

外源激素对速生轻木种子萌发和幼苗生长的影响

李明义^{1,2}, 张佳振^{2,3}, 赵泽民⁴, 吕俊杰⁵, 李天良⁶, 曹雄江^{2,3}, 杨丽^{2,3},
李国珍^{2,3}, 赵高卷^{2*}, 陈亚军^{2,6}

(1. 云南大学 生态与环境学院, 昆明 650091; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园云南省森林生态系统稳定与全球变化重点实验室, 云南 勐腊 666303; 3. 普洱学院 生物与化学学院, 云南 普洱 665000; 4. 西南林业大学 林学院, 昆明 650224; 5. 云南农业大学, 昆明 650500; 6. 中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态系统研究站, 云南 元江 653300)

摘要: 轻木 (*Ochroma lagopus* Swartz) 因其生长快、生命周期短、木材密度最小和材质均匀等优良特性备受风电产业和航空工业的青睐, 但是, 轻木种子种皮坚硬、休眠期长、自然萌发率低以及幼苗异质性大等问题严重限制了其标准化育苗和规模化栽培。为提高轻木种子的萌发率、幼苗的均匀性及其生长特性, 该研究分别以轻木种子和幼苗为试验材料, 采用培养皿萌发法和盆栽控制试验, 探索不同浓度外源激素吲哚乙酸 (IAA)、6-苄腺嘌呤 (6-BA) 和赤霉素 (GA) 对轻木种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明: (1) GA 促进了种子萌发和胚芽生长, 而 IAA 和 6-BA 抑制了种子萌发、胚芽和胚根的生物量和长度 ($P < 0.05$), 且随浓度的增加, 抑制作用增强; (2) 相反, 喷施 GA、IAA 和 6-BA 促进了幼苗的生长, 且对地径的促进作用大于树高和根长, 并随浓度增加效果越显著 ($P < 0.05$); (3) 此外, GA 和 IAA 还显著促进了幼苗的地下生物量以及根冠比 ($P < 0.01$)。该研究揭示了 GA 通过打破种子休眠提高了种子的萌发, 而 GA、IAA 和 6-BA 不仅能促进幼苗的建成, 还提高了幼苗的根冠比, 这可能会改善幼苗的水分吸收能力和抗旱性, 研究结果为轻木育苗技术和栽培管理提供理论基础和实践意义。

关键词: 巴沙木, 植物激素, 速生树种, 引种栽培, 育苗技术, 根冠比

中图分类号: Q945.34 **文献标识码:** A **文章编号:**

Influence of exogenous hormones on seed germination and seedlings growth of fast-growing *Ochroma lagopus*

LI Mingyi^{1,2}, ZHANG Jiazhen^{2,3}, ZHAO Zemin⁴, LÜ Junjie⁵, LI Tianliang⁶, CAO Xiongjiang^{2,3},
YANG Li^{2,3}, LI Guozhen^{2,3}, ZHAO Gaojuan^{2*}, CHEN Yajun^{2,6}

(1. School of Ecology and Environmental, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Forest Ecosystem Stability and Global Change, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; 3. College of Biology and Chemistry, Pu'er University, Puer 665000, Yunnan, China; 4. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 5. Yunnan Agricultural University,

基金项目: 中国科学院院企合作项目; 云南省基础研究专项(202401AT070223); 中国科学院西双版纳热带植物园“十四五”规划项目(XTBG-1450101, XTBG-1450102)。

第一作者: 李明义(2000—), 硕士研究生, 主要从事轻木生理生态研究, (E-mail)limingyi@xtbg.ac.cn。

***通信作者:** 赵高卷, 博士, 主要从事热区树种筛选、群落构建及脆弱生态系统恢复研究, (E-mail)zhaogaojuan@xtbg.ac.cn。

Kunming 650500, China; 6. Yuanjiang Savanna Ecosystem Research Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang 653300, Yunnan, China)

Abstract: Balsa wood (*Ochroma lagopus* Swartz) is characterized by its fast growth, short life cycle, minimum wood density and uniform material texture, and widely used in the wind power industry and the aviation industry. However, challenges such as low natural seed germination rates due to hard seed coat and prolonged seed dormancy, as well as high seedling variability restricted severely standardized breeding and large-scale cultivation. In order to improve the seeds germination, seedlings homogeneity and growth, this study performed dish germination and pot control experiments to evaluate the effects of varying concentrations of indoleacetic acid (IAA), benayl aminopurine (6-BA), and gibberellin (GA) on seed germination and seedling growth for balsa. The results indicated that (1) GA promoted seed germination and embryo growth, while IAA and 6-BA inhibited seed germination, the biomass and length of embryo bud and embryo root ($P<0.05$), and the inhibitory effect increased with the increasing of concentration. (2) On the contrary, GA, IAA and 6-BA boosted the growth of seedlings, and the promoting effect on ground diameter was greater than that on the height and root length, and the effect enhanced with the increasing concentration ($P<0.05$). (3) In addition, GA and IAA also significantly increased the underground biomass and root-crown ratio of seedlings ($P<0.01$). This study concluded that GA enhanced seed germination by breaking seed dormancy, while GA, IAA and 6-BA not only facilitated the performance of seedlings but also increase the root-crown ratio, ultimately accelerating their water absorption capacity and drought resistance. These findings provided a theoretical basis and practical significance for the seedling raising technology and cultivation management of balsa wood.

