

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.011

论文标题： 不同种源降香黄檀幼苗生长节律遗传变异

作　　者： 赵涵迪，徐大平，刘小金，等

收稿日期： 2025-09-09

引文格式： 赵涵迪,徐大平,刘小金,等.不同种源降香黄檀幼苗生长节律遗传变异[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):124-132,145.

Zhao H D, Xu D P, Liu X J, et al. Provenance variation of growth rhythm for *Dalbergia odorifera* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(10):124-132,145.

相关论文推荐

Recommended articles

不同基质和容器规格对降香黄檀苗期及造林早期生长的影响

Effects of different mediums and container sizes on the growth performance of *Dalbergia odorifera* at seedling and early afforestation stages

降香黄檀内生细菌多样性研究

The diversity of endophytic bacteria in *Dalbergia odorifera*

降香黄檀生根的生理机制

Physiological mechanism of rooting of *Dalbegia odorifera* cuttings

供氮方式和水平对交趾黄檀幼苗生长和生理的影响

Effects of different fertilization methods and levels on the growth and physiological characteristics of *Dalbergia cochinchinensis* seedlings

6年生不同家系降香黄檀早期生长评价

Early growth evaluation on six-year-old *Dalbergia odorifera* T. Chen families

岩溶石山降香黄檀人工林的天然更新

The natural regeneration of karst plantation of *Dalbergia odorifera*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.011 http: //qks.csuft.edu.cn

不同种源降香黄檀幼苗生长节律遗传变异

赵涵迪[1, 2]，徐大平[1]，刘小金[1]，崔之益[1]，张宁南[1]，苏 宇[3]，洪 舟[1]
（1. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州 510520；2. 南京林业大学，江苏 南京 210037；
3. 广州市林业和园林科学研究院，广东 广州 510080）

摘 要：【目的】探究不同种源降香黄檀幼苗生长节律的遗传变异规律，为其良种选育和高效育苗提供理论依据。【方法】对海南 9 个种源的一年生幼苗，开展定期苗高和地径观测，利用 Logistic 生长曲线拟合其年生长过程，并计算最大生长速率（MGR）、快速生长速率（RGR）、速生期生长量（RIG）及速生期占比（PRT）等关键生长参数，结合地理 - 气候因子进行相关性和聚类分析，利用 ASReml-R 3.0 程序估计遗传力等遗传参数。【结果】Logistic 模型对降香黄檀幼苗苗高和地径生长的拟合效果良好（$R^2 > 0.98$），幼苗生长呈典型“S”形曲线，可分为生长前期、速生期和生长后期。不同种源在物候参数和生长参数上存在显著差异，地径速生期早于苗高，其起始时间平均分别为第 47 天和第 117 天。MGR、RGR、RIG 与种源年降水量呈显著正相关，表明水分是影响降香黄檀生长速率的重要环境因子。通过聚类分析将 9 个种源可依地理结构分为两类，除 PRT 外，各类间生长节律参数差异显著。遗传分析显示，地径性状的遗传力普遍高于苗高，生长节律性状具有中等遗传力，遗传变异系数较低，表明这些性状主要受遗传控制，具备较高的遗传改良潜力。【结论】降香黄檀幼苗生长节律存在明显的种源差异和地理变异，年降水量是影响生长速率的重要环境因子。Logistic 模型能准确预测其生长进程，为科学育苗、种源选择与遗传改良提供了可靠依据，本研究结果为降香黄檀的良种选育与高效栽培提供了重要的理论与技术支撑。

关键词：降香黄檀；幼苗；种源；生长节律；遗传变异
中图分类号：S722.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)10-0124-09

Provenance variation of growth rhythm for *Dalbergia odorifera* seedlings

Zhao Handi[1,2], Xu Daping[1], Liu Xiaojin[1], Cui Zhiyi[1], Zhang Ningnan[1], Su Yu[3], Hong Zhou[1]

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;
2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
3. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】To investigate the genetic variation in growth rhythm of *Dalbergia odorifera* seedlings from different provenances, so as to provide a theoretical basis for superior provenance selection and efficient seedling cultivation.【Methods】One-year-old seedlings from nine provenances in Hainan were regularly measured for height and ground diameter. The annual growth process was fitted using the Logistic growth curve, and key growth parameters including maximum growth rate (MGR), rapid growth rate (RGR), growth increment during the rapid growth period (RIG), and the proportion of rapid growth period (PRT) were calculated. Correlation and cluster analyses were conducted in combination with geographical and climatic factors. The genetic parameters such as heritability were estimated by the ASReml-R 3.0.【Result】The Logistic model showed a good fit for both height and ground diameter growth ($R^2 > 0.98$), with seedling growth following a typical “S”-shaped curve, which could be divided into initial, rapid, and late growth phases. Significant differences were observed among provenances in both phenological and growth parameters. The rapid growth period of ground diameter occurred earlier than that of height, with average starting times of day 47 and day 117, respectively. MGR, RGR, and RIG were significantly positively correlated with annual precipitation of the provenances, indicating that moisture is an important environmental factor affecting growth rate. Cluster analysis grouped the nine provenances into two categories based on geographical structure. With the exception of PRT, significant differences in growth rhythm parameters were observed between groups. Genetic analysis revealed that heritability was generally higher for ground diameter than for height, and growth rhythm traits exhibited

收稿日期（Received）：2025-09-09 **修订日期**（Revised）：2025-12-31
基金项目：广州市生态园林科技协同创新中心项目（202206010058）；“十四五”国家重点研发计划项目（2024YFD2200101）。
第一作者：赵涵迪（3094136887@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**洪舟（hzhou1981@sina.com），副研究员，硕士研究生导师。
引文格式：赵涵迪 , 徐大平 , 刘小金 , 等 . 不同种源降香黄檀幼苗生长节律遗传变异 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):124-132,145.
Zhao H D, Xu D P, Liu X J, et al. Provenance variation of growth rhythm for *Dalbergia odorifera* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):124-132,145.

moderate heritability with low coefficients of genetic variation, indicating that these traits are mainly under genetic control and have high potential for genetic improvement.【Conclusion】The growth rhythm of *D. odorifera* seedlings exhibits clear differences among provenances and geographic variations. Annual precipitation is an important environmental factor influencing growth rate. The Logistic model can accurately predict growth processes, providing a reliable basis for scientific seedling cultivation, provenance selection and genetic improvement, the results of this study offer important theoretical and technical support for superior breeding and efficient cultivation of *D. odorifera.*

Keywords: *Dalbergia odorifera* T. Chen; seedling; provenance; growth rhythm; genetic variation

树木的年生长节律与物候变化是气候周期性变化对树木年生长周期所产生的综合响应，也是其遗传特性与自然环境互作适应的结果[1]。研究树种的生长节律与物候特征，并探讨引种树种的适应性与抗逆性，可为树种的引种栽培和遗传改良提供科学依据[2]。幼苗生长是幼苗遗传特性在特定生境下适应性的外在表征，在幼苗生长发育过程中依据不同生育阶段的生物学特性实施科学管理，不仅有助于降低育苗成本，也可显著提高苗木质量[3]。

