油茶花部结构差异对传粉昆虫的影响*

魏 玮[1, 2**] 蒙思圳[1, 2] 王亚美[1, 2] 龙金桂[1, 2] 姚 杰[1, 2] 黄敦元[1, 2***]

（1. 重庆师范大学，农业农村部长江上游传粉昆虫资源保护与利用重点实验室，重庆 401331；
2. 重庆师范大学，媒介生物控制和利用重庆市重点实验室，重庆 401331）

摘 要 **【目的】** 油茶 *Camellia oleifera* 是我国重要木本食用油料植物之一，广泛分布在我国南方地区，油茶花期秋末冬初，传粉昆虫不足导致的异花授粉受限是制约油茶产量的瓶颈之一。花部特征对传粉昆虫的选择偏好及行为有一定的影响，本研究探究油茶花部结构差异对传粉昆虫访花行为的影响，以期为油茶新品种的选育提供参考依据。**【方法】** 于 2022 年 10-11 月在江西赣州市选择 4 个油茶基地，开展油茶花部结构差异对油茶传粉昆虫访花行为的影响研究，观察统计了 168 株研究样本的访花昆虫以及 11 个花特征，通过相关性分析、线性回归分析等统计学方法进行分析。**【结果】** 在野外观测期间，分别观测到大分舌蜂 *Colletes gigas* 750 次、油茶地蜂 *Andrena camellia* 144 次、胡蜂科 Vespidae 物种 125 次和食蚜蝇科 Syrphinae 物种 2 359 次访花行为，为该地区油茶主要访花昆虫；对油茶 11 个花部结构进行测量，油茶花具有花瓣 5-9 瓣，花朵展示面积为（30.09±9.37）cm^2；雌蕊位于雄蕊群中心位置，子房上位长（4.03± 0.52）mm、柱头 2-5 裂，长（9.59±1.87）mm、花柱直径（1.02±0.19）mm，雄蕊群直径（17.47±3.65）mm，高（14.46±2.09）mm，具有（99.85±17.53）根雄蕊；柱头略低于雄蕊（0.87±2.37）mm，横向距离为（1.33±1.33）mm。相关性分析、线性回归分析表明，传粉昆虫的访花次数与花面积、雄蕊群直径长、雄蕊数量具有极显著正相关性（P<0.01）；与柱头高度差具有显著正相关性（P<0.05）；与横向距离具有显著负相关性（P<0.05）。回归公式分别为：传粉昆虫的访花次数与花面积 y=8.832 63+0.373 88x（P<0.01）、传粉昆虫的访花次数与雄蕊群直径长 y=1.338 68+1.075 91x（P<0.01）、传粉昆虫的访花次数与雄蕊数量 y=1.311 08+0.189 3x（P<0.01）、传粉昆虫的访花次数与柱头高度差 y=7.329 16+0.825 38x（P<0.05）、传粉昆虫的访花次数与横向距离 y=9.667 94-1.217 09x（P<0.05）。**【结论】** 油茶传粉昆虫偏爱到访油茶单花面积大、雄蕊群面积大、雄蕊数量多且相对比较聚集的花朵，本研究结果从油茶花部结构视角为油茶新品种的选育提供了科学依据。

关键词 油茶；花部结构；传粉昆虫吸引；访花行为

The effect of differences in flower structure on pollinators of *Camellia oleifera*

WEI Wei[1, 2**] MENG Si-Zhen[1, 2] WANG Ya-Mei[1, 2] LONG Jin-Gui[1, 2]
YAO Jie[1, 2] HUANG Dun-Yuan[1, 2***]

(1. Key Laboratory of Conservation and Utilization of Pollinator Insect of the Upper Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Vector Control and Utilization, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the impact of differences in floral structure on the behavior of pollinators of *Camellia oleifera*, an important woody, edible, oil plant in China, in order to develop improved varieties of this plant. **[Methods]** From October to November 2022, four *C. oleifera* plantations in Ganzhou, Jiangxi, were selected to study the impact of differences in floral structure on pollinator behavior. Observations and statistical analyses were conducted on 168 samples of flower-visiting insects and 11 floral traits. Correlation and linear regression analyses were used to analyze the data. **[Results]**

*资助项目 Supported projects：重庆市自然科学基金（CSTB2022NSCQ-MSX0985）；国家自然科学基金（31970484）

**第一作者 First author，E-mail：2021110513014@stu.cqnu.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：20170054@cqnu.edu.cn

收稿日期 Received：2024-04-08；接受日期 Accepted：2024-10-28

Primary flower-visiting included 750 visits by *Colletes gigas*, 144 by *Andrena camellia*, 125 by Vespidae species, and 2 359 by Syrphinae species. Eleven *C. oleifera* flowers were measured. These had 5 to 9 petals with a display area of (30.09±9.37) cm². The pistil was centrally located among the stamens, with a superior ovary measuring (4.03±0.52) mm, a stigma with 2 to 5 lobes, a stigma length of (9.59±1.87) mm, and a stigma style diameter of (1.02±0.19) mm. The outer diameter of the stamen cluster was (17.47±3.65) mm, with a height of about (14.46±2.09) mm and approximately (99.85±17.53) stamens. The stigma was (0.87±2.37) mm lower than the stamens, with a lateral distance of (1.33±1.33) mm. Correlation and linear regression reveal a highly significant, positive correlation between the number of pollinator visits and floral area, stamen cluster diameter and stamen quantity (P<0.01), a significant positive correlation with stigma height difference (P<0.05), and a significant negative correlation with lateral distance (P<0.05). The regression equations were as follows: Floral area: y=8.832 63+0.373 88x (P=0.001<0.01); Stamen diameter: y=1.338 68+1.07 5 91x (P=0.001<0.01); Stamen number: y=1.31 108+0.1 893x (P=0.005<0.01); Height differential between stigma and the stamens: y=7.329 16+0.825 38x (P=0.486<0.05); Lateral distance between stigma and the stamens: y=9.667 94-1.217 09x (P=0.285<0.05). **[Conclusion]** Pollinators of *C. oleifera* prefer flowers with a larger floral area, larger stamen clusters, more stamens, and relatively concentrated structures. These results offer insights for breeding *C. oleifera* varieties that are more attractive to pollinators.