Key words: balsa wood, plant hormone, fast-growing species, introduction and cultivation, breeding techniques, root-crown ratio

种子萌发和幼苗建成在植物更新过程中扮演极其重要的角色,是植物生活史中最为敏感且关键的阶段,不仅受到水分、温度、氧气和光等外界环境因子的影响,还受到植物内源激素的精细调控(赵高卷等, 2016; 玉苏甫·阿不力提甫和曾雪玲, 2023)。植物内源激素是指植物自身合成的对植物生长或者发育有调控作用的有机物质(Ahmad et al., 2025; Sun et al., 2025)。根据植物内源激素的化学结构,目前利用人工合成的相似物质被称为外源植物激素或植物生长调节剂,广泛应用于农业生产中,用以打破种子休眠、促进农作物增产、优化品质和提高抗逆性等方面(马秀杰, 2011; 蔡鑫等, 2024)。轻木(*Ochroma lagopus* Swartz)作为一种重要的热带经济树种,具备生长快、生命周期短以及木材密度最低等优良特性(Fletcher, 1951; Da Silva & Kyriakides, 2007)。然而,轻木种子存在种皮坚硬、休眠期长、自然萌发率低以及幼苗变异性大等问题,这些难题长期制约着轻木的标准化育苗和规模化栽培(朱光斌, 1965; Samuel et al., 2015; Edwin et al., 2017; 成统等, 2023)。因此,研究植物外源激素对轻木种子萌发和幼苗生长的影响,具有重要的现实意义和应用价值。

大量研究表明,植物生长调节剂吲哚丁酸(IAA)、赤霉素(GA)和 6-苄腺嘌呤(6-BA)均有促进种子萌发、细胞分离和茎秆生长的功能(Chen & Chang, 1972; 熊宁旺等, 2024; Sajeev et al., 2024)。其中,吲哚乙酸(亦称生长素),能够促进植物枝条、芽和幼苗顶端芽的形成(陈文龙等, 2019)。赤霉素主要分布在幼根、叶片和嫩叶,能够调控种子休眠,加速种子发芽及茎秆伸长(何军等, 2013; Huang et al., 2019)。此外,赤霉素还能在干旱条件下提升种子体内的丝氨酸、色氨酸及游离脯氨酸等的含量,缓解干旱对种子萌发及幼苗

生长的负面效应（陈志飞，2016）。6-苄腺嘌呤（又名细胞分裂素），主要在植物根部产生和合成，是一类促进胞质分裂、组织分化、细胞生长和发育的植物激素，并与生长素协同调控植物生理过程（刘文婷，2021）。最新研究发现，在萌发早期，种子中生长素、赤霉素、细胞分裂素和乙烯的含量普遍增加，而脱落酸和其他抑制剂含量下降（苏俊宇等，2024）。值得注意的是，激素的促进和/或抑制作用还受外界环境条件、植物类型以及激素浓度等因素的影响。此外，目前有关外源激素对植物种子萌发和幼苗生长的研究主要集中在一些农作物和生长缓慢的树种（袁莲珍等，2020；苏俊宇等，2024），对速生树种如轻木的相关研究鲜见报道。

轻木，又称巴沙木，是木棉科轻木属常绿乔木，原产于南美洲的赤道热带地区（Borrega et al., 2015；邹寿青等，2019）。由于其生长速度快、木材密度低且材质均匀等特性，被广泛应用于风力发电产业和航空工业（Miyajima et al., 2018；高峰，2022）。我国轻木原材料完全依赖进口（高峰，2022），随着轻木需求量持续攀升以及中外贸易的不确定性，风电产业和航空工业的轻木原材料供应随时会面临“卡脖子”风险（梁明月等，2022）。尽管轻木已在我国台湾、广东、福建、海南和云南引种成功，但受台风和冬季低温的限制，未能在台湾、广东、福建和海南一带推广种植，仅在云南西双版纳实现小规模种植（李文钰等，2025）。但是，在轻木育苗和种植过程中，我们发现种子种皮坚硬、自然萌发率低以及幼苗变异性大等问题，限制了轻木的标准化育苗和规模化栽培进程（邹寿青等，2019）。为了破解上述难题，前期研究通过温水、硫酸处理、pH 调节、氯化汞和椰子水等浸泡种子，并用生根粉、微生物菌剂和水溶肥等处理幼苗，取得了一定成效（邹寿青等，2019；梁明月等，2022），但是，外源激素能否通过打破轻木种子休眠并实现种子萌发和幼苗生长的具体影响机制尚不明确。

因此，本研究以引种轻木为材料，采用种子培养皿萌发法和幼苗盆栽控制方法，通过比较不同浓度吲哚乙酸（IAA）、6-苄腺嘌呤（6-BA）和赤霉素（GA）对轻木种子萌发和幼苗生长的影响。拟探讨以下问题：（1）不同外源激素对轻木种子萌发和幼苗生长的影响是否相同；（2）最有利于种子萌发和幼苗生长的浓度？研究旨在探索轻木种子萌发和幼苗生长的最优激素类型及处理浓度，以期为轻木的育苗和栽培管理提供理论基础和实践意义。

1. 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园（XTBG，21°54'N，101°46'E，580 m a.s.l.）。夏季受印度洋西南季风和太平洋东南气流的影响，造成了高温多雨、干湿季节分明的气候特点。旱季从 11 月到翌年 4 月，雨季从 5 月至 10 月，平均年降水量约 1 560 mm，近 80% 的降水量集中在雨季。年平均气温 21.7 °C，最冷月份（12 月）平均气温 15.9 °C，最热月份（6 月）平均气温 25.7 °C。总日照时数为 1 878.5~2 241.0 h，水热条件充沛，风速小，全年无霜，已被证实为我国唯一可以大面积种植轻木的区域（Liu et al, 2024；李文钰等，2025）。

