

智能蜂箱在设施农业授粉蜂群中的应用研究*

刘绿峰^{1**} 王 颖¹ 王红芳¹ 路云涛² 刘振国^{1***} 胥保华^{1***}

(1. 山东农业大学动物科技学院, 泰安 271018; 2. 中国农业科学院, 农业信息研究所, 北京 100081)

摘 要 【目的】以意大利蜜蜂 *Apis mellifera ligustica* 为研究对象, 通过将蜜蜂转至草莓大棚进行试验, 运用智能蜂箱采集蜜蜂在草莓大棚内的日常活动数据, 以探究蜜蜂在设施农业环境下影响其健康状况的因素。【方法】利用智能蜂箱监测蜜蜂进出巢数量、蜂巢温湿度、蜂脾重量、声音和蜂群群势等数据变化, 为了减少误差对获得的数据进行归一化处理。【结果】在大棚环境中蜂群的重量呈明显的下降趋势, 重量损失甚至超过 50%。蜂巢内每天平均温度稳定在 10-20 °C 之间, 昼夜温差大, 不同大棚巢内湿度差距很大, 巢内温湿度并不是蜂群生存的最佳环境。蜂群进出量的变化趋势相似, 但变化幅度有差别且蜂群进出量最高的大棚相较其他大棚高出 2.67-2.83 倍。巢内声音变化趋势相似, 随着试验时间的延长声音逐渐增强。【结论】大棚环境并不是蜜蜂生存的最佳环境, 反季节大棚果蔬种植环境对授粉蜂群的健康有不利影响。本研究对开展设施农业中蜂群健康状况研究具有一定指导意义。

关键词 设施农业; 智能蜂箱; 授粉; 蜂群; 蜂群健康状态

Using smart beehives to monitor the health of honeybee colonies pollinating agricultural crops

LIU Lu-Feng^{1**} WANG Ying¹ WANG Hong-Fang¹ LU Yun-Tao²
LIU Zhen-Guo^{1***} XU Bao-Hua^{1***}

(1. College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Agricultural Information Institute of CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the health of honeybees in a strawberry greenhouse. 【Methods】Italian honeybees *Apis mellifera ligustica* were the study species. We used smart beehives situated in a strawberry greenhouse as a monitoring tool to obtain data on the number of bees entering and leaving the hive, the temperature and humidity of the hive, the honeycomb weight, the volume of sound produced by colonies and colony potential. All data were normalized before analysis. 【Results】The weight of bee colonies decreased significantly by > 50% over the course of the study. The average daily temperature of hives was between 10 and 20 °C in all three greenhouses. There was, however, a large temperature difference between day and night, and humidity varied considerably between greenhouses. The temperature and humidity recorded in hives were not ideal for colony health and survival. The trend in the number of bees entering and leaving hives was similar, but the range was different. In one greenhouse 2.67-2.83 times more bees entered and left hives than in the other greenhouses. The change in the volume of sound produced by colonies was similar; volume gradually increased over the duration of the experiment. 【Conclusion】The greenhouse environment is not an ideal environment for honey bees, and the off-season fruit and vegetable cultivation environment in greenhouses has adverse effects on the health of honeybee colonies. These findings lay a foundation for improving the health of honeybees used for pollination purposes in greenhouses.

Key words facility agriculture; smart beehive; pollination; bee colony; colony health status

*资助项目 Supported projects: 泰山产业领军人才项目 (LJNY202003); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-44); 泰安市科技特派员项目 (2020TPY014)

**第一作者 First author, E-mail: 1248126172@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zgliu@sdaa.edu.cn; bhxu@sdaa.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-08-03; 接受日期 Accepted: 2022-09-30

蜜蜂是目前使用范围最广、最有效的农业授粉昆虫。蜜蜂授粉对大部分农作物都有不同程度的增产效果 (Klein *et al.*, 2007), 具有重要的生态效益和经济效益 (褚亚芳和胡福良, 2009; 刘朋飞等, 2011)。用蜜蜂授粉不但能减少劳动强度, 提质增效, 而且对生态平衡与物种保护具有独特功能。

据调查数据显示, 全世界设施农业总面积达到 460 万 hm^2 , 而中国设施农业面积达 370 万 hm^2 , 约占世界设施农业总面积的 80%, 居世界第一 (骆飞等, 2020)。蜜蜂授粉已经成为设施农业的关键环节。利用蜜蜂授粉, 弥补大棚环境缺乏传花授粉媒介的缺点 (付宝春和杨蛟峰, 2014), 并且通过蜜蜂授粉降低了果实畸形率, 增大了果实重量, 延长了货架期, 带来更高的商业价值 (Klatt *et al.*, 2014)。

研究发现设施农业关注农作物的产量质量以及测定授粉蜜蜂出巢温度、日活动时间、访花频率、单花停留时间、花粉移出率、柱头花粉沉降数目及授粉效果等 (杨甫等, 2010), 而对温室内授粉蜜蜂的健康研究较少, 由于温室内的温度和湿度变化大, 温室环境并不是蜜蜂生存的最佳环境 (丁小涛等, 2011; 武文亮等, 2016)。王宏栋等 (2022) 对熊蜂授粉的优势、技术要点及其在设施农业中的应用效果进行了总结阐述, 赵改灵等 (2020) 及彭佃亮等 (2016) 收集草莓的坐果率、畸形果率、单果重、产量及产值等数据, 发现蜜蜂和熊蜂都可以提高草莓的生产效益, 但熊蜂授粉的草莓较蜜蜂授粉的单果质量增加 16.81%-36.96%。Kakutani 等 (1993) 研究了无刺蜂 *Trigona minangkabau* 和欧洲蜜蜂 *Apis mellifera* 对草莓的授粉率和畸形果率, 发现蜜蜂一次访问的平均授粉率为 11%, 而无刺蜂的一次访问平均授粉率为 4.7%, 每朵花需要蜜蜂访问 11 次或无刺蜂访问 30 次才能获得正常的浆果 (受精率 87%)。其次发现无刺蜂区的畸形浆果发生率 (73%) 低于对照区 (90%), 但高于蜜蜂区 (51%)。温湿度的变化对蜜蜂个体、蜂群、蜜蜂发育及病虫害发生均有影响 (杨令中, 1980;

曹义锋等, 2007; Abou-Shaara *et al.*, 2017)。农药胁迫也是影响蜜蜂健康的重要因素, 苍涛等 (2009) 通过测定 12 种草莓生产中所使用的农药的急性毒力, 发现 12 种农药不管毒力高低对蜜蜂均有影响; Calatayud-Vernich 等 (2018) 对农药残留的研究发现在花粉、蜂蜜、蜂蜡和蜜蜂中均有农药残留。

