

‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗期生长特性及子代优选

刘爱林¹, 杨晓倩¹, 陈玺珏¹, 周婷^{2,①}, 张往祥^{1,3,①}, 饶辉⁴

[1. 南京林业大学林草学院、水土保持学院, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;

3. 扬州小苹果园艺有限公司, 江苏 扬州 225200; 4. 南京金埔园林股份有限公司, 江苏 南京 211100]

摘要:以61个‘范艾斯汀’海棠(*Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’)自由授粉子代的2年生嫁接苗为实验材料,并以同年嫁接的母本‘范艾斯汀’海棠嫁接苗为对照,对‘范艾斯汀’海棠半同胞家系及母本苗期的生长、观赏和抗性指标进行观测,采用Gompertz模型拟合子代年生长过程,采用层次分析(AHP)法对‘范艾斯汀’海棠半同胞家系进行综合评价,旨在制定适宜的育苗措施,同时选育出生长迅速且表型优良的子代。结果显示:‘范艾斯汀’海棠半同胞家系的苗高和地径年生长均符合“S”型曲线,呈“慢—快—慢”的生长节律,反映了“生长前期(3月中至5月中)—速生期(4月初至9月初)—生长后期(5月中至11月中)”的生长过程,对各生长期应给予不同的育苗措施。‘范艾斯汀’海棠半同胞家系速生期可分为前期速生型(4月初至4月中)、中期速生型(4月中至5月初)和后期速生型(5月初至5月中)。不同个体苗高和地径速生期始末差异明显,呈现异速生长现象。其中,85%的子代苗高速生期属于前期、中期速生型,91%的子代地径速生期属于中期、后期速生型。V39、V49、V21、V27和V40 5个子代生长迅速,苗高(202.0~226.0 cm)和地径(18.96~22.04 mm)均高于母本(苗高和地径分别为197.9 cm和16.14 mm),分枝数(14~38)多于母本(9),新叶均为紫红色或棕红色,树皮光滑或较光滑。综上所述,Gompertz模型可预测‘范艾斯汀’海棠半同胞家系的苗期生长特性随时间的变化趋势,了解子代的年生长规律;V39、V49、V21、V27和V40 5个子代综合评价得分较高,是优良的‘范艾斯汀’海棠子代单株,今后可加强其观赏性评价,实现观赏与长势俱佳的育种目标。

关键词:‘范艾斯汀’海棠; 半同胞家系; 苗期生长; 生长模型; 子代优选

中图分类号: Q945.3; S685.99; S602.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)05-0062-12

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.05.06

Growth characteristics and progeny optimization of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’ during seedling stage

LIU Ailin¹, YANG Xiaoqian¹, CHEN Xijue¹, ZHOU Ting^{2,①}, ZHANG Wangxiang^{1,3,①}, RAO Hui⁴ [1. College of Forestry and Grassland, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 3. Yangzhou Flowering Crabapple Horticulture Ltd., Yangzhou 225200, China; 4. Jinpu Landscape Architecture Co., Ltd., Nanjing 211100, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(5): 62-73

Abstract: Taking 61 two-year-old grafted seedlings of free pollinated progenies of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’ as experimental materials, and grafted seedlings of the female parent *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ grafted in the same year as the control, the growth, ornamental, and resistance indexes of the half-sib families and female parent of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ were observed during the seedling stage, the annual growth process of the progenies was fitted by using Gompertz model, and the half-sib

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 扬州市科技计划项目(YZ2022044); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20220751); 国家自然科学基金青年基金项目(32201618)

作者简介: 刘爱林(2000—),女,安徽淮南人,硕士研究生,主要从事观赏植物应用方面的研究。

①通信作者 E-mail: tingzhou689@cnbg.net; malus2011@163.com

引用格式: 刘爱林, 杨晓倩, 陈玺珏, 等. ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗期生长特性及子代优选[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(5): 62-73.

families of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ were comprehensively evaluated by using analytic hierarchy process (AHP) method, the aim was to formulate an appropriate seedling cultivation measures and simultaneously select and breed progenies with rapid growth and excellent phenotypic traits. The results show that the annual growth of seedling height and ground diameter of the half-sib families of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ both conform to a “S”-shaped curve, exhibiting a “slow-fast-slow” growth rhythm, this reflects the growth process of “early growth stage (from mid-March to mid-May) – fast-growing stage (from early April to early September) – late growth stage (from mid-May to mid-November)”, and different seedling cultivation measures should be implemented for each growth stage. The fast-growing stage of the half-sib families of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ can be divided into early fast-growing type (from early April to mid-April), mid-term fast-growing type (from mid-April to early May), and late fast-growing type (from early May to mid-May). There are obvious differences in the initial and terminal fast-growing stage of seedling height and ground diameter between different individuals, showing an allometric growth phenomenon. Among them, 85% of the progenies belong to the early and mid-term fast-growing types in seedling height, while 91% of the progenies belong to the mid-term and late fast-growing types in ground diameter. The five progenies V39, V49, V21, V27, and V40 grow rapidly, and their seedling height (202.0–226.0 cm) and ground diameter (18.96–22.04 mm) are both higher than those of the female parent (seedling height and ground diameter are 197.9 cm and 16.14 mm, respectively), while the number of branches (14–38) is larger than that of the female parent (9), their young leaves are all fuchsia or brownish red, and their barks are smooth or relatively smooth. In conclusion, the Gompertz model can predict the variation tendency of growth characteristics of the half-sib families of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’ with time during seedling stage, and provide insights into the annual growth rules of the progenies; the comprehensive evaluation scores of five progenies V39, V49, V21, V27, and V40 are relatively high and are considered as excellent progeny individuals of *M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’, and their ornamental evaluation can be further strengthened in the future to achieve the breeding goal of both excellent ornamental and growth characteristics.

Key words: *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’; half-sib family; seedling growth; growth model; progeny optimization

海棠是蔷薇科 (Rosaceae) 苹果属 (*Malus* Mill.) 中果径较小 (小于或等于 5 cm) 的一类植物总称,其资源丰富、应用范围广,是北温带重要的园林观赏树种^[1]。目前,全世界苹果属有 30 余种,人工培育的栽培品种已达 700 多个,但现有种质多为单瓣白花或红花,重瓣粉花类型较少,仅‘范艾斯汀’ (*M. spectabilis* ‘Vans Eseltine’)、‘高原玫瑰’ (*M. spectabilis* ‘Praire Rose’)、‘粉红霓裳’ (*M. spectabilis* ‘Fenhong Nichang’) 等约 20 个海棠品种,虽然这些品种观赏价值高,但多数品种分枝能力弱且长势缓慢,严重限制其种质资源开发与产业化利用。现阶段海棠研究主要集中于品种分类^[2-3]、栽培选育^[4-5]、色彩变化^[6-7]、物候特征^[8-9]、花粉外壁纹饰^[10]等方面,较少涉及苗期生长特性,这不利于海棠苗木的精准抚育和品种改良。

目前,苗木半同胞家系研究在林木育种和林业生产上取得了许多进展,主要集中在 3 个方面。1) 遗传评估与优选:对子代的生长特性,如株高、地径、冠幅等进行遗传指数评估,选取优良家系为林业生产提供