1.2 试验材料收集和激素试剂准备

供试轻木种子采集于中国科学院西双版纳热带植物园，成年母树引种厄瓜多尔。轻木花期为 3—4 月，果实成熟于 6—7 月，果实成熟后，果皮初裂，要及时采收，否则开裂后种子会随棉毛飞散。果实采收后及时晾晒，取出带种子的棉絮，放入大瓦缸中，用弹棉絮的工具将种子与棉絮分离，取得纯净种子，种子净度 90% 左右，千粒重 6.32~8.62 g。挑选大小一致、颜色和成熟度相似的种子备用。

此外，本研究选择吲哚乙酸（四川新兰月生物科技有限公司）、6-苄腺嘌呤（河南比赛尔农业科技有限公司）和赤霉素（四川润尔科技有限公司）3 种外源激素，每个激素设置 3

个浓度梯度（低浓度、中浓度和高浓度），将激素原液按照比例加入无菌蒸馏水配制而成。其中以规定的标准浓度为中浓度，即激素生产商的参考浓度，低浓度设置为中浓度的一半，而高浓度设置为中浓度的 2 倍（廖建良和姜莉，2023），具体激素类型和浓度处理如表 1。

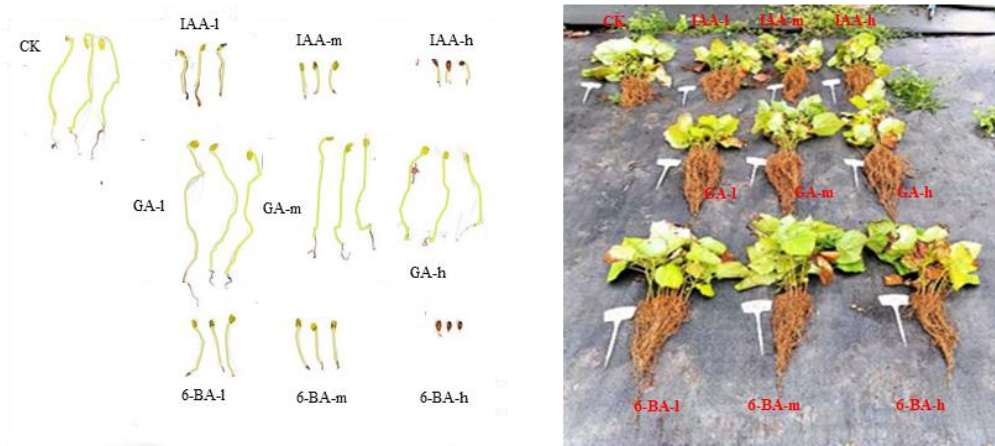
表 1 外源激素的处理浓度

Table 1 The treatment concentrations of exogenous hormones			
外源激素	低浓度	中浓度	高浓度
Exogenous hormones	Low concentration	Medium concentration	High concentration
	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)
IAA	2.5	5	10
GA	10	20	40
6-BA	1	2	4

1.3 轻木种子萌发和幼苗生长实验设计及指标测定

种子萌发采用培养皿恒温箱法。每个培养皿放 2 张滤纸，将选好的种子随机放入培养皿中，每个培养皿放种子 50 粒，每个浓度设置 5 个重复，分别加入等量的 IAA、6-BA 和 GA 溶液，保证培养皿内种子潮湿，以加入等量无菌蒸馏水为对照，贴好标签。然后将培养皿放入人工气候箱（MGC-300H，上海一恒科学仪器有限公司），温度设置为 30 °C，相对湿度为 60%，光照为 3 000 Lux，光照时间和不光照时间分别设为 12 h。每天观察和记录种子的萌发情况，待种子萌发完成以后，统计种子的萌发率，然后用游标卡尺分别测量胚芽和胚根的长度，用电子天平测定其鲜生物量，置于 100 °C 烘箱 24 h 后测定其干重。

同时，在温室进行盆栽控制试验。将腐殖土、红土和珍珠岩按照 1:1:0.5 混合均匀装入花盆（30 cm x 40 cm），每个花盆装入等量的土。然后放入 2~3 粒种子，播种深度 0.3~0.5 cm，保持正常管理，种子萌发后移除多余幼苗，每个花盆保留 1 株大小一致的健康苗木。待幼苗生长稳定后，将涨势和大小一致的幼苗随机分组，每 3 天喷施 1 次激素，喷施量以叶片湿润而不滴水为准，确保每株喷施量相等，每个处理设置 10 个重复，以喷施等量无菌蒸馏水为对照（苏俊宇等，2024）。试验过程中维持正常的除草和浇水管理工作，试验持续 1 个月。试验完成后，用卷尺测量轻木的树高和根长，游标卡尺测地径，再将整株幼苗采收洗净后分别测其地上生物量和地下生物量的鲜重，置于 100 °C 烘箱 24 h 后测量其干重，每个处理设置 10 个重复。种子萌发和幼苗生长示意图（图 1）。



CK. 对照；IAA. 吲哚乙酸；GA. 赤霉素；6-BA. 6-苄腺嘌呤；l. 低浓度；m. 中浓度；h. 高浓度。下同。

CK control; IAA indoleacetic acid; GA gibberellin; 6-BA 6-benzaminopine; l low concentration;

m medium concentration; **h** high concentration. The same below.

