①对发芽高峰有提早作用。赤霉素对发芽高峰的提早作用在 0.2~2.0 d 范围内，180, 220 mg·L⁻¹ 处理提早效果最好；萘乙酸对发芽高峰的提早作用较显著，范围在 1.0~2.3 d，其中 10⁻² 和 10⁻⁴ mg·L⁻¹ 的处理与清水处理相比有显著差异，比清水组提早了 2.3 d；复硝酚钠对发芽高峰的提早作用在 1.0~2.0 d 范围内，10 mg·L⁻¹ 处理提早效果最好。②对发芽持续时间有缩短作用。赤霉素对发芽持续时间的缩短作用在 0.3~3.3 d 范围内，其中 200 mg·L⁻¹ 处理缩短效果最好；萘乙酸对发芽持续时间的缩短作用在 1.0~2.3 d 范围内，其中 200 mg·L⁻¹ 处理缩短效果最好；复硝酚钠对发芽持续时间的缩短作用不明显，范围在 0.3~0.7 d。不同促进剂对荆条发芽时间影响：①对发芽高峰有延缓作用。赤霉素对发芽高峰出现时间的延缓作用在 0.3~2.3 d 范围内，其中 60 mg·L⁻¹ 处理的延缓作用最大，为 2.3 d；萘乙酸



标记 * 表示 Dunnett *t* 检验 $P < 0.05$, 即与清水组(ck)有显著性差异

图 1 不同质量浓度促进剂处理的 3 种灌木种子的发芽势均值图及 Dunnett 检验结果

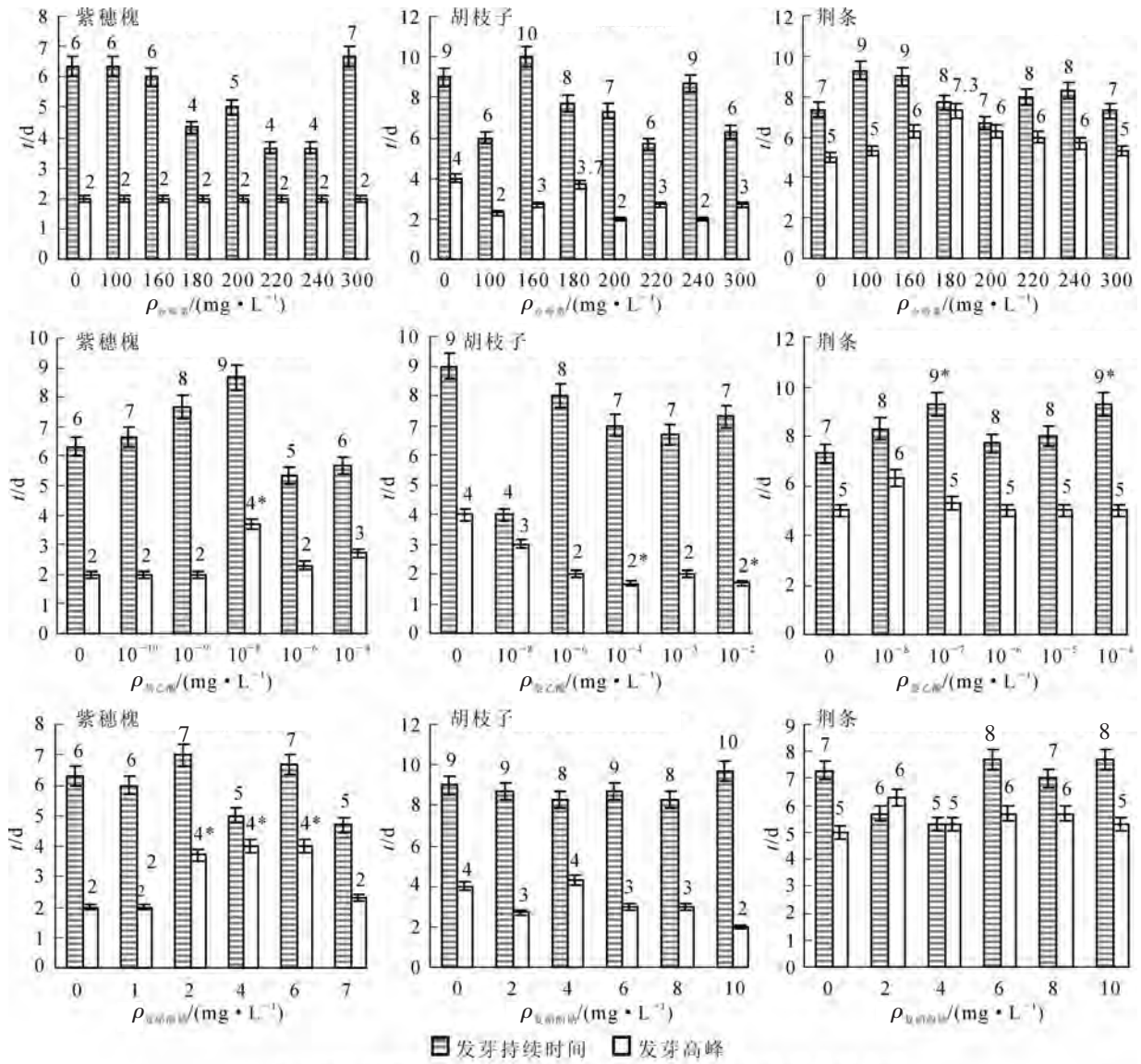
Figure 1 Dunnett result of geminability of three species of shrub seeds soaked by different concentrations of plant growth accelerators

