2017-02-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2016.03021 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2017, 23 (1): 0077-0081

濒危红树植物红榄李开花生物学特征及繁育系统*

张 颖** 李燕华 张晓楠 杨 勇
海南师范大学生命科学学院 海口 571158

摘 要 为了解红树植物红榄李[*Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt]濒危的生殖生物学原因，结合野外观测，综合运用杂交指数、花粉–胚珠比、花粉活力和柱头可授性观测、人工授粉以及套袋实验等方法，对红榄李的开花生物学和繁育系统进行研究. 结果表明：红榄李群体花期从1月底到8月底. 单花开放过程可分为萌动、初展、盛开、凋落4个阶段. 单花花期约为（12.60 ± 0.80）d，单花序花期约持续（29.70 ± 1.00）d，单株花期约为（115.20 ± 6.00）d. 单株平均开花数量为（9.60 ± 0.03）万朵，单株平均开花振幅为（83.47 ± 1.50）朵/d）；红榄李的杂交指数为4，花粉胚珠比为21 649.08. 实验发现红榄李繁育系统为兼性异交，传粉过程需要传粉者；红榄李的花粉生活力低于10%，花粉活力可维持至散粉后的第4天. 但散粉2 d后，柱头可授性显著下降，花粉的高活力期与柱头可授期有1-2 d的重叠；在自然状况下，红榄李结果率较高但同时空胚率也高. 人工辅助异株异花授粉对提高结果率和降低空胚率有明显作用. 综上，红榄李“花期分散”的开花模式，花粉生活力低，自然状态下传粉效率低、胚败育严重和花果期虫害严重是导致其濒危的主要原因.（图2 表3 参27）

关键词 濒危红树植物；红榄李；开花动态；繁育系统；人工辅助授粉；濒危机制
CLC Q945.79

Flower phenology and breeding system of endangered mangrove *Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt*

ZHANG Ying**, LI Yanhua, ZHANG Xiaonan & YANG Yong
College of Life Science, Hainan Normal University, Haikou 571158, China

Abstract *Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt is one endangered mangrove species in China. To understand the reasons of its reproductive biology, we studied its flower pheonology and breeding system by observing the outcrossing index, pollen–ovule ratio (P/O), pollen vitality, and stigma receptivity under natural environment and artificial pollination and bagging. Generally, the *L. littorea* population`s flowering started from the late January and ended in the late August. The flowering process of single flower could be divided into four stages as bud swelling, flower opening, full blooming and flower withering. The flowering process of single flower lasted 12.60±0.80 days, the single inflorescence lasted 29.70±1.00 days, while the individual was about 115.20±6.00 days. The mean number of flowers per plant was 96.0±0.3 thousand and the mean flowering amplitude was 83.47±1.50 per plant per day. The out-crossing index was 4, and the P/O was 21 649.08. The breeding system of *L. littorea* (Jack.) Voigt was outcrossing with partial self-pollination, and needing pollinators. The pollen vitality was lower than 10%. It could be maintained for 4 days after pollen dissemination. The stigma receptivity decreased significantly after pollen dissemination, and there was only a 1-2 day overlap between the pollen dehiscence and the stigma receptivity. Under natural conditions, the high empty embryo rate along with the high fruit setting rate was found. The artificial heterogenitic pollination could improve the fruit setting rate and the empty embryo rate obviously. It was concluded that the florescence mode, the low pollen viability, the low pollination efficiency, the heavy embryo abortion and the heavy damage by insects in blossom and fruit period could be the main reasons for the endangering of *L. Littorea* (Jack.) Voigt.

Keywords endangered mangrove; *Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt; floral dynamic; breeding system

收稿日期 Received: 2016-03-11 接受日期 Accepted: 2016-04-26
*国家自然科学基金项目（31360173）、有害生物控制与资源利用国家重点实验室2015开放课题（SKLBC15KF06）和海南师范大学青年教师科研启动项目（QN1435）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31360173), the 2015 Open Fund of the State Key Laboratory of Hazardous Organisms Control and Resources Utilization (SKLBC15KF06), and the Startup Project for Youth Teachers of Hainan Normal University (QN1435)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: Zhangyingred@yahoo.com)

植物繁育系统与传粉者的进化和物种的繁殖策略紧密交织在一起，构成种群基因流动的途径，决定着受精过程，是作为物种性别表达影响个体对下一代相对遗传贡献的首要因子，也是调节种群遗传结构的有效手段[1]. 植物繁育系统是决定植物群体遗传结构的最主要因素之一[2]，主要包括花部综合特征、花各性器官的寿命、自交亲和程度和交配系统等内容的研究，是当今生态学和进化生物学研究最为活跃的领域之一[3]. 对珍稀濒危植物的开花物候与繁育系统的研究，将有助于全面了解濒危原因.

