

观赏海棠杂交育种花色早期定向选择研究

孙凡雅, 沈 向, 束怀瑞, 李晓磊, 王庆菊, 王 磊, 康 鸾

(山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 【目的】找出观赏海棠杂交育种早期定向选择的方法, 解决杂交中存在的育种费用大、效率低等问题。【方法】根据父本木质部与其花瓣、果皮中的花色苷含量的数量关系, 利用这种相关性预测杂交实生苗的花色与果色, 以便在童期进行预选。【结果】父本花瓣与木质部花色苷含量间存在显著相关性, 4 月份时相关系数最大 ($r=0.933$), 因此建立 4 月份木质部 (y) 与花瓣 (x) 花色苷含量间的数学模型 $y=1.9391x+312.41$, 利用已开花的 *M. 'Pink Spire'* 的红花杂交后代检验数学模型, 预测值与实际花瓣中花色苷含量的差值均不超过 4%。对杂交群体进行遗传分析发现除 *M. 'Pink Spire'* 的杂交群体外, 其余 7 个杂交群体的遗传力均 $\geq 52.43\%$, 并且木质部花色苷含量的遗传属于数量遗传。对父本进行分析结果表明, 以红艳花色为育种目标时, 以 *M. 'Red Splendor'* 品种的观赏海棠作为父本的杂交结果较之其它品种更佳。【结论】利用木质部花色苷含量对杂交后代花色、果色进行预选具有可行性。

关键词: 观赏海棠; 杂交; 木质部; 花色苷; 早期定向选择

Early Directional Selection Color of Ornamental Crabapples Cultivars

SUN Fan-ya, SHEN Xiang, SHU Huai-rui, LI Xiao-lei, WANG Qing-ju, WANG Lei, KANG Luan

(College of Horticulture Science and Engineering/State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong)

Abstract: 【Objective】 Find a method for early directional selection of ornamental crabapples in order to figure out the hybridization problems of high cost and low efficiency in breeding. 【Method】 According to quantitative relation between xylem and its flower and fruit peel of male parent, forecast the crossbred seedlings' flower and fruit color. 【Result】 There is a very significant correlation between flower color and xylem anthocyanin content in April ($r=0.933$). With anthocyanin content of April xylem (y) and flower (x), a regression equation $y=1.9391x+312.41$ was established, and *M. Pink Spire* combination's secondary year F_1 generation was used breeding to test the equation, the discrepancies were less than 4%. The genetic analysis showed $h^2 \geq 52.43\%$ except cross combination of *M. Pink Spire*. Anthocyanin content in xylem inherit is quantitative inheritance. The analytical result indicates that *M. Red Splendor* cultivar is a better male parent variety for colour selection breeding. 【Conclusion】 Using anthocyanin content of xylem to select flower and fruit colour is feasible.

Key words: Ornamental crabapple; Hybrid; Xylem; Anthocyanin; Early directional selection

0 引言

【研究意义】观赏海棠为蔷薇科苹果属 (*Malus*) 落叶小乔木, 是优秀的景观树种, 其花繁密, 灿烂似锦, 素有“国艳”之誉。而且观赏海棠的果、叶及树

型等也都具有很高的观赏性, 受到人们的普遍喜爱。同时观赏海棠还能够忍耐 -30°C 的低温, 并且抗涝耐瘠薄, 病虫害少, 对环境的适应极强, 养护简单, 因而深受世界各国园艺工作者的重视, 广泛应用于各种园林景观。目前, 欧美苗圃目录上观赏海棠品种已近

收稿日期: 2007-06-02; 接受日期: 2007-12-13

基金项目: 山东省农业良种产业化开发项目重大课题 (鲁农良种字[2005]10 号); 科技部农转资金项目 (03EFN213700156); 山东省科学发展计划项目 (2007GG20009013)

作者简介: 孙凡雅 (1983-), 女, 山东威海人, 硕士, 研究方向为观赏海棠杂交育种。Tel: 0538-8249140; E-mail: yafansun@163.com。通讯作者沈向 (1966-), 男, 山东曲阜人, 教授, 博士, 研究方向为果树种质资源及生物技术育种。Tel: 0538-8249140; Fax: 0538-8249140; E-mail: shenx@sdau.edu.cn

