

中华蜜蜂对白三叶的访花行为 及授粉效果研究*

陈志敏^{1**} 朱欣³ 常志敏² 陈祥盛² 周正湘⁵
樊莹⁴ 张茂¹ 潘成涛¹ 龙见坤^{2***}

(1. 贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学昆虫资源开发利用省级特色重点实验室,
昆虫研究所, 贵阳 550025; 3. 贵州省草地技术试验推广站, 贵阳 550001;
4. 贵州省畜禽遗传资源管理站, 贵阳 550001; 5. 安顺学院, 安顺 561000)

摘要 【目的】为明确我国本土优势蜂种中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* Fabricius 对白三叶的访花行为和授粉效果。【方法】2021年5月, 利用中华蜜蜂为白三叶授粉, 采用随机区组设计, 共设置了完全授粉、不授粉、初花期授粉、盛花期授粉及末花期授粉5个处理, 观察蜜蜂的访花行为和规律, 并分析蜜蜂授粉对白三叶产量相关性状的影响。【结果】中华蜜蜂在不同时间段授粉, 其访花行为均不相同。中华蜜蜂的单花滞留时间和访花转移次数在初花期的10:00-12:00和末花期的13:00-15:00最多, 盛花期则与此相反; 其花序采粉、蜜次数和访花速率在初花期的16:00-18:00最高, 盛花期和末花期的最大值出现在13:00-15:00。中华蜜蜂访花转移次数、花序采粉、蜜次数和访花速率的值均在盛花期最高, 而单花滞留时间、花序访问时间在盛花期最短, 且在盛花期与末花期存在显著性的差异 ($P < 0.05$)。相关分析结果表明, 访花速率与单花停滞时间呈不显著负相关关系 ($P > 0.05$), 与花序访问时间呈不显著正相关关系 ($P > 0.05$)、与花序采粉和蜜次数 ($P < 0.01$) 呈极显著正相关关系; 白三叶产量相关性状中产花密度、种子数以及荚果数在全花期授粉与盛花期最高, 分别为 (286.67 ± 8.11) 个、(4.65 ± 0.20) 粒和 (66.7 ± 3.93) 个; 在不授粉的情况下最低, 分别为 (273.33 ± 5.81) 个、(4.21 ± 0.10) 粒和 (38.00 ± 2.93) 个。【结论】中华蜜蜂对白三叶盛花期的访花最活跃; 完全授粉和盛花期授粉条件下能较好提高白三叶的花密度、花序花朵数、单序荚果数和种子数。

关键词 中华蜜蜂; 授粉; 访花行为; 白三叶; 产量相关要素

Flower-visiting behavior and pollination of white clover by *Apis cerana cerana*

CHEN Zhi-Min^{1**} ZHU Xin³ CHANG Zhi-Min² CHEN Xiang-Sheng²
ZHOU Zheng-Xiang⁵ FAN Ying⁴ ZHANG Mao¹ PAN Cheng-Tao¹ LONG Jian-Kun^{2***}

(1. College of Animal Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Entomology of Guizhou University,
Special Key Laboratory for Development and Utilization of Insect Resources of Guizhou, Guiyang 550025, China;
3. Guizhou Grassland Technology Extending Station, Guiyang 550001, China; 4. Guizhou Animal Genetic Resources
Management Station, Guiyang 550001, China; 5. Anshun University, Anshun, 561000, China)

Abstract 【Objectives】To quantify the flower visiting behavior and pollination of white clover, *Trifolium repens*, by the dominant native bee species in China (*Apis cerana cerana*). 【Methods】Visits by *A. cerana cerana* to white clover flowers were observed and recorded in May 2021 and the relationship between visits and flower density, seed number and pod number

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (31601886); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2019] 2295); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础 [2018] 1031; 黔科合基础 [2018] 1032); 贵州大学引进人才科研项目 (贵大人基合字 [2017] 18); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台人才 [2017] 5788); 安顺学院博士基金项目 (Asxybsjj[202002])

**第一作者 First author, E-mail: zm525_x@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: longjiankun123@163.com

收稿日期 Received: 2022-01-06; 接受日期 Accepted: 2022-03-16

was analyzed. **[Results]** Flower visiting behavior and pollination differed at different times of the day. The retention time of a single flower and the transfer time between flowers was highest between 10:00 and 12:00 at the beginning of flowering and between 13:00 and 15:00 at the end of flowering, but the reverse was true during the full flowering period. The amount of pollen and honey collected, and flower visiting rates per inflorescence, were highest from 16:00 to 18:00 in the initial flowering stage, and from 13:00 to 15:00 in the full and the final flowering stages. The transfer time between flowers, the amount of time spent collecting pollen and honey and the visiting rate, were highest in the full flowering stage, whereas the retention time of a single flower and visiting time between inflorescences were shortest in the full flowering stage; there were significant differences between the full and the final flowering stages ($P < 0.05$). There was no significant negative correlation between flower visiting rate and single flower stagnation time ($P > 0.05$), nor was there a significant positive correlation with inflorescence visiting time ($P > 0.05$), but there was a very significant positive correlation between inflorescence pollination and honey collection time ($P < 0.01$). Flower density, seed number and pod number were highest during the full flowering stage; $(286.67 \pm 8.11) \text{ ind.}$, $(4.65 \pm 0.20) \text{ grain}$ and $(66.70 \pm 3.93) \text{ ind.}$, respectively, and lowest without pollination; $(273.33 \pm 5.81) \text{ ind.}$, $(4.21 \pm 0.10) \text{ grain}$ and $(38.00 \pm 2.93) \text{ ind.}$, respectively. **[Conclusion]** Most visits by *A. cerana cerana* to white clover flowers occurred during the full flowering stage. The flower density, number of inflorescences per flower, pod number and seed number, were all increased by complete pollination during the full flowering stage.

