



周琳璿,周美才,贾婷,等.红花香椿苗木质量评价与生物量投资规律[J].江西农业大学学报,2025,47(4):1013–1022.
ZHOU L J,ZHOU M C,JIA T,et al.Quality evaluation of seedlings and biomass investment patterns of *Toona fargesii*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(4):1013–1022.

红花香椿苗木质量评价与生物量投资规律

周琳璿^{1,2},周美才³,贾婷^{1,2},曹雯^{1,2},廖国祥^{1,2},
吴晓^{1,2},朱天顺³,张露^{1,2*}

(1.江西农业大学 亚热带森林资源培育江西省重点实验室,江西 南昌 330045;2.江西特色林木资源培育与利用
2011协同创新中心,江西 南昌 330045;3.江西省安福县明月山林场,江西 吉安 343200)

摘要:【目的】旨在探讨不同等级红花香椿苗木的生物量投资规律与苗木质量指数间的关系。【方法】以468株红花香椿1年生实生苗为研究对象,在苗木停止生长时对苗木生长、形态指标、生物量进行测定,通过因子分析并结合平均值±标准差法进行苗木质量指数评价和等级划分。【结果】(1)1年生红花香椿苗木地径和苗高分别为1.37 cm和145.37 cm,苗木整株生物量和质量指数分别为59.93 g和0.66,苗木生长性状和各组分生物量的变异系数均大于29.64%,地径和苗高与生物量的正相关系数分别为0.89和0.60,均达极显著水平($P<0.01$)。(2)以地径或苗高将苗木分为3个等级,I级苗($D\geq 2.00$ cm, $H\geq 203.96$ cm);II级苗(0.76 cm $\leq D<2.00$ cm, 88.16 cm $\leq H<203.96$ cm);III级苗($D<0.76$ cm, $H<88.16$ cm),不同等级苗木间的生物量投资均存在显著差异($P<0.05$),地上生物量均高于地下生物量,说明红花香椿幼苗更倾向于投资地上生物量以促进苗高和地径生长。(3)以苗高分级的II级苗木的生长量与总生物量间拟合模型($y=0.15x+4.73$, $R^2=0.80$)效果最优。(4)苗木等级越优(I级)的苗木质量指数与生物量间的正相关关系越显著,说明生物量越大的苗木,其苗木质量越好。【结论】红花香椿苗木生物量越大其苗木质量越好,地径和苗高这2种指标可以较好地说明苗木整株的生物量,并以2种指标划分苗木等级,可以对苗木质量进行可靠评价。

关键词:红花香椿;苗木质量;分级评价;生物量投资

中图分类号:S718.5 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2025)04-1013-10

CSTR:32399.14.aauj.2025087

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quality evaluation of seedlings and biomass investment patterns of *Toona fargesii*

ZHOU Linjin^{1,2},ZHOU Meicai³,JIA Ting^{1,2},CAO Wen^{1,2},LIAO Guoxiang^{1,2},
WU Xiao^{1,2},ZHU Tianshun³,ZHANG Lu^{1,2*}

(1.Jiangxi Province Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.2011 Collaboration Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, Nanchang 330045, China; 3.Mingyueshan Forest Farm in Anfu County, Jiangxi Province, Ji'an, Jiangxi 343200, China)

收稿日期:2025-01-22 修回日期:2025-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32460387、31860202)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32460387,31860202)

作者简介:周琳璿,硕士生,orcid.org/0009-0003-0514-1136,zljrinko26@163.com;*通信作者:张露,教授,博士,主要从事森林培育和林木遗传改良研究,orcid.org/0000-0003-2168-0546,zhanglu856@mail.jxau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [Objective] This study aims to explore the relationship between the biomass investment patterns and the seedling quality index of different grades of *Toona fargesii* seedlings. [Method] The growth, morphological indexes and biomass of 468 annual seedlings of *T. fargesii* were measured when the seedlings stopped growing in winter. Factor analysis combined with the mean $\pm$ standard deviation method was employed to evaluate and classify the seedling quality index. [Result] (1) The results indicated that the ground diameter and seedling height of one-year-old *T. fargesii* seedlings were 1.37 cm and 145.37 cm, respectively. The total biomass and quality index of the seedlings were 59.93 g and 0.66, respectively. The coefficients of variation for growth traits and total biomass were both higher than 29.64%. The positive correlation coefficients between ground diameter and seedling height with biomass were 0.89 and 0.60, respectively, both reaching a highly significant level ($P < 0.01$). (2) Seedlings were classified into three grades based on diameter or height: Grade I seedlings ($D \geq 2.00$ cm, $H \geq 203.96$ cm); Grade II seedlings (0.76 cm $\leq D < 2.00$ cm, 88.16 cm $\leq H < 203.96$ cm); and Grade III seedlings ($D < 0.76$ cm, $H < 88.16$ cm). There were significant differences in biomass investment among the different grades of seedlings ($P < 0.05$). The aboveground biomass was consistently higher than the belowground biomass, indicating that *T. fargesii* seedlings tend to allocate more resources to aboveground growth to enhance seedling height and ground diameter development. (3) The fitted model assessing the relationship between growth quantity and total biomass for Grade II seedlings based on height was optimal, represented by the equation $y = 0.15x + 4.73$ with an R^2 value of 0.80. (4) The better the seedling grade (Grade I), the more significant the positive correlation between the seedling quality index and biomass, suggesting that seedlings with higher biomass possess higher quality. [Conclusion] The greater the biomass of *T. fargesii* seedlings, the higher their quality. Ground diameter and seedling height are two indicators that effectively reflect the total biomass of the seedlings. Classifying seedling grades based on these two indicators can provide a reliable evaluation of seedling quality.