仅 10⁻⁸ 和 10⁻⁷ mg·L⁻¹ 处理有延缓作用, 分别为 1.3 和 0.3 d, 其余质量浓度对发芽高峰无影响; 复硝酚钠对荆条发芽高峰的延缓作用在 0.3~1.3 d 范围内, 其中 2 mg·L⁻¹ 处理延缓作用最大。②对发芽持续时间有延长作用。赤霉素对发芽持续时间的延长作用在 0.4~2.0 d 范围内, 其中 20 mg·L⁻¹ 处理发芽持续时间最长; 萘乙酸对发芽持续时间的延长作用在 0.4~2.0 d 范围内, 其中 10⁻⁴ 和 10⁻⁷ mg·L⁻¹ 处理与清水处理对比差异显著, 延长时间最长; 复硝酚钠对发芽持续时间呈现先缩短后延长的作用, 但效果都不明显。

2.1.3 基于发芽试验结果的促进剂较优质量浓度筛选 根据发芽势和发芽时间结果筛选出了通用质量浓度(即对 3 种灌木种子发芽均有促进作用的最优质量浓度)促进剂和专用质量浓度(仅对某种灌木种子促进作用最好的质量浓度)。3 种通用质量浓度为 100 mg·L⁻¹ 赤霉素, 10⁻⁸ mg·L⁻¹ 茶乙酸, 6 mg·L⁻¹ 复硝酚钠。专用质量浓度: 紫穗槐分别为 200 mg·L⁻¹ 赤霉素, 10⁻⁸ mg·L⁻¹ 茶乙酸, 6 mg·L⁻¹ 复硝酚钠; 胡枝子分别为 160 mg·L⁻¹ 赤霉素, 4 mg·L⁻¹ 复硝酚钠; 荆条分别为 100 mg·L⁻¹ 赤霉素, 10⁻⁶ mg·L⁻¹ 茶乙酸, 8 mg·L⁻¹ 复硝酚钠。利用筛选获得的最优质量浓度促进剂和清水对灌木种子进行 12 h 浸泡后, 播种于花盆中进行播种试验。

2.2 播种试验结果分析

在喷播的实际施工中, 考虑到成本因素, 浇水量、浇水频率一般达不到室内试验时的条件, 因此,



标记 * 表示 Dunnett *t* 检验 $P < 0.05$ ，即与清水组(ck)有显著性差异

图 2 不同质量浓度促进剂处理的 3 种灌木种子的发芽高峰及发芽持续时间均值图

Figure 2 Mean plots of germination peak time and germination lasting of shrub seeds soaked by different concentrations of plant growth accelerators