图 1 轻木种子萌发（左图）和幼苗生长（右图）示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seed germination (left) and seedling growth (right) experiment

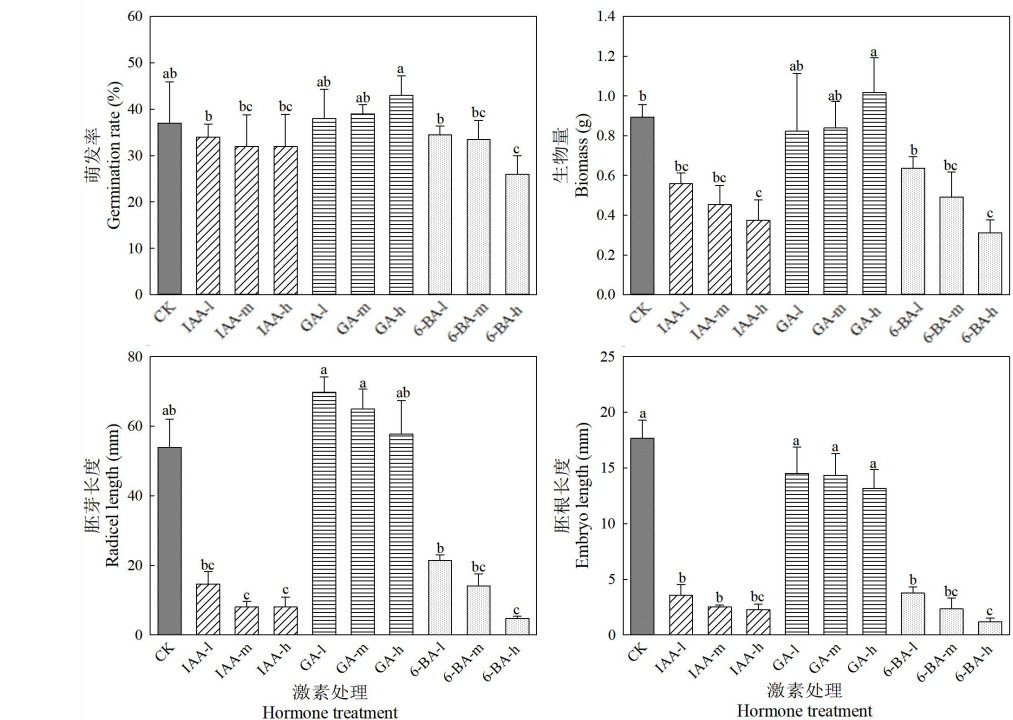
1.4 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 22.0 和 Sigmaplot 14 软件对数据进行统计分析。不同激素不同浓度对轻木种子萌发和幼苗生长的影响采用单因素方差分析（One-Way ANOVA），最小显著性差异（LSD）法进行多重比较。方差分析前采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态分布检验（ $P>0.05$ ）。若数据不服从正态分布（ $P<0.05$ ），则采用非参数检验方法（Mann-Whitney U）进行显著性检验。所有图都用 Sigmaplot 14 进行绘制。

2. 结果与分析

2.1 外源激素 IAA、GA 和 6-BA 对轻木种子萌发的影响

与对照相比，GA 有促进了轻木种子萌发率、生物量和胚芽长度的趋势，萌发率和生物量随浓度增加，促进作用增强，而胚芽长度随浓度增加而下降，但差异不显著，表明 GA 通过打破种子休眠而促进萌发。相反，GA 抑制了胚根的长度，随浓度增加，抑制作用越明显，表明胚根对外源激素的响应更为敏感。此外，IAA 和 6-BA 显著抑制了种子萌发率、生物量、胚芽长度和胚根长度，且随浓度增加，抑制作用越明显（ $P<0.05$ ），特别是胚芽和胚根长度（ $P<0.01$ ）（图 2），证实并非所有外源激素均有促进种子萌发的功能，且对不同浓度的响应也存在差异。



不同小写字母表示不同处理之间的差异显著，下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments, the same below.

图 2 不同激素和浓度处理对轻木种子萌发的影响

Fig. 2 Effects of different hormone and concentration treatments on seed germination rates

2.2 喷施激素 IAA、GA 和 6-BA 对轻木幼苗生长的影响

从轻木幼苗的形态指标来看，喷施外源激素有促进幼苗生长（高度、地径和根长）的效果，且随浓度增加效果越显著，表明喷施外源激素能提高幼苗的生长情况。从幼苗高度来看，只有高浓度 GA 达到显著水平($P<0.05$)，从根长来看，只有高浓度 GA 达到显著水平($P<0.05$)。激素对幼苗地径的促进作用显著大于树高和根长，除了低浓度 6-BA 和中浓度 GA，其他激素及处理的地径均显著大于对照组的地径 ($P<0.01$)（图 3），表明轻木通过叶片吸收激素后，通过茎秆向下运输到树干，促进轻木径向生长。

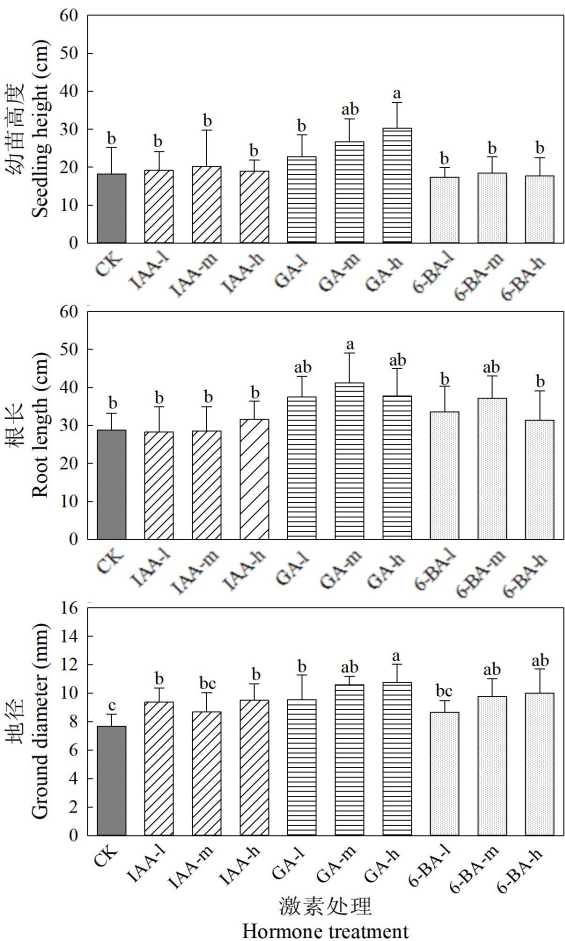


图 3 不同激素和浓度处理对轻木幼苗形态指标的影响

Fig. 3 Effects of different hormone and concentration treatments on the morphological traits of balsa seedlings

