

大花百子莲的结实和结籽格局及种子产量影响因素分析

孙颖¹, 马翠青¹, 陈士惠¹, 卓丽环^{2,①}

(1. 东北林业大学园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 上海农林职业技术学院, 上海 201600)

摘要: 在 2007 和 2008 年对大花百子莲(*Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue') 在群体、果序和单果水平上的结实和结籽格局进行了观测, 并依据每花序单花数、单花胚珠数和单粒种子质量推算其单株潜在种子产量; 此外, 采用人工补充授粉方法研究了不同授粉方式对大花百子莲结实和结籽的影响, 并对其种子产量的影响因素进行了分析。结果表明: 从始花期、盛花期至末花期, 随开花时间的延迟, 大花百子莲植株的每花序单花数和座果率均逐渐降低, 其中始花期开花的植株每花序单花数和座果率均最高。从果序基部、中部至顶端, 座果率和结籽率均逐渐减小且差异显著。在果序基部和中部, 果实内种子败育率沿果实基部至顶端依次降低, 而单粒种子质量则依次增加; 且果序基部的果实各部位的种子败育率均低于果序中部的果实, 而单粒种子质量则差异不大。大花百子莲的单株潜在种子产量约为 43.18 g, 而其单株实际种子产量约为 2.87 g, 远低于其潜在种子产量。自然授粉的大花百子莲每柱头花粉数为 27.5 粒, 而自花授粉、同株异花授粉和异株授粉的每柱头花粉数均超过 100 粒; 与自然授粉、自花授粉和同株异花授粉植株相比, 异株授粉植株的座果率和结籽率均显著增加。研究结果显示: 大花百子莲的结实和结籽格局呈现非随机分布规律, 在引种地存在有性繁殖障碍; 养分和授粉状况是制约大花百子莲种子产量的重要因素。

关键词: 大花百子莲; 结实格局; 结籽格局; 种子产量; 授粉方式; 影响因素

中图分类号: Q945.5; S682.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)02-0048-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.02.07

Analyses on patterns of fruit and seed setting and influence factors on seed yield of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' SUN Ying¹, MA Cuiqing¹, CHEN Shihui¹, ZHUO Lihuan^{2,①}
(1. College of Landscape and Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Shanghai Vocational Technical College of Agriculture and Forestry, Shanghai 201600, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(2): 48-53

Abstract: Patterns of fruit and seed setting of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' at levels of population, infructescence and single fruit were investigated in 2007 and 2008, and its potential seed yield per plant was calculated according to flower number per inflorescence, ovule number per flower and single seed weight. In addition, effects of different pollination modes on fruit and seed setting of *A. praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' were studied by artificial supplement pollination method, and influence factors on its seed yield were analyzed. The results show that from early flowering stage, full flowering stage to late flowering stage, flower number per inflorescence and fruit setting rate of *A. praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' plants all reduce gradually with delaying of flowering time, in which, those of plants flowering at early flowering stage are the highest. Its fruit and seed setting rates from base, center to apex of infructescence all reduce gradually with significant difference. In base and center of infructescence, seed abortion rate in fruit decreases successively from base to apex of fruit, while single seed weight increases successively. And seed abortion rate of different parts of fruit at base of

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL13BA08); 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字 2010 第 6-2 号)

作者简介: 孙颖(1979—), 女, 吉林长春人, 博士, 副教授, 主要从事园林植物种质资源开发与利用研究。

①通信作者 E-mail: zhuoliuhuan@263.net

infructescence is lower than that at center of infructescence, while difference of single seed weight is not obvious. Potential seed yield per plant of *A. praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' is about 43.18 g, while its actual seed yield per plant is about 2.87 g, which is obviously lower than its potential seed yield. Pollen number per stigma by natural pollination is 27.5, while that by self-pollination, geitonogamy and xenogamy cross-pollination is more than 100. Fruit and seed setting rates of plants by xenogamy cross-pollination increase significantly compared to those of plants by natural pollination, self-pollination and geitonogamy. It is suggested that patterns of fruit and seed setting of *A. praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' appear a non-random distribution rule, and there is sexual propagation obstacle in induction locality. Nutrition and pollination status are important limitation factors restricting its seed yield.