Key words *Camellia oleifera*; floral structure; pollination insect attraction; foraging behavior

油茶 *Camellia oleifera* 隶属山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia*，是世界四大木本油料植物之一，主要分布在我国南方丘陵山区，种植面积已达 45 万 hm^2，油茶籽年产量可达 394 万吨、榨取茶油 88.9 万吨，相关产业产值 1 920 亿元（国家林业和草原局，2020）；在增加食用油供给、维护国家粮油安全和助力乡村振兴中起到不可或缺的作用（国家林业草原局，2016）。油茶是典型的异花授粉植物，花期秋末冬初，传粉昆虫相对较少导致的授粉受限是制约油茶产业可持续发展的瓶颈之一（邓园艺等，2011；韦维等，2017；陈永忠，2023）。针对油茶授粉不足的现状，研究发现引入高效野生传粉昆虫和使用无人机辅助授粉，可以提高油茶的传粉效率，缓解花粉的限制，进而提高油茶的产量；然而，这些辅助方法存在成本较高、易导致病原传播等缺陷（丁桂玲等，2023；徐安糠等，2023）。因此，引入传粉生态学观念，从油茶花部结构特征考虑选育一些优良品种，增加对传粉昆虫的吸引，也是解决油茶授粉限制的思路之一。

传粉生态学理论认为花部特征与传粉者访花行为、传粉机制和植物适合度之间存在不可忽视的联系（Casper *et al.*，2021）。花部结构是吸引昆虫访花的重要特征，也是影响传粉昆虫访花偏好性的重要因素，其包括花的大小、柱头特征、花冠管和蜜距长度等（Eckerter *et al.*，2019；Basari *et al.*，2021；Hernanz *et al.*，2023；纪霜等，2023）。不同植物花的结构形态特征差异对访花昆虫的数量、种类以及访花行为具有不同程度的影响，较大的花或者以花序形式簇集以增加展示面积的花能吸引到更多种类的传粉昆虫（Zhao *et al.*，2016）。特定的花结构改变同样能影响传粉昆虫的访花数量，如马先蒿属 *Pedicularis* 植物通过增加花下唇结构面积成功吸引了更多熊蜂访问，有效提高繁育成功率（路广梅等，2021）。

我国油茶花期传粉昆虫约 90 种，其中分舌蜂科 Colletidae、地蜂科 Andrenidae、胡蜂科 Vespidae、食蚜蝇科 Syrphidae 和蜜蜂科 Apidae 为主要类群（张欢等，2022）。大分舌蜂 *Colletes gigas*、油茶地蜂 *Andrena camellia*、湖南地蜂 *Andrena hunanensis*、浙江地蜂 *Andrena chekiangensis* 和纹地蜂 *Andrena striata* 等土壤筑巢野生蜜蜂，体表被茂密毛发，并且具有携粉足；其成虫活动期一般为每年 10-12 月，与油茶花期高度吻合，是油茶的优势传粉昆虫（吴燕如，1977；黄敦元等，2015，2017；邱建生等，2018；Huang *et al.*，2021）。Li 等（2021）研究证实，油茶座果率与大分舌蜂、油茶地蜂等优势传粉野生蜜蜂的到访数目呈现正相关，但油茶花部结构特征如何吸引传粉昆虫亟待进一步研究。

本研究选择盛花期在油茶基地开展野外工

作，主要测量花瓣数、花面积、子房长、花柱长、花柱直径、柱头裂数、雄蕊群直径长、雄蕊数量、雄蕊群高度、柱头高度差、横向距离共 11 个花部特征参数，同时野外观察、记录不同样树单位时间内大分舌蜂、油茶地蜂、胡蜂类与食蚜蝇类的访问次数，分析不同油茶花部结构对传粉昆虫的访花偏好性的影响。

1　材料与方法

1.1　样地信息表及样树选择

本研究于 2022 年 10-11 月在江西省赣州市进行，并随机选取了 4 个油茶种植基地，共 168 株盛花期的油茶植株作为研究对象，涉及约 20 个不同的无性系品种，具体样地信息见表 1。

表 1　样地信息

Table 1　Information of sample plots

序号 No.	样地 Sample plots	北纬（°） Northern latitude (°)	东经（°） East longitude (°)	海拔（m） Altitude (m)	样树数目 Number of sample trees
1	江西省赣州市石城县琴江镇（JXSC） Qinjiang Town, Shicheng County, Ganzhou City, Jiangxi Province (JXSC)	26.370 73	116.373 99	226.0	48
2	江西省赣州市赣县区五云镇（JXGX） Wuyun Town, Ganxian District, Ganzhou City, Jiangxi Province (JXGX)	26.476 39	114.805 27	157.3	39
3	江西省赣州市于都县银坑镇（JXYD） Yinkeng Town, Yudu County, Ganzhou City, Jiangxi Province (JXYD)	26.160 76	115.659 63	246.1	41
4	江西省赣州市寻乌县留车镇（JXXW） Liuche Town, Xunwu County, Ganzhou City, Jiangxi Province (JXXW)	24.751 01	115.586 29	462.4	40

1.2　传粉昆虫观察

在油茶盛花期选择晴朗天气，于上午 9:00-12:00，下午 13:00-16:00 分别观测每株样树的到访传粉昆虫数量，每棵树上午、下午各观察一次，每次观测 5 min，累计 10 min。

