新型智能蜂箱研发及其应用*

何升洋[1, 2**] 蔡星星[3] 钱文彬[3] 曾 青[1, 2]
何旭江[1, 2] 颜伟玉[1, 2] 曾志将[1, 2***]

（1. 江西农业大学蜜蜂研究所，南昌 330045；2. 蜜蜂生物学与饲养江西省重点实验室，南昌 330045；
3. 江西农业大学软件学院，南昌 330045）

摘 要 **【目的】** 蜜蜂是一种重要经济昆虫，对绿色农业增产和生态保护都有重要作用。传统蜜蜂饲养方式，是建立在以经验为主的基础上，不仅费时费力，而且在一定程度限制蜜蜂饲养规模。信息化、智能化蜂箱不仅是现代蜂业发展趋势，也是现代养蜂业生产主要支撑技术。**【方法】** 为了研发新型智能蜂箱，在充分分析国内外现有智能蜂箱性能基础上，设计了新型智能蜂箱，主要包括智能饲养平台、智能蜂箱箱体、可移动巢框传感器、智能电动巢门和摄像头等部分，并配套智能蜂箱配套软件。应用该智能蜂箱饲养中华蜜蜂 *Apis cerana cerana*，并分析了蜂群在自然分蜂、失王、食物缺少等状态下温度、湿度、CO_2浓度、声音等指标的变化。**【结果】** 新型智能蜂箱具备监控蜂群中的温度、湿度、CO_2浓度、声音、重量、上传巢门相片、自动调节巢门大小等功能。蜂群在自然分蜂、无蜂王、缺少食物等状态相关指标会发生变化，并可通过短信发给养蜂者。**【结论】** 新型智能蜂箱能自动监控蜂群中的状态，对维护蜂群健康和提高蜂群饲养水平有重要意义，对未来我国养蜂生产的智能化和机械化提供了技术支撑。

关键词 智能蜂箱；蜜蜂；蜂群监测；养蜂信息化

Development and application of a novel, smart, beehive system

HE Sheng-Yang[1, 2**] CAI Xing-Xing[3] QIAN Wen-Bin[3] ZENG Qing[1, 2]
HE Xu-Jiang[1, 2] YAN Wei-Yu[1, 2] ZENG Zhi-Jiang[1, 2***]

(1. Honeybee Research Institute, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2. Jiangxi Province Key Laboratory of Honeybee Biology and Beekeeping, Nanchang 330045, China;
3. College of Software, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract **[Aim]** To develop and evaluate an improved, intelligent beehive for honey bees (*Apis* spp.). **[Methods]** The performance of current domestic, and international, intelligent beehives was analyzed in order to develop an optimized version. Based on this, a new, intelligent, beehive system was designed, comprised primarily of an intelligent rearing platform, an intelligent hive body, removable frame-integrated sensors, a smart, electric, hive entrance, cameras, and supporting software. We deployed this system to manage colonies of the Chinese honey bee (*Apis cerana cerana*). Key colony parameters, including temperature, humidity, CO_2 concentration, and sound, were monitored and analyzed during critical states such as swarming, queenlessness, and food shortage. **[Results]** The novel intelligent beehive system effectively monitored colony temperature, humidity, CO_2 concentration, sound, hive weight, uploaded entrance images, and automatically regulated entrance size. Distinct changes in monitored parameters were detected during swarming, queenlessness and starvation allowing critical state alerts to be automatically communicated to beekeepers via SMS. **[Conclusion]** The novel, intelligent, beehive described in this paper enables automated monitoring of colony status, thereby facilitating the maintenance of colony health and improved beekeeping standards. This beehive has considerable potential for the future optimization of apiculture in China.

Key words intelligent beehive; honey bee; colony monitoring; apicultural informatization

---

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2022YFD1600202）；江西省重点研发计划（20232BBF60008）；江西省重点实验室（2024SSY04151）

**第一作者 First author，E-mail：1315251031@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：bees1965@sina.com

收稿日期 Received：2025-08-20；接受日期 Accepted：2025-09-15

蜜蜂是一种重要的农业昆虫，不但生产营养丰富的蜂产品（江慧枝等，2025），而且在植物授粉及生态系统中有重要作用（徐天羽等，2025），还是一种理想模式昆虫（曾志将，2020；陈伟轩等，2024）。我国是养蜂大国，蜂群数量、蜂产品产量和出口量都居世界前列（曾蜜等，2022，2023），蜜蜂饲养已成为一项助力山区乡村振兴的富民产业。

蜂箱是供蜜蜂繁衍生息和生产蜂产品的基本用具。1851 年美国人朗斯特罗什（Lorenzo Lorraine Langstroth）提出来“蜂路”这一概念，并发明设计了蜂箱。蜂箱发明标志着蜜蜂活框饲养技术开始，也促进了人们对蜜蜂生物学特性理解。

在全球农业智能化转型背景下，养蜂产业也在加速融合信息化和智能化技术，智能蜂箱应运而生并成为研究热点。智能蜂箱通过嵌入物联网技术，构建非侵入式蜂群管理方案（何升洋等，2025）。养蜂人员通过移动设备即可获取蜂群内动态数据，不需要频繁开蜂箱检查，节省了人力（吕纯阳等，2019）。