Keywords: *Toona fargesii*; seedling quality; grade classification and evaluation; biomass investment

【研究意义】红花香椿(*Toona fargesii* A. Chev.)为楝科(Meliaceae)香椿属(*Toona*)的高大落叶乔木,主要分布于我国江西、福建、浙江等亚热带地区。其树干通直、速生,紫红色花,且木材色泽艳红,纹理美观,是优良的珍贵乡土用材树种。因其树高花小,不易观察花色,长期以来被误认为毛红椿(*Toona ciliata* var. *pubescens*)(花为白色),《浙江植物志》已将毛红椿校正更名为红花香椿^[1];本课题组通过连续几年的花期物候观察和叶绿体基因组分析(未发表),亦证实江西及周边省份的毛红椿为红花香椿。在“双碳”战略与林业转型升级的背景下,高效培育木材资源与提升森林质量成为紧迫需求。珍贵阔叶树种因材性优良、生态功能突出是重要的造林树种,但与针叶树种的研究相比,相关研究相对较少,优良珍贵阔叶树种苗木资源相对匮乏,制约了林业的可持续发展。红花香椿兼具生态与经济价值,具备满足高品质木材需求和改善生态环境的潜力;人工林培育中,苗木质量直接影响造林成活率与林分健康,为此,开展苗木质量评价,筛选优良种苗材料,对国储林阔叶珍贵树种的选育与推广,加快林分更新并提升经营水平具有深远意义。【前人研究进展】目前,学者们围绕红花香椿的生物学特性^[2]、种子性状^[3]、生长生理^[4]、施肥^[5]、混交树种选择^[6]、种间联结^[7]、居群遗传多样性^[8-9]、基因组和转录组^[10-11]等方面开展了大量研究,为红花香椿人工林培育和天然林更新提供技术支撑。但对人工林建园所需的红花香椿优质苗木的质量评价却较少涉及。近年来,针对降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、闽楠(*Phoebe bournei*)、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)和直干桉(*E. maideni*)等阔叶树种苗木质量评价也开展了相关的研究,并取得了显著进展。降香黄檀通过筛选不同容器和基质育苗提高苗木质量^[13]。闽楠在基质优化、苗木抗性筛选及人工林培育中的研究进一步揭示了育苗技术改良对提升苗木质量的关键作用^[14]。王晓丽等^[12]通过对蓝桉和直干桉超级苗早期选择发现,优良苗木营造的林分具有明显的生长优势,苗木质量评价有助于提升人工林质量。

【本研究切入点】在林业研究与生产中,苗木质量评价通常基于形态学指标(如苗高、地径、一级侧根

数量、分枝数量等)与生物量指标(如茎、根的鲜重和干重)^[15],但由于物种特性、生境差异及个体大小等因素的影响,苗木各器官的生物量分配往往呈动态变化^[16-18],单一指标易导致结果片面或失准,因此需综合多维度并兼顾不同个体大小与生长等级,以实现苗木质量更为准确、全面的评估。本研究选取1年生红花香椿实生苗为研究材料,通过线性回归与相关性分析系统量化形态、生长、生物量及苗木质量指数之间的关联度,并结合分级区间划定构建更加严谨、可操作的质量评价框架,随后运用回归模型进一步探讨形态指标与生物量分配对苗木质量指数的影响规律,从而为红花香椿优质苗木筛选和人工造林策略的科学制定提供重要参考,也可为其他珍贵阔叶树种的育苗与良种选育工作提供借鉴。【拟解决的关键问题】厘清不同质量等级红花香椿苗木在生长、形态和生物量分配等方面的差异,深入剖析其生物量投资规律;揭示苗木质量指数与生物量分配之间的关系,为科学构建苗木质量评价体系提供理论支撑;建立苗木质量分级方法,形成可操作、易推广的评价标准,为人工林培育中优质苗木的高效筛选提供技术保障;为后续红花香椿人工造林提供更具有针对性的苗木质量控制措施,也为其他珍贵阔叶树种的苗木培育与良种选育提供可借鉴的思路。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省安福县明月山林场苗圃(27°36'N,114°47'E),属亚热带季风湿润气候,年平均气温28.9℃,年平均无霜期279 d、日照时数1 649 h,年均降水量为1 553 mm,最冷月为1月,平均气温为5.9℃,最热月为7月,平均温度为28.9℃。土壤为红壤,含水率为19.03%,pH 5.33,土壤容重为1.85 g/cm³,有效磷含量为19.72 mg/kg,有机质含量为28.87 g/kg,全氮、全磷和全钾含量分别为2.34,1.64,4.71 mg/g。

1.2 试验材料

红花香椿种子采集于安福县羊狮慕林区红花香椿天然林4株成年母树,采种母树之间相距约100 m,母树平均胸径45 cm、高约16 m,种子千粒质量为(5.46±0.85) g。2023年2月在苗圃垦翻土壤深度20 cm以上,施0.30 kg/m²有机肥和0.20 kg/m²复合肥为底肥,做床,苗床宽1 m、长10 m,将采集的种子混合进行播种,覆土以不见种子为宜;当种子萌发出土后,选择阴雨天间苗,株行距10 cm×20 cm。定期开展除草松土、浇水追肥等田间管理。

1.3 指标测定

苗木落叶且停止生长后进行调查,采用随机抽样方法,每条苗床随机设置3个1 m×1 m样方,在6条苗床上共设置18个样方。采用整株收获法挖出样方中所有苗木并挂牌编号,共计468株。用游标卡尺测量苗木地径,卷尺测定苗高、主根长和侧根长,用天平称取茎和根的鲜重,在105℃烘箱中杀青30 min、65℃烘箱中烘至恒重时称取茎和根的干重。将茎干重作为地上生物量,根干重作为地下生物量,计算高径比、整株生物量、干物质含量及苗木质量指数。

$$\text{高径比} = \frac{\text{苗高}}{\text{地径}} \quad (1)$$

$$\text{整株生物量} = \text{地上生物量} + \text{地下生物量} \quad (2)$$

$$\text{干物质含量} = \frac{\text{地上生物量} + \text{地下生物量}}{\text{茎鲜重} + \text{根鲜重}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{苗木质量指数} = \frac{\text{地上生物量} + \text{地下生物量}}{\text{高径比} + \frac{\text{地上生物量}}{\text{地下生物量}}} \quad (4)$$