1.3　花部表型性状测定

在油茶盛花期，根据《中国油茶（第二版）》（庄瑞林，2008）描述，使用电子游标卡尺（精确度为 0.01 mm）对 4 个基地 168 株样树油茶花（每株样树随机选择 5 朵花）的 11 个表型进行野外测量，具体测量参数如下：①花瓣数量（Petals number，PN）；②花面积（Corolla area，CA）：“+”测量花冠直径的平均长度，以平均值代表花朵直径计算花面积，计算公式为：$CA=\pi$（花朵平均直径）$^2/4$；③子房长度（Ovary length，OL）：解剖分离花柱与子房后，测量子房基部至顶端距离代表子房长度；④花柱直径（Style diameter，SDI）：测量花柱中部位置直径代表花柱平均直径；⑤花柱长度（Style length，SL）：解剖分离花柱与子房后，测量花柱基部至顶端开裂顶部距离代表花柱长度；⑥柱头开裂数（The number of spilt of stigma，NS）：油茶花柱柱头存在开裂现象，计数每枚柱头存在几裂；⑦雄蕊群直径长（Stamens diameter，STD）：以最外轮雄蕊的直径长度代表雄蕊群直径；⑧雄蕊数量（Stamens number，STN）：使用镊子解剖分离雄蕊群与柱头，计数油茶花朵中多轮雄蕊总个数；⑨雄蕊群高度（Stamens length，STL）：雄蕊群基部至花药顶端平均距离；⑩柱头高度差（Height distance between the stigma and the stamens，HD）：油茶花柱头和雄蕊顶端花药存在的相对高度距离，又称雄蕊相对高度；⑪横向距离（Cross distance between the stigma and the stamens，CD）：柱头顶端与内轮雄蕊顶端花药的水平最近距离。油茶花型态特征具体示意见图 1（A，B）。

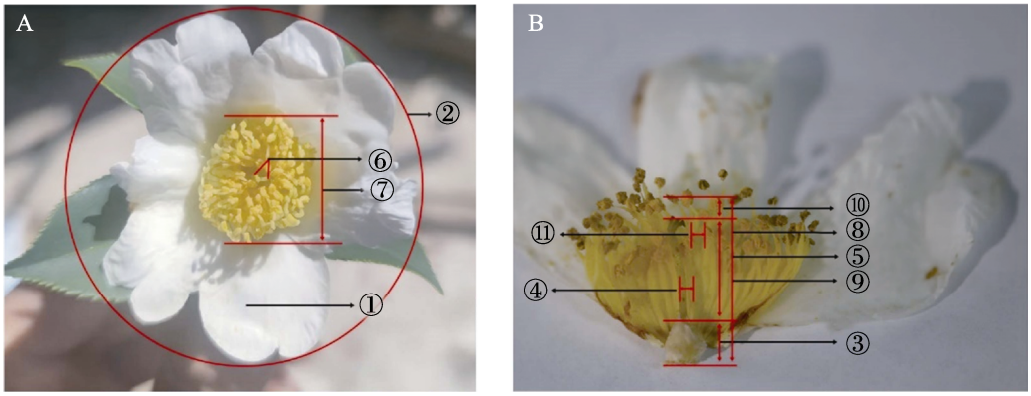

图 1 油茶花朵形态结构

Fig. 1 The floral structure of *Camellia oleifera*

A. 单花完整形态照；B. 解剖图。

A. Single flower morphology photos; B. Anatomical diagram.

①：花瓣数量；②：花面积；③：子房长度；④：花柱直径；⑤：花柱长度；⑥：柱头开裂数；⑦：雄蕊群直径长；⑧：雄蕊数量；⑨：雄蕊群高度；⑩：柱头高度差；⑪：横向距离。

①: Petals number; ②: Corolla area; ③: Ovary length; ④: Style diameter; ⑤Style length; ⑥: The number of spilt of stigma; ⑦: Stamens diameter; ⑧: Stamens number; ⑨: Stamens length; ⑩: Height distance between the stigma and the stamens; ⑪: Cross distance between the stigma and the stamens.

1.4 数据分析

1.4.1 传粉昆虫统计 使用 Excel 2010 记录访花昆虫的访问次数并统计访花类群，计算总访花次数，同时计算访花次数最大值与最小值。

1.4.2 油茶花表型性状测量 使用 Excel 2010 记录 168 株样树共 840 朵花 11 个测量值数据，并计算各花部表型性状的平均值和标准差。

1.4.3 传粉昆虫访花次数受表型性状影响分析 使用 SPSS 26.0 计算各花部表型性状与传粉昆虫访花次数之间的相关性（Pearson 计算相关性）；使用 SPSS 26.0 计算各花部结构之间是否存在相关性（Pearson 计算相关性），排除共线性关系造成的影响；使用 SPSS 26.0 进行线性回归分析并对回归模型进行 ANOVA 显著性分析，并使用 Origin 2021 软件绘制线性回归分析图。

2 结果与分析

2.1 传粉昆虫访问次数

4 个油茶基地中观察到为油茶传粉的昆虫主要有大分舌蜂、油茶地蜂、胡蜂类与食蚜蝇类 4 个类群，共计有传粉昆虫 3 378 只，其中，大分舌蜂 750 只、油茶地蜂 144 只、胡蜂类 125 只、食蚜蝇类 2 359 只。不同样地油茶传粉昆虫的数量存在较大差异（表 2）。

2.2 表型性状

根据 4 个油茶基地 168 株植株共计 840 朵油茶花的花部结构特征进行测量，结果显示（表 3）：油茶花具有花瓣 5-9 瓣，花朵展示面积为（30.09 ± 9.37）cm^2；雌蕊位于雄蕊群中心位置，子房上位长（4.03 ± 0.52）mm、柱头 2-5 裂，长（9.59 ± 1.87）mm、花柱直径（1.02 ± 0.19）mm，雄蕊群直径（17.47 ± 3.65）mm、高（14.46 ± 2.09）mm，具有（99.85 ± 17.53）根雄蕊；横向距离（1.33 ± 1.33）mm，同时柱头低于雄蕊（0.87 ± 2.37）mm。

2.3 花部结构与传粉昆虫访花相关性分析

传粉昆虫的访花次数与油茶花部结构特征相关参数的 Pearson 相关性分析结果显示：传粉昆虫的访花次数与柱头高度差有显著相关性（P<0.05）；与花面积、雄蕊群直径长、雄蕊数量以及横向距离值有极显著相关性（P<0.01）；与花瓣数、子房长、花柱长、花柱直径、柱头裂数、雄蕊群高度不相关（P>0.05）（表 4）。