国外主要研究工作有：2015 年爱尔兰的 Apis Protect 公司研发了一种能实时监测蜂箱内部温湿度、CO_2 浓度等环境指标的蜂箱，同时将数据用无线网络实时传输给养蜂者（Edwards-Murphy *et al.*，2016）；2016 年巴西 Kridi 等人提出了无线传感器网络在蜂箱监测中应用，开发了一套蜂箱监测平台，该平台能分析蜂箱内温度，当温度值超过给定阈值时能向养蜂者发送过热警报（Kridi *et al.*，2016）；2017 年以色列 BeeHero 公司和美国甲骨文公司研发了一套蜜蜂环境监测系统及配套人工智能计算系统，能帮助养蜂者监测蜂群的行为和状况（何升洋等，2025）；2015 年台湾大学研发出一款基于无线传感器网络的蜜蜂觅食行为及蜂箱环境因素自动监测系统，在蜂箱内外搭载了温湿度传感器和红外线收发器，不仅可以检测蜂巢内外的环境因素，还可以提供蜜蜂进出觅食活动的长期数据（Jiang *et al.*，2016）。

国内主要研究工作有：2015 年四川天府蜂谷科技有限公司研发了智能蜂箱及“大蜂慧”管理系统，蜂箱设置了温度、湿度、重量、声音、进出数量等传感器，建立了智能养蜂模式，并通过阿里云平台进行整体集成，向全国推广 AI 养蜂服务（李梦璐和张社梅，2020）；2020 年中国农业科学院农业信息研究所研发了一款智能蜂箱，应用了物联网、人工智能等技术，集成了蜂箱数据采集硬件设备及数据管理系统，协助养蜂者远程实时监控蜂箱内部情况，同时提供预警功能辅助养殖决策，提高了蜂群管理效率（何升洋等，2025）；2023 年江西上饶蜂富家科技有限公司研发了一款智能蜂箱及相配套的智慧蜂场系统，可实时监测蜂场风向、温度、湿度等信息，收集蜂箱位置、温湿度及噪声环境参数、视频等数据，另外开发了蜂友 App（何升洋等，2025）。

为了研发新型智能蜂箱，本课题组在充分分析国内外以上智能蜂箱性能基础上，设计了一种新型智能蜂箱，能采集蜂箱内关键信息，能够实时监测蜂群内温度、湿度、重量、声音、CO_2 浓度、蜂群视频监控信息、卫星定位、蜂群溯源等数据。其中视频监控分为二类：蜂群整体监控视频信息采集和蜜蜂个体的高清近景监控视频信息采集。建立移动端远程智能控制、大数据分析可视化监测平台的系统解决方案。同时利用人工智能算法，实现蜂群精准管理、疾病精准评估与预警。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫

试验蜂群为中华蜜蜂 *Apis cerana cerana*（简称中蜂），饲养于江西省井冈山市东上乡东上村养蜂示范蜂场（26.64° N，114.04° E）。试验时间为 2024 年 9 月至 2025 年 4 月。

1.2　新型智能蜂箱设计思路

为了让新型智能蜂箱更贴近养蜂生产实际，课题组在分析总结国内外现有智能蜂箱性能基础上，根据蜜蜂生物学特性，设计一种蜜蜂信息智能化饲养平台，实现了对蜂群内温度、湿度、

声音、CO_2 浓度、重量、GPS 定位、蜂群视频和蜂群 ID 编号等信息的实时监控，特别是设计具备人机交互功能、支持手机端远程操控的智能巢门。

1.3 新型智能蜂箱监测蜂群情况

1.3.1 新型智能蜂箱监测中蜂自然分蜂情况 选健康的 10 群中蜂，群势为 5 张巢脾，蜂脾相称。分为两组（实验组和对照组），每组 5 群。实验组蜂群中已封盖 5-6 d 自然王台，而对照组蜂群中没有王台，对于是否发生分蜂，人工进行观测。观测时间为每日 9:30 和 13:30。若蜂群发生自然分蜂，则拍照并记录时间。使用智能蜂箱监测蜂群的温湿度、CO_2 浓度、声音、频率、重量等指标。

1.3.2 新型智能蜂箱监测中蜂无王群情况 选健康的 10 群中蜂，群势为 5 张巢脾，蜂脾相称。分为两组（实验组和对照组），每组 5 群。实验组蜂群中人为移走蜂王，形成无王群，而对照组蜂群中有正常蜂王，使用智能蜂箱监测蜂群的温湿度、CO_2 浓度、声音频率、重量等指标。

1.3.3 新型智能蜂箱监测中蜂食物缺少情况 选健康的 10 群中蜂，群势为 5 张巢脾，蜂脾相称。分为两组（实验组和对照组），每组 5 群。将实验组蜂群中蜂蜜摇出，形成蜂群内食物缺少状态，而对照组蜂群中有充足食物，使用智能蜂箱监测蜂群的温湿度、CO_2 浓度、声音频率、重量等指标。

1.4 数据分析

蜂箱收集的数据由主板汇总发送到服务器 MYSQL 中，使用 Navicat Premium 17 读取服务器中数据，读取的数据导入 Office Excel 2016 中进行初步整理，使用 IBM SPSS Statistics 27 处理并分析数据。

2 结果与分析

2.1 新型智能蜂箱结构及功能

新型智能蜂箱（图 1：A，B）主要包括智能饲养平台、智能蜂箱箱体、可移动巢框传感器、智能电动巢门和摄像头等部分，另外还有智能蜂箱配套软件。各电子原件参数见表 1。