育种材料^[11]; 2) 遗传与环境互作:研究不同生境或不同种源环境下半同胞家系的苗期生长特性^[12-13],揭示遗传与环境之间的互作关系,为精准育种提供依据; 3) 抗性遗传改良:研究半同胞家系的抗病性和环境胁迫适应性,以培育抗性强的优良品种^[14]。然而,目前对于半同胞家系苗期生长的长期效应研究较少,难以得知苗木生长初期特性随时间的变化,通过建立数学模型来预测苗木的变化趋势,可更深入地了解其生长规律,并为制定科学有效的育种策略和管理措施奠定基础。

非线性模型是传统的生长模型,可对变量的变化趋势进行拟合和预测,解决了线性模型无法处理或难以有效处理的实际问题,在林木和作物生长上应用较多^[15]。苗木生长采用模型拟合可将苗期进行划分,定期、定量进行苗木抚育^[16]; 在农业生产上,模型拟合可有效预测生长拐点和临界点,确定最佳收获期以实现生产量化^[17],如利用渐近减速点来描述黑麦 (*Secale cereale* Linn.) 干物质质量的积累^[18]。根、茎、叶、果实及种子的生长变化均遵循“慢—快—慢”的

模式,均可用生长模型进行拟合^[19-20]。常用的生长模型主要有 Logistic、Gompertz 和 Bertalanffy 模型。Logistic 模型在上渐近线 50% 处达到拐点,适合拟合对称增长过程;Gompertz 模型在上渐近线 37% 处达到拐点;Bertalanffy 模型的拐点高度值是最大生长量的一半。

苗木自由授粉虽不能实现定向培育,但其子代在变异情况和数量上远远优于控制授粉,可为品种选育提供多种可能。‘范艾斯汀’海棠属于重瓣粉花品种,其花瓣规整,观赏价值较高,但具有生长缓慢、分枝能力弱的典型特点,本研究以‘范艾斯汀’海棠为母本自由授粉,对其子代嫁接苗的生长、观赏和抗性指标进行观测。选取适宜的生长模型拟合子代群体的年生长过程,划分生长阶段,以期给予科学的育苗措施,为海棠的生产实践及应用推广提供理论基础;并采用层次分析(AHP)法对子代群体进行综合评价,以筛选生长迅速、表型优良子代为育种目标,以期打破母本生长缓慢的局限性。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地位于江苏省扬州市仙女镇国家海棠种质基因库(东经 119°55′、北纬 32°42′),属北亚热带季风气候,年平均气温 14.9℃~16.5℃,年平均降水量 800~1 000 mm,无霜期较长。土壤类型为沙壤土,地势平坦,排水良好。

1.2 材料

实验材料均来自国家海棠种质基因库,母本为‘范艾斯汀’海棠嫁接苗,子代为其半同胞家系 2 年生嫁接苗。2019 年 11 月,对树龄 10 a 的母树采种,种子在 0℃~5℃低温环境下沙藏 60 d 后,次年春季在海棠基地进行田间点播;从 100 余株实生苗中选出 61 株生长良好的苗木,并进行挂牌(编号 V01~V61)。2021 年 9 月以 1 年生湖北海棠 [*Malus hupehensis* (Pamp.) Rehder] 实生苗为砧木芽接,砧木距离地面 3~5 cm,次年早春对嫁接苗移植,株距 20 cm、行距 20 cm;2023 年从各子代中选取生长基本一致的 30 株苗木进行测定。嫁接所选砧木的粗细基本一致,嫁接时间相同,田间生长条件和管理措施一致。对照组为 30 株同年嫁接的母本‘范艾斯汀’海棠嫁接苗。

1.3 方法

1.3.1 生长指标测定 使用卷尺(精度 0.1 cm)测量苗高(嫁接口到苗顶端的高度);使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量地径(嫁接口上方 3 cm 处的直径)。测定时间从 2023 年 4 月开始,于每月月中旬测定 1 次,直至新梢不再生长时(即 11 月苗木落叶末期前)停止测量。

1.3.2 叶片色彩测定 2023 年 5 月,使用 CR-400 色差仪[爱色丽(上海)色彩科技有限公司]测定苗木的新叶颜色和成熟叶颜色,新叶为苗木顶端的幼嫩叶片,成熟叶为苗木中位叶;测定部位为叶片上表皮,取叶脉对称的 6 个点,各叶位取 3 枚叶片,测定 18 个重复,结果取均值。使用 CR-400 色差仪测定明度(L^*)以及色相 a^* 、 b^* 值,并计算色彩饱和度(C^*)和色调角(h°),计算公式分别为 $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 和 $h^\circ = \arctan(b^*/a^*)$ 。

1.3.3 其他性状观测 2023 年 7 月,观测成熟叶的叶形、叶表面形态及叶尖形状;8 月中旬对苗木成熟叶的卷曲、灼伤及落叶情况进行观察,记录耐热性;9 月中旬对苗木的分枝数和树皮光滑度进行观察。定性性状为大多数样本表现的性状,定量性状为样本均值,参照文献[21-22]中的方法并结合子代实际情况进行等级划分。‘范艾斯汀’海棠半同胞家系表型性状描述与分级见表 1。

1.3.4 模型优选 3 种生长模型表达式及特征参数如表 2 所示,拟合时运用 Levenberg-Marquart 算法进行迭代,直至拟合收敛。对公式求三阶导,令其为 0,得出 t_1 、 t_2 值。 t_1 值是苗木从当年开始展叶到速生期的分界点,即速生始期; t_2 值是从速生期到停止生长的分界点,即速生末期。

采用决定系数(R^2)、赤池信息准则(AIC)和均方误差(MSE)3 种方法检验模型拟合度。 R^2 值是用来衡量模型拟合程度的指标,其值越接近 1 代表拟合效果越好,计算公式为 $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}$,式中, x_i 为拟合值, y_i 为实测值, \bar{y} 为实测均值, n 为样本个数。AIC 值用来衡量模型的相对质量和拟合数据的优劣,能避免出现过度拟合的情况,通常选取 AIC 值较小的模型作为最优统计模型,计算公式为 $AIC = 2k + n' \ln(SSR/n')$,式中, k 为参数个数, n' 为个案数,SSR 为残差平方和。MSE 值用来衡量拟合值和实测值之间的差异,数值越低代表拟合效果越好,计算

公式为 $MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$, 式中, n 为样本个数, x_i 为拟合值, y_i 为实测值。除根据 R^2 、 AIC 和 MSE 值判断

模型拟合优劣外, 还结合实际拟合情况进一步判定, 如在拟合过程中出现违背生长规律的现象, 则该模型应剔除。

表 1 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系表型性状描述与分级

Table 1 Description and classification of phenotypic traits of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’ tested