表 2　不同基地油茶传粉昆虫的数量统计表

Table 2　Statistical table of the number of pollinators in different sample plots

样地 Sample plots	大分舌蜂 *Colletes gigas*	油茶地蜂 *Andrena camellia*	胡蜂 Vespidae	食蚜蝇 Syrphidae	总计 Total	最小单株访花昆虫数量 The minimum number of flower-visiting insect in single sample	最大单株访花昆虫数量 The maximum number of flower-visiting insect in single sample
JXSC	131	54	11	211	407	0	18
JXGX	152	45	5	516	718	0	30
JXYD	36	44	2	1 320	1 402	0	49
JXXW	431	1	107	312	851	11	32
总计 Total	750	144	125	2 359	3 378	–	–

JXSC：江西省赣州市石城县琴江镇；JXGX：江西省赣州市赣县区五云镇；JXYD：江西省赣州市于都县银坑镇；JXXW：江西省赣州市寻乌县留车镇。

JXSC: Qinjiang Town, Shicheng County, Ganzhou City, Jiangxi Province; JXGX: Wuyun Town, Ganxian District, Ganzhou City, Jiangxi Province；JXYD: Yinkeng Town, Yudu County, Ganzhou City, Jiangxi Province; JXXW: Liuche Town, Xunwu County, Ganzhou City, Jiangxi Province.

表 3　油茶花朵花部结构测量结果统计表

Table 3　Statistical table of floral measurements for *Camellia oleifera* flowers

花部结构 Floral structure	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation
花瓣数量 Petals number	5.00	9.00	6.30	1.00
花面积（cm^2）Corolla area (cm^2)	14.65	60.87	30.09	9.37
子房长度（mm）Ovary length (mm)	2.63	5.64	4.03	0.52
花柱直径（mm）Style diameter (mm)	0.59	1.72	1.02	0.19
花柱长度（mm）Style length (mm)	5.01	16.64	9.59	1.87
柱头开裂数 The number of spilt of stigma	2.00	5.00	3.56	0.59
雄蕊群直径长（mm）Stamens diameter (mm)	10.86	27.76	17.47	3.65
雄蕊数量 Stamens number	58.00	156.00	99.85	17.53
雄蕊群高度（mm）Stamens length (mm)	9.76	21.08	14.46	2.09
柱头高度差（mm）Height distance between the stigma and stamens (mm)	- 6.58	+6.41	+0.87	2.37
横向距离（mm）Cross distance between the stigma and stamens (mm)	0.00	7.73	1.33	1.33

在表格“柱头高度差”一行中，符号 - 表示柱头高于雄蕊群，符号+表示柱头低于雄蕊群。

In the table row “Height distance between the stigma and stamens”, the symbol - indicates the stigma is higher than the stamen cluster, while the symbol + indicates the stigma is lower than the stamen cluster.

油茶花部结构特征的 Pearson 相关性分析结果显示：花瓣数量与雄蕊数量、花面积和子房长、花面积和花柱直径、花面积和花柱长度、花面积和雄蕊群高度、子房长度和雄蕊群高度、花柱直径和花柱长度、花柱直径和柱头裂数、柱头裂数和雄蕊群高度、柱头裂数和柱头高度差，以及雄蕊群高度和柱头高度差两两性状之间存在相关性（表 5）。综上，可排除花面积、雄蕊数量、雄蕊群直径长、柱头高度差、横向距离之间存在相关性，可进行回归分析。

表 4 传粉昆虫访花次数与油茶花部结构的 Pearson 相关性计算结果

Table 4 The Pearson correlation calculation between the number of flower-visiting insects and the floral structures of *Camellia oleifera*

	PN	CA	OL	SDI	SL	NS	STN	STL	STD	HD	CD
NFSS	0.021	0.273**	0.094	0.105	0.091	0.083	0.259**	0.065	0.310**	0.184*	0.218**

PN：花瓣数量；CA：花面积；OL：子房长度；SDI：花柱直径；SL 花柱长度；NS：柱头开裂数；STD：雄蕊群直径长；STN：雄蕊数量；STL：雄蕊群高度；HD：柱头高度差；CD：横向距离；NFSS：单株访花昆虫数量。在 SPSS 26.0 中，Pearson 相关性分析结果自动展示在表格中：* 表示在 *P*=0.05 水平相关性显著，** 表示在 *P*=0.01 水平相关性显著。表 5 同。

PN: Petals number; CA: Corolla area; OL: Ovary length; SDI: Style diameter; SL: Style length; NS: The number of spilt of stigma; STD: Stamens diameter; STN: Stamens number; STL: Stamens length; HD: Height distance between the stigma and stamens; CD: Cross distance between the stigma and stamens; NFSS: Number of flower-visiting insects per sample. In SPSS 26.0, Pearson correlation analysis results are automatically displayed in the table: * indicate significant correlation at *P*=0.05 level; ** indicate highly significant correlation at *P*=0.01 level. The same for Table 5.

表 5 11 个油茶花部结构之间的 Pearson 相关性计算结果

Table 5 The Pearson correlation calculation among 11 floral structures in *Camellia oleifera*

	CA	OL	SDI	SL	NS	STN	STL	STD	HD	CD
PN	0.046	0.074	0.088	0.032	0.054	0.226**	0.052	0.164*	0.027	0.107
CA		0.213**	0.190*	0.548**	0.062	0.138	0.382**	0.148	0.045	0.129
OL			0.054	0.087	0.129	0.099	0.190*	0.108	0.089	0.015
SDI				0.248**	0.252**	0.010	0.128	0.207**	0.067	0.050
SL					0.069	0.072	0.341**	0.127	0.325**	0.094
NS						0.069	0.092	0.141	0.116	0.015
STN							0.001	0.142	0.094	0.054
STL								0.081	0.415**	0.011
STD									0.137	0.089
HD										0.073

