

金叶银杏杂交 F₁ 代苗木生长和叶色变化分析

王改萍¹, 丁延朋², 曹福亮^{1,3,①}, 章雷¹, 陈慧¹, 赵群¹

(1. 南京林业大学林学院 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 福建省林业勘察设计院, 福建 福州 350001;
3. 江苏农林职业技术学院, 江苏 镇江 212400)

摘要: 以金叶银杏 (*Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’) 为母本、银杏 (*G. biloba* Linn.) 为父本杂交产生的 F₁ 代 (包括黄叶型 I、绿叶型 I、黄叶型 II、绿叶型 II) 实生苗为材料, 当地品种 ‘泰兴大佛指’ (‘Taixing Dafozhi’) 为对照, 利用 Logistic 方程拟合苗木生长模型, 探究各材料苗木生长规律及代谢物含量和叶色的动态变化特征。结果表明: 杂交 F₁ 代黄叶型苗高呈 “S” 型增长, 绿叶型苗高呈对数型增长, 先快后慢; 所有材料的地径均呈 “S” 型增长。在苗木生长 150 d 时, 杂交 F₁ 代不同苗木间的单株质量差异不显著 ($P>0.05$)。在不同生长时间, 可溶性糖含量均表现为绿叶型 I 高于黄叶型 I、绿叶型 II 高于黄叶型 II; 在 120 d 时, 各材料的淀粉含量较 90 d 大幅升高, 且黄叶型 I 和绿叶型 I 的淀粉含量显著 ($P<0.05$) 高于其他材料; 在 90~120 d, 可溶性蛋白质含量表现为黄叶型 I 高于绿叶型 I、黄叶型 II 高于绿叶型 II。在 150 d 时, 总黄酮含量表现为 ‘泰兴大佛指’ 显著高于 4 个杂交 F₁ 代, 黄叶型 I 高于绿叶型 I、黄叶型 II 高于绿叶型 II。在 30~90 d, 黄叶型的亮度参数值 (L^*)、红/绿色相值 (a^*)、黄/蓝色相值 (b^*) 整体上随时间推移显著降低, 且 L^* 和 b^* 均表现为黄叶型显著高于绿叶型。在 30~90 d, 黄叶型的总叶绿素含量随时间推移逐渐升高, 而绿叶型的总叶绿素含量在 60 d 达到最大值。苗木质量评价结果显示: 苗木质量排名由高到低依次为 ‘泰兴大佛指’、黄叶型 I、黄叶型 II、绿叶型 I、绿叶型 II。综上所述, 金叶银杏杂交 F₁ 代中黄叶型实生苗质量优于绿叶型。

关键词: 金叶银杏; 杂交选育; Logistic 方程; 叶色; 苗木质量评价

中图分类号: Q945.3; S664.3; S722.8⁺9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)04-0001-11
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.04.01

Analysis on growth and leaf color variation of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’ WANG Gaiping¹, DING Yanpeng², CAO Fuliang^{1,3,①}, ZHANG Lei¹, CHEN Hui¹, ZHAO Qun¹ (1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Fujian Forestry Prospect and Design Institute, Fuzhou 350001, China; 3. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang 212400, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(4): 1-11

Abstract: Taking *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’ as female parent and *G. biloba* Linn. as male parent, their hybrid F₁ generation (including yellow leaf type I, green leaf type I, yellow leaf type II, green leaf type II) seedlings were used as materials and local cultivar ‘Taixing Dafozhi’ was used as the control, the seedling growth model was established by using Logistic equation, and the growth rhythm and dynamic change characteristics of metabolite content and leaf color of each material were investigated. The results show that the seedling heights of yellow leaf types of hybrid F₁ generations show an “S” type increase, while those of green leaf types show a logarithmic increase, which is first fast and then slow; the ground diameters of all materials show an “S” type increase. At 150 d of seedling growth, the differences in single plant mass between different seedlings of hybrid F₁ generations are not significant

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 江苏省科技项目 (BE2021367); 江苏省高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 王改萍 (1969—), 女, 山西榆社人, 博士, 副教授, 主要研究方向为经济林栽培及利用。

① 通信作者 E-mail: fuliangcaonjfu@163.com

引用格式: 王改萍, 丁延朋, 曹福亮, 等. 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木生长和叶色变化分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(4): 1-11.

($P>0.05$). At different growth times, soluble sugar content is higher in green leaf type I than in yellow leaf type I, and higher in green leaf type II than in yellow leaf type II; at 120 d, starch content in each material increases greatly compared with 90 d, and starch contents in yellow leaf type I and green leaf type I are significantly ($P<0.05$) higher than the other materials; during 90–120 d, soluble protein content is higher in yellow leaf type I than in green leaf type I, and higher in yellow leaf type II than in green leaf type II. At 150 d, total flavonoid content in ‘Taixing Dafozhi’ is significantly higher than four hybrid F_1 generations, which is higher in yellow leaf type I than in green leaf type I, and higher in yellow leaf type II than in green leaf type II. During 30–90 d, lightness parameter value (L^*), red/green phase value (a^*), and yellow/blue phase value (b^*) of yellow leaf types significantly decrease with the elongation of time in general, and both L^* and b^* of yellow leaf types are significantly higher than green leaf types. During 30–90 d, total chlorophyll contents in yellow leaf types gradually increase with the elongation of time, while those in green leaf types reach the highest value at 60 d. The evaluation result of seedling quality shows that the seedling quality ranking from high to low is ‘Taixing Dafozhi’, yellow leaf type I, yellow leaf type II, green leaf type I, green leaf type II. In conclusion, the seedling qualities of yellow leaf types of hybrid F_1 generations of *G. biloba* are better than green leaf types.

Key words: *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’; cross breeding; Logistic equation; leaf color; seedling quality evaluation

银杏(*Ginkgo biloba* Linn.)是中国本土孑遗树种,集食用、药用、材用和观赏等价值于一身^[1-3]。金叶银杏(*Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’)为银杏的一个芽变品系,是近年来选育的银杏新品系,具有独特的叶色性状及较高的药用价值^[4]。金叶银杏叶色从4月初萌芽开始呈金黄色,至7月转绿,之后与银杏(绿叶)叶色基本一致,到10月再次转黄^[5]。已有研究者对金叶银杏开展相关研究:郁万文等^[6]对金叶银杏叶片色素含量进行了系统研究,发现黄叶中的叶绿素a含量(Chla)、叶绿素b含量(Chlb)、类胡萝卜素含量(Car)明显低于绿叶,但在叶色发育过程中,Chla、Chlb、Car均升高,认为Chla/Car、Chlb/Car较低是叶片呈现黄色的主要原因;叶威等^[7]和王志勇等^[8]研究发现金叶银杏叶片黄酮类化合物含量高于银杏(绿叶)。相关学者对金叶银杏生长适应性、光合特性等方面进行研究后认为湖北安陆和江苏南京适于金叶银杏的推广利用^[9-10]。

目前金叶银杏主要来源于嫁接苗木,各地的金叶银杏起源相同或相近,导致其在种植多年后出现诸多问题,如叶色退化、树干直立性不强、树冠形态不优美等,影响了金叶银杏优良苗木的培育及发展^[9]。近年来,各地嫁接的金叶银杏逐渐进入结实阶段,可以通过控制授粉等措施获得较为充足的种子,为实生苗的培育及优选工作奠定基础^[4,11]。研究表明金叶银杏实生苗在叶色保持、植株生长等方面普遍优于同龄嫁接苗,且实生苗在药用方面的优势更为突