表型性状 Phenotypic trait	等级 Level				
	1	2	3	4	5
苗高/cm Seedling height (h)	$73.0 \leq h < 104.0$	$104.0 \leq h < 135.0$	$135.0 \leq h < 167.0$	$167.0 \leq h < 198.0$	$198.0 \leq h < 229.0$
地径/mm Ground diameter (D)	$7.50 \leq D < 10.40$	$10.40 \leq D < 13.30$	$13.30 \leq D < 16.20$	$16.20 \leq D < 19.20$	$19.20 \leq D < 22.10$
分枝数 Branch number (n_B)	$n_B < 10$	$10 \leq n_B < 20$	$20 \leq n_B < 30$	$30 \leq n_B < 40$	$n_B \geq 40$
新叶颜色 Young leaf color	绿色 Green	亮绿色 Brilliant green	棕红色 Brownish red	紫红色 Fuchsia	鲜红色 Bright red
成熟叶颜色 Mature leaf color	暗绿色 Dark green	绿色 Green	棕绿色 Brownish green	亮绿色 Brilliant green	
树皮光滑度 Bark smoothness	粗糙 Rough	较光滑 Relatively smooth	光滑 Smooth		
叶形 Leaf shape	卵形叶 Ovate leaf	椭圆形叶 Elliptic leaf	卵形叶和掌形裂叶 Oval leaf and palmate lobed leaf	椭圆形叶和掌形裂叶 Elliptic leaf and palmate lobed leaf	掌形裂叶 Palmate lobed leaf
叶表面形态 Leaf surface morphology	多皱 Crinkliness	抱和 Cuddle	平展 Flat		
叶尖形状 Leaf tip shape	急尖 Acute tip	渐尖 Taper tip	尾尖 Caudal tip		
耐热性 Heat resistance	单株 90% 以上的叶片卷曲或灼伤, 严重落叶 More than 90% of the leaves of a single plant are curled or burned, with severely deciduous	单株 70% 的叶片卷曲或灼伤, 严重落叶 70% of the leaves of a single plant are curled or burned, with severely deciduous	单株 50% 的叶片卷曲或灼伤, 部分落叶 50% of the leaves of a single plant are curled or burned, with partially deciduous	单株 30% 的叶片卷曲或灼伤 30% of the leaves of a single plant are curled or burned	单株不超过 10% 的叶片卷曲或灼伤 No more than 10% of the leaves of a single plant are curled or burned

表 2 3 种生长模型表达式及特征参数¹⁾

Table 2 Expressions and characteristic parameters of three growth models¹⁾

模型 Model	表达式 Expression	t_1	拐点 T Inflection T	t_2	拐点高度 Inflection height
Bertalanffy	$y = K(1 - ae^{-bt})^3$	$(\ln \frac{9a}{4 + \sqrt{7}}) / b$	$(\ln 3a) / b$	$(\ln \frac{9a}{4 - \sqrt{7}}) / b$	$K/2$
Gompertz	$y = Ke^{-ae^{-bt}}$	$(\ln \frac{2a}{3 + \sqrt{5}}) / b$	$(\ln a) / b$	$(\ln \frac{2a}{3 - \sqrt{5}}) / b$	K/e
Logistic	$y = K / (1 + ae^{-bt})$	$(\ln \frac{a}{2 + \sqrt{3}}) / b$	$(\ln a) / b$	$(\ln \frac{a}{2 - \sqrt{3}}) / b$	$8K/27$

¹⁾ t_1 : 速生始期 Initial fast-growing stage; t_2 : 速生末期 Terminal fast-growing stage; y : 累积生长量频率 Frequency of cumulative growth; K : 最大累积生长量频率 Frequency of maximum cumulative growth; a, b : 参数 Parameter; e : 自然对数的底数 Base of the natural logarithm; t : 累积天数频率 Frequency of cumulative days.

1.3.5 基于最优模型的生长期、速生期类型划分及生长量计算 苗木生长过程可用 t_1 、 t_2 值划分为 3 个时期, t_1 前为生长前期, t_1 至 t_2 为速生期, t_2 后为生长后期。统计最早和最晚进入速生期的 2 个子代间隔天数, 以天数的 1/3 为级差, 从第 1 个进入速生期的子代为起点按照极差依次划分为前期速生型、中期速生型和后期速生型^[23]。

苗高和地径的生长量计算公式为生长量 = 累积生长量频率 × 年生长量, 其中, 累积生长量频率由累

积天数频率(相邻月份间隔天数与测量总天数的比值)带入最优模型计算获得, 年生长量为苗木生长末期与生长初期的生长量之差。

1.3.6 半同胞家系综合评价 以优良子代评价为总目标层(A), 以生长、观赏和抗性指标为准则层(C_i), 以苗高、地径、分枝数、新叶颜色、成熟叶颜色、树皮光滑度、叶形、叶表面形态、叶尖形状及耐热性为指标层(P_i)构建层次分析(AHP)法评价模型。

按照生长、观赏和抗性指标顺序以及性状分级

(表1)进行性状相对重要性赋值,建立 A-C、C₁-P、C₂-P、C₃-P 4个判断矩阵。采用1~9比率标度法^[24]比较两两因子对观赏性的相对重要程度,并对构造的判断矩阵进行一致性检验,当随机一致性比率(CR)小于0.1时认为一致性检验通过。

根据公式 $Y = \sum Y_i W_i$ 对子代进行综合评价,式中,Y为加权得分, Y_i 为第*i*项指标的评分值, W_i 为第*i*项指标的权重。当指标加权得分累积值大于0.85时,则视为子代优选的重要指标。

1.4 数据处理和分析

使用 EXCEL 16.66.1 软件进行数据整理,使用 SPSS Statistics 26.0.0.2 软件进行系统聚类分析,使用 Origin 2023 软件进行制图,使用 Adobe Photoshop 2021 软件进行色彩还原。

2 结果和分析

2.1 子代生长模型优选

对‘范艾斯汀’海棠半同胞家系进行生长模型拟合,各模型拟合度统计指标见表3。结果显示:苗高和地径生长模型的决定系数(R^2)由大至小依次为

Bertalanffy 模型、Gompertz 模型、Logistic 模型,赤池信息准则(AIC)和均方误差(MSE)由大至小依次为 Logistic 模型、Gompertz 模型、Bertalanffy 模型。根据 R^2 值越大,AIC 和 MSE 值越低的评价标准,Bertalanffy 模型优于 Gompertz 模型,Gompertz 模型优于 Logistic 模型。

根据各模型的拟合值绘制散点图(图1)。结果显示:3种模型在各时间点上的拟合值差异小,但 Bertalanffy 模型在苗高生长量和地径生长量初始值拟合上出现负值,违背实际予以剔除。综合考虑,Gompertz 模型为‘范艾斯汀’海棠半同胞家系的最优模型。

表3 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系3种生长模型拟合度的统计指标¹⁾

Table 3 Statistical indexes of fitting degree of three growth models of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’¹⁾

模型 Model	苗高 Seedling height			地径 Ground diameter		
	R^2	AIC	MSE	R^2	AIC	MSE
Bertalanffy	0.927	-1 965.67	0.100	0.903	-1 876.53	0.113
Gompertz	0.924	-1 950.63	0.102	0.901	-1 867.45	0.114
Logistic	0.913	-1 894.49	0.108	0.891	-1 828.38	0.119

¹⁾ R^2 : 决定系数 Determination coefficient; AIC: 赤池信息准则 Akaike information criteria; MSE: 均方误差 Mean square error.