目前，“S”形生长曲线在树木动态生长研究中已得到广泛应用[4]。该曲线通常用于表征种群在空间约束条件下的生长过程，其典型特征为：在一定阶段内，生长速率随环境条件的变化而加快，接近线性增长；当生长达到某一阈值后逐渐减缓，最终趋于停滞[2]。“S”形生长曲线包含若干关键参数：其一为最大生长量，是栽培实践中的主要目标；其二为最大生长速率，是衡量生长势的重要指标；其三为物候参数，包括快速生长期的起始时间、结束时间、中点及持续期，这一阶段是整体生长过程的关键时期[5]。快速生长期中点的生长速率（即最大瞬时生长率）、该阶段的平均生长率及生长量，共同决定了总生物量的积累，在林木栽培管理中具有重要的参考价值[6]。

降香黄檀 *Dalbergia odorifera* T. Chen 为豆科蝶形花亚科黄檀属植物，又称海南黄花梨、降香[7]。作为中国海南特有种，该树种主要分布于海南西部及西南部（如昌江、乐东、白沙、三亚等地区）海拔 400 m 以下的平原与丘陵地带[8]。降香黄檀属国家二级保护植物，亦被列入中国国家标准《红木》（GB/T 18107—2017）中 5 属 8 类 29 种之一，其材质价值仅次于檀香、紫檀和酸枝木，是我国重要的珍贵红木树种[9]。该树种不仅兼具优良的材用与药用价值，还具有较强的抗旱性和耐瘠薄能力，是一种极具推广潜力的珍贵树种[10]。幼苗在不同时期的生长表现存在明显差异，其生长节律的变化既反映了自身生理功能的调控，也受到外界环境因子的显著影响[11]。掌握其苗木生长规律对于优化栽培管理措施具有重要意义。目前，针对蝶形花亚科植物如刺槐 *Robinia pseudoacacia*[12]、美丽胡枝子 *Lespedeza formosa*[13]、印度紫檀 *Pterocarpus indicus*[14] 及红豆树 *Ormosia hosiei*[15] 等树种已开展了大量苗木生长节律研究。然而，人工栽培降香黄檀仍面临生长缓慢和育苗技术体系不成熟等问题[16]。系统研究其生长节律有助于实施科学管理，明确速生期的时间范围与生长速率，从而提升降香黄檀的生长效益及经济生态价值[17]。

本研究通过分析降香黄檀苗木的年生长规律及其生长特性，进一步划分其生长时期，旨在为培育壮苗技术和引种栽培实践提供理论支撑。本研究采用 Logistic 生长曲线对不同种源降香黄檀一年生幼苗的生长进行拟合与遗传分析，主要目标包括：1）确定并划分降香黄檀幼苗的生长期；2）比较不同种源间生长参数的变异特征；3）为其引种栽培和高效育苗提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材　料

2022 年 11 月，采集来自 9 个不同种源（表 1）的降香黄檀种子。每个种源的种子均由 10 株生长状况良好、无明显病虫害的母树混合组成。为确保种源内遗传多样性，同一采种群体中各母树之间的空间距离均保持在 200 m 以上。

1.2　试验地点

试验地位于中国林业科学研究院热带林业研究所温室（23°11′N，113°22′E），属典型的南亚热带季风海洋性气候。该地区年平均气温 20 ～ 22 ℃，日平均气温在 0 ℃以上，年降水量 1 289 ～ 1 676 mm，其中 4—9 月为雨季，降水量约占全年的 85%。

1.3　试验方法

2022 年 12 月，将采自不同种源的降香黄檀种子经 0.5 g·L^{-1} 高锰酸钾溶液表面消毒 30 min，随

后用冷水浸泡处理 12 h 以促进萌发，之后播种于经消毒处理的沙床中。待幼苗发育至 4 片真叶时，将其移栽至 14 cm × 18 cm 规格的育苗盆中，育苗基质按体积比配制为泥炭∶珍珠岩 = 3∶1。在移栽后第 1 个月及第 6 个月分别施入有效期为 6 个月的缓释肥，施用量依次为 200 mg/ 盆和 300 mg/ 盆。每个种源选取 150 株生长健壮、表型一致的苗木（采用随机区组设计，每小区 50 株，3 次重复）用于生长节律观测。2023 年，每 30 天测量一次苗高与地径，全年共计完成 12 次测量。

表 1 降香黄檀种源地的地理和气候条件 †

Table 1 Geographical and climatic conditions of the provenance for *D. odorifera*

种源 Provenance	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	7 月平均气温 Average temperature in July /℃	1 月平均气温 Average temperature in January /℃	年降水量 Annual precipitation /mm	年平均气温 Annual average temperature /℃
白沙 BS	109°26′51″	19°13′35″	27.3	17.6	1 341	23.4
霸王岭 BW	109°08′24″	19°04′12″	25.7	16.4	1 495	21.9
东方 DF	108°37′48″	19°06′36″	29.3	19.1	1 515	24.9
海口 HK	110°19′52″	20°02′04″	28.7	17.3	1 790	24.1
尖峰 JF	108°52′48″	18°42′18″	27.8	19.1	1 310	24.2
琼海 QH	110°27′22″	19°14′06″	27.3	19.0	2 041	23.4
文昌 WC	110°44′18″	19°37′30″	28.6	18.2	1 777	24.3
万宁 WN	110°23′24″	18°49′30″	28.8	20.0	1 826	25.2
五指山 WZS	109°39′18″	18°52′12″	24.6	16.2	1 395	21.2

† 各种源气象数据均源自国家气象科学数据中心，为 2000—2020 年的气候平均值。
All meteorological data sources are derived from the National Meteorological Science Data Center, representing climate averages from 2000 to 2020.

1.4 生长模型建立

采用 Logistic 公式（1）拟合不同种源苗木苗高和地径的年生长进程 [18]：

$$y=\frac{k}{1+\mathrm{e}^{a-bt}} \tag{1}$$

式中：y 为性状累计生长量，t 为测定时间，a、b 为参数，k 为设定条件下生长性状的极值，按式（2）计算：

$$k=\frac{N_1N_4(N_2+N_3)-N_2N_3(N_1+N_4)}{N_1N_4-N_2N_3} \tag{2}$$

式中：N_1、N_2、N_3、N_4 分别为第一时刻（t_1）、中间 2 个时刻（t_2、t_3）、最后一个时刻（t_4）各性状对应的值，$t_1+t_4=t_2+t_3$。

1.5 物候参数计算

通过计算公式（1）的一阶导数，可以得到连续日生长方程（3）：

$$\frac{d_y}{d_t}=\frac{abk\mathrm{e}^{-bx}}{(1+a\mathrm{e}^{-\mathrm{bx}})^2} \tag{3}$$

幼苗快速生长时间点（t_0）是通过公式（1）的二阶导数计算得出的，公式为：

$$\frac{d_y^2}{d_{t^2}}=\frac{k^2ab\mathrm{e}^{-kt}(b\mathrm{e}^{-kt}-1)}{(1+b\mathrm{e}^{-kt})^3} \tag{4}$$