智慧农业是当前我国农业发展的趋势, 也是现代农业形态发展的重要方向, 智能蜂箱是设施农业发展中的一环, 对精确化蜜蜂养殖业发展有至关重要的作用。国内外对巢内图像、声音、温湿度和重量信息的监测与应用大大提高了蜂农养殖效率, 减轻蜂农负担 (刘升平等, 2020)。Edwards-Murphy (2016) 基于无线传感器网络 (WSN) 设计与决策树分析的检测系统测量的蜂巢参数: CO_2 、 O_2 、污染气体、温度和相对湿度, 并首先提出了一种基于阈值的算法来检测蜂巢变化并提醒养蜂人。此外, 例如通过将部署的输出与养蜂人的观察结果和官方天气记录进行比较, 验证了这些算法。Debauche 等 (2018) 描述了一个基于内部传感器和云架构的网络监控系统, 用于监控和跟踪蜜蜂的行为。Braga 等 (2020) 提出了一种基于监督机器学习方法的方法, 该方法使用蜂巢内传感器 (即内部温度和蜂巢重量)、天气和蜂房检查的数据来预测蜜蜂群体的健康状况。洪葳等 (2020) 设计了一种蜂群监测系统, 它采用多种传感器融合设计, 能够检测蜂箱内部的温度、湿度、蜂群重量、声音和蜜蜂的进出量等蜜蜂常规的指标, 通过手机移动网络和 Wi-Fi 将这些数据上传到远程云服务器中。蜂箱装有太阳能充电板能保证电量自足, 更方便部署和实现蜂箱的长期监测。

设施授粉中蜜蜂的健康状况对授粉效果尤为重要, 虽然目前对蜜蜂监测的研究有很多, 但对设施农业下对蜜蜂活动数据的采集的研究匮乏。鉴于此, 在大棚环境下, 通过对蜜蜂巢内温湿度、巢口进出量、重量和声音进行长期监测, 探讨蜜蜂在大棚环境下的各指标的关联和变化规律。

1 材料与方法

1.1 供试蜂群

试验地点位于济南市唐王某草莓基地。试验时间为 2021 年 11 月 20 日到 2022 年 5 月 20 日, 连续采集意大利蜜蜂 *Apis mellifera ligustica* 授粉蜂群共 3 780 h 活动数据。试验动物为 9 群健康的意大利蜂群, 来自山东农业大学试验蜂场。每箱群势调整为 5 足框蜂, 蜜粉储备和封盖子脾面积相当。群势用“足框蜂”进行衡量, 即蜜蜂在一张标准脾上平铺时, 能均匀的占满一张蜂脾的两面为“1 足框蜂”(王颖等, 2011)。

试验期间将 9 群蜂群随机分配到 3 个大棚中进行对照试验, 试验过程中并未对蜜蜂进行处理, 以降低外界因素对蜂群的影响。

试验用大棚均为普通塑料大棚, 采用钢结构框架、塑料薄膜的结构, 可人工控制大棚向阳面的草帘, 每个大棚面积约为 1 067 m²。授粉作物管理均采用标准化统一管理: 施肥工作在草莓种植前就已完成, 采用滴灌的方式精准浇水, 每天统一时间开启或关闭草帘和大棚通风。每个大棚开花状况基本一致。

1.2 智能蜂箱

本次试验设备采用一个其内部拥有多个传感器组成的智能蜂箱, 它可以通过互联网传输数据以及通过太阳能板来保持电量的自给自足(洪葳等, 2020)。该设备可以采集蜂巢的温度和湿度、蜜蜂进出巢门口的数量、蜂巢的重量及蜂群的声音等数据。装置结构如图 1 所示, 具体传感器参数参考洪葳等(2020)。将蜂群置于草莓大棚中稳定 2 d 后, 开始采集蜂箱数据(图 2)。本研究使用的气温数据来自当地气象基站, 通过网络采集和传输数据。然后, 对数据进行分析 and 处理。设备在采集蜂群信息时, 每小时通过无线传输上传一次数据, 上传的数据存储在云服务器中。同时, 该设备采用太阳能电池板和备用电池相结合的方式供电, 因此在阴雨天气下可以连续采集两周以上的数据。在这项研究开始之前, 我们对该装置进行了检查, 发现它对蜂群的正常活动没有实质性影响。

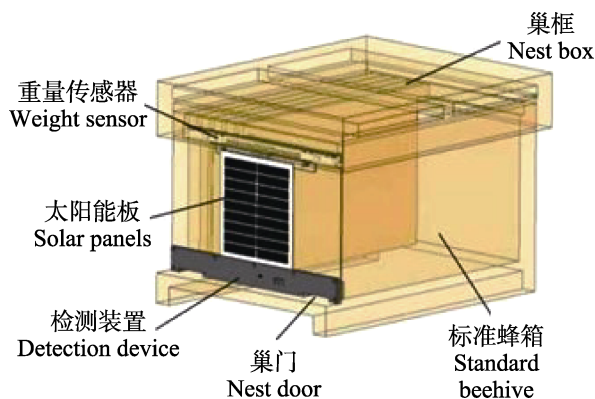


图 1 智能蜂箱的结构(洪葳等, 2020)

Fig. 1 The structure of the smart beehive (Hong et al., 2020)



图 2 智能蜂箱在草莓大棚中的应用

Fig. 2 Application of smart beehives in strawberry greenhouses

1.3 数据处理与分析

智能蜂箱监测数据运用 Python 3.9 及 Origin 2022 软件进行数据提取和绘图分析, 为了消除不同大棚初始蜂群状态的不同引起的监测数据差异, 研究将监测数据进行归一化处理, 运用比值 Ratio 作为衡量监测数据的依据; Ratio 计算方式为试验期内每日监测数据量/第一日监测数据量。