Key words Chinese bee; pollination; flower visiting behavior; *trifolium repens*; yield-related factors

白三叶 *Trifolium repens* 是一种优良的豆科牧草, 其适口性极好, 营养价值高, 根系发达, 其根系与固氮菌共生具有较好地固氮功能, 在饲用、绿化、水土保持等方面具有较高的应用价值(王文, 2021; 王肇钧等, 2022)。随着畜牧业的发展和生态环境保护意识的增强, 白三叶在农林业以及生态保护等方面的应用受到人们广泛关注, 其种子需求量逐年增加(Rasmussen *et al.*, 2010; 李佩洪, 2021)。目前, 主要通过种植管理(灌溉、栽培、施肥)来增加白三叶种子产量(Antonín *et al.*, 2021; Katharina *et al.*, 2021), 以满足市场需求, 但增产效果有限, 且存在生产成本低、耗时、低效及未能物尽其用等问题。不能自行授粉是影响白三叶种子产量的主要原因, 因此需要依靠风媒或虫媒传粉来保障其种子的产量和质量(Goodman 和周自玮, 1997)。

据统计, 过去几十年里中国农业对传粉昆虫的依赖度越来越高, 2010 年昆虫传粉产生的经济价值占中国农业总产值的 19.2%, 预计 2020 年中国农业昆虫传粉产生的经济价值将超过 2 万亿人民币(Shibonage *et al.*, 2021)。在全球范围内, 蜜蜂作为传粉昆虫得到了最为广泛的应用。蜜蜂访花时通过一系列行为(如访花速率、振翅频率及访花时间等)影响植物的生长、产量和品质(钦俊德和王琛柱, 2001; 韩胜明等, 2020; Gagic *et al.*, 2021)。研究表明蜜蜂授粉对瓜果蔬

菜、牧草和油料作物等的产量、品质有明显提高作用(Perrot *et al.*, 2018)。郭媛等(2017)利用西方蜜蜂 *Apis mellifera* Linnaeus 和地熊蜂 *Bombus terrestris* 为紫花苜蓿授粉明显提高了苜蓿产量。国外研究者利用本地蜂种苜蓿切叶蜂为白三叶授粉, 使白三叶种子产量提高了 39 g/m^2 (Goodman 和周自玮, 1997; Goodwin *et al.*, 2011; Richards, 2016)。中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* Fabricius 是我国本土蜂种的优势种群, 几千年来为我国人民提供了丰富的蜂产品的同时也为我国的农业发展做出了重要贡献(李春雨和王星, 2021)。目前, 有关中华蜜蜂对白三叶的授粉研究较少(张拱辰, 1987), 在不同花期的授粉行为以及对产量相关性状的影响更是鲜见报道。因此, 为进一步探究中华蜜蜂的访花行为和对白三叶的授粉效果, 开展不同花期和不同授粉条件下中华蜜蜂的访花行为和对白三叶的产量相关性状的影响研究, 将为我国本土授粉昆虫资源的开发与利用和白三叶种子增产提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

贵州省草地技术推广站独山基地位于独山县(N $25^{\circ}04' - 25^{\circ}31'$, E $107^{\circ}41' - 107^{\circ}55'$), 是中

国南方畜牧业重点县之一,地处贵州最南端,与广西壮族自治区接壤。地处云贵高原,平均海拔较周边地区高出 300-500 m。最低海拔 500 m,最高海拔为 1 465 m,平均海拔 850-1 100 m 之间。属中亚热带湿润季风性气候,四季分明,冬无严寒、夏无酷暑,年平均气温 15 ℃,极端最高气温 35.5 ℃,极端最低气温零下 4.0 ℃,年降雨量为 1 429.9 mm,无霜期 297 d。

1.2 试验设计

在贵州省草地技术推广站独山基地的种质资源圃圃,选取 VNS 白三叶品种为研究对象,于 2020 年 11 月播种,次年花期利用本土养殖的中华蜜蜂对其进行授粉试验。试验设置完全授粉,即全花期授粉(简称 CP)、初花期授粉(简称 IFP)、盛花期授粉(简称 FFP)、末花期授粉(简称 FWPP)和不授粉(简称 NP)5 个处理,采用随机区组排列试验小区,每个处理进行 3 次重复试验。5 个处理均以搭建隔离棚(棚布用 60 目白色防虫网代替)进行隔离控制,试验均在 5 月份的晴天(10:00-18:00)进行(何亚平和刘建全,2004)。

1.3 访花行为测定

1.3.1 单花滞留时间(简称 SFRT) 每天 10:00-12:00、13:00-15:00 和 16:00-18:00 对每个处理中的中华蜜蜂进行单花滞留观测,利用秒表与计时器记录中华蜜蜂访花时在一朵花上的滞留时间,每个时间段中每隔 1 h 记录一次,共记录 3 次,每次记录 3 头,共 9 头,取均值。

1.3.2 中华蜜蜂访花转移次数(简称 NFVCB) 分别于 10:00-12:00、13:00-15:00 和 16:00-18:00 对每个处理中的中华蜜蜂进行访花转移情况观测,利用秒表与计时器记录 1 min 内中华蜜蜂访花过程中从同一朵花序中的一朵小花转移到另一朵小花的转移次数,每个时间段中每隔 1 h 记录一次,共记录 3 次,每次记录 3 头,共 9 头,取均值。

1.3.3 花序采粉和蜜次数(简称 NPNCI) 分别于 10:00-12:00、13:00-15:00 和 16:00-18:00 3 个时间段利用秒表与计时器记录 1 min 内中华

蜜蜂在花序上访花时头部伸入花中采蜜或采粉的次数,每个时间段中每隔 1 h 记录一次,共记录 3 次,每次记录 3 头,共 9 头,取均值。

1.3.4 访花速率(简称 VR) 分别于 10:00-12:00、13:00-15:00 和 16:00-18:00 3 个时间段利用秒表与计时器记录 1 min 内中华蜜蜂访问的花朵数,每个时间段中每隔 1 h 记录一次,共记录 3 次,每次记录 3 头,共 9 头,取均值;

