动物科学

DOI:10.11721/cqnuj20250414

中华蜜蜂温、湿度监测系统开发及在越冬蜂群中的运用*

皮安娟[1,2]，杨　焱[1,2]，张小燕[1,2]
(1. 重庆师范大学 生命科学学院；2. 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)

摘要：针对中华蜜蜂(*Apis cerana cerana*)越冬期蜂巢微环境调控需求，探究非侵入式温、湿度监测技术对蜂群健康管理的优化机制，构建精准化、低成本的物联网监测系统，以提升秋、冬季蜂群存活率与饲养管理效率。基于物联网架构开发了蜂箱温湿度监测系统(后简称 HTHS)，该系统集成了主控模块即 ESP8266 WIFI 芯片与 DHT11 传感器；通过部署蜂巢中心、边缘及环境监测节点，每 5 min 进行 1 次数据采集，再结合 *Z*-score 法剔除异常值、SPSS 26.0 统计软件中的 Pearson 相关性分析及通过 Matlab 7.0 软件实现温度梯度曲线拟合，从而对比了越冬准备期与越冬期的连续监测数据。HTHS 监测数据显示蜂群通过聚集行为将蜂巢中心区域温度和相对湿度分别稳定于(33.3±1.2) ℃和 53.6%±2.0%，蜂巢边缘区域受环境渗透影响明显；这一结果与人工开箱检测结果高度一致。HTHS 监测数据进一步显示：越冬阶段蜂群对蜂巢中心温度调控能力突出，环境温度为 0～19.6 ℃时，蜂巢温度可维持在(25.4±1.9) ℃。HTHS 通过非侵入式连续监测和精准解析蜂巢温湿度时空动态，为极端气候预警与蜂群健康管理提供了物联网技术支撑，该系统所具有的低成本、低干扰特性有助于推动传统养蜂业向数据驱动的“精准养蜂”模式转型。

关键词：中华蜜蜂；温度；相对湿度；监测系统；物联网
中图分类号：Q965　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-6693(2025)04-0051-08

重庆市地处中国西南内陆、长江上游，属于亚热带湿润季风气候区，地形复杂，山区面积占比约 70%，森林覆盖率约 43.1%，具有独特的自然生态环境、丰富的蜜源植物资源与蜜蜂资源，养蜂历史悠久。蜜蜂为野生及栽培植物提供授粉服务，在它们的生殖生长中起到了关键作用。蜜蜂在维系自然界生物多样性的同时还产出蜂蜜、蜂蜡等副产品，是典型的经济资源昆虫[1]。中华蜜蜂(*Apis cerana cerana*)可充分利用零星蜜源植物且采蜜期较长，适合在中国山区定点养殖，因此成为了重庆市的主要养殖蜂种。

当前，中国多数地区的中华蜜蜂养殖业仍采用传统方式，而这一方式弊端诸多，特别是频繁开箱检查易引起蜂群内部环境变化、干扰蜜蜂生活[2]且不利于蜂群高效生产，也限制了相关研究的广度。随着科技的快速发展，传统养蜂业的发展迎来了新机遇，研究者们在全球范围内提出了“精准养蜂”议题[3]，即通过物联网技术建立蜂群环境参数监测系统平台[4]，对温度、相对湿度、声音、进出量、二氧化碳浓度等一系列蜜蜂养殖参数进行精确监测，从而更准确地判断蜜蜂生存状态并有效应对蜂群崩溃[5]。与传统方式相比，新的方式更强调对有关数据的非侵入式获取，从而避免了频繁人工开箱检查对蜂群生活的干扰以及对蜂箱生态环境的破坏。