2 结果与分析

2.1 蜂群日常活动的监测

经过数据整合选取了从 2021 年 12 月 6 日到 2022 年 3 月 16 号 3 个大棚中 7 群意大利蜜蜂共 100 d 的检测数据(图 3)。

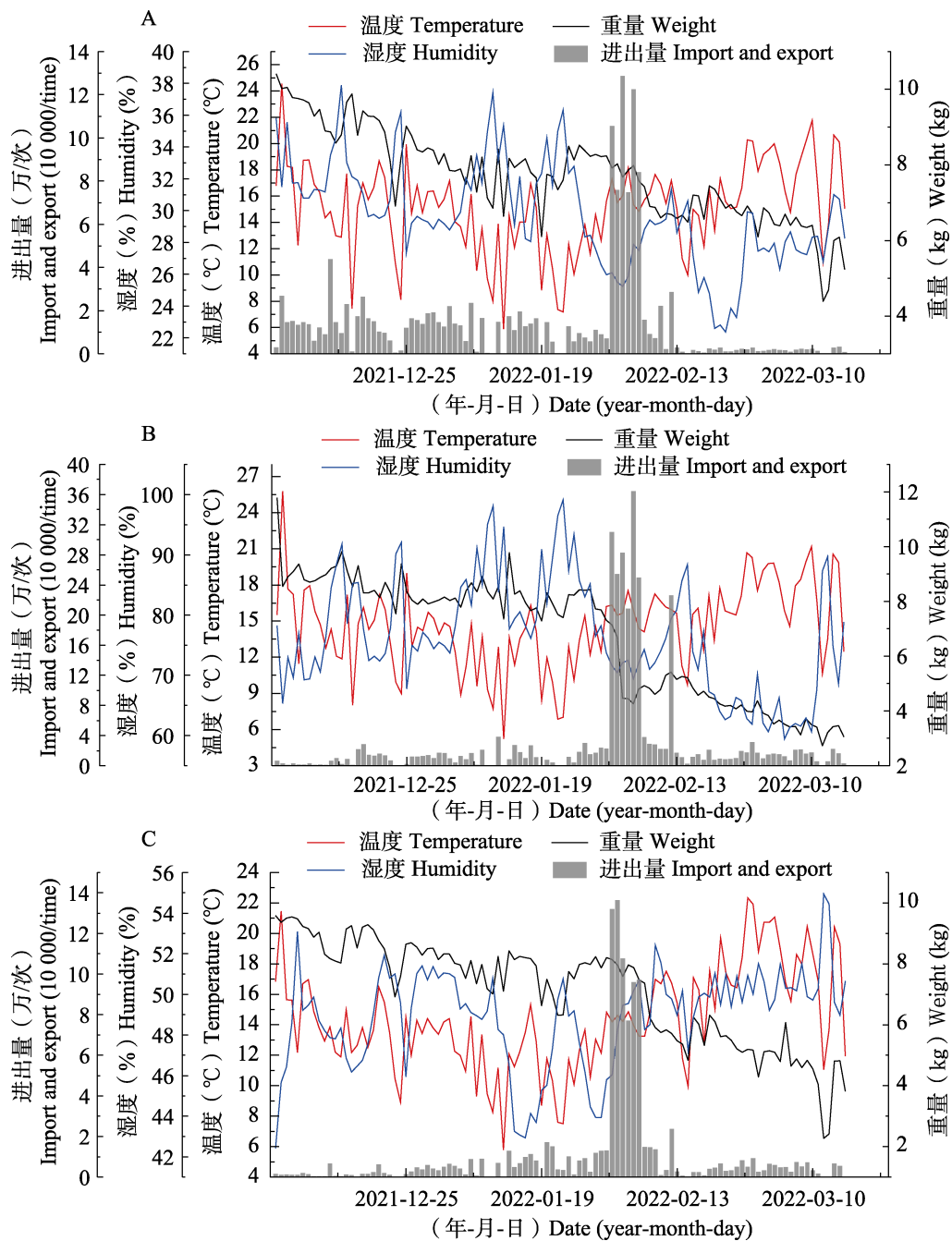


图3 智能蜂箱温度、湿度和巢门口进出量的检测

Fig. 3 Detection data of smart beehive temperature, humidity, and the amount of in and out of the nest door

A. 1号大棚内2个蜂群的平均数据; B. 2号大棚3个蜂箱的平均数据; C. 3号大棚2个蜂箱的平均数据。

A. Average data of the two colonies placed in shed 1; B. Average data of the three colonies placed in shed 2; C. Average data of the two colonies placed in shed 3.

2.2 蜂群重量的变化

通过分析图4(A-D)蜂箱的重量数据,结果表明在大棚环境中蜂群的重量呈明显的下降

趋势,重量损失甚至超过50%,说明反季节大棚果蔬种植环境对授粉蜂群的健康有不利影响。蜂群所处环境中昼夜温差大、湿度高及蜜粉源单一可能是造成这种现象的主要因素。

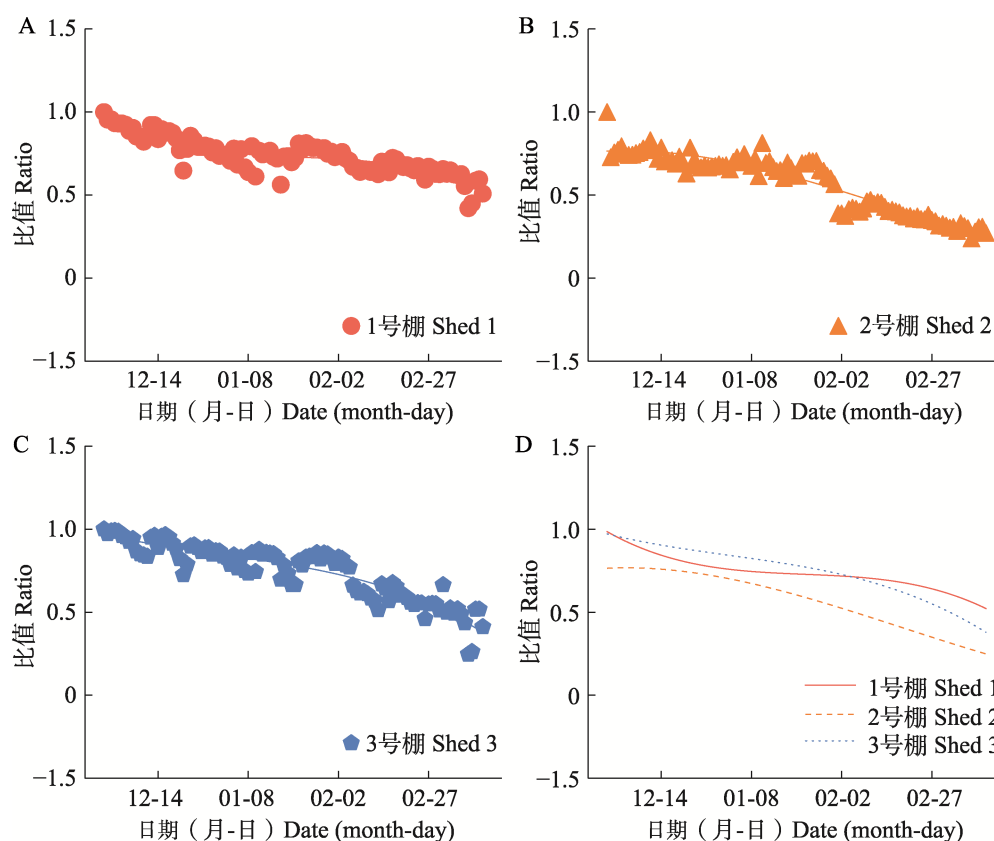


图 4 大棚环境中蜂箱的重量随时间变化

Fig. 4 Changes in the weight of beehives over time in a greenhouse environment

A. 1 号棚蜂箱重量随时间的变化率, 红色圆型散点图为 1 号棚 2 群重量随时间的变化; B. 2 号棚蜂箱重量随时间的变化率, 黄色三角形散点图为 2 号棚 3 群重量随时间的变化; C. 3 号棚蜂箱重量随时间的变化率, 蓝色星型散点图代表 3 号棚 2 群的重量随时间的变化; D. 3 个棚蜂箱重量随时间变化率的拟合曲线, 红色实线代表 1 号棚重量的拟合曲线、黄色虚线代表 2 号棚重量的拟合曲线、蓝色虚线代表 1 号棚重量的拟合曲线。下图同。