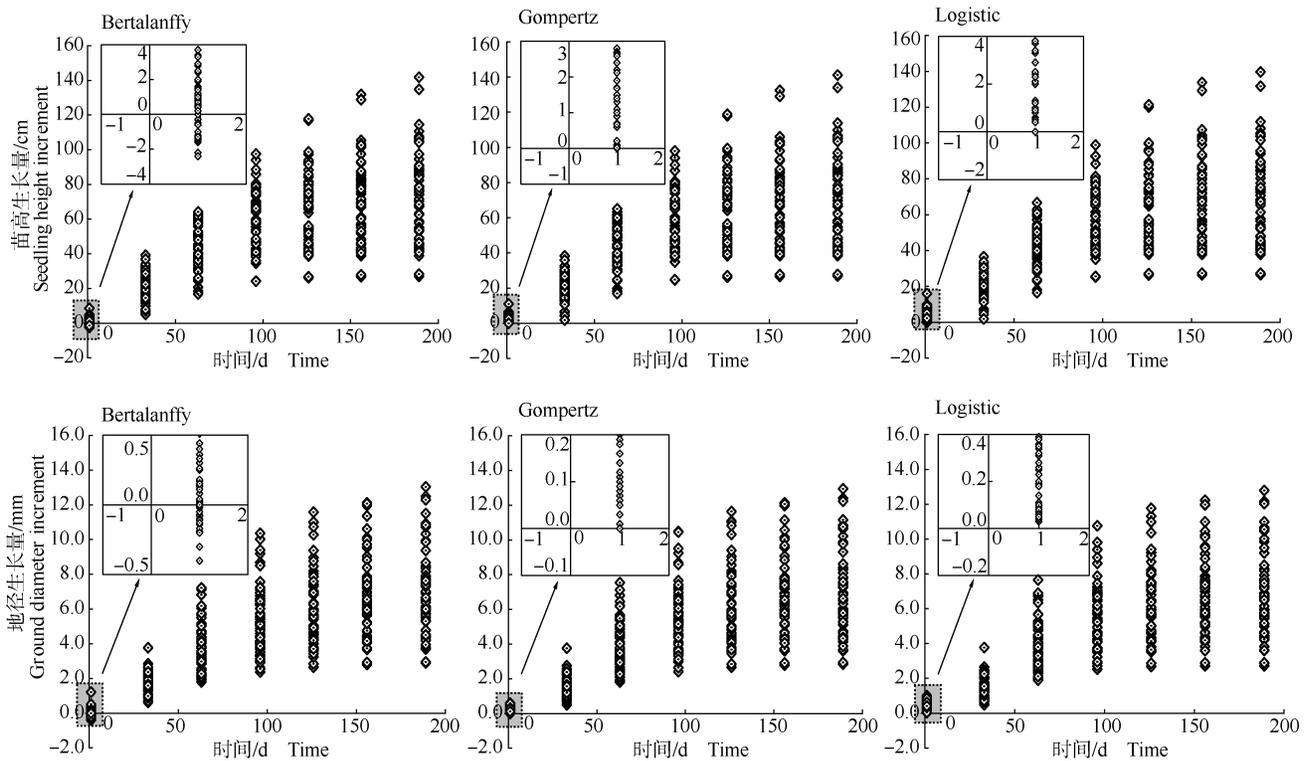


图1 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系3种生长模型拟合值散点图

Fig. 1 Fit value scatter plots of three growth models of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’

2.2 基于 Gompertz 模型的子代生长期及生长量比较

基于最优模型 Gompertz 对 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗高生长量和地径生长量进行拟合, 苗高生长量和地径生长量的年生长曲线为 “S” 型, 呈 “慢—快—慢” 的生长节律, 以子代 V07 为例 (图 2)。苗高和地径生长期均可划分为生长前期、速生期和生长后期, 各时期的平均生长量、平均持续时间及其占比见表 4。

结果显示: 苗高和地径速生期的平均生长量分别是生长前期的 8.16 和 7.98 倍, 是生长后期的 2.17 和 1.92 倍; 苗高和地径的平均生长量表现为速生期最高, 生长后期次之, 生长前期最低。苗高速生期的平均生长量占比为 63.15%, 61 个子代苗高速生期的平均持续时间为 59 d, 占比为 27.3%; 地径速生期的平均生长量占比为 60.76%, 61 个子代地径速生期的平均持续时间为 63 d, 占比为 29.2%。

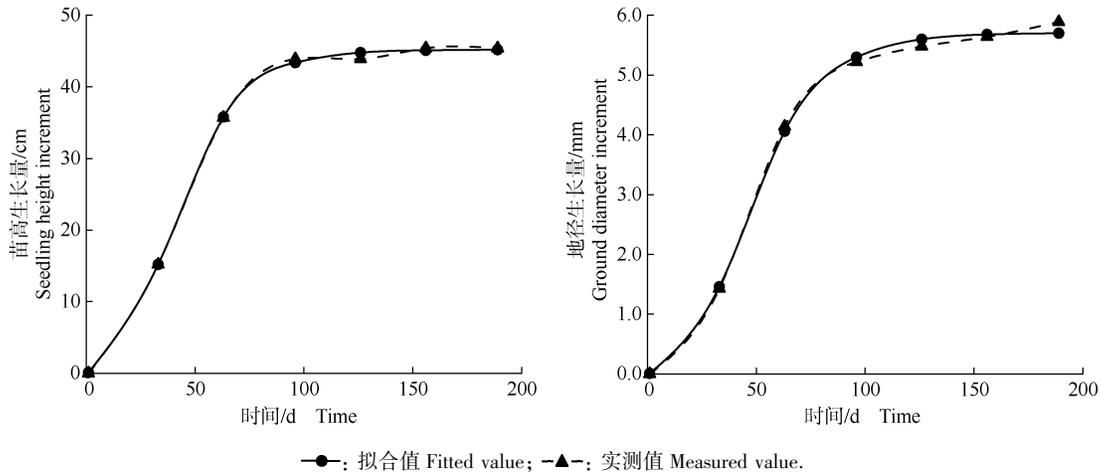


图 2 ‘范艾斯汀’海棠半同胞子代 V07 苗高生长量和地径生长量的年生长曲线
Fig. 2 Annual growth curves of seedling height increment and ground diameter increment of half-sib progeny V07 of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’

表 4 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗高和地径各生长期的平均生长量、平均持续时间及其占比¹⁾
Table 4 Mean increment and duration, and their proportions during each growth stage of seedling height and ground diameter of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’¹⁾

生长期 Growth stage	苗高 Seedling height				地径 Ground diameter			
	MI/cm ($\bar{X} \pm SD$)	$P_{MI}/\%$	t_M/d	$P_t/\%$	MI/mm ($\bar{X} \pm SD$)	$P_{MI}/\%$	t_M/d	$P_t/\%$
生长前期 Early growth stage	5.5±2.1	7.74	35	16.2	0.52±0.20	7.61	39	18.1
速生期 Fast-growing stage	44.9±17.4	63.15	59	27.3	4.15±1.60	60.76	63	29.2
生长后期 Late growth stage	20.7±6.8	29.11	122	56.5	2.16±0.70	31.63	114	52.8

¹⁾ MI: 平均生长量 Mean increment; P_{MI} : 平均生长量占比 Mean increment proportion; t_M : 平均持续时间 Mean duration; P_t : 平均持续时间占比 Mean duration proportion.