珍稀濒危红树植物红榄李[*Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt]是使君子科（Combretaceae）榄李属（*Lumnitzera*）红树植物，国家二级保护植物，亦为《国际湿地公约》濒危物种[4-5]. 自然生长于易受人为干扰的高潮带，是嗜热的窄分布种[6]. 在我国，红榄李仅见于海南岛. 其数量由2006年的359株[5]到2016年的11株[三亚铁炉港（18°15′N, 109°42′E）9株，陵水大墩村（18°23′N, 110°00′E）2株]. 2001-2013年连续13年的野外调查均没有在野外发现小苗[5, 7-8]. 但在2014-2016年的野外调查中发现红榄李母株下有种子萌发现象. 前期研究对红榄李的分布现状[8]、形态特征[5, 9]、元素分析[10]、遗传多样性[11]和花粉结构等[12]进行了介绍，但是缺乏对红榄李的开花生物学特征和繁育过程系统的梳理. 因此本研究通过研究红榄李开花生物学特征和繁育系统，了解其生殖过程中的濒危环节，旨在从生殖生物学角度探索红榄李可能存在的濒危原因，为挽救红榄李种质资源提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

三亚铁炉港（18°15′N, 109°42′E），平均气温 25.5 ℃，最冷月平均气温 20.3 ℃，极端最低气温 5.1 ℃，年平均降水量 1 255 mm. 地貌上属沙坝—泻湖型港湾[13].

1.2 研究方法

1.2.1 开花生物学观察 参照Dafni的方法[14]，于2014-2015年对红榄李开花物候从群体、个体、花序和单花4个水平进行观测.

单花水平：在研究地点随机摘取已开放的红榄李花60朵，观察花和测量其各部分的长度. 随机抽取红榄李不同植株上同步开放的60朵花，观察其开花动态及在时间上的差异，确定其单花持续时间.

群体、个体和花序水平：在花蕾期，对全部9株红榄李的始花时间、盛花期、终花期和持续时间进行观察统计. 花序和个体的始花日期为第一朵花在花序和个体上开花的日期，花序和个体开花数大于或等于50%时为盛花期. 75%的植株开花结束时视为群体终花期[15].

1.2.2 花粉生活力测定 参照吴月亮固体培养基法[16]，培养基组成为蔗糖10%，琼脂3.5%，硼酸0.02%. 将数滴培养基均匀涂布于载玻片上，少许花粉均匀撒播到培养基上，载玻片置于垫有2层湿滤纸的培养皿中，附着花粉粒一面朝上，盖上培养皿盖，25 ℃培养2 h，镜检. 随机选择30朵花，每朵花涂布1片，每片随机选5个视野. 花粉管长度大于花粉粒直径视为花粉萌发.

1.2.3 柱头可授性测定 联苯胺—过氧化氢法[2]对不同开放天数的花朵进行测定柱头可授性.

1.2.4 花粉-胚珠比(P/O)的测定 参照刘林德等的方法[17]，随机选取未裂开的花药进行镜检，统计花粉数；取子房剥开记录胚珠数目，重复10次，取平均值.

1.2.5 杂交指数 (OCI) 的检测 依照Dafni的划分标准[14]对红榄李花朵直径、大小和开花行为进行测定.

1.2.6 套袋实验 参照杨旭等的方法[1]，在野外对花分别做以下处理：自然授粉；开花前不去雄套袋；去雄套袋，人工同株异花授粉；去雄套袋，人工异株异花授粉；去雄套袋，不授粉. 30朵花一组重复10次.

1.2.7 扫描电镜 参照张彦妮等的方法[18]，使用Hitachi（S-3000N）扫描电子显微镜对红榄李花粉囊和柱头进行显微分析.