1.4 数据处理

对所有样本数据进行KMO(抽样适合性)检验和Bartlett's(巴特利特)球形检验。KMO检验用于评估变量间的相关性和偏相关性,其取值范围为0~1。KMO值越趋近于1,表明变量间的相关性越高,因子分析效果越显著。当KMO值大于0.7,表明数据具有较高的相关性,分析结果可靠。Bartlett's球形检验用于验证变量间是否相互独立,从而确保因子分析的适用性。当Bartlett's球形检验的 $P < 0.05$ 时,数据呈现球形分布,适合用于因子分析^[19]。

为深入探究红花香椿苗木生物量分配与地径、苗高之间的关系,计算各等级苗木的地径平方与苗高的乘积(D^2H),并分别与各等级苗木的单株总生物量进行相关分析。为了确保模型的准确性和可靠性,选用线性方程、指数方程和对数方程等多种函数形式来构建生物量估测模型,并筛选出拟合度最优的方程(即 R^2 值最大的方程)^[20],并绘制生物量最优模型图。数据分析采用SPSS 26进行样本平均值及标准差计算,以及Pearson相关性分析,并使用Origin软件绘图。

2 结果与分析

2.1 苗木生长性状与各组分生物量特征

红花香椿苗木的平均地径为 1.37 cm,变异系数为 44.73%,表明不同苗木地径变异较大。苗高极差为 251.00 cm,平均值为 145.37 cm,变异系数为 39.81%。平均地径和苗高均高于江西省地方标准 I 级苗标准($D \geq 1.20$ cm, $H \geq 100$ cm)。高径比为 115.61,变异系数 42.19%,反映了苗木形态多样性。平均主根长为 19.97 cm,变异系数为 37.99%,表明主根长差异大。侧根数变异系数高达 53.39%,说明侧根数量在不同苗木间的变异最为显著。平均侧根长为 15.93 cm,变异系数为 40.20%。茎鲜重和根鲜重分别为 82.34 g 和 55.36 g,变异系数分别高达 109.79% 和 110.89%,根茎鲜重比的变异系数为 102.60%,表明不同苗木间的生物量积累存在极大差异,地上生物量和地下生物量分别为 40.34 g 和 20.21 g,变异系数分别高达 112.66% 和 115.35%,反映了苗木在资源分配上的不同策略由表 1 可知。

表 1 红花香椿苗木的生长性状及生物量

Tab.1 Growth traits and biomass of *Toona fargesii* seedlings

项目 Items	极差 Range	平均值±标准差 Mean±standard deviation	方差 Variance	变异系数/% Coefficient of variation
地径/cm Ground diameter	3.79	1.37±0.61	0.38	44.73
苗高/cm Seedling height	251.00	145.37±57.87	3348.72	39.81
高径比 Ratio of height to diameter	284.20	115.61±48.77	2378.78	42.19
主根长/cm Length of main root	73.80	19.97±7.59	57.56	37.99
侧根数/根 Number of lateral root	7.00	2.62±1.40	1.96	53.39
平均侧根长/cm Average lateral root length	52.55	15.93±6.40	41.00	40.20
茎鲜重/g Stem fresh weight	668.00	82.34±90.40	8172.97	109.79
根鲜重/g Fresh weight of root	453.00	55.36±61.39	3769.32	110.89
地上生物量/g Aboveground biomass	326.06	40.34±45.44	2065.12	112.66
地下生物量/g Belowground biomass	170.43	20.21±23.31	543.54	115.35
地上生物量/地下生物量 Aboveground biomass/ belowground biomass	8.29	2.39±1.23	1.52	51.48
整株生物量/g Whole plant biomass	495.91	59.93±67.23	4523.33	111.78
干物质含量/% Dry matter content	158.57	44.17±13.09	171.33	29.64
苗木质量指数 Quality index of seedling	7.05	0.66±0.87	0.75	130.85

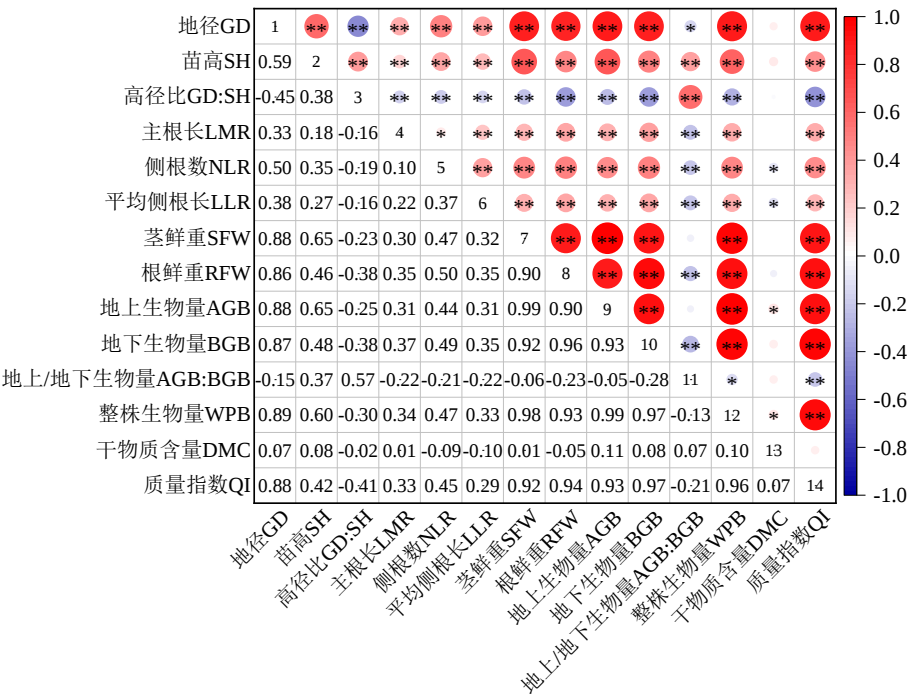
2.2 苗木质量指标间相关性分析

对地径、苗高、主根长、侧根长、地上生物量、地下生物量及干物质含量等进行KMO检验和Bartlett's球形检验(表2)。结果表明,KMO值为0.831(大于0.7),说明数据具有较高的相关性。Bartlett's球形检验的 P 值 <0.001 (小于0.05),说明数据呈现球形分布,适合用于因子分析。