2.4 花部结构与传粉昆虫访花次数线性回归分析

传粉昆虫的访花次数与花面积、雄蕊群直径长、雄蕊数量、柱头高度差以及横向距离 5 个结构的具体回归关系如图 2（A-E）所示：

传粉昆虫的访花次数与花面积（图 2：A）、雄蕊群直径长（图 2：B）、雄蕊数量（图 2：C）具有极显著正相关性（$P<0.01$）；与柱头高度差（图 2：D）具有显著正相关性（$P<0.05$）；与横向距离（图 2：E）具有显著负相关性（$P<0.05$）。回归公式分别为：传粉昆虫的访花次数与花面积 $y=8.832\ 63+0.373\ 88x$（$P<0.01$）；传粉昆虫的访花次数与雄蕊群直径长 $y=1.338\ 68+1.075\ 91x$（$P<0.01$）；传粉昆虫的访花次数与雄蕊数量 $y=1.311\ 08+0.189\ 3x$（$P<0.01$）；传粉昆虫的访花次数与柱头高度差 $y=7.329\ 16+0.825\ 38x$（$P>0.05$）；传粉昆虫的访花次数与横向距离 $y=9.667\ 94-1.217\ 09x$（$P>0.05$）。

3 讨论

传粉昆虫是植物有性生殖的重要媒介之一，访花频率的提高可以有效提高植物结实率（何亚平和刘建全，2004）。已有研究表明大分舌蜂与油茶地蜂是油茶的优势传粉昆虫（何学友等，2010；黄华艳等，2014；张欢等，2022），胡蜂类和食蚜蝇类昆虫对油茶授粉具有一定作用（何学友等，2010；罗辑等，2014；Yuan *et al.*，2022）。本研究首次发现油茶花部结构部分参数（花面

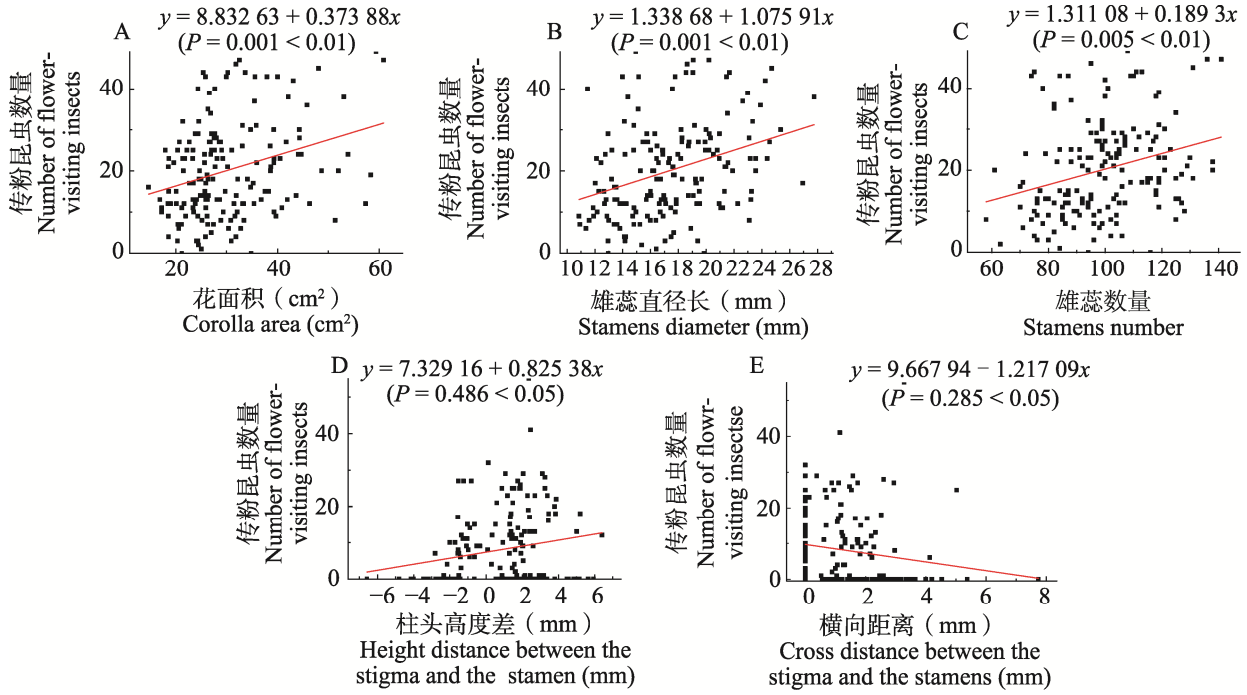

图 2　传粉昆虫访花次数与油茶不同花部特征的线性回归分析图

Fig. 2　The linear regression analysis diagram between numbers of flower-visiting insects and different floral structures of *Camellia oleifera*

A. 传粉昆虫访花次数与花面积关系；B. 传粉昆虫访花次数与雄蕊直径长关系；C. 传粉昆虫访花次数与雄蕊数量关系；D. 传粉昆虫访花次数与柱头高度差关系；E. 传粉昆虫访花次数与横向距离关系。在图 D 中，横坐标“柱头高度差”，符号 - 表示柱头高于雄蕊群，符号+表示柱头低于雄蕊群。

A. The relationship between the numbers of flower-visiting insects and the corolla area; B. The relationship between the numbers of flower-visiting insects and the stamens diameter; C. The relationship between the numbers of flower-visiting insects and the stamens number; D. The relationship between the numbers of flower-visiting insects and height distance between the stigma and the stamens; E: The relationship between the numbers of flower-visiting insects and the cross distance between the stigma and the stamens. In the Fig.D , in “Height distance between the stigma and stamens”, the symbol - indicates the stigma is higher than the stamen cluster, while the symbol + indicates the stigma is lower than the stamen cluster.