2.3 基于 Gompertz 模型的子代速生期类型划分

结果 (表 5) 显示: 在苗高方面, ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系在速生期始末上存在差异, 速生始期为 4 月 5 日至 5 月 18 日, 速生末期为 5 月 11 日至 8 月 28 日。进入速生期最早的子代 V32 与最晚的子代 V59 间隔 44 d, 以 15 d 为级差, 将各子代速生期划分为前期速生型、中期速生型和后期速生型。其中, 前期速生型有 21 个子代, 占比 34.4%; 中期速生型有 31 个子代, 占 50.8%; 后期速生型有 9 个子代, 占

14.8%。

结果 (表 5) 还显示: 在地径方面, 各子代在速生期始末上也存在差异, 速生始期为 4 月 1 日至 5 月 14 日, 速生末期为 5 月 29 日至 9 月 8 日。进入速生期最早的子代 V51 与最晚的子代 V01 间隔 44 d, 以 15 d 为级差进行划分。其中, 前期速生型有 5 个子代, 占 8.2%; 中期速生型有 32 个子代, 占 52.5%; 后期速生型有 24 个子代, 占 39.3%。

总体上看, 在该家系中, 地径的速生始期比苗高

表5 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗高、地径速生期类型划分

Table 5 Division of fast-growing stage types of seedling height and ground diameter of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’

材料编号 No. of material	苗高 Seedling height			材料编号 No. of material	地径 Ground diameter		
	速生始期 Initial fast-growing stage (MM-DD)	速生末期 Terminal fast-growing stage (MM-DD)	持续时间/d Duration		速生始期 Initial fast-growing stage (MM-DD)	速生末期 Terminal fast-growing stage (MM-DD)	持续时间/d Duration
前期速生型 Early fast-growing type				前期速生型 Early fast-growing type			
V32	04-05	06-16	73	V51	04-01	07-21	112
V43	04-09	06-22	75	V15	04-03	08-07	127
V45	04-11	06-30	81	V31	04-15	06-20	67
V08	04-13	06-13	62	V02	04-16	05-29	44
V12	04-14	07-05	83	V28	04-16	06-21	67
V11	04-15	06-22	69	中期速生型 Mid-term fast-growing type			
V39	04-15	06-25	72	V34	04-17	07-15	90
V48	04-17	05-11	25	V48	04-17	07-07	82
V09	04-18	05-13	26	V23	04-19	09-08	143
V13	04-18	06-06	50	V49	04-19	06-29	72
V16	04-18	06-05	49	V18	04-20	06-28	70
V23	04-18	06-13	57	V58	04-20	06-14	56
V33	04-18	05-30	43	V16	04-22	08-05	106
V56	04-18	05-25	38	V27	04-22	07-26	96
V58	04-18	06-07	51	V37	04-22	06-28	68
V10	04-19	07-28	101	V04	04-23	07-19	88
V29	04-19	06-08	51	V26	04-23	08-08	108
V35	04-19	06-09	52	V10	04-24	06-19	57
V02	04-20	07-23	95	V11	04-24	06-10	48
V22	04-20	07-09	81	V25	04-24	07-31	99
V53	04-20	07-04	76	V47	04-24	06-19	57
中期速生型 Mid-term fast-growing type				V09	04-25	06-09	46
V17	04-21	06-23	64	V19	04-25	06-23	60
V25	04-21	06-16	57	V30	04-25	07-22	89
V26	04-21	07-01	72	V33	04-26	06-27	63
V27	04-21	05-26	36	V56	04-26	07-04	70
V30	04-21	06-11	52	V43	04-27	06-29	64
V38	04-21	06-17	58	V05	04-28	07-26	90
V46	04-21	07-07	78	V55	04-28	06-19	53
V55	04-21	05-30	40	V32	04-29	06-25	58
V57	04-21	05-17	27	V39	04-29	07-26	89
V04	04-22	07-02	72	V44	04-29	07-01	64
V37	04-22	05-25	34	V46	04-29	06-30	63
V50	04-22	06-27	67	V59	04-29	06-21	54
V14	04-24	06-25	63	V12	04-30	07-31	93
V19	04-24	05-21	28	V60	04-30	06-19	51
V21	04-24	07-21	89	V61	04-30	07-02	64
V51	04-24	07-04	72	V42	05-01	07-05	66
V49	04-25	08-28	126	后期速生型 Late fast-growing type			
V24	04-26	07-10	76	V03	05-02	06-15	45
V41	04-26	06-21	57	V13	05-02	06-06	36
V18	04-27	07-11	76	V36	05-02	06-17	47
V20	04-27	07-08	73	V07	05-03	06-12	41
V07	04-29	06-04	37	V40	05-03	07-30	89
V15	04-29	05-24	26	V50	05-03	06-25	54
V36	04-29	05-24	26	V54	05-03	06-27	56
V05	05-01	07-25	86	V35	05-04	06-18	46

续表5 Table 5 (Continued)

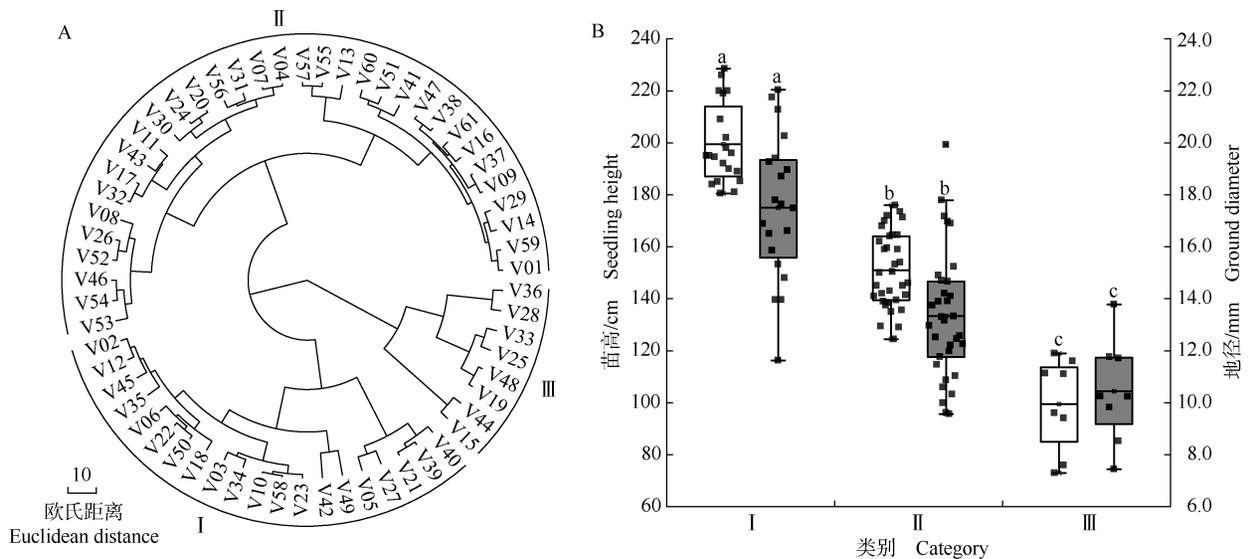
材料编号 No. of material	苗高 Seedling height			材料编号 No. of material	地径 Ground diameter		
	速生始期 Initial fast-growing stage (MM-DD)	速生末期 Terminal fast-growing stage (MM-DD)	持续时间/d Duration		速生始期 Initial fast-growing stage (MM-DD)	速生末期 Terminal fast-growing stage (MM-DD)	持续时间/d Duration
V28	05-01	06-14	45	V41	05-04	06-29	57
V61	05-01	05-29	29	V45	05-04	06-24	52
V03	05-03	05-27	25	V52	05-05	06-05	32
V31	05-03	05-28	26	V08	05-06	07-11	67
V06	05-05	07-28	85	V06	05-07	07-25	80
V47	05-05	06-12	39	V17	05-07	06-02	27
后期速生型 Late fast-growing type				V38	05-07	06-06	31
V42	05-06	07-12	68	V14	05-08	06-10	34
V54	05-06	06-22	48	V24	05-08	06-14	38
V34	05-07	07-31	86	V20	05-09	06-05	28
V44	05-08	06-20	44	V53	05-10	06-03	25
V60	05-11	06-17	38	V57	05-10	06-04	26
V40	05-12	07-31	81	V22	05-11	06-15	36
V01	05-13	08-12	92	V29	05-11	06-14	35
V52	05-14	06-20	38	V21	05-12	06-15	35
V59	05-18	06-11	25	V01	05-14	06-16	34