除根茎鲜重比和干物质含量外,红花香椿生长指标和生物量间的相关系数均呈显著差异($P<0.05$)。苗高与其生长指标和各组分的生物量指标均呈极显著差异($P<0.001$),与地上生物量和整株生物量的相关系数分别为0.65和0.60;地径与地上生物量、地下生物量和整株生物量均呈极显著差异,相关系数分别为:0.88、0.87和0.89(图1)。地径和苗高作为最直观的生长指标,其与各组分的生物量密切相关,因此选取地径、苗高作为苗木分级的主要指标。

表 2 KMO 和 Bartlett's 检验
Tab.2 The test of KMO and Bartlett

KMO 取样适切性量数		0.831
KMO measure of sampling adequacy		
巴特利特球形度检验 Bartlett's test for sphericity	近似卡方	5 419.478
	自由度	45
	显著性	<0.001



GD: 地径; SH: 苗高; SH: GD: 高径比; LMR: 主根长; NLR: 侧根数; LLR: 平均侧根长; SFW: 茎鲜重; RFW: 根鲜重; RFW: SFW: 茎根鲜重比; AGB: 地上生物量; BGB: 地下生物量; AGB: BGB: 地上生物量: 地下生物量; WPB: 整株生物量; DMC: 干物质含量。

GD: ground diameter; SH: seedling height; SH: GD: ratio of height to diameter; LMR: length of main root; NLR: number of lateral root; LLR: average lateral root length; SFW: stem fresh weight; RFW: fresh weight of root; RFW: SFW: ratio of fresh weight of root and stem; AGB: aboveground biomass; AGB: BGB: aboveground biomass/belowground biomass; WPB: whole plant biomass; DMC: dry matter content.

图 1 红花香椿生长性状与生物量间的相关性分析
Fig.1 Correlation analysis between growth traits and biomass of *Toona fargesii*

2.3 苗木分级及各等级苗木质量特征

本研究根据苗木地径和苗高,将苗木划分为 3 个等级(表 3),地径 $D \geq 2.00$ cm 或苗高 $H \geq 203.96$ cm 的苗木为 I 级苗, $0.76 \text{ cm} \leq D < 2.00 \text{ cm}$ 或 $88.16 \text{ cm} \leq H < 203.96 \text{ cm}$ 的苗木为 II 级苗, $D < 0.76 \text{ cm}$ 或 $H < 88.16 \text{ cm}$ 的苗木为 III 级苗。按地径划分出的 I 级、II 级和 III 级苗占比分别为 16.45%、67.74% 和 15.81%,按地径或苗高划分的 II 级苗数量均最多(超过 60%),表明中等大小的苗木占主导地位。

不同等级苗木的地径、苗高、主根长、侧根长以及地上和地下生物量均存在显著差异。随着地径和苗高等级提高,苗木的地径、苗高、根系长度、生物量及干物质含量均呈显著增加趋势。I 级苗在所有指标上均表现最佳,且显著高于其他 2 个等级;III 级苗的各项形态指标则显著低于其他等级,尤其是 I 级苗的生物量显著高于 II 级苗和 III 级苗,表明 I 级苗生长性状更优、生物量积累多,而 III 级苗生长状况相对较差,不适合出圃。上述结果进一步验证了以地径和苗高为主要依据进行苗木分级的合理性及准确性。

表3 红花香椿苗木分级基本特征
Tab.3 Basic characteristics of classification for *Toona fargesii* seedlings

分级指标 Classification index	地径/cm Ground diameter			苗高/cm Seedling height		
等级 Grade	I	II	III	I	II	III
分级标准 Grading standard	$D \geq 2.00$	$0.76 \leq D < 2.00$	$D < 0.76$	$H \geq 203.96$	$88.16 \leq H < 203.96$	$H < 88.16$
株数 Number of plants	77	317	74	85	295	88
比例/% Ratio	16.45	67.74	15.81	18.16	63.03	18.80
地径/cm Ground diameter	2.44 ± 0.05^a	1.30 ± 0.02^b	0.63 ± 0.01^c	1.99 ± 0.08^a	1.35 ± 0.03^b	0.89 ± 0.03^c
苗高/cm Seedling height	198.27 ± 5.42^a	146.38 ± 2.91^b	90.36 ± 4.38^c	230.51 ± 1.98^a	146.33 ± 1.88^b	63.59 ± 1.82^c
高径比 Seedling height/ground diameter	82.12 ± 2.18^c	117.41 ± 2.59^b	145.13 ± 6.80^a	130.25 ± 5.02^a	122.72 ± 2.77^b	79.64 ± 3.81^c
主根长/cm Length of main root	23.63 ± 0.97^a	19.83 ± 0.41^b	16.61 ± 0.67^c	21.90 ± 0.93^a	19.90 ± 0.41^b	18.23 ± 0.82^c
侧根长/cm Length of lateral root	19.38 ± 0.59^a	16.30 ± 0.34^b	10.78 ± 0.69^c	18.61 ± 0.59^a	15.96 ± 0.34^b	13.26 ± 0.84^c
地上生物量/g Aboveground biomass	115.27 ± 6.93^a	30.57 ± 1.23^b	5.45 ± 0.49^c	93.81 ± 7.43^a	34.64 ± 1.68^b	8.19 ± 0.67^c
地下生物量/g Belowground biomass	59.99 ± 3.35^a	14.96 ± 0.67^b	2.83 ± 0.34^c	42.07 ± 3.93^a	18.34 ± 1.06^b	7.39 ± 0.77^c
地上生物量/地下生物量 AGB/BGB	1.89 ± 0.07^c	2.46 ± 0.08^a	2.29 ± 0.16^b	2.72 ± 0.12^a	2.46 ± 0.08^b	1.56 ± 0.10^c
整株生物量/g Whole plant biomass	170.78 ± 86.76^a	45.19 ± 32.08^b	8.20 ± 5.89^c	132.08 ± 100.90^a	52.49 ± 45.61^b	15.58 ± 12.73^c
干物质含量/% Dry matter contents	44.67 ± 1.20^a	43.42 ± 0.74^a	45.16 ± 2.13^a	44.50 ± 1.67^a	44.01 ± 0.77^a	42.95 ± 1.44^a
苗木质量指数 Quality index of seedling	2.11 ± 1.17^a	0.67 ± 3.74^b	0.06 ± 0.05^b	1.33 ± 1.38^a	0.58 ± 0.66^b	0.26 ± 0.29^c

