

药用植物扁担杆的传粉生态学特性研究

张晓涵¹, 刘林德¹, 张莉¹, 胡德昌², 刘志浩², 孔宪海²

(1. 鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264039; 2. 烟台三维岩土工程技术有限公司, 山东 烟台 264001)

摘要: 对扁担杆(*Grewia biloba*)的开花物候、花粉活力、柱头可授性、繁育系统、访花昆虫及频率进行定位观测,揭示扁担杆植株的有性生殖传粉机理,以期扁担杆植株的种质资源保护提供参考依据。结果显示:扁担杆单花花期5 d,种群花期50~55 d左右。花粉活力从蕾期、初花期(花瓣与花柱的夹角 $<30^\circ$)、盛花期(花瓣与柱头夹角 $\geq 90^\circ$)、凋落期,呈现先升高后降低的趋势。初花期时雄花达 $92.34\% \pm 1.77\%$,两性花为 $72.62\% \pm 8.76\%$,且此时柱头可授性最强。两性花与雌花柱头在开花当天就具有过氧化物酶活性,柱头盘状有四裂,这增大了接受花粉的可能性;两性花花粉胚珠比为59.596.75~101.653.25,扁担杆以异交为主要传粉者,也存在自交,在两性花中自然座果率为 $27\% \pm 1\%$;中华蜜蜂、意大利蜜蜂、中国芦蜂是扁担杆的最常见访花者,昆虫访问雌花频率略低于雄花与两性花。就不同生境生长的扁担杆来看,槐树林内扁担杆的访花昆虫物种数丰富但访花频率极不均匀,而灌木丛内访花昆虫的访花频率则拥有较高的均匀度。综上所述,扁担杆的花粉量大且活力高,柱头可授性强,花粉活力与柱头可授性在同一时期到达峰值,能确保高效传粉;访花者的访花行为与花朵结构及周围生境相适应,扁担杆是一种异交为主,自交与异交相结合的植物。

关键词: 扁担杆; 花粉活力; 柱头可授性; 繁育系统; 传粉者

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-8020(2021)03-0235-07

植物的繁殖比动物繁殖复杂的多,在植物中有性繁殖与无性繁殖常常并存,而且植物繁育系统类型与过程复杂多样,大多数开花植物中的花粉转移由传粉者的行为决定,传粉媒介对植物繁殖成功的贡献取决于其有效性及其活动^[1],因此传粉生态学在研究植物的繁殖机理中占据一定地位。

扁担杆(*Grewia biloba*)属于椴树科(Tiliaceae)扁担杆属(*Grewia*)。花分两性花与单性花,核果红色,有2~4颗分核,花期5~7月,生长于丘陵、低山路边草地、灌丛或疏林,是一种良好的野生药用、经济植物;在中国及一些周边国家地区为一种常见的中草药,以根或全株入药,是一种用来治疗皮肤化脓生疮的常见的药物^[2]。

现阶段对扁担杆的研究多集中在对其化学成分、提取物抗肿瘤抗疟疾的药理功能研究^[3],另外,扁担杆作为一种耐旱植物,有学者关注干旱胁迫

下其水分利用特性^[4-5],还有学者对扁担杆群落的多样性特性进行研究^[6],关注扁担杆植株的低水分利用效率和浅水源的利用策略^[7]。本研究则通过野外观测、室内检测对扁担杆的繁育系统特征和传粉生态特性进行探究,以期扁担杆人工繁殖保育策略的制定提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地点与材料

研究样地设于烟台市芝罘区莱山($37^\circ 20' N \sim 37^\circ 30' N$, $121^\circ 19' E \sim 121^\circ 21' E$),该地区属暖温带季风性大陆气候,年平均气温 $12.6^\circ C$,年平均降雨量 672.5 mm 。该实验在6—7月扁担杆花期开展,以槐树林内生长的扁担杆为主要研究对象,槐树林内优势种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*),扁

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-18

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MC055); 山东省农业良种工程项目(2019LZGC1805); 企业委托项目(2016HX040)