2.1.1 智能饲养平台 智能饲养平台为实木材质，呈长方体结构（54.3 cm × 41.0 cm × 12.8 cm）（图 2：A，B）。其设计主要实现以下功能：

（1）核心设备防护：平台内嵌抽屉式结构，用于容纳并保护核心电子主板，兼具防水、防潮功能。

（2）重量监测：平台底面四角安装称重传感器，用于持续监测蜂群重量变化。

（3）蜜蜂归巢引导：平台前端设有飞行板，便于蜜蜂降落和进入蜂箱。

（4）防潮与地面隔离：平台底面四角安装橡胶脚垫，提升蜂箱整体高度，有效防止底部受雨水或地表潮气浸湿。

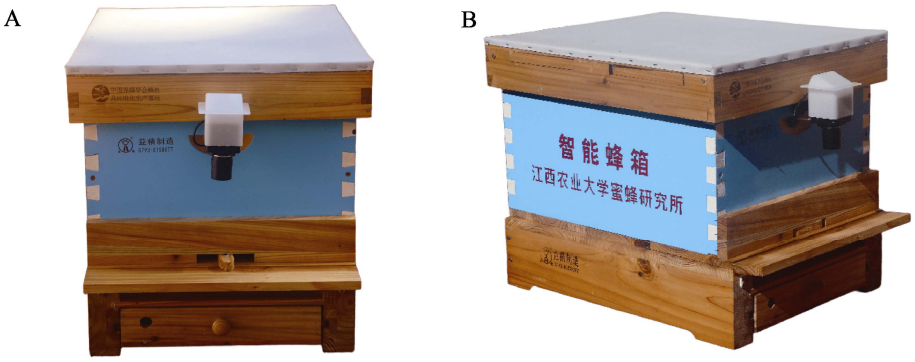

图 1 智能蜂箱

Fig. 1 Intelligent beehive

A. 正面；B. 侧面。

A: The front side; B: The left side.

表 1　智能蜂箱各电子元件参数

Table 1　Parameters of each electronic component of the intelligent beehive

元件名 Component name	型号 Model	量程 Measurement range	误差 Error	工作温度（℃） Operating temperature (℃)	生产厂家 Manufacturer
主控芯片 Main control chip	STM32L431	-	-	- 40-85	意法半导体有限公司 ST Microelectronics International N.V.
物联网通信模组 IoT communication module	EG800K	-	-	- 40-85	上海移远通信技术股份有限公司 Quectel Wireless Solutions Co., Ltd.
温湿度传感器 Temperature and humidity sensor	SHT31-DIS-B	- 40-125 ℃, 0-100% RH	±0.2 ℃, ±2% RH	- 40-125	盛思锐贸易有限公司 Sensirion AG
二氧化碳传感器 Carbon dioxide sensor	ZG09	0-10 000 μmol/mol	±50 μmol/mol, ±3%	- 20-60	热映光电股份有限公司 Radiant Innovation Inc.
蜂群声纹采集器 Bee colony voiceprint collector	MAX9814	40 dB, 50 dB, 60 dB	±1 dB	- 40-85	美信半导体有限公司 Maxim Integrated Products, Inc.
称重传感器 Weighing sensor	YZL928D	0-50 kg	0.05% F.S	- 10-40	广州芊迪电子科技有限公司 Guangzhou Qiandi Electronic Technology Co., Ltd.
摄像头 Camera	JM-W5025T	5 MP		- 20-60	深圳市桥芯电材科技有限公司 Shenzhen Qiaoxin Electric Materials Technology Co., Ltd.
太阳能电板 Solar panel	MO18V20W	0-20 W	±5%	- 40-85	深圳市翔日科技有限公司 Shenzhen Xiangri Technology Co., Ltd.

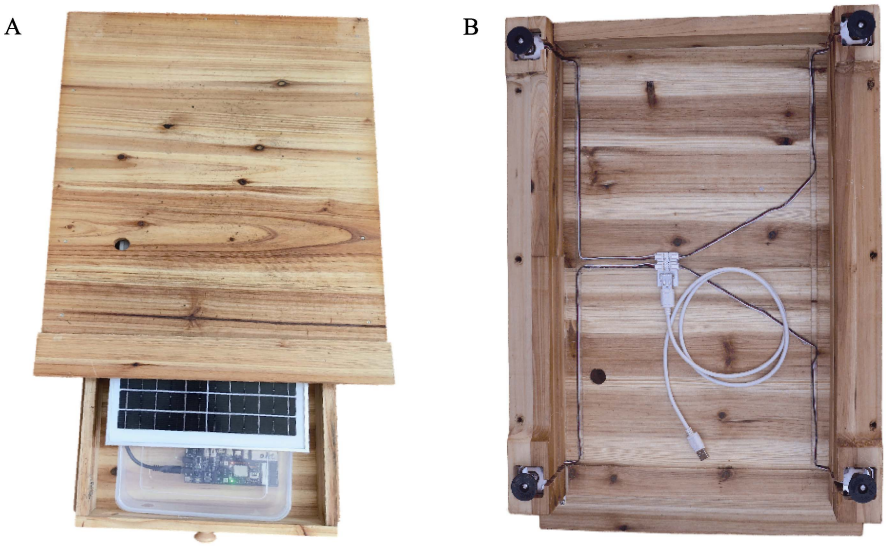

图 2　智能饲养平台

Fig. 2　Intelligent rearing platform

A. 正面；B. 背面。

A. The front side; B: The back side.

2.1.2　智能蜂箱箱体　智能蜂箱箱体由箱身、箱盖和纱盖构成（图 1：A，B）。箱身为木质长方体结构（51.0 cm × 41.0 cm × 26.0 cm），为蜂群提供生存空间。其侧面开有线缆通道，底面预留穿线孔洞，供传感器数据线排布使用。