A. The ratio of the changes in the weight of beehives over time in shed 1, red scatter plots indicate the weight changes overtime of the two colonies placed in shed 1; B. The ratio of the changes in the weight of beehives over time in shed 2, green scatter plots indicate the weight changes overtime of the three colonies placed in shed 2; C. The ratio of the changes in the weight of beehives over time in shed 3, the blue scatter plots indicate the weight changes overtime of the two colonies placed in shed 3; D. The fitted curve of the ratio of the changes in the weight of beehives over time in the three sheds, respectively, the red solid line represents the fitting curve of weight changes of the colonies in shed 1, the yellow dotted line represents the fitting curve of weight changes of the colonies in shed 2 and the blue dash line represents the fitting curve of weight changes of the colonies in shed 3. The same below.

2.3 智能蜂箱巢门口蜜蜂进出量的变化

如图 5 所示, 根据各大棚的拟合曲线发现 1 号棚和 2 号棚从试验开始到 12 月 14 号左右是呈下降趋势 (图 5: A, B), 3 号棚进出量变化不明显始终处于进出量较少的状态 (图 5: C), 从 12 月 14 号左右开始 3 个大棚的进出量显著上升, 在 2 月初到 2 月中旬期间分别达到顶峰, 其中 2 号棚上升最为明显并且在蜂箱进出量最高的时期比 1 号棚和 3 号棚的进出量高出 2.67-2.83 倍,

从 2 月处到 2 月中旬的中旬蜂群的进出量开始急剧下降。

2.4 箱内温度和湿度的变化

如图 3 所示, 3 个大棚蜂巢内每天平均温度趋于稳定在 10-20 °C 之间, 巢内湿度差距很大, 1 号棚中蜂巢的湿度保持在 20%-40% 之间, 2 号棚湿度保持在 60%-80% 之间, 3 号棚湿度保持在 40%-60% 之间, 如图 6 所示, 各大棚巢内平均温度变化趋势相似。如图 7 所示, 湿度变化趋势与

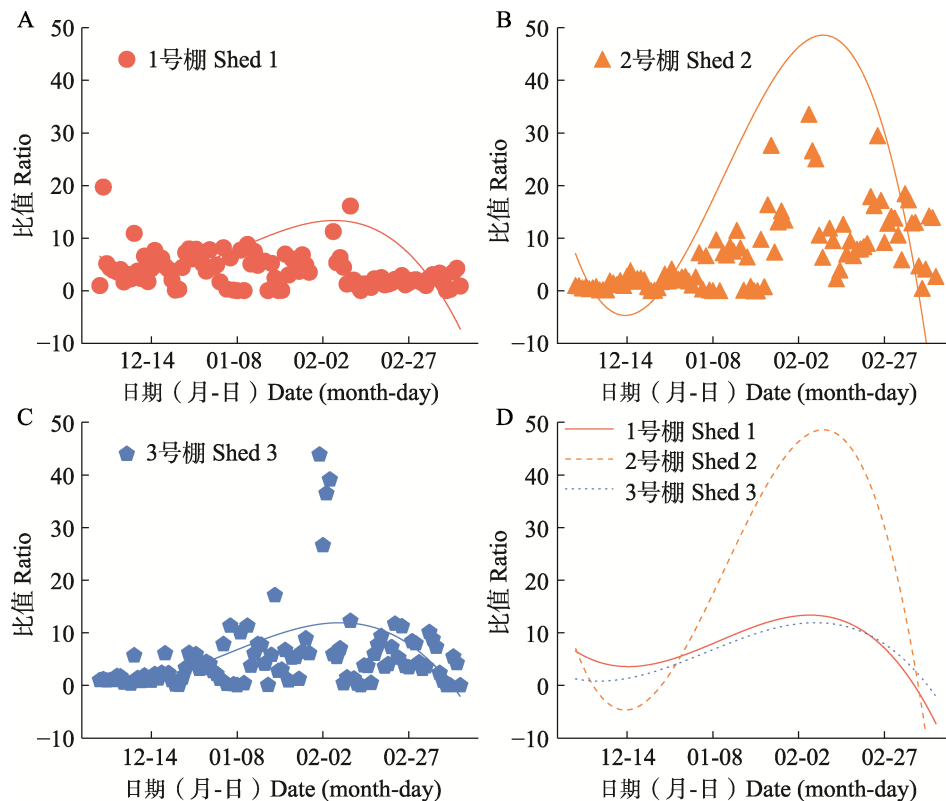


图 5 大棚环境中蜂箱巢门口进出量的变化

Fig. 5 Changes in the amount of in and out of the beehives door in the greenhouse environment

- A. 1 号棚蜂箱巢门口进出量随时间的变化率; B. 2 号棚蜂箱巢门口进出量随时间的变化率;
 C. 3 号棚蜂箱巢门口进出量随时间的变化率; D. 3 个棚蜂箱巢门口进出量随时间变化率的拟合曲线。
 A. The ratio of changes in the amount of in and out of the beehives door over time in shed 1;
 B. The ratio of changes in the amount of in and out of the beehives door over time in shed 2;
 C. The ratio of changes in the amount of in and out of the beehives door over time in shed 3;
 D. The fitted curve of the ratio of changes in the amount of in and out of the beehives door over time in the three sheds, respectively.