当 $\frac{d_2^y}{d_2^x}=0$ 时，$t_0=\frac{a}{b}$ （5）

对式（1）求三阶导数，结果为：

$$\frac{d_y^3}{d_{t^3}}=b^3k\mathrm{e}^{a-bt}\frac{(\mathrm{e}^{2\ln a-2bt}-4\mathrm{e}^{a-bt}+1)}{(1+\mathrm{e}^{a-bt})^4} \tag{6}$$

当 $\frac{d_y^3}{d_{t^3}}=0$ 时，$t_1=(a-\ln(2+\sqrt{3}))/b$ 且 $t_2=(a+\ln(2+\sqrt{3}))/b$ （7）

此时将整个生长曲线分为 3 段：当 $t<t_1$ 时，幼苗生长缓慢，为生长前期；当 $t_1<t<t_2$ 时，为快速生长期；当 $t>t_2$ 时，快速生长期结束，幼苗进入生长后期，生长逐渐变缓直至停止生长。从 t_1 到 t_2 的数据是幼苗快速生长期（R_{GD}），计算公式如下：

$$R_{\mathrm{GD}}=t_2-t_1=\frac{2\ln(2+\sqrt{3})}{b} \tag{8}$$

1.6 生长周期参数计算

生长期参数包括最大快速生长速率（M_{GR}）、快速生长速率（R_{GR}）、快速生长阶段各生长性状总的增加量（R_{IG}）和快速生长量占各生长性状总增加量的百分比（P_{RT}）[19]。各参数计算公式如下：

$$M_{GR} = V_{max} = \frac{1}{4}bk \quad (9)$$

$$R_{GR} = y_2 - y_1 = \frac{k}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$R_{IG} = \frac{R_{GR}}{R_{GD}} = \frac{kb}{2\sqrt{3}\ln(2+\sqrt{3})} \quad (11)$$

$$P_{RT} = \frac{R_{GR}}{R_{IG}} \times 100\% \quad (12)$$

式中：R_{IG} 是整个生长阶段生长性状的总增量。

1.7　统计分析

使用程序 ASReml-R 3.0[20] 估计方差和协方差分量，不同种源之间生长节律参数的变异按照以下公式计算：

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + e_{ijk} \quad (13)$$

式中：y_{ijk} 为第 j 个区组第 i 个种源第 k 个个体的生长节律表现；μ 为总体均值；α_i 为种源效应；β_j 为区组效应；$\alpha\beta_{ij}$ 为第 j 个区组第 i 个种源的效应；e_{ijk} 为随机误差。

每个性状的种源遗传力估计公式如下：

$$h_p^2 = \sigma_p^2 / (\sigma_{bp}^2 / B + \sigma_e^2 / nB) \quad (14)$$

式中：h_p^2、σ_p^2、σ_{bp}^2 和 σ_e^2 分别为种源遗传力和种源遗传、区组内种源和表型变异分量。B 和 n 分别为区组和区组内个体数。

幼苗高度和地径生长节律参数之间的遗传相关性，其公式为：

$$r_G = \hat{\sigma}_{(x,y)} / \sqrt{(\hat{\sigma}_{(x)}^2 \times \hat{\sigma}_{(y)}^2)} \quad (15)$$

式中：$\hat{\sigma}_{(x)}^2$ 和 $\hat{\sigma}_{(y)}^2$ 分别为性状 x 和 y 估计的遗传方差；$\hat{\sigma}_{(x,y)}$ 为性状 x 和 y 之间估计的遗传协方差。

2　结果与分析

2.1　年生长量拟合

采用 Logistic 模型对降香黄檀幼苗的年生长动态及参数进行拟合。结果表明，该树种幼苗生育期相对较长，其苗高与地径生长均遵循典型的“S”形曲线（图 1）。各参试种源生长性状的拟合确定系数（R^2）均高于 0.98（表 2），表明 Logistic 模型能够有效模拟降香黄檀幼苗苗高与地径的生长过程，拟合效果良好，适用于该树种的生长动态描述。

2.2　不同种源物候和生长参数

根据不同种源苗木生长的 Logistic 模型所计算出的时间点 t_1 与 t_2，将其整个生长期划分为前期、速生期和后期。各参试种源在苗高与地径的速生期起始时间、持续期及相关生长参数如表 3 所示。地径的速生期起始时间（t_1）早于苗高，分别为第 47 天与第 117 天，其变异系数分别为 17.12% 和 6.34%。HK 和 WN 种源在苗高与地径性状最晚进入速生期，t_1 分别为第 126 天和第 56 天； WZS 和 BW 种源在苗高性状最早进入速生期，而地径性状最早进入速生期的为 WZS 种源，起始时间为第 31 天。苗高与地径的最大生长速率出现时间（t_0）平均分别为第 184 天和第 124 天；其中， HK 种源的苗高和 QH 种源的地径达到最大生长速率的时间最晚，分别为第 197 天与第 139 天。除 JF 和 WN 种源外，各地径的速生持续期均长于苗高。在速生期内，苗高与地径的快速生长速率均值分别为 4.51 cm·d^{-1} 和 0.26 cm·d^{-1}。WC 和 WN 种源的快速生长速率最高，其苗高与地径的快速生长速率分别为 5.15 cm·d^{-1} 和 0.32 cm·d^{-1}。速生阶段内的最大

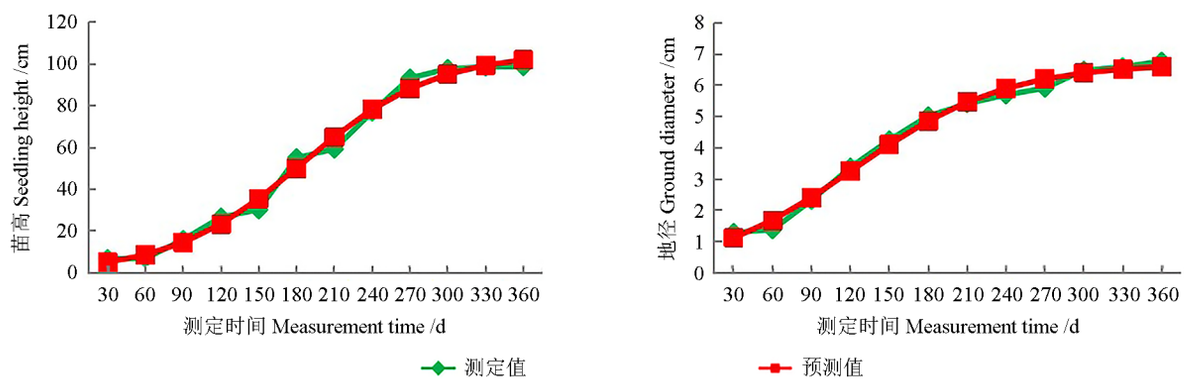


图 1　降香黄檀幼苗高度 (A) 和地径 (B) 的生长拟合曲线

Fig. 1　Simulated curve of seedling height (A) and ground diameter (B) of *D. odorifera*