出^[5,11-12]。但目前实生金叶银杏种子来源不明,苗木质量参差不齐,严重制约了实生苗在生产上的推广利用。通过人为控制授粉获得优质金叶银杏资源,是解决目前金叶银杏苗木生产混乱的有效途径^[13]。笔者在前期研究基础上^[14],选择湖北安陆地区的金叶银杏雌树和江苏南京地区的2株成年银杏雄树进行人工授粉,探索金叶银杏杂交 F_1 代苗木的生长规律及代谢物含量和叶色的动态变化特征,并对其进行苗木质量评价,以期在金叶银杏优良品种(品系)的筛选提供材料,为实现金叶银杏优良观赏及药用品种(品系)的大面积种植奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

研究地位于江苏省泰兴市(东经119°54′~120°21′、北纬31°58′~32°23′),属亚热带季风气候区,四季分明,雨量集中,年均温为14.9℃,土壤以黄棕壤为主。

以湖北安陆的嫁接金叶银杏为母本、南京林业大学校内2株健康成年银杏(绿叶)为父本,组成杂交组合I和II。于2015年4月采集花粉,按1:60($m:V$)的比例将花粉和水混合,加入蔗糖(最终质量体积分数为10%),放入干净的喷雾器内。授粉时,打开3月已套袋隔离的雌树大枝上的纸袋,对准枝条进行喷雾,保证每个枝条都有花粉液滴后重新套

袋,待长出小果后去袋。于同年9月上旬采集种子,将种子进行低温层积催芽,翌年3月下旬进行大田播种(株距10 cm、行距15 cm),苗木于4月中旬出土,5月初展叶,根据叶色分为黄叶型和绿叶型。杂交组合I的种子发芽率为88.3%,结实率为90.4%, F_1 代即黄叶型I和绿叶型I的叶色分化率分别为56.9%和43.1%;杂交组合II的种子发芽率为82.7%,结实率为67.1%, F_1 代即黄叶型II和绿叶型II的叶色分化率分别为53.6%和46.4%。对照为当地的优良品种‘泰兴大佛指’(‘Taixing Dafozhi’)。

1.2 方法

1.2.1 生长指标测定 在苗木展叶后15 d(即苗木生长15 d)开始测定各项指标。根据出苗期及苗木叶色变化特征,确定各指标测定时间及采样次数^[5]。于5月至7月,每隔15 d测定1次;于7月至10月每隔30 d测定1次^[14]。于5月至10月,随机选取15株苗木,用卷尺(精度0.1 cm)测量苗高,用游标卡尺(精度0.01 mm)测量地径,重复测量3次。于10月(苗木停止生长),随机选取10株苗木,用分析天平(精度0.001 g)称量单株根、茎、叶质量,并计算单株质量(单株根、茎、叶质量之和)和根冠比(单株根质量与单株地上部质量的比值),重复称量3次。苗高、地径净增量为2个相邻测定时间的差值,起始净增量设为0;年净增量为苗木停止生长时(150 d)与起始时(苗木生长15 d)的差值。

1.2.2 代谢物含量测定

1.2.2.1 基础代谢物含量测定 于6月至9月,随机选取10株苗木,每株采集2~3枚成熟叶,混合后于-80℃保存、备用。可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白质含量参照付慧敏^[15]的方法测定,重复测定3次。

1.2.2.2 次生代谢物含量测定 于9月,随机选取10株苗木,每株采集2~3枚成熟叶,混合后于70℃烘箱中烘干至恒质量,研磨成粉后备用。总黄酮的提取及含量测定采用许继业等^[16]的方法,重复测定3次。分别计算槲皮素、山柰酚、异鼠李素含量后,计算总黄酮含量,计算公式为总黄酮含量=(槲皮素含量+山柰酚含量+异鼠李素含量) $\times 2.51$ 。

1.2.3 叶色和叶绿素含量测定 于6月至8月(即苗木生长30~90 d,叶色由黄转绿时期),随机选取10株苗木,采用X-Rite Ci64色差仪[爱色丽(上海)色彩仪器商贸有限公司]进行叶色测定^[17]。亮度参数值(L^*)表示色彩明暗,其数值越大表明色彩越亮;

红/绿色相值(a^*)表示色彩的红绿属性,数值由负变正表明颜色由绿变红;黄/蓝色相值(b^*)表示色彩的黄蓝属性,数值由负变正表明颜色由蓝变黄。共测定4次,每次3个重复。叶色测定完毕后,每株采集2~3枚叶,混匀后参照李合生等^[18]的方法测定叶绿素a含量(Chla)和叶绿素b含量(Chlb),并计算总叶绿素含量(Chl)即Chla与Chlb之和。

1.3 数据处理

利用EXCEL 2016和SPSS 24.0软件对数据进行整理和统计分析;利用Origin 2021软件进行Logistic拟合分析及图表制作;采用模糊数学隶属函数法^[19]进行苗木质量评价。

2 结果和分析

2.1 苗木生长特性

2.1.1 苗高和地径的年生长规律

2.1.1.1 生长情况 统计结果(表1)表明:在苗木生长15 d时,不同材料间苗高无显著($P>0.05$)差异。在30~150 d,金叶银杏杂交 F_1 代的苗高均显著($P<0.05$)低于对照(‘泰兴大佛指’)。在60 d时,绿叶型苗高显著高于黄叶型;在90 d时,黄叶型II的苗高显著高于黄叶型I;在150 d时,苗木停止生长,苗高由大到小依次为‘泰兴大佛指’、黄叶型II、绿叶型II、绿叶型I、黄叶型I,其中‘泰兴大佛指’的苗高较黄叶型I高32%。在不同生长时间,同一材料的苗高表现为30 d显著高于15 d,45和60 d间无显著差异,但基本上显著高于15和30 d,90、120和150 d间基本无显著差异,但基本上显著高于45和60 d。同一时间不同材料间地径基本上无显著差异。在150 d时,黄叶型I的地径显著大于‘泰兴大佛指’,黄叶型地径大于绿叶型但无显著差异。在不同生长时间,同一材料的地径表现为45 d基本上显著大于15和30 d,90 d显著大于45 d,但45和60 d、90和120 d及120和150 d间基本无显著差异。

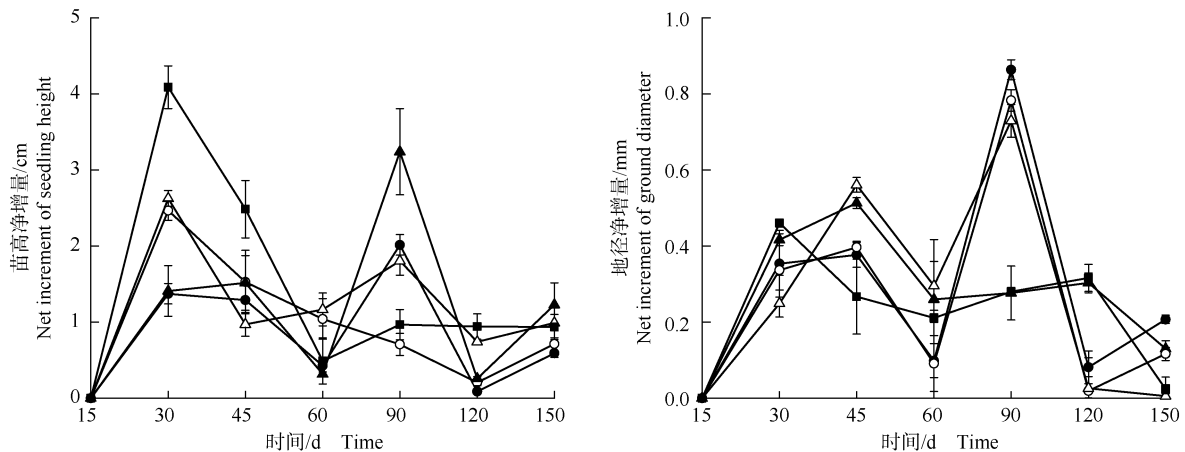
2.1.1.2 净增量动态变化 由动态变化分析结果(图1)可见:不同材料苗高和地径净增量高峰出现时间不同。苗高净增量的第1个高峰出现在苗木生长30 d时,黄叶型I和黄叶型II的净增量分别是年净增量的23%和18%,绿叶型I和绿叶型II的净增量分别是年净增量的37%和34%,‘泰兴大佛指’的净增量最大,占年净增量的43%。在90 d时,除绿叶型I外,苗高