第一作者简介: 张晓涵(1996—),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为植物生态学。E-mail: 1392074349@qq.com

通信作者简介: 刘林德(1965—),男,山东莒县人,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为植物生态学。E-mail: linde_liu@163.com

担杆(*Grewia biloba*)、荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.)) 均为常见种,灌木丛内优势种为入侵植物美洲商陆(*Phytolacca americana*)。

1.2 研究方法

1.2.1 开花动态及花朵数量性状测定

采用吊牌标记法,随机标记槐树林内将要开放的扁担杆雌株、雄株、两性株,自然条件下每天观察花蕾直到花朵开放,在花朵开放当天连续观察花朵开放过程、性状及其时空动态直到花丝枯萎,记录花朵单花花期与种群花期,随机取正开放的雌花、雄花和两性花各 30 朵,测量花冠直径、花丝长度、花药与柱头之间的空间距离,并计算各项相关指标。

1.2.2 生长于不同生境之间的扁担杆物候期

比较不同生境之间开花物候,植物的开花物候受周围大环境的影响,用温湿度计分别测同一天之内的每小时生长于槐树林与灌木丛的扁担杆之间的大气相对湿度、近地面 1 m 处温度。

1.2.3 花粉与柱头的生物学观察

用 TTC 法检测花粉活力,柱头可授性测定采用联苯胺-过氧化氢法^[1]。用苏丹 III 染液与 IKI 溶液鉴定扁担杆花粉粒是否含脂性。

1.2.4 传粉媒介的检验,访花者及访问频率观察

在扁担杆的盛花期,选择槐树林样地内相隔 1 m 的同一植株内 5 个花序,观察其访花者的种类、访花行为、频率,并拍照记录其访花行为,同时记录实验样地的温湿度。

比较不同生境之间访花者物种多样性。采用 α 多样性指数(α 多样性主要关注局域均匀生境)对不同林型之间访花昆虫物种之间的多样性进行比较,此处我们选用辛普森指数和香农维纳指数^[8]。

辛普森指数(Simpson's diversity index)

$$D = 1 - \sum (N_i/N)^2,$$

香农维纳指数(Shannon's Diversity Index)

$$H' = - \sum (P_i \ln P_i),$$

式中: $P_i = N_i/N$, N 表示观察到的个体数目; P_i 为群落中种 i 的个体在全部个体中的比例; N_i 为第 i 种个体数。

1.2.5 繁育系统检测

依据 Cruden(1977)^[9] 的标准来评估 P/O,

对野生种群中扁担杆前开花过程和开花直径进行观察测量,根据 Dafni(1992)^[10] 的标准判断其杂交指数。

对扁担杆进行套袋实验验证繁育系统,包括如下处理:(1) 自然状态下花朵自然授粉检测自然条件下的坐果率;(2) 开花前不去雄,套袋检测是否需要传粉者;(3) 去雄,不套袋,自然授粉;(4) 去雄,套袋,检测是否存在无融合生殖。雌花、雄花、两性花选取 30 朵单花进行处理,之后累计观察 60 天左右,记录座果率并检测其繁育系统类型。

2 结果与分析

2.1 开花动态及花部数量性状观测

据调查,烟台地区的扁担杆开花时间为 6 月 27 日至 8 月中旬,存在两性花和单性花,种群花期持续 50~55 d,单花花期 5 d,聚伞花序,花被片 5,雄花与两性花雄蕊数枚,一个花序上有 7~10 朵花。雌花雌蕊单枚,雄蕊退化,一个花序上有 15~20 朵花,花朵直径较小(见表 1)。

表 1 扁担杆花朵的某些数量性状

Tab.1 Some quantitative traits of *Grewia biloba*

项目	扁担杆雌花 /mm	扁担杆两性花 /mm	扁担杆雄花 /mm
花朵直径	7.69±0.48	14.62±1.11	15.21±0.44
花高度	9.51±0.86	13.52±0.42	13.79±0.37
花丝长度	0	4.19±0.18	5.38±0.08
柱头直径	0.92±0.11	0.65±0.06	0.37±0.04
花柱长度	1.70±0.14	4.49±0.35	3.02±0.20