从喷施激素对轻木生物量的影响来看，对地上生物量的影响呈不规律变化趋势，仅中浓度 GA、中浓度 6-BA 和高浓度 6-BA 有促进作用，其他处理均为抑制作用，但所有处理均未达到显著性水平，表明轻木幼苗生物量不仅受外源激素的影响。但是，喷施激素促进了地下生物量的积累，特别是高浓度 IAA 以及不同浓度的 GA，其对地下生物量的促进作用达到了显著水平 ($P<0.05$)。最重要的是，喷施激素 IAA 和 GA 极显著提高了轻木的根冠比 ($P<0.01$)，而喷施 6-BA 却没有显著差异（图 4），表明外源激素通过叶片和树干运输到根部，促进根生物量的积累，这对其水分吸收和抗旱性具有重要意义。

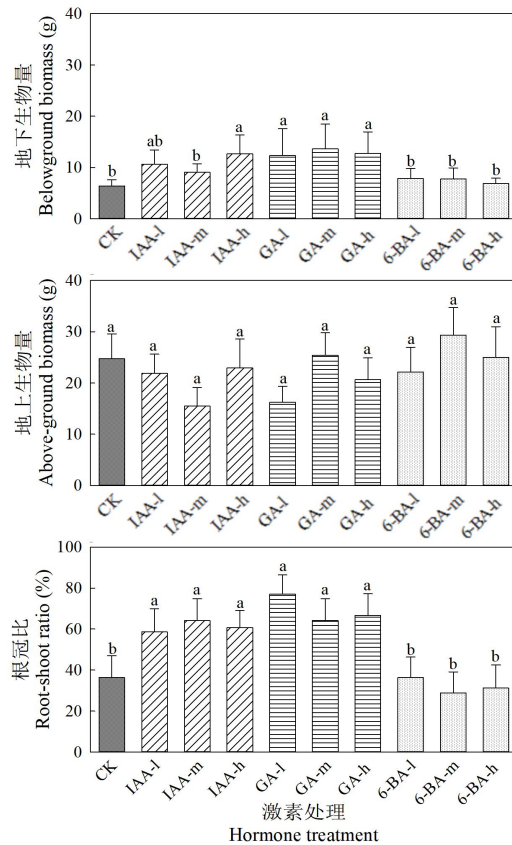


图 4 不同激素和浓度处理对轻木幼苗生物量的影响

Fig. 4 Effects of different hormone and concentration treatments on the biomass allocation of balsa wood seedlings

3.讨论与结论

3.1 外源激素调控轻木种子的萌发

种子萌发是植物生活史过程中最为危险的阶段，是从土壤种子库到幼苗的转换，在植物更新和标准化育苗进程中扮演重要角色，受植物激素的调控（Carrera-Castano et al., 2020；宋松泉等，2024）。在种子成熟过程中，植物内源激素正向调节营养物质的贮藏积累，抑制胚生长，诱导耐干燥和初级休眠特性（曾芳等，2023）。本研究表明 GA 促进了种子萌发和胚芽生长，而 IAA 和 6-BA 抑制了种子萌发、胚芽和胚根的生物量和长度，且随浓度的增加，促进或者抑制作用增强。其他研究也发现 GA 能打破种子休眠，进而促进种子萌发（廖建良和姜莉，2023；苏俊宇等，2024），外源 GA 还会提高种子发芽初期的 α -淀粉酶活性， α -淀粉酶水解淀粉为发芽提供能量，进而加快咖啡黄葵（*Abelmoschus esculentus*）和水稻种子的萌发（Sugimoto et al., 1998；Kaneko et al., 2002；李燕等，2017）。相反，大部分研究则表明 IAA 和 6-BA 处理均有打破种子休眠、促进种子萌发的作用，可提高细胞分离度和幼苗整齐度，但随激素浓度的增加，促进效果呈下降趋势（Statwick, 2016；熊宁旺等，2024；Sajeev et al., 2024）。其他研究还表明 6-BA 能促进轻木组织培养愈伤组织的诱导、不定芽的增殖和生根过程（李翠新等，2020）。本研究产生与其他研究结果不同的原因可能是：（1）轻木种子种皮坚硬，同时具有休眠期，所以需要更高浓度的 GA 打破其休眠，促进其萌发；（2）轻木本身生长快，果实和种子中积累的内源激素可能会更多，喷施外源激素 IAA 和 6-BA 会使浓度更高，协同抑制种子的萌发；（3）激素对种子萌发的影响因树种、激素种类和浓度

而异,本研究激素浓度是参考生产商的标准浓度,该浓度主要用于常规树种和农作物,缺乏对速生树种的验证;(4)轻木种子自然萌发率只有30%左右,本研究GA处理也只有50%左右,但其他研究通过55℃水浴处理、硫酸处理和氯化汞处理,种子萌发率提升到80%以上(Chen & Chang, 1972; 成统等, 2023),由此可以推测,轻木种子的休眠主要属于物理休眠,而非生理休眠,相关研究值得进一步验证。