表1 金叶银杏杂交 F₁代苗木苗高和地径的生长情况 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 1 Growth status of seedling height and ground diameter of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* 'Golden leaves' ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的苗高/cm Seedling height at different times						
	15 d	30 d	45 d	60 d	90 d	120 d	150 d
Y I	7.80±0.54Da	9.17±1.55Cb	10.46±0.38Bb	10.89±0.72Bc	12.90±0.25Ac	12.99±0.70Ab	13.59±1.52Ad
G I	7.29±1.19Ea	9.75±1.05Db	11.28±1.26Cb	12.32±1.13BCb	13.03±0.66ABbc	13.24±1.16ABb	13.95±1.18Acd
Y II	7.61±1.13Ea	9.02±0.68Db	10.54±0.28Cb	10.86±0.16Cc	14.10±1.23Bb	14.23±0.93Bb	15.46±0.69Ab
G II	7.30±1.26Da	9.93±0.53Cb	10.90±1.14BCb	12.07±1.14Bb	13.88±0.99Abc	14.04±0.53Ab	15.03±0.67Abc
CK	8.46±0.82Ea	12.54±0.67Da	15.03±1.15Ca	15.13±1.35Ca	16.10±1.14BCa	17.04±0.87ABa	17.98±1.27Aa
材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的地径/mm Ground diameter at different times						
	15 d	30 d	45 d	60 d	90 d	120 d	150 d
Y I	3.06±0.09Da	3.41±0.04CDab	3.79±0.33Ca	3.89±0.32Ca	4.75±0.17Bab	4.83±0.16Ba	5.04±0.78Aa
G I	3.09±0.07Ca	3.42±0.16Cab	3.82±0.20Ba	3.91±0.27Ba	4.69±0.06Aab	4.71±0.21Aa	4.83±0.34Aab
Y II	3.00±0.21Ea	3.42±0.15Dab	3.93±0.10Ca	4.19±0.19BCa	4.47±0.13Bab	4.77±0.25Aa	4.90±0.06Aab
G II	3.05±0.23Ca	3.29±0.18Cb	3.86±0.24Ba	4.15±0.26Ba	4.88±0.43Aa	4.81±0.24Aa	4.88±0.19Aab
CK	3.15±0.03Fa	3.61±0.13Ea	3.88±0.06Da	4.09±0.08Ca	4.37±0.10Bb	4.68±0.08Aa	4.71±0.16Ab

¹⁾ 同行中不同大写字母表示在同一材料不同时间间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P<0.05$) differences between different times of the same material; 同列中不同小写字母表示在同一时间不同材料间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different materials at the same time.

²⁾ Y: 黄叶型 Yellow leaf type; G: 绿叶型 Green leaf type; CK: '泰兴大佛指' 'Taixing Dafozhi'.



●—: 黄叶型 I Yellow leaf type I; ○—: 绿叶型 I Green leaf type I; ▲—: 黄叶型 II Yellow leaf type II; △—: 绿叶型 II Green leaf type II; ■—: '泰兴大佛指' 'Taixing Dafozhi'.

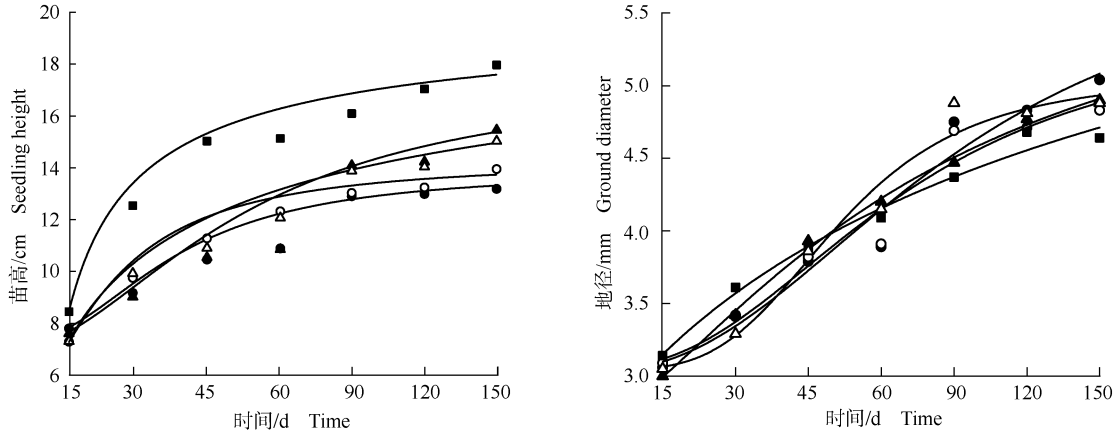
图1 金叶银杏杂交 F₁代苗木苗高和地径净增长量动态变化Fig. 1 Dynamics of seedling height and ground diameter increments of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* 'Golden leaves'

净增量出现第2个高峰,黄叶型 I、黄叶型 II 增长较多,分别为年净增量的 35%、42%,而绿叶型 I 和 '泰兴大佛指' 的净增量仅为年净增量的 11%,绿叶型 II 的净增量为年净增量的 24%。除 '泰兴大佛指' 外,4 个杂交 F₁ 代地径净增量的第 1 个高峰出现在 45 d,黄叶型 I、绿叶型 I、黄叶型 II、绿叶型 II 的净增量分别为年净增量的 19%、23%、27%、30%, '泰兴大佛指' 地径净增量的第 1 个高峰出现在 30 d,为年净增量的 30%。黄叶型 I、绿叶型 I 和绿叶型 II 的地径

净增量的第 2 个高峰出现在 90 d,净增量分别为年净增量的 44%、45%、39%;黄叶型 II 和 '泰兴大佛指' 地径净增量的第 2 个高峰出现在 120 d,为年净增量的 16%和 20%。整体来看,苗木苗高快速增长早于地径。
2.1.1.3 生长动态的 Logistic 拟合分析 对苗高和地径的 7 次测量结果进行拟合,得到非线性 Logistic 拟合曲线(图 2),拟合方程见表 2。结果显示:绿叶型 I、绿叶型 II 和 '泰兴大佛指' 苗高都呈对数型增长,且先快后慢;而 2 个黄叶型苗高呈 "S" 型增长。在整

个生长过程中‘泰兴大佛指’苗高都高于 4 个杂交 F₁ 代, 而 4 个杂交 F₁ 代苗高相互交替向上, 无明显差异。各材料地径的增长曲线均呈“S”型, 呈现“慢—快—慢”的规律, 但 2 个黄叶型“S”型趋势较弱。不

同材料苗高、地径的实际观测值和理论值拟合较好, Logistic 拟合回归关系达到极显著 ($P < 0.01$) 水平, R^2 在 0.977~0.996 之间。预测苗高、地径生长曲线均在 90 d 后逐渐平稳, 与实际观测结果基本一致。



—●—: 黄叶型 I Yellow leaf type I ; —○—: 绿叶型 I Green leaf type I ; —▲—: 黄叶型 II Yellow leaf type II ; —△—: 绿叶型 II Green leaf type II ; —■—: ‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’.