温度变化趋势反比, 并且 2 号棚的湿度变化最小。

根据蜂箱试验期间每小时的温度数据, 本研究选取了 7: 00 (最低温度) 和 13: 00 (最高温度) 行对比分析, 发现蜂箱的昼夜温差很大 (1 号棚的平均温差 26.92 °C, 最大温差可达 43.13 °C, 最小温差 0.4 °C (图 8: A); 2 号棚的平均温差 31.94 °C, 最大温差可达 45.15 °C, 最小温差 4.53 °C (图 8: B); 3 号棚的平均温差 19.70 °C, 最大温差可达 42.75 °C, 最小温差 0.35 °C (图 8: C), 温度的变化主要受到当地天气的影响。

2.5 大棚环境内智能蜂巢中声音的变化

由图 9 示, 1 号棚声音强度随时间呈上升的趋势 (图 9: A), 3 号棚呈 S 型从刚开始的上升,

在 1 月 8 日左右开始降低, 到 2 月 27 日左右又开始上升 (图 9: C), 2 号棚与 3 号棚相似但变化幅度相对较小 (图 9: B)。结合昼夜温差和进出量的变化发现, 蜂群的声音变化与昼夜温差高低呈反比, 与进出量变化呈正比, 说明蜜蜂的声音变化可能受到温度和巢门口进出量等环境因素的影响变嘈杂。

3 讨论

本研究是在大棚环境下对蜜蜂巢内温湿度、巢口进出量、重量和声音进行长期监测, 并得到蜂群活动的详细数据。蜂群的重量是蜂群健康和生产力的重要指标 (McLellan *et al.*, 1977), 研究发现蜂蜜和花粉的数量, 尤其是蜂蜜的重量是

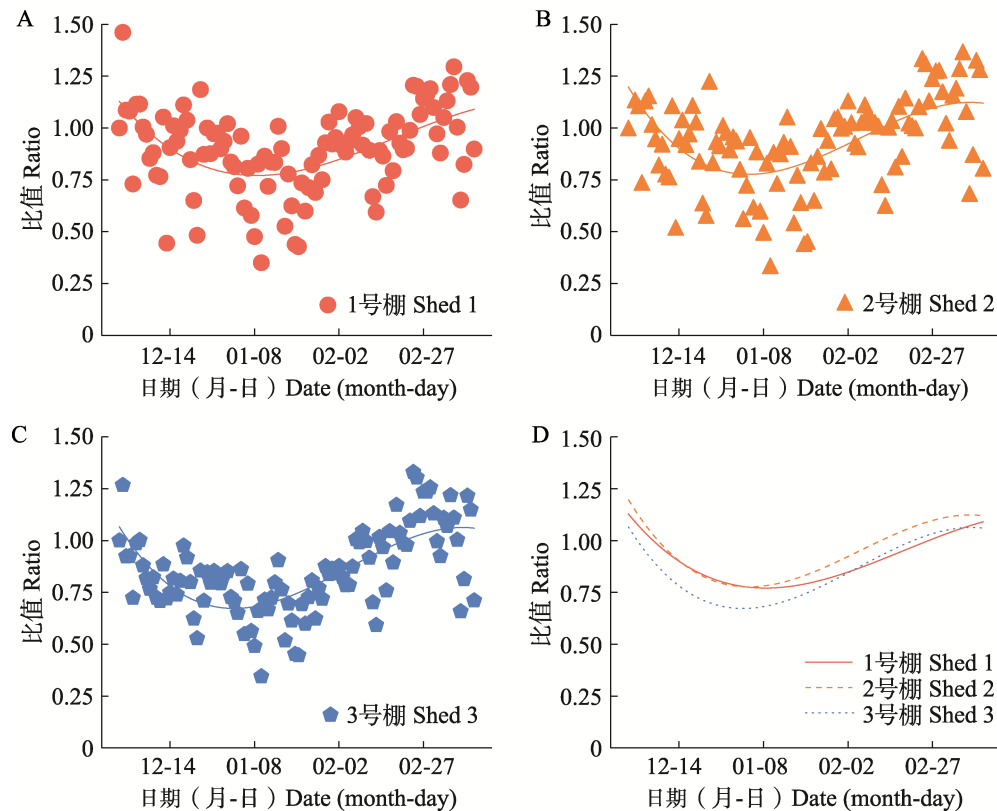


图 6 大棚环境中智能蜂巢内温度随时间的变化

Fig. 6 Changes of temperature in the smart honeycombs with time in the greenhouse environment

A. 1 号棚蜂箱巢内温度随时间的变化率; B. 2 号棚蜂箱巢内温度随时间的变化率;

C. 3 号棚蜂箱巢内温度随时间的变化率; D. 3 个棚蜂箱号棚蜂箱巢内温度随时间的变化率的拟合曲线。

A. The ratio of changes of temperature in the honeycombs in shed 1 with time;

B. The ratio of changes of temperature in the honeycombs in shed 2 with time;

C. The ratio of changes of temperature in the honeycombs in shed 3 with time;

D. The fitted curve of the ratio of temperature changes in the honeycombs in the three sheds with time, respectively.

与蜂群重量最相关的因素 (Meikle *et al.*, 2008)。本文对蜂箱每天的平均重量进行分析 (图 4), 结果表明蜂箱重量在试验期间随时间推移而下降, 客观反映出蜂群内营养储备 (蜂蜜和花粉等) 逐渐减少。由此可见, 授粉蜂群在大棚环境下处于营养消耗的状态, 需要根据蜂群内的食物储备情况按需补充, 否则容易引起营养摄入不足而导致蜂群群势衰败。试验蜂群处于草莓大棚环境中, 蜜源的产量并不充裕且单一, 所以蜂群始终处于消耗食物的状态, 导致蜂群重量呈下降趋势, 重量损失甚至超过 50%。蜂群所处的环境并不适合蜂群的生存, 大棚内温度湿度昼夜温差大, 以及可能存在农药残留等负面因素, 使蜂群处于应激状态, 可能会导致蜜蜂的崩溃, 引起群势消减导

致蜂群重量的下降。

蜂群巢门口的进出量是蜜蜂健康的重要指标之一 (Cunha *et al.*, 2020), 可以判断蜜蜂工作的积极性和预判分蜂行为等, 蜜蜂巢外活动一般分为: 一般活动的觅食活动, 蜜蜂在蜂巢前的一般活动包括适龄工蜂认巢试飞, 守卫蜂保护蜂群免受其他入侵蜜蜂的侵害, 以及在天气炎热的时候在巢门口煽动翅膀为蜂群散热 (Capaldi and Dyer, 1999); 觅食活动主要是收集花粉和花蜜, 是蜂群生产力的体现。本研究发现蜂群进出量的高低可能会影响蜜蜂蜂巢湿度的调节, 且在蜂巢的进出量在 1 月末和 2 月出的时间段开始增长, 称为进出量暴发期, 在其他时间段蜜蜂的进出量相对稳定, 在进出量暴涨的时候, 温度开始增长