1.3.5 花序访问时间(简称 IVT) 分别于 10:00-12:00、13:00-15 和 16:00-18:00 3 个时间段利用秒表与计时器记录中华蜜蜂在一个花序上访花时所需要的时间,每个时间段中每隔 1 h 记录一次,共记录 3 次,每次记录 3 头,共 9 头,取均值。

1.4 白三叶相关指标测定

1.4.1 产花密度 采用随机法以 1 m×1 m 的样方分别对 5 个处理的花序数量(含已凋谢的花序数)进行统计,每个处理 3 个重复,取均值。

1.4.2 花序花朵数 分别对 5 个处理的单个花序上的花朵数进行随机取样统计,每个处理 3 个重复,每个重复随机统计 10 个花序,取均值。

1.4.3 单序荚果数 在试验结束后的晚熟期,分别对 5 个处理单个花序上的结荚数进行统计,每个处理 3 个重复,每个重复随机统计 10 个花序,取均值。

1.4.4 种子数 在试验结束后的晚熟期,各分别对 5 个处理中单一荚果内的种子数量进行统计,每个处理 3 个重复,每个重复随机统计 50 个荚果,取均值。

2 结果与分析

2.1 中华蜜蜂对白三叶的访花行为和访花规律

2.1.1 中华蜜蜂对白三叶的访花行为 中华蜜蜂在 3 个时间段(10:00-12:00、13:00-15:00 和 16:00-18:00)内初花期的单花滞留时间(图 1: A)在 10:00-18:00 随着时间的推移而逐渐减短,但 3 个时间段内的单花滞留时间差异不显著($P>0.05$);在盛花期时单花滞留时间,在 1 d 中随着时间的推移逐渐延长,且在 10:00-12:00 的

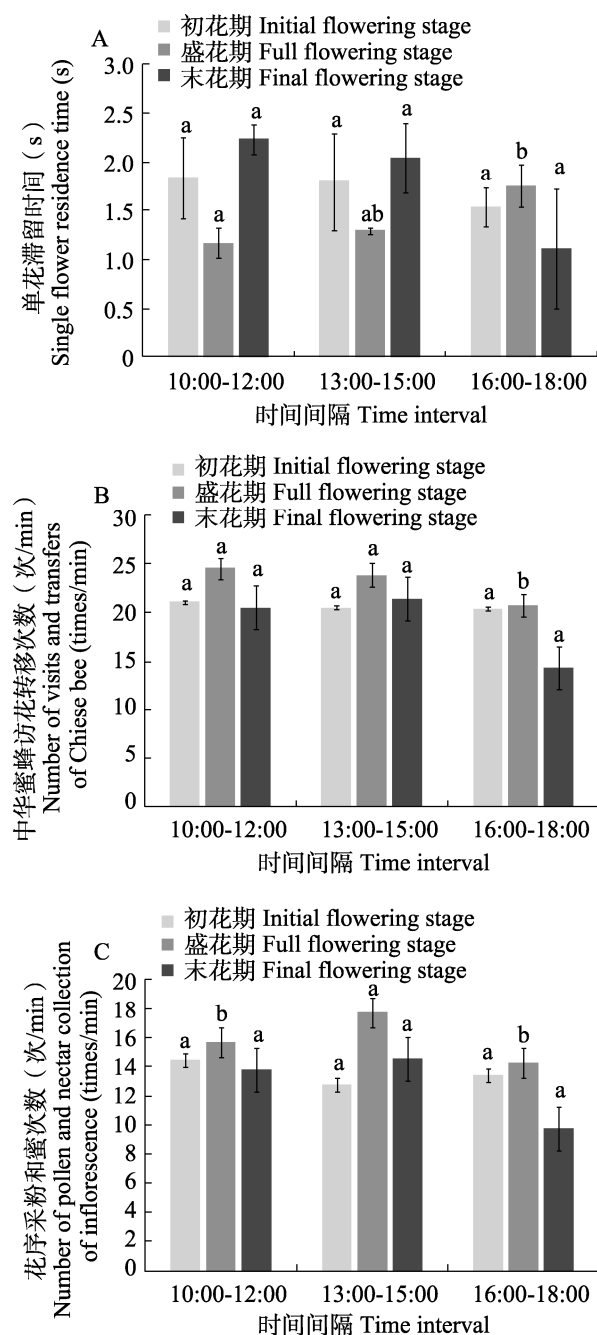


图 1 中华蜜蜂对白三叶访花行为变化

Fig. 1 The dynamic changes of Chinese honeybee's visiting behavior on white clover

A. 单花滞留时间; B. 中华蜜蜂访花转移次数;

C. 花序采粉和蜜次数。

柱上标有不同的小写字母表示差异显著

($P < 0.05$, F -test 检验)。图 2 同。

A. Single flower residence time; B. Number of visits and transfers of Chinese bee; C. Number of pollen and nectar collection of inflorescence. Histograms with different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level by F -test. The same as Fig. 2.

单花滞留时间与其他 2 个时间段存在显著性差异 ($P < 0.05$); 末花期的单花滞留时间与前面两个花期有所不同, 10:00-15:00 时间段逐渐增加, 16:00 后逐渐降低, 3 个时间段内的单花滞留时间的差异性均不显著 ($P > 0.05$)。