图 2 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木苗高和地径生长动态的 Logistic 拟合曲线
 Fig. 2 Logistic fitting curves of growth dynamics of seedling height and ground diameter of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’

表 2 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木苗高和地径生长动态的 Logistic 拟合方程

Table 2 Logistic fitting equations of growth dynamics of seedling height and ground diameter of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’

材料 Material	苗高 Seedling height			地径 Ground diameter		
	Logistic 拟合方程 Logistic fitting equation	R^2	P	Logistic 拟合方程 Logistic fitting equation	R^2	P
黄叶型 I Yellow leaf type I	$y = 13.864\ 76 - \frac{6.517\ 08}{1 + (x/48.601\ 76)^{2.118\ 25}}$	0.984	<0.01	$y = 5.376\ 62 - \frac{2.369\ 84}{1 + (x/65.707\ 26)^{2.223\ 03}}$	0.980	<0.01
绿叶型 I Green leaf type I	$y = 14.311\ 67 - \frac{9.525\ 22}{1 + (x/28.194\ 38)^{1.642\ 58}}$	0.996	<0.01	$y = 5.040\ 16 - \frac{1.998\ 47}{1 + (x/57.763\ 99)^{2.411\ 17}}$	0.977	<0.01
黄叶型 II Yellow leaf type II	$y = 17.521\ 13 - \frac{10.434\ 40}{1 + (x/70.864\ 30)^{1.809\ 59}}$	0.978	<0.01	$y = 5.272\ 89 - \frac{2.664\ 90}{1 + (x/47.938\ 07)^{1.548\ 83}}$	0.996	<0.01
绿叶型 II Green leaf type II	$y = 20.366\ 25 - \frac{20.989\ 28}{1 + (x/31.197\ 16)^{0.674\ 83}}$	0.992	<0.01	$y = 4.950\ 54 - \frac{1.917\ 87}{1 + (x/50.629\ 71)^{3.535\ 76}}$	0.987	<0.01
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	$y = 20.353\ 26 - \frac{419.337\ 00}{1 + (x/0.061\ 74)^{0.643\ 58}}$	0.987	<0.01	$y = 5.224\ 09 - \frac{2.638\ 19}{1 + (x/45.840\ 73)^{1.171\ 66}}$	0.992	<0.01

2.1.2 根、茎、叶质量分析 在苗木生长 150 d 时各材料不同部位的质量见表 3。由结果可见: 不同材料单株根质量间不存在显著差异。单株茎质量表现为黄叶型 I、黄叶型 II 和绿叶型 II 显著低于‘泰兴大佛指’, 但 4 个杂交 F₁ 代间差异不显著。单株叶质量表现为‘泰兴大佛指’最大; 绿叶型均高于黄叶型, 且黄

叶型 I 高于黄叶型 II, 绿叶型 I 高于绿叶型 II, 但 4 个杂交 F₁ 代间无显著差异。单株质量表现为‘泰兴大佛指’显著高于 4 个杂交 F₁ 代, 绿叶型高于黄叶型, 但 4 个杂交 F₁ 代间无显著差异。根冠比表现为黄叶型 I 最大, 显著高于其余 3 个杂交 F₁ 代和‘泰兴大佛指’, 后四者间无显著差异。

表3 金叶银杏杂交 F₁代苗木单株根、茎、叶质量 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 3 Root, stem, and leaf masses per plant of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* 'Golden leaves' ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

材料 Material	单株根质量/g Root mass per plant	单株茎质量/g Stem mass per plant	单株叶质量/g Leaf mass per plant	单株质量/g Single plant mass	根冠比 Root-shoot ratio
黄叶型 I Yellow leaf type I	1.56±0.04a	1.98±0.04b	1.01±0.03ab	4.55±0.04b	0.52a
绿叶型 I Green leaf type I	1.51±0.02a	2.37±0.03ab	1.14±0.02ab	5.01±0.023b	0.43b
黄叶型 II Yellow leaf type II	1.30±0.03a	2.23±0.03b	0.97±0.01b	4.51±0.03b	0.40b
绿叶型 II Green leaf type II	1.36±0.03a	2.15±0.05b	1.08±0.02ab	4.58±0.04b	0.42b
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	1.71±0.02a	2.83±0.05a	1.21±0.02a	5.74±0.05a	0.42b

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同材料间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different materials.

2.2 苗木代谢物动态变化

2.2.1 基础代谢物动态变化 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木叶片的可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白质含量的动态变化见表4。结果显示:各材料的可溶性糖、淀粉、可溶性蛋白质含量总体上在 120 d 时达到最大值,且基本显著 ($P < 0.05$) 高于其他时间。

2.2.1.1 可溶性糖含量 除黄叶型 I 外,其他 4 个材料叶片的可溶性糖含量在 45 d 时略降低,之后基本

呈增加趋势,迅速积累期主要集中在 60~90 d,且 4 个杂交 F₁ 代在不同生长时间均表现为绿叶型 I 高于黄叶型 I、绿叶型 II 高于黄叶型 II;在 120 d 时,黄叶型 I、绿叶型 I 显著高于黄叶型 II、绿叶型 II,‘泰兴大佛指’显著高于 4 个杂交 F₁ 代。

2.2.1.2 淀粉含量 各材料的淀粉含量随时间推移先降低后大幅升高,在 60 d 时,淀粉含量最低,在 90~120 d 迅速升高。在 30 和 60 d 时,绿叶型 I 的淀

表4 金叶银杏杂交 F₁代苗木叶片可溶性糖、淀粉和可溶性蛋白质含量的动态变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 4 Dynamic changes of contents of soluble sugar, starch, and soluble protein in leaves of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* 'Golden leaves' ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