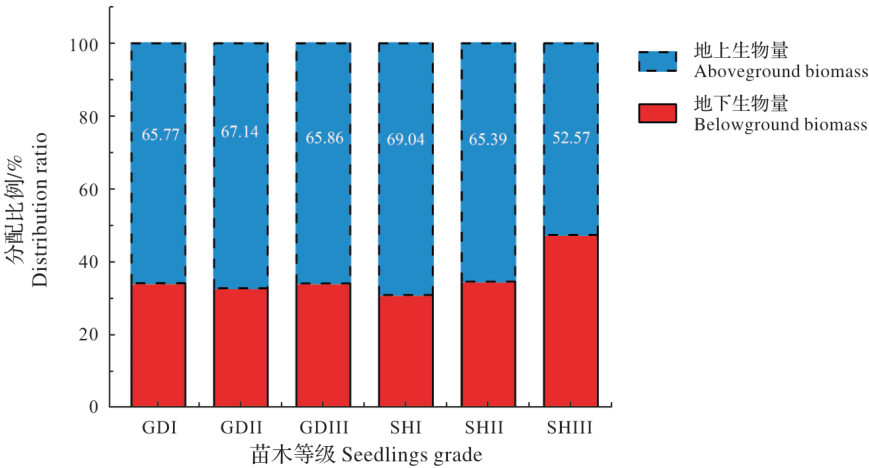
数据为平均值±标准差,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。
Data are presented as mean ± standard deviation. Different letters indicated significant differences ($P < 0.05$).

2.4 不同等级苗木的生物量分配特征

方差分析结果显示,不同等级苗木地上部分与地下部分的生物量存在较大差异(图2)。以地径为分级依据,各等级红花香椿苗木地上生物量占比($60.00\% \geq$)明显高于地下生物量,其中II级苗的地上生物量占比最高(67.14%),而I级苗地下生物量占比最高(34.23%)。这表明,按地径进行分级时,苗木更倾向于在地上部分进行生物量积累,不同等级之间的地上生物量和地下生物量占比也存在差异,其中I级苗根系更发达。以苗高为分级依据时,各等级红花香椿苗木地上生物量($50.00\% \geq$)仍然明显高于地下生物量,但III级苗的地上生物量和地下生物量基本持平(约50.00%),说明在苗高为分级标准下,苗木依旧倾向于分配更多的生物量到地上部分,但III级苗的地下生物量占比显著上升。总体而言,各等级苗木在生物量分配上表现出一定的差异。

2.5 不同等级苗木生长量与生物量的拟合模型

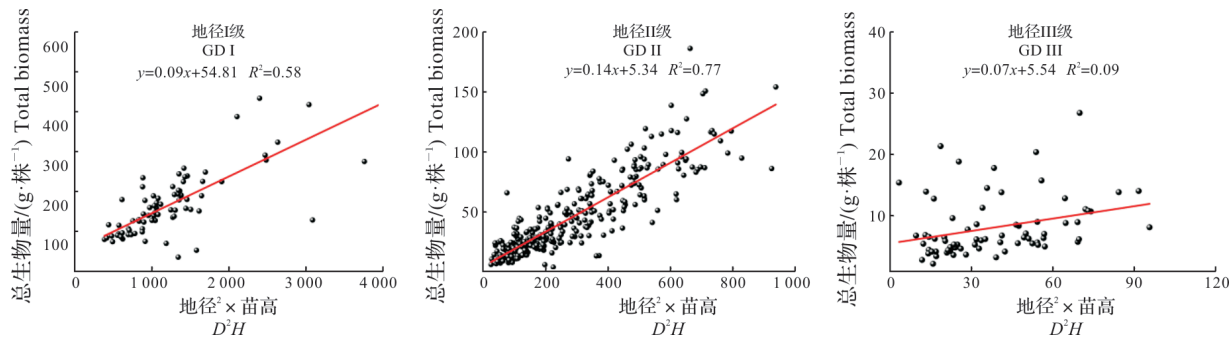
地径分级结果(图3)表明,各等级苗木生长量与生物量之间均可通过线性方程获得最佳拟合。其中II级苗 D^2H 与总生物量的线性关系拟合效果最佳($y = 0.14x + 5.34, R^2 = 0.77$),当 $D^2H = 1$ 时,II级苗的生物量为5.48 g。I级苗 D^2H 与总生物量的线性关系拟合效果同样显著($R^2 = 0.58$),当 $D^2H = 1$ 时,I级苗的生物量为54.90 g。苗高分级结果(图4)显示,各等级苗木生长量与生物量之间的最佳拟合方程为线性方程,其中II级苗 D^2H 与总生物量的线性关系拟合度最佳($y = 0.15x + 4.73, R^2 = 0.80$),I级苗木 D^2H 与总生物量的线性方程为: $y = 0.11x + 16.91, R^2 = 0.76$,拟合效果呈显著水平。总体上,以地径或苗高分级时,各等级苗木生长量与生物量所构建的最优估测模型均为线性方程,且II级苗的 D^2H 与总生物量间的拟合度最高。这表明通过生长特性并依据线性模型来推测II级苗的生物量,具有较高准确性和可靠性。



以地径分级(GD I、GD II、GD III),以苗高分级(SH I、SH II、SH III)。
Graded by ground diameter(GD I, GD II, GD III) and seedling height(SH I, SH II, SH III).