综合考虑幼苗前期和后期的生长情况具有一定的实际意义。试验结果分析分为对 30 d, 90 d 生长期的影响以及综合影响 3 个部分。

2.2.1 对灌木幼苗 30 d 生长期的影响 ①3 种灌木幼苗之间生长情况对比。对比表 2 中出苗率、成活率、高度、出苗时间的数据发现，紫穗槐幼苗生长效果最好，胡枝子和荆条次之。取权重紫穗槐为 40%，胡枝子 30%，荆条 30%，对表 2 的结果做分析。②基于对灌木幼苗 30 d 生长期影响的促进剂质量浓度评分结果。为了促进灌木幼苗前期生长，提高灌木相对草本的竞争力，应关注其成活率及生长高度，权重取出苗率 20%，成活率 40%，高度 40%，根据表 3 和表 4 的数据计算得出总评分(以排序名次为某项得分，后根据权重加和，评分越接近 0 表示生长指标越好)。结果如表 5 所示。

表 2 通用质量浓度处理和清水处理的灌木幼苗生长指标平均结果

Table 2 Average results of growth indices of seedlings in treatment of general concentrations and water

灌木	出苗率/%	成活率/%	高度/cm	出苗时间/d
紫穗槐	47.0	26.0	9.1	2.0
胡枝子	45.0	24.0	8.1	3.0
荆条	52.0	21.0	7.5	5.0

2.2.2 对灌木幼苗 90 d 生长期的影响 对生长满 3 个月的灌木幼苗进行采收。采用全挖法，挖出后清洗擦干，剪成地上和地下 2 部分(于茎根分理处裁剪)，丈量植株高度和主根长。对地上枝干、叶片、地

下等3个部分,分别称取鲜质量。之后放入烘箱内烘干,105℃杀青0.5h,后80℃烘至恒量,取出后记录枝干、叶片、地下等3个部分干质量。数据处理采用R进行因子分析,对株高、地径、主根长、地上鲜质量、叶鲜质量、地下鲜质量、地上干质量、叶干质量、地下干质量等9项指标进行因子分析,建立因子模型并对灌木幼苗综合情况进行排序。①通用质量浓度促进剂处理下灌木幼苗生长指标结果。因子分析结果显示,按照方差贡献率大于80%的原则,提取前3个因子。其因子载荷矩阵和因子模型如表6。根据表6结果可以看出:因子 F_1 在株高 x_1 ,地径 x_2 ,地上鲜质量 x_4 ,地上干质量 x_7 上的载荷量较大,反映了植株地上部分生长状况,可视为“地上部分生长情况”因子; F_2 在叶片鲜质量 x_5 和叶片干质量 x_8 上载荷量较大,反映了植株的叶片生长情况,可视为“叶片生长情况”因子; F_3 在主根长 x_3 ,地下鲜质量 x_6 和地下干质量 x_9 上的载荷量大,反映了植株的地下部分生长状况,可视为“地下部分生长情况”因子。根据上述分析,由回归法估计出因子得分,以各因子的方差贡献率占3个因子总方差贡献率的比例作为权重进行加权汇总,得出各处理植株的综合得分,然后进行排序,结果见表7。②专用质量浓度促进剂处理下灌木幼苗生长指标结果。因子分析结果显示,按照方差贡献率大于80%的原则,提取前3个因子。其因子载荷矩阵及因子模型如表8。根据表8结果可以看出:因子 F_1 在地径 x_2 ,地上鲜质量 x_4 ,地上干质量 x_7 ,地下干质量 x_9 上的载荷量较大,主要反映了植株干质量情况,可视为“植株干质量”因子; F_2 在叶片鲜质量 x_5 ,地下鲜质量 x_6 和叶片干质量 x_8 上载荷量较大,主要反映了植株的叶片生长情况,可视为“叶片生长情况”因子; F_3 在株高 x_1 和主根长 x_3 上的载荷量大,反映了植株的形态,可视为“植株形态”因子。各处理植株的综合得分结果见表9。③基于对灌木幼苗前90d生长期影响的植物生长促进剂质量浓度评分结果。按权重紫穗槐40%,胡枝子30%,荆条30%计算通用质量浓度评分结果,评分方式为用因子得分排名数除以总个数。所得通用及专用质量浓度处理下幼苗后期生长情况评分如表10所示。