Key words: *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue'; fruit setting pattern; seed setting pattern; seed yield; pollination mode; influence factor

植物的结实和结籽特性不仅在植物生活史中占有重要地位,而且也是繁殖生物学研究的重要内容^[1-4]。结实特性与种子大小、质量以及母本或子代的适合度紧密相关,能够影响植物的资源效率、后代品质以及种子散布效率^[5],特别是对种子生产和杂交育种以及新品种选育具有重要意义^[6]。在种子植物的结实和结籽格局中,果实与种子败育可分为随机败育和选择性败育两大类,其中后者是植物学家研究的热点^[7-11]。选择性败育在种子植物中是比较普遍的现象之一^[12],通过选择性败育可以去除植物的不良基因型后代,从而提高母本及后代的适合度^[13]。

大花百子莲(*Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue')隶属于百子莲属(*Agapanthus* Linn.),是原产南非的一种优良观赏植物,因结籽量大而得名。百子莲属植物引入中国的时间并不长,目前仅在上海、南宁、广州、北京、南京和哈尔滨等地有栽培^[14]。卓丽环等^[15]研究发现:大花百子莲在上海地区的结实率较低,种子质量也不高。可见,大花百子莲在引种地存在有性繁殖障碍,致使其杂交育种及新品种选育工作困难极大。

为了解大花百子莲的结实和结籽特点,作者在群体、果序和单果3个水平上对大花百子莲的结实及结籽格局进行详细观测,并进一步分析影响其结实和结籽的限制因素,以期为大花百子莲在引种地的正常结实和结籽及其繁殖效率提升对策的制定提供实验依据,并为培育大花百子莲新品种提供前期种质保障。

1 研究地自然概况和研究方法

1.1 研究地自然概况

研究地点设在上海市松江区上海农林职业技术

学院五库实习基地内,具体地理坐标为北纬31°14'、东经121°29',基地大田共种植大花百子莲2万余株。该基地海拔4 m,土壤主要为灰垆土;年均温17.5℃,极端最高温38.6℃,极端最低温-4.7℃,年均有效积温4 983℃;年均降雨量1 254.9 mm;年均日照时数1 778.3 h,年均太阳总辐射量 $4.67 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$;年均晴天日数134.6 d,年均阴天日数56.3 d。

1.2 方法

1.2.1 群体水平结实格局观测 观测时间为2007年及2008年的4月至10月。在大田中随机选择300株大花百子莲植株,参照文献^[16]的方法,分别标记群体中处于始花期(5%个体开花视为始花期)、盛花期(50%个体达到开花高峰视为盛花期)、末花期(少于10%个体开花视为末花期)的植株各50株,每株选取1个花序进行跟踪观察直至果实成熟。果实成熟后,分别统计各花序的单花数、始花时间(第1朵花的开花时间)及座果数,并按公式“座果率=(每花序座果数/每花序单花数)×100%”计算座果率。

1.2.2 果序水平结实和结籽格局观测 观测时间为2007年及2008年的9月。从始花期开始,在大田中随机选取30株大花百子莲植株(每株选取1个花序)进行跟踪观测直至果实成熟,观察并统计果序上不同位置(基部、中部、顶端)的座果数、单花数、结籽总数及胚珠总数,并计算果序不同位置的座果率和结籽率。果序基部、中部和顶端的定义为:基部指果序中近轴端1/3的部位;顶端指果序中远轴端1/3的部位;中部指基部和顶端间的1/3部位。座果率和结籽率的计算公式如下:果序不同位置座果率=(每果序不同位置的座果数/每果序不同位置的单花数)×100%;果序不同位置结籽率=(每果序不同位置的结籽总数/每果序不同位置的胚珠总数)×100%。

1.2.3 单果水平结籽格局观测 观测时间为 2007 年及 2008 年的 9 月。每年分别选取果序基部单果 100 个、果序中部单果 100 个、果序顶端单果 50 个,观察并统计单果不同部位(基部、中部和顶端)的胚珠数和败育种子数,并按公式“种子败育率=(单果不同部位的败育种子数/单果不同部位的胚珠数) $\times 100\%$ ”计算单果不同部位的种子败育率;同时称量单粒种子质量。果实不同部位的定义为:基部指单果花梗端 1/3 的部位;顶端指单果柱头端 1/3 的部位;中部指基部和顶端间的 1/3 部位。

1.2.4 单株潜在种子产量的推算 于 2008 年种子成熟时随机选取 30 株大花百子莲植株,分别统计每花序单花数、单花胚珠数、单粒种子质量及单株种子产量,并据此计算单株潜在种子产量,计算公式为:单株潜在种子产量=每花序单花数 \times 单花胚珠数 \times 单粒种子质量。

