

蜜蜂授粉对咖啡果实性状的影响

邓尚靠¹, 秦加敏¹, 展江¹, 张洋逸¹, 陶玉波², 晏天皓², 李劲松², 张芬²,
王大能², 梁铖^{1*}

1. 云南省农业科学院蚕桑蜜蜂研究所, 云南蒙自 661101; 2. 西盟佤族自治县农业农村和科学技术局畜牧工作站, 云南西盟 665700

摘要: 咖啡是云南省重要的经济作物, 为了探明蜜蜂授粉对咖啡种植生产的影响, 本研究在云南省西盟县力所乡的咖啡花期调查了访花蜜蜂的种类及优势蜂种的访花行为, 并对蜜蜂自由授粉组和对照组咖啡果实性状进行测定和差异分析。结果表明: 咖啡花期访花蜂种包括大蜜蜂 (*Apis dorsata*)、中华蜜蜂 (*A. cerana cerana*)、小蜜蜂 (*A. florea*) 和熊蜂 (*Bombus* spp.), 主要为大蜜蜂和中华蜜蜂。1 天中 9:00—17:00 期间均有大蜜蜂访花, 而中华蜜蜂访花主要集中在上午, 但中华蜜蜂的单花停留时间极显著长于大蜜蜂 ($P<0.01$); 人工引入中华蜜蜂群, 可增加咖啡访花蜜蜂数量; 蜜蜂自由授粉组与对照组相比, 咖啡坐果率、单果质量、种子质量和种子数显著增高, 果皮变薄, 其他性状变优, 同时采摘成熟度高的果实占比较高。由此可见, 蜜蜂授粉可显著改善咖啡果实性状, 促进果实成熟, 有效提高咖啡的品质, 本研究结果可为咖啡种植提质增效提供理论依据。

关键词: 咖啡; 授粉; 中华蜜蜂; 品质; 成熟度; 访花

中图分类号: S571.2 文献标志码: A

Effects of Bee Pollination on Coffee Fruit Traits

DENG Shangkao¹, QIN Jiamin¹, ZHAN Jiang¹, ZHANG Yangyi¹, TAO Yubo², YAN Tianhao², LI Jinsong²,
ZHANG Fen², WANG Daneng², LIANG Cheng^{1*}

1. Sericulture and Apiculture Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Mengzi, Yunnan 661101, China;
2. Animal Husbandry Workstation, Bureau of Agriculture, Rural Areas, Science and Technology of Ximeng Va Autonomous County, Ximeng, Yunnan 665700, China

Abstract: Coffee is an important economic crop in Yunnan, China. To investigate the effects of bee pollination on coffee production, this study examined the species of pollinating bees and the foraging behavior of dominant bee species during the coffee flowering period in Lisou, Ximeng, Yunnan. Additionally, the study evaluated and compared the fruit traits of coffee under bee pollination and control groups. The results showed that the bee species visiting coffee flowers included *Apis dorsata*, *Apis cerana cerana*, *Apis florea* and bumblebees (*Bombus* spp.), with *A. dorsata* and *A. cerana cerana* being the dominant species. *A. dorsata* visited coffee flowers throughout the day (from 9:00 to 17:00), while *A. cerana cerana* primarily foraged in the morning. However, the visiting duration per flower of *A. cerana cerana* was extremely significantly longer than that of *A. dorsata* ($P<0.01$). Introducing *A. cerana cerana* colonies increased the number of flower-visiting bees. Compared with the control group, the bee pollination group showed significantly higher fruit set rates, single fruit weight, seed weight, and seed number. Moreover, the fruit skins became thinner, and other traits improved, with a higher proportion of fruits reaching high maturity at harvest. The findings suggest that bee pollination can significantly improve coffee fruit traits, promote fruit maturation, and effectively enhance coffee quality. The results would provide a theoretical basis for improving coffee cultivation and productivity.

收稿日期 2025-01-03; 接受日期 2025-02-16

基金项目 国家现代农业蜂产业技术体系 (No. CARS-44-SYZ14); 云南省科技人才与平台计划项目 (No. 202405AD350070); 蚕蜂所 2023 年度青年创新基金项目 (No. QC2023013)。

作者简介 邓尚靠 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 蜜蜂授粉技术。*通信作者 (Corresponding author): 梁铖 (LIANG Cheng), E-mail: lc@yaas.org.cn。

Keywords: coffee; pollination; *Apis cerana cerana*; quality; maturity; flower-visiting

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.012

咖啡 (*Coffea arabica* L.) 为茜草科 (Rubiaceae) 咖啡属 (*Coffea*) 多年生常绿灌木^[1], 是世界三大饮料作物之一^[2]。咖啡源产于埃塞俄比亚地区, 主要分布在热带地区^[3], 早在 15 世纪已经开始种植, 18 世纪以来, 在欧洲、亚洲、非洲和拉丁美洲的热带、亚热带地区开始广泛种植, 现已成为世界上重要的经济作物之一^[4]。19 世纪, 咖啡开始引入我国, 随后在云南、海南等地广泛种植, 目前云南省已成为我国最大的咖啡种植地区 and 出口产地^[5], 我国约 99% 的产量和种植面积都在云南省, 在国内外市场上具有较强的市场竞争力^[6]。近年来, 随着咖啡消费量的快速增长, 咖啡产业在云南省经济发展中占据重要地位, 在推进边疆地区乡村振兴中起到非常重要的作用。随着国民生活水平的日益提高, 以咖啡为主要原材料的各大饮品需求量越来越大, 进而对咖啡豆 (咖啡种子) 品质要求也越来越高。然而云南各地区咖啡产量和品质参差不齐, 除品种、种植管理和产地等因素外, 咖啡豆的产量和质量与生产中的授粉有很大关系。