表 2 降香黄檀不同种源苗高与地径 Logistic 回归曲线参数 †

Table 2 Logistic regression curve parameters of seedling growth in height and ground diameter of *D. odorifera* provenances

种源 Provenance	苗高 Seedling height				地径 Ground diameter			
	k /cm	*a*	*b*	R^2	*k* /cm	*a*	*b*	R^2
白沙 BS	94.65±1.89 b	3.62±0.16 a	0.19±0.004 a	0.992	7.26±0.43 a	2.07±0.06 abc	0.16±0.02 ab	0.982
霸王岭 BW	93.27±5.97 b	3.49±0.21 a	0.20±0.004 a	0.989	5.78±0.15 b	2.01±0.05 bc	0.19±0.01 ab	0.989
东方 DF	105.03±5.09 ab	3.46±0.02 a	0.21±0.008 a	0.989	6.28±0.68 ab	2.04±0.19 abc	0.16±0.01 ab	0.994
海口 HK	115.78±15.97 ab	3.71±0.31 a	0.20±0.005 a	0.989	7.61±0.42 a	2.24±0.09 abc	0.16±0.01 ab	0.986
尖峰 JF	90.91±11.91 b	3.62±0.14 a	0.19±0.013 a	0.986	6.49±0.20 ab	2.36±0.22 ab	0.21±0.02 a	0.993
琼海 QH	123.60±3.11 a	3.56±0.12 a	0.19±0.007 a	0.989	6.57±0.12 ab	2.08±0.01 abc	0.15±0.01 b	0.991
文昌 WC	113.69±9.60 ab	3.82±0.11 a	0.19±0.005 a	0.989	7.06±0.67 ab	2.19±0.04 abc	0.17±0.01 ab	0.991
万宁 WN	122.21±6.57 a	3.61±0.10 a	0.21±0.006 a	0.988	7.31±0.23 a	2.46±0.11 a	0.20±0.02 a	0.990
五指山 WZS	92.61±2.06 b	3.44±0.04 a	0.19±0.008 a	0.990	6.21±0.45 ab	1.91±0.21 c	0.18±0.02 ab	0.992
平均 Mean	105.75±3.36	3.59±0.05	0.19±0.008 a	0.990	6.73±0.16	2.15±0.05	0.18±0.01	0.991

† 同列不同小写字母表示种源间差异显著（$P < 0.05$），下同。
Means with different lowercase letters within a column indicate significant differences at $P < 0.05$ among different provenances, the same below.

表 3 降香黄檀不同种源苗高和地径物候及生长参数 †

Table 3 Phenological and growth parameters of seedling height and ground diameter for different provenances of *D. odorifera*

性状 Traits	种源 Provenance	t_0 /d	t_1 /d	t_2 /d	R_{GD} /d	M_{GR} /(cm·d^{-1})	R_{GR} /cm	R_{IG} /(cm·d^{-1})	P_{RT} /%
苗高 Seedling height	白沙 BS	187±4.10 abc	118±4.41 ab	255±5.70 abc	137±6.12 a	4.58±0.13 a	54.65±1.09 b	4.01±0.12 a	67.37±0.61 a
	霸王岭 BW	174±3.61 c	107±6.06 b	239±2.03 c	132±5.13 a	4.66±0.18 a	53.85±3.44 b	4.08±0.15 a	65.86±0.22 a
	东方 DF	177±3.48 bc	110±2.08 ab	244±4.91 c	134±2.96 a	5.13±0.31 a	60.64±2.94 ab	4.50±0.27 a	66.07±1.12 a
	海口 HK	197±3.67 a	126±8.69 a	268±2.03 a	142±10.6 a	5.52±1.08 a	66.85±9.22 ab	4.84±0.94 a	67.97±2.29 a
	尖峰 JF	187±6.11 abc	119±6.66 ab	255±6.33 abc	136±2.91 a	4.41±0.64 a	52.49±6.88 b	3.87±0.56 a	66.93±1.22 a
	琼海 QH	188±5.17 abc	118±4.91 ab	258±5.93 abc	140±4.26 a	5.83±0.22 a	71.36±1.79 a	5.11±0.19 a	65.62±0.43 a
	文昌 WC	184±8.41 abc	121±7.02 ab	248±10.02 bc	127±3.61 a	5.87±0.34 a	65.64±5.55 ab	5.15±0.30 a	65.61±0.90 a
	万宁 WN	193±4.10 ab	122±3.28 ab	263±6.17 ab	141±5.13 a	5.70±0.13 a	70.55±3.79 a	5.00±0.12 a	66.02±0.45 a
	五指山 WZS	174±2.08 c	107±1.20 b	240±3.71 c	133±2.85 a	4.59±0.18 a	53.46±1.19 b	4.02±0.15 a	65.9±0.42 a
	平均 Mean	184±2.03	117±1.97	252±2.44	135±1.73	5.14±0.17	61.05±1.94	4.51±0.15	66.37±0.33
地径 Ground diameter	白沙 BS	132±8.74 a	48±1.20 abc	217±16.58 ab	169±16.07 ab	0.28±0.02 ab	4.19±0.25 a	0.25±0.02 ab	71.40±1.71 ab
	霸王岭 BW	108±3.00 b	37±1.53 bc	178±6.17 c	141±6.36 ab	0.27±0.01 b	3.34±0.09 b	0.23±0.01 b	73.23±0.77 a
	东方 DF	125±5.86 ab	43±9.70 abc	207±4.67 abc	163±9.94 ab	0.26±0.04 b	3.63±0.39 ab	0.23±0.04 b	67.27±1.71 b
	海口 HK	136±7.51 a	56±6.43 a	217±8.67 ab	161±2.67 ab	0.31±0.02 ab	4.39±0.24 a	0.27±0.01 ab	69.58±3.18 ab
	尖峰 JF	118±3.00 ab	50±5.61 ab	185±11.79 bc	135±17.35 ab	0.33±0.04 ab	3.75±0.12 ab	0.29±0.04 ab	69.09±1.06 ab
	琼海 QH	138±8.72a	50±3.28 ab	226±13.59 a	176±10.39 a	0.25±0.02 b	3.79±0.07 ab	0.22±0.02 b	71.11±1.64 ab
	文昌 WC	128±4.81ab	51±3.06 ab	205±7.69 abc	154±5.93 ab	0.30±0.02 ab	4.08±0.39 ab	0.26±0.02 ab	67.65±0.97 b
	万宁 WN	122±9.21 ab	56±4.18 a	188±15.96 bc	132±13.58 b	0.37±0.03 a	4.22±0.13 a	0.32±0.02 a	66.17±1.30 b
	五指山 WZS	107±0.67 b	31±7.88 c	183±7.37 bc	152±15.25 ab	0.28±0.04 ab	3.59±0.26 ab	0.25±0.04 ab	73.12±1.13 a
	平均 Mean	124±2.73	47±2.18	201±4.42	154±4.30	0.30±0.01	3.89±0.09	0.26±0.01	69.85±0.65

† t_0、t_1、t_2、R_{GD}、M_{GR}、R_{GR}、R_{IG} 和 P_{RT} 分别表示快速生长时间点、快速生长阶段的开始时间、快速生长阶段的结束时间、幼苗快速生长期、最大快速生长速率、快速生长速率、快速生长阶段各生长性状总的增加量以及快速生长量占各生长性状总增加量的百分比。下同。
t_0, t_1, t_2, R_{GD}, M_{GR}, R_{GR}, R_{IG} and P_{RT} denote key rapid-growth time points, the start time of the rapid growth phase, the end time of the rapid growth phase, the rapid growth duration of seedlings, the maximum growth rate during the rapid growth stage, the rapid growth rate, the total increment of growth traits during the rapid growth stage, and the percentage of rapid growth amount to the total increase of growth traits, respectively. The same below.