图2 红花香椿不同等级苗木生物量的分配比例

Fig.2 The biomass allocation proportion of different grade seedlings of *Toona fargesii*



GD I:地径I级;GD II:地径II级;GD III:地径III级。

GD I: ground diameter I, GD II: ground diameter II, GD III: ground diameter III.

图3 以地径分级红花香椿苗木各等级生物量最优估测模型

Fig.3 The optimal estimation model of biomass of each grade based on ground diameter

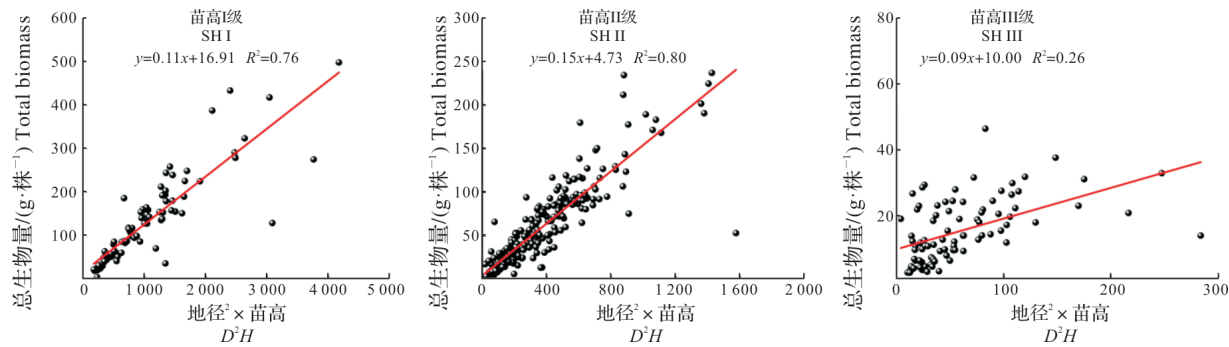


图4 以苗高分级红花香椿苗木各等级生物量最优估测模型

Fig.4 The optimal estimation model of biomass of each grade based on seedling height

2.6 不同等级苗木质量指数与生物量投资间的关系

红花香椿苗木质量指数与苗木生物量投资之间关联密切(图5)。以地径分级时,I级苗的地上生物量和总生物量与苗木质量指数间的线性关系达极显著水平($P<0.01$)(图5A、图5C),从I级苗到III级苗,生物量投资与苗木质量指数间的线性关系逐渐变弱。以苗高分级时,I级苗的总生物量与苗木质量指数间呈极显著的正相关($R^2=0.96$),II级苗和III级苗总生物量和苗木质量指数间呈显著线性关系($P<0.05$)(图5F)。II级苗地下生物量与苗木质量指数间的线性拟合最好($R^2=0.92$)(图5E),而地上生物量和总生物量与苗木质量指数间的线性拟合系数随苗木等级的增加(I~III级)逐渐降低(图5D、图5F)。总体来看,苗木等级越优(I级),其苗木质量指数与生物量投资之间的线性关系越显著。