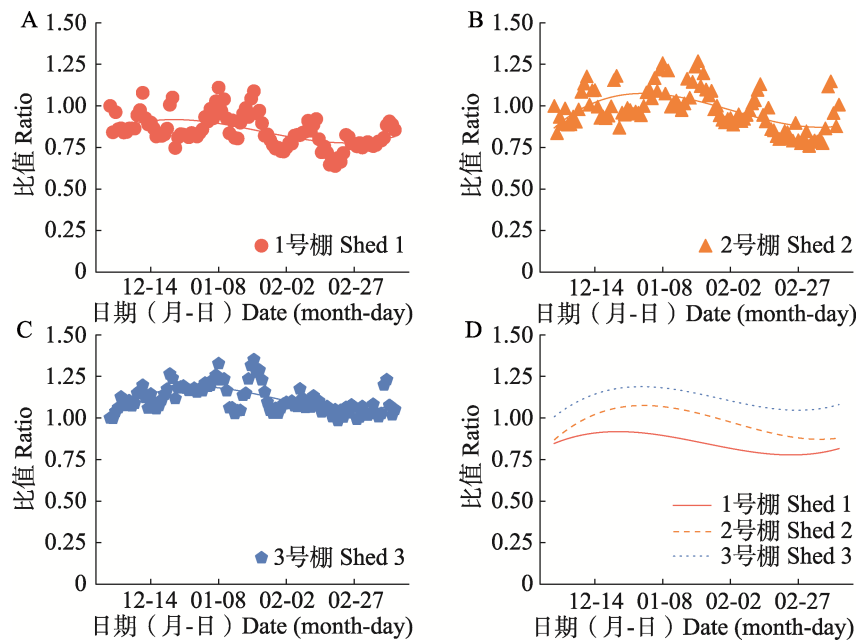


图 7 大棚环境中智能蜂巢内湿度随时间的变化

Fig. 7 Changes of humidity in smart honeycombs with time in greenhouse environment

A. 1 号棚蜂箱巢内湿度随时间的变化率; B. 2 号棚蜂箱巢内湿度随时间的变化率;

C. 3 号棚蜂箱巢内湿度随时间的变化率; D. 3 个棚蜂箱巢内湿度随时间变化率的拟合曲线。

A. The ratio of changes of humidity in the honeycombs over time in shed 1; B. The ratio of changes of humidity in the honeycombs over time in shed 2; C. The ratio of changes of humidity in the honeycombs over time in shed 3;

D. The fitted curve of the ratio of humidity changes in the honeycombs over time in the three sheds, respectively.

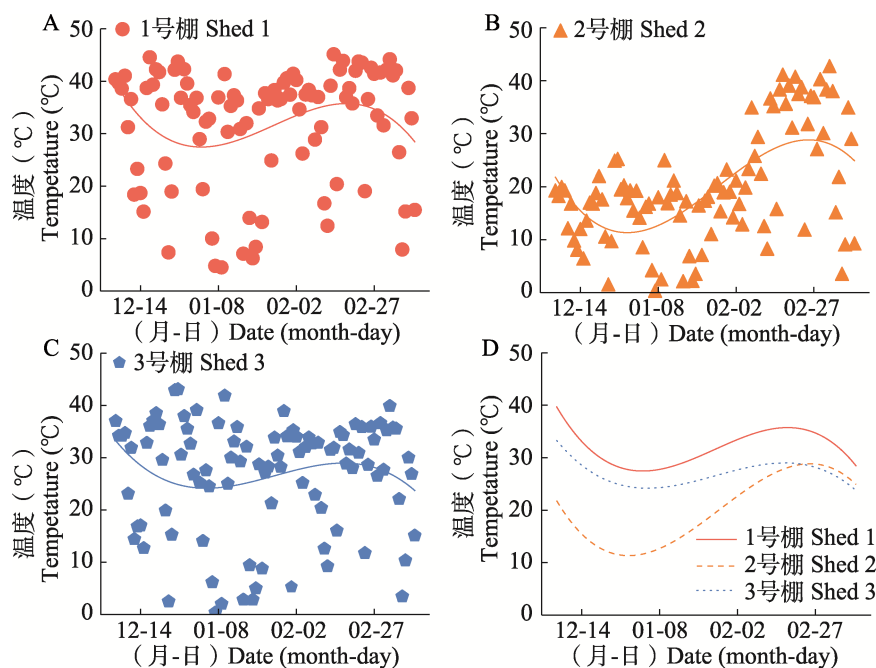


图 8 大棚蜂箱的昼夜温差变化

Fig. 8 Changes in the temperature difference of beehives between the day and night in the greenhouse

A. 1 号棚昼夜温差变化; B. 2 号棚昼夜温差变化; C. 3 号棚昼夜温差变化; D. 3 个棚昼夜温差变化拟合曲线。

A. The ratio of changes in the temperature difference of beehives between the day and night over time in shed 1; B. The ratio of changes in the temperature difference of beehives between the day and night over time in shed 2; C. The ratio of changes in the temperature difference of beehives between the day and night over time in shed 3; D. The fitted curve of the ratio of changes in the temperature difference of beehives between the day and night over time in the three sheds, respectively.