中华蜜蜂的访花转移次数 (图 1: B) 在初花期的 10:00-18:00 逐渐减少, 3 个时间段的访花转移次数无显著性差异 ($P > 0.05$); 盛花期的访花转移次数在 10:00-18:00 逐渐减少, 10:00-12:00 和 13:00-15:00 的访花转移次数与 16:00-18:00 存在显著性差异 ($P < 0.05$); 末花期的访花转移次数在 10:00-15:00 逐渐增加, 16:00 后则逐渐减少, 且 3 个时间段内的访花转移次数无显著性差异 ($P > 0.05$)。中华蜜蜂对白三叶采集粉和蜜次数 (图 1: C) 在初花期的 10:00-15:00 逐渐降低, 16:00 后逐渐增加, 3 个时间段内无显著性差异 ($P > 0.05$); 盛花期和末花期的采集粉和蜜次数规律基本相似, 但与初花期在 3 个时间段内的规律不同, 且盛花期的采集粉和蜜次数在 13:00-15:00 与 10:00-12:00 和 16:00-18:00 均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.1.2 中华蜜蜂对白三叶的访花频率 中华蜜蜂在不同花期的访花速率在 10:00-18:00 不同 (图 2: A)。初花期 10:00-15:00 逐渐降低, 之后逐渐增加, 不同时间段间的差异均不显著 ($P > 0.05$); 而盛花期访花速率与初花期相反, 最后一个时间段与前两时间段存在显著性差异 ($P < 0.05$); 末花期与盛花期访花速率的趋势相同, 但 3 个时间段间的差异均不显著 ($P > 0.05$)。

在 10:00-18:00 期间, 中华蜜蜂花序访问时间在初花期 10:00-15:00 逐渐增加, 16:00 后逐渐降低, 花序访问时间在 13:00-15:00 与 10:00-12:00 差异不显著 ($P > 0.05$) (图 2: B); 盛花期与初花期的花序访问时间规律相似, 10:00-12:00 与 16:00-18:00 的差异不显著 ($P > 0.05$), 而 10:00-12:00 和 16:00-18:00 的花序访问时间均与 13:00-15:00 的花序访问时间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 末花期的花序访问时间与初花期和盛花期的花序访花时间规律相反, 10:00-12:00 的花序访问时间与 13:00-15:00 的花序访问时间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

中华蜜蜂的访花行为在不同花期表现不同（表 1）。单花滞留时间在 10:00-15:00 均表现为盛花期最短（0.019 s 和 0.022 s），末花期最长（0.037 s 和 0.034 s），在 10:00-12:00 末花期的

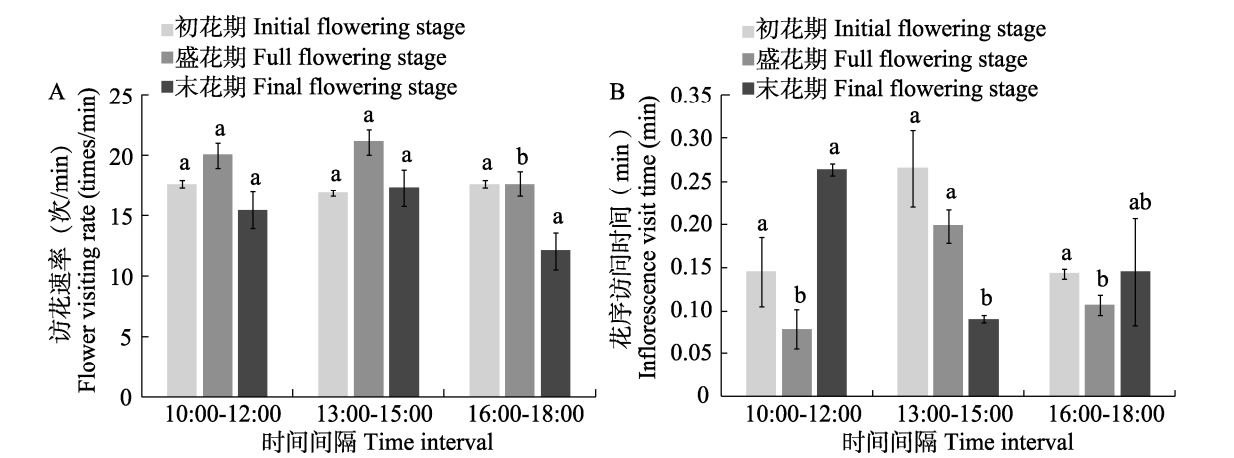


图 2 中华蜜蜂对白三叶访花速率的动态变化
Fig. 2 The dynamic changes of Chinese honeybee's visiting rate on white clover

A. 访花速率；B. 花序访问时间。A. Flower visiting rate; B. Inflorescence visit time.

表 1 中华蜜蜂对白三叶不同花期访花行为的比较

Table 1 Comparison of Chinese honeybee's visiting behavior of white clover in different flowering periods

蜜蜂访花行为 Bee visiting behavior	花期 Flowering period	时间段 Time period		
		10:00-12:00	13:00-15:00	16:00-18:00
SFRT	初花期 Initial flowering	1.860±0.420ab	1.800±0.480a	1.560±0.180a
	盛花期 Full flowering	1.140±0.180b	1.320±0.060a	1.740±0.240a
	末花期 Flower withering	2.220±0.180a	2.040±0.360a	1.080±0.600a
NFVCB	初花期 Initial flowering	21.111±1.444ab	20.556±0.868b	20.445±0.588a
	盛花期 Full flowering	24.667±0.192a	23.889±0.909a	20.778±7.219a
	末花期 Flower withering	20.556±1.176b	21.444±0.618ab	14.333±0.619a
NPNCI	初花期 Initial flowering	14.444±0.801a	12.778±0.676b	13.444±4.893a
	盛花期 Full flowering	15.667±0.577a	17.778±0.729a	14.222±0.333a
	末花期 Flower withering	13.778±1.392a	14.556±0.401b	9.778±0.509a
VR	初花期 Initial flowering	17.667±2.072a	16.889±0.401b	17.667±0.016a
	盛花期 Full flowering	20.000±0.694a	21.111±0.778a	17.667±0.024a
	末花期 Flower withering	15.444±3.228a	17.333±0.509b	12.111±0.079a
IVT	初花期 Initial flowering	0.178±0.070a	0.231±0.074a	0.129±0.016a
	盛花期 Full flowering	0.079±0.023a	0.175±0.034a	0.089±0.024a
	末花期 Flower withering	0.230±0.026a	0.091±0.005a	0.115±0.079a

表中数值为平均值±标准差，同列数据后标有相同小写字母表示差异不显著（ $P>0.05$ ， F -test 检验），同列数据后标有不同的字母表示差异显著（ $P<0.05$ ， F -test 检验）。表 3 同。

SFRT：单花滞留时间；NFVCB：中华蜜蜂访花转移次数；NPNCI：花序采粉和蜜的次数；VR：访花速率；IVT：花序访问时间。下表同。

Date are mean±SD, and followed by the same lowercase letters indicate no significant differences at 0.05 level by F -test, while followed by the uppercase letters indicate significant differences at 0.05 level by F -test. The same as table 3. SFRT: Single flower residence time; NFVCB: Nnumber of visits and transfers of Chinese bee; NPNCI: Number of pollen and nectar collection of inflorescence; VR: Flower visiting rate; IVT: Inflorescence visit time. The same below.