千种, 著名的品种有紫叶的 ‘Royalty’, 鲜红花色的 ‘Radiant’, 垂枝的 ‘Red jade’ 等, 成为观赏乔木中创新最多的物种之一^[1]。但是, 观赏海棠品种存在花期短(约 10~15 d)、花期集中、花期偏前的缺点, 因此笔者选用花期较晚的国光苹果 (*M. domestica* ‘Ralls’) 作为母本与 9 个花果各具特色的观赏海棠品种进行杂交, 希望通过不同花期的品种组合延长春花的观赏期, 并进一步丰富观赏海棠的花色、花型与果色。但是观赏海棠实生苗的童期^[2]很长(约为 8~10 年), 这使得观赏海棠新品种的选育存在育种费用大、育种效率低等问题。因此, 开展童期预选研究具有重要意义。【前人研究进展】在植物发育中, 不同器官之间存在相关性。植物叶片出现肉茎、多浆、薄叶、卷叶、硬叶等形态, 往往是抗旱性极强的类群^[3]; 独花兰 (*Changnienia amoena*) 开花持续期与叶长、叶面积有显著和极显著相关^[4], 叶宽与花瓣长存在极显著相关^[4,5]。关于观赏海棠木质部花色苷含量与花、果颜色的相关性还少有报道。【本研究切入点】通过父

本花色、果色与木质部花色苷含量的相关性研究, 根据木质部花色苷在杂交后代中的遗传规律, 建立花色相关性选择标准。【拟解决的关键问题】在观赏海棠杂交群体的童期对实生苗的花色进行早期的预选, 以选育花果颜色鲜红的观赏海棠品种, 确定遗传力高的亲本组合, 以提高育种效率。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

供试父本观赏海棠均取自山东农业大学观赏果树试验站, 为 7 年生观赏海棠品种嫁接树(表 1), 砧木为八棱海棠, 试验土为褐壤土, 有良好的灌溉条件, 管理水平良好。于 2004 年 4 月 7 日在山东农业大学观赏海棠果树种质资源圃对这 9 种海棠进行采粉, 同年 4 月 18 日与国光进行杂交, 同年 10 月中旬收获、采种, 杂交后代实生苗于 2005 年种植于山东农业大学观赏果树试验站内。

1.2 试验方法

表 1 供试父本品种简介

Table 1 Introduction of the male plant varieties used in experiment

父本编号 No. of male parent	品种名 Varieties	来源 Origin	中文译名 Chinese translation	与国光杂交组合的编号 No. of hybrid combination
01	<i>M.</i> ‘Red Splendor’	美国 USA	红丽	2004R-001
03	<i>M.</i> ‘Pink Spire’	美国 USA	粉芽	2004R-003
04	<i>M.</i> ‘Radiant’	美国 USA	绚丽	2004R-004
05	<i>M.</i> ‘Pink Princess’	美国 USA	粉红公主	2004R-005
07	<i>M.</i> ‘Indian Summer’	美国 USA	印第安之夏	2004R-007
08	<i>M.</i> ‘Indian Magic’	美国 USA	印第安魔法	2004R-008
09	<i>M.</i> ‘Hopa’	美国 USA	霍巴	2004R-009
014	<i>M.</i> ‘Kelsy’	美国 USA	凯尔斯	2004R-014
015	<i>M.</i> <i>Spectabilis</i>	中国 China	海棠花	2004R-015

花色苷含量的测定参考全月澳等^[6]和马志本等^[7]的方法加以修改。2006 年 4~10 月分别取观赏海棠 2.5 cm 长的一年生枝条的木质部、花瓣和果实, 采用 1.5 mol·L⁻¹ HCl : 95%乙醇 = 15 : 85 混合液, 在黑暗条件下浸提 24 h 后, 用岛津 UV-2450 紫外光可见分光光度计检测 650、620 和 530 nm 波长的光密度值, 其花色苷含量 (nmol·g⁻¹) = OD_λ / (0.0462 m), OD_λ 为提取液之光密度, OD_λ = (A₅₃₀ - A₆₂₀) - 0.1 (A₆₅₀ - A₆₂₀); m 为提取时木质部的质量(单位: g)。每个试材重复测定 3 次。于 2006 年对父本与杂交组合的一年生枝条木质部、花瓣、果皮进行花色苷含量的测定。父本木