1.2.8 数据分析 用SPSS 16.0和Excel 2003软件进行分析，结果以平均值±标准差表示.

2 结果与分析

2.1 花的形态特征

红榄李的花序为总状花序，顶生，具蜜腺，平均单花直径为 6.70 mm. 花瓣5枚，红色，长约3-5 cm，苞片脱落；两性花，雄蕊6-10枚，比花瓣约长2倍，花丝红色；雌蕊1枚，花柱棒状，上部粗厚；花柱红色且与花丝等长. 胚珠4-5枚，各珠柄彼此稍合生但不等长（表1）.

表1 红榄李花的特征

Table 1 Floral characteristics of *L. littorea* (Jack.) Voigt

形态 Morphology	样本量 Sample size	长度 Length (*l*/mm)	范围 Range (*l*/mm)
单花直径 Diameter of single flower	60	6.70 ± 0.04	5.90-7.20
花瓣 Petals	60	4.20 ± 0.43	2.90-5.40
雌蕊 Pistil	60	8.70 ± 0.15	7.20-9.10
雄蕊 Stamen	60	8.50 ± 0.23	7.80-8.80

红榄李单花的花期为10-14 d. 单花开放过程可分为4个时期：萌动期，花萼松动，花芽明显膨大，花瓣微露（6-7 d）；初展期，单花伸长至唇瓣微张，初见雄蕊（约1开）；盛开期，单花从唇瓣微张开至唇瓣完全上下张开（约0.5 d）；凋落期，花冠凋谢，柱头萎蔫（图1）.

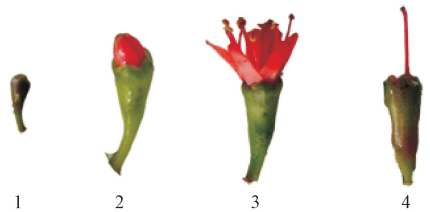


图1 红榄李单花开放过程. 1：花蕾期；2：初展期；3：盛开期；4：凋落期.

Fig. 1 The flowering process of *L. littorea* (Jack.) Voigt. 1: bud swelling; 2: initial flowering; 3: blooming flower; 4: withering flower.

红榄李群体的花期从1月底持续到8月底，开花时间不集中. 单花、花序、单株水平上的开花物候都表现出开花不同步性. 开花持续时间分别为单花（12.60 ± 0.80）d，花序（29.70 ±

1.00) d, 单株 (115.30 ± 6.00) d, 群体 (210.40 ± 8.50) d. 红榄李单株平均开花数量为 9.60 ± 0.03 万朵, 每株平均开花振幅为 (83.47 ± 1.50) 朵/d.

2.2 花粉活力检测

红榄李花粉活力随着开花过程表现为先增强, 后保持平稳, 再急剧下降的变化过程. 散粉后4 d内, 花粉具有活力 (图2). 红榄李花粉生活力较低, 均不超过10%. 不同育性的花粉粒见图3 (2-4). 扫描电镜下, 花粉粒散布于开裂花粉囊裂口表面[图3 (1-2)], 可育花粉粒为6裂圆形或近圆形, 3孔沟与3条假沟相间排列[图3 (4)], 败育花粉粒呈现为三棱形或四棱形[图3 (3)].

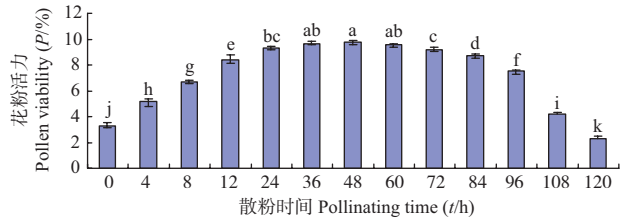


图2 红榄李花粉活力测定.

Fig. 2 The pollen viability of *L. littorea* (Jack.) Voigt.