根据花开顺序及花部状态,可将扁担杆两性花和雄花花开进程分为 4 个时期,分别是花蕾期、初开期、盛花期、凋落期。由花蕾至开花阶段,蕾期花药紧紧相聚,花丝不分散,花柱小而短,花梗伸长花蕾膨大;花朵开放瞬间,先绽开一片花被片,其余花被片陆续全部开放;初开期:花被片微展,花丝微散(与花柱的夹角 $<30^\circ$),花柱伸长,慢慢高于雄蕊,花药饱满而鲜艳;盛花期:花丝排列比较分散杂乱,花粉开始散粉,柱头上端开始由淡绿色变成红褐色;花朵萎蔫期:花瓣残败且卷曲,花药干瘪大都完成散粉,柱头颜色开始加深;凋落期:花丝与花瓣陆续凋落。雌性植株相比两性花和雄花来说,花的直径略小一些,初开期:花被片

微展开 柱头呈现嫩绿色; 盛花期: 花被片平展 柱头伸长; 花朵萎蔫期: 花被片卷曲 柱头变褐色且干枯。

2.2 生长于不同生境之间的扁担杆物候期及访花者物种多样性的对比

在同一时间里, 灌木丛内扁担杆着生处与槐树林内扁担杆着生处存在差异(见图 1), 灌木丛平均温度较槐树林高 1~2℃, 平均湿度低 2%左

右, 灌木丛内的扁担杆花期都要比槐树林内的扁担杆花期提前(表 2), 而槐树林内扁担杆的单花花期比灌木丛长 2 d 左右, 但槐树林内的种群花期大概在 36~40 d, 而灌木丛内种群花期为 20 d; 灌木丛内大部分为草本植物, 而槐树林内植株茂密且大都为高大乔木, 故存在一定遮阴现象, 一方面植物可以蒸发水分提高周边环境空气湿度, 另一方面又可以吸收太阳光能量降低周边环境温度。

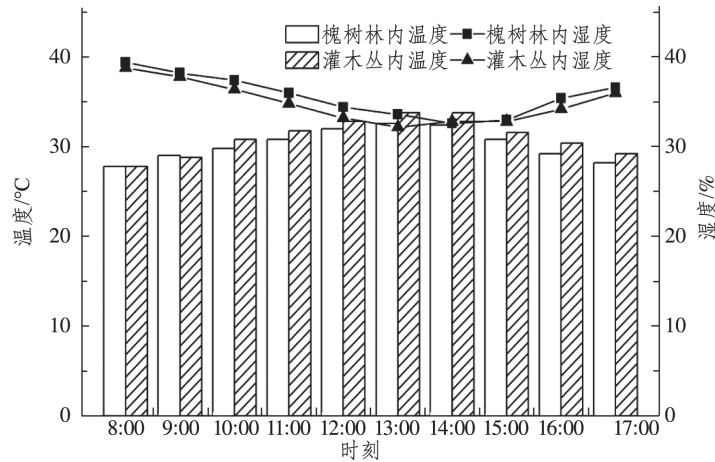


图 1 不同林型日间温湿度

Fig.1 Daytime temperature and humidity of different forest types

表 2 灌木丛内与槐树林下扁担杆的花期物候比较

Tab.2 Comparison of the flowering phenology of the *Grewia biloba* in the bushes and under the locust trees

项目	槐树林	灌木丛内
始花期	7月5日—7月9日	6月25日—6月28日
盛花期	7月13日—7月16日	6月30日—7月1日
末花期	8月中旬	7月15日—7月17日
单花花期	7 d 左右	5 d 左右
种群花期	36~40 d	20 d