质部与果实于每月的 15 日采集, 花瓣于盛花期采集, 杂交群体木质部于 5 月 15 日采集, 所有试材于采集后 2 日内测定完毕。

1.3 数据处理

遗传力与一般配合力效应值参考刘来福等^[8]和王明麻^[9]的方法估算, 运用 SPSS13.0 数据分析统计软件和 Excel 对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 父本木质部与花瓣中花色苷含量的相关分析

运用 SPSS13.0 统计软件对 9 个父本的花瓣与木质

部内的花色苷含量进行相关分析(表2)。结果表明,4月份的花瓣与4、5、6、7这4个月份的木质部花色苷含量在0.01水平达到极显著相关性,8、9两个月份

木质部花色苷含量在0.05水平也达到显著相关性。因此推测通过对木质部花色苷含量的测定来预测花色的浓艳程度具有可行性。

表2 父本木质部与花瓣中花色苷含量的相关性分析

Table 2 The anthocyanin contents correlations of xylem and petal in male parent

	木质部/4月 Xylem/April	花瓣/4月 Petal/April	木质部/5月 Xylem/May	木质部/6月 Xylem/June	木质部/7月 Xylem/July	木质部/8月 Xylem/August	木质部/9月 Xylem/September	木质部/10月 Xylem/October
木质部4月 Ylem/Aprile	1							
花瓣4月 Etal/April	0.933**	1						
木质部5月 Ylem/May	0.926**	0.909**	1					
木质部6月 Elem/June	0.832**	0.920**	0.881**	1				
木质部7月 Ylem/July	0.883**	0.921**	0.915**	0.911**	1			
木质部8月 Ylem/August	0.794*	0.697*	0.687*	0.654	0.733*	1		
木质部9月 Ylem/September	0.671*	0.685*	0.680*	0.672*	0.565	0.742*	1	
木质部10月 Ylem/October	0.464	0.545	0.514	0.417	0.391	0.532	0.807**	1

**在0.01水平存在显著相关性(双侧检验); *在0.05水平存在显著相关性(双侧检验)

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

所测定各月份中,4月份的木质部花色苷含量间的相关系数最高 $r=0.933$ ($P\leq 0.01$),因此,利用4月份父本的花瓣与木质部间花色苷含量建立数学模型来预测杂交后代的花色误差将最小。2007年组合

2004R-003出现了1株2年即结束童期的开红花观赏海棠实生苗,因此得以初步验证所建立数学模型,预测结果与实际花瓣中花色苷含量 $459.65\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 的差值仅为3.55%(表3)。

表3 验证一次线性回归模型

Table 3 Validate linear regression equation

数学模型 Mathematical model	木质部花色苷含量x值($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$) Xylem anthocyanin content	花瓣花色苷含量y值($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$) Petal anthocyanin content	实际花瓣花色苷含量($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$) Petal factual anthocyanin content	误差(%) Error
$y = 1.9391x + 312.41$	67.52	443.33	459.65	3.55

2.2 父本木质部与果实中花色苷含量的相关分析

对8个果实红色的父本观赏海棠6~10月份的木质部与果皮中的花色苷含量进行分析比较表明,6~8月份果皮与木质部中的花色苷含量相近且变化波动较小,然后以8月份为转折点,木质部与果皮中的花色苷含量急剧增加。其中,01号父本(图1-a)木质部与果皮中花色苷含量在各月份间的差异不明显;其余7个父本03、04、05、07、08、09、014号的变化趋势相近(图1-b),即8月份后果皮中花色苷含量增加幅度明显高于木质部。015号果实始终为黄绿色,花色苷含量很低。