咖啡是云南省普洱市西盟佤族自治县的支柱产业, 为促进咖啡种植提质增效, 增加农民的收入, 引入蜜蜂为咖啡授粉作为一项栽培技术在当地开展。蜜蜂授粉是我国农业绿色、优质、高效生产的重要配套技术^[7]。由于咖啡属于自花授粉植物^[8], 蜜蜂为咖啡授粉可显著增加咖啡雄蕊花粉落到雌蕊柱头的概率, 同时也增加了异花授粉的机率, 从而提高咖啡的结实率^[9-12]。咖啡豆是咖啡主要的可食用部分, 研究表明, 通过蜜蜂授粉可以显著增加咖啡果实的产量与质量, 增加优质咖啡豆的产出率, 带来更大的经济效益^[8, 13-17]。西盟县咖啡连片种植且面积较大, 但授粉蜂的种类、数量及其授粉行为, 以及引入人工培育的蜂群对咖啡坐果率及果实性状的影响尚不清楚。

咖啡果实性状会影响其商品价值, 国际市场竞争激烈, 唯有优良的品质才有较好的竞争力。因此, 本研究以云南省西盟县力所乡咖啡为研究对象, 探究蜜蜂授粉对咖啡果实性状的影响, 期为咖啡种植生产技术集成提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2023 年 2 月至 2024 年 2 月在云南省西盟佤族自治县力所乡开展。西盟县位于云南省西南部, 地处 99°21'E~99°33'E, 22°35'N~22°43'N, 境内沟壑纵横, 最高海拔 2458.9 m, 最低海拔 590.0 m, 河流交叉分布, 呈树枝状由北向南注入南卡江。西盟县受孟加拉湾西南暖湿气流影响, 属亚热带海洋性季风气候, 年均温 15.3 °C, 年均降水量 2758.3 mm, 降雨主要集中在夏秋两季, 干湿分明, 常年无霜。

1.1.2 试验材料 西盟县力所乡茨米竹村种植的卡帝姆 (Catimor C1F7963) 咖啡, 授粉蜂群为当地饲养的中华蜜蜂 (*Apis cerana cerana*), 每群为 4 足框, 巢框内围尺寸长 428.00 mm, 高 202.00 mm, 上框梁宽 25.00 mm。

1.1.3 主要设备 360 智能摄像头小水滴 AI 版 (D930, 北京视觉世界科技有限公司)、数显游标卡尺 (南京苏测计量仪器有限公司)、白色透明尼龙网袋 (40 目)、电子称、照相机等。

1.2 方法

1.2.1 访花蜂种多样性调查及优势蜂种访花行为观察 在咖啡花期观察, 于每天中 9:00、11:00、13:00、15:00 和 17:00 的 5 个时间点, 记录每株树上访花蜜蜂的种类及其数量。采用 Berger-Parker 指数 (D) 分析访花蜂种的物种多度 (优势度), 计算公式: $D=N_i/N$, 式中 N_i 为第 i 种访花蜂种个体的数量, N 为所有访花蜂种的总数量。依据正态分布的原则, 定义为 $D \geq 0.10$ 时为访花蜂种优势种; $0.05 \leq D < 0.10$ 时为丰盛种; $0.01 \leq D < 0.05$ 时为常见种; $D < 0.01$ 时为稀有种。

在咖啡林不同方向选择 3 个试验点, 每个试验点选择 1 株长势开花状态相似的咖啡树作为观测目标, 对每天 9:00、11:00、13:00、15:00、17:00 的 5 个时间点 1 min 内同一株树上访问咖啡花的优势蜂种的数量进行记录, 连续记录 3 d。此外, 还记录蜜蜂单花停留时间 (蜜蜂在 1 朵花上采集的时间), 连续记录 3 d。

中华蜜蜂出、归巢活动调查: 咖啡盛花期, 选取 3 群群势相当的人工引入的中蜂群, 在蜂箱巢门口放置 360 智能摄像头, 24 h 拍摄记录巢门

口工蜂活动情况，通过视频回放，记录每天 7:00—19:00 每个整点 1 min 内出巢、归巢和携带花粉的工蜂数量，连续晴暖天气记录 3 d。

1.2.2 不同授粉方式对咖啡果实性状的影响 采用分区对比的试验方法，在咖啡园同一试验地选择树龄、冠幅、树高、花蕾数量相似且健康的咖啡 12 株，分别设置 1 个自由授粉组（蜜蜂授粉试验区）和 1 个对照组（隔离无蜂授粉试验区），每个试验区 6 株咖啡树。自由授粉组：每株挂牌标记 50 枝花朵露白即将要开放的花枝，共 300 枝，记录每个花枝上的花蕾数量，花朵开放后让蜜蜂自由采集咖啡花；对照组：在每株咖啡树挂牌标记 50 枝开花状态与蜜蜂自由授粉组相似的花枝，共 300 枝，分别记录每个花枝上的花蕾数量，并用尼龙网袋罩上，防止蜜蜂接触花朵。坐果率调查：花期结束 30 d 后，分别统计蜜蜂自由授粉组和对照