3.2 外源激素对轻木幼苗生长的影响

幼苗生长是植物生活史中最为敏感和重要的阶段,是实现幼苗到幼树的过渡,为幼树的生长提供良好基础,受环境因子、土壤条件和植物激素的综合调控。植物内源激素在植物的生长、发育、繁殖以及应对环境胁迫等方面起着至关重要的作用(段娜等, 2015; 田红红等, 2015)。本研究表明喷施GA、IAA和6-BA促进了幼苗的生长,且对地径的促进作用显著大于树高,并随浓度增加而增强,这可能与轻木速生特性有关,轻木生长快可能需要更多的激素调控,该结果与其他研究相似,GA、IAA和6-BA处理显著促进幼苗的株高、茎粗和地下部分鲜重等形态指标(焦德志等, 2010; 张奥等, 2024)。激素对地径的促进作用显著大于树高,可能与植物体内同化物质的合成和运输有关。轻木将更多的物质分配到根和茎秆,这不仅提高了根的吸水能力,还增强了轻木的径向生长,这为培养轻木大径材提供一定的参考和依据。但是,其他研究则表明激素在低浓度时促进生长,高浓度时抑制生长,甚至使植物死亡(杨荣超等, 2012; Statwick, 2016; 苏俊宇等, 2024)。此外,本研究还发现喷施GA和IAA还显著促进了幼苗的地下生物量以及根冠比,证实了GA和IAA有提高轻木抗旱性和适应性的趋势。相关研究也表明激素对于干旱环境下种子萌发及幼苗生长有重要的缓解效应(刘文婷, 2021)。相反,其他研究则表明GA和IAA通过改善植物地上部分生长,抑制地下部分生长,进而降低了幼苗的根冠比(杨晓平等, 2019)。轻木属于先锋速生树种,确实应该优先将同化物质分配到地上部分,较少的物质分配到根部和防御系统。本研究喷施GA和IAA后提高根生物量和根冠比,正好弥补了轻木防御功能低下的缺陷。喷施激素不仅促进生长,还提高其抗逆能力和适应性,这为轻木大面积栽培提供了一定的理论基础和实践意义。最重要的是,本研究IAA和6-BA对种子萌发和幼苗生长的结果不一致,抑制种子萌发却促进幼苗生长,可能的原因是:(1)轻木种子和幼苗对外源激素的响应存在差异;(2)轻木种子的休眠可能是物理休眠,而非生理休眠,GA具有打破休眠的功能,而高浓度IAA和6-BA抑制了种子的萌发;(3)轻木幼苗生长快,需要更多的激素来调控生长,所以喷施外源激素会显著促进其生长。

3.3 外源激素在速生轻木产业中的应用及展望

我国风电机组和叶片生产分别约占全球市场的60%和64%,填充轻木原材料完全依赖进口,为了避免“卡脖子”问题,轻木国产化迫在眉睫(李文钰等, 2025)。“适地适树”和“良种良法”是轻木产业发展中最有效的措施,研究已证实西双版纳是轻木大面积种植的唯一区域。尽管目前其扦插、嫁接和组培技术已获得一定成效,但扦插和嫁接偏冠严重,枝下高太低。此外,由于轻木的叶片和枝干有绒毛,组培无性繁殖困难,目前组培材料一直采用种子,仍不能筛选出优良性状和无性系,且时间长(李翠新等, 2020)。因此,种子繁殖仍然是轻木的主要繁育方式(邹寿青等, 2019),提高种子萌发率和幼苗一致性成为主要目标。本研究揭示了GA能提高种子的萌发率,GA、IAA和6-BA不仅促进幼苗生长,还提高了幼苗的根生物量和根冠比,增强水分吸收能力,这将对轻木的抗逆性研究产生一定的启示。此外,从IAA和6-BA抑制种子萌发来看,可以推测轻木种子可能属于物理休眠,而非生理休眠,这与轻木坚硬的种皮特性相吻合。因此,本研究应该结合打破轻木种子物理休眠的措施(温水、硫酸和氯化汞处理等),协同探索提升轻木种子萌发率、整齐度以及幼苗建成的最有效方法。此外,将来的研究还应集中在轻木种子和幼苗内源激素的动态、外源激素对幼苗生理、木材质量以及营养—生殖生长权衡的调控等方面,进一步优化轻木国产化进程。

参考文献

- Ahmad I, Minkina T, Mandzhieva S, et al., 2025. Effect of novel plant growth regulator and nitrogen fertilization on endogenous hormones content and its relation with grain filling in winter wheat [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, (2025): 1-18.
- Borrega M, Ahvenainen P, Serimaa R, et al., 2015. Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood [J]. *Wood Science and Technology*, 49(2): 403-420.
- Cai X, Chen H, Wang H R, et al., 2024. Effects of foliar spraying plant growth regulator on growth and physiological indexes of wheat seedlings under saline-alkali stress [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 41(6): 1304-1312. [蔡鑫, 陈虹, 汪灏然, 等, 2024. 叶面喷施植物生长调节剂对盐碱胁迫下小麦幼苗生长及生理指标的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 41(6): 1304-1312.]
- Carrera-Castaño G, Calleja-Cabrera J, Pernas M, et al., 2020. An updated overview on the regulation of seed germination [J]. *Plants*, 9: 703.
- Cheng T, Bai X, Qian R, et al., 2023. Exploration the seed germination conditions, low temperature tolerance and suitable pH value for *ochroma lagopus* swartz growth [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 44(4): 88-96. [成统, 白雪, 钱容, 等, 2023. 轻木萌发条件、低温耐受性及最适 pH 值条件探索 [J]. *四川林业科技*, 44(4): 88-96]
- Chen SSC & Chang JLL, 1972. Does gibberellic acid stimulate seed germination via amylase synthesis? [J]. *Plant Physiology*, 49(3): 441-442.
- Chen W L, Wang X, Zhao CL, et al., 2019. Effects of exogenous hormones on seed germination and seedling growth of eggplant [J]. *Horticulture & Seed*, 39(8): 3-6. [陈文龙, 王晓, 赵春丽, 等, 2019. 外源激素对茄子种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *园艺与种苗*, 39(08): 3-6.]
- Chen Z F, 2016. Study on the alleviating effect of exogenous plant hormones on the growth of *Tall Fescue* under drought stress [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University. [陈志飞, 2016. 外源植物激素对于旱胁迫下高羊茅生长的缓解效应研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Da Silva A & Kyriakides S, 2007. Compressive response and failure of balsa wood [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 44: 8685-8717.
- Duan N, Jia Y K, Xu J, et al, 2015. Research progress on plant endogenous hormones [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(2): 159-165. [段娜, 贾玉奎, 徐军, 等, 2015. 植物内源激素研究进展 [J]. *中国农学通报*, 31(2): 159-165.]
- Edwin J R, Luis G F, Mercedes C P, et al., 2017. Germination and growth of *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. in Ecuador [J]. *Scientia Agropecuaria*, 8(3): 243-250.
- Fletcher M I, 1951. Balsa—Production and utilization [J]. *Economic Botany*, 5: 107-125.
- Gao F, 2022. Analysis of operation and maintenance of wind turbine [J]. *Electronic Technique*, 51(1): 230-231. [高峰, 2022. 风力发电机组的运行维护分析 [J]. *电子技术*, 51(1): 230-231.]
- He J, Pu J, Wang W L, et al., 2013. Effects of different priming treatments on germination and seedling drought-resistances of *Astragalus membranaceus* [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 31(5): 233-237. [何军, 浦俊, 王渭玲, 等, 2013. 引发对黄芪种子萌发及幼苗耐旱性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 31(5): 233-237.]