2.3 花粉与柱头的生物学检测

不同时期不同性别的扁担杆花粉活力的表现不同, 单性花与两性花花粉活力大体趋势都呈现先

升高后降低的趋势(表 3)。从花蕾期到凋落期, 雄花花粉初开期花粉活力高于 85%, 花蕾期与初开期花粉活力差异显著 ($p < 0.05$), 花朵盛开期与花朵凋落期的花粉活力差异不显著 ($p > 0.05$)。

对两性花, 总体花粉活力显示出要弱于雄性花, 初开期的花粉活力最高, 花蕾期与初开期的花粉活力差异显著 ($p < 0.05$), 盛开期与初开期之间差异显著 ($p < 0.05$), 盛开期与凋落期之间花粉活力差异不显著 ($p > 0.05$), 花粉与苏丹 III 发生阳性反应, 呈现橘红色, 则扁担杆花粉粒属于含脂型, 在不同温度梯度下进行花粉萌发, 花粉萌发率详见表 4。

表 3 扁担杆雌花、两性花、雄花的花粉活力与柱头可授性

Tab.3 Pollen vitality and stigma acceptability of female flowers, bisexual flowers and male flowers

花期	扁担杆雌花		扁担杆雄花		扁担杆两性花	
	花粉活力 / %	柱头可授性	花粉活力 / %	柱头可授性	花粉活力 / %	柱头可授性
蕾期	*	+	69.04% ± 14.88%	-	30.82% ± 9.62%	+ / -
初开期	*	++	92.34% ± 1.77%	-	72.62% ± 8.76%	+
盛开期	*	+++	73.82% ± 5.02%	-	51.48% ± 10.29%	+
凋落期	*	+ / -	71.27% ± 5.61%	-	50.99% ± 7.16%	+

注: M 为平均值; SD 为标准差 “-” 不具有可授性 “+ / -” 部分柱头具有可授性 “+” 柱头具有可授性 “*” 无法操作。

表 4 室温下扁担杆花粉萌发率
Tab.4 Germination ratio of pollens of *Grewia biloba* at room temperature

花期	雄株	两性株
蕾期	12.4%±3.55%	10.99%±3.08%
初开期	17.97%±4.72%	12.34%±4.57%
盛开期	20%±3.85%	19.26%±8.25%
凋落期	11.45%±3.42%	9.14%±2.39%

注: M 为平均值; SD 为标准差

扁担杆雄花柱头无过氧化物酶活性(表 3), 而雌花和两性花在开花当天柱头就拥有过氧化物酶活性。雌花的柱头在花朵开放当日呈绿色, 后变成棕褐色, 此时可授性极差或不具有柱头可授性。两性花的柱头在花朵初开期变为红褐色, 此

时柱头过氧化物酶活性极强, 后逐渐减弱, 但在花朵凋落期柱头仍然具有可授性。

2.4 传粉媒介的检验, 访花频率

访花者访花行为受环境温度的影响, 不同性别的扁担杆植株的访花频率存在差异。雄株与两性株两者之间区别不明显(图 2), 总体呈现出先增高, 后降低的趋势; 访花高峰发生在 8:30—9:15, 此时温度在 29~30℃ 之间, 湿度 31% 左右, 访花频率最低则出现在 12:00—14:00, 在午间温度达到一天之内顶峰, 水分散失, 湿度降低; 而在 15:30—16:15, 温度有所降低, 访花昆虫出现次数增多。