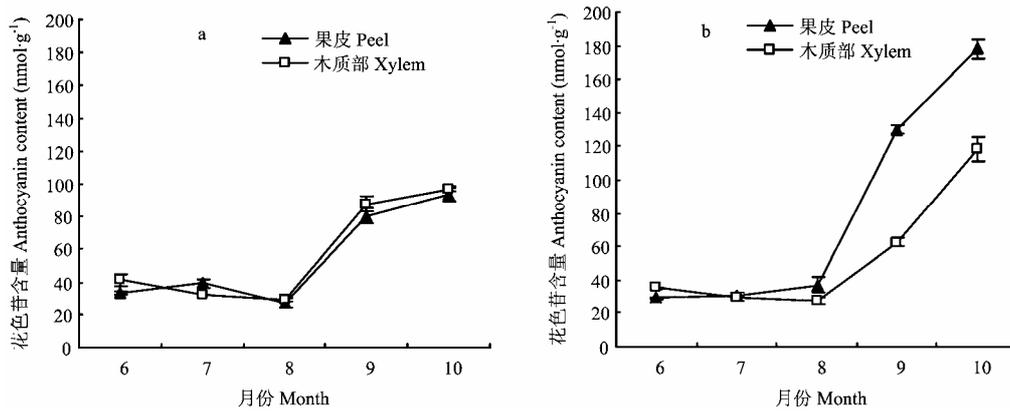
这8个父本的果实颜色的变化趋势均是未成熟时粉红色,成熟后(10月份左右观赏海棠的果实成熟)颜色加深变为红褐色,因此果实的颜色与果皮中花色苷的合成含量急剧增加在时间和变化趋势上具有一致

性,证明果实的颜色与果皮中花色苷的合成、含量有关^[10-12];同时,生长期果皮中花色苷与木质部中的花色苷含量在0.01水平存在显著相关性,因此通过确定观赏海棠实生苗童期木质部的花色苷含量,就可以通过木质部花色苷的含量预测观赏海棠实生苗结果后的果实颜色。

2.3 杂交后代木质部花色苷含量遗传变异

通过对各杂交组合的统计表明(表4),只有组合2004R-014与2004R-008中木质部为红色的比例超过50%,其它组合均不超过50%。组合中以木质部无红色的海棠花为父本的 F_1 代中不存在木质部红色的后代。父本木质部中花色苷含量与 F_1 代群体中木质部红色植株中花色苷含量的平均值之间在0.05水平存在显著相关性,相关系数 $r=0.806$ 。

通过估计性状的遗传参数发现,8个木质部红色



a: 01 号父本 6~10 月份果皮与木质部中花色苷含量的变化; b: 08 号父本 6~10 月份果皮与木质部中花色苷含量的变化
 a: The fruit peel and xylem's anthocyanin content changed from June to October of the male parent No.01; b: The fruit peel and xylem's anthocyanin content changed from June to October of the male parent No.08

图 1 父本果皮与木质部花色苷含量随时间变化趋势图

Fig. 1 The fruit peel and xylem anthocyanin content change tendency charts in male parent

表 4 父子代植株木质部和花瓣中花色苷含量分析

Table 4 The anthocyanin contents of xylem and petal in male parent and their F₁

序号 No.	组合大小 Combination size (strain)	木质部红色 的植株 Total of red xylem (strain)	木质部红色 植株的百分率 Percentage (%)	F ₁ 木质部红色的植株 花色苷含量平均值 Anthocyanin content of F ₁ red xylems (nmol·g ⁻¹)	父本木质部花色苷含量(x) Anthocyanin content of male parent's xylem (nmol·g ⁻¹)	父本花瓣花色苷含量 (y) Anthocyanin content of male parent's petal (nmol·g ⁻¹)	遗传力 h ² Heritability (%)
2004R-001	46	19	41.30	139.83±46.42	142.21	581.94	72.68
2004R-003	21	6	28.57	86.67±65.19	63.37	437.99	43.26
2004R-004	203	70	34.48	92.48±51.19	96.31	514.47	59.73
2004R-005	104	35	33.65	99.09±39.89	101.73	547.71	62.44
2004R-007	43	14	32.56	56.06±29.51	81.70	437.17	52.43
2004R-008	22	11	50.0	77.03±48.71	92.84	475.84	58.00
2004R-009	28	13	46.43	118.93±43.85	99.84	492.09	61.50
2004R-014	38	26	68.42	66.73±29.09	73.21	468.72	58.18
2004R-015	28	0	0	-	-	-	-
总计 Total	533	194	-	-	-	-	-