组咖啡的坐果数量。坐果率=(坐果数/花蕾数)×100%；咖啡果实采摘期，将之前标记的自由授粉组和对照组咖啡果实全部摘下。果实参照 KAZAMA 等^[18]和李亚麒等^[19]对咖啡成熟度的分类方法，将咖啡果实的成熟度按照颜色分为 I（绿色）、II（红绿色）、III（红黄色）、IV（红色）、V（紫红色）5 个等级（图 1），统计不同颜色等级咖啡果实的数量，称取果质量（g）、种子质量（g）。

咖啡果实性状测定：各成熟度随机选取 100 个果实用于果实性状测定。利用游标卡尺测量果实纵径、果实横径、果皮厚、种子纵径、种子横径，精确到 0.01 mm。记录种子数，并计算果形指数、种形指数。此外，分别记录不同试验组 500 个果实每个果实的种子总数，并计算种子数分别为 0、1、2、3 粒的果实百分比。果形指数=果实纵径/果实横径；种形指数=种子纵径/种子横径。



图 1 不同成熟度咖啡果实颜色参考

Fig. 1 Color reference for coffee fruits at different maturity stages

1.3 数据处理

利用 SPSS 26.0 软件对每天不同时段咖啡树上访花蜜蜂数量、中蜂的出巢、归巢及携粉蜜蜂数量、不同成熟度果实性状进行单因素方差分析（one-way ANOVA）；对优势蜂种的单花停留时间、不同授粉方式咖啡坐果率和果实性状进行统计并 *t* 检验。每天 5 个时段咖啡植株未观察到蜜蜂的时段，访花蜜蜂数量记录为 0，数据进行标准化处理后，进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 访花蜂种多样性调查及优势蜂种访花行为观察

在咖啡园能观察到大蜜蜂（*A. dorsata*）、中华蜜蜂（*A. cerana cerana*）、小蜜蜂（*A. florea*）和熊蜂（*Bombus* spp.）4 种蜜蜂，3 d 观察记录访花蜜蜂共 1906 头，其中大蜜蜂 1222 头，占比 64.11%（*D*=0.6411）；中华蜜蜂 669 头，占比 35.10%（*D*=0.3510），小蜜蜂 13 头，占比 0.68%（*D*=0.0068），熊蜂 2 头，占比 0.10%（*D*=0.0010），

其中大蜜蜂和中华蜜蜂为咖啡的优势访花蜂种。

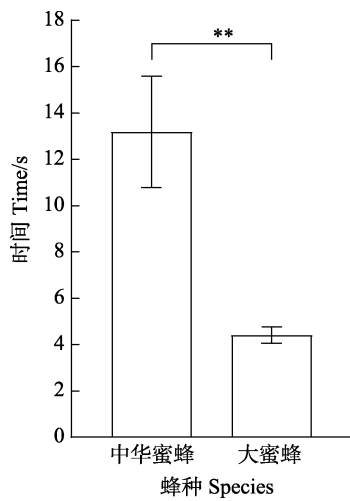
通过对不同时间 1 min 内同一株咖啡树上访花的大蜜蜂和中华蜜蜂数量进行比较，结果显示 1 天中 9:00、11:00、13:00、15:00 和 17:00 各个时段大蜜蜂和中华蜜蜂数量差异显著（*P*<0.05），17:00 大蜜蜂数量显著低于 15:00（*P*<0.05），9:00、11:00、13:00、15:00 之间大蜜蜂数量差异不显著；9:00 和 11:00 中华蜜蜂数量差异不显著，但显著高于 15:00 和 17:00（*P*<0.05），13:00、15:00 和 17:00 中华蜜蜂数量差异不显著（表 1）。在 9:00—17:00 时间段均有大蜜蜂访问咖啡花，且在各时间点 1 min 内 1 株树上约有 3 头以上大蜜蜂访花，15:00 时 1 min 内观察到访花的大蜜蜂数量最多（7.08±3.82）头；而中华蜜蜂访问咖啡花主要在上午，15:00 以后几乎无中华蜜蜂访花（表 1）。

对中华蜜蜂和大蜜蜂的单花停留时间进行比较分析，结果显示：中华蜜蜂和大蜜蜂的单花停留时间分别为（13.19±2.40）s 和（4.41±0.35）s，中华蜜蜂的单花停留时间显著高于大蜜蜂（*P*<0.01）（图 2）。

表 1 1 d 中不同时间点咖啡树上访花蜜蜂数量
Tab. 1 Number of flower-visiting bees on coffee trees at different time during the day

时间 Time	大蜜蜂数量 Number of <i>A. dorsata</i>	中华蜜蜂数量 Number of <i>A. cerana cerana</i>
9: 00	4.64±2.09 ^{ab}	8.07±7.21 ^a
11: 00	5.05±2.56 ^{ab}	3.15±2.51 ^{ab}
13: 00	5.86±3.06 ^{ab}	1.36±0.79 ^{bc}
15: 00	7.08±3.82 ^a	1.20±0.51 ^c
17: 00	3.80±2.08 ^b	1.08±0.28 ^c

注: 同列不同小写字母表示不同时间点差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at different time ($P<0.05$).