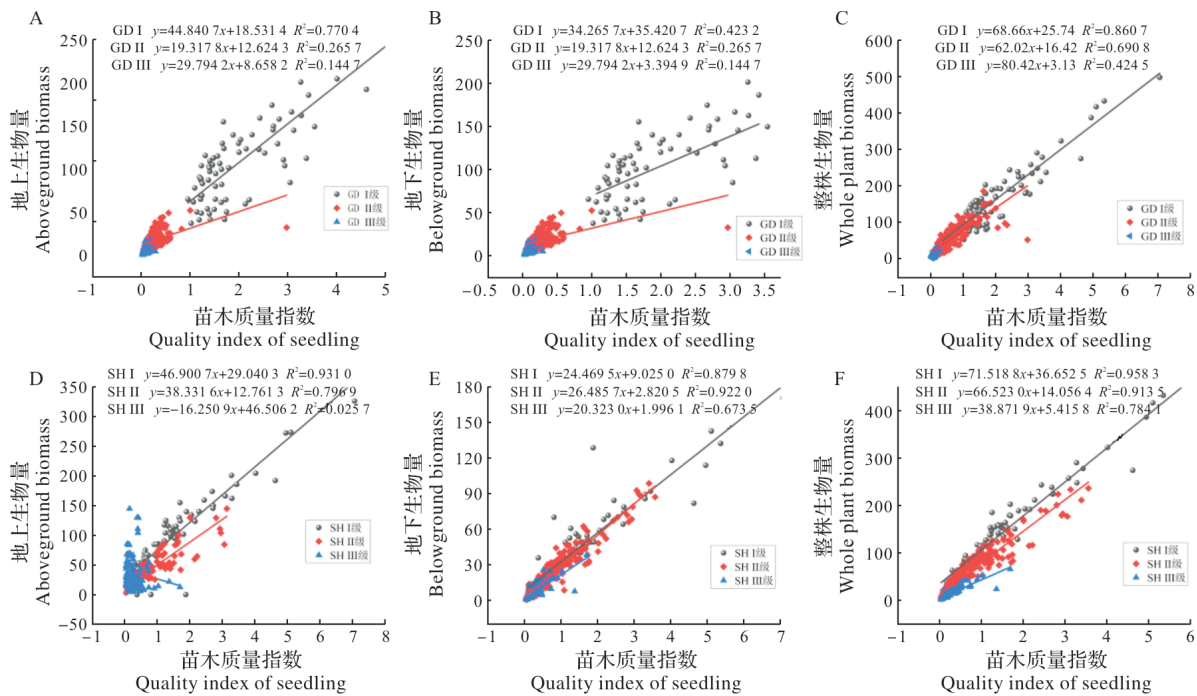


图5 苗木质量指数与生物量投资之间的关系

Fig.5 Relationship between seedling quality index and biomass investment

3 讨论

本研究表明地径与苗高,在红花香椿苗木质量评价体系中占据核心地位,地径对苗木的抗逆性能及造林后的成活率具有直接影响,而苗高则能够映射出遗传潜能及生长环境的适应性。因此,在构建苗木质量评估框架时,地径与苗高作为关键参数,其重要性不容忽视^[15]。通过相关性分析,笔者发现地径与苗高与地上部生物量、地下部生物量及全株生物量之间均存在高度正相关关系,且这种相关性达到了极显著水平,从而验证了地径与苗高作为红花香椿苗木分级核心指标的合理性。基于平均值±标准差的方法^[15],笔者将红花香椿苗木细分为3个等级:依据地径划分, $D \geq 2.00$ cm的苗木被归为I级,展现出优越的生长态势; D 介于0.76 cm至2.00 cm之间的为II级,生长状况良好; $D < 0.76$ cm的则归为III级,其生长量相对较小。以苗高为分类依据, $H \geq 203.96$ cm的苗木属于I级,长势优良; H 在88.16 cm至203.96 cm范围内的为II级,生长速率适中; $H < 88.16$ cm的则为III级,生长速度较慢。此苗木分级体系不仅为生物量投资分配的研究奠定了重要基础,同时也为红花香椿苗木的培育实践与管理策略提供了科学依据与参考。

生物量在植物各个器官间的分配被视为植物长期适应不同环境条件的一种内在机制,受植物独特生理特性与复杂形态结构的共同调控^[21]。其中,个体大小作为影响生物量分配的一个关键因素,在不同的生长阶段会呈现出独特的分配特点^[22],如植物生长初期更倾向于通过减少地下生物量和增大地上生物量的策略,将更多能量用于其高生长^[23]。本研究采用基于地径或苗高的独立分级方法,探究红花香椿苗木在不同生长等级下生物量的分配,结果表明在2种分级方法中红花香椿苗木的地上生物量均大于地下生物量,说明1年生红花香椿更倾向于不断积累茎干生物量来促进苗木的高度和粗度生长。在不同等级苗木中,地上生物量和地下生物量呈现不同变化,说明通过不同的分级方式,各等级苗木对地上生物量及地下生物量的分配方式有所差异。由于红花香椿为落叶树种,取样时1年生苗木地上部分主要由茎干构成,而地下部分则由根部组成。茎干生物量普遍高于根部生物量,这与李鑫等^[22]对云南松幼苗生物量分配的研究结果一致。植物在生长初期,倾向于将更多的生物量投资于地上部分的茎干,以支持其向上生长和拓展生存空间。以地径分级时的结果表明,3个等级苗木在生物量分配比例上并未表现出显著差异,与程远峰等^[21]和何怀江等^[24]的研究结果相契合,反映出不同生长等级的苗木,根部生物量的分配也相对稳定,即随着苗木大小的变化不会发生显著波动,这一策略有助于植物在复杂多变的环境中保持根部的生长和发育。这种地上生物量与地下生物量的投资规律的变化反映植物在生物量分配上具有灵活

性和适应性,能够根据自身的生长需求和外部环境进行调控。

在探讨不同等级苗木生物量估测模型构建过程中发现,基于地径和苗高分级构建模型时,红花香椿最优的单株生物量模型多为线性方程,杨昆等^[25]、张亚茹等^[26]多位学者也针对多个地区不同灌木林林木器官或树种的生物量模型进行探究,与本研究结果相一致,认为线性模型是最优选择。另外,通过探索苗木质量指数与生物量之间的关系,综合评价红花香椿各等级苗木质量,结果发现苗木等级越优(I级苗),苗木质量指数与生物量间也呈现线性关系。对于红花香椿来说,不论哪种分级方式,整株生物量越大,苗木质量指数越高,意味着苗木质量越好。

4 结 论

红花香椿一年生实生苗生长变异较大,地径和苗高均可较好地反映苗木整株生物量。以苗高和地径均可划分苗木等级,且不同等级的苗木在生长策略上呈现出一致性,即倾向于将更多的资源投入到地上部位的生物量构建。地径与苗高、生物量与苗木质量指数之间关系均是线性关系,可通过苗高和地径等生长指标较准确地评估红花香椿苗木质量。

参考文献 References:

- [1] 陈锋,谢文远,张水利,等.浙江种子植物资料订补(II)[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2020,19(6):96-102.
CHEN F, XIE W Y, ZHANG S L, et al. Additional notes on the seed plants in Zhejiang(II)[J]. Journal of Hangzhou normal university(natural science edition), 2020, 19(6):96-102.
- [2] 刘军,张海燕,姜景民,等.毛红椿种实和苗期生长性状地理种源变异[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(3):55-59.
LIU J, ZHANG H Y, JIANG J M, et al. Geographic variation of seed/fruit and seedling growing traits in *Toona ciliata* var. *pubescens*[J]. Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition), 2011, 35(3):55-59.
- [3] 贾婷,杜宣瑾,张露,等.毛红椿种子性状的种源差异及综合评价[J].森林与环境学报,2023,43(5):548-554.
JIA T, DU X J, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of seed traits and provenance-associated trait differences in *Toona ciliata* var. *pubescens*[J]. Journal of forest and environment, 2023, 43(5):548-554.
- [4] 潘俊彬,刘远生,张露,等.施肥对毛红椿幼林生长及叶片生理特征的影响[J].广西植物,2024,44(1):147-156.
PAN J B, LIU Y S, ZHANG L, et al. Effects of fertilization on young forest growth and leaf physiological characteristics of *Toona ciliata* var. *pubescens*[J]. Guihaia, 2024, 44(1):147-156.
- [5] 刘文剑,金建儿,李彦杰,等.水分和氮磷配比施肥对毛红椿幼苗生长、养分分配及叶绿素荧光特性的影响[J].西部林业科学,2021,50(6):83-90.
LIU W J, JIN J E, LI Y J, et al. Effects of waters, fertilization with different nitrogen and phosphorus ratios on the growth, nutrient distribution and chlorophyll fluorescence characteristics of *Toona ciliata* var. *pubescens* seedlings[J]. Journal of west China forestry science, 2021, 50(6):83-90.
- [6] 黄红兰,蔡军火,彭欢,等.毛红椿混交树种选择及其幼龄林生长效应[J].森林与环境学报,2020,40(5):497-504.
HUANG H L, CAI J H, PENG H, et al. Selection of tree species mixed with *Toona ciliata* var. *pubescens* and their growth effects in young forests [J]. Journal of forest and environment, 2020, 40(5):497-504.
- [7] 付方林,张露,杨清培,等.毛红椿天然林优势种群的种间联结性研究[J].江西农业大学学报,2007(6):982-987.
FU F L, ZHANG L, YANG Q P, et al. A study on the interspecific association of dominant species in *Toona ciliata* var. *pubescens* natural forests communities[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2007(6):982-987.
- [8] 刘军,姜景民,邹军,等.中国特有濒危树种毛红椿核心和边缘居群的遗传多样性[J].植物生态学报,2013,37(1):52-60.
LIU J, JIANG J M, ZHOU J, et al. Genetic diversity of central and peripheral populations of *Toona ciliata* var. *pubescens*, an endangered tree species endemic to China[J]. Chinese journal of plant ecology, 2013, 37(1):52-60.
- [9] WANG Q, PAN J, KE Y, et al. Impact of aspect on arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community composition in a natural *Toona ciliata* var. *pubescens* forest in subtropical China[J]. Forests, 2022, 13(12):2100.
- [10] 钟秋蔚,马际凯,贾婷,等.毛红椿 *TcNAC2* 基因克隆及在干旱胁迫下的表达分析[J].江西农业大学学报,2023,45(5):1051-1060.
ZHONG Q W, MA J K, JIA T, et al. Cloning and expression analysis of NAC transcription factor gene *TcNAC2* from *Toona ciliata* var. *pubescens* under drought stress[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(5):1051-1060.