--: 无数值 -: No value

的组合内只有 2004R-003 组合的遗传力低于 50%，说明这个组合花色苷含量受中等以下强度的遗传控制；组合 2004R-001、2004R-005 和 2004R-009 的遗传力均较高，受较高强度的遗传控制，通过木质部花色苷含量对其后代进行选择可靠性更高。

2.4 木质部花色苷含量的遗传分析

各种群体花色苷含量的变异系数的顺序：2004R-003>2004R-008>2004R-004>2004R-007 (52.64%)>2004R-014>2004R-005>2004R-009>2004R-001。变异系数 (CV) 越大，则遗传的潜能越大。对杂交

一代木质部花色苷含量进行 χ^2 检验，各群体的花色苷含量分布均属于正态分布，具有数量性状遗传的特征。

一般地，性状在群体内的变异幅度愈大，选择潜力愈大，选择效果愈明显。8 个杂交组合（除杂交群体中无木质部红色的组合 2004R-015）的变异幅度均 >100 nmol·g⁻¹，其中组合 2004R-004 的花色苷含量幅度变化最大，从 21.24~221.60 nmol·g⁻¹，相差 200.36 nmol·g⁻¹；2004R-014 组合的花色苷含量幅度变化最小，从 24.24~128.07 nmol·g⁻¹，相差 103.83 nmol·g⁻¹。（表 5）

表 5 杂交后代花色苷含量的遗传分析

Table 5 The heredity analysis of anhocyanin contents in hybrid

编号 No.	变幅 Amplitude (nmol·g ⁻¹)	变幅差 Amplitude difference	变异系数 Variation coefficient (%)	χ^2 检验 χ^2 test	
				偏度系数 Skewness coefficient	偏度系数的标准误 Skewness coefficient's standard error
2004R-001	77.33~202.66	125.33	33.20	0.119	0.524
2004R-003	32.50~203.04	170.54	75.21	1.410	0.845
2004R-004	21.24~221.60	200.36	55.35	0.958	0.487
2004R-005	27.95~175.05	147.1	40.25	0.244	0.398
2004R-007	17.82~132.20	114.38	52.64	1.221	0.616
2004R-008	25.98~162.02	136.04	63.24	0.766	0.661
2004R-009	44.92~209.61	164.69	39.61	0.848	0.616
2004R-014	24.24~128.07	103.83	43.60	0.434	0.464

2.5 一般配合力相对效应值

亲本某一性状一般配合力 (general combining ability) 效应值的高低可反映该性状在一系列杂交组合的平均表现。某性状一般配合力效应值高, 说明亲本中对此性状有利的基因位点多, 加性基因效应大,

易于稳定遗传^[13~15]。表 6 为亲本和杂交组合的花色苷含量的一般配合力相对效应值, 结果表明, 不同亲本同一性状的一般配合力相对效应值是不同的, 而且组合与亲本的一般配合力效应值并不对应。01 号亲本的一般配合力的相对效应值为正且较大, 05、09 号次之。

表 6 一般配合力相对效应值

Table 6 The effective value order of GCA

父本序号 No. of male parent	01	03	04	05	07	08	09	014
一般配合力效应值 General combining ability	4.06*	-3.37 [△]	0.18	1.67	-2.92	-1.17	1.64	-1.03

*最高值, △最低值

*Maximum value, △Minimum value

3 讨论

3.1 花色遗传与观赏海棠早期选择

花色遗传是一个极为复杂的问题, 从孟德尔的经典遗传研究——单基因控制的花色分离规律, 到现代关于四倍体大丽花所表现的绚丽多彩的复杂花色——多基因控制的数量遗传规律, 以及观察到外界环境条件对花色表型的影响, 研究者记述了大量的现象。例如, 据 Basmuson 的试验, 凤仙花紫花对白花为显性, 红花对淡红为显性; 又如万寿菊, 浓橙色对淡黄色是不完全显性, F₂ 表现不同色调的分离; 紫红色和栗色马鞭草是一对基因的区别, F₁ 自交后代紫红色和栗色呈 3 : 1 比例分离; 石竹 (*Dianthus barbatus*) 白花亲本 × 暗红色花亲本, F₁ 的花色在开花之初纯白色, 而至开花末期变为暗红色。总之, 很难, 事实上也不可能找到一个统一的花色遗传规律。本试验对杂交后代木质部中花色苷量的测定结果表现出数量遗传的规