**表示差异极显著 ($P<0.01$)。
** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 2 不同蜂种单花停留时间比较

Fig. 2 Comparison of single-flower visit duration between different bee species

1 d 中不同时间点 1 min 内, 中华蜜蜂出巢、归巢和携粉的工蜂数量均有差异。11: 00、12: 00 时间点 1 min 内出巢的工蜂数量最多, 分别为 (136.5±7.1)头、(151.3±16.1)头, 显著高于其他时间点 ($P<0.05$), 其次是 13: 00, 为(99.1±6.7)头, 数量最少的是 19: 00, 为(10.9±1.1)头, 蜜蜂出巢时间主要集中在 10: 00—14: 00 之间; 同样, 在 11: 00、12: 00 的 2 个时间点 1 min 内蜜蜂归巢数量最多, 分别为(107.0±6.1)头、(105.0±9.5)头, 显著高于其他时间点 ($P<0.05$), 其次是 13: 00, 为(72.8±6.0)头, 14: 00, 为 (51.9±4.8)头, 归巢数量最少的是 8: 00, 为 (9.5±0.8)头, 蜜蜂归巢时间主要集中在 11: 00—14: 00 之间; 携粉蜜蜂数量最多的时间点为 11: 00、12: 00、13: 00, 显著高于其他时间点 ($P<0.05$), 其次为 10: 00、14: 00 时间

点, 显著高于 7: 00、8: 00、9: 00、15: 00、16: 00、17: 00、18: 00、19: 00 时间点 ($P<0.05$) (表 2)。

综上所述, 力所乡咖啡园内野生大蜜蜂是咖啡主要的访花昆虫, 人工引入中华蜜蜂群, 可以增加咖啡访花昆虫数量, 中华蜜蜂出巢、归巢高峰时段滞后于咖啡访花高峰时段, 其采集活动可能受到咖啡林周边其他蜜粉源植物的影响。

表 2 1 d 中不同时间点中华蜜蜂出巢、归巢、携粉的工蜂数量

Tab. 2 Daily variation in the number of foraging, returning, and pollen-carryingworkers of *A. cerana cerana* at different time during the day

时间 Time	蜂数量 Number of bees		
	出巢 Foraging	归巢 Returning	携粉 Pollen-carrying
7: 00	24.7±3.3 ^{de}	25.0±3.5 ^{de}	0.8±0.2 ^f
8: 00	14.3±2.2 ^e	9.5±0.8 ^f	2.6±0.4 ^{cd}
9: 00	31.0±3.2 ^{de}	16.9±1.7 ^{ef}	3.7±0.5 ^c
10: 00	65.6±7.4 ^c	35.4±2.8 ^d	6.1±0.7 ^b
11: 00	136.5±7.1 ^a	107.0±6.1 ^a	10.4±0.7 ^a
12: 00	151.3±16.1 ^a	105.0±9.5 ^a	10.7±0.9 ^a
13: 00	99.1±6.7 ^b	72.8±6.0 ^b	9.8±0.9 ^a
14: 00	65.3±6.7 ^c	51.9±4.8 ^c	6.8±0.7 ^b
15: 00	38.1±4.3 ^d	34.4±3.0 ^d	2.5±0.3 ^{cde}
16: 00	36.8±4.3 ^d	27.9±2.7 ^{de}	1.2±0.2 ^{def}
17: 00	35.1±7.2 ^d	27.3±5.1 ^{de}	0.8±0.3 ^f
18: 00	37.2±7.4 ^d	24.0±4.9 ^{de}	0.9±0.3 ^{ef}
19: 00	10.9±1.1 ^e	21.9±2.1 ^{def}	0.3±0.1 ^f

注: 同列不同小写字母表示不同时间点差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at different time ($P<0.05$).

2.2 不同授粉方式对咖啡坐果率及单果质量、种子质量的影响

由表 3 可见, 蜜蜂自由授粉组咖啡坐果率为 95.06%, 对照组坐果率为 84.55%, 通过蜜蜂授粉坐果率提高 10.51%, 说明蜜蜂授粉能有效增加咖啡的坐果率。

表 3 不同授粉方式对咖啡坐果率的影响

Tab. 3 Effect of different pollination methods on coffee fruit set rate

处理 Treatment	花朵数 Number of flowers	坐果数 Number of fruit setting	平均坐果率 Average rate of fruit setting/%
对照	14 417	12 190	84.55
自由授粉	19 293	18 339	95.06

蜜蜂授粉成熟度 I 的咖啡单果质量和对照差异不显著，但 II、III、IV、V 的单果质量和种子质量均极显著高于对照 ($P<0.01$) (表 4)，表明蜜蜂授粉可以有效提高咖啡豆的品质。随着成熟度的增加，单果质量和种子质量逐渐增大，成熟度 V 紫红色单果质量和种子质量最优。

表 4 不同授粉方式成熟咖啡果单果质量和种子质量比较
Tab. 4 Comparison of single fruit weight and seed weight of mature coffee fruit under different pollination methods

指标 Index	成熟度 Maturity	自由授粉 Free pollination	对照 Control
单果质量/g	I	0.97±0.22 ^a	0.90±0.28 ^a
	II	1.27±0.26 ^A	0.96±0.32 ^B
	III	1.34±0.30 ^A	1.03±0.26 ^B
	IV	1.48±0.30 ^A	1.18±0.31 ^B
	V	1.74±0.31 ^A	1.37±0.35 ^B
种子质量/g	I	0.58±0.17 ^A	0.50±0.19 ^B
	II	0.75±0.20 ^A	0.53±0.21 ^B
	III	0.81±0.21 ^A	0.59±0.22 ^B
	IV	0.90±0.20 ^A	0.67±0.21 ^B
	V	0.97±0.21 ^A	0.76±0.24 ^B

注：同行不同小写字母表示自由授粉与对照间差异显著 ($P<0.05$)；同行不同大写字母表示自由授粉与对照间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between free pollination and control group ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same row indicate extremely significant difference between free pollination and control group ($P<0.01$).