2.1.3　可移动巢框传感器　可移动巢框采用矩形木质框架结构（49.0 cm × 23.2 cm）（图 3：A, B），核心功能如下：

（1）集成化指标监测：巢框中部固定塑料传感器盒，内置多参数集成传感器，可实时采集蜂巢内部环境数据，包括温度、湿度、CO_2 浓度及声学频率特征。

（2）仿巢脾结构与空间可调性：传感器盒双侧对称安装标准巢础，模拟自然巢房结构。该设计允许巢框在蜂箱内自由移动，实现对蜂巢不同区域的动态指标监测。

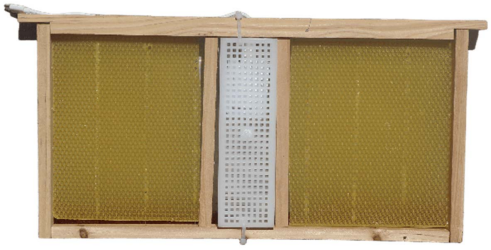

图 3　可移动巢框传感器

Fig. 3　Removable frame-integrated sensors

2.1.4　电动巢门　电动巢门系统由巢门闸板（41.0 cm × 2.0 cm × 7.2 cm）和舵机动力单元构成（图 4：A，B）。主板通过专用舵机线驱动舵机运转，支持 2 种控制模式：

（1）现场人工控制：通过物理开关直接操作。

（2）远程无线控制：基于移动终端应用程序可实现对巢门开闭状态进行实时调控，真正实现人机交互功能。

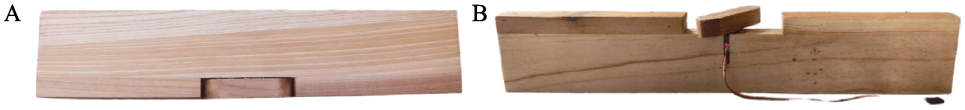

图 4　智能电动巢门

Fig. 4　Smart electric hive entrance

A.正面；B. 背面。

A. The front side; B: The back side.

2.1.5　摄像头　巢门监测使用京目摄像头（JM-W5025T）（图 5：A），设定抓拍间隔为 900 s 以获取巢门口实景图像（图 5：B）。采集图像经主板传输至云端服务器，由 AI 算法实时分析巢门口蜜蜂数量，并结合其它传感器指标数据综合评估蜂群状态，支撑对蜂群精准管理决策。

2.1.6　智能蜂箱配套软件　开发了网页大屏端和手机小程序端软件系统，用户可通过双平台实时查看蜂箱的监测数据及巢门口照片，无需人工开箱即可掌握蜂箱内外状态（图 6：A，B）。此外系统利用人工智能算法，可进行蜂群精细化管理、疾病评估与预警，帮助用户足不出户就能远程了解蜂群状况。