1.2.5 补充授粉实验 于 2008 年植株开花前标记 30 株长势和大小均基本一致的植株,每株随机选择 20 朵开放单花进行补充授粉实验。其中,5 朵进行自花授粉,5 朵进行同株异花授粉,5 朵进行异株授粉(异株花粉来源于距被授粉植株 2~3 m 的植株),另外 5 朵进行自然授粉(作为对照)。授粉 3 d 后采集各授粉处理组的单花,用 FAA 溶液固定。每处理随机选取 50 朵花,检测柱头上的花粉数量;其余花朵用于座果总数、单花总数、结籽总数和胚珠总数的统计,并计算座果率和结籽率,计算公式为:座果率=(座果

总数/单花总数) $\times 100\%$;结籽率=(结籽总数/胚珠总数) $\times 100\%$ 。

1.3 数据处理和统计分析

采用 SPSS 11.5 和 EXCEL 2007 统计分析软件进行数据统计和分析,并采用 Pearson 相关系数进行相关分析。

2 结果和分析

2.1 大花百子莲的结实和结籽格局分析

2.1.1 群体水平的结实格局分析 对大花百子莲群体连续 2 年的跟踪观测结果(表 1)表明:在不同花期大花百子莲群体中,每花序单花数表现出一定的差异性。其中,始花期和盛花期开花的植株每花序单花数较多,均达到 80~90 朵,甚至高达 100 朵以上;而未花期开花的植株每花序单花数只有 40~50 朵,不到始花期和盛花期每花序单花数的一半,差异显著($P < 0.05$)。

由表 1 还可以看出:大花百子莲在不同年份间的座果率变化趋势完全一致,即随着花期进程,越晚开花的植株其座果率越低且差异显著($P < 0.05$)。其中,始花期开花的植株座果率最高,在 2007 年和 2008 年分别达到 48.6% 和 34.6%;盛花期开花的植株座果率显著降低,分别为 8.7% 和 6.5%,仅为始花期座果率的 17.9%~18.8%;未花期开花的植株则几乎没有成功座果。

表 1 不同花期大花百子莲每花序的单花数及座果率比较¹⁾

Table 1 Comparison of flower number and fruit setting rate per inflorescence of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' at different flowering stages¹⁾

| 花期 Flowering stage | 不同年份每花序单花数 Flower number per inflorescence in different years | | 不同年份每花序座果率/% Fruit setting rate per inflorescence in different years | |
|---------------------------|--|------------------|---|-------|
| | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 |
| 始花期 Early flowering stage | 116.2 \pm 31.4a | 89.0 \pm 23.0a | 48.6a | 34.6a |
| 盛花期 Full flowering stage | 83.2 \pm 29.1b | 91.3 \pm 30.2a | 8.7b | 6.5b |
| 末花期 Late flowering stage | 46.6 \pm 12.3c | 41.1 \pm 14.2b | 0.0c | 0.1c |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

相关分析结果表明:大花百子莲每花序的始花时间与单花数和座果率间的相关系数分别为-0.278 和 -0.812, P 值分别小于 0.005 和 0.001,说明其相关性均达到极显著水平($P < 0.01$);而每花序的单花数与座果率间的相关系数为 0.432, P 值小于 0.001,说明其相关性也达到极显著水平($P < 0.01$)。可见,大花

百子莲每花序的单花数与群体中植株的花期有关,早开花的植株每花序的单花数比晚开花植株更多,座果率也更高。

2.1.2 果序水平的结实和结籽格局分析 由统计结果(表 2)可知:在 2007 年和 2008 年,大花百子莲果序的座果和结籽特点完全一致,果序不同位置间的座果

率及结籽率差异均达显著水平($P < 0.05$),表明大花百子莲的结实和结籽格局存在非随机性分布规律。其中,大花百子莲果序基部的座果率最高,达87%以上,并显著高于果序中部和顶端;果序中部的座果率居中,约为40%,不到果序基部座果率的一半;果序顶

端的座果率最低,尤其是在2008年,仅为4.03%。比较结果表明:大花百子莲果序不同位置座果率由基部至顶端依次降低;并且果序同一位置的结籽率均明显低于座果率,但果序不同位置结籽率的变化趋势与座果率一致。