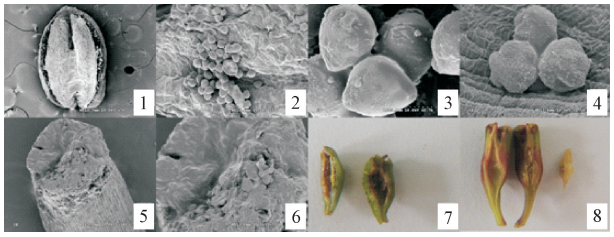


图3 红榄李的花粉和果实. 1: 花粉囊; 2: 花粉粒; 3: 败育花粉粒; 4: 可育花粉粒; 5: 柱头; 6: 柱头上接收的花粉粒; 7: 虫害果实; 8: 正常发育果实.

Fig. 3 The pollen and fruit of *L. littorea* (Jack.) Voigt. 1: anther; 2: pollens; 3: abortion pollens; 4: normal pollens; 5: stigma; 6: pollens on the stigma; 7: pest damaged fruit; 8: normal fruit.

2.3 柱头可授性测定

由表2可知, 在未散粉前1天, 红榄李柱头可产生少量气泡, 柱头具可授性; 散粉后的第1-2天, 产生大量气泡, 柱头可授性达到最强. 而后柱头可授性降低. 同时通过扫描电镜观察, 在散粉前红榄李柱头上能够接受花粉粒如图3 (5-6).

表2 红榄李花柱头可授性的测定

Table 2 The stigma receptivity of *L. littorea* (Jack.) Voigt

散粉天数 Blooming time	时间 Time				
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
前1天 1 day before blooming	+	++	++	++	++
第1天 The first day	++++	++++	++++	++++	+++
第2天 The second day	+++	+++	+++	+++	+++
第3天 The third day	++	++	++	++	++
第4天 The fourth day	+	+	+	-	-

-: 柱头不具有可授性; +: 柱头具有可授性; ++: 柱头具有较强可授性; +++: 柱头具有强可授性; ++++: 柱头具有最强可授性

—: no stigma receptivity; +: stigmas with receptivity; ++: stigmas with high receptivity; +++: stigmas with higher receptivity; ++++: stigmas with the highest receptivity.

2.4 花粉-胚珠比 (P / O)

随机选择单花100朵对红榄李的花粉量进行测定, 其单花平均花粉量为93 740.52 ± 5 132.56, 胚珠数目4.33 ± 0.40, P/O为21 649.08. 根据Cruden提出的标准[19], 即P/O为2 108.0-195 525.0时, 为专性异交. 据此, 红榄李繁育系统为专性异交.

2.5 杂交指数 (OCI) 的检测

根据OCI的估算标准, 红榄李平均单花直径为 (6.70 ± 0.04) mm, 记为3; 花粉高活力期和柱头可授期的累计重叠时间约为24 h, 雌雄同熟记为1; 雌雄蕊几乎同高记为0. 合计杂交指数为4, 表明红榄李繁育系统为异交型.

2.6 套袋实验

在套袋实验中, 去雄套袋处理后未能产生果实, 说明红榄李没有无融合生殖现象存在 (表3). 在自花授粉状态下, 红榄李表现为低结实率和高空胚率 (76.54%), 说明红榄李有很低的自交亲和现象. 异花授粉能有效提高结实率和降低空胚率, 说明红榄李的繁育系统为兼性异交型, 需要传粉媒介.

表3 红榄李花不同授粉方式结实率与空胚率

Table 3 Fruit set and empty embryo rate of *L. littorea* (Jack.) Voigt under different treatments

处理 Treatment	花朵数 Number of treated flowers	结实率 (*r*/%) Fruit-set rate	空胚率 (*r*/%) Empty embryo rate
自然对照 CK	300	44.40 ± 0.20 a	76.54 ± 0.50 a
自花授粉 Self-pollination	300	29.30 ± 0.40 b	89.50 ± 0.30 b
同株异花授粉 Geitonogamy	300	56.10 ± 0.40 c	62.30 ± 0.40 c
异株异花授粉 Outcross pollination	300	78.30 ± 0.30 d	56.40 ± 0.50 d
去雄套袋 Bagging after castration	300	0	-

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$).