材料 Material	不同时间的可溶性糖含量/% Soluble sugar content at different times				
	30 d	45 d	60 d	90 d	120 d
黄叶型 I Yellow leaf type I	3.47±0.08Eb	4.06±0.03Dab	7.64±0.06Cc	15.11±0.37Bb	19.42±0.43Ab
绿叶型 I Green leaf type I	5.62±0.83Da	4.42±1.40Dab	10.25±0.93Cab	16.03±0.77Bb	19.73±0.36Ab
黄叶型 II Yellow leaf type II	6.42±0.01Ca	3.38±0.06Db	8.40±0.00Bbc	17.73±0.54Aa	18.13±0.35Ac
绿叶型 II Green leaf type II	6.50±0.80Ca	4.90±0.98Ca	10.35±1.15Bab	18.42±0.83Aa	18.32±0.65Ac
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	6.20±0.24Da	4.52±0.63Dab	11.19±2.01Ca	15.03±0.71Bb	21.17±0.55Aa
材料 Material	不同时间的淀粉含量/(mg·g ⁻¹) Starch content at different times				
	30 d	45 d	60 d	90 d	120 d
黄叶型 I Yellow leaf type I	0.96±0.05Cc	0.79±0.02Da	0.54±0.03Eb	1.33±0.02Ba	4.34±0.12Aa
绿叶型 I Green leaf type I	3.18±0.77Ba	1.34±0.52Ca	0.93±0.33Ca	1.19±0.15Ca	4.57±0.22Aa
黄叶型 II Yellow leaf type II	1.88±0.01Bbc	0.77±0.03Da	0.48±0.01Eb	1.16±0.12Ca	3.26±0.22Abc
绿叶型 II Green leaf type II	1.79±0.29Bbc	1.06±0.36CDa	0.83±0.08Dab	1.33±0.01Ca	3.02±0.16Ac
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	2.43±1.20Bab	1.03±0.20Ca	0.66±0.24Cab	1.07±0.35Ca	3.55±0.18Ab
材料 Material	不同时间的可溶性蛋白质含量/(mg·g ⁻¹) Soluble protein content at different times				
	30 d	45 d	60 d	90 d	120 d
黄叶型 I Yellow leaf type I	3.02±0.21Dc	4.91±0.05Cc	5.10±0.06Cc	8.29±0.82Bab	15.01±1.56Aa
绿叶型 I Green leaf type I	5.80±0.35Ca	7.30±0.54Bb	7.86±0.14Bab	7.57±0.23Bab	13.72±0.79Aa
黄叶型 II Yellow leaf type II	4.78±0.13Cab	5.46±0.13Cbc	9.20±0.72Bab	8.71±0.06Ba	13.92±0.57Aa
绿叶型 II Green leaf type II	4.35±0.79Cb	7.04±1.53Bb	7.44±1.36Bb	6.56±1.09Bb	13.44±0.41Aa
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	5.86±1.23Ca	9.67±1.58Ba	9.67±1.58Ba	7.80±1.74BCab	15.12±1.55Aa

¹⁾ 同行中不同大写字母表示在同一材料不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different times of the same material; 同列中不同小写字母表示在同一时间不同材料间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different materials at the same time.

粉含量显著高于其余 3 个杂交 F₁ 代; 在 120 d 时, 黄叶型 I 和绿叶型 I 的淀粉含量显著高于其余材料。

2.2.1.3 可溶性蛋白质含量 除黄叶型 I 的可溶性蛋白质含量随时间推移持续增加外, 其余材料的可溶性蛋白质含量呈波动变化。4 个杂交 F₁ 代的可溶性蛋白质含量在 30~60 d 呈上升趋势, 在 90 d 时明显降低, 但在 90 d 时显著高于 30 d。在 90 和 120 d 时, 可溶性蛋白质含量表现为黄叶型 I 高于绿叶型 I、黄叶型 II 高于绿叶型 II, 但仅在 90 d 时黄叶型 II 与绿叶型 II 间差异显著。

2.2.2 次生代谢物积累 苗木生长 120 d 时叶片黄酮类化合物含量见表 5。结果显示: 总黄酮含量从高到低依次为‘泰兴大佛指’、黄叶型 II、黄叶型 I、绿叶型 II、绿叶型 I, 总黄酮含量最高的‘泰兴大佛指’较最低的绿叶型 I 高 76.5%。同一杂交组合中, 黄叶型总黄酮含量显著高于绿叶型。槲皮素、山柰酚、异鼠李素含量也表现为‘泰兴大佛指’显著高于 4 个杂交 F₁ 代, 黄叶型 I 和黄叶型 II 间、绿叶型 I 和绿叶型 II 间的槲皮素和山柰酚含量差异显著。

2.3 苗木叶色变化特征

金叶银杏杂交 F₁ 代的叶色参数和叶片色素含量动态变化分别见表 6 和表 7。

2.3.1 叶色参数动态变化 结果(表 6)显示: 不同材料叶片的亮度参数值(L*)、红/绿色相值(a*)、黄/蓝色相值(b*)在苗木生长 30~90 d 存在差异。

黄叶型 I 的 L* 随时间推移呈下降趋势, 其余 4 个材料的 L* 在 30~60 d 呈下降趋势, 但在 90 d 时略升高; 黄叶型的 L* 为 50.82~66.41, 绿叶型的 L* 为

表 5 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木叶片黄酮类化合物含量($\bar{X} \pm SD$)
Table 5 Flavonoids contents in leaves of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’ ($\bar{X} \pm SD$)

材料 ¹⁾ Material ¹⁾	含量/(mg·g ⁻¹) ²⁾ Content ²⁾			
	槲皮素 Quercetin	山柰酚 Kaempferol	异鼠李 Isorhamnetin	总黄酮 Total flavonoids
Y I	2.08±0.031b	1.69±0.140c	1.78±0.020c	13.93±0.459c
G I	1.38±0.015d	1.52±0.020d	1.89±0.021b	12.02±0.103d
Y II	1.87±0.014c	2.56±0.064b	1.75±0.060c	15.51±0.090b
G II	1.91±0.012c	1.70±0.036c	1.86±0.046b	13.73±0.198c
CK	2.92±0.130a	2.93±0.056a	2.60±0.021a	21.21±0.154a

¹⁾ Y: 黄叶型 Yellow leaf type; G: 绿叶型 Green leaf type; CK: ‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’.

²⁾ 同列中不同小写字母表示在不同材料间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different materials.

表 6 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木叶色参数动态变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 6 Dynamic changes of leaf color parameters of hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’ ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 L* L* at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	66.41±0.69Aa	60.38±0.96Ba	53.84±0.17Ca	51.93±2.63Cb
G I	49.54±0.71Ac	46.85±1.22Bc	41.99±0.89Cc	43.36±0.85Cc
Y II	61.98±1.31Ab	54.80±1.35Bb	50.82±2.29Cb	55.59±1.46Ba
G II	47.28±2.37Ac	44.76±1.07ABc	41.29±1.83Cc	42.61±0.51BCc
CK	43.62±2.12Ad	39.92±1.49Bd	35.86±0.63Cd	37.19±0.97Cd

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 a* a* at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	5.59±0.34Aa	3.24±0.17Ba	-4.45±1.50Ca	-3.71±0.81Ca
G I	-4.57±0.51Ac	-5.97±0.92ABc	-7.57±0.72Bbc	-10.20±1.33Cb
Y II	2.31±0.26Ab	0.24±0.22Bb	-4.63±0.20Ca	-4.64±0.40Ca
G II	-4.20±0.06Ac	-5.25±0.10Bc	-6.54±0.57Cb	-10.09±0.49Db
CK	-4.22±0.30Ac	-5.85±0.78Bc	-8.65±0.37Cc	-10.97±0.46Db

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 b* b* at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	57.13±0.81Aa	50.42±0.41Ba	41.11±2.07Ca	38.29±1.60Da
G I	28.18±3.14Ab	24.69±4.57ABc	21.20±3.20BCc	17.43±3.02Cb
Y II	53.09±1.61Aa	45.81±0.52Bb	40.22±0.52Ca	35.81±1.87Da
G II	31.12±3.85Ab	28.03±1.80ABc	25.02±1.86BCb	20.84±1.96Cb
CK	28.93±1.80Ab	24.42±2.17Bc	19.32±1.68Cc	17.58±0.76Cb

¹⁾ L*: 亮度参数值 Lightness parameter value; a*: 红/绿色相值 Red/green phase value; b*: 黄/蓝色相值 Yellow/blue phase value. 同行中不同大写字母表示在同一材料不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different times of the same material; 同列中不同小写字母表示在同一时间不同材料间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different materials at the same time.