越冬期是蜂群生命周期中的关键阶段，蜂巢内部微环境的稳定性直接关系着蜂群的存活率及春季繁殖效能。研究表明，中华蜜蜂通过群体行为调控蜂巢内部温、湿度以维持卵、幼虫及蛹的适宜发育条件[6]。越冬准备期和越冬期外界环境变化剧烈，若蜂巢内部温度低于 20 ℃或高于 35 ℃，将导致蜜蜂代谢紊乱，幼虫发育停滞甚至死亡[7]；而蜂巢内部相对湿度大于 70%易诱发真菌病害，小于 40%则增加蜜蜂脱水风险[2]。由此可见，越冬准备期和越冬期温、湿度监测对蜂群饲养管理具有重要的生态与生产意义。实时监测数据还可为蜂农提供精准干预依据。例如，他们可以通过相关数据在寒潮期间加强保温或在湿度异常时优化通风以避免蜂群越冬群势凋亡等风险。此外，温、湿度动态与结团取暖、扇风排湿等蜂群行为密切相关，长期监测数据可揭示蜂群适应环境胁迫的生理机制，为优化蜂箱设计及管理策略提供理论支撑[8]。因此，越冬准备期和越冬期的温、湿度监测不仅是

* **收稿日期**：2025-04-20　**修回日期**：2025-05-17　**网络出版时间**：2025-09-10T14:13
资助项目：重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2021jcyj-msxmX0425)；现代农业产业技术体系建设专项资金项目(No. CARS-44)；重庆市蜂产业技术体系项目(No. COMAITS202416)
第一作者简介：皮安娟，女，研究方向为生物信息学，E-mail：2530242605@qq.com；**通信作者简介**：张小燕，女，副教授，E-mail：zyzhang18@163.com
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250910.0939.006

保障蜂群健康越冬的技术手段,更是推动养蜂业向数据驱动模式转型的重要基础[9]。

为满足中华蜜蜂越冬期蜂巢微环境调控需求和提升秋冬季蜂群存活率与饲养管理效率,基于上述研究背景,本研究团队开发了一种基于多参数智能传感器的温湿度监测系统(后简称 HTHS)。HTHS 通过一体化传感器设计有效降低了硬件成本,同时集成了实时监测、数据可视化等功能,兼具经济性与实用性。同时,HTHS 基于无线传感与物联网技术构建,通过持续采集蜂箱环境参数来实现蜂群健康状态的智能识别与科学管理。本研究团队在中华蜜蜂蜂箱的实地应用中验证了 HTHS 在环境监测方面的有效性:温、湿度数据的实时反馈为蜂群状态评估提供了量化依据,而基于物联网架构的低成本特性则有助于协助蜂农优化养殖决策。HTHS 的成功应用有望为蜂群健康管理提供可靠的技术解决方案。

1 材料与方法

1.1 实验蜂群的来源与饲养

实验所用中华蜜蜂蜂群来自重庆师范大学蜜蜂园实验蜂场。在越冬准备期和越冬期各选取健康且群势相当的 3 群中华蜜蜂作为研究对象,采用标准郎氏蜂箱进行饲养管理。蜂箱安置于通风条件良好、蜜粉源植物丰富的室外环境,实验期间定期检查蜂群状态并及时补充饲料,确保蜂群维持正常的繁殖周期与活动规律。上述饲养方式在越冬准备期和越冬期均保持一致以保障实验数据的连续性和可比性。除在传感器部署时调整蜂路结构以外,实验期间保持蜂箱自然状态,避免频繁开箱干扰蜂群生活。