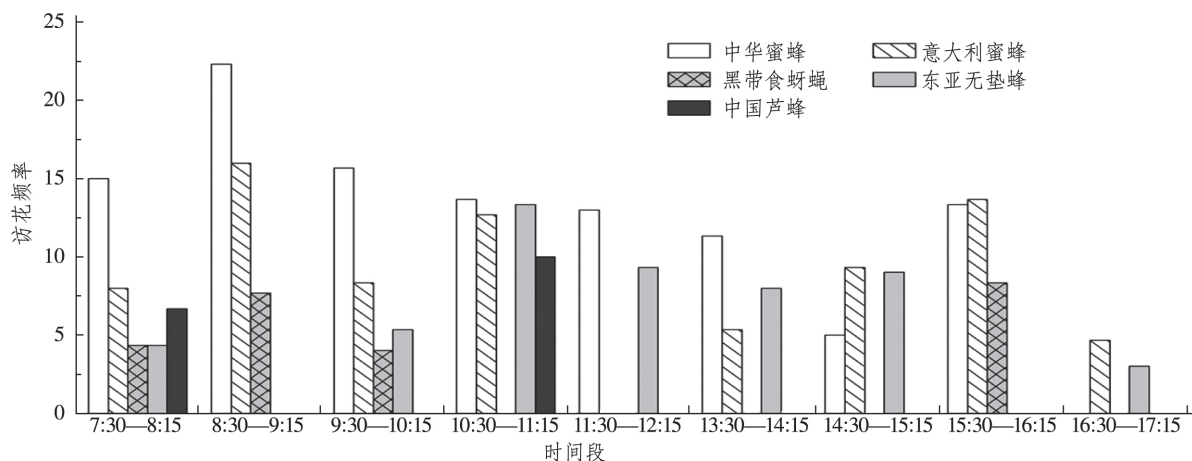


图 2 两性花日间访花者访花频率

Fig.2 Visiting frequency of daytime visitors for bisexual flower

扁担杆的传粉者有中华蜜蜂、意大利蜜蜂、黑带食蚜蝇等, 其中中华蜜蜂是主要的传粉者, 在 24 h 内观察到的访问频率最高, 其访问时间大多数在 16:00 之前。中华蜜蜂开始活动, 停留在扁担杆花丝上, 合抱花蕊, 花粉散粉后易沾到蜜蜂胸腹部, 蜜蜂会访问一朵花序中半数以上的已开花朵, 蜜蜂单次停留时间为 1~3 s, 在不同花朵间四处走动, 吸取基部花蜜, 吸取花蜜时头部、腹部和足在花药与柱头间摩擦完成授粉。相比较之下食蚜蝇类则表现为访问次数少但停留时间长, 几乎舔舐了整个花序上的所有花。东亚无垫蜂也是扁担杆的访花者, 多集中在上午, 且访花次数比较少。芦蜂是扁担杆雌花的优势访花者, 雌花既没有丰富的花蜜也没有鲜艳的颜色, 这可能与该蜂偏向于访问此种花朵有关。

本研究内的 Shannon-wiener 多样性指数显示(表 5) 槐树林>灌木丛, 槐树林内扁担杆的访花

昆虫物种较灌木丛内的略丰富, 辛普森多样性指数则显示灌木丛>槐树林, 灌木丛内昆虫访问频率较槐树林内更平均。

表 5 不同生境内生长的扁担杆访花者物种多样性指数
Tab.5 Species diversity index of pollen flower visitors in different habitats

不同生境	Shannon-wiener	Simpson
槐树林内	2.106	0.776
灌木丛内	1.989	0.856

2.5 繁育系统与去雄套袋实验

扁担杆雄花与两性花有雄蕊多枚, 花粉量大, 每朵花可提供 238 387~406 613 粒花粉, 胚珠 4 个, 两性花 P/O 为 59 596.75~101 653.25, 雌花 P/O 为 0, 雄花花粉 P/O 无穷大, 繁育系统为专性异交。根据花冠直径及相关的测量结果, 计算得扁担杆两性花雌花雄花的 OCI 值均为 4, 依据

Dafni(1992)的标准,扁担杆的繁育系统为异交,部分自交亲和,需要传粉者。

经套袋实验检测(表6),扁担杆去雄后套袋,均无座果,说明均不存在无融合生殖现象,扁担杆雄花只起到提供花粉的作用,雌花套袋后无座果,说明植株座果需要传粉者,扁担杆雌花的自然座果率最高能达到50%左右,扁担杆两性株套袋不去雄座果率在18.5%,说明存在自交亲和现象,但仍需要传粉者,传粉者的存在提高了座果率。

表6 不同处理下扁担杆的座果率
Tab.6 Fruit setting rate of *Grewia biloba*
under different treatments