2.2.3 基于对灌木幼苗生长影响的植物生长促进剂质量浓度筛选结果 对30d生长期、90d生长期的生长情况评分的结果进行汇总。为建立以灌木为主的灌草群落,应首先保证灌木种子的出苗率、存活率及前期生长高度,再次考虑灌木幼苗后期生长状况。因此,设置前期评分排名权重70%,后期评分排名权重30%。以此做排名评分(排名除以总名数,评分越小越好)。综合发芽及播种试验的所有结果分析,由表12可知:最优通用质量浓度为萘乙酸 10^{-8} mg·L⁻¹;最优专用质量浓度为紫穗槐-复硝酚钠6 mg·L⁻¹,胡枝子-赤霉素160 mg·L⁻¹,荆条-赤霉素100 mg·L⁻¹。

3 讨论

不同种类和质量浓度的植物生长促进剂对不同种类的灌木种子发芽势、发芽时间和幼苗生长的影响不一。促进剂一般可提高种子发芽势,使灌木种子在短时间内尽可能多地发芽,在一定程度上提高了灌木种子的竞争力。而促进剂对发芽高峰和发芽持续时间,不同灌木种影响不一,可根据试验结果指导喷

表3 通用质量浓度促进剂处理下灌木幼苗生长指标平均结果

Table 3 Average results of growth indices of seedlings in treatment of general concentrations

处理/(mg·L ⁻¹)	出苗率/%	成活率/%	高度/cm
C-100	51.6	32.4	7.4
N-10 ⁻⁸	40.8	22.0	9.4
F-6	55.6	21.6	8.6
清水	43.6	19.6	7.9

说明:按权重紫穗槐40%,胡枝子30%,荆条30%计算。
C. 赤霉素, N. 萘乙酸, F. 复硝酚钠。

表4 专用质量浓度促进剂处理下灌木幼苗生长指标平均结果

Table 4 Average results of growth indices of seedlings in treatment of special concentrations

灌木	处理/(mg·L ⁻¹)	出苗率/%	成活率/%	高度/cm
紫穗槐	C-Z 200	36.0	8.0	9.1
	F-Z 6	52.0	24.0	10.8
	N-Z 10 ⁻⁸	36.0	16.0	10.4
	清水-Z	52.0	28.0	8.7
胡枝子	C-H 160	60.0	36.0	8.7
	F-H 4	48.0	36.0	8.2
荆条	清水-H	24.0	8.0	8.3
	C-J 100	48.0	28.0	7.7
	N-J 10 ⁻⁶	44.0	12.0	8.3
	F-J 8	48.0	28.0	6.0
	清水-J	52.0	20.0	7.0

说明:按权重紫穗槐40%,胡枝子30%,荆条30%计算。
C. 赤霉素, N. 萘乙酸, F. 复硝酚钠, Z. 紫穗槐, H. 胡枝子, J. 荆条。

播施工后的浇水时间的调整。

植物生长促进剂浸种后主要通过影响灌木种子内源生长调节物质的水平来促进发芽，每种植物对不同植物生长促进剂的种类和质量浓度的响应不同，需要通过试验来选择最佳的植物生长促进剂种类和适用质量浓度。本研究试验设置的质量浓度种类多且梯度小，将得出的发芽结果绘制了峰图来反映种子对植物生长促进剂质量浓度变化的响应，表现为低质量浓度促进发芽、高质量浓度抑制发芽。根据差异显著性结果，选出了促进灌木种子发芽的较优通用质量浓度和专用质量浓度。而后用 2 类质量浓度的促进剂浸种后，进行了播种试验，以观察促进剂浸种对灌木幼苗生长的影响。播种试验的结果分析中，考虑到喷播实际施工中的成本因素，浇水量、浇水频率可能达不到试验条件，因此，综合分析了幼苗前期和后期的生长情况，以幼苗 30 d 内和 90 d 内的生长情况结果对促进剂质量浓度进一步筛选，得出最优(既能促进种子发芽又能促进幼苗生长)的植物生长促进剂通用和专用种类及质量浓度。最终的评分结果综合考虑了幼苗前期和后期的生长情况，

表 5 基于对灌木幼苗 30 d 生长期影响结果的植物生长促进剂质量浓度评分结果

Table 5 Scores of plant growth accelerators' concentrations based on the average results of seedlings' growth indices of the first 30 days