单花滞留时间与盛花期的单花滞留时间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 在 16:00-18:00 盛花期的单花滞留时间最长 (0.029 s), 末花期的单花滞留时间最短 (0.018 s), 3 个花期间的差异均不显著 ($P > 0.05$); 中华蜜蜂访花转移次数、花序采粉和蜜次数及访花速率在 3 个花期中均表现为盛花期的最多, 在 13:00-15:00 盛花期与其余两个花期的花序采粉和蜜次数存在显著性差异 ($P < 0.05$); 花序访问时间在 10:00-12:00 与 16:00-18:00 表现为盛花期最少, 13:00-15:00 初花期最多, 且 3 个花期之间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.2 中华蜜蜂访花行为的相关性分析

中华蜜蜂对白三叶访花行为相关性分析可知, 单花滞留时间与访花转移次数、花序采粉和蜜次数、访花速率及花序访问时间等的相关性均不显著 ($P > 0.05$), 单花滞留时间与花序访问时间呈正相关关系, 与其余 3 个指标均呈负相关关系 (表 2)。访花转移次数与花序采粉和蜜次数、访花速率和花序访问时间等呈正相关关系, 其中与访花速率呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与其它 2 个指标相关性不显著 ($P > 0.05$)。花序采粉和蜜次数与访花速率、花序访问时间均呈正相关关系, 其中只与访花速率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。访花速率与花序访问时间呈正相关关系, 但相关性不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 中华蜜蜂对白三叶不同花期访花行为的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of Chinese honeybee's visiting behavior of white clover in different flowering periods

	SFRT	NFVCB	NPNCI	VR	IVT
SFRT	1				
NFVCB	-0.6	1			
NPNCI	-0.421	0.558	1		
VR	-0.538	0.828**	0.866**	1	
IVT	0.06	0.103	0.479	0.426	1

* 表示在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著; **表示在 0.01 级别 (双尾) 相关性显著。

* indicates significant correlation at the 0.05 level (two-tailed);

** indicates extremely significant correlation at the 0.01 level (two-tailed).

2.3 中华蜜蜂对白三叶产量相关性状的影响

在不同授粉处理 (完全授粉 CP、初花期授粉 IFP、盛花期授粉 FFP、末花期授粉 FWPP、不授粉 NP) 条件下 (表 3), 产花密度大小顺序依次为盛花期授粉>完全授粉>不授粉>末花期授粉>初花期授粉, 其中初花期授粉与盛花期授粉的产花密度差异显著 ($P < 0.05$); 每个花序花朵数依次为完全授粉>不授粉>盛花期授粉>末花期授粉>初花期授粉, 5 个处理条件下的花序花朵数差异均不显著 ($P > 0.05$)。单个花序荚果数依次为: 完全授粉>盛花期授粉>末花期授粉>初花期授粉>不授粉, 完全授粉与其它 4 个授粉处理均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 而这 4 个授粉处理间不存在显著性的差异 ($P > 0.05$)。种子数表现为盛花期授粉>完全授粉>末花期授粉=不授粉>初花期授粉, 5 个授粉处理条件之间的种子数均不存在显著的差异性 ($P > 0.05$)。

3 结论与讨论

蜜蜂的访花行为是植物传粉的主要途径之一 (赵东绪等, 2019; 敖塘堰等, 2021), 蜜蜂为农作物进行授粉时, 蜜蜂访花的活跃程度在时间上差异较大 (王丹等, 2016)。本文结果显示, 初花期和末花期中华蜜蜂访花的高峰期均在 13:00-15:00 (图 1: A, B), 访花速率的高峰期均在 10:00-12:00 (图 2: A), 可能是初花期和末花期的花粉和花蜜的分泌量较小 (容维中, 1994), 而盛花期高峰期为 13:00-15:00 (图 2: A), 因试验期间处于多雨季节 (5 月), 试验田积水过多而导致清晨的温度略低、湿度过大, 植物的散粉规律受到影响, 挥发性物质的扩散性降低, 导致蜜蜂采集的积极性降低 (赵括等, 2021)。随着日温度的升高, 释放的花粉花蜜量增加, 增强蜜蜂的活跃程度 (陈发军等, 2016)。也就是说初花期花粉和花蜜的分泌量少, 且上午空气湿度大等不利于气味分子在空气传播, 限制了蜜蜂找到花朵, 而午后温度升高加速了气味分子的扩散, 有利于蜜蜂找到花朵进行采蜜授粉活动。这说明访花行为很大程度上会受到天气情况的影

表 3 不同授粉处理对白三叶相关指标的影响差异

Table 3 Differences in the effects of different pollination treatments on related indexes of white clover

处理 Treatments	产花密度 Flowering density	花序花朵数 (朵/个) Number of inflorescence flowers (single/piece)	单序荚果数 (个) Number of single-sequence pods (piece)	种子数 (粒/个) Number of seeds (grains/piece)
CP	280.00±2.31ab	90.50±1.14a	66.70±3.93b	4.33±0.12a
IFP	244.00±13.86b	81.67±7.84a	41.27±1.08a	4.13±0.16a
FFP	286.67±8.11a	82.43±1.35a	42.65±0.95a	4.65±0.20a
FWP	261.33±16.71ab	81.83±1.56a	42.47±0.92a	4.21±0.26a
NP	273.33±5.81ab	84.10±4.21a	38.00±2.93a	4.21±0.10a

CP: 完全授粉; IFP: 初花期授粉; FFP: 盛花期授粉; FWPP: 末花期授粉; NP: 不授粉。

CP: Complete pollination; IFP: Initial flowering pollination; FFP: Full flowering pollination; FWP: Flower withering pollination; NP: No pollination.