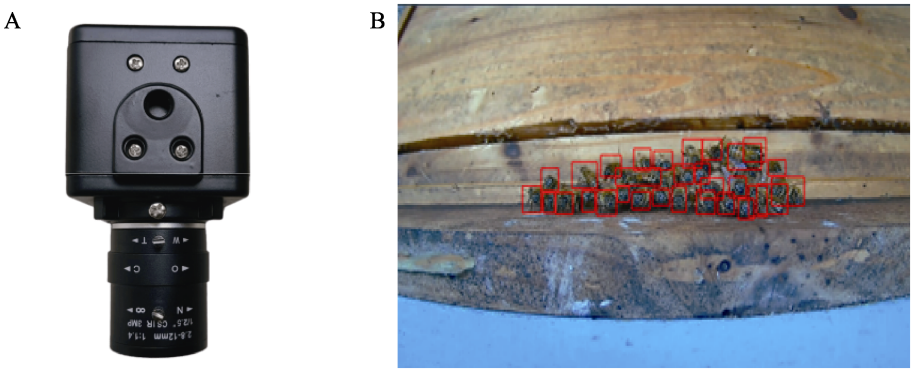

图 5　摄像头

Fig. 5　Camera

A. 摄像头实物；B. AI 识别摄像头拍摄的蜜蜂个体。

A. Physical camera; B. Individual bees captured by AI recognition camera.

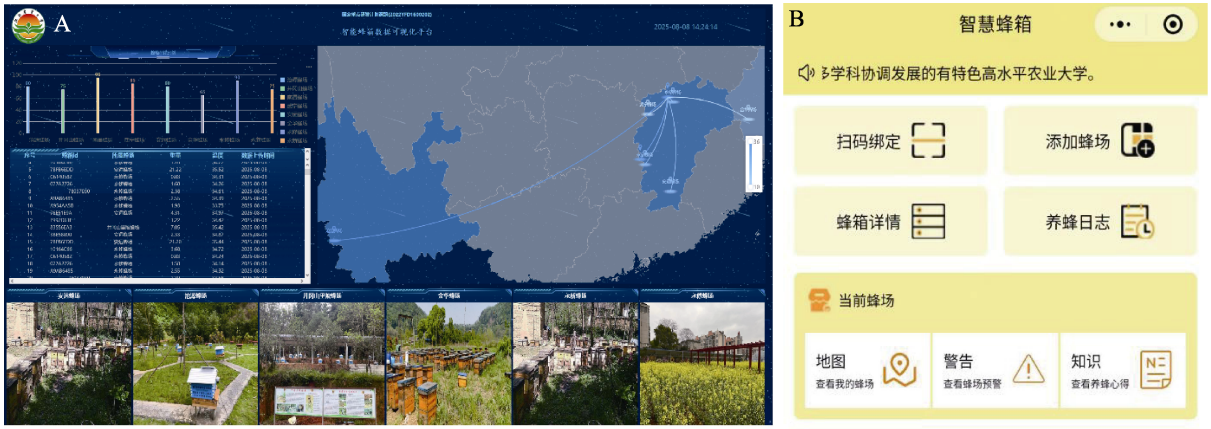

图 6　配套软件

Fig. 6　Supporting software

A. 电脑大屏端；B. 手机小程序端。

A. computer large screen version; B. mobile mini program version.

2.2　新型智能蜂箱监控蜂群相关结果

2.2.1　新型智能蜂箱测定中蜂自然分蜂相关结果　以天为测算单位，如表 2 所示，分蜂前 2 d，分蜂组与未分蜂组蜂群温度、湿度、CO_2 浓度、频率、重量等指标均无显著差异（P>0.05）。分蜂前 1 d 和当天，分蜂组 CO_2 浓度都显著低于未分蜂组（P<0.05）。蜂群分蜂 1 d 后，分蜂组蜂群温度显著低于未分蜂组（P<0.05）；分蜂组振动频率显著高于未分蜂组（P<0.05）；分蜂组

重量显著低于未分蜂组（$P<0.05$）；但两组间湿度不存在显著差异（$P>0.05$）。

以小时为测算单位，如表 3 所示，分蜂发生前 2 h，分蜂组与未分蜂组蜂群温度、湿度、CO_2 浓度、频率、重量等指标均无显著差异（$P>0.05$）。分蜂发生前 1 h，分蜂组蜂群温度、CO_2 浓度和频率均显著高于未分蜂组蜂群（$P<0.05$）。分蜂发生后 1 h，分蜂组重量显著低于未分蜂组蜂群（$P<0.05$）；分蜂组频率显著高于未分蜂组蜂群（$P<0.05$）。分蜂发生后 2 h，分蜂组 CO_2 浓度和重量均显著低于未分蜂组（$P<0.05$），同时分蜂组的频率仍显著高于未分蜂组（$P<0.05$）。

综合以上结果，建议将中蜂自然分蜂阈值初步设定为：CO_2 浓度 1 h 内升高至 7 000 μmol/mol，频率 1 h 内升高至 250 Hz，且温度上升至 36 ℃时，可初步判断自然分蜂并报警，同时摄像头监测巢门口蜜蜂数量可作为辅助判断依据。

2.2.2 新型智能蜂箱测定中蜂无王群相关结果 以天为测算单位，如表 4 所示，蜂群失王前 2 d，分蜂组蜂群与未分蜂组蜂群温度、湿度、CO_2 浓度、频率等指标均无显著差异（$P>0.05$）；失王当天，失王群组的巢内温度、CO_2 浓度和频率均显著高于未失王组（$P<0.05$）；失王后 1 d，各组间的各项观测指标再次恢复至无显著差异状态（$P>0.05$）。

以小时为测算单位，如表 5 所示，蜂群失王前 2 h，失王组蜂群与未失王组蜂群温度、湿度、CO_2 浓度、频率等指标均无显著差异（$P>0.05$）。蜂群失王后 1 h，失王组频率显著高于未失王组（$P<0.05$）。失王状态主要影响蜂群行为（如振动频率）和生理指标（如温度、CO_2 浓度）。

综合以上结果，中蜂失王蜂群阈值与温度、CO_2 浓度和频率相关，建议将中蜂失王阈值初步设定为 1 h 内频率平均高于 200 Hz。

2.2.3 新型智能蜂箱测定中蜂食物缺少相关结果 由表 6 可见，当蜂群缺食物时，缺食物组蜂群重量与有食物组存在显著差异（$P<0.05$），而蜂群温度、湿度、CO_2 浓度、频率等指标均无显著差异（$P>0.05$）。

3 讨论

我国是世界第一养蜂大国，蜂群饲养量超过 1 400 万群，从业人员 30 多万人。但我国蜂场饲养规模小，小于 100 群占 60.4%；蜂场年产值低，少于 5 万元的蜂场占 41.7%（曾蜜等，2020）。另外养蜂者平均年龄 52.9 岁，呈老龄化趋势（曾蜜等，2024）。未来 10-20 年，谁来养蜂？是一个急待解决产业技术瓶颈。借鉴其它农业产业规模化、信息化、智能化、机械化的发展经验，发展新型智能蜂箱是蜂业生产现代化基础。

纵观现有智能蜂箱，虽然可视化移动端具有显示实时数据、监控与预警等基础功能，但仍不能完全满足精细化、科学化的养蜂技术需求。特别是对蜂群复杂状态和疾病监控进行数字化表征和智能评价，还需要更科学的技术手段。