Different letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

3 讨论

濒危红树植物红榄李野生植株在我国现存数量稀少, 已到了濒临灭绝的边缘[5]. 前期研究表明, 红榄李在我国从2007年以来, 在不到10年的时间内, 野生植株的数量由359株[4]骤然降至11株 (2016年野外调查数据). 红榄李的保护性研究工作已到了刻不容缓的地步. 对于濒临灭绝的野生植物而言, 只有在对其形成过程、高风险灭绝机制进行系统研究的基础上, 才能有针对性地采取科学有效的拯救保护措施[20]. 近年来, 对濒危红树植物红榄李的分布状况、形态鉴定和生物多样性分析等内容进行了持续的研究[4-5, 7-8, 11, 21]. 红榄李在自然状态下表现为林下无幼苗, 种子不萌发, 同时没有发现其无性繁殖方式. 这种繁殖现状是濒危植物走向最终灭亡的最危机状态[15]. 为探究这种状态的原因, 珍稀濒危植物的开花生物学及繁育系统的研究受到了重视[22].

红榄李开花量较大, 但花期长, 开花同步性低, 属于持续开花模式. 这种开花现象与濒危植物银沙槐*Ammodendron argenteum* [2]、长柄双花木*Disanthus cercidifolius* [23]和准噶尔

无叶豆*Eremosparton songoricum* [24] 的“集中开花模式”有所不同. “大量、集中开放”的这种开花模式能够吸引到更多的传粉者的访问, 不仅保证了植株的生殖成功, 而且减少了恶劣的环境对其的不良影响. 红榄李从单花、花序和单株开花的不同步性是有利于异株异花授粉, 可大幅提高结实率与单果出种率, 但由于种群开花的不同步性, 使该物种被迫选择同株异花授粉. 同株异花授粉再导致胚珠褐化、胚发育中断、雌蕊败育等现象[15, 25], 这是导致其濒危的主要原因之一.

根据花粉/胚珠比和杂交指数, 红榄李的繁育系统为异交型. 其花冠红色, 总状花序顶生于枝条之上, 有利于吸引昆虫. 野外调察显示, 红榄李的传粉者有蚂蚁、蜜蜂、甲虫和蝴蝶等. 项目组2013年和2014年在三亚铁炉港发现黄腹花蜜鸟(*Nectarinia jugularis*)亦是红榄李的传粉者. 但红榄李伴生植物尖瓣海莲*Bruguiera sexangula* (Lour.) Poir. 常年开花, 花朵红色, 蜜汁量大对红榄李的鸟媒授粉形成了竞争, 这种现象在花期相同的其它物种间也有类似的发现[26]. 套袋实验表明, 红榄李存在一定程度的自交亲合现象. 一方面, 兼备自花传粉的濒危植物个体在传粉者稀少或数量较少时, 较专性异交的个体相比, 有一定的选择优势[27]. 另一方面, 也可能是异交授粉途径受阻而被迫进行自花授粉, 造成自交衰退, 从而加重濒危现象. 红榄李的花粉数量较大, 花粉活力极低(10%), 这与濒危植物瑶山苣苔*Dayaoshania cotinifolia* (97.1%)、银沙槐*Ammodendron argenteum* (95%)和掌叶木*Handeliodendron bodinieri* (90.5%) [2, 15, 27]的表现不同. 自然状态下, 红榄李果实空胚率高, 这种现象在濒危植物掌叶木(*Handeliodendron bodinieri*) [15]果实中也被发现. 由此可见, 胚的中途败育是红榄李濒危的又一个原因, 败育阶段的确认有待进一步的研究.

人工辅助异株异花授粉能够有效提高濒危植物银沙槐(*Ammodendron argenteum*)、凹叶厚朴(*Magnolia officinalis*)结果率和长柄双花木(*Disanthus cercidifolius*)的结果率、结籽率或单果出种百分率[1-2, 23]. 在本研究中, 人工辅助异株异花授粉对红榄李的结果率也有很大的提高, 同时有效降低了空胚率. 近年红榄李的花果受害严重[图3(7)], 2013年的调查表明58%的果实受到虫害[5]. 所以采取有效的人工辅助授粉并结合害虫防治将能对红榄李的种子繁育起到积极的作用.

致谢 感谢GEF海南省湿地保护体系项目对本文研究在调查和采样工作等方面的帮助.