处理方法	扁担杆雌花	扁担杆两性花	扁担杆雄花
自由传粉	39±12%	27±1%	0
去雄不套袋,自由传粉	30.9±7.4%	18±5%	0
去雄套袋,不人工授粉	0	0	0
套袋,不去雄	0	18.5±12.4%	0

注: M 为数据平均值; SD 为标准差

3 讨论

开花与传粉是植物生长发育过程中的关键环节,在不同地区生长的同种植物在开花物候与传粉者之间具有差异,陈敏等^[11]发现烟台与黑河地区生长的中国柽柳由于生境的不同而产生繁殖行为与传粉策略的巨大差异。而在本研究中通过对比同一地区内的槐树林与灌木丛内生长的扁担杆,发现槐树林内乔木居多,灌木丛内草本植物居多,乔木蒸腾作用要远远大于灌木,良好的蒸腾作用会使周围的环境湿度增加,温度降低,灌木丛内开花时间早于槐树林内生长的扁担杆,这与张玲等^[12]认为温度升高,植物开花物候期提前结论相一致。不同生境下植物有自身的适应调节机制,如北黄花菜开花物候对天气变化影响作出相应的响应^[13]。侯勤正等^[14]认为,生境差异会对湿生扁蕾繁殖投资和生活史策略造成显著影响,本研究中气候影响着蜜源植物的花期进而影响访花昆虫的多样性,故会产生在不同生境下同种植物的物候期及访花昆虫多样性表现不同。

雌花和两性花的柱头自开花当日就具备了柱头可授性,这些花部开放特征都大大增加了花粉与柱头结合的可能性,不同植物的柱头拥有可授性的时间也不同,宁夏枸杞在花药尚未开裂时就具备了柱头可授性,表现为雌蕊先熟^[15],花粉具有活力,柱头接受花粉成功,这标志植物有性生殖

器官发育成熟并且开始进行有性繁殖^[16]。两性花既可以提供花粉,又可以接受花粉从而座果,雌花花柱有4个分枝,完全伸展且裸露,在两性花中花柱略低于花丝,雌花的柱头直径大于两性花的柱头直径,这一性征增大了雌花接受异株花粉的范围,前人研究表明柱头面积大有利于结实^[17]。传粉是花粉从花药到柱头的转移过程,是植物有性生殖的关键步骤,该花传粉系统由三个部分组成,即花粉、柱头与传粉媒介。高等植物固着生长的特性使得他们不能主动的去寻找配偶,而必须依靠“中间媒介”来传递花粉,动物传粉者与植物互相供给^[18],花粉和花蜜是植物提供给访花者的“薪酬”^[19],蜜蜂从花的花蜜和花粉中获得糖、氨基酸、脂质、维生素和矿物质,以满足其生命需要^[20-23],实现两性配子的融合。

扁担杆的花粉量多而带有粘性,且柱头四裂,加大了成功授粉的可能,对传粉媒介授粉过程具有较大的适应性,有研究表明植物物种经常被多种授粉媒介授粉,但黄双全课题组首次揭示了传粉者混访异种花粉落置之间存在着负相关关系,这是共存的开花植物之间具有降低异种花粉传递的适应策略。同域开花的植物,只有花部结构能限制异种花粉落置的(即接受较少异种花粉的植物,才能在自然选择时容忍较为频繁的传粉者混访^[24]。植物自身拥有适应环境的自我调节机制,如外来入侵植物意大利苍耳的长花期,高的花粉活力和极强的柱头可授性及混合交配系统均是其高效入侵的保障^[25]。一般来说雄性花和两性花为传粉者提供了花粉和花蜜,因而吸引了众多传粉者,但大量的雌花集中开放也能通过开花数目的改变来吸引传粉者。昆虫自身的认知行为生态学、花部特征及访花酬劳等因素影响昆虫的访花行为^[26]。对访花昆虫来说要想找到合适的宿主植物就要动用自身的感觉器官,而即使是同一种植物,对不同昆虫的吸引程度也不尽相同,因为不同的昆虫具有不同的感觉机制,从而导致了不同的感觉敏感程度^[27]。