本文主要探讨了蜂群发生自然分蜂、无蜂王、缺少食物等异常状态下，蜂群的温度、湿度、CO_2 浓度、频率、重量等变化规律。研究发现，蜂群在分蜂前 1 d，CO_2 浓度显著降低；分蜂前 1 h，蜂群温度和声音频率显著升高，这与 Seeley（2008）和 Grozinger 等（2014）的研究发现一致，即蜜蜂分蜂前侦察蜂的跑动和发出“piping”的管鸣声会引发蜂群的活动和升温，为蜂群的分蜂做好准备。在失王 1 h 后，蜂群声音频率显著升高，也与 Kanelis 等（2023）和 Ruvinga 等（2023）的发现一致，即蜜蜂在蜂王被移除 1 h 内就能感知到蜂王的缺失，并且声音信号在 5 h 内逐渐增强，蜂王缺失时，工蜂会发出特定声音（如频率更高的“呻吟声”），取代正常的“颤动声”。研究结果为构建蜜蜂异常状态预警的多维模型提供了数据基础，有助于理解蜜蜂行为并优化养蜂管理。

在精准农业和智慧养殖趋势下，智能蜂箱推广对推动蜂业生产现代化转型有着重要意义。但目前智能蜂箱市场价格偏高，普遍在 1 500 元以上，与传统蜂箱 100-150 元相比，显然没有价格优势。另外我国蜂农群体的文化水平普遍不高，54.8%的蜂农只有初中及以下文化水平（曾蜜等，2024），在一定程度上也会影响蜂农对智能蜂箱

表 2　智能蜂箱监控中华蜜蜂蜂群分蜂前后各项指标

Table 2　Various indicators of bee colonies before and after swarming monitored by intelligent beehives of *Apis cerana cerana*

指标 Index	组别 Group	时间（d）Time (d)				
		前 2 d 2 d prior	前 1 d 1 d prior	当天 The day in question	后 1 d 1 d subsequent	后 2 d 2 d subsequent
温度（℃）Temperature (℃)	分蜂 Swarming	35.16±0.12	35.13±0.22	34.77±0.75	31.26±4.35*	25.36±8.24*
	未分蜂 Non-swarming	35.10±0.20	35.07±0.22	35.12±0.15	35.12±0.19*	34.36±0.82*
湿度（%）Humidity (%)	分蜂 Swarming	64.51±2.83	64.11±2.53	64.52±2.54	64.36±6.74	59.23±12.66
	未分蜂 Non-swarming	65.25±1.79	65.26±2.40	66.02±3.42	65.61±3.80	61.22±3.87
CO_2 浓度（μmol/mol） CO_2 concentration (μmol/mol)	分蜂 Swarming	5 869.41±683.78	4 883.33±765.00*	4 101.11±303.58*	4 998.74±1 940.97	6 556.98±2 840.46
	未分蜂 Non-swarming	7 618.03±593.44	6 057.29±496.05*	5 587.75±471.18*	4 638.46±172.61	7 709.17±3 947.78
频率（Hz）Frequency (Hz)	分蜂 Swarming	172.59±70.92	174.90±64.96	194.06±66.40	196.65±76.71*	203.43±70.99*
	未分蜂 Non-swarming	148.68±7.94	145.89±11.63	141.34±25.99	135.10±29.58*	131.01±16.81*
蜂群重量（kg）Colony weight (kg)	分蜂 Swarming	12.62±2.42	12.67±2.52	9.24±1.52*	6.31±1.97*	6.29±2.03*
	未分蜂 Non-swarming	14.07±0.76	14.45±0.61	14.57±0.66*	14.33±0.78*	14.32±1.13*

表中数据为平均值±标准差，两组之间的比较采用独立样本 *t* 检验。相同指标同列数据比较，*表示差异显著（*P*<0.05）。下表同。 Data in the table are presented as mean±SD. Comparisons between the two groups were performed using an independent samples *t*-test. For comparison of data in the same column for the same index, * indicatea significant difference (*P*<0.05). The same below.

表 3　智能蜂箱监控蜂群分蜂前后各项指标

Table 3　Various indicators of bee colonies before and after swarming monitored by intelligent beehives of *Apis cerana cerana*

指标 Index	组别 Group	时间（h）Time (h)			
		前 2 h 2 h prior	前 1 h 1 h prior	后 1 h 1 h subsequent	后 2 h 2 h subsequent
温度（℃）Temperature (℃)	分蜂 Swarming	35.04±0.45	36.40±0.40*	35.84±0.52	35.88±0.61
	未分蜂 Non-swarming	35.47±0.14	35.40±0.15*	35.55±0.21	35.91±0.35
湿度（%）Humidity (%)	分蜂 Swarming	64.89±3.59	63.46±3.56	63.91±4.10	64.21±2.84
	未分蜂 Non-swarming	66.15±4.82	65.78±5.57	65.72±6.72	67.03±6.46*
CO_2 浓度（μmol/mol） CO_2 concentration (μmol/mol)	分蜂 Swarming	4 838.18±1 432.19	7 464.19±2 735.00*	3 188.76±1 069.57	2 771.05±671.46*
	未分蜂 Non-swarming	3 716.73±321.94	3 370.45±379.47*	3 546.50±282.67	3 913.87±452.10
频率（Hz）Frequency (Hz)	分蜂 Swarming	171.45±60.28	342.76±91.51*	260.36±70.48*	239.61±77.84*
	未分蜂 Non-swarming	140.65±11.79	148.96±13.16*	139.58±8.74*	143.68±3.89*
蜂群重量（kg）Colony weight (kg)	分蜂 Swarming	12.51±2.49	11.88±2.37	7.17±3.08*	6.51±1.67*
	未分蜂 Non-swarming	14.37±0.64	14.42±0.65	14.46±0.72*	14.44±0.72*