生长速率范围分别为：苗高 4.41 ～ 5.87 cm·d^{-1}，地径 0.25 ～ 0.37 cm·d^{-1}，平均值分别为 5.14 cm·d^{-1} 和 0.30 cm·d^{-1}。速生期生长量占性状总生长量的平均比例在苗高与地径中分别为 66.37% 和 69.85%，其变异系数分别为 1.06% 和 3.87%。

2.3 物候及生长参数与种源地理气候因子的相关性分析

为探究影响降香黄檀幼苗生长节律性状变异的主要环境因子，对其生长参数与种源地理 - 气候因子进行相关性分析（表 4）。结果表明，降香黄檀

苗高的速生持续期、最大生长速率和快速生长速率与经度及年降水量呈显著或极显著正相关关系；而地径仅快速生长速率与经度呈显著正相关。结果表明，种源地的年降水量越高，其苗木生长速率越快，其余生长指标与种源地理气候因子间均无显著相关性。

2.4　不同种源区幼苗物候和生长节律参数的差异

相关分析和聚类分析结果表明，根据幼苗苗高或者地径可将 9 个种源分为 2 类，地理结构相对清晰。根据苗高性状，一个是东北沿海种源区，包括 HK、WC 和 WN 种源，另一个是中西部山地种源区包括 DF、BW、WZS、QH、BS 和 JF 种源（图 2A）。根据地径性状，一个是南部种源区，包括 DF、QH、WC、BS 和 HK 种源，另一个是北部种源区包括 JF、WN、BW 和 WZS 种源（图 2B）。除 P_{RT} 外，不同种源区苗高和地径性状的物候和生长节律参数存在显著或极显著差异（表 5）。苗高性状上，东北沿海种源区的物候参数（t_0、t_1 和 t_2）均早于中西部山地种源区，幼苗快速生长期（R_{GD}）短于中西部山地种源区；中西部山区种源区幼苗苗高的生长参数（M_{GR}、R_{GR} 和 R_{IG}）分别比东北沿海种源区低 13.07%、18.11% 和 13.03%，而 P_{RT} 高出东北沿海种源区 0.37%。地径性状上，北部种源区的物候参数（t_0、t_1 和 t_2）均早于南部种源区，幼苗快速生长期（R_{GD}）短于南部种源区；南部种源区地径的生长参数（M_{GR}、R_{IG} 和 P_{RT}）分别比北部种源区低 10.40%、9.72% 和 1.42%，而 R_{GR} 高出北部种源区 7.81%。

表 4　降香黄檀物候及生长参数与种源地理气候因子的相关性 †

Table 4　Correlation analysis of phenological and growth parameters with geographical and climatic factors of the provenances for *D. odorifera*

性状 Traits	指标 Index	t_0	t_1	t_2	R_{GD}	M_{GR}	R_{GR}	R_{IG}	P_{RT}
苗高 Seedling height	经度	0.62	0.67*	0.57	0.24	0.80*	0.78*	0.80*	-0.12
	纬度	0.41	0.48	0.37	0.09	0.51	0.43	0.51	0.39
	7 月平均温度	0.60	0.67*	0.57	0.25	0.56	0.58	0.57	0.24
	1 月平均温度	0.48	0.47	0.48	0.34	0.46	0.54	0.46	-0.13
	年降水量	0.50	0.49	0.50	0.34	0.94**	0.96**	0.94**	-0.28
	年平均温度	0.61	0.66*	0.59	0.29	0.51	0.55	0.52	0.18
地径 Ground diameter	经度	0.51	0.60	0.39	0.11	0.39	0.75*	0.38	-0.27
	纬度	0.63	0.39	0.65	0.53	-0.17	0.55	-0.20	-0.07
	7 月平均温度	0.69*	0.81*	0.51	0.10	0.36	0.64	0.35	-0.91**
	1 月平均温度	0.49	0.68*	0.29	-0.07	0.41	0.37	0.42	-0.82*
	年降水量	0.79*	0.61	0.74*	0.50	-0.02	0.57	-0.05	-0.26
	年平均温度	0.60	0.82*	0.38	-0.05	0.49	0.62	0.49	-0.96**

† * 和 ** 分别表示相关显著性水平为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$。下同。
* and ** indicate significance at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. The same below.

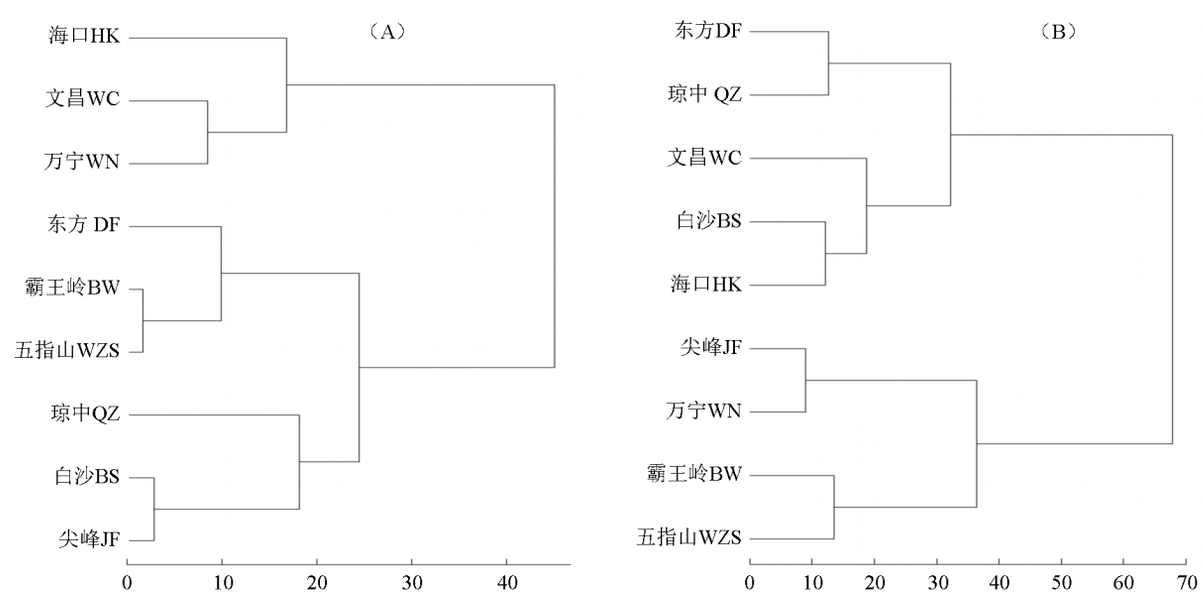


图 2　9 个降香黄檀种源苗高 (A) 和地径 (B) 性状聚类图

Fig. 2　Cluster of 9 provenances of seedling height(A) and ground diameter(B) for *D. odorifera*