利用间接的方法估算扁担杆的繁育系统,我们经常用到的就是 P/O 和 OCI 指数,花粉胚珠比显示该花专性异交。而 OCI=4,表现为以异交为主,部分自交亲和,需要传粉者。这与我们的去雄套袋实验所检测的结果相一致,扁担杆无融合生殖现象。自然界中的繁育系统各种各样,前人的研究早已表明,经过对不同植物的繁育系统进行

分析并发现,只存在自交或杂交的物种是非常少的,大部分是自交与杂交结合的混合交配,保障植物有性生殖顺利进行。

参考文献:

- [1] DAFNI A. Pollination ecology: a practical approach [J]. *Brittonia*, 1994, 46(2): 155-156.
- [2] ZAIDI M A, CROW S A. Biologically active traditional medicinal herbs from Balochistan, Pakistan [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2005, 96(1/2): 331-334.
- [3] 刘建群, 吴继梅, 张锐. 扁担杆化学成分体外抑菌活性研究 [J]. *江西中医学院学报*, 2009, 21(2): 75-76.
- [4] 何春霞, 张劲松, 孟平, 等. 太行山南麓 3 种常见灌木的水分利用特性 [J]. *林业科学*, 2018, 54(9): 137-146.
- [5] 孙守家, 孟平, 张劲松, 等. 太行山南麓山区栓皮栎-扁担杆生态系统水分利用策略 [J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6317-6325.
- [6] 赵娜, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 北京松山自然保护区典型植物群落物种多样性研究 [J]. *西北植物学报*, 2018, 38(11): 2120-2128.
- [7] 何春霞, 张劲松, 孟平, 等. 太行山南麓 3 种常见灌木的水分利用特性 [J]. *林业科学*, 2018, 54(9): 137-14.
- [8] 吴坤君, 龚佩瑜, 盛承发. 昆虫多样性参数的测定和表达 [J]. *昆虫知识*, 2005, 42(3): 338-340.
- [9] CRUDEN R W. Pollen-ovule ratio: a conservation indicator of breeding systems in flowering plants [J]. *Evolution*, 1977, 31: 32-46.
- [10] DAFNI A. *Pollination ecology* [M]. New York: Oxford University Press, 1992.
- [11] 陈敏, 刘林德, 张莉, 等. 黑河中游和烟台海滨中国柽柳的传粉生态学研究 [J]. *植物学报*, 2012, 47(3): 264-270.
- [12] 张玲, 杨明凤, 刘勇, 等. 石河子春季温度变化对蟠桃花期的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2019(12): 42-45.
- [13] 孙颖, 刘松, 李梦雨, 等. 北黄花菜的开花物候及传粉特性研究 [J]. *广西植物*, 2020, 40(8): 13-20.
- [14] 侯勤正, 叶广继, 马小兵, 等. 青藏高原不同生境下湿生扁蕾 (*Gentianopsis paludosa*) 个体大小依赖的繁殖分配 [J]. *生态学报*, 2016(9): 2686-2694.
- [15] 王兵, 焦恩宁, 秦垦, 等. 宁夏枸杞传粉生态学初步研究 [J]. *西北植物学报*, 2010, 30(1): 68-77.
- [16] CRAWFORD B C W, YANOFSKY M F. The formation and function of the female reproductive tract in flowering plants [J]. *Current Biology*, 2008, 18(20): 972-978.
- [17] 叶要妹, 张俊卫, 齐迎春, 等. 百日草柱头可授性和花粉生活力的研究 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2376-2381.
- [18] IRWIN R E. Pollination biology—linking botany and zoology [J]. *Ecology*, 2002, 83(4): 1168-1169.
- [19] NICOLSON S W. Bee food: the chemistry and nutritional value of nectar, pollen and mixtures of the two [J]. *African Zoology*, 2011, 46(2): 197-204.
- [20] STABLER D, PAOLI P P, NICOLSON S W, et al. Nutrient balancing of the adult worker bumblebee (*Bombus terrestris*) depends on the dietary source of essential amino acids [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2015, 218(5): 793-802.
- [21] 黄双全, 郭友好. 传粉生物学的研究进展 [J]. *科学通报*, 2000, 45(3): 225-237.
- [22] 钦俊德. *昆虫与植物的关系* [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [23] ZHANG D Y. *Plant life history evolution and reproductive ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 97-164 + 258-279.
- [24] FAN Q, FANG, HUANG S Q. A directed network analysis of heterospecific pollen transfer in a biodiverse community [J]. *Ecology*, 2013, 94(5): 1176-85.
- [25] 林慧, 张明莉, 王鹏鹏, 等. 外来入侵植物意大利苍耳的传粉生态学特性 [J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1810-1816.
- [26] SMITHSON A. Cognitive Ecology of pollination: pollinator preference, frequency dependence, and floral evolution [J]. *Ethology*, 2001, 83(3): 287-288.
- [27] DOTTER L S, VERECCEN N J. The chemical ecology and evolution of bee-flower interactions: a review and perspectives [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2010, 88(7): 668-697.