表 4　智能蜂箱监控蜂群失王前后各项指标

Table 4　Various indicators of bee colonies before and after queenless monitored by intelligent beehives of *Apis cerana cerana*

指标 Index	组别 Group	时间（d）Time (d)				
		前 2 d 2 d prior	前 1 d 1 d prior	当天 The day in question	后 1 d 1 d subsequent	后 2 d 2 d subsequent
温度（℃）Temperature (℃)	失王 Queenless	32.10±2.23	32.51±1.80	31.71±2.21*	31.09±2.68	30.53±3.06
	未失王 Queenright	28.79±2.84	29.70±2.53	28.38±2.32*	28.40±2.00	27.80±2.61
湿度（%）Humidity (%)	失王 Queenless	65.26±5.81	67.11±5.62	64.71±5.10	65.74±4.46	64.57±5.78
	未失王 Queenright	64.98±5.58	67.33±6.02	65.81±8.36	67.05±8.28	66.66±6.08
CO_2 浓度（μmol/mol）CO_2 concentration (μmol/mol)	失王 Queenless	4 773.10±846.20	4 913.35±699.22	5 274.93±743.62*	5 070.95±762.93	4 561.44±971.08
	未失王 Queenright	3 756.45±1 049.98	4 266.93±845.36	4 222.96±441.45*	4 133.47±488.91	4 184.71±336.12
频率（Hz）Frequency (Hz)	失王 Queenless	128.87±9.18	129.46±8.50	146.28±12.10*	136.10±15.98	142.54±15.28
	未失王 Queenright	125.32±10.30	129.85±10.86	127.29±7.34*	128.71±14.82	133.23±16.10
蜂群重量（kg）Colony weight (kg)	失王 Queenless	10.66±3.50*	10.39±2.94*	10.52±3.10*	10.41±2.96*	10.67±3.52*
	未失王 Queenright	7.01±0.86*	7.00±0.89*	7.10±1.06*	7.10±1.02*	6.99±0.94*

表 5　智能蜂箱监控蜂群失王前后各项指标

Table 5　Various indicators of bee colonies before and after queenless monitored by intelligent beehives of *Apis cerana cerana*

指标 Index	组别 Group	时间（h）Time (h)			
		前 2 h 2 h prior	前 1 h 1 h prior	后 1 h 1 h subsequent	后 2 h 2 h subsequent
温度（℃）Temperature (℃)	失王 Queenless	31.40±3.26	31.79±3.20	31.22±2.27	31.92±3.13
	未失王 Queenright	28.57±1.95	29.23±1.81	29.74±1.77	29.77±1.73
湿度（%）Humidity (%)	失王 Queenless	63.54±5.23	65.61±6.09	62.73±5.15	66.50±2.73
	未失王 Queenright	64.74±9.55	65.14±9.12	66.17±9.02	65.24±8.89
CO_2 浓度（μmol/mol） CO_2 concentration (μmol/mol)	失王 Queenless	5 484.00±1 325.45	5 337.35±1 187.75	4 762.59±905.46	5 549.33±1 040.46
	未失王 Queenright	4 605.47±1 881.08	4 271.78±1 692.31	4 450.07±1 156.72	4 169.36±895.08
频率（Hz）Frequency (Hz)	失王 Queenless	148.04±17.16	137.62±19.50	203.18±40.94*	133.15±30.67
	未失王 Queenright	151.77±25.22	127.31±24.56	133.96±23.73*	156.44±28.96
蜂群重量（kg）Colony weight (kg)	失王 Queenless	9.25±0.98*	9.23±1.00*	9.12±1.13*	9.39±1.11*
	未失王 Queenright	7.44±0.73*	7.42±0.72*	7.47±0.72*	7.51±0.71*

表 6　智能蜂箱监控蜂群有无食物各项指标

Table 6　Various indicators of the presence or absence of food in bee colonies monitored by intelligent beehives

指标 Index	组别 Group	时间（d）Time (d)			
		第 1 天 The 1st day	第 2 天 The 2nd day	第 3 天 The 3rd day	第 4 天 The 4th day
温度（℃）Temperature (℃)	缺食物 Food-deficient	34.08±1.47	34.87±0.85	35.02±0.67	35.38±0.16
	有食物 Food-sufficient	33.68±1.95	34.87±0.55	35.04±0.19	35.16±0.11
湿度（%）Humidity (%)	缺食物 Food-deficient	67.81±4.07	66.95±1.47	65.88±1.30	65.62±1.34
	有食物 Food-sufficient	66.67±4.33	65.80±3.16	65.86±2.83	64.55±2.98
CO_2 浓度（μmol/mol）CO_2 concentration (μmol/mol)	缺食物 Food-deficient	11 350.16±1 699.63	9 595.47±1 509.36	8 419.89±1 463.88	6 183.39±802.13
	有食物 Food-sufficient	10 903.48±2 488.29	9 331.23±2 558.25	7 407.21±1 767.25	5 732.92±1 095.57
频率（Hz）Frequency (Hz)	缺食物 Food-deficient	172.09±27.01	153.01±16.09	139.80±6.36	135.32±1.94
	有食物 Food-sufficient	168.00±25.02	153.61±4.68	146.78±8.68	143.55±12.32
蜂群重量（kg）Colony weight (kg)	缺食物 Food-deficient	10.31±0.69*	10.71±0.76*	11.03±0.96*	11.43±1.24*
	有食物 Food-sufficient	11.99±1.26*	12.21±1.32*	13.03±1.31*	13.42±1.36*