表2 大花百子莲果序不同位置的座果率和结籽率比较¹⁾

Table 2 Comparison of fruit and seed setting rates of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' at different positions in infructescence¹⁾

| 果序位置 Infructescence position | 不同年份座果率/% Fruit setting rate in different years | | 不同年份结籽率/% Seed setting rate in different years | |
|---------------------------------|--|--------|---|--------|
| | 2007 | 2008 | 2007 | 2008 |
| | 果序基部 Base of infructescence | 87.26a | 88.72a | 26.52a |
| 果序中部 Center of infructescence | 43.99b | 38.01b | 13.49b | 17.67b |
| 果序顶端 Apex of infructescence | 14.62c | 4.03c | 7.20c | 8.34c |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在0.05水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

2.1.3 单果水平上的结籽格局分析 大花百子莲种子具有非随机性败育特点,对果实内种子败育格局的统计结果(表3)显示:位于大花百子莲果序基部和中部的果实内的种子败育率不同,且果序基部果实内各部位的种子败育率均低于果序中部的果实。其中,位

于果序基部的果实其中部和顶端的种子败育率与位于果序中部的果实有显著差异($P < 0.05$),而二者的果实基部的种子败育率则无显著差异($P > 0.05$)。此外,位于果序顶端的果实内各部位的种子败育率最高,接近100%。

表3 大花百子莲果序基部和中部的果实不同部位的种子败育率及单粒种子质量比较¹⁾

Table 3 Comparison of seed abortion rate and single seed weight of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue' in different parts of fruit at base and center of infructescence¹⁾

| 果实部位 Fruit part | 果序不同位置的种子败育率/% Seed abortion rate at different positions in infructescence | | 果序不同位置的单粒种子质量/mg Single seed weight at different positions in infructescence | |
|----------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | 果序基部 Base of infructescence | 果序中部 Center of infructescence | 果序基部 Base of infructescence | 果序中部 Center of infructescence |
| | 果实基部 Base of fruit | 85.41a | 88.88a | 11.47b |
| 果实中部 Center of fruit | 66.11b | 80.21a | 13.09a | 13.28a |
| 果实顶端 Apex of fruit | 61.25b | 77.91a | 13.45a | 13.31a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在0.05水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

由表3还可知:在大花百子莲果序基部和中部,果实内种子败育率沿果实基部至顶端依次降低。其中,位于果序基部的果实内顶端和中部的种子败育率无显著差异,但与果实内基部的种子败育率差异显著。说明自果实基部向上(从果柄端到柱头端),大花百子莲果实内的败育种子比例逐渐减小,发育完全的种子比例逐渐增大。

由表3还可见:在大花百子莲的果序基部和中部,果实内不同部位的单粒种子质量也有一定差别。其中,果实中部和顶端的单粒种子质量差异不显著,而果实基部的单粒种子质量则显著小于其中部和顶端。换言之,大花百子莲果实内单粒种子质量的变化

趋势为从果实顶端至基部依次降低。

2.2 大花百子莲潜在种子产量分析

统计结果显示:种子成熟期大花百子莲每花序单花数为90.2、单花胚珠数为32.9、单粒种子质量为14.55 mg,据此计算出大花百子莲的单株潜在种子产量约为43.18 g;然而,实测其单株种子实际产量约为2.87 g,仅为潜在种子产量的6.65%。可见,大花百子莲种子的实际产量远低于其潜在产量,说明大花百子莲在引种地存在有性繁殖障碍。

2.3 不同授粉方式对大花百子莲结实和结籽的影响

补充授粉实验结果(表4)表明:自然授粉状态下大花百子莲每柱头花粉数为27.5粒,而通过自花授

粉、同株异花授粉和异株授粉 3 种方式人工补充授粉后每柱头的花粉数明显增加,均超过 100 粒。可见,自然授粉条件下大花百子莲每个柱头接受的花粉数小于其胚珠数,据此可认为花粉数量是限制大花百子莲结实的因素之一。

由表 4 还可见:与自然授粉植株相比,大花百子莲同株异花授粉及自花授粉植株的座果率略有提高或下降但差异均不显著,而异株授粉植株的座果率则显著提高($P < 0.05$)。此外,异株授粉植株的结籽率也显著高于其他 3 种授粉方式。由此判断花粉来源也是限制大花百子莲结实的因素之一。