Ecological Characteristics of Pollination of Medicinal Plant *Grewia biloba*

ZHANG Xiaohan¹, LIU Linde¹, ZHANG Li¹, HU Dechang², LIU Zhihao², KONG Xianhai²

(1.School of Life Sciences ,Ludong University ,Yantai 264025 ,China;

2.Three Dimensional Geotechnical Engineering Co. ,Ltd. ,Yantai 264001 ,China)

Abstract: The flowering phenology ,pollen viability ,stigma receptivity ,breeding system ,behavior of flower-visiting insects and frequency of *Grewia biloba* were undertaken positioning observation ,to reveal the sexual pollination mechanism of *Grewia biloba* and provide reference for the protection of germplasm resources of *Grewia biloba*.The results showed that the *Grewia biloba* had a flowering period of 5 days for a single flower.The flowering period of the population was around 50~55 d.Pollen vitality showed a trend of first increased and then decreased from the bud stage ,to the initial blooming stage (the angle between the petals and the stigma<30°) ,the blooming stage (the petals and the stigma angle $\geq 90^\circ$) and the withering stage.The male flowers reached $92.34\% \pm 1.77\%$ at the initial blooming stage ,the bisexual flowers were $72.62\% \pm 8.76\%$,and the stigma was the strongest at this time.The stigmas of bisexual flowers and female flowers have peroxidase activity on the day of flowering ,and the stigmas are discshaped with four lobes ,which increased the possibility of receiving pollen; the ratio of pollen ovules of hermaphrodite flowers was 59 596.75 ~ 101 653.25.*Grewia biloba* is mainly outcrossed and need to be pollinated ,and self-crossing also existed ,and the natural fruit setting rate in bisexual flowers was $27 \pm 1\%$; *Apis cerana* ,*Apis mellifera ligustica* ,and *Ceratina chinensis* were the most common flower visitors to the *Grewia biloba*.The frequency of insects visiting female flowers was slightly lower than that of male flowers and bisexual flowers.Around this period ,the number of visits to female flowers by Chinese reed bees was significantly higher than the other two flowers in terms of the *Grewia biloba* grew in different habitats.The number of flower-visiting insects on the *Grewia biloba* in the locust forest is abundant ,but the frequency of visiting flowers was extremely uneven ,and the visiting frequency of the flower-visiting insects in the bushes had a relatively high degree of uniformity.In summary ,*Grewia biloba* had a large amount of pollen and high pollen vigor ,and it had strong stigma receptivity.Pollen vigor and stigma receptivity reached the peak in the same period ,which can ensure efficient pollination.The visiting behavior of flower visitor is compatible with the flower structure and the surrounding habitat.*Grewia biloba* is a kind of plant with main outcrossing ,and the combination of self-crossing and outcrossing.

Keywords: *Grewia biloba*; pollen vitality; stigma pollination; breeding system; pollinator

(责任编辑 李维卫)