参考文献 [References]

1 杨旭, 杨志玲, 王洁, 檀国印, 何正松. 濒危植物凹叶厚朴的花部综合特征和繁育系统[J]. 生态学杂志, 2012, **31** (3): 551- 556 [Yang X, Yang ZL, Wang J, Tan GY, He ZS, Floral syndrome and breeding system of endangered species *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31** (3): 551- 556]

2 吕海英, 曹满航, 李进. 新疆特有珍稀灌木银沙槐繁育系统研究[J]. 广西植物, 2014, **34** (6): 763-767 [Lü HY, Cao MH, Li J. Study on the breeding system of the rare plant *Ammodendron argenteum* [J]. *Guihaia*, 2014, **34** (6): 763-767]

3 何亚平, 刘建全. 植物繁育系统研究的最新进展和评述[J]. 植物生态学报, 2003, **27** (2): 151-163 [He YP, Liu JQ. A review on recent advances in the studies of plant breeding system [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, **27** (2): 151-163]

4 范航清, 陈利洪. 中国濒危红树植物红榄李的种群数量及其分布[J]. 广西科学, 2006, **13** (3): 226-227 [Fan HQ, Chen LH. Current distribution of endangered Mangrove *Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt in China [J]. *Guangxi Sci*, 2006, **13** (3): 226-227]

5 张颖, 钟才荣, 李诗川, 严廷良, 管伟. 濒危红树植物红榄李[J]. 林业资源管理, 2013, **5**: 103-107, 151 [Zhang Y, Zhong CR, Li SC, Yan TL, Guan W. Endangered species of mangrove plants: *Lumnitzera littore* [J]. *Forest Resour Manage*, 2013, **5**: 103-107, 151]

6 Polidoro BA, Carrenter KE, Collins L, Duke NC, Ellison AM, Joanna CE, Elizabeth JF. The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern [J]. *PLoS ONE*, 2010, **5**: 1-10

7 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 298-299 [Wang WQ, Qang M. The Mangroves of China [M]. Beijing: Science Press, 2007: 298-299]

8 钟才荣, 李诗川, 管伟, 李华亮, 林雪云, 廖宝文. 中国3种濒危红树植物的分布现状[J]. 生态科学, 2011, **30** (4): 431- 435 [Zhong CR, Li SC, Guan W, Li HL, Lin XY, Liao BW. Current distributions of three endangered mangrove species in China [J]. *Ecol Sci*, 2011, **30** (4): 431-435]

9 李元跃, 潘文, 黎中宝, 林鹏. 榄李属红树植物叶片结构及其生态适应[J]. 海洋科学, 2010, **34** (7): 72-76 [Li YY, Pan W, Li ZB, Lin B. Leaf structure and its ecological adaptability of mangroves of *Lumintzera* [J]. *Mar Sci*, 2010, **34** (7): 72-76]

10 牟美蓉, 蒋巧兰, 王文卿. 真红树和半红树植物叶片氯含量及叶性状的比较. 植物生态学报, 2007, **31** (3): 497-504 [Mu MR, Jiang QL, Wang WQ. Comparisons of leaf chloride content and leaf traits between true mangrove plants and semi-mangrove plants [J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31** (3): 497-504]

11 苏国华. 红树植物榄李属的遗传多样性研究[D]. 广州: 中山大学, 2004 [Su GH. The genetic diversity of mangroves of *Lumintzera* [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2004]

12 张玉兰, 王开发. 我国某些红树植物花粉形态研究及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22** (4): 29-33 [Zhang YL, Wang KF. Study on pollen morphology of some mangrove in china and its paleoenvironment significance [J]. *Mar Geol Quatern Geol*, 2002, **22** (4): 29-33]

13 姚铁锋, 廖文波, 宋晓彦, 李承森. 海南三亚铁炉港红树林资源现状与保护[J]. 海洋学报, 2010, **29** (2): 150-155 [Yao YF, Liao WB, Song XY, Li CS. Current status and conservation of mangrove resources in Tielu Harbor, Sanya, Hainan [J]. *Mar Sci Bull*, 2010, **29** (2): 150-155]

14 Dafni A . Pollination Ecology [M]. New York: Oxford University Press, 1992: 1-57

15 李在留, 李雪萍, 郭松, 闫湘, 李磊, 包满珠. 珍稀濒危植物掌叶木的开花生物学特性与繁育系统[J]. 园艺学报, 2015, **42** (2): 311-320 [Li ZL, Li XP, Guo S, Yan X, Li L, Bao MZ. Flowering biology and breeding system of the rare and endangered plant *Handeliodendron bodinieri* [J]. *Acta Horticult Sin*, 2015, **42** (2): 311-320]