响,一方面影响开花植物的花粉花蜜的传播,另一方面影响传粉昆虫的活动,另外低温和降雨都不利于昆虫的活动。

单花停滞时间的长短是衡量植物授粉效果好坏的重要指标,同时也是植物协同进化程度的间接性因素之一(方海涛和斯琴巴特,2007;孟柏达等,2019)。研究表明,蜜蜂在花朵上的滞留时间越长,植物的授粉效果越好(郭城俊等,2016)。本研究结果表明中华蜜蜂对白三叶授粉时的单花滞留时间在末花期最长(2.220 s),盛花期最短(1.140 s),且两者间存在显著性差异($P<0.05$),这可能因为末花期的挥发性物质较少,使蜜蜂嗅觉的敏感度降低,增加了蜜蜂访问时间(吴国火等,2020)。此外,花序采粉与蜜次数的多少与访花速率的高低、花序访问时间的长短也是衡量植物授粉成功概率大小参考的重要指标(孟柏达等,2019)。本研究结果表明,花序采粉和蜜次数与访花速率在盛花期最多;而花序访问时间在早晚都表现出盛花期最短,这与蜜蜂访花行为规律相符,即单花滞留时间越短,蜜蜂的访花速率越高,增加了花序采粉和蜜的机会,从而增大授粉成功的机率(李稚等,2014;孟柏达等,2019)。综上所述可知,中华蜜蜂为白三叶授粉时,在盛花期最为活跃(表2)。

而蜜蜂在访花过程中容易受到植物的花色、花形、综合特征以及花挥发性物质、地理环境等因素的影响(Williams *et al.*, 1983;王伟等,2008),此外,蜜蜂的访花行为各要素之间也相互影响

(邓晓保等,2005)。本研究结果表明单花滞留时间与中华蜜蜂访花转移次数、花序采粉和蜜、访花速率均呈负相关关系,与花序访问时间呈正相关关系,这与梁之聘等(2010)对大叶铁线莲访花昆虫行为研究结果相似,这说明蜜蜂的访花速率主要受单花滞留时间及花序访问时间的影响。而访花速率与访花转移次数、花序采粉和蜜均呈极显著正相关关系($P<0.01$),由此可见,中华蜜蜂访花转移次数、花序采粉和蜜的次数是影响访花速率的主要因素,是影响蜜蜂访花行为与授粉效果的间接性因素(表3)。

综上所述,授粉在维持生态系统的自然平衡方面发挥着至关重要的作用,是作物生产的基石,授粉能够提高其质量和数量(Mashilingi *et al.*, 2021)。本研究结果表明,在完全授粉条件下白三叶的产量相关要素得到了相应的提高,与不授粉相比,提高了产花密度 6.67 个、花序花朵数 6.4 朵、单序荚果数 28.7 个、种子数 0.12 粒,这与 Panakov 和 Vazhov (2012) 及黄斌等(2020)研究的结果相似,这表明中华蜜蜂授粉使授粉更加充分,促进白三叶更好的生长生产,这是因为蜜蜂在访花授粉时会将未受精成功的枯萎花瓣、部分危害花朵的害虫清理掉,使受精成功的花朵增加阳光的照射和减少害虫的危害,从而提高了产量的相关要素。本实验在白三叶初花期、盛花期和末花期开展蜜蜂授粉的研究结果表明,在盛花期的产量相关要素最高,其中产花密度显著高于初花期,这与赵恬等(2021)

利用蜜蜂为猕猴桃授粉的研究结果相似,说明除了在整个完全授粉之外,盛花期为最佳的授粉时期,韩建国等(1996)研究表明产花密度是决定白三叶潜在种子的决定因素,说明中华蜜蜂适当的授粉除了能提高产量外,还能提高白三叶的生殖生产。

参考文献 (References)

- Ao TY, Xiong L, Ma ZG, 2021. Review on the characteristics and differences of visiting behavior between honeybee *Apis cerana* and *Apis mellifera*. *Journal of Bee*, 41(3): 1–4. [敖塘堰, 熊亮, 马振刚, 2021. 中华蜜蜂与意大利蜜蜂访花行为特点与区别. 蜜蜂杂志, 41(3): 1–4.]
- Antonín K, Igor H, Tomáš V, Vladěna O, Tereza H, Martin B, Jakub E, 2021. Effect of seed coating and PEG-induced drought on the germination capacity of five clover crops. *Plants*, 10(4): 724.
- Chen FJ, Yang QQ, Long L, Hu HM, Duan B, Chen WN, 2016. Activity patterns and foraging behavior of *Apis cerana cerana* in the urban gardens in winter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(1): 275–281. [陈发军, 杨青青, 龙黎, 胡红梅, 段彬, 陈文年, 2016. 城市园林生境冬季中华蜜蜂的活动规律和采集行为. 应用生态学报, 27(1): 275–281.]
- Deng XB, Ren PY, Li QJ, 2005. Nectar secretion patterns floral visitor behavior and their impacts on fruit and seed sire of *Alplnia blepharocaly*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 29(2): 7. [邓晓保, 任盘宇, 李庆军, 2005. 云南草蔻花蜜分泌格局与访花动物行为及其对果实和种子产量的影响. 植物生态学报, 29(2): 7.]
- Fang HT, Seqinbate, 2007. Blossom character and insect pollination of *Prunus mongolica* Maxm. *Chinese Journal of Ecology*, 26(2): 177–181. [方海涛, 斯琴巴特, 2007. 蒙古扁桃的花部综合特征与虫媒传粉. 生态学杂志, 26(2): 177–181.]
- Gagic V, Kirkland L, Kendall LK, Jones J, Kirkland J, Spurr C, Rader R, 2020. Understanding pollinator foraging behaviour and transition rates between flowers is important to maximize seed set in hybrid crops. *Apidologie*, 52(1): 89–100.
- Goodman RD, Zhou ZW, 1997. Bee pollination on white clover. *Grassland and Turf*, 17(1): 40–42. [Good R.D Goodman, 周自玮, 1997. 海弗白三叶的蜜蜂传粉. 草原与草坪, 17(1): 40–42.]
- Goodwin R, Cox H, Taylor M, Evans L, McBrydie H, 2011. Number of honey bee visits required to fully pollinate white clover (*Trifolium repens*) seed crops in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Crop & Horticultural Science*, 39(1): 7–19.
- Guo CJ, Shen JS, Wu WQ, Song HL, Ma WH, Gao P, Du YL, Shao YQ, 2016. Effect of different inducers treatment of pear on honeybee visiting behavior. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 44(6): 829–832. [郭成俊, 申晋山, 武文卿, 宋怀磊, 马卫华, 高鹏, 杜亚丽, 邵有全, 2016. 不同诱导剂处理梨树对蜜蜂访花行为的影响. 山西农业科学, 44(6): 829–832.]
- Guo Y, Song ZQ, Zhang XF, Song HL, WU WQ, Shao YQ, 2017. Comparison of pollinating effects for the alfalfa between *Apis mellifera* L. and *Bombus terrestris* L. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 1008–1014. [郭媛, 宋卓琴, 张旭凤, 宋怀磊, 武文卿, 邵有全, 2017. 西方蜜蜂和地熊蜂为紫花苜蓿授粉效果比较. 应用昆虫学报, 54(6): 1008–1014.]
- Han JG, Li M, Li F, 1996. Potential seed yield and actual seed yield in forage seed production. *Grassland and Turf*, 16(1): 7–11. [韩建国, 李敏, 李枫, 1996. 牧草种子生产中的潜在种子产量与实际种子产量. 草原与草坪, 16(1): 7–11.]
- Han SM, Lai K, Zhao YZ, Bai F, Li ZF, Peng WJ, 2020. Flower visiting behavior and pollination by honeybees in kiwifruit orchards. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1131–1138. [韩胜明, 赖康, 赵亚周, 白峰, 李治菲, 彭文君, 2020. 蜜蜂在猕猴桃园的访花行为和授粉效果评估. 应用昆虫学报, 57(5): 1131–1138.]
- He YP, Liu JQ, 2004. Pollination ecology of *Gentiana straminea* Maxim (Gentianaceae), an alpine perennial in the Qinghai Tibet plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 24(2): 215–220. [何亚平, 刘建全, 2004. 青藏高原高山植物麻花艽的传粉生态学研究. 生态学报, 24(2): 215–220.]
- Huang B, Zhang SW, Tian ZZ, Liu XP, 2020. Effect of bee pollination on the yield, quality and physicochemical properties of *Astragalus membranaceus*. *Gansu Agriculture*, 2020(12): 68–70. [黄斌, 张世文, 田自珍, 刘晓鹏, 2020. 蜜蜂授粉对黄芪产量品质和理化性状的影响研究. 甘肃农业, 2020(12): 68–70.]
- Katharina L, Hanna B, Thorsten K, Thomas D, Ralf P, 2021. Poppy (*Papaver somniferum* L.) intercropping with spring barley and with white clover: Benefits and competitive effects. *Agronomy*, 11(5): 948.
- Li CY, Wang X, 2021. Biological properties and pollination application of commonly used pollinating bees. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2021(10): 88–91. [李春雨, 王星, 2021. 常用授粉蜂的生物学特性及授粉应用. 现代畜牧兽医, 2021(10): 88–91.]
- Li PH, Zeng P, Gong X, Tang W, Chen Z, 2021. Effects of sod-culture on soil nutrients and microbial abundance in *Zanthoxylum bungeanum* plantation. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 42(4): 73–77. [李佩洪, 曾攀, 龚霞, 唐伟, 陈政, 2021. 生草对花椒园土壤养分及微生物丰度的影响. 四川林业科技, 42(4): 73–77.]
- Li Z, Yang GD, Duan YF, Fan Y, Zhao YP, Cheng JR, Wang XR, 2014. Study on major pollinators and their flower visiting behavior of *Osmanthus fragrans*. *Journal of Nanjing Forestry*

- University (Natural Sciences Edition), 38(S1): 47–50. [李稚, 杨国栋, 段一凡, 范怡, 赵友朋, 成举荣, 王贤荣, 2014. 桂花访花昆虫及其访花行为观察. 南京林业大学学报(自然科学版), 38(S1): 47–50.]
- Liang ZP, Li HH, Hu BB, Zhao TJ, Ren XB, 2010. Flower visiting insects and behavior of nectar robbers associated with *Clematis heracleifolia*. *Acta Entomologica Sinica*, 53(7): 794–801. [梁之聘, 李后魂, 胡冰冰, 赵铁建, 任秀柏, 2010. 大叶铁线莲访花昆虫调查及盗蜜昆虫行为研究. 昆虫学报, 53(7): 794–801.]
- Mashilingi SK, Zhang H, Chen WF, Vaissi è re BE, Garibaldi LA, An JD, 2021. Temporal trends in pollination deficits and its potential impacts on Chinese agriculture. *Journal of Economic Entomology*, 114(4): 1431–1440.
- Meng BD, Ren XX, Gong XY, Chen XL, Hu XL, Qing Z, Li LS, Zhou DY, Dong K, 2019. Effect of *Apis mellifera* L. on the foraging behavior of *Apis cerana* F. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(5): 1070–1078. [孟柏达, 任晓晓, 龚雪阳, 陈新兰, 胡晓玲, 卿卓, 李林庶, 周丹银, 董坤, 2019. 西方蜜蜂对东方蜜蜂采集行为及食物资源利用的影响. 应用昆虫学报, 56(5): 1070–1078.]
- Panakov DM, Vazhov VM, 2012. Sainfoin cultivation with bee pollination in forest steppe zone of Altai region. *Zemledelie*, 2012(7): 34–36.
- Perrot T, Gaba S, Roncoroni M, Gautier JL, Bretagnolle V, 2018. Bees increase oilseed rape yield under real field conditions. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 266(1): 39–48.
- Qin JD, Wang CZ, 2001. On the interaction and evolutionary relationship between insects and plants. *Acta Entomologica Sinica*, 44(3): 360–365. [钦俊德, 王琛柱, 2001. 论昆虫与植物的相互作用和进化的关系. 昆虫学报, 44(3): 360–365.]
- Rasmussen J, Eriksen J, Jensen ES, Høgh-Jensen H, 2010. Root size fractions of ryegrass and clover contribute differently to C and N inclusion in SOM. *Biology & Fertility of Soils*, 46(3): 293–297.
- Richards KW, 2016. Effectiveness of the alfalfa leafcutter bee *Megachile rotundata* Fab to pollinate perennial clovers. *Journal of Apicultural Research*, 55(3): 259–267.
- Rong JQ, 2017. Reciprocal relationship with honeybee pollination. *Nong Cun Shi Yong Ji Shu*, 192(11): 30–32. [荣吉青, 2017. 蜜蜂与植物授粉的互惠关系. 农村实用技术, 192(11): 30–32.]
- Rong WZ, 1994. Reasons for the low seed setting rate of white clover. *Grassland and Turf*, 14(2): 28–30. [容维中, 1994. 白三叶结籽率低的原因. 草原与草坪, 14(2): 28–30.]
- Mashilingi SK, Zhang H, Chen WF, Vaissière BE, Garibaldi LA, An JD, 2021. Temporal trends in pollination deficits and its potential impacts on Chinese agriculture. *Journal of Economic Entomology*, 114(4): 1431–1440.
- Wang D, He ML, Luo Q, Zhang M, Li ZH, 2016. Observation and research on feijoa flower visiting media and flower visiting behavior. *South China Fruits*, 45(4): 61–69. [王丹, 何孟玲, 罗勤, 张猛, 李泽华, 2016. 费约果访花媒介及其访花行为观察研究. 中国南方果树, 45(4): 61–69.]
- Wang W, Zhao YJ, Li MY, Xuan WT, Yu YW, Xu Z, 2021. Research on the planting effect of *Dactylis glomerata*+*Lolium perenne*+*Trifolium repens* grasslands in summer/autumn sowing dates. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 36(6): 1057–1064. [王文, 赵一军, 李梦瑶, 宣文婷, 于应文, 徐震, 2021. 夏/秋播种鸭茅+多年生黑麦草+白三叶草地建植效果比较研究. 云南农业大学学报(自然科学), 36(6): 1057–1064.]
- Wang W, Liu Y, Chen FD, Dai HG, 2008. Behavior and activity rhythm of flower-visiting insects on *Chrysanthemum morifolium* in Nanjing suburb. *Chinese Journal of Ecology*, 27(7): 1167–1172. [王伟, 刘勇, 陈发棣, 戴华国, 2008. 南京郊区小菊访花昆虫的行为与活动规律. 生态学杂志, 27(7): 1167–1172.]
- Wang ZJ, Zhang G, Wang L, Ji YQ, Fan YQ, Wei B, 2022. Effect of exogenous nitrogen on the competition between *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 54(1): 107–112. [王肇钧, 张刚, 王磊, 计阳晴, 范亚芹, 韦冰, 2022. 施氮对白三叶与黑麦草种间竞争的影响研究. 东北师大学报(自然科学版), 54(1): 107–112.]
- Williams NH, 1983. Floral fragrances as cues in animal behavior//Jones CE, Little RJ(eds.). *Handbook of Experimental Pollination Biology*. New York: Van Nostrand Reinhold. 50–72.
- Wu GH, Cui L, Wang MX, Li HL, Han BY, 2020. Attraction of aroma from tea floods and lands to the Chinese honeybees (*Apis cerana cerana*). *Acta Ecologica Sinica*, 40(12): 4024–4031. [吴国火, 崔林, 王梦馨, 李红亮, 韩宝瑜, 2020. 茶树花香气及茶叶气味对中华蜜蜂的引诱效应. 生态学报, 40(12): 4024–4031.]
- Zhang GZ, 1987. The first pollinator. *Apicultural Science and Technology*, 1987(3): 37. [张拱辰, 1987. 首次授粉实验的人. 养蜂科技, 1987(3): 37.]
- Zhao DX, Su XL, Hua QY, Tou LJ, Chen DX, 2019. The comparative studies of pollination behaviors between *Apis cerana* and *Apis mellifera* in blueberry. *Journal of Environmental Entomology*, 41(1): 187–192. [赵东绪, 苏晓玲, 华启云, 斜凌娟, 陈东晓, 2019. 意大利蜜蜂和中华蜜蜂为蓝莓授粉的行为比较研究. 环境昆虫学报, 41(1): 187–192.]
- Zhao T, Wang YC, Yuan Y, Wei XP, Zhang DH, Yao D, Zhang JH, 2021. Study on the flower-visiting behavior and pollination effect by *Apis cerana cerana* on kiwi fruit. *Journal of Environmental Entomology*, 43(3): 667–675. [赵恬, 王胤晨, 袁扬, 韦小平, 张定红, 姚丹, 张锦华, 2021. 中华蜜蜂对猕猴桃的访花行为及授粉效果研究. 环境昆虫学报, 43(3): 667–675.]