2.3 不同授粉方式对咖啡果实外观性状影响

由图 3 可以看出，在咖啡果同一采收时间点，自由授粉成熟度 V 的果实占比最高 (41.24%)，其次是 IV，占比 37.69%，I 占比最少 (3.38%)。对照组成熟度 IV 占比最高 (31.17%)，其次是 III，占比 26.88%，成熟度 V 仅占比 19.68%。整体而

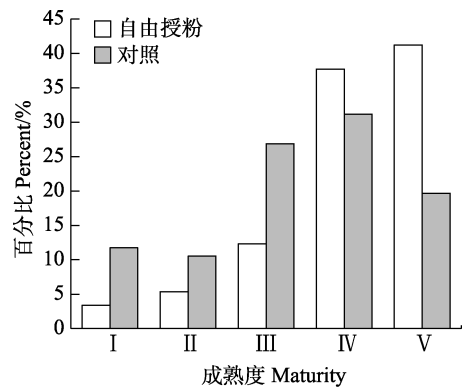


图 3 不同授粉方式咖啡果实成熟度比例
Fig. 3 Proportion of coffee fruit maturity under different pollination methods

言，相同种植管理模式下，同批次开花的咖啡，同一采收期，自由授粉的成熟度 IV 和 V 占比较高，表明蜜蜂授粉促进咖啡果成熟，有利于采收期咖啡果实整齐度。

对不同成熟度的咖啡果实性状进行比较分析，结果见表 5，自由授粉的果形指数和种形指数大于对照，种子数极显著多于对照 ($P<0.01$)。其中，成熟度 I 的咖啡果，自由授粉后果实横径、果形指数、种子纵径、种子横径、种子数 5 项指标均显著高于对照 ($P<0.05$)，但果实纵径、果皮厚度、种形指数与对照相比差异不显著。成熟度 II 的咖啡果，自由授粉后果实纵径、果实横径、种子纵径、种子横径、种形指数、种子数 6 项指标均极显著高于对照 ($P<0.01$)，果形指数显著高于对照 ($P<0.05$)。成熟度 III 的咖啡果，自由授粉的果实种子数极显著高于对照 ($P<0.01$)，果实纵径、种子纵径和种子横径均显著高于对照 ($P<0.05$)。成熟度 IV 的咖啡果，自由授粉的果形指数、种子横径均显著高于对照 ($P<0.05$)，种子数极显著高于对照 ($P<0.01$)，果皮厚显著低于对照 ($P<0.05$)。成熟度 V 的咖啡果，果实纵径、果实横径、种子数均极显著高于对照 ($P<0.01$)，种子横径显著高于对照 ($P<0.05$)，果皮厚极显著低于对照 ($P<0.01$)。随着成熟度的增加，果实纵径、果实横径、果皮厚、种子横径、种子纵径逐渐增加，果形指数、种形指数总体上逐渐减小，种子数变化不大 (表 5)。

咖啡果实一般有 2 粒种子，也存在 1 粒或者 3 粒；含有 2 粒种子者，种子呈半椭圆形；1 粒者呈橄榄球形，俗称圆豆；3 粒者呈三角形，俗称三角豆^[20]。通过对自由授粉、对照的咖啡种子数进行统计 (图 4)，结果显示：自由授粉种子数为 0 和 1 粒的果实占比分别为 0.18% 和 13.44%，低于对照的 1.77% 和 36.72%，种子数为 2 粒和 3 粒的果实分别占比 84.71% 和 1.66%，均高于对照的 61.52% 和 0.59%。表明自由授粉可以减少咖啡种子为 0 (空仁) 和种子为 1 (圆豆) 的比例，增加种子数，改善咖啡豆品质。

综上所述，自由授粉后不同成熟度咖啡果的种子数极显著高于对照，果实纵径、果实横径、果形指数、种子纵径、种子横径、种形指数和单果种子数 7 项指标整体高于对照，果皮厚低于对照，表明自由授粉可以有效改善咖啡果的外观性状。

表 5 不同授粉方式的咖啡果实性状比较
Tab. 5 Comparison of coffee fruit traits under different pollination methods