表 5 降香黄檀不同种源区苗期物候和生长参数
Table 5 Phenological and growth parameters of seedlings for different provenance regions of *D. odorifera*

性状 Traits	种源区 Provenance regions	指标 Index							
		t_0 /d	t_1 /d	t_2 /d	R_{GD} /d	M_{GR} /(cm·d^{-1})	R_{GR} /cm	R_{IG} /(cm·d^{-1})	P_{RT} /%
苗高 Seedling height	东北沿海	187±2.97	120±2.77	253±3.58	133±2.32	6.12±0.23	69.61±2.49	5.37±0.19	66.66±0.45
	中西部山地	175±6.11	112±5.34	237±7.71	125±5.31	5.32±0.43	57.00±4.45	4.67±0.38	66.91±0.77
	F 值	10.60**	6.01*	12.10**	6.52*	9.60**	21.30**	9.60**	0.27
地径 Ground diameter	南部	132±5.40	50±4.72	214±8.53	165±8.32	0.28±0.03	4.02±0.31	0.25±0.02	69.4±1.91
	北部	114±7.41	44±11.5	184±4.20	140±8.83	0.31±0.05	3.73±0.37	0.27±0.04	70.4±3.42
	F 值	34.43**	12.55**	29.25**	16.82**	3.96*	7.00**	3.96*	1.90

2.5 物候和生长节律参数的遗传变异

生长节律参数的遗传变异系数与表型变异系数如表 6 所示。在 4 个物候参数（t0、t1、t2 和 R_{GD}）中，苗高的遗传变异系数（CV_A）与表型变异系数（CV_P）范围分别为 2.13% ～ 3.47% 和 14.52% ～ 21.81%，总体低于地径相应指标的变异水平。地径物候参数的种源遗传力介于 0.53 ～ 0.77 之间；苗高各性状的遗传力略高于地径，但速生期开始时间（t_1）和速生持续期（R_{GD}）的遗传力较低，分别为 0.18 和 0.22。生长节律性状（M_{GR}、R_{GR}、R_{IG} 和 P_{RT}）的遗传力普遍低于物候参数，其中地径的遗传力变化范围为 0.41（P_{RT}）至 0.56（M_{GR}），而苗高多数性状的平均遗传力约为 0.40。

表 6 降香黄檀物候和生长节律参数的遗传变异
Table 6 Genetic variation in phenological and growth rhythm parameters of *D. odorifera*

性状 Traits	指标 Index	遗传变异系数 CV_A /%	表型变异系数 CV_P /%	种源遗传力 h^2
苗高 Seedling height	t_0 /d	3.47	15.81	0.60±0.24
	t_1 /d	2.22	21.81	0.18±0.13
	t_2 /d	3.46	14.52	0.64±0.16
	R_{GD} /d	2.13	18.38	0.22±0.13
	M_{GR} /(cm·d^{-1})	6.90	36.68	0.38±0.27
	R_{GR} (cm)	8.99	36.32	0.54±0.27
	R_{IG} /(cm·d^{-1})	6.91	36.69	0.38±0.37
	P_{RT} /%	1.09	5.63	0.37±0.36
地径 Ground diameter	t_0 /d	8.00	21.99	0.77±0.13
	t_1 /d	12.69	37.29	0.65±0.21
	t_2 /d	7.21	22.98	0.72±0.16
	R_{GD} /d	6.51	28.84	0.53±0.28
	M_{GR} /(cm·d^{-1})	10.05	31.27	0.56±0.26
	R_{GR} (cm)	6.81	25.15	0.53±0.28
	R_{IG} /(cm·d^{-1})	10.05	31.27	0.56±0.26
	P_{RT} /%	2.40	11.40	0.41±0.36

2.6 生长节律性状间的遗传相关性

降香黄檀幼苗的苗高与地径在生长节律参数上表现出不同的相关性（表 7）。除速生期生长量占比外，苗高和地径的年生长量与生长节律参数均呈正向遗传相关。具体而言，苗高年生长量与速生持续期呈显著正相关，与生长速率常数、最大生长速率、快速生长速率及快速生长量均呈极显著正相关。就地径而言，其年生长量与最大生长速率出现时间（t_0）呈显著正相关，与生长速率常数（k）、速生期开始时间（t_1）、最大生长速率、平均生长速率及快速生长量呈极显著正相关。

3 讨 论

运用适合的生长模型估算树木生长参数或生物学参数是人工林栽培研究中关键且基础的内容 [21]。利用所构建的生长模型估算的相关生长参数，不仅能更有效地揭示不同基因型的生长特性及内在规律，还可依据生长特性的差异制定科学的造林栽培措施，从而促进树木生长 [22]。本研究采用 Logistic 方程对不同种源降香黄檀的幼苗生长进行拟合，结果表明降香黄檀一年生幼苗的苗高和地径生长均呈“S”形曲线，且 Logistic 模型具有较高的拟合优度，该结果与南方红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *mairei*[23] 和红椿 *Toona ciliata*[24] 等珍贵树种的研究结果一致。在生长初期，幼苗的根和叶具备吸收养分和合成物质的功能，但此时积累的养分远不足以支持幼苗快速生长，因此早期生长较为缓慢。随着生长时间的延长，幼苗根系逐渐发达，叶面积和叶片数量增加，能够为植株提供充足的营养；同时，前期物质的积累以及幼苗对生长环境的适应性提升，共同促使植株进入速生期。在生长后期，苗高生长逐渐减缓直至停止，地径生长虽亦有所放缓，但仍保持持续的增粗趋势。

根据 Logistic 拟合方程，可估算生长节律物候参数，并将幼苗整体生长过程划分为生长前期、速生期和生长后期。研究表明，苗木的生长量主要取决于速生期持续时间的长短和来临的早晚。

表 7　苗高和地径生长参数的遗传相关性 †

Table 7　Genetic correlations among growth parameters for seedling height and ground diameter

性状 Traits	k	t_0	t_1	t_2	R_{GD}	M_{GR}	R_{GR}	R_{IG}	P_{RT}	年生长量 Annual growth
k		0.53*	0.55	0.94**	0.62*	-0.26	0.65*	-0.28	-0.35	0.99**
t_0	0.66**		0.99**	0.99**	0.97**	0.32	0.53*	0.32	0.66*	0.46
t_1	0.91**	0.862*		0.98**	0.94**	0.34	0.55*	0.34	0.90**	0.46
t_2	0.48	0.97**	0.71**		0.98**	0.32	0.54*	0.32	0.57*	0.47
R_{GD}	0.07	0.76**	0.32	0.89**		0.35	0.81**	0.35	0.35	0.56*
M_{GR}	0.71**	0.01	0.52*	-0.22	-0.64*		0.94**	0.753*	-0.36	0.94**
R_{GR}	-0.79**	0.66*	0.91**	0.48	0.07	0.71**		0.94**	-0.35	0.99**
R_{IG}	0.71**	0.01	0.52*	-0.22	-0.64*	0.11	0.71**		-0.36	0.94**
P_{RT}	-0.73**	-0.42	-0.76**	-0.21	0.19	-0.65**	-0.73**	-0.65**		-0.41
年生长量 Annual growth	0.98**	0.62*	0.91**	0.42	0.01	0.74**	0.98**	0.74**	-0.81**	

† 对角线以上是苗高性状，对角线以下是地径性状。Above the diagonal is the seedling height; below the diagonal is the ground diameter.