表 4 不同授粉方式对大花百子莲结实和结籽的影响¹⁾
Table 4 Effects of different pollination modes on fruit and seed setting of *Agapanthus praecox* subsp. *orientalis* 'Big Blue'¹⁾

| 授粉方式 Pollination mode | 座果率/% Fruit setting rate | 结籽率/% Seed setting rate | 每柱头花粉数 Pollen number per stigma |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 自花授粉 Self-pollination | 30.00b | 24.41b | >100.0a |
| 同株异花授粉 Geitonogamy | 40.00b | 27.18b | >100.0a |
| 异株授粉 Xenogamy cross-pollination | 70.00a | 34.44a | >100.0a |
| 自然授粉 Natural pollination (CK) | 38.00b | 20.10b | 27.5±13.7b |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

3 讨论和结论

引种植物能否在引种地采用其固有的繁殖方式进行正常繁殖是判断植物引种驯化是否成功的标准之一^[17-18]。本研究结果表明:在群体水平、果序水平及单果水平上,大花百子莲的结实和结籽格局都存在非随机性分布规律。群体内始花期开花的植株座果率显著高于盛花期和末花期开花的植株;果序的座果率和结籽率则从果序基部至顶端逐渐减小且差异显著;果实的种子败育率沿果实基部向顶端逐渐降低,即发育完好种子的比例逐渐增大,并且单粒种子质量逐渐增大。经估算,大花百子莲单株实际种子产量只占潜在种子产量的 6.65%,种子的实际产量远低于其潜在产量,说明大花百子莲在引种地的自然繁殖受到一定的制约。

花期不同阶段的结实情况能够反映群体种子产量形成的动态过程。随着大花百子莲开花过程的推进,开花越晚的植株座果率越低。一般情况下,开花

晚的植株较细弱、花序小且花序顶端的单花常不能顺利开放,这可能是由于苗期养分积累不足导致营养生长缓慢,而在花期又存在营养生长和生殖生长的竞争,因此生殖器官很难获得充足的资源分配,最终导致其座果率降低。作者前期的研究结果^[19]表明:大花百子莲为虫媒传粉植物,传粉者的访花行为与其种群内植株的开花时间关系密切;种群中早期开花的植株接受的平均昆虫访花频率明显高于中期和末期开花的植株,因此,早开花的植株能获得较多的花粉,从而保证其座果率维持在较高水平。由此可见,传粉昆虫的访花行为是导致大花百子莲花期不同阶段座果率出现显著差异的另一个重要原因。总之,植株的养分积累和授粉状况是影响大花百子莲种子产量的重要制约因素。

大花百子莲果序的结实格局是从果序基部到顶端果实产量逐渐减小,一般来说这种结实格局与发育果实的资源竞争有关^[7,20-23]。一方面,大花百子莲单花开放顺序从花序基部开始逐渐向上,最早开放的花在资源吸收和利用上占有主动权,能够获得更多的母体资源,因此果序基部果实成熟的可能性最高;而花序顶端的单花开花较晚,花、果发育受到资源竞争的制约,顶部的有些单花甚至出现萎蔫、无法正常开放的现象。另一方面,当用于繁殖的资源量有限时,植株上距离光合产物源和营养源最近的果实(即果序基部的果实)拥有对资源竞争的空间优势^[9]。因此,时间与空间的双重优势使得大花百子莲在引种地形成了果序基部结籽率最高、而顶端结籽率几乎为零的结实格局。

补充授粉实验结果表明:经过人工异株授粉后大花百子莲植株的座果率和结籽率均显著高于自然授粉的植株,说明柱头上的花粉量对大花百子莲植株的结实和结籽格局有较大影响。当柱头上的花粉数量较多时,植株会选择具有较高活力的花粉完成受精,因此能够产生出具有更高活力的后代^[24-25],并在果实成熟前选择性地败育那些基因型较差的果实^[26]。然而,经过人工自花授粉和同株异花授粉的大花百子莲植株的座果率并没有显著提高,说明花粉源差异对大花百子莲的受精作用有较大影响。从遗传角度来看,异花受精的果实或种子含有优良的亲本基因型,并且这些果实或种子更容易成熟^[27],本研究结果也验证了这一观点。

参考文献:

- [1] STEPHENSON A G. Flower and fruit abortion: proximate causes and ultimate functions [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1981, 12: 253-279.
- [2] LEE T D, BAZZAZ F A. Regulation of fruit and seed production in an annual legume, *Cassia asciculata* [J]. *Ecology*, 1982, 63: 1363-1373.
- [3] HOSSAERT M, VALÉRO M. Effect of ovule position in the pod on patterns of seed formation in two species of *Lathyrus* (Leguminosae: Papilionoideae) [J]. *American Journal of Botany*, 1988, 75: 1714-1731.
- [4] GÓMEZ J M, ZAMORA R. Factors affecting intrafruit pattern of ovule abortion and seed production in *Hormathophylla spinosa* (Cruciferae) [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2003, 239: 215-229.
- [5] 方炎明. 植物生殖生态学[M]. 济南: 山东大学出版社, 1996: 1-8.
- [6] 熊志斌, 冉景丞, 谭成江, 等. 濒危植物掌叶木种子生态特征 [J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 820-825.
- [7] 张爱勤, 朱进忠. 苜蓿结实格局及其影响因素的研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2005, 28(4): 15-19.
- [8] 王宏飞, 魏岩. 紫翅猪毛菜的种子多型性及其结实格局 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 419-424.
- [9] 施翔, 王建成, 张道远, 等. 荒漠植物准噶尔无叶豆结实、结籽格局及其生态适应意义 [J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 4935-4940.
- [10] 王雷, 董鸣, 黄振英. 种子异型植物异子蓬的生殖分配和结实格局 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(9): 948-955.
- [11] 张艳敏, 魏岩, 严成. 亚麻叶碱蓬 (*Suaeda linifolia*) 的物候及结实格局 [J]. *新疆农业大学学报*, 2010, 33(3): 187-191.
- [12] 赵学杰, 谭敦炎. 种子植物的选择性败育及其进化生态意义 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1007-1018.
- [13] THOMPSON J D, DOMMÉE B. Sequential variation in the components of reproductive success in the distylous *Jasminum fruticans* (Oleaceae) [J]. *Oecologia*, 1993, 94: 480-487.
- [14] 孙颖, 马翠青, 严俊鑫, 等. 大花百子莲的花粉活力与柱头可授性 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(7): 89-92.
- [15] 卓丽环, 孙颖. 百子莲的花部特征与繁育系统观察 [J]. *园艺学报*, 2009, 36(11): 1697-1700.
- [16] DAFINI A. *Pollination Ecology* [M]. New York: Oxford University Press, 1992: 1-57.
- [17] 王宁, 胡建湘, 朱华, 等. 澳大利亚引种植物在西双版纳的适应性分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(4): 16-20.
- [18] 李亚, 姚淦, 邓飞, 等. 江苏省外来种子植物的初步调查和分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(4): 55-60.
- [19] 孙颖, 卓丽环. 百子莲的传粉昆虫及其访花行为研究 [J]. *上海农业学报*, 2009, 25(1): 87-91.
- [20] BERRY P E, CALVO R N. Pollinator limitation and position dependent fruit set in the high Andean orchid *Myrosmodes cochleare* (Orchidaceae) [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 1991, 174: 93-101.
- [21] 艾沙江·阿不都沙拉木, 谭敦炎, 吾买尔夏提·塔汉. 新疆郁金香营养生长、个体大小和开花次序对繁殖分配的影响 [J]. *生物多样性*, 2012, 20(3): 391-399.
- [22] 边才苗, 金则新, 李钧敏. 七子花的繁殖生物学研究 [J]. *云南植物研究*, 2002, 24(5): 613-618.
- [23] 张振春, 谭敦炎. 雄全同株植物簇花芹花期性别分配与开花式样 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(1): 63-71.
- [24] NIESENBAUM R A. Linking herbivory and pollination: defoliation and selective fruit abortion in *Lindera benzoin* [J]. *Ecology*, 1996, 77: 2324-2331.
- [25] NIESENBAUM R A. The effects of pollen load size and donor diversity on pollen performance, selective abortion, and progeny vigor in *Mirabilis jalapa* [J]. *American Journal of Botany*, 1999, 86: 261-268.
- [26] CRUZAN M B, THOMSON J D. Effects of pre-dispersal selection on offspring growth and survival in *Erythronium grandiflorum* [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 1997, 10: 295-314.
- [27] RASPÉ O, GUILLAUME P, JACQUEMART A-L. Inbreeding depression and biased paternity after mixed-pollination in *Vaccinium myrtillus* L. (Ericaceae) [J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2004, 165: 765-771.

(责任编辑: 佟金凤)