指标 Index	成熟度 Maturity	自由授粉 Free pollination	对照 Control
果实纵径/mm	I	14.18±1.23 ^a	12.69±1.36 ^a
	II	14.41±0.94 ^A	12.34±1.39 ^B
	III	14.13±1.21 ^a	12.93±1.04 ^b
	IV	14.56±1.14 ^a	13.25±1.07 ^a
	V	15.60±0.71 ^A	13.37±1.04 ^B
果实横径/mm	I	12.31±1.13 ^A	11.34±1.34 ^B
	II	12.74±0.98 ^A	11.28±1.43 ^B
	III	12.88±1.05 ^a	12.16±1.14 ^a
	IV	13.41±1.07 ^a	12.91±1.12 ^a
	V	14.68±0.70 ^A	13.30±1.26 ^B
果形指数	I	1.15±0.06 ^a	1.12±0.07 ^b
	II	1.13±0.06 ^a	1.10±0.08 ^b
	III	1.10±0.08 ^a	1.07±0.07 ^a
	IV	1.09±0.06 ^a	1.03±0.05 ^b
	V	1.06±0.05 ^a	1.01±0.06 ^a
果皮厚度/mm	I	0.73±0.15 ^a	0.88±0.18 ^a
	II	0.83±0.13 ^a	0.84±0.14 ^a
	III	0.81±0.12 ^a	0.80±0.16 ^a
	IV	0.71±0.10 ^B	0.75±0.15 ^A
	V	0.72±0.12 ^B	0.89±0.16 ^A
种子纵径/mm	I	11.25±0.85 ^A	10.40±1.08 ^B
	II	11.74±0.76 ^A	10.28±1.13 ^B
	III	11.72±0.95 ^a	10.43±0.79 ^b
	IV	11.69±0.95 ^a	10.69±0.85 ^a
	V	12.23±0.83 ^a	10.57±0.82 ^a
种子横径/mm	I	8.18±1.02 ^a	7.95±1.04 ^b
	II	8.43±0.52 ^A	8.09±1.03 ^B
	III	8.52±0.74 ^a	8.01±0.85 ^b
	IV	8.45±0.64 ^A	8.38±0.85 ^B
	V	8.82±0.66 ^a	8.40±0.83 ^b
种形指数	I	1.42±0.49 ^a	1.32±0.10 ^a
	II	1.39±0.08 ^A	1.28±0.10 ^B
	III	1.38±0.10 ^a	1.31±0.09 ^a
	IV	1.39±0.08 ^a	1.28±0.09 ^a
	V	1.39±0.09 ^a	1.26±0.08 ^a
种子数/个	I	1.85±0.36 ^A	1.64±0.56 ^B
	II	1.77±0.45 ^A	1.54±0.56 ^B
	III	1.88±0.38 ^A	1.52±0.54 ^B
	IV	1.95±0.33 ^A	1.69±0.49 ^B
	V	1.91±0.32 ^A	1.64±0.48 ^B

注: 同行不同小写字母表示自由授粉与对照间差异显著 ($P<0.05$); 同行不同大写字母表示自由授粉与对照间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between free pollination and control group ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same row indicate extremely significant difference between free pollination and control group ($P<0.01$).

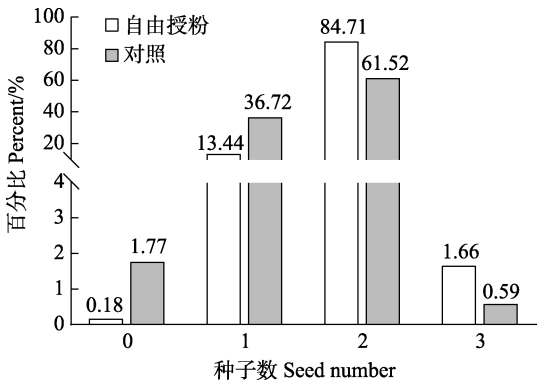


图 4 不同授粉方式咖啡种子数的占比
Fig. 4 Proportion of coffee seed number under different pollination methods

3 讨论

咖啡是高度依赖蜜蜂授粉的植物^[21], RICKETTS^[9]和 YOUNG 等^[22]研究发现, 咖啡主要依靠独居蜂或群居蜜蜂授粉, 独居蜂与群居蜜蜂相比, 喙更长, 更易吸食到花蜜, 访花积极性更高, 成功为咖啡授粉的机率更高, 所以独居蜂单次访问咖啡坐果率更高^[23]。本研究也发现在一天中的 9:00—17:00 时间段均有野生大蜜蜂访问咖啡花, 咖啡的花冠小且比较深, 大蜜蜂体型大且喙较长, 即便一天中只有少量花蜜也可以进行采集。但是因为单朵咖啡花寿命短, 单朵花对蜜蜂的吸引力只有 1 d, 长期进化过程中蜜蜂已有最佳访花时间^[12, 24], 野生蜜蜂有自身的适应性, 其中大蜜蜂因体型大访花积极性较高, 小蜜蜂与之相反, 但二者的种群数量不稳定, 易迁徙、对生存环境要求较高、不受人为控制, 对咖啡规模种植模式的授粉的性能存在不确定性^[25-27]。虽然本研究发现中华蜜蜂访问咖啡花主要集中在上午, 但中华蜜蜂的单花停留时间显著高于大蜜蜂, 引入饲养的中华蜜蜂群也可增加访花蜜蜂的数量, 中华蜜蜂的授粉效果还需在其他生境中进一步评价。与野生蜜蜂相比, 中华蜜蜂可人工饲养扩繁、可控制、可移动, 咖啡花期虽然中蜂访花行为受到其他蜜粉源植物影响, 但适当增加蜂群数量, 可大幅提高采集咖啡花的中华蜜蜂数量。所以, 对于规模化种植咖啡, 引入人工饲养的中华蜜蜂群, 能更好地保障咖啡授粉结实。东盟县多山, 自然环境较好, 目前咖啡访花野生蜜蜂较多, 证明了传粉昆虫多样性保障作物增产的重要性, 发展种植业同时保护野生蜜蜂意义重大。熊蜂作为半社会性昆虫, 季节性出没, 春季是种群

数量最少的时期,野生熊蜂对于规模化种植的咖啡授粉效果不明显。目前熊蜂已实现工厂化周年繁育,在野生蜜蜂较少地区,商业授粉熊蜂也可作为咖啡授粉的选择,从生态保护方面,本土熊蜂的驯化与利用尤为重要。