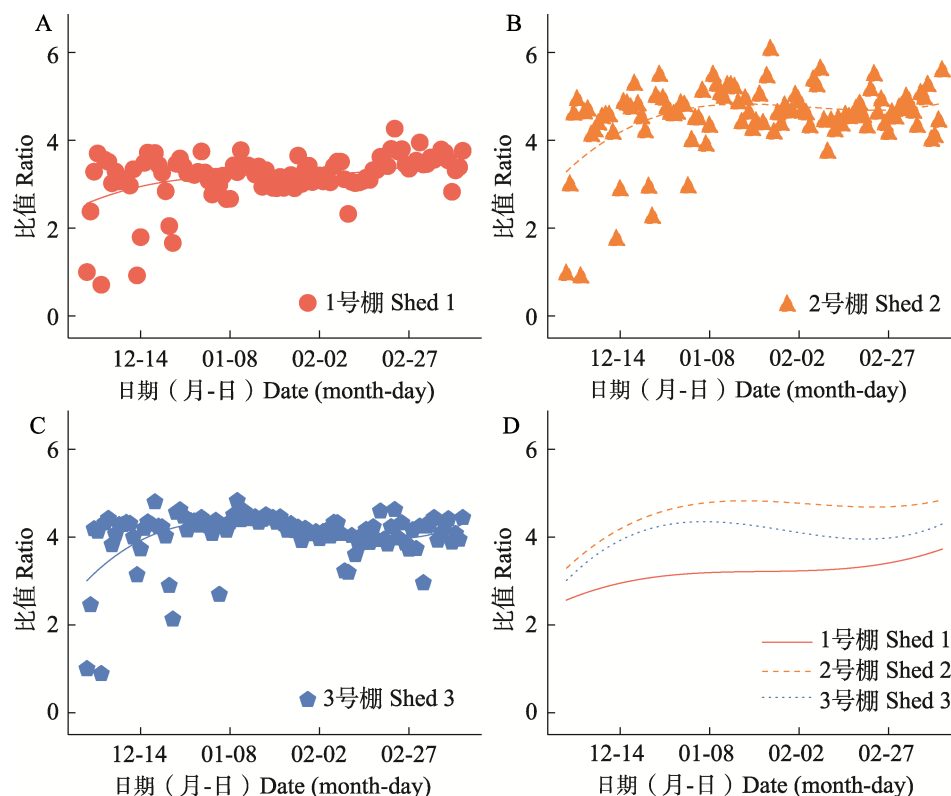


图9 智能蜂箱声音随时间的变化

Fig. 9 Changes in the sound of smart beehives over time

A. 1号棚蜂箱声音变化率; B. 2号棚蜂箱声音变化率; C. 3号棚蜂箱声音变化率; D. 3个棚蜂箱声音变化率拟合曲线。
A. The ratio of changes in the sound of beehives over time in shed 1; B. The ratio of changes in the sound of beehives over time in shed 2; C. The ratio of changes in the sound of beehives over time in shed 3; D. The fitted curve of the ratio of changes in the sound of beehives between over time in the three sheds, respectively.

的同时湿度开始降低,而蜂巢的重量的在此时的下降速度变慢与前面保持持平,但经过这个增长暴发期后,重量又开始下降,这可能是由于温度的提高刺激了工蜂出去采集的动力,引起蜜蜂进出量的提高。蜂群进出量暴发期过后蜂群的进出量迅速下降,并且持续保持低进出量的状态直至试验结束。进出量暴发期后蜂箱的平均温度缓慢稳步上升,湿度与温度成负相关(图6,图7)。本研究中3号大棚蜂群的进出量低于1号和2号大棚的蜂群进出量,但在进出量暴发期后3号大棚湿度调节恢复比1号和2号大棚更快,表明3号大棚的湿度调节能力更强,推测大棚果蔬种植环境下授粉蜂群短时间内高强度进出量变化可能导致蜜蜂湿度调节能力下降。

蜜蜂需要调控巢内温度稳定在 32-36 °C 之间,以保证蜜蜂子期正常生长发育(李志勇等,

2018)。在本次试验大棚环境中平均温度在 10-25 °C 之间(图6),且昼夜温差大(图8),无法维持幼虫发育所需要的温度,这可能导致蜜蜂子期发育不正常,引起蜜蜂衰老后,新蜂不足导致群势衰减,影响蜜蜂的生产力以及授粉效率(Brodschneider and Crailsheim, 2010; Wang *et al.*, 2016)。一般情况下,蜂巢内的相对湿度为 40%-80%, Doull (1976) 发现蜂巢内的湿度会影响蜜蜂卵的发育,蜂卵孵化的最佳相对湿度范围是 90%-95%。在本研究结果显示 1 号棚中蜂巢的湿度始终保持在 20%-40% 之间, 2 号棚湿度保持在 60%-80% 之间, 3 号棚湿度保持在 40%-60% 之间(图7),其中 1 号棚和 2 号棚虽然湿度差别很大,但变化趋势都是先上升再下降,最后趋于稳定,而 3 号棚湿度始终趋于稳定。不同巢内湿度差距很大,但都没有达到蜂卵孵化

的最佳湿度, 进一步影响蜂群卵的孵化。

蜜蜂授粉已经在设施农业中广泛应用, 为反季节果蔬种植提质增效发挥关键作用。但设施农业环境对蜜蜂的健康有一定的限制作用, 而蜂群的管理不善将对设施农业经济效益产生重大影响。因此, 开展设施农业中蜂群健康状况的研究成为促进传粉昆虫与设施农业有机结合的重要纽带。智能蜂箱可以有效地监测蜂箱内部的数据, 并通过远距传输将蜂群的状态实时传递给管理人员, 并及时介入蜂群管理, 调整大棚微环境, 为蜂群的可持续利用提供技术支持。

参考文献 (References)

- Abou-Shaara HF, Owayss AA, Ibrahim YY, Basuny NK, 2017. A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. *Insectes Sociaux*, 64(4): 455–463.
- Braga AR, Gomes DG, Rogers R, Hassler EE, Freitas BM, Cazier JA, 2020. A method for mining combined data from in-hive sensors, weather and apiary inspections to forecast the health status of honey bee colonies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36 (169): 105161.
- Brodschneider R, Crailsheim K, 2010. Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3): 278–294.
- Calatayud-Vernich P, Calatayud F, Simó E, Picó Y, 2018. Pesticide residues in honey bees, pollen and beeswax: Assessing beehive exposure. *Environmental Pollution*, 31(241): 106–114.
- Cang T, Zhao XP, Zhang ZH, Wu CX, Wu SG, Chen LP, Yu RX, 2009. Toxicity and safety evaluation of pesticides commonly used in strawberry production to bees. *Zhejiang Agricultural Science*, 50(4): 785–787. [苍涛, 赵学平, 张志恒, 吴长兴, 吴声敢, 陈丽萍, 俞瑞鲜, 2009. 草莓生产中常用, 对蜜蜂的毒性及安全评价. *浙江农业科学*, 50(4): 785–787.]
- Cao YF, Yu LS, Bi SD, Ding J, 2007. Research progress of the influence of temperature on honeybee. *Journal of Bee*, 26(4): 13–15. [曹义锋, 余林生, 毕守东, 丁建, 2007. 温度对蜜蜂影响的研究进展. *蜜蜂杂志*, 26(4): 13–15.]
- Capaldi EA, Dyer FC, 1999. The role of orientation flights on homing performance in honeybees. *Journal of Experimental Biology*, 202(12): 1655–1566.
- Chu YF, Hu FL, 2009. Bees and ecological balance. *Journal of Bee*, 29(3): 8–10. [褚亚芳, 胡福良, 2009. 蜜蜂与生态平衡. *蜜蜂杂志*, 29(3): 8–10.]
- Cunha AS, Rose J, Prior J, Aumann HM, Emanetoglu NW, Drummond FA, 2020. A novel non-invasive radar to monitor honey bee colony health. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170: 105241.
- Debauche O, El Moulal M, Mahmoudi S, Boukraa S, Manneback P, Lebeau F, 2018. Web monitoring of bee health for researchers and beekeepers based on the internet of things. *Procedia Computer Science*, 9(130): 991–998.
- Ding XT, Jin HJ, Zhong HM, Yu JZ, 2011. A comparative study on temperature and humidity environment between single and multi span plastic greenhouses. *Acta Agriculturae Shanghai*, 26(2): 96–101. [丁小涛, 金海军, 张红梅, 余纪柱, 2011. 单栋大棚和连栋塑料温室温、湿度环境比较研究. *上海农业学报*, 26(2): 96–101.]
- Doull KM, 1976. The effects of different humidities on the hatching of the eggs of honeybees. *Apidologie*, 7(1): 61–66.
- Edwards-Murphy F, Magno M, Whelan PM, O'Halloran J, Popovici EM, 2016. b+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(124): 211–219.
- Fu BC, Yang JF, 2014. Application of common pollinating bee species in facility agriculture. *Shanxi Agricultural Science*, 42(8): 925–928. [付宝春, 杨蛟峰, 2014. 常见授粉蜂种在设施农业中的应用. *山西农业科学*, 42(8): 925–928.]
- Hong W, Xu BH, Liu SP, 2020. Design and experimental study of multi-characteristic long-term monitoring system for bee colony. *Smart Agriculture (Chinese and English)*, 2(2): 105–114. [洪威, 胥保华, 刘升平, 2020. 蜂群多特征长期监测系统设计与试验研究. *智慧农业(中英文)*, 2(2): 105–114.]
- Kakutani T, Inoue T, Tezuka T, Maeta Y, 1993. Pollination of strawberry by the stingless bee, *Trigona minangkabau*, and the honey bee, *Apis mellifera*: An experimental study of fertilization efficiency. *Researches on Population Ecology*, 35(1): 95–111.
- Klatt BK, Holzschuh A, Westphal C, Clough Y, Smit I, Pawelzik E, Tschamtk T, 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1775): 20132440.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tschamtk T, 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608): 303–313.
- Li ZY, Zhuang ML, Zhang F, 2018. Extreme ambient temperature and temperature and humidity regulation of bee colonies. Proceedings of the 12th Cross-Strait Bee and Bee Products Summit Forum and the 1st China Xi'an (Lantian) Qinling China Bee Poverty Alleviation Industry Development Forum. Xian: 138–147. [李志勇, 庄明亮, 张发, 2018. 极端环境温度与蜂群的温湿度调控. 第十二届海峡两岸蜜蜂与蜂产品高峰论坛暨