²⁾ Y: 黄叶型 Yellow leaf type; G: 绿叶型 Green leaf type; CK: ‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’.

表 7 金叶银杏杂交 F₁ 代苗木叶片色素含量动态变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 7 Dynamic changes of leaf pigment contents in hybrid F₁ generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’ ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 Chl/(mg·g ⁻¹) Chl at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	0.20±0.03Dc	0.49±0.01Cc	0.62±0.02Bb	1.18±0.05Ab
G I	0.65±0.05Cb	1.34±0.05Ba	1.66±0.03Aa	1.35±0.00Ba
Y II	0.23±0.01Dc	0.60±0.07Cc	0.78±0.04Bb	1.18±0.01Ab
G II	0.81±0.03Da	1.39±0.03Ba	1.56±0.03Aa	0.89±0.00Cc
CK	0.67±0.10Bb	1.10±0.23Ab	1.24±0.08Aa	1.18±0.05Ab

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 Chla/Chlb Chla/Chlb at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	2.70±0.07Aa	2.93±0.12Ab	3.34±0.45Aa	3.40±0.54Aa
G I	2.72±0.05Aa	2.71±0.14Ab	1.83±0.08Cc	2.52±0.00Bc
Y II	2.93±0.12Ba	4.48±0.74Aa	3.25±0.22Ba	3.37±0.07Ba
G II	2.72±0.05Ba	2.85±0.21Bb	2.08±0.08Cc	3.10±0.00Aab
CK	2.69±0.36Aa	2.86±0.17Ab	2.58±0.09Ab	2.86±0.06Abc

续表7 Table 7 (Continued)

材料 ²⁾ Material ²⁾	不同时间的 Car/(mg·g ⁻¹) Car at different times			
	30 d	45 d	60 d	90 d
Y I	0.13±0.00Bc	0.12±0.01Bb	0.14±0.02Bab	0.17±0.01Ab
G I	0.16±0.00Ab	0.14±0.01Ba	0.07±0.01Cd	0.14±0.00Bc
Y II	0.13±0.01Bc	0.12±0.01Bb	0.14±0.01Bb	0.18±0.01Ab
G II	0.18±0.01Ba	0.12±0.00Cb	0.10±0.01Dc	0.20±0.00Aa
CK	0.15±0.02Bb	0.15±0.01Ba	0.16±0.01ABa	0.18±0.01Ab

¹⁾ Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Chla/Chlb: 叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值 Ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content; Car: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content. 同行中不同大写字母表示在同一材料不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different times of the same material; 同列中不同小写字母表示在同一时间不同材料间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different materials at the same time.

²⁾ Y: 黄叶型 Yellow leaf type; G: 绿叶型 Green leaf type; CK: ‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’.

41.99~49.54, ‘泰兴大佛指’的 L^* 为 35.86~43.62。总体来看,黄叶型的 L^* 显著 ($P < 0.05$) 高于绿叶型, ‘泰兴大佛指’的 L^* 显著低于 4 个杂交 F_1 代。

2 个黄叶型的 a^* 在 30 和 45 d 时为正值,在 60 和 90 d 时为负值;2 个绿叶型和 ‘泰兴大佛指’的 a^* 在不同时间均为负值,且随着时间推移逐渐降低,即叶片绿色程度不断加深。在 30~90 d,2 个黄叶型的 a^* 显著高于 2 个绿叶型和 ‘泰兴大佛指’;2 个黄叶型的 a^* 在 45~60 d 显著降低,说明这段时间是叶色

转绿的关键时间。

b^* 的变化趋势和 a^* 相近,随着时间推移呈下降趋势,即叶片黄色程度越来越低;2 个黄叶型的 b^* 显著高于 2 个绿叶型和 ‘泰兴大佛指’,且黄叶型的 b^* 在不同时间差异显著,在 30~60 d 快速下降。

2.3.2 叶片色素含量动态变化 结果(表 7)显示: ‘泰兴大佛指’的总叶绿素含量(Chl)在 45 d 时显著升高,在 45~90 d 基本稳定;2 个绿叶型的 Chl 在 30~60 d 显著升高,而在 90 d 时显著降低;2 个黄叶型的 Chl 则在 30~90 d 显著升高,在 90 d 时大幅上升达到最大值。2 个黄叶型的叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值(Chla/Chlb)基本上大于 2 个绿叶型和 ‘泰兴大佛指’,60 d 时,黄叶型 I 和黄叶型 II 的 Chla/Chlb 分别为绿叶型 I 和绿叶型 II 的 1.83 和 1.56 倍,且 2 个绿叶型的 Chla/Chlb 在 60 d 时最小,而 ‘泰兴大佛指’的 Chla/Chlb 在不同时间没有显著变化。4 个杂交 F_1 代的类胡萝卜素含量(Car)总体上表现为先下降后上升的趋势,黄叶型 I 和黄叶型 II 在 45 d 时最低,绿叶型 I 和绿叶型 II 在 60 d 时最低。

2.4 基于隶属函数值的苗木质量评价

通过分析各指标的隶属函数值,最终确定不同材料苗木质量排名,结果见表 8。结果显示: ‘泰兴大佛指’的苗木质量最佳,隶属函数值为 0.554;黄叶型 I

表 8 金叶银杏杂交 F_1 代苗木质量相关指标的隶属函数值¹⁾Table 8 Subordinate function values of quality related indexes of hybrid F_1 generation seedlings of *Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’¹⁾

材料 Material	各指标的隶属函数值 Subordinate function value of each index							平均隶属函数值 Average of subordinate function	排名 Ranking
	苗高 Seedling height	地径 Ground diameter	单株质量 Single plant mass	根冠比 Root shoot ratio	可溶性糖含量 Soluble sugar content	淀粉含量 Starch content	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content		
黄叶型 I Yellow leaf type I	0.052	0.779	0.337	0.532	0.401	0.752	0.531		
绿叶型 I Green leaf type I	0.117	0.462	0.583	0.260	0.478	0.873	0.209		
黄叶型 II Yellow leaf type II	0.387	0.574	0.314	0.208	0.073	0.203	0.258		
绿叶型 II Green leaf type II	0.311	0.535	0.355	0.241	0.122	0.078	0.140		
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	0.839	0.278	0.973	0.255	0.844	0.350	0.558		

材料 Material	各指标的隶属函数值 Subordinate function value of each index							平均隶属函数值 Average of subordinate function	排名 Ranking
	总黄酮含量 Total flavonoids content	L^*	a^*	b^*	Chl	Chla/Chlb	Car		
黄叶型 I Yellow leaf type I	0.214	0.965	0.057	0.963	0.022	0.661	0.381	0.474	2
绿叶型 I Green leaf type I	0.010	0.376	0.875	0.141	0.043	0.041	0.097	0.326	4
黄叶型 II Yellow leaf type II	0.383	0.879	0.236	0.864	0.033	0.863	0.366	0.402	3
绿叶型 II Green leaf type II	0.190	0.314	0.794	0.272	0.289	0.218	0.557	0.315	5
‘泰兴大佛指’ ‘Taixing Dafozhi’	0.988	0.042	0.950	0.116	0.244	0.427	0.888	0.554	1

¹⁾ L^* : 亮度参数值 Lightness parameter value; a^* : 红/绿色相值 Red/green phase value; b^* : 黄/蓝色相值 Yellow/blue phase value; Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Chla/Chlb: 叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值 Ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content; Car: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content.