近年来,随着农业集约化和野生蜜蜂的栖息地遭受破坏,授粉蜜蜂种群数量下降^[28-29],利用人工饲养的蜜蜂为作物授粉受到了高度重视。咖啡是否需要引入蜜蜂授粉深受人们的关注,早期研究认为咖啡属于自花授粉植物,不需要蜜蜂进行授粉^[30],但随后大多学者研究发现,引入蜜蜂授粉可显著改善咖啡的产量与质量^[8, 31]。本研究也发现引入饲养的蜜蜂与野生蜜蜂同时自由采集咖啡花,咖啡坐果率及果实性状均优于隔离授粉咖啡组。另外,咖啡群体花期较长,咖啡蜜中含有丰富的营养和生物成分^[32],因此,在咖啡花期引入蜜蜂进行授粉,不但可以提高咖啡坐果率及改善咖啡果实性状以增加咖啡种植户的收入,同时蜂农还可以采收咖啡蜜,实现咖啡种植户和养蜂人的双丰收。

咖啡果实品质也受采收成熟度的影响^[33],成熟度影响咖啡豆的挥发性物质和风味物质,因为香气和风味特性直接影响人们对咖啡饮料的兴趣^[18]。由于咖啡开花不均匀且分批次开放,从而导致咖啡果实的成熟度不一致^[34-35]。采摘咖啡时,由于不同的人对成熟度的认知不一致,会把一些不成熟或者过熟的咖啡果混杂在一起,从而对咖啡的品质产生影响^[19]。本研究发现,同一采收期,自由授粉的成熟度Ⅳ和Ⅴ的咖啡果实数量占比较高,表明自由授粉促进咖啡果成熟,有利于采收期咖啡果实成熟整齐度;另外,自由授粉后不同成熟度咖啡果的种子数极显著高于对照组,果实纵径、果实横径、果形指数、种子纵径、种子横径、种形指数6项指标整体均高于对照,果皮厚低于对照,随着成熟度的增加果实性状越好,进一步证明自由授粉有力促进咖啡种植生产提质增效。

咖啡种植生产的根本目标是提高果实产量和品质,从而获得最大的经济效益。咖啡自由授粉可提高坐果率,果实性状显著优于对照,降低果实空仁的比率,促进咖啡果实成熟,表明自由授粉可以有效提高咖啡的品质,助力咖啡种植生产高质量发展。

参考文献

[1] DAVIS A P, GOVAERTS R, BRIDSON D M,

STOFFELEN P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae)[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2006, 152(4): 465-512.

- [2] 黄丽芳, 李金芹, 龙宇宙, 董云萍, 王晓阳, 林兴军, 孙燕, 陈鹏, 闫林. 低温胁迫下不同咖啡生理生化指标的变化及耐寒性评价[J]. 热带作物学报, 2021, 42 (7): 1941-1947.
HUANG L F, LI J Q, LONG Y Z, DONG Y P, WANG X Y, LIN X J, SUN Y, CHEN P, YAN L. Changes of physiological, biochemical and evaluation of cold tolerance in *Coffea*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 1941-1947. (in Chinese)
- [3] GIRAUDO A, GRASSI S, SAVORANI F, GAVOCI G, CASIRAGHI E, GEOBALDO F. Determination of the geographical origin of green coffee beans using NIR spectroscopy and multivariate data analysis[J]. Food Control, 2019, 99: 137-145.
- [4] MUSHAMBANYI B M T. Social and ecological drivers of the economic value of pollination services delivered to coffee in central Uganda[J]. Journal of Ecosystems, 2014(1): 1-23.
- [5] 黄丽芳, 龙宇宙, 李金芹, 董云萍, 王晓阳, 陈鹏, 王宪文, 闫林. 低温胁迫对小粒种咖啡幼苗生理特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(2): 60-67.
HUANG L F, LONG Y Z, LI J Q, DONG Y P, WANG X Y, CHEN P, WANG X W, YAN L. Physiological and biochemical characteristics of *Coffea arabica* seedling under low temperature stress[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(2): 60-67. (in Chinese)
- [6] 陈云兰, 李积华, 陈文进, 桂花, 李学玲. 云南4个产区咖啡豆的主要风味成分及感官品质分析[J]. 热带作物学报, 2024, 45(7): 1445-1454.
CHEN Y L, LI J H, CHEN W J, GUI H, LI X L. Analysis of main flavor components and sensory quality of coffee beans from four production areas in Yunnan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(7): 1445-1454. (in Chinese)
- [7] BRITAIN C, KREMEN C, GARBER A, KLEIN A M. Pollination and plant resources change the nutritional quality of almonds for human health[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e90082.
- [8] KLEIN A M, STEFFAN - DEWENTER I, TSCHARNTKE T. Bee pollination and fruit set of *Coffea arabica* and *C. canephora* (Rubiaceae)[J]. American Journal of Botany, 2003, 90(1): 153-157.
- [9] RICKETTS T H. Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee crops[J]. Conservation Biology, 2004, 18(5): 1262-1271.
- [10] BRAVO-MONROY L, TZANOPOULOS J, POTTS S G. Ecological and social drivers of coffee pollination in Santander, Colombia[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 211: 145-154.