早,速生末期较苗高晚,速生期持续时间长,苗高和地径出现异速生长现象。

2.4 子代生长参数聚类分析

基于‘范艾斯汀’海棠半同胞家系停止生长后的苗高和地径进行系统聚类(图 3-A),在欧氏距离 45 处将该家系分为 3 大类,各类间子代苗高、地径存在

显著差异(图 3-B)。其中, I 类包含 20 个子代,生长速度快,平均苗高为 199.5 cm,平均地径为 17.50 mm; II 类包含 33 个子代,生长速度中等,平均苗高为 151.0 cm,平均地径为 13.33 mm; III 类包含 8 个子代,生长速度慢,平均苗高为 99.5 cm,平均地径为 10.44 mm。



□: 苗高 Seedling height; ■: 地径 Ground diameter. B 图中同一指标误差线上不同小写字母表示不同类别间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases on error bars of the same index in figure B indicate the significant difference ($P < 0.05$) between different categories.

图 3 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系聚类图(A)及各类的苗高、地径(B)

Fig. 3 Cluster graph (A) and seedling height and ground diameter of each type (B) of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’

2.5 子代优选

在进行‘范艾斯汀’海棠半同胞家系优株评价时,以选育出长势优良的子代为主,同时还需要兼顾观赏性和抗性指标,层次分析(AHP)法在进行多表型性状综合评价时,可针对目的指标权重进行侧重。‘范艾斯汀’海棠半同胞家系优株评价的判断矩阵及权重见表6。结果显示:苗高、地径、分枝数、新叶颜色及耐热性的加权得分累计值为0.8546,是进行子代优选的重要指标。构造的4个判断矩阵的随机一致性比率(CR)均小于0.1,说明一致性检验通过,各

指标权重合理。

对生长速度快的‘范艾斯汀’海棠半同胞家系I类20个子代表型性状进行比较,结果(表7)显示:子代V39、V49、V21、V27、V40综合评价得分(加权得分)较高,分别为4.41、4.16、4.07、4.06和3.91,为优选子代。这5个优选子代的苗高、地径和分枝数均优于母本;树皮光滑或较光滑,新叶紫红色或棕红色,优于母本(树皮粗糙,新叶亮绿色);优选子代V49叶形为椭圆形,优选子代V21、V27、V39、V40的耐热性优于母本。

表6 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系优株评价体系及权重¹⁾

Table 6 Evaluation system and its weight of superior strains of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’¹⁾

		判断矩阵 Judgment matrix				权重 Weight	总权重 Total weight	一致性检验 λ_{\max}	Consistency test CR			
A-C _i	A	C ₁	C ₂	C ₃								
	C ₁	1	2	7	0.590 7		3.014 0	0.013 0				
	C ₂	1/2	1	5	0.333 8							
	C ₃	1/7	1/5	1	0.075 5							
C ₁ -P _i	C ₁	P ₁	P ₂									
	P ₁	1	1		0.500 0	0.295 4	2.000 0	0.000 0				
	P ₂	1	1		0.500 0	0.295 4						
C ₂ -P _i	C ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉				
	P ₃	1	2	3	4	5	6	7	0.328 8	0.109 8	7.557 0	0.069 0
	P ₄	1/2	1	2	3	5	6	7	0.235 2	0.078 5		
	P ₅	1/3	1/2	1	3	5	6	7	0.188 7	0.063 0		
	P ₆	1/4	1/3	1/3	1	3	5	6	0.116 4	0.038 9		
	P ₇	1/5	1/5	1/5	1/3	1	3	4	0.065 2	0.021 8		
	P ₈	1/6	1/6	1/6	1/5	1/3	1	3	0.040 5	0.013 5		
	P ₉	1/7	1/7	1/7	1/6	1/4	1/3	1	0.025 2	0.008 4		
	C ₃ -P _i	C ₃	P ₁₀									
P ₁₀		1							1.000 0	0.075 5	1.000 0	0.000 0

¹⁾ A: 目标层 Target layer; C_i: 准则层 Criterion layer; P_i: 指标层 Index layer; C₁: 生长指标 Growth index; C₂: 观赏指标 Ornamental index; C₃: 抗性指标 Resistance index; P₁: 苗高 Seedling height; P₂: 地径 Ground diameter; P₃: 分枝数 Branch number; P₄: 新叶颜色 Young leaf color; P₅: 成熟叶颜色 Mature leaf color; P₆: 树皮光滑度 Bark smoothness; P₇: 叶形 Leaf shape; P₈: 叶表面形态 Leaf surface morphology; P₉: 叶尖形状 Leaf tip shape; P₁₀: 耐热性 Heat resistance; λ_{\max} : 最大特征根 Maximum characteristic root; CR: 随机一致性比率 Random consistency ratio.

表7 ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系I类子代表型性状比较

Table 7 Comparison on phenotypic traits of class I progeny of half-sib families of *Malus spectabilis* ‘Vans Eseltine’

材料 编号 No. of material	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter	分枝数 Branch number	新叶 颜色 ¹⁾ Young leaf color ¹⁾	成熟叶 颜色 ²⁾ Mature leaf color ²⁾	树皮 光滑度 ³⁾ Bark smoothness ³⁾	叶形 ⁴⁾ Leaf shape ⁴⁾	叶表面 形态 ⁵⁾ Leaf surface morphology ⁵⁾	叶尖 形状 ⁶⁾ Leaf tip shape ⁶⁾	耐热性 ⁷⁾ Heat resistance ⁷⁾	加权得分 Weighted score
优良子代 Excellent progeny											
V39	220.0	21.75	38	4	2	3	1	3	3	5	4.41
V49	202.0	19.27	35	3	1	2	2	3	1	4	4.16
V21	219.0	21.28	19	3	2	2	1	3	2	5	4.07
V27	226.0	22.04	14	3	2	2	1	3	1	5	4.06
V40	220.0	18.96	20	4	1	3	1	1	2	5	3.91

续表7 Table 7 (Continued)