律^[16~20]。

目前对观赏植物花色苷的各种研究主要集中于生殖器官、叶片等表现器官的研究上, 对于木质部中的色素还少有研究。笔者在长期的栽培、育种过程中发现观赏海棠木质部与花色间具有相关性, 即: 红花海棠的木质部红色, 白花海棠的木质部白色 (这种规律在梅花和美人梅中都有出现^[21,22])。本研究以此为线索展开, 希望这可以应用在观赏海棠育种的早期选择上, 以便高效率地选育出有自主知识产权的新品种。

由于观赏树木育种中存在育种效率低、需占用大面积土地及管理繁琐等问题, 所以对观赏树木的育种进行早期预选是有其必要性的。以前大都通过形态特征进行早期预选, 也有人提出用生理生化指标预选。笔者应用的是形态指标和生化指标联合预选, 可靠性、精确性都有所提高。研究表明, 杂交父本木质部与花瓣的花色苷含量在 0.01 水平上存在显著相关性, 父本木质部花色苷含量和杂交后代木质部花色苷含量

之间存在显著相关。因此, 通过木质部的花色苷含量在童期对观赏海棠的花色进行预选具有可行性。

遗传力的大小体现了遗传因素和环境条件对性状表现的影响程度, 是作物育种的一项重要遗传参数, 遗传力高, 说明环境对性状的影响小, 从表型值可以较准确地估计遗传型值。根据遗传力的大小, 制定相应的育种方案, 可以提高选择的效果和预见性^[23-26]。综合试验测得的各项指标 01 号父本的木质部花色苷含量对后代的遗传力较高, 同时它的花瓣中花色苷的含量及其杂交后代中木质部红色的比例都较高, 所以, 以 01 号作为亲本进行杂交育种, 对于选育出花色鲜艳的观赏海棠新品种应是一个高效组合。今后要进一步深化花瓣颜色与幼树木质部花色苷含量间的数量遗传关系, 以应用于育种实践中, 并进一步探讨其它观赏树种花色遗传规律。

3.2 观赏果树杂交育种中的杂交设计

本次试验的杂交组合是以花期较晚的国光苹果 (*M. domestica* 'Ralls') 作母本与 9 个花果各具特色的观赏海棠品种进行杂交获得的, 以观赏海棠品种作为父本进行杂交是因为它的花期较之国光苹果早, 便于进行花粉的采集与授粉。由于果树杂交育种的周期较长及实用性等方面的考虑, 使得果树的杂交育种中很少重视杂交试验方案的设计与其在试验中的应用。叶金山等^[27]曾经研究过不同杂交方案下马褂木幼苗生长性状在家系间存在极显著差异, 回交家系表现特别优良, 因而家系选择、单株选择等利用潜力很大。所以, 对于观赏海棠新品种的研究今后将注重杂交育种试验的设计与育种模拟^[28], 研究正反交以及回交和 F_1 间杂交的差异, 找出优良的杂交方式。