- Huang B, Chen Y E, Zhao Y Q, et al., 2019. Exogenous melatonin alleviates oxidative damages and protects photosystem II in maize seedlings under drought stress [J]. *Front Plant Science*, 10:67.
- Jiao D Z, Gong M, Pan X Y, et al., 2010. Effects of various phytohormones on germination and growth of *Leymus chinensis* seeds [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(3): 1188-1190. [焦德志, 龚孟, 潘学岩, 等, 2010. 不同植物激素对羊草种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *安徽农业科学*, 38(3): 1188-1190.]
- Kaneko M, Itoh H, Ueguchi-Tanaka M, et al., 2002. The α -amylase induction in endosperm during rice seed germination is caused by gibberellin synthesized in epithelium [J]. *Plant Physiology*, 128(4): 1264-1270.
- Liang M Y, Liu C A, Hua S, et al., 2022. Comparison of *Ochroma lagopus* Swartz growth and soil ecological effects under different cultivation modes [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 43(1): 12-18. [梁明月, 刘长安, 华帅, 等, 2022. 不同栽培模式下轻木生长情况与土壤生态效应比较 [J]. *四川林业科技*, 43(1): 12-18.]
- Liao J L & Jiang L, 2023. Effects of different phytormone and plant growth regulators on seed germination and growth of *Vitex negundo* [J]. *Journal of Huizhou University*, 43(3): 40-45. [廖建良和姜莉, 2023. 植物激素和植物生长调节剂对黄荆种子萌发及生长的影响 [J]. *惠州学院学报*, 43(3): 40-45.]
- Li C X, He D, Meng D Z, 2020. Research on plant tissue culture of *Ochroma lagopus* [J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science)*, 38(3): 253-256. [李翠新, 何德, 孟德中, 2020. 轻木植物组织培养研究 [J]. *湖北民族大学学报(自然科学版)*, 38(3): 253-256.]
- Li M, 2025. Effects of exogenous phytohormone on tomato seed germination and seedling root growth under salt stress [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 31(4): 13-19. [李苗, 2025. 盐胁迫下外源激素对番茄种子萌发和幼苗根系生长的影响 [J]. *天津农业科学*, 31(4): 13-19.]
- Liu C A, Liang M Y, Zhang J L, et al., 2024. Improved soil moisture, nutrients, and economic benefits using plastic mulchs in balsa-based agroforestry systems [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 31(10): 15733-15745.
- Liu W T, 2021. Effects of three exogenous plant growth regulators on drought resistance of *Festuca arundinacea* in seedling stage [D]. Lanzhou University. [刘文婷, 2021. 3 种外源植物激素对苇状羊茅苗期耐旱性的影响 [D]. 兰州大学.]
- Li W Y, Li H H, Zhao G J, et al., 2025. Exploration on growth characteristics and influencing factors of *Ochroma lagopus* artificial forest in Xishuangbanna [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, (2025): 1-9. [李文钰, 李红花, 赵高卷, 等, 2025. 西双版纳轻木人工林的生长特性及其影响因子探析 [J]. *热带亚热带植物学报*, 26 (2): 1-9.]
- Li Y, Ru J, Ji Y, 2017. Study on the germination of *Abelmoschus esculentus* seeds and the relationship between germination and α -amylase [J]. *Seed*, 36(3): 80-83. [李燕, 汝姣, 姬越, 2017. GA 处理下咖啡黄葵种子萌发及与 α -淀粉酶相关性研究 [J]. *种子*, 36(3): 80-83.]
- Ma X J, 2011. Study on the physiological response of external plant growth regulators to low temperature and dry early stress of *Perennial ryegrass* [D]. Beijing: Beijing Forestry University. [马秀杰, 2011. 外施植物生长调节剂对多年生黑麦草低温和干旱胁迫生理响应研究 [D]. 北京: 北京林业大学.]
- Mei S, Zhang M H, YE J W, et al., 2023. Auxin contributes to jasmonate-mediated regulation of abscisic acid signaling during seed germination in *Arabidopsis Free* [J]. *The Plant Cell*, 35(3): 1110-1133.