积、雄蕊群直径、雄蕊数量、柱头高度差和横向距离）对吸引这些昆虫的到访有一定的影响，进而可能影响油茶有效座果率。其中，柱头高度差和横向距离对访花昆虫的访问影响研究相对稀少，通常被认为是附加的影响（纪霜等，2023），故在本文中不做重点阐述。本研究认为油茶的花面积和雄蕊群数量面积大小，是影响传粉昆虫访问的主要因素。

本研究首次观察到油茶花面积增大，有利于传粉昆虫访花频率的增加。与许多研究的观察结果一致，如 Ishii 和 Harder（2006）通过减小双色飞燕草 *Delphinium bicolor* 和灰飞燕草 *Delphinium glaucum* 花的花被面积，传粉昆虫中熊蜂访花频率降低。Lázaro 等（2013）对挪威南部 Finse 地区 2 块山区草地共计 21 种开花植物进行花大小测量和访花昆虫观察，结果显示花展示面积更大的物种访花昆虫的种类与数量都增多。Barrio 和 Teixido（2015）研究西班牙马德里的一种开花灌木岩玫瑰 *Cistus ladanifer*，发现传粉昆虫在大型花朵之间来回访问的频率增加。对于该现象 Ohashi 和 Yahara（2001）提出假设，在花对传粉昆虫的视觉吸引上，更大的花朵更容易被传粉者发现，可节省传粉者觅食过程的搜寻时间，因此受到传粉者更多的访问。油茶花朵面积的增大，提高了被传粉昆虫发现的可能性，节省了传粉昆虫觅食过程的搜寻时间，有效提升了觅食效率。

油茶花朵的花面积大小差异，有利于传粉昆虫的来回访问，提高了花粉传递的效率。

雄蕊是被子植物花的雄性生殖器，通常具有鲜艳的颜色，对传粉者具有一定的吸引作用（Ashman and Schoen, 1994）。Tang 和 Huang（2007）研究发现减少雨久花 *Monochoria korsakowii* 的黄色雄蕊后，昆虫访花频率显著降低；刘春洋等（2018）研究发现开花期摘除部分油用牡丹 *Paeonia suffruticosa* 的雄蕊导致访花传粉昆虫多样性减少，是牡丹籽粒产量显著下降的主要原因。开花植物在进化过程中，花瓣、雄蕊等花部结构通过展现出多样的颜色吸引不同的传粉者，传粉者通过视觉感受并选择不同颜色的花，其中膜翅目蜂类偏好蓝、黄和白色（Schiestl and Johnson, 2013；纪霜等, 2023）。刘乐乐等（2013）研究发现，去除毛梗状金莲花 *Trollius ranunculoides* 黄色萼片后，传粉蜜蜂的访花频率显著下降。苏格兰地区一种入侵金雀儿 *Cytisus scoparius* 种群内存在红、黄、橙 3 种不同花色的花，研究调查发现传粉熊蜂对黄色花朵的访问频率最高，而对橙色和红色的访问频率较低（Devegili and Farji-Brener，2021）。本研究中油茶的雄蕊为黄色，会更有效的吸引油茶膜翅目传粉者。因此，油茶不同品种间雄蕊的数量和雄蕊群的展示面积增大，会加深传粉者对黄色的响应能力，对吸引膜翅目传粉昆虫的多样性起到十分重要的作用。

此外，气味和访花报酬产量在传粉生态学中同样被认为是吸引昆虫的重要因素（Chen *et al.*, 2009；Edge *et al.*, 2012；Nicholls and de Ibarra *et al.*, 2017）。研究发现人为减少马先蒿 *Pedicularis kansuensis* 和半扭卷马先蒿 *P. semitorta* 的花粉报酬后，主要传粉昆虫的访问次数出现明显的下降趋势（路广梅等，2021）。油茶雄蕊群的增大标志着油茶花药的增多，花药增多则表明花粉增多，即能为传粉者提供更多的报酬，促进了传粉者访问。同时，雄蕊是释放大量挥发性物质的主要器官，如热依拉穆·麦麦提吐尔逊和艾沙江·阿不都沙拉木（2023）发现石榴 *Punica granatum* 的黄色雄蕊释放了大量的挥发性化合物，其化合物种类和相对含量都是花朵各结构中占比最大的，是吸引传粉者昆虫的主要因素。油茶开花时，具有浓烈气味，而雄蕊群是油茶挥发性物质释放的主要器官之一。雄蕊群的增大会增加挥发性物质的释放浓度。目前，已有研究发现油茶的气味挥发性物质，以脂肪酸衍生物、芳香族化合物、萜类化合物为主，但未将气味与其对油茶优势传粉昆虫吸引相关联（贺兴江等，2020）。与前面研究类似，本文也发现油茶花朵伴随雄蕊数量增加，从颜色、气味、访花报酬三个方面增强对油茶传粉昆虫的吸引力，从而提高了花粉传递的效率。因此，雄蕊数量是油茶结果不可或缺的影响因素。本研究后续将基于油茶花朵挥发性气味，并通过比较花部结构与花朵挥发性气味对传粉昆虫的吸引力大小，开展油茶花对传粉昆虫吸引机制的相关研究。

参考文献 (References)

Ashman TL, Schoen DJ, 1994. How long should flowers live? *Nature*, 371(6500): 788–791.

Barrio M, Teixido AL, 2015. Sex-dependent selection on flower size in a large-flowered Mediterranean species: An experimental approach with *Cistus ladanifer*. *Plant Systematics and Evolution*, 301(1): 113–124.

Basari N, Ramli SN, Abdul-Mutalid NA, Shaipulah NFM, Hashim NA, 2021. Flowers morphology and nectar concentration determine the preferred food source of stingless bee, *Heterotrigona itama*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 24(2): 232–236.

Casper JK, Mario VM, Sara DL, 2021. Mutualisms and symmetry in plant-pollinator interactions. *Current Biology*, 31(2): 91–99.

Chen C, Song QS, Proffit M, Bessière JM, Li ZB, Hossaert-McKey M, 2009. Private channel: A single unusual compound assures specific pollinator attraction in *Ficus semicordata*. *Functional Ecology*, 23(5): 941–950.

Chen YZ, 2023. Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 43(7): 1–22. [陈永忠, 2023. 我国油茶科技进展与未来核心技术. 中南林业科技大学学报, 43(7): 1–22.]

Deng YY, Yu XL, Luo YB, 2010. The role of native bees on the reproductive success of *Camellia oleifera* in Hunan Province, Central South China. *Acta Ecologica Sinica*, 30(16): 4427–4436. [邓园艺, 喻勋林, 罗毅波, 2010. 传粉昆虫对我国中南地区油茶结实和结籽的作用. 生态学报, 30(16): 4427–4436.]