材料编号 No. of material	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter	分枝数 Branch number	新叶颜色 ¹⁾ Young leaf color ¹⁾	成熟叶颜色 ²⁾ Mature leaf color ²⁾	树皮光滑度 ³⁾ Bark smoothness ³⁾	叶形 ⁴⁾ Leaf shape ⁴⁾	叶表面形态 ⁵⁾ Leaf surface morphology ⁵⁾	叶尖形状 ⁶⁾ Leaf tip shape ⁶⁾	耐热性 ⁷⁾ Heat resistance ⁷⁾	加权得分 Weighted score
其他子代 Other progenies											
V45	189.0	20.26	23	4	1	1	1	2	2	5	3.85
V35	195.0	19.41	10	4	1	1	1	1	3	5	3.62
V23	184.0	17.48	13	1	3	3	2	3	1	5	3.44
V10	185.0	16.61	9	3	3	2	1	3	2	5	3.43
V12	190.0	16.50	14	3	1	1	2	1	2	5	3.37
V42	209.0	13.96	5	4	1	1	1	3	3	5	3.35
V05	228.5	17.79	5	1	1	1	1	3	2	4	3.33
V03	180.5	18.71	18	3	1	3	1	3	2	3	3.30
V02	192.0	17.63	14	1	1	2	1	3	2	5	3.26
V22	196.0	13.96	11	3	2	3	1	3	1	5	3.21
V34	181.0	15.85	15	4	1	1	1	1	2	5	3.13
V58	185.2	16.89	10	1	1	2	1	2	1	5	3.13
V06	198.0	15.32	12	1	2	2	3	3	3	4	3.00
V50	195.0	14.80	6	1	3	2	2	3	3	4	2.93
V18	194.5	11.63	8	1	2	1	1	3	3	4	2.81
CK ⁸⁾	197.9	16.14	9	2	2	1	1	3	1	4	2.87

¹⁾ 1: 绿色 Green; 2: 亮绿色 Brilliant green; 3: 棕红色 Brownish red; 4: 紫红色 Fuchsia.

²⁾ 1: 暗绿色 Dark green; 2: 绿色 Green; 3: 棕绿色 Brownish green.

³⁾ 1: 粗糙 Rough; 2: 较光滑 Relatively smooth; 3: 光滑 Smooth.

⁴⁾ 1: 卵形叶 Ovate leaf; 2: 椭圆形叶 Elliptic leaf; 3: 卵形叶和掌形裂叶 Oval leaf and palmate lobed leaf.

⁵⁾ 1: 多皱 Crinkliness; 2: 抱和 Cuddle; 3: 平展 Flat.

⁶⁾ 1: 急尖 Acute tip; 2: 渐尖 Taper tip; 3: 尾尖 Caudal tip.

⁷⁾ 3: 单株 50% 的叶片卷曲或灼伤, 部分落叶 50% of the leaves of a single plant are curled or burned, with partially deciduous; 4: 单株 30% 的叶片卷曲或灼伤 30% of the leaves of a single plant are curled or burned; 5: 单株不超过 10% 的叶片卷曲或灼伤 No more than 10% of the leaves of a single plant are curled or burned.

⁸⁾ CK: 对照组 The control group.

3 讨论和结论

本研究中, Bertalanffy、Gompertz 和 Logistic 模型均能对‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗期生长做出拟合, 但拟合效果存在明显差异。3 种模型拐点出现时间和所在高度不同, Gompertz 模型拐点出现时间早于 Bertalanffy 模型, 但拐点处累积生长量低于 Logistic 模型。本研究中, Bertalanffy 模型虽在决定系数 (R^2)、赤池信息准则 (AIC) 和均方误差 (MSE) 3 个统计指标上表现最佳, 但部分子代的苗高和地径在拟合初始值上出现负值, 表现出过度拟合, 综合考虑 Gompertz 模型最适宜拟合‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗期生长。

苗高、地径作为评价苗木质量的重要指标^[25], 对其探究有助于了解苗木生长状态。作者观察发现, ‘范艾斯汀’海棠一般在 3 月中旬进入展叶期, 后进

入持续生长阶段, 直至 11 月中旬进入落叶末期。Gompertz 模型拟合结果显示: ‘范艾斯汀’海棠半同胞家系苗高和地径年生长呈“慢—快—慢”的节律, 具有明显的阶段性, 可划分为生长前期 (3 月中至 5 月中)、速生期 (4 月初至 9 月初) 和生长后期 (5 月中至 11 月中)。各子代苗高、地径在速生期始末上存在明显差异, 该家系地径速生始期比苗高早, 但速生末期晚, 速生期持续时间长, 出现这种异速生长现象可能是因为苗木在不同时期有不同的生长中心^[26]。根据各子代进入速生期的时间, 划分为前期速生型 (4 月初至 4 月中)、中期速生型 (4 月中至 5 月初) 和后期速生型 (5 月初至 5 月中)。从苗高看, 85% 的子代属于前期、中期速生型; 从地径看, 91% 的子代属于中期、后期速生型, 因此可确定 4 月初至 5 月初是苗高抚育的关键时期, 4 月中至 5 月中是地径增粗的关键时期, 这与武启飞等^[23]的研究结果不同, 主要原因在于海棠品种的差异。此外, 苗高、地径的速生期持

续时间虽较短,但生长量大,与杨斌^[27]对柳树(*Salix* spp.)以及 Magnussen 等^[28]对黑杨(*Populus nigra* Linn.)的研究结果一致。速生期生长量决定苗木当年总生长量^[29],是苗木形成生长差异的主要时期,且速生期生长量与持续时间存在相关性^[23],故二者可作为评价苗木生长状况的重要指标^[30]。

海棠种质资源虽丰富,但重瓣粉花类型较少。‘范艾斯汀’海棠作为重瓣粉花品种之一,观赏价值高,但其光饱和点低、光补偿点高,净光合速率偏低,导致生长势弱^[31];还具有分枝能力弱、树皮粗糙的缺点,严重制约了其产业化进程。观赏海棠叶色与花色具有强相关性^[32]。根据周婷等^[33]推出的观赏海棠花色的苗期预测方法,子代花色可分为2种情况:1)当上位叶为棕红色或绿色系,中、下位叶为绿色系时,花色一般在蕾期、盛花期为白色或粉色;2)当上位叶为紫红色,中、下位叶为绿色系时,花色还会出现蕾期为紫红色或粉色,盛花期为粉色的情况。‘范艾斯汀’海棠母本的上、中、下位叶均为绿色系(观赏海棠的下位叶均为绿色系),其花色在蕾期和盛花期均为粉色,本文优选的子代 V39 和 V40 新叶(上位叶)均为紫红色,子代 V49、V21 和 V27 新叶为棕红色,5 个子代的成熟叶(中、下位叶)均为绿色系。推测子代 V39 和 V40 的花色在蕾期为紫红色或粉色,盛花期为粉色;子代 V49、V21 和 V27 花色在蕾期、盛花期为白色或粉色。说明优选子代在花色上可能遗传了母本性状。苗木的分枝数与花量呈正相关关系^[34],与母本花量相比,优选子代 V39 和 V49 分枝数量大(分枝数分别为 38 和 35),花量可能出现极繁现象,优选子代 V21、V27 和 V40(分枝数分别为 19、14 和 20)花量可能为繁。苗木树皮光滑度影响观赏效果,相对于母本的树皮粗糙,上述 5 个优选子代树皮光滑或较光滑,观赏效果好。综上所述,优选的 5 个子代 V39、V49、V21、V27 和 V40 不仅生长迅速,且新叶均为紫红色或棕红色,突破母本新叶亮绿色的局限性,分枝数(14~38)多于母本(9),且其树皮光滑或较光滑,是优良的‘范艾斯汀’海棠子代单株。今后可进一步加强 5 个优良子代花色、花型等观赏指标评价,实现观赏与长势俱佳的育种目标。

相关研究结果^[35]表明:施用氮肥可促进植物光合作用,显著影响植物的生长指标,主要促进苗高的增长,提高生长量;施用磷肥能促进早期根系的形成,对地径增粗的效果比较显著,也可加快地上部分的生