- [11] KREMEN C, WILLIAMS N M, THORP R W. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(26): 16812-16816.
- [12] KLEIN A M, STEFFAN-DEWENTER I, TSCHARNTKE T. Fruit set of highland coffee increases with the diversity of pollinating bees[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2003, 270(1518): 955-961.
- [13] KLEIN A. Nearby rainforest promotes coffee pollination by increasing spatio-temporal stability in bee species richness[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 1838-1845.
- [14] MUNYULI T. Factors governing flower visitation patterns and quality of pollination services delivered by social and solitary bee species to coffee in central Uganda[J]. *African Journal of Ecology*, 2011, 49(4): 501-509.
- [15] SATURNI F T, JAFFE R, METZGER J P. Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 235: 1-12.
- [16] RICKETTS T H, DAILY G C, EHRLICH P R, MICHENER C D. Economic value of tropical forest to coffee production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(34): 12579-12582.
- [17] GARIBALDI L A, CARVALHEIRO L G, VAISSIÈRE B E, GEMMILL-HERREN B, HIPÓLITO J, FREITAS B, NGO H, AZZU N, SÁEZ A, STRM J. Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms[J]. *Science*, 2016, 351(6271): 388-391.
- [18] KAZAMA H E, TEDESCO D, CARREIRA S D V, BARBOSA JR M R, DE OLIVEIRA M F, FERREIRA F M, MALDONADO JR W, SILVA R P D. Monitoring coffee fruit maturity using an enhanced convolutional neural network under different image acquisition settings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 328(2): 1-7.
- [19] 李亚麒, 娄予强, 何红艳, 李亚男, 胡发广, 黄家雄, 施莉莉, 程金焕. 咖啡果实不同成熟度对其品质的影响[J]. *种子*, 2022, 41(12): 78-84.
- LI Y Q, LOU Y Q, HE H Y, LI Y N, HU F G, HUANG J X, SHI L L, CHENG J H. Effect of different maturity on fruit quality of coffee[J]. *Seed*, 2022, 41(12): 78-84. (in Chinese)
- [20] HIDAYAT T, PRASETYO P, FAHRURROZI F. The effect of fruit maturity levels on the yield losses and quality of robusta coffee green bean[J]. *Jurnal Tanaman Industri dan Penyegar*, 2021, 8(2): 67-78.
- [21] KLEIN A M, VAISSIERE B E, CANE J H, STEFFAN-DEWENTER I, CUNNINGHAM S A, KREMEN C, TSCHARNTKE T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops[J]. *Proceedings: Biological Sciences*, 2007, 274(1608): 303-313.
- [22] YOUNG A M. Nectar and pollen robbing of *Thunbergia grandiflora* by *Trigona* bees in Costa Rica[J]. *Biotropica*, 1983, 15(1): 78-80.
- [23] HEARD T A. Behaviour and pollinator efficiency of stingless bees and honey bees on macadamia flowers[J]. *Journal of Apicultural Research*, 1994, 33(4): 191-198.
- [24] CORBET S A, WILLIAMS I H, OSBORNE J L. Bees and the pollination of crops and wild flowers in the European community[J]. *Bee World*, 1991, 72(2): 47-59.
- [25] SARMA M S, FUCHS S, WERBER C, TAUTZ J. Worker piping triggers hissing for coordinated colony defence in the dwarf honeybee *Apis florea*[J]. *Zoology*, 2002, 105(3): 215-223.
- [26] SIHAG R C. Nesting behavior and nest site preferences of the giant honey bee (*Apis dorsata* F.) in the semi-arid environment of north west India[J]. *Journal of Apicultural Research*, 2017, 56(4): 452-466.
- [27] WOYKE J, WILDE J, WILDE M. Swarming and migration of and honey bees in India, Nepal and Bhutan[J]. *Journal of Apicultural Science*, 2012, 56(1): 81-91.
- [28] SCHWARZE S, BENÍTEZ P C, TSCHARNTKE T, OLSCHESKI R, KLEIN A M. Economic evaluation of pollination services comparing coffee landscapes in Ecuador and Indonesia[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 709-723.
- [29] VIGNIERI S. More-diverse pollinators improve crop yields[J]. *Science*, 2016, 351(6271): 350-352.
- [30] FREE J B. Insect pollination of crops[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1970, 17(3): 164-164.
- [31] ROUBIK D. The value of bees to the coffee harvest[J]. *Nature*, 2002, 417(6890): 708.
- [32] 荆津, 祖铁红, 孙会媛, 管志斌, 贾光群, 李阿丹, 崔宗岩. 咖啡蜜在不同色谱柱上挥发性成分测定与对比分析[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(7): 211-218.
- JING J, ZU T H, SUN H Y, GUAN Z B, JIA G Q, LI A D, CUI Z Y. Determination and comparative analysis of volatile compounds of coffee honey using different chromatographic columns[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(7): 211-218. (in Chinese)
- [33] SANTOS F C, CAIXETA F, CLEMENTE A C S, PINHO E V, ROSA S D V F. Gene expression of antioxidant enzymes and coffee seed quality during pre-and post-physiological maturity[J]. *Genetics & Molecular Research*, 2014, 13(4): 10983-10993.
- [34] DE CAMARGO Â P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeeiras) do Brasil[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 1985, 20(7): 831-839.
- [35] RONCHI C P, MIRANDA F R. Flowering percentage in arabica coffee crops depends on the water deficit level applied during the pre-flowering stage[J]. *Revista Caatinga*, 2020, 33(1): 195-204.