4 结论

观赏海棠木质部与花瓣、果皮中的花色苷含量均存在显著相关性; 运用父本木质部与花瓣中的花色苷含量建立的数学模型可以预测杂交后代花瓣中的花色苷含量。

References

- [1] Fiala J L. *Flowering Crabapples*. Portland, Oregon: Timber Press, 1994: 162-230.
- [2] 孙永华, 陈学森. 杏杂种实生树叶片童性的研究. *果树学报*, 2005, 22(4): 327-330.
Sun Y H, Chen X S. Study on juvenile trait of leaf in apricot hybrid seedlings. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(4): 327-330. (in Chinese)
- [3] 王勋陵, 马 驥. 从旱生植物叶结构探讨其生态适应的多样性. *生态学报*, 1999, 19(6): 787-792.
Wang X L, Ma J. A study on leaf-structure and the diversity of xerophytes ecology adaptation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 787-792. (in Chinese)
- [4] 熊治廷, 吴 剑, 李 奕, 葛 颂, 赵子恩, 桂先群, 程增林, 黄遵义. 独花兰野生种群研究——开花与营养体状态的关系. *植物学通报*, 2002, 19(1): 87-91.
Xiong Z T, Wu J, Li Y, Ge S, Zhao Z E, Gui X Q, Cheng Z L, Huang Z Y. Relationship between flowering and vegetative status of *Changnienia amoena* Chien: a field population study. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002, 19(1): 87-91. (in Chinese)
- [5] 孙海芹, 李 昂, 班 玮, 郑晓明, 葛 颂. 濒危植物独花兰的形态变异及其适应意义. *生物多样性*, 2005, 13(5): 376-386.
Sun H Q, Li A, Ban W, Zheng X M, Ge S. Morphological variation and its adaptive significance for *Changnienia amoena*, an endangered orchid. *Biodiversity Science*, 2005, 13(5): 376-386. (in Chinese)
- [6] 全月澳, 周厚基. 果树营养诊断法. 北京: 农业出版社, 1982: 112-115.
Tong Y A, Zhou H J. *Method of Nutrition Diagnosis for Fruit Trees*. Beijing: Agricultural Press, 1982: 112-115. (in Chinese)
- [7] 马志本, 程玉娥. 关于苹果果实表面花青素含量的化学测定方法. *中国果树*, 1984, (4): 49-51.
Ma Z B, Cheng Y E. The chemistry method of determination of anthocyanin content on fruit surface in apples. *China Fruits*, 1984, (4): 49-51. (in Chinese)
- [8] 刘来福, 毛盛贤, 黄远樟. 作物数量遗传. 北京: 农业出版社, 1984: 211-261.
Liu L F, Mao S X, Huang Y Z. *The Quantity Genetic in Crops*. Beijing: Agricultural Press, 1984: 211-261. (in Chinese)
- [9] 王明麻. 林木遗传育种学. 北京: 中国林业出版社, 2001: 156-166.
Wang M X. *Forest-crop Genetic*. Beijing: China Forestry Press, 2001: 156-166. (in Chinese)
- [10] 李 平, 陈大成, 胡桂兵, 王卫华. 荔枝果实发育过程中果皮色素的变化. *热带亚热带植物学报*, 1999, 7(1): 53-58.
Li P, Chen D C, Hu G B, Wang W H. Pigment changes in litchi skin. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1999, 7(1): 53-58. (in Chinese)
- [11] 赵宗方, 谢嘉宝, 吴桂法, 王成良. 富士苹果果皮花青素发育的相关因素分析. *果树学报*, 1992, 9(3): 134-137.
Zhao Z F, Xie J B, Wu G F, Wang C L. Correlation analysis on development of anthocyanin in pericarp of Fuji apple. *Journal of Fruit*