与其他树种不同的是，降香黄檀地径的生长前期较短，而速生期持续时间较长 [25]，其苗高速生期始于 4 月。在此阶段，幼苗消耗大量水分和养分，导致高生长出现暂时性延迟 [26]。苗高与地径的速生期起始时间存在差异，地径速生期早于苗高，这可能源于不同生长阶段植株生长中心的转移，或是由于幼苗早期养分优先用于地径生长，从而促进木质化程度提升和根系发育。

苗期生长评价与管理对林木培育具有重要意义 [27]。不同种源及速生阶段内的生长参数存在显著差异。通常，来自中西部山地的种源其速生期起始时间早于东北沿海种源，但持续期较短。其原因可能在于中西部山地气温低于东北沿海地区，因而该地区种源生长所需的温度阈值较低，当引种至广东后，其萌发时间自然早于东北沿海种源。幼苗生长期长度并非造成生长差异的主要原因，而速生期的起始时间与持续期则对幼苗生长具有直接影响。不同种源在各生长阶段均表现出相似的变化趋势，速生期持续时间虽仅占全年生长期的 1/3，但其生长量可占年总生长量的 60% 以上。降香黄檀幼苗生长节律参数在种源间存在显著的遗传变异：如苗高生长、木材密度、心材率以及生长节律参数（M_{GR}、R_{IG} 和 R_{GR}）均表现出由产地降水量引起的纬向变异格局。与中西部山地种源相比，东北沿海种源的 M_{GR}、R_{IG} 和 R_{GR} 较低。根据生长参数间的相关性可推断，东北沿海种源降香黄檀苗高生长较高，并非因其线性生长期较长，而是由于其具有更高的线性生长速率和速生期生长量。在降香黄檀苗高速生期或生长盛期，可通过提高线性生长速率和延长速生期以促进苗木生长。

树种生长差异通常由遗传背景、环境适应性、基因型与环境互作（G×E）共同决定。南方红豆杉种源间的生长差异主要受原产地经度、纬度和 7 月均温的影响 [28]。本研究通过遗传力估计发现，地径性状的遗传力普遍高于苗高，说明地径更易通过遗传选择进行改良，而苗高生长参数（如 t_1、R_{GD}）遗传力较低，更容易受环境影响。此外，生长节律参数与气候因子的相关性进一步说明，种源间差异是遗传适应性与环境因子共同作用的结果。

4　结　论

降香黄檀一年生容器苗的生长节律表现出显著的种源间遗传变异，具有较高的遗传改良潜力。在降香黄檀早期选育过程中，应综合考虑其适生生境以实现最佳的选育效果。速生期是降香黄檀苗木生长的关键阶段，其生长量通常占全年生长量的主要部分。在苗木即将进入速生期时，应加强水肥调控，及时补充快速生长所必需的各种营养元素，以满足其旺盛生长的需求。至生长后期，则应增施磷、钾肥以促进木质化进程，增强苗木抗逆性，为出圃或造林奠定良好基础。

参考文献：

[1] Hannerz M, Sonesson J, Ekberg I. Genetic correlations between growth and growth rhythm observed in a short-term test and performance in long-term field trials of Norway spruce[J]. Canadian Journal of Forest Research,1999,29:768-778.

[2] Hänninen H, Kramer K. A framework for modelling the annual cycle of trees in boreal and temperate regions[J]. Silva Fennica,2007,41(1):167-205.

[3] 杨玲 , 杜文婷 , 鲁强 , 等 .3 种四照花一年生播种苗生长规律

初探 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2020,28(4):367-374.
Yang L, Du W T, Lu Q, et al. Annual growth rhythm of 1-year-old seedlings of three *Cornus* species[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2020,28(4):367-374.

[4] Lukkarinen A J, Ruotsalainen S, Peltola H, et al. Annual growth rhythm of *Larix sibirica* and *Larix gmelinii* provenances in a field trial in southern Finland[J]. Scandinavian Journal of Forest Research,2013,28(6):518-532.

[5] 闫彩霞 , 苗婷婷 , 刘俊龙 , 等 . 杨树杂交 F_1 代扦插无性系苗期生长节律及遗传变异分析 [J]. 中国农学通报 ,2023,39(5):39-48.
Yan C X, Miao T T, Liu J L, et al. The growth rhythm and genetic variation of the F_1 hybrid cuttings of *Populus deltoides*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2023,39(5):39-48.

[6] Zeide B. Analysis of growth equations[J]. Forest Science,1993,39(3):594-616.

[7] Liu F M, Hong Z, Xu D P, et al. Genetic diversity of the endangered *Dalbergia odorifera* revealed by SSR markers[J]. Forests,2019,10:225.

[8] 洪舟 , 刘小金 , 张宁南 , 等 . 不同基质和容器规格对降香黄檀苗期及造林早期生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(10):22-29,38.
Hong Z, Liu X J, Zhang N N, et al. Effects of different mediums and container sizes on the growth performance of *Dalbergia odorifera* at seedling and early afforestation stages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(10):22-29,38.

[9] GB/T 18107—2017 红木 [S].
GB/T 18107-2017 Hongmu[S].

[10] Li X W, Chen Q X, Lei H Q, et al. Nutrient uptake and utilization by fragrant rosewood (*Dalbergia odorifera*) seedlings cultured with oligosaccharide addition under different lighting spectra[J]. Forests,2018,9:29.

[11] O'Reilly C, Owens J N. Shoot, needle and cambial growth phenology and branch tracheid dimensions in provenances of lodgepole pine[J]. Canadian Journal of Forest Research,1989,19:599-605.

[12] 有祥亮 , 梁玉堂 , 龙庄如 . 刺槐优良无性系苗木年生长节律的研究 [J]. 山东农业大学学报 ,1993,24(增刊 1):62-66.
You X L, Liang Y T, Long Z R. A study on annual growth rhythm of excellent clones of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),1993,24(S1):62-66.

[13] 董健 , 尤文忠 , 陆爱君 , 等 . 胡枝子种 - 种源苗期生长和抗寒性分析 [J]. 辽宁林业科技 ,2006(4):5-9.
Dong J, You W Z, Lu A J, et al. Analysis of the growth and cold resistance in seedling stage for species-provenances of *Lespedeza bicolor*[J]. Journal of Liaoning Forestry Science and Technology,2006(4):5-9.