- Miyajima R H, Barreto V C S, De Oliveira P A, et al., 2018. Risk analysis of the economic benefits of *Ochroma pyramidale*: A case study of forest planting in Brazil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 8(7): 444-453.
- Sajeev N, Koornneef M, Bentsink L, 2024. A commitment for life: decades of unraveling the molecular mechanisms behind seed dormancy and germination [J]. Plant Cell, 1-19.
- Samuel I L T, Ivar V, Francisco R D, et al., 2015. Natural Regeneration after Long-Term Bracken Fern Control with Balsa (*Ochroma pyramidale*) in the Neotropics [J]. Forests, 6: 2163-2177.
- Song S Q, Tang C F, Cheng H Y, et al., 2024. Research progress in regulation of seed germination [J]. Scientia Sinica Vitae, 54(7): 1226-1253. [宋松泉, 唐翠芳, 程红焱, 等, 2024. 种子萌发调控的研究进展 [J]. 中国科学: 生命科学, 54(7): 1226-1253.]
- Statwick J M, 2016. Germination pretreatments to break hard-seed dormancy in *Astragalus cicer* L. (Fabaceae) [J]. Peer J, 4(11): e2621.
- Sugimoto N, Takeda G, Nagato Y, et al., 1998. Temporal and spatial expression of the α -amylase gene during seed germination in rice and barley [J]. Plant Cell Physiology, 39(3): 323-333.
- Su J Y, Zhu S M, Chen H W, et al., 2024. Effects of different exogenous hormones on germination of fresh seeds and seedling growth of *Amomum tsaoko* [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 39(2): 93-100. [苏俊宇, 朱树明, 陈浩文, 等, 2024. 不同外源激素对鲜草果种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 39(2): 93-100.]
- Sun Y, Li Y, Zhang J, et al., 2025. Comparative analysis of endogenous phytohormone profiling in different life stages of *Haematococcus pluvialis* by targeted metabolomics [J]. Algal Research, 91: 104283-104283.
- Tian H H, Li C C, Wu Q, et al., 2015. Effects of plant growth regulators on endogenous hormones content of *Rhodoendron decorum* [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 42(02): 90-93+135. [田红红, 李朝婵, 伍庆, 等, 2015. 植物生长调节剂对大白杜鹃幼苗内源激素的影响[J]. 福建林业科技, 42(02): 90-93+135.]
- Wang S P A B L T P & Zeng X L, 2023. Effects of exogenous hormones on the germination and seedling growth of *Elaeagnus angustifolia*. Seed, 42(4): 92-97. [玉苏甫·阿不力提甫和曾雪玲, 2023. 外源激素对尖果沙枣种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 种子, 42(4): 92-97.]
- Xiong N W, Zhang Y L, Zheng Y B, et al., 2024. Effects of exogenous hormones on seed germination and seedling growth of *Magnolia biondii* [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, (10): 52-55. [熊宁旺, 张玉蕾, 郑奕彬, 等, 2024. 外源激素对望春玉兰种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 黑龙江农业科学, (10): 52-55.]
- Yang R C, Zhang H J, Wang Q, et al., 2012. Regulatory mechanism of plant hormones on seed dormancy and germination [J]. Acta Agrestia Sinica, 20(1): 1-9. [杨荣超, 张海军, 王倩, 等, 2012. 植物激素对种子休眠和萌发调控机理的研究进展 [J]. 草地学报, 20(1): 1-9.]
- Yang X P, Chen X B, Li Y H, et al., 2019. The influence of different hormones on the germination and growth of *Capsicum annuum* L [J]. Agricultural Techniques, 4: 25-27. [杨晓平, 陈修斌, 李翊华, 等, 2019. 不同种类激素对辣椒种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 农艺农技, 4: 25-27.]
- Yuan L Z, Yang B, Liu J M, et al., 2020. Effects of exogenous hormones on the germination and seedling growth of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 41(6): 75-79. [袁莲珍, 杨斌, 刘际梅, 等, 2020. 外源植物激素对杉木种子萌发及苗木生长的影响 [J]. 四川林业科技, 41(6): 75-79.]

- Zeng F, Gao Y, Pan X, et al., 2023. Research progress on plant endogenous hormones regulating pre-harvest sprouting [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 39(3): 848-858. [曾芳, 高娅, 潘鑫, 等, 2023. 调控穗发芽的植物内源激素研究进展 [J]. 江苏农业学报, 39(3): 848-858.]
- Zhang A, Wang J L, Wang X Q, et al., 2024. Effects of different exogenous plant hormones on seed germination and seedling growth of *Medicago falcata* [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 52(11): 16-22. [张奥, 王佳琳, 王晓琴, 等, 2024. 不同外源植物激素对野苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 贵州农业科学, 52(11): 16-22.]
- Zhao G J, Xu X L, Ma H C, et al., 2016. Causes of difficulties with natural regeneration of a *Bombax ceiba* population in Hong-He dry-hot valleys (DHV) [J]. Acta Ecologica Sinica, 36(5): 1342-1351. [赵高卷, 徐兴良, 马焕成, 等, 2016. 红河干热河谷木棉种群的天然更新 [J]. 生态学报, 36(5): 1342-1351.]
- Zhu G B, 1965. Forestry characteristics and cultivation techniques of *Ochroma lagopus* [J]. Practical Technology of Forestry, (5): 3-5. [朱光斌, 1965. 轻木的林学特性和栽培技术 [J]. 林业实用技术, (5): 3-5.]
- Zou S Q, Hua S, Duan Z B, et al., 2019. Cultivation technology of *Ochroma lagopus* in low altitude area of Xishuangbanna [J]. Forest Inventory and Planning, 44(5): 112-116. [邹寿青, 华帅, 段柱标, 等, 2019. 轻木在西双版纳低海拔地区栽培实用技术 [J]. 林业调查规划, 44(5): 112-116.]