- Science*, 1992, 9(3): 134-137. (in Chinese)
- [12] Jiang Y M, Joyce D C. ABA effects on ethylene production, PAL activity, anthocyanin and phenolic contents of strawberry fruit. *Plant Growth Regulation*, 2003, 39: 171-174.
- [13] 李仕贵, 黎汉云, 周开达, 马玉清. 杂交水稻稻米外观品质性状的遗传相关分析. *西南农业学报*, 1996, 9: 1-7.
Li S G, Li H Y, Zhou K D, Ma Y Q. Genetic analysis of exterior quality traits in hybrid rice. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1996, 9: 1-7. (in Chinese)
- [14] 吴健聪, 徐春霞, 陈洪梅, 谭静, 韩学瑞, 黄必华, 潘兴明. 24个优质白玉米自交系与中国温带玉米四大优势群代表自交系的配合力和杂种优势群研究. *中国农业科学*, 2007, 40(6): 1288-1296.
Wu J C, Xu C X, Chen H M, Tan J, Han X R, Huang B H, Fan X M. Studies on combining ability and heterotic grouping of 24 quality protein maize inbreds and four temperate representative inbreds of Chinese major heterotic groups. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [15] Yadav H K, Shukla S, Singh S P. Genetic divergence in parental genotypes and its relation with heterosis, F₁ performance and general combining ability (GCA) in opium poppy (*Papaver somniferum* L.). *Euphytica*, 2007, 157: 123-130.
- [16] 卢钰, 董现义, 杜景平, 李永强, 王明林. 花色苷研究进展. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(2): 315-320.
Lu Y, Dong X Y, Du J P, Li Y Q, Wang M L. Research progress on anthocyanins. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2004, 35(2): 315-320. (in Chinese)
- [17] 何启谦. *园林植物育种学*. 北京: 中国林业出版社, 1992: 41-47, 112-122.
He Q Q. *Genetics and Breeding of Gardern Plants*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992: 41-47, 112-122. (in Chinese)
- [18] de Jong W S, Eannetta N T, de Jong D M, Bodis M. Candidate gene analysis of anthocyanin pigmentation loci in the Solanaceae. *Theoretical and Applied Genetics*, 2004, 1008: 423-432.
- [19] Consonni G, Ronchi A, Pilu R, Gavazzi G, Dellaporta S L, Tonelli C. Ectopic anthocyanin pigmentation in maize as a tool for defining interactions between homologous regulatory factors. *Molecular and General Genetics*, 1997, 256: 265-276.
- [20] 王惠聪, 黄旭明, 胡桂兵, 黄辉白. 荔枝果皮花色苷合成与相关酶的关系研究. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 2028-2032.
Wang H C, Huang X M, Hu G B, Huang H B. Studies on the relationship between anthocyanin biosynthesis and related enzymes in litchi pericarp. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 2028-2032. (in Chinese)
- [21] 李亚蒙, 王庆菊, 沈向. 四季李属彩叶树种枝叶花色苷分布的解剖研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(4): 489-494.
Li Y M, Wang Q J, Shen X. Pigment distribution in fresh shoot tissues of four colored - leaf *Prunus* Taxa. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2006, 37(4): 489-494. (in Chinese)
- [22] 陈俊愉. *中国梅花*. 海口: 中国海南出版社, 1996: 33-35.
Chen J Y. *Chinese Mei Flowers*. Haikou: China Hainan Press, 1996: 33-35. (in Chinese)
- [23] 陈学森, 吴燕, 陈晓流, 孙永华, 何天明, 冯建荣. 杏杂种一代群体部分性状遗传趋势研究. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1863-1868.
Chen X S, Wu Y, Chen X L, Sun Y H, He T M, Feng J R. Research on heredity trend of some characters in F₁ progenies of apricot. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1863-1868. (in Chinese)
- [24] 李俊才, 伊凯, 刘成, 隋洪涛, 王家珍. 梨果实部分性状遗传倾向研究. *果树学报*, 2002, 19(2): 87-93.
Li J C, Yin K, Liu C, Sui H T, Wang J Z. Studies on the trend of inheritance of some characters of pear fruit. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(2): 87-93. (in Chinese)
- [25] Fokar M, Nguyen H T, Blum A. Heat tolerance in spring wheat. I. Estimating cellular thermotolerance and its heritability. *Euphytica*, 1998, 104: 1-8.
- [26] 孙晓梅, 张守攻, 齐力旺, 王军辉, 吕守芳, 姜英淑. 日本落叶松自由授粉家系纸浆材材性遗传变异的研究. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 515-522.
Sun X M, Zhang S G, Qi L W, Wang J H, Lü S F, Jiang Y S. Genetic variations in Pulpwood qualities of open-pollinated Japanese larch families. *Forest Research*, 2003, 16(5): 515-522. (in Chinese)
- [27] 叶金山, 王章荣. 杂种马褂木杂种优势的遗传分析. *林业科学*, 2002, 38(4): 67-71.
Ye J S, Wang Z R. Genetic analysis of heterosis for hybrid tulip tree. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 67-71. (in Chinese)
- [28] 王健康, Wolfgang H Pfeiffer. 植物育种模拟的原理和应用. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 1-12.
Wang J K, Pfeiffer W H. Simulation approach and its applications in plant breeding. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 1-12. (in Chinese)