类型	处理/ (mg·L ⁻¹)	出苗率 得分	成活率 得分	高度 得分	总评分
通用	C-100	2.0	1.0	4.0	2.4
	N-10 ⁻⁸	4.0	2.0	1.0	2.0
	F-6	1.0	3.0	2.0	2.2
专用	C-Z 200	2.0	4.0	3.0	3.2
	F-Z 6	1.0	2.0	1.0	1.4
	N-Z 10 ⁻⁸	2.0	3.0	2.0	2.4
	C-H 160	1.0	2.0	1.0	1.4
	F-H 4	2.0	1.0	3.0	2.0
	C-J 100	2.0	2.0	2.0	2.0
	N-J 10 ⁻⁶	4.0	4.0	1.0	2.8
	F-J 8	3.0	1.0	4.0	2.6

说明：按权重出苗率 20%，成活率 40%，高度 40% 计算。C. 赤霉素，N. 萘乙酸，F. 复硝酚钠，Z. 紫穗槐，H. 胡枝子，J. 荆条。

表 6 通用质量浓度处理下灌木幼苗生长指标因子载荷矩阵及因子模型

Table 6 Load-matrix and factor model of seedlings' growth indices in treatment of general concentrations

项目	因子	株高 x_1	地径 x_2	主根长 x_3	上鲜 x_4	叶鲜 x_5	下鲜 x_6	上干 x_7	叶干 x_8	下干 x_9
因子载荷矩阵	F_1	0.822	0.901		0.861	0.348	0.513	0.921	0.348	0.638
	F_2	0.505	0.248		0.461	0.931	0.518	0.274	0.928	0.299
	F_3		0.216	0.570	0.206		0.648	0.268	0.115	0.706
因子模型		$F_1=0.822x_1+0.901x_2+0.861x_4+0.348x_5+0.513x_6+0.921x_7+0.348x_8+0.638x_9$								
		$F_2=0.505x_1+0.248x_2+0.461x_4+0.931x_5+0.518x_6+0.274x_7+0.928x_8+0.299x_9$								
		$F_3=0.216x_2+0.570x_3+0.206x_4+0.648x_6+0.268x_7+0.115x_8+0.706x_9$								
方差贡献	公因子	方差贡献率/%				累计方差贡献率/%				
	F_1	44.3				44.3				
	F_2	29.9				74.2				
	F_3	15.9				90.1				
模型检验	$P=0.0109 < 0.05$ ，模型有意义									

表 7 通用质量浓度处理下灌木幼苗生长指标数据及因子得分排名

Table 7 Ranking of factor scores of seedlings' growth indices in treatment of general concentrations

处理/(mg·L ⁻¹)	排名	株高/cm	地径/mm	主根长/cm	上鲜/g	叶鲜/g	下鲜/g	上干/g	叶干/g	下干/g
C-Z 100	1	23.3	3.04	6.7	0.562	0.645	0.403	0.238	0.161	0.131
N-Z 10 ⁻⁸	2	25.2	2.82	2.2	0.549	0.563	0.251	0.236	0.127	0.091
N-H 10 ⁻⁸	3	16.5	1.47	1.8	0.319	0.744	0.360	0.102	0.169	0.083
F-H 6	4	16.4	1.27	2.3	0.204	0.507	0.077	0.057	0.124	0.019
F-Z 6	5	19.2	1.77	2.7	0.219	0.259	0.108	0.079	0.054	0.027
C-H 100	6	12.5	1.19	3.9	0.108	0.364	0.097	0.028	0.075	0.021
C-J 100	7	8.5	0.87	4.0	0.061	0.047	0.080	0.032	0.013	0.032
F-J 6	8	9.9	0.89	3.2	0.064	0.019	0.075	0.032	0.005	0.027

说明：C. 赤霉素，N. 萘乙酸，F. 复硝酚钠，Z. 紫穗槐，H. 胡枝子，J. 荆条。

表8 专用质量浓度处理下灌木幼苗生长指标因子载荷矩阵及因子模型

Table 8 Load-matrix and factor model of seedlings' growth indices in treatment of special concentrations