应用和推广。因此建议政府加大对智能蜂箱应用的补贴力度，并加强宣传推广，通过多方协作推动智能蜂箱的应用，为推广“一人多养”的高效饲养模式提供技术支撑。

参考文献 (References)

Chen WX, Jiang HZ, Zeng ZJ, 2024. Research advances on major factor of honeybee cast differentiation. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(6): 1177−1182. [陈伟轩, 江慧枝, 曾志将, 2024. 影响蜜蜂级型分化的主要因素研究进展. 应用昆虫学报, 61(6): 1177−1182.]

Edwards-Murphy F, Magno M, Pádraig MW, John OH, Popovici EM, 2016. B+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124(2): 211−219.

Grozinger CM, Richards J, Mattila HR, 2014. From molecules to societies: Mechanisms regulating swarming behavior in honey bees (*Apis* spp.). *Apidologie*, 45(3): 327–346.

He SY, He XJ, Zeng ZJ, 2025. Research progress of intelligent beehives. *Apiculture of China*, 76(6): 57−61. [何升洋, 何旭江, 曾志将, 2025. 智能蜂箱研究进展. 中国蜂业, 76(6): 57−61.]

Jiang HZ, Chen WX, Xu M, Zeng ZJ, 2025. Advances in research on the antioxidant properties and anti-aging functions of honey. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(4): 867−880. [江慧枝, 陈伟轩, 徐敏, 曾志将, 2025. 蜂蜜抗氧化活性和抗衰老功能研究进展. 应用昆虫学报, 62(4): 867−880.]

Jiang JA, Wang CH, Chen CH, Liao MS, Su YL, Chen WS, Huang CP, Yang EC, Chuang CL, 2016. A WSN-based automatic monitoring system for the foraging behavior of honey bees and environmental factors of beehives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123(2): 304−318.

Kanelis D, Liolios V, Papadopoulou F, Rodopoulou MA, Kampelopoulos D, Siozios K, Tananaki C, 2023. Decoding the behavior of a queenless colony using sound signals. *Biology*, 12(11): 1392.

Kridi DS, de Carvalho CGN, Gomes DG, 2016. Application of wireless sensor networks for beehive monitoring and in-hive thermal patterns detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127(2): 221–235.

Li ML, Zhang SM, 2020. Economic impact analysis of intelligent beehives. *Apiculture of China*, 71(5): 56–59. [李梦璐, 张社梅, 2020. 智能蜂箱的经济影响分析. 中国蜂业, 71(5): 56–59.]

Lü CY, Liu JZ, Wu ZG,Wang X, Liu SP, 2019. Research progress of intelligent apiaries. *Apiculture of China*, 70(4): 58–59. [吕纯阳, 刘进祖, 吴忠高, 王星, 刘升平, 2019. 智能蜂场研究进展. 中国蜂业, 70(4): 58–59.]

Ruvinga S, Hunter G, Duran O, Nebel JC, 2023. Identifying queenlessness in honeybee hives from audio signals using machine learning. *Electronics*, 12(7): 1627.

Seeley TD, 2008. Rittschof CC, 2008. The buzz-run: How honeybees signal ‘Time to go!’. *Animal Behaviour*, 75(1): 189–197.

Xu TY, Li Z, Zeng ZJ, 2025. Cloning of four oligosaccharide metabolism-related genes in *Andrena camellia* and their expression in *Escherichia coli in vivo*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(4): 890–901. [徐天羽, 李震, 曾志将, 2025. 油茶地蜂中四个寡糖代谢相关基因克隆及其在大肠杆菌体内表达. 应用昆虫学报, 62(4): 890–901.]

Zeng M, Zeng ZJ, 2020. Results of a survey of apiaries. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1139−1142. [曾蜜, 曾志将, 2020. 蜜蜂饲养规模与产值效益调查分析. 应用昆虫学报, 57(5): 1139−1142.]

Zeng M, Zhou WL, Yan WY, Zeng ZJ, 2022. Developmental analysis of apicultural industry in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1471−1480. [曾蜜, 周伟良, 颜伟玉, 曾志将, 2022.中国蜜蜂产业生产发展分析. 应用昆虫学报, 59(6): 1471−1480.]

Zeng M, Zhou WL, Yan WY, Zeng ZJ, 2023. Analysis of honey export and import in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(3): 741−754. [曾蜜, 周伟良, 颜伟玉, 曾志将, 2023. 中国蜂蜜出口和进口分析. 应用昆虫学报, 60(3): 741−754.]

Zeng M, Zhou WL, Yan WY, Zeng ZJ, 2024. Investigation of the current production status of different feeding methods of apiary. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(2): 485−491. [曾蜜, 周伟良, 颜伟玉, 曾志将, 2024. 不同饲养方式的蜂场生产现状调查与分析. 应用昆虫学报, 61(2): 485−491.]

Zeng ZJ, 2020. Advances of honeybee biology in China in the past 70 years. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(2): 259–264. [曾志将, 2020. 中国 70 年来蜜蜂生物学研究进展. 应用昆虫学报, 57(2): 259–264.]