和黄叶型 II 分别排名第 2 和第 3,隶属函数值分别为 0.474 和 0.402;绿叶型 I 和绿叶型 II 的苗木质量较差,隶属函数值分别为 0.326 和 0.315。总体表现为 4 个杂交 F₁代生长状况劣于‘泰兴大佛指’,但杂交 F₁代的黄叶型优于绿叶型。总黄酮含量、可溶性蛋白质含量、叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值(Chla/Chlb)、亮度参数值(L*)、黄/蓝色相值(b*)的隶属函数值表现为黄叶型明显高于绿叶型,表明这 5 个指标对于苗木质量排名有明显影响。

3 讨论和结论

苗高和地径是植物生长中 2 个重要的表型特征指标,其生长变化规律与生产管理息息相关,理想的生长曲线模型在提高苗木成活率、培育优质壮苗方面有重要作用。通过 Logistic 方程拟合植物生长节律并估算相关参数^[20],不仅可以了解不同品种(品系)苗木生长特点,还可以进行苗高、地径生长的预测和分析。本研究通过 Logistic 拟合分析,发现金叶银杏杂交 F₁代的黄叶型苗高、地径均为“S”型增长,表现为“慢—快—慢”,这与毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)^[21]、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)^[22]等树种的研究结果相似;而绿叶型的苗高增长与前述研究结果不同,表现为前期生长迅速,后期生长缓慢,闽楠[*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang]半同孢子代有类似的现象,即有的前期生长快,有的后期生长快^[23]。本研究对苗木苗高、地径生长动态进行 Logistic 拟合分析,R²在 0.977~0.996 间,拟合效果较好(P<0.01),且与实测值接近,表明可以用拟合方程的理论值估测实际值。

金叶银杏杂交 F₁代苗木苗高和地径的生长节律不同,苗高第 1 个生长高峰出现在出苗后 30 d,而地径第 1 个生长高峰出现在出苗后 45 d,这与伞花木[*Eurycorymbus cavaleriei* (Lévl.) Rehd. et Hand.-Mazz.]^[24]、罗甸小米核桃(*Juglans regia* f. *luodianense* Liu et Xu)^[25]研究结果一致,即苗高生长速生期较地径早 10~15 d。但金叶银杏杂交 F₁代苗木苗高和地径第 2 个生长高峰均出现在出苗后 90 d,之后有少量增长或基本停止。不同金叶银杏杂交 F₁代的苗高间存在显著(P<0.05)差异,地径间的差异不显著,这与郑仁华等^[26]在对福建柏[*Fokienia hodginsii* (Dunn) A. Henry et Thomas]苗期的研究结果一致。基于不

同杂交 F₁代间苗高的生长量差异明显大于地径,在苗期选择优株时以苗高为主,地径为辅。

可溶性糖和淀粉是植物光合作用产物,二者之间存在一定的转换关系,且其含量直接影响植物生长发育,而可溶性蛋白质和可溶性糖含量又与植物渗透压的调节息息相关^[27]。因此,植物营养物质在很大程度上能反映植物的生长和抗性水平。然而前人对马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)^[28]、锦鸡儿属(*Caragana* Fabr.)植物^[29]的研究结果表明这 3 种代谢物的变化并无明显规律。本研究中,可溶性糖和淀粉含量的变化规律存在一定的相似性,在金叶银杏杂交 F₁代苗木的快速生长期(15~30 d),2 种代谢物含量相对较低,可能与植物的代谢生长有关,在生长缓慢阶段开始积累,9 月中旬其含量达到最高,可能用于提高抗性,适应温度变化^[30]。而可溶性蛋白质含量在整个生长期存在一定的波动性,整体呈“增—减—增”的趋势,这可能与金叶银杏杂交 F₁代苗木叶片中的酶、结构性蛋白等物质的变化存在复杂的关系,具体原因待进一步探究。

黄酮类化合物是叶用银杏品种(品系)选择的重要指标。本研究中,金叶银杏杂交 F₁代苗木叶片的黄酮类化合物含量显著低于‘泰兴大佛指’,这可能与苗木遗传特性及苗木尚处于幼嫩阶段有一定关系。路鑫等^[31]研究表明:银杏苗木生长生理受产地的影响很大,同一品种的黄酮类化合物含量在不同产地间存在显著差异。同时,苗木生长阶段也与黄酮类化合物积累有密切关系。肖桂英等^[32]认为,苗木优良性状会随着苗龄的增大逐渐显现。

营养物质积累是植物生长的前提。徐圆圆等^[33]的研究结果表明:柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *sinensis* Miq.)1 年生实生苗的苗高与可溶性糖和可溶性蛋白质含量存在显著或极显著正相关关系,而地径仅与可溶性蛋白质含量存在显著正相关关系。蔡雅桥等^[34]在探究钩栗(*Castanopsis tibetana* Hance)2 年生苗木时却发现苗高、地径与可溶性糖和可溶性蛋白质含量间不存在明显的相关性。故不同树种营养物质与植株生长的关系存在一定差异,苗木的生长是多种物质不断合成转化的结果。本研究中,金叶银杏杂交 F₁代苗木叶片的可溶性糖含量在 60~90 d 的增长量最大,而此时其对应的苗高、地径的增长量也最大,即三者最大增长量同步,推断杂交 F₁代苗木叶片内可溶性糖的积累更有助于苗木的苗高、地径生长。而

淀粉和蛋白质含量均在 90~120 d 有明显增加,晚于苗高、地径的快速生长期,这些指标与苗木间的关系需要后续进一步研究。

自然界中,植物叶片呈现多种多样的颜色,一般认为是其遗传特性和周围环境共同作用的结果,对应的是色素类型、含量、分布区域的改变^[35-36]。叶绿素和类胡萝卜素在呈色反应中至关重要。姜卫兵等^[36]认为绿叶植物叶色变化与叶绿素含量有关,而黄叶植物叶色变化主要受类胡萝卜素含量影响。本研究对叶色及色素含量的研究表明:金叶银杏杂交 F₁ 代黄叶型叶色由黄转绿时,总叶绿素和类胡萝卜素含量增加,但二者增加幅度存在差异,即叶片内总叶绿素含量增加幅度高于类胡萝卜素含量,从而实现了黄叶型的叶色由黄到绿的转变,该结论与 Li 等^[4]和郁万文等^[6]的研究结果基本一致。Li 等^[37]从基因水平上对金叶银杏与银杏(绿叶)进行比较,认为金叶银杏叶片呈现黄色可能是因为叶绿素合成基因表达量相对下调,且类胡萝卜素合成基因表达量相对上调。郁万文等^[6]通过对金叶银杏黄酮类化合物含量的测定,初步推断黄酮类化合物含量与叶色变化间存在相关性。本研究并未发现金叶银杏杂交 F₁ 代黄酮类化合物含量与叶色间存在直接的相关关系,但发现在同一杂交组合中总黄酮含量表现为黄叶型 I 高于绿叶型 I、黄叶型 II 高于绿叶型 II,且差异均达到显著水平。