- 首届中国西安(蓝田)秦岭中蜂扶贫产业发展论坛论集. 西安: 138–147.]
- Liu PF, Wu J, Li YH, Lin SW, 2011. Economic value assessment of agricultural bee pollination in China. *Chinese Agricultural Science*, 44(24): 5117–5123. [刘鹏飞, 吴杰, 李海燕, 林素文, 2011. 中国农业蜜蜂授粉的经济价值评估. 中国农业科学, 44(24): 5117–5123.]
- Liu SP, Lü CY, Guo MX, Liu DZ, Xiao SF, Yang FF, Liu H, 2020. Research review on the methods and application of bee colony behavior monitoring. *Journal of China Agricultural University*, 25(9): 80–89. [刘升平, 吕纯阳, 郭秀明, 刘大众, 肖顺夫, 杨菲菲, 刘航, 2020. 蜂群行为监测方法及应用研究综述. 中国农业大学学报, 25(9): 80–89.]
- Luo F, Xu HF, Zuo ZY, Zhao GD, Guo XS, Wang LP, 2020. Current situation, deficiencies and countermeasures of facility agriculture development in China. *Jiangsu Agricultural Science*, 48(10): 57–62. [骆飞, 徐海斌, 左志宇, 赵桂东, 郭小山, 王丽平, 2020. 我国设施农业发展现状、存在不足及对策. 江苏农业科学, 48(10): 57–62.]
- McLellan AR, 1977. Honeybee colony weight as an index of honey production and nectar flow: A critical evaluation. *Journal of Applied Ecology*, 14(2): 401–408.
- Meikle WG, Rector BG, Mercadier G, Holst N, 2008. Within-day variation in continuous hive weight data as a measure of honey bee colony activity. *Apidologie*, 39(6): 694–707.
- Peng DL, Liu YG, Xia HB, Meng LB, Zhao BG, Li MQ, 2016. Effects of different pollination methods on the yield, quality and benefit of strawberry in solar greenhouse. *Northern Gardening*, 39(4): 52–55. [彭佃亮, 刘永光, 夏海波, 孟令彬, 赵博光, 李美芹, 2016. 不同授粉方式对日光温室草莓产量、品质及效益的影响. 北方园艺, 39(4): 52–55.]
- Wang HD, Han S, Han B, Wu MF, Zhu GX, Li DG, 2022. Research progress on bumblebee pollination technology in facility agriculture. *Changjiang Vegetables*, 38(8): 34–37. [王宏栋, 韩双, 韩冰, 武明飞, 朱冠雄, 李冬刚, 2022. 设施农业熊蜂授粉技术研究进展. 长江蔬菜, 38(8): 34–37.]
- Wang Q, Xu XJ, Zhu, XJ, Chen L, Zhou SJ, Huang ZY, Zhou BF, 2016. Low-temperature stress during capped brood stage increases pupal mortality, misorientation and adult mortality in honey bees. *PLoS ONE*, 11(5): e0154547.
- Wang Y, Ma LT, Xu BH, 2011. Necessity and strategy of honeybee nutrition needs research. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 23(8): 1269–1272. [王颖, 马兰婷, 胥保华, 2011. 蜜蜂营养需要研究的必要性及策略. 动物营养学报, 23(8): 1269–1272.]
- Wu WL, Zhang ZB, Liwang DY, 2016. Principal component analysis of greenhouse crop growing environment. *Computer Technology and Development*, 26(10): 165–168. [武文亮, 张志斌, 李王东岳, 2016. 温室作物生长环境的主成分分析. 计算机技术与发展, 26(10): 165–168.]
- Yang LZ, 1980. Influence of external factors on bee development. *Chinese Beekeeping*, 26(1): 20–21. [杨令中, 1980. 外界因素对蜜蜂发育的影响. 中国养蜂, 26(1): 20–21.]
- Yang F, Wang FH, Xu XL, 2010. Behavioral observation on the pollination of greenhouse strawberries by the *Bombus lucorum*, *Apis cerana cerana* and *Apis mellifera ligustica*. *Anhui Agricultural Sciences*, 38(20): 10711–10713. [杨甫, 王凤鹤, 徐希莲, 2010. 明亮熊蜂和中华蜜蜂和意大利蜜蜂为温室草莓授粉的行为观察. 安徽农业科学, 38(20): 10711–10713.]
- Zhao GL, Li Q, Zhang J, 2020. Comparison of pollination effects of different pollination methods on strawberry in solar greenhouse. *Chinese Fruit and Vegetables*, 40(1): 59–61, 65. [赵改灵, 李秦, 张洁, 2020. 不同授粉方式对日光温室草莓授粉效果的比较. 中国果菜, 40(1): 59–61, 65.]