Devegili AM, Farji-Brener AG, 2021. Association of flower color with pollen reward may explain increased bumblebee visitation to the scotch broom yellow morph. *Plant Ecology*, 222(12): 1325–1334.

Ding GL, Zhang WF, Lu BY, Yang YZ, Zhou XP, Yang BY, Huang JX, Luo YB, 2023. The significance of artificial introduction of pollinators for improving the yield of *Camellia oleifera* and the potential biosafety issues. *Acta Ecologica Sinica*, 43(7): 2959–2967. [丁桂玲, 张武凡, 鲁宾雁, 杨友志, 周新平, 杨柏云, 黄家兴, 罗毅波, 2023. 人工引入传粉者对油茶丰产的意义及潜在的生物安全. 生态学报, 43(7): 2959–2967.]

Eckerter T, Buse J, Förschler M, Pufal G, 2019. Additive positive effects of canopy openness on European bilberry (*Vaccinium myrtillus*) fruit quantity and quality. *Forest Ecology and Management*, 433: 122–130.

Edge AA, van Nest BN, Johnson JN, Miller SN, Naeger N, Boyd SD, Moore D, 2012. Diel nectar secretion rhythm in squash (*Cucurbita pepo*) and its relation with pollinator activity. *Apidologie*, 43(1): 1–16.

He XJ, Wei XP, Zhou WC, Li Y, 2020. Odor chemical components of *Camellia oleifera* and nectar were analyzed by GC-MS. *Special Economic Animals and Plants*, 23(4): 18–21. [贺兴江, 韦小平, 周文才, 李应, 2020. 基于GC-MS法分析油茶花及花蜜气味化学成分. 特种经济动植物, 23(4): 18–21.]

He XY, Cai SP, Xiong Y, Han GY, Chen YD, Huang LR, Wu QR, 2010. Investigation on the pollination insect species and their foraging behaviors on *Camellia oleifera* in Fujian Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 37(4): 1–5, 30. [何学友, 蔡守平, 熊瑜, 韩国勇, 陈元德, 黄铃荣, 吴清荣, 2010. 福建省油茶林主要传粉昆虫种类及访花行为. 福建林业科技, 37(4): 1–5, 30.]

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.]

Hernanz S, Albaladejo RG, Lavergne S, Rubio E, MarínRodulfo M, Arroyo J, Aparicio A, 2023. Strong floral morphology conservatism during the rapid diversification of the genus *Helianthemum*. *Journal of American Biotany*, 110: e16155.

Huang HY, Luo J, Jiang XJ, Zhao CJ, Li GH, 2014. The investigation on Hymenoptera pollination insect of *Camellia oleifera* in Guangxi Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 41(2): 79–83. [黄华艳, 罗辑, 蒋学建, 赵程劼, 李桂华, 2014. 广西油茶传粉膜翅目昆虫调查. 福建林业科技, 41(2): 79–83.]

Huang DY, Gu P, Su TJ, Yu JF, He B, Niu ZQ, Zhu CD, 2015. The study on bionomics character of *Colletes gigas* (Hymenoptera, Colletidae). *Joumal of Environmental Entomology*, 37(1): 133–138. [黄敦元, 谷平, 苏田娟, 余江帆, 何波, 牛泽清, 朱朝东, 2015. 大分舌蜂主要生物学特性研究. 环境昆虫学报, 37(1): 133–138.]

Huang DY, He B, Gu P, Su TJ, Zhu CD, 2017. Discussion on current situation and research direction of pollination insects of *Camellia oleifera*. *Journal of Environmental Entomology*, 39(1): 213–220. [黄敦元, 何波, 谷平, 苏田娟, 朱朝东, 2017. 油茶传粉昆虫研究现状与方向的探讨. 环境昆虫学报, 39(1): 213–220.]

Huang DY, Kou RM, Orr MC, Li HY, Dou FY, Zhu CD, 2021. Comparison of two criteria on the essential number calculation of *Andrena camellia*. *Bulletin of Entomological Research*, 111(3): 364–370.

Huang HY, Luo J, Jiang XJ, Zhao CJ, Li GH, 2014. The investigation on hymenoptera pollination insect of *Camellia oleifera* in Guangxi Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 41(2): 79–83. [黄华艳, 罗辑, 蒋学建, 赵程劼, 李桂华, 2014. 广西油茶传粉膜翅目昆虫调查. 福建林业科技, 41(2): 79–83.]

Ishii HS, Harder LD, 2006. The size of individual *Delphinium* flowers and the opportunity for geitonogamous pollination. *Functional Ecology*, 20(6): 1115–1123.

Ji S, Yang L, Yan SJ, Ye JW, Liao JW, 2023. Research advances in the interactions between floral traits and flower-visiting insects. *World Forestry Research*, 36(2): 26–31. [纪霜, 杨丽, 闫淑君, 叶佳伟, 廖剑威, 2023. 植物花部特征与访花昆虫互作关系研究进展. 世界林业研究, 36(2): 26–31.]

Lázaro A, Jakobsson A, Totland Ø, 2013. How do pollinator visitation rate and seed set relate to species' floral traits and community context? *Oecologia*, 173(3): 881–893.

Li HY, Orr MC, Luo AC, Dou FY, Kou RM, Hu F, Zhu CD, Huang DY, 2021. Relationships between wild bee abundance and fruit set of *Camellia oleifera* Abel. *Journal of Applied Entomology*, 145(4): 277–285.

Liu CY, Wang QY, Sun Z, Fu W, Wang XY, Shi GA, 2018. Effects of removed stamens and petals on fruiting characteristics and seed oil ingredients of tree peony (*Paeonia ostii*) 'Fengdan' during flowering stage. *Acta Agriculturae Borveali-occidentalis Sinica*, 27(3): 411–417. [刘春洋, 王茜赟, 孙振, 付炜, 王晓亚, 史国安, 2018. 开花期摘除雄蕊与花瓣对'凤丹'牡丹结实性能和籽粒油脂成分的影响. 西北农业学报, 27(3): 411–417.]