苗木质量是一个综合的概念,单独用 1 个或孤立的几个指标很难真实反映,因此采用各指标隶属函数值作为苗木质量评定标准,隶属函数值越大,苗木质量愈佳。本研究选择了金叶银杏杂交 F₁ 代间存在差异的指标进行隶属函数值分析,单株根、茎、叶质量差异较小,参照相关文献^[21],选择单株质量进行隶属函数值计算。从苗木质量评价结果来看,金叶银杏杂交 F₁ 代银杏中黄叶型 I 的苗木质量最佳,其次为黄叶型 II,表现为黄叶型总体质量要优于绿叶型;此外,可将总黄酮含量、可溶性蛋白质含量、叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值(Chla/Chlb)、亮度参数值(L*)、黄/蓝色相值(b*)用于金叶银杏苗木质量评价。

金叶银杏杂交 F₁ 代苗木的研究刚刚起步,目前金叶银杏进入生殖阶段的树木数量较少,为保证足够的实验种子数量,本研究对开花大枝全部进行套袋控制授粉,秋季没有获得未授粉的金叶银杏种子,后期为了比较其生长适应性,选用江苏本地良种‘泰兴大

佛指’作为对照进行对比,以获得更多金叶银杏实生苗生长特性数据。本次结果初步揭示了金叶银杏杂交 F₁ 代的生长规律,但由于对照材料不理想,影响了规律分析的精度,后期随着金叶银杏结实数量的增加,将弥补这方面的不足。另外,研究地当年频繁出现高温、多雨气候,增加了苗木保存等方面的困难,加大了杂交育种的难度。本研究中苗木生长 150 d 时,叶片已基本脱落,叶片的基础代谢物和次生代谢物含量仅测定至 120 d,这些野外工作中的不足,也对后续育种工作有一定的借鉴作用。为保证后期杂交育种工作顺利进行,需要在金叶银杏适生地多点实验,提高实验的可靠性和可重复性,使结果具有一定的普遍性,经过多次验证后方可在生产中推广应用。

参考文献:

- [1] STICHER O. Quality of *Ginkgo* preparations [J]. *Planta Medica*, 1993, 59(1): 2-11.
- [2] 胡爱华,邢世岩,巩其亮. 基于 FTIR 的银杏木材鉴别研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(4): 88-92.
- [3] 曹福亮. 银杏[M]. 北京:中国林业出版社, 2007: 101-104.
- [4] LI W X, HE Z C, YANG S B, et al. Construction and analysis of a library of miRNA in gold-colored mutant leaves of *Ginkgo biloba* L. [J]. *Folia Horticulturae*, 2019, 31(1): 81-92.
- [5] 王改萍,张磊,姚雪冰,等. 金叶银杏叶色变化特性分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 41-48.
- [6] 郁万文,曹福亮. 黄叶银杏叶色发育及光合特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(25): 15410-15412, 15494.
- [7] 叶威,李强,陈颖,等. 雌、雄株和金叶银杏光合生理及黄酮成分年动态变化研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 77-86.
- [8] 王志勇,胡俊,潘小平,等. 安陆金叶银杏特性初报[J]. *湖北林业科技*, 2017, 46(6): 31-34, 69.
- [9] 祝遵凌,曹福亮,孟凡军,等. 黄叶银杏新品种‘万年金’区域化试验[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(12): 125-131.
- [10] 赵辉,吕良贺,路鑫,等. 杂种金叶银杏叶片光合特性分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1): 193-199.
- [11] 袁斌玲,王瑞敏,陈颖,等. NaCl 处理下茉莉酸甲酯对金叶银杏光合色素、抗氧化性及黄酮代谢的调控作用[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 64-71.
- [12] 王孟珂,国颖,汪贵斌,等. 不同生境对银杏雌、雄株嫁接苗叶中聚戊烯醇等成分积累的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 121-128.
- [13] 黎章矩,钱莲芳,喻卫武. 银杏嫁接技术研究[J]. *浙江林学院学报*, 2002, 19(3): 235-239.
- [14] 章雷,王改萍,丁延朋,等. 金叶银杏杂交播种及其叶色分化[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(11): 8-12, 22.

- [15] 付慧敏. 随州和安陆的银杏古树种核特征及其营养成分的初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006: 19-23.
- [16] 许继业, 牟志刚, 刘国华, 等. 银杏半同胞家系叶主要功能性状及组分含量差异[J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 27-35.
- [17] BYAMUKAMA R, JORDHEIM M, KIREMIRE B, et al. Anthocyanins from flowers of *Hippeastrum* cultivars[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 109: 262-266.
- [18] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-137.
- [19] 田力, 徐骋炜, 尚旭岚, 等. 青钱柳药用优良单株评价与选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 21-28.
- [20] 郭欢欢, 刘勇, 姚飞, 等. 黄连木苗期年生长节律、生物量分配及养分积累[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(7): 71-75.
- [21] 乔栋, 刘勇, 田书勇, 等. 不同土壤水势对毛白杨苗木生长节律和苗木质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(4): 12-23.
- [22] 敖妍, 刘觉非, 陈浩, 等. 不同种源文冠果1年生苗生长节律及性状相关性研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 91-97.
- [23] 许佳胜. 闽楠母树与半同胞子代生长的关联分析[J]. 福建林业科技, 2020, 47(3): 19-22, 39.
- [24] 廖海红, 代丽华, 孔小丽, 等. 伞花木1年生播种苗生长节律研究[J]. 南方林业科学, 2021, 49(3): 11-14.
- [25] 徐国瑞, 刘济明, 何绪, 等. 罗甸小米核桃一年生播种苗的年生长规律[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(11): 207-211.
- [26] 郑仁华, 杨宗武, 方海峰, 等. 福建柏优树子代苗期性状遗传变异和生长节律研究[J]. 林业科学, 2003, 39(增刊1): 179-183.
- [27] JOHARI-PIREIVATLOU M. Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(1): 36-40.
- [28] 刘建兵, 喻方圆, 胡晓健. 马尾松苗木小分子有机化合物动态监测[J]. 湖南林业科技, 2014, 41(3): 30-33.
- [29] 杨九艳, 杨劫, 杨明博, 等. 5种锦鸡儿属植物渗透调节物质的变化[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 677-682.
- [30] 罗颖, 张子晗, 张丽玲, 等. 不同越冬措施下东京野茉莉苗木的生理特性[J]. 林业科技开发, 2015, 29(6): 76-79.
- [31] 路鑫, 周伟伟, 吕良贺, 等. 北方三地6个叶用银杏无性系生长生理选育研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(12): 70-76.
- [32] 肖桂英, 常恩福, 孟广涛, 等. 铁橡栎不同家系苗期生长差异及其早期选择[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 105-110, 117.
- [33] 徐圆圆, 叶绍明, 赵毅辉, 等. 对羟基苯甲酸和阿魏酸对柳杉苗木生长及其叶片生理指标的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(1): 27-33.
- [34] 蔡雅桥, 许德琼, 陈松, 等. 配方施肥对钩栗生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(3): 33-37, 95.
- [35] 王玥, 裴顺祥, 孙敬爽, 等. 2种刺柏属彩色树叶色参数与色素变化[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(1): 138-146.
- [36] 姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展[J]. 园艺学报, 2005, 32(2): 352-358.
- [37] LI W X, YANG S B, LI Z G, et al. Cytological, physiological, and transcriptomic analyses of golden leaf coloration in *Ginkgo biloba* L.[J]. Horticulture Research, 2018, 5: 12.

(责任编辑: 吴蕊夷)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》的投稿网址为 <http://zwzy.cnbg.net>; 联系电话: 025-84347014; E-mail: zwzybjb@163.com; QQ: 2219161478。

《植物资源与环境学报》编辑部
2023-07