项目	因子	株高 x_1	地径 x_2	主根长 x_3	上鲜 x_4	叶鲜 x_5	下鲜 x_6	上干 x_7	叶干 x_8	下干 x_8	
因子载荷矩阵	F_1	0.569	0.782		0.733	0.473	0.639	0.813	0.389	0.764	
	F_2	0.418	0.357	-0.103	0.604	0.808	0.756	0.527	0.862	0.639	
	F_3	0.688	0.473	-0.718	0.309	0.339	0.113	0.240	0.321		
因子模型		$F_1=0.569x_1+0.782x_2+0.733x_4+0.473x_5+0.639x_6+0.813x_7+0.389x_8+0.764x_9$									
		$F_2=0.418x_1+0.357x_2-0.103x_3+0.604x_4+0.808x_5+0.756x_6+0.527x_7+0.862x_8+0.639x_9$									
		$F_3=0.688x_1+0.473x_2-0.718x_3+0.309x_4+0.339x_5+0.113x_6+0.240x_7+0.321x_8$									
项目	公因子	方差贡献率/%			累计方差贡献率/%						
方差贡献	F_1	39.0			39.0						
	F_2	37.0			76.0						
	F_3	17.8			93.8						
模型检验		$P=0.000\ 644<0.01$, 模型有意义									

表9 专用质量浓度处理下灌木幼苗生长指标数据及因子得分排名

Table 9 Ranking of factor scores of seedlings' growth indices in treatment of special concentrations

处理/(mg·L ⁻¹)	排名	株高/cm	地径/mm	主根长/cm	上鲜/g	叶鲜/g	下鲜/g	上干/g	叶干/g	下干/g
C-Z 200	1	35.8	3.87	3.5	1.527	2.138	1.222	0.708	0.471	0.486
F-H 4	2	22.8	2.03	2.3	0.732	1.515	0.776	0.261	0.419	0.207
N-Z 10 ⁻⁸	3	25.2	2.82	2.2	0.549	0.563	0.251	0.236	0.127	0.091
C-J 100	4	8.5	0.87	4.0	0.061	0.047	0.080	0.032	0.013	0.032
F-Z 6	5	19.2	1.77	2.7	0.219	0.259	0.108	0.079	0.054	0.027
C-H 160	6	17.2	1.24	2.3	0.203	0.587	0.109	0.053	0.117	0.022
N-J 10 ⁻⁶	7	6.5	0.90	4.0	0.051	0.040	0.073	0.028	0.012	0.032
F-J 8	8	6.1	0.89	6.2	0.044	0.068	0.081	0.024	0.017	0.031

说明: C. 赤霉素, N. 萘乙酸, F. 复硝酚钠, Z. 紫穗槐, H. 胡枝子, J. 荆条。

对将最优质量浓度促进剂浸种应用于实践有一定的指导意义。

本研究所用的植物生长促进剂浸种仅是促进灌木发芽和幼苗生长的一种方法,除此之外还可以采用热水浸种、延长浸种时间、浓硫酸浸种和机械破皮等多种方法,或者若干方法结合使用。例如:采用不同温度热水浸泡、浓硫酸浸种和液氮对胡枝子种子浸种后在室内进行发芽试验,结果表明:浓硫酸浸种 10 min 效果最好,发芽率达 69.4%^[13];用不同温度热水浸泡、浓硫酸浸泡、机械破皮等方法对胡枝子种子进行处理,发现机械破皮后用 60 °C 热水浸种效果最好^[14-15];低温和 GA₃ 结合处理能有效促进紫斑牡丹 *Paeonia suffruticosa* var. *papaveracea* 种子发芽和幼苗生长^[16]。因此,还需尝试结合其他方法进一步研究,例如结合层积、热水浸种、确定最佳浸种时长等^[17-19],以更好地提高灌木竞争力。

4 结论

植物生长促进剂对灌木种子发芽势有提高作用,能使灌木种在短期内尽可能多发芽,可增强灌木种子自身的发芽能力,提高灌木种子相对草本种子的竞争力。

对发芽高峰和发芽持续时间,不同灌木种影响不一,延长和缩短的范围一般在 2~3 d,考虑到工程

表10 基于对灌木幼苗 90 d 生长期影响的植物生长促进剂质量浓度评分结果

Table 10 Scores of plant growth accelerator's concentrations based on the average results of seedlings' growth indices of the first 90 days

类型	处理/(mg·L ⁻¹)	评分	类型	处理/(mg·L ⁻¹)	评分
通用	C-100	0.3	专用	C-H 160	0.8
通用	N-10 ⁻⁸	0.5	专用	F-H 4	0.3
通用	F-6	0.6	专用	C-J 100	0.5
专用	C-Z 200	0.1	专用	N-J 10 ⁻⁶	0.9
专用	F-Z 6	0.6	专用	F-J 8	1.0
专用	N-Z 10 ⁻⁸	0.4			