长;施用钾肥可使苗木生长健壮、茎秆粗硬,抗倒伏,提高抗寒、抗旱等抗性;施用有机肥能提高土壤的透气性和疏松度,提高土壤肥力,并促进植物根系发育。本研究通过 Gompertz 模型可预测‘范艾斯汀’海棠半同胞家系的苗期生长特性随时间的变化趋势,了解各子代的年生长规律,并制定出更科学有效的育苗措施。在生长前期,苗木展出的新叶较嫩,需搭棚遮阳,并施加 1~2 次低氮高磷的复合肥,提高生长量并为速生期做准备。速生期施肥遵循“少量多次、适时适量”的原则,对 3 种速生期类型苗木给予不同的育苗措施:前期速生型,苗高增长较快,地径增粗相对较慢,苗木进入速生期后每隔 2~3 周施用 1 次稀释的高氮肥,并每月增施 1 次稀释的高磷高钾复合肥;中期速生型,苗高增长趋于平稳,地径增粗相对较快,需进行适当修剪,去除弱枝和病枝,促进主干生长,苗木进入速生期后每隔 2~3 周施用 1 次稀释的高磷高钾复合肥,并每月增施 1 次稀释的高氮肥,如优选子代 V27 和 V49;后期速生型,苗高增长和地径增粗均相对缓慢,可根据需要进行修剪,保持树形美观,苗木进入速生期后每月施用 1 次稀释的高氮高磷高钾复合肥,如优选子代 V40;其他苗高、地径不同速生型如优选子代 V21 和 V39 则根据以上育苗措施合理搭配。在生长后期需及时停止氮肥的施用以防止苗木徒长,可施用 2~3 次少量有机肥和稀释的高磷高钾复合肥,在改善土壤结构的同时促进根系发育,提高苗木抗寒性,使苗木安全越冬。此外,无论在哪个生长期,都需保持适量的水分供应,定期除草,密切关注病虫害防治^[36]。

参考文献:

- [1] HÖFER M, MOHAMED M A, ALI S E, et al. Phenotypic evaluation and characterization of a collection of *Malus* species[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2014, 61(5): 943-964.
- [2] 周婷,沈星诚,周道建,等.海棠品种分类研究进展[J]. *园艺学报*, 2018, 45(2): 380-396.
- [3] ZHOU T, NING K, ZHANG W X, et al. Phenotypic variation of floral organs in flowering crabapples and its taxonomic significance[J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 503.
- [4] 张往祥,张龙,江皓,等.观赏海棠新品种‘洛可可女士’[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(4): 203-204.
- [5] SUN T T, CHEN Y X, ZHANG W X, et al. ‘Yanzhi Yu’ crabapple[J]. *HortScience*, 2023, 58(5): 513-514.
- [6] 姜文龙,范俊俊,张丹丹,等.观赏海棠不同叶位色彩特征及特异种质挖掘[J]. *园艺学报*, 2017, 44(6): 1135-1144.

- [7] 张丹丹, 范俊俊, 王欢, 等. 不同观赏海棠种质果色动态变化规律研究[J]. 经济林研究, 2017, 35(3): 161-167.
- [8] 张往祥, 魏宏亮, 江志华, 等. 观赏海棠品种群的花期物候特征研究[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 713-725.
- [9] 储吴越, 范俊俊, 张往祥. 观赏海棠花期物候稳定性及其对温度变化的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 49-54.
- [10] ZHANG W X, ZHAO M M, FAN J J, et al. Study on relationship between pollen exine ornamentation pattern and germplasm evolution in flowering crabapple [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 39759.
- [11] 陈雅丽, 吕东, 赵明, 等. 青海云杉半同胞家系子代测定与亲本评价[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 17-24.
- [12] RAWAT S, KUMARI A, BARMAN P K, et al. Variability study analysis for half-sib families under control environmental conditions in *Neolamarckia cadamba* (kadamb) [J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2023, 13(11): 3846-3851.
- [13] 肖兴翠, 王树山, 杨勇智, 等. 香椿半同胞家系在川中丘陵区生长变异及早期选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 9-19.
- [14] 吴美珍, 李佳妮, 李煜, 等. 锥栗半同胞家系栗疫病抗性与生长性状的遗传分析[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(2): 175-182.
- [15] 符利勇. 非线性混合效应模型及其在林业上应用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012: 17-20.
- [16] 万志兵, 冯刚, 朱成磊, 等. 不同柳树无性系一年生生长差异分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2358-2363.
- [17] SARI B G, LÚCIO A D C, SANTANA C S, et al. Describing tomato plant production using growth models [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 146-154.
- [18] KLEINPAUL J A, FILHO A C, CARINI F, et al. Productive traits of rye cultivars grown under different sowing seasons [J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2019, 23(12): 937-944.
- [19] KUMAR A, YADVA R, GUPTA S, et al. Identification of genotypes and marker validation for grain filling rate and grain filling duration in wheat under conservation agriculture [J]. The Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2018, 78(3): 309-316.
- [20] 徐臣善, 徐爱红, 高东升, 等. 苹果果实生长的数学模型及各生长指标间的相关性分析[J]. 植物科学学报, 2015, 33(1): 72-80.
- [21] 冯梅, 黄文娟, 李志军. 胡杨叶形变化与叶片养分间的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1467-1473.
- [22] 王生华. 闽楠人工林生长与干形形质分析[J]. 福建林业科技, 2012, 39(1): 58-62.
- [23] 武启飞, 范俊俊, 姜文龙, 等. 二十个观赏海棠无性系苗期生长特性[J]. 北方园艺, 2018(1): 77-85.
- [24] 崔毅婵, 林雪茜, 杨玲, 等. 不同四照花观赏价值的综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(6): 43-51.
- [25] 郑朝晖, 李丕军, 李宏, 等. 伊犁州19个引种杨树品种扦插苗生长特性的研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(2): 91-95.
- [26] 韦剑锋, 吴炫柯, 韦冬萍, 等. 两品种麻疯树施肥与不施肥周年生长规律研究[J]. 种子, 2016, 35(11): 82-87.
- [27] 杨斌. 柳树苗期年生长模型的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 97-99, 129.
- [28] MAGNUSSEN S, KREMER A. Selection for an optimum tree growth curve [J]. Silvae Genetica, 1993, 42(6): 322-335.
- [29] 陈丽君, 刘明寿, 廖柏勇, 等. 苦楝不同种源苗期生长性状和生长节律研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(4): 1-7.
- [30] 赵曦阳, 张志毅. 毛白杨种内杂交无性系苗期生长模型构建[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(5): 15-21.
- [31] 刘凤栾, 房义福, 孙居文, 等. 36种欧美观赏海棠生长与光合生理特性分析[J]. 植物生理学报, 2013, 49(8): 738-742.
- [32] 毛萌萌. 观赏海棠生殖生物学基础性状分析[D]. 秦皇岛: 河北师范科技学院, 2015: 20.
- [33] 周婷, 江皓, 范俊俊, 等. 一种观赏海棠花色的苗期预测方法: CN201910353044.5[P]. 2023-09-26.
- [34] 李艳艳. 玫瑰花产量性状、观赏特性的遗传变异及选育策略研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008: 8-14.
- [35] 车飞伟. 施肥对西府海棠幼林的效应影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2021: 47-52.
- [36] 王洪伟, 谭巍. 丽格海棠栽培管理要点[J]. 北方园艺, 2012(4): 59-60.

(责任编辑: 郭严冬)