1.2 实验方案与操作方法

1.2.1 系统架构与部署方案

在本研究团队研发的 HTHS 硬件中,ESP8266 WIFI 芯片为主控模块,连接 DHT11 温湿度传感器[10-11]。设备外壳通过 3D 打印制作,内部由规格为 3.7 V、3 000 mA·h 的 18650 锂电池供电(图 1a)。HTSH 的物联网体系架构(图 1b)主要是围绕温湿度传感器采集数据,ESP8266 作为基站,通过路由器连入互联网,通过 MQ 遥测传输(后简称 MQTT)将数据上传到百度智能云云端、本地机和手机。用户随时可以通过通过云端监控主控模块的状况并向该模块发送控制指令。HTHS 的软件部分基于安卓平台开发,利用 C++语言编写数据采集程序,通过 MQTT 协议传输数据至百度智能云物联网平台进行存储与可视化。图 1c 显示了百度智能云的可视工作区,该工作区除了可显示时间日期,还用表盘和曲线走向这 2 种方式显示温度和相对湿度,并带有地图定位功能。软件还配套开发了安卓端应用程序用于移动监控,HTHS Mqqt 软件可以实时显示每个传感器监测到的温湿度和相对湿度数据(图 1d)。DHT11 传感器分别布置于蜂巢内外关键区域:在越冬准备期阶段,1~3 号传感器置于蜂路 1~3 的中心,4、5 号传感器分别位于下蜂路(巢门侧)和上蜂路(副盖侧),6 号传感器监测环境温湿度;在越冬阶段,所有传感器集中于蜂巢中心。主控模块及电源装置固定于隔板外侧,确保连续供电,数据每 5 min 自动采集 1 次并上传至云端。

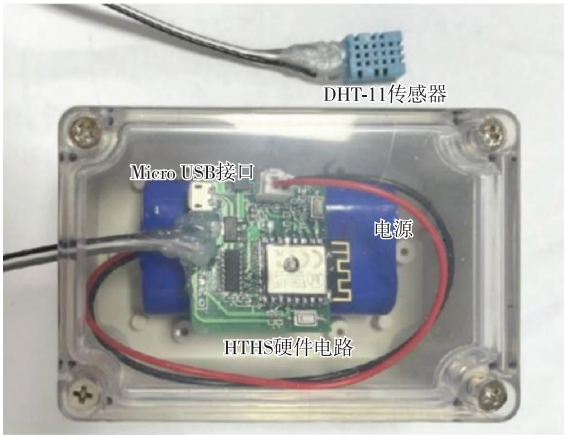
1.2.2 数据采集与处理流程

基于安卓平台开发的 C++程序驱动数据采集系统,通过 MQTT 协议实现云端传输。数据采集时间间隔根据实验阶段动态调整,常规为每 30 min 进行 1 次,遇极端天气时缩短上述时间间隔。百度智能云物联网平台承担实时数据存储与可视化任务,配套安卓端 APP(HTHS Mqqt)实现远程监控。原始数据经 MOTT.fx 软件下载后,通过自主开发的 Hths2023 程序进行格式转换,结合 Z-score 法剔除异常值。处理流程采用多软件协同分析:首先用 Excel 2019 软件完成数据分类整理;然后采用 SPSS 26.0 统计软件对数据进行线性回归及 Pearson 相关性检验;再经过 Matlab 7.0 软件实现温度梯度曲线拟合;最终通过 Origin 8.0 软件进行专业图表可视化。

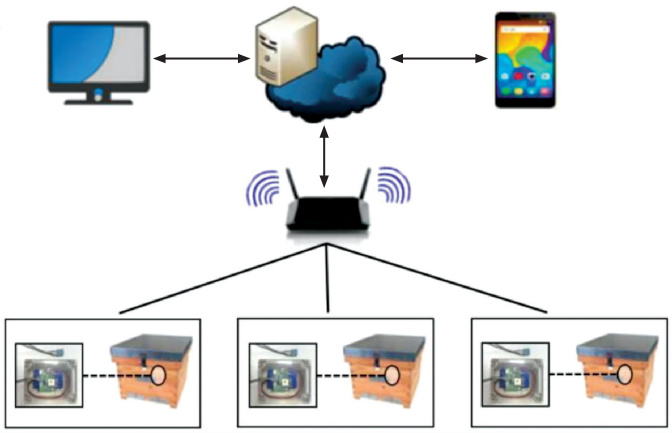
2 结果与分析

2.1 HTHS 构建与测试

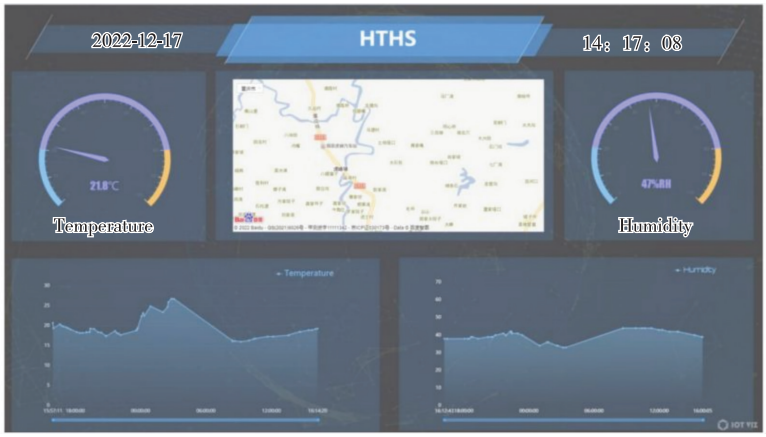
HTHS 基于作为主控模块的 ESP8266 WIFI 芯片与 DHT11 传感器进行构建,硬件成本低于同类系统。ESP8266 WIFI 芯片支持“站点模式+无线接入点模式”双模联网,通过 MQTT 协议实现数据实时传输至百度智能云平台及本地终端。DHT11 传感器覆盖-20~60 ℃的温度范围与 5%~95%的相对湿度范围[10],满足蜂箱环境监测需求。系统部署中,蜂箱内外传感器分别监测环境及蜂路(中心与边缘)参数,数据每 5 min 采集 1 次,累计获取到 14 152 个有效数据点。



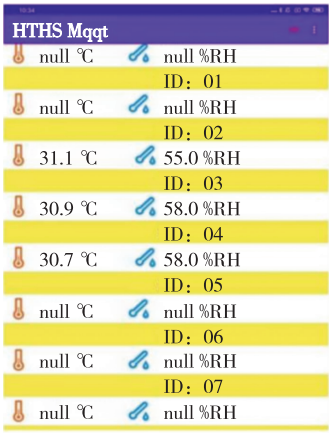
a　HTSH 硬件实物



b　HTSH 的物联网体系架构



c　百度智能云的可视工作区：蜂巢温度和相对湿度监测系统



d　手机端接收数据软件：HTHS Mqqt

图 1　HTSH 系统构成

Fig. 1　The composition of HTSH

监测数据显示(表 1)，在越冬准备期外部环境中温、湿度波动均较大的情形下，蜂箱内部温、湿度保持了较高的稳定性：中心蜂路温度 T2 的变异系数为 0.1%，与蜂巢外部的环境温度 T(out)的比较结果表明实验蜂群通过聚集行为实现核心热稳定性($p<0.01$)；边缘区域蜂路温度 T1、T3 平均值分别为 29.8 ℃与 31.3 ℃，符合蜂群热力学分布模型。

表 1　越冬准备期蜂巢内外温度统计值

Tab. 1　Statistical values of temperature inside and outside the hive in pre-overwintering period　　℃

项目	平均值	标准误差	最小值	中间值	最大值
T(out)	18.8	4.1	11.4	18.6	33.6
T1	29.8	1.7	24.6	30.1	35.6
T2	33.3	1.2	27.0	33.7	34.8
T3	31.3	1.8	25.7	31.3	35.0

注：T(out)为蜂巢外部的环境温度，T2 为蜂巢内部中心蜂路温度，T1 和 T3 为蜂巢内部边缘区域蜂路温度，下同。

对越冬准备期的相对湿度监测数据显示(表 2)，中心蜂路相对湿度 RH2 变异系数为 0.1%，标准误差较环境相对湿度 RH(out)降低 68.4%，本研究推测与繁殖期蜂群代谢调节相关[2]；而边缘区域蜂路相对湿度 RH1、RH3 受环境影响明显，平均值更