说明: C. 赤霉素, N. 萘乙酸, F. 复硝酚钠, Z. 紫穗槐, H. 胡枝子, J. 荆条。

表 11 基于对灌木幼苗生长影响的植物生长促进剂质量浓度评分结果

Table 11 Scores of plant growth accelerators' concentrations based on the average results of seedlings' growth indices

类型	处理/(mg·L ⁻¹)	前 30 d 评分	前 90 d 评分	总评分	排名
通用	C-100	2.2	0.6	0.77	2
	N-10 ⁻⁸	2.0	0.5	0.43	1
	F-6	2.4	0.3	0.80	3
	C-Z 200	3.2	0.1	0.80	3
	F-Z 6	1.4	0.6	0.53	1
专用	N-Z 10 ⁻⁸	2.4	0.4	0.67	2
	C-H 160	1.4	0.8	0.65	1
	F-H 4	2.0	0.3	0.85	2
	C-J 100	2.0	0.5	0.33	1
	N-J 10 ⁻⁶	2.8	0.9	0.90	3
	F-J 8	2.6	1.0	0.77	2

说明：按权重灌木幼苗前 30 d 生长指标评分结果 70%，前 90 d 生长指标评分结果 30% 计算。C. 赤霉素，N. 萘乙酸，F. 复硝酚钠，Z. 紫穗槐，H. 胡枝子，J. 荆条。

中的供水情况，若使用植物生长促进剂，则在维护紫穗槐、荆条过程中应该延长浇水日期，最短保证 8 d，维护胡枝子时可缩短浇水日期，最短保证 6 d。

结合灌木种子发芽试验结果和灌木幼苗生长情况结果，筛选出的最优促进剂种类及质量浓度如下：通用质量浓度促进剂筛选结果为萘乙酸-10⁻⁸ mg·L⁻¹；专用质量浓度促进剂筛选结果为紫穗槐-复硝酚钠 6 mg·L⁻¹，胡枝子-赤霉素 160 mg·L⁻¹，荆条-赤霉素 100 mg·L⁻¹。

5 参考文献

- [1] 邓辅唐, 晏雨鸿, 孙佩石, 等. 高速公路边坡 3 种植物恢复模式的生态效果评估[J]. 中国水土保持, 2007(4): 40 - 42.
DENG Futang, YAN Yuhong, SUN Peishi, *et al.* Evaluation on ecological effect of the three modes of vegetation rehabilitation conducted on freeway slopes [J]. *Soil Water Conserv China*, 2007(4): 40 - 42.
- [2] 李义强, 王英宇, 宋桂龙, 等. 厚层基材喷播技术在北方半干旱区岩石边坡植被恢复中的应用: 以京承高速公路(3 期)植被恢复工程为例[J]. 草原与草坪, 2012, 32(3): 58 - 64.
LI Yiqiang, WANG Yingyu, SONG Guilong, *et al.* Application of technique of thick-layer base material spraying technology on vegetation restoration of rock slop in semiarid area of north China: a case of Jingcheng Expressway (the third phase) [J]. *Grassland Turf*, 2012, 32(3): 58 - 64.
- [3] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 65 - 120.
- [4] BURNS R M, COGGINS C W. Sweet orange germination and growth aided by water and gibberellin seed soak [J]. *California Agric*, 1969, 23(12): 18 - 19.
- [5] LI Xiangnan, JIANG Haidong, LIU Fulai, *et al.* Induction of chilling tolerance in wheat during germination by pre-soaking seed with nitric oxide and gibberellin [J]. *Plant Growth Regul*, 2013, 71(1): 31 - 40.
- [6] 何中声, 刘金福, 洪伟, 等. 不同处理对格氏栲种子发芽的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 66 - 70.
HE Zhongsheng, LIU Jinfu, HONG Wei, *et al.* Effects of different treatments on seed germination of *Castanopsis kawakamii* [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, 34(2): 66 - 70.
- [7] 张雪崧, 张蓝艺, 孙庆元. 不同处理对紫穗槐种子活力的影响[J]. 大连工业大学学报, 2014, 33(6): 413 - 415.
ZHANG Xuesong, ZHANG Lanyi, SUN Qingyuan. The affection of different treatments on the seed vigor of *Amropha fruticosa* L. [J]. *J Dalian Polyt Univ*, 2014, 33(6): 413 - 415.
- [8] 李义强, 宋桂龙, 郭宇. 水浸与赤霉素处理对荆条种子萌发影响研究[J]. 种子, 2012, 31(3): 10 - 13.
LI Yiqiang, SONG Guilong, GUO Yu. Study on effect to water immersion and gibberellin treatments on seed germina-