16 吴月亮, 赵传统, 伊文芝, 蒋俐, 董胜君, 刘明国. 不同培养基及贮藏条件对文冠果花粉生活力的影响[J]. 北方园艺, 2015 (5): 64-67 [Wu YL, Zhao CT, Yin WZ, Jiang L, Dong SJ, Liu MG. Effect of pollen

viability of *Xanthoceras sorbifoloa* under different culture media and storage conditons [J]. *North Horticult*, 2015 (5): 64-67]

17 刘林德, 张萍, 张丽, 陈磊, 高玉葆. 锦带花的花粉活力、柱头可授性及传粉者的观察[J]. 西北植物学报, 2004, **24** (8): 1431-1434 [Liu LD, Zhang P, Zhang L, Chen L, Gao YB. Pollen viability, stigma receptivity and pollinators of Weigela florida [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2004, **24** (8): 1431-1434]

18 张彦妮, 钱灿. 12种百合属植物花粉形态扫描电镜观察[J]. 草业学报, 2011, **20** (5): 111-118 [Zhang YN, Qian C. SEM observation on pollen morphology of 12 lily species [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2011, **20** (5): 111-118]

19 Cruden RW. Pollen-ovule ration: a consernative indicator of breeding in flowering plant [J]. *Evolution*, 1977, **135**: 1-6

20 孙卫邦, 韩春艳. 论极小种群野生植物的研究及科学保护[J]. 生物多样性, 2015, **23** (3): 426-429 [Sun WB, Han CY. Researches and conservation for plant species with extremely small populations (PSESP) [J]. *Biodiv Sci*, 2015, **23** (3): 426-429]

21 陈利洪. 红树濒危植物红榄李的保护生物学研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007 [Chen LH. Reseach on conservation biology of endangered mangrove plant [J]. Nanning: Guangxi University, 2007]

22 王洁, 杨志玲, 杨旭. 濒危植物繁育系统研究进展[J]. 西北农林科技大学学报自然科学版, 2011 (9): 207-213[Wang J, Yang ZL, Yang X. Advances in the studies of endangered plants breeding system [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2011 (9): 207-213]

23 肖宜安, 李晓红, 曾建军, 胡文海, 胡雪华, 周兵. 人工授粉对濒危植物长柄双花木结果率和结籽率的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2012, **33** (3): 96-101 [Xiao YA, Li XH, Zeng JJ, Hu WH, Hu XH, Zhou B. Effects of hand pollination on fruit and seed set in the endangered plant *Disanthus cercidifolius* var. *longipes* [J]. *J Jinggangshan Univ (Nat Sci)*, 2012, **33** (3): 96-101]

24 马文宝, 施翔, 张道远, 尹林克. 准噶尔无叶豆的开花物候与生殖特征[J]. 植物生态学报, 2008, **32** (4) 760-767 [Ma WB, Shi X, Zhang YD, Yin LK. Flowering phenology and reproductive features of the rare plant *Eremosparton songoricum* in desert zone, xinjiang China [J]. *J Plant Ecol*, 2008, **32** (4): 760-767]

25 王若涵. 木兰属生殖生物学研究及系统演化表征探析[D] . 北京: 北京林业大学, 2010 [Wang RH. A study on reproductive biology in *Magnolia* and its systematic characterization [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010]

26 Runquist RDB. Pollinator-mediated competition between two congeners, *Limnanthes douglasii* subsp. *rosea* and *L. alba* (Limnanthaceae) [J]. *Am J Bot*, 2012, **99** (7): 1125-1132

27 王玉兵, 梁宏伟, 莫耐波, 覃康平, 汤庚国. 珍稀濒危植物瑶山苣苔开花生物学及繁育系统研究. 西北植物学报, 2011, **31** (5): 958-965 [Wang YB, Liang HW, Mo NB, Qin KP, Tang GG . Flower phenology and breeding system of rare and endangered *Dayaoshania cotinifolia* [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2011, **31** (5): 958-965]