- [11] CHENG Q Q, MA J K, GUO C C, et al. Insights into the root sprouts of *Toona fargesii* in a natural forest: from the morphology, physiology, and transcriptome levels[J]. *Forests*, 2024, 15(2): 335.
- [12] 王晓丽, 杨再国, 曹梦涵, 等. 蓝桉及直干桉超级苗初步选择研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(4): 89-93.
WANG X L, YANG Z G, CAO M H, et al. Preliminary selection of super seedlings of *Eucalyptus globules* and *Eucalyptus maideni*[J]. *Journal of southwest forestry university (natural sciences)*, 2018, 38(4): 89-93.
- [13] 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.
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.
- [14] YANG Z J, WU X H, GROSSNICKLE S C, et al. Formula fertilization promotes *Phoebe bournei* robust seedling cultivation[J]. *Forests*, 2020, 11(7): 781.
- [15] 李亚麒, 陈诗, 孙继伟, 等. 2年生云南松苗木分级与生物量分配关系研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(5): 25-31.
LI Y Q, CHEN S, SUN J W, et al. The relationships between classification and biomass allocation of 2 years old *Pinus yunnanensis* seedlings[J]. *Journal of southwest forestry university (natural sciences)*, 2020, 40(5): 25-31.
- [16] NICOTRA A B, ATKIN O K, BONSER S P, et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate[J]. *Trends in plant science*, 2010, 15(12): 684-692.
- [17] 罗明道, 洪舟, 李科, 等. 交趾黄檀1年生容器苗分级标准研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 76-82.
LUO M D, HONG Z, LI K, et al. Grading standards of one-year-old container seedlings of *Dalbergia cochinchinensis*[J]. *Journal of south China agricultural university*, 2019, 40(2): 76-82.
- [18] BERNACCHI C J, COLEMAN J S, BAZZAZ F A, et al. Biomass allocation in old-field annual species grown in elevated CO₂ environments: no evidence for optimal partitioning[J]. *Global change biology*, 2000, 6(7): 855-863.
- [19] WEINER J. Allocation, plasticity and allometry in plants[J]. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*, 2004, 6(4): 207-215.
- [20] LUO Y, WANG X, ZHANG X, et al. Root:shoot ratios across China's forests: forest type and climatic effects[J]. *Forest ecology and management*, 2012, 269: 19-25.
- [21] 程远峰, 国庆喜, 李晓娜. 东北天然次生林下木树种的生物量器官分配规律[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2146-2154.
CHENG Y F, GUO Q X, LI X N. Biomass allocation of understory plants in a secondary forest in Northeast China[J]. *Chinese journal of ecology*, 2010, 29(11): 2146-2154.
- [22] 李鑫, 李昆, 段安安, 等. 不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 41-50.
LI X, LI K, DUAN A A, et al. Biomass allocation and allometry of *Pinus yunnanensis* seedlings from different provenances[J]. *Journal of Beijing forestry university*, 2019, 41(4): 41-50.
- [23] 李树萍, 董琼, 李世民, 等. 树番茄幼苗生长及氮积累与分配对光照和氮素添加的响应[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(1): 156-168.
LI S P, DONG Q, LI S M, et al. Responses of *Cyphomandra betacea* Sendt. seedling growth and nitrogen accumulation and allocation to light and nitrogen addition[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(1): 156-168.
- [24] 何怀江, 张春雨, 赵秀海, 等. 吉林蛟河次生针阔混交林群落结构与微地形关系[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 13-17.
HE H J, ZHANG C Y, ZHAO X H, et al. Associations between community structure and microtopography in mixed broadleaf-conifer forest of Jiaohe, Jilin Province[J]. *Journal of northeast forestry university*, 2014, 42(5): 13-17.
- [25] 杨昆, 管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型[J]. 生态学报, 2007(2): 705-714.
YANG K, GUAN D S. Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2007(2): 705-714.
- [26] 张亚茹, 欧阳旭, 李跃林, 等. 我国亚热带灌丛群落特征及生物量的定量计算[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(9): 71-79.
ZHANG Y R, OU Y X, LI Y L, et al. Shrub community characteristics and quantitative calculation of theirs biomass in southern China[J]. *Journal of central south university of forestry & technology*, 2013, 33(9): 71-79.

(责任编辑: 刘玉香)