- tion of *Vitex negundo* var. *heterophylla* [J]. *Seed*, 2012, **31**(3): 10 – 13.
- [9] 孙睿, 邵红, 张丽敏, 等. 萘乙酸对哈密瓜种子萌发的影响[J]. 农村经济与科技, 2013, **24**(7): 194 – 197.
SUN Rui, SHAO Hong, ZHANG Limin, *et al.* Effect of NAA on germination of melon seeds [J]. *J Rural Econ Sci Technol*, 2013, **24**(7): 194 – 197.
- [10] 李威, 周青平, 颜红波. 萘乙酸对燕麦种子胚根长、胚芽长和发芽率的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2010, **29**(12): 7 – 8.
LI Wei, ZHOU Qingping, YAN Hongbo. Effect of naphthalene acetic on the length of the radical and hypocotyls and seed germination rate in oats [J]. *Chin Qinghai J Anim Vet Sci*, 2010, **29**(12): 7 – 8.
- [11] 于彩莲, 刘波, 燕红, 等. 复硝酚钠及其组分对大豆种子萌发的影响[J]. 大豆科学, 2010, **29**(3): 440 – 443.
YU Cailian, LIU Bo, YAN Hong, *et al.* Effects of sodium nitrophenolate and its composition on germination of soybean seed [J]. *Soybean Sci*, 2010, **29**(3): 440 – 443.
- [12] 朱芹. 复硝酚钠浸种对重金属胁迫决明子萌发及幼苗生长的影响[J]. 嘉应学院学报, 2014, **32**(8): 72 – 77.
ZHU Qin. Effect of soaking with sodium nitrophenolate on seeding growth of *Cassia obtusifolia* L. under heavy metal stress [J]. *J Jiaying Univ*, 2014, **32**(8): 72 – 77.
- [13] 赵慧婷, 赵祥, 高新中, 等. 不同处理对达乌里胡枝子种子萌发效果的影响[J]. 中国草地学报, 2007, **29**(1): 117 – 120.
ZHAO Huiting, ZHAO Xiang, GAO Xinzong, *et al.* Effect of different treatments on germination of *Lespedeza davurica* seed [J]. *Chin J Grassland*, 2007, **29**(1): 117 – 120.
- [14] 拉旦, 欧阳克蕙, 王堃. 不同处理方法对美国截叶胡枝子种子发芽的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2006(8): 57 – 58.
LA Dan, OUYANG Kehui, WANG Kun. Effect of the different treatments on the germination rate of *Lespedeza davurica* [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2006(8): 57 – 58.
- [15] 于玲, 钟原, 王莹, 等. 低温和赤霉素对紫斑牡丹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37**(4): 120 – 126.
YU Ling, ZHONG Yuan, WANG Ying, *et al.* Effects of gibberellic acid and chilling treatments on seed germination and seedling growth of *Paeonia rockii* hybrids [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(4): 120 – 126.
- [16] 潘彬荣, 任镜羽, 赵光武. 浸种处理对甜玉米种子萌发及活力的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(1): 47 – 51.
PAN Binrong, REN Jingyu, ZHAO Guangwu. Germination and vigor of sweet corn seeds with seed soaking time [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(1): 47 – 51.
- [17] 李淑芳, 杨建华, 范志远, 等. 不同处理对美国山核桃种子发芽的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(3): 444 – 449.
LI Shufang, YANG Jianhua, FAN Zhiyuan, *et al.* Treatments for germination of *Carya illinoensis* seeds [J]. *J Zhejiang A & F University*, 2011, **28**(3): 444 – 449.
- [18] 杨秀莲, 郝其梅. 桂花种子休眠和萌发的初步研究[J]. 浙江农林大学学报, 2010, **27**(2): 272 – 276.
YANG Xiulian, HAO Qimei. Dormancy and germination of *Osmanthus fragrans* seeds [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2010, **27**(2): 272 – 276.