[14] 沙二 , 朱先成 , 赵志刚 , 等 . 印度紫檀的育苗技术及其在西双版纳的苗期生长表现 [J]. 广西林业科学 ,2008,37(2):92-94.
Sha E, Zhu X C, Zhao Z G, et al. Seedling-raising techniques for *Pterocarpus indicus* and its seedling growth performance in Xishuangbanna[J]. Guangxi Forestry Science,2008,37(2):92-94.

[15] 李峰卿 , 陈焕伟 , 周志春 , 等 . 红豆树优树种子和幼苗性状的变异分析及优良家系的初选 [J]. 植物资源与环境学报 ,2018,27(2):57-65.
Li F Q, Chen H W, Zhou Z C, et al. Analysis on variation of seed and seedling traits of superior trees of *Ormosia hosiei* and primary screening of optimum family[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2018,27(2):57-65.

[16] Liu X J, Xu D P, Yang Z J, et al. Geographic variations in seed germination of *Dalbergia odorifera* T. Chen in response to temperature[J]. Industrial Crops and Products,2017,102:45-50.

[17] 郑国增 . 降香黄檀播种及幼苗生长规律研究 [J]. 福建林业科技 ,2015,42(1):123-125.
Zheng G Z. Sowing technique and seedling growth law of *Dalbergia odorifera*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology,2015,42(1):123-125.

[18] 张江涛 , 赵蓬晖 , 杨淑红 , 等 . 白榆苗期年生长节律及生长模型研究 [J]. 上海农业学报 ,2024,40(6):67-71.
Zhang J T, Zhao P H, Yang S H, et al. Growth rhythm and models of the *Ulmus pumila* L. on nursery stage[J]. Acta Agriculturae Shanghai,2024,40(6):67-71.

[19] 王旭军 , 张日清 , 许忠坤 , 等 . 不同种源红榉苗期生长节律的研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2013,33(7):31-34.
Wang X J, Zhang R Q, Xu Z K, et al. Study on growth rhythm of different *Zelkova schneideriana* provenances at seedling stage[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2013,33(7):31-34.

[20] Gilmour A R, Gogel B J, Cullis B R, et al. ASReml User Guide Release 3.0[M]. VSN International Ltd, Hemel Hempstead, 2009:viii.

[21] Scolforo H F, Scolforo J R S, Thiersch C R, et al. A new model of tropical tree diameter growth rate and its application to identify fast-growing native tree species[J]. Forest Ecology & Management,2017,400:578-586.

[22] 黄佳聪 , 郭俊杰 , 曾杰 . 滇西地区西南桦无性系早期测定与生长节律研究 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(3):518-524.
Huang J C, Guo J J, Zeng J. Early selection of *Betula alnoides* clones and their growth rhythm in western Yunnan, China[J]. Forest Research,2017,30(3):518-524.

（下转第 145 页）

terrestrial vegetation cover changes in the Poyang lake basin[D]. Chongqing: Southwest University,2022:42-52.

[24] 黄宇玲 , 吴达胜 , 方陆明 . 基于逐步回归的 XGBoost 方法的森林蓄积量估测 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(6):72-80.
Huang Y L, Wu D S, Fang L M. Forest stock volume estimation based on XGBoost method of stepwise regression[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(6):72-80.

[25] 邱大鹅 , 张军以 , 杨晓雪 , 等 . 基于 XGBoost-PLUS 模型的成渝城市群生态安全格局多情景模拟及反规划优化 [J]. 生态学报 ,2025,45(16):7905-7920.
Qiu D E, Zhang J Y, Yang X X, et al. Multi-scenario simulation and future planning optimization of ecological security pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on XGBoost-PLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(16):7905-7920.

[26] 田智慧 , 尹传鑫 , 王晓蕾 . 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析 [J]. 环境科学 ,2023,44(2):816-827.
Tian Z H, Yin C X, Wang X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang lake basin[J]. Environmental Science,2023,44(2):816-827.

[27] 江名荣 . 浅析德兴市受重金属污染的现状及治理措施 [J]. 资源节约与环保 ,2013(7):243.
Jiang M R. Analysis of heavy metal pollution and control measures in Dexing City[J]. Resources Economization & Environmental Protection,2013(7):243.

[28] 江西省推进生态鄱阳湖流域建设行动计划的实施意见 [N]. 江西日报 ,2019-01-23(007).
Implementation opinions on promoting the construction of an ecological Poyang lake basin action plan in Jiangxi Province[N]. Jiangxi Daily,2019-01-23(007).

[29] 江西省水文监测中心 .2020 年鄱阳湖流域暴雨洪水 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 ,2024:47-81.
Jiangxi Provincial Hydrological Monitoring Center. Rainstorm and flood in the Poyang lake basin (2020)[M]. Beijing: China Water & Power Press,2024:47-81.

[30] 何杰霞 , 张福庆 , 辛雪 , 等 . 基于深度学习模型的生态安全预警与格局构建研究——以鄱阳湖流域为例 [J]. 地理科学 ,2026,46(8):1755-1768.
He J X, Zhang F Q, Xin X, et al. Ecological safety early warning and pattern construction based on deep learning models: a case study of the Poyang lake basin[J]. Geographical Science,2026,46(8):1755-1768.

[本文编校：吴　彬]

（上接第 132 页）

[23] 肖遥 , 楚秀丽 , 徐肇友 , 等 . 南方红豆杉 2 年生容器苗多点试验的生长节律家系变异 [J]. 林业科学研究 ,2016,29(2):238-244.
Xiao Y, Chu X L, Xu Z Y, et al. Family variation on growth rhythm of two-year-old container seedlings of *Taxus wallichiana* var. *mairei* in multi-location trials[J]. Forest Research,2016,29(2):238-244.

[24] 李培 , 阙青敏 , 吴林瑛 , 等 . 红椿不同种源的苗期生长节律研究 [J]. 华南农业大学学报 ,2017,38(1):96-102.
Li P, Que Q M, Wu L Y, et al. Growth rhythms of *Toona ciliata* seedlings from different provenances[J]. Journal of South China Agricultural University,2017,38(1):96-102.

[25] Li C M, Xia H, Bai H, et al. Genetic variation of height growth rhythm between clones of *Larix kaempferi* × *L. gmelini* based on logistic models[J]. Journal of Forestry Research,2018,29:1387-1394.

[26] Carles S, Lamhamedi M S, Beaulieu J, et al. Differences in growth and mineral nutrition of seedlings produced from ten white spruce seed orchards[J]. New Forests,2011,42:195-214.

[27] Nasr S M H, Savadkoohi S K, Ahmadi E. Investigation of salinity impacts on germination and growth of two forest tree species at seedling stage[J]. Journal of Forestry Research,2013,24(4):703-708.

[28] 焦月玲 . 南方红豆杉和三尖杉种源变异及生理遗传研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2006:38.
Jiao Y L. Study on provenance variation and physiology genetics of *Taxus chinensis* var. mairei and *Cephalotaxus fortunei*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2006:38.

[本文编校：吴　彬]