Liu LL, Yang X, Gao TP, Zhang ZH, Liu ZJ, Zhao ZG, 2013. A

study on the attractive function of different floral structures in *Trollius ranunculoides* (Ranunculaceae). *Acta Prataculturae Sinica*, 22(3): 190–195. [刘乐乐, 杨晓, 高天鹏, 张兆华, 刘左军, 赵志刚, 2013. 毛茛状金莲花花部结构的吸引功能. 草业学报, 22(3): 190–195.]

Lu GM, Lu NN, Ma Y, Gao CF, 2021. Floral traits and their manipulation of foraging behaviors of pollinators of two sympatric *Pedicularis* species. *Journal of Lanzhou University* (*Natural Sciences Edition*), 57(3): 338–343, 352. [路广梅, 路宁娜, 马妍, 高翠芳, 2021. 同域分布两种马先蒿植物的花特征及其对传粉昆虫访花行为的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 57(3): 338–343, 352.]

Luo J, Zhao CJ, Huang HY, Jiang XJ, 2014. Variety investigation on pollinating insect of *Camellia oleifera* in Guangxi Province. *Journal of Guangxi Forestry Science*, 43(1): 61–65. [罗辑, 赵程劼, 黄华艳, 蒋学建, 2014. 广西油茶传粉昆虫多样性调查. 广西林业科学, 43(1): 61–65.]

National Forestry and Grassland Administration, 2016. Notice on the issuance of the " National Plan for the Production and Development of Bulk Oil Crops (2016-2020). " http://www.moa.gov.cn/nybgb/2016/dishiqi/201711/t20171126_5919612.htm. [国家林业草原局, 2016. 关于印发《全国大宗油料作物生产发展规划(2016-2020年)》通知. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2016/dishiqi/201711/t20171126_5919612.htm.]

National Forestry and Grassland Administration, 2020. China Forester and Grassland Statistical Yearbook 2018. Beijing: China Forestry Publishing House. 1–386. [国家林业和草原局, 2020. 中国林业和草原统计年鉴 2018. 北京: 中国林业出版社. 1–386.]

Nicholls E, de Ibarra NH, 2017. Assessment of pollen rewards by foraging bees. *Functional Ecology*, 31(1): 76–87.

Ohashi K, Yahara T, 2001. Behavioral Responses of Pollinators to Variation in Floral Display Size and Their Influences on the Evolution of Floral Traits. Cognitive Ecology of Pollination, Animal Behavior and Floral Evolution. Cambridge: Cambridge University Press. 274–296.

Qiu JS, Zhang NN, Liu TT, Tian MJ, Xie ZH, Chen XM, 2018. Biological characteristics of pollination of *Anderena camelia* Wu. *Biotic Resources*, 40(2): 176–181. [邱建生, 张念念, 刘童童, 田茂娟, 谢正华, 陈晓鸣, 2018. 油茶地蜂的传粉生物学特性研究. 生物资源, 40(2): 176–181.]

Reyilamu · Maimaitituerxun, Aysajan·Abdusalam, 2023. Exploring the influence of petal and stamen color on pollinator and reproductive success in *Punica granatum*. *Biodiversity Science*, 31(7): 58–65. [热依拉穆·麦麦提吐尔逊, 艾沙江·阿不都沙拉木, 2023. 石榴花瓣和雄蕊对其传粉过程与繁殖成功的影响. 生物多样性, 31(7): 58–65.]

Schiestl FP, Johnson SD, 2013. Pollinator-mediated evolution of floral signals. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(5): 307–315.

Tang LL, Huang SQ, 2007. Evidence for reductions in floral attractants with increased selfing rates in two heterandrous species. *New Phytologist*, 175(3): 588–595.

Wei W, Li XY, Wei X, Lu W, Yang XH, Zheng XL, 2017. Review of species, nesting and pollination behaviors of pollinating insects in *Camellia* spp. *Guangxi Forestry Science*, 46(1): 98–101. [韦维, 李雪媛, 韦幸, 陆温, 杨秀好, 郑霞林, 2017. 油茶传粉昆虫种类、筑巢及访花行为的研究进展. 广西林业科学, 46(1): 98–101.]

Wu YR, 1977. The pollinating bees on *Camellia olifera* with descriptions of 4 new species of the genus *Andrena*. *Acta Entomologica Sinica*, 20(2): 199–204. [吴燕如, 1977. 油茶传粉蜜蜂的鉴别及地蜂属四个新种. 昆虫学报, 20(2): 199–204.]

Xu AK, Zhao KX, Wei W, Liu WP, Yan Q, Lou LH, Huang DY, 2023. Study and application of liquid pollination technology of *Camellia oleifera*. *Journal of Chongqing Normal University* (*Natural Science Edition*), 40(6): 122–128. [徐安糠, 赵凯旋, 魏玮, 刘文平, 晏巧, 娄利华, 黄敦元, 2023. 油茶液体辅助授粉技术研究及应用. 重庆师范大学学报(自然科学版), 40(6): 122–128.]

Yuan B, Hu GX, Zhang XX, Yuan JK, Fan XM, Yuan DY, 2022. What are the best pollinator candidates for *Camelia oleifera*: Do not forget hoverflies and flies. *Insects*, 13(6): 539.

Zhang H, Liu WP, Wei W, Zhao KX, Lu HH, Li HY, Zhou ZY, Niu ZQ, Zhu CD, Huang DY, 2022. Pollinator communities diversity in the main *Camellia oleifera* producing areas of China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1223–1239. [张欢, 刘文平, 魏玮, 赵凯旋, 陆欢欢, 李红英, 周泽扬, 牛泽清, 朱朝东, 黄敦元, 2022. 中国油茶主产区传粉昆虫群落多样性分析. 应用昆虫学报, 59(6): 1223–1239.]

Zhao YH, Ren ZX, Lázaro A, Wang H, Bernhardt P, Li HD, Li DZ, 2016. Floral traits influence pollen vectors' choices in higher elevation communities in the Himalaya-Hengduan Mountains. *BMC Ecology*, 16: 26.]

Zhuang RL, 2008. Oil Tea in China (Second Edition). Beijing: China Forestry Publishing House. 33–35. [庄瑞林, 2008. 中国油茶(第二版). 北京: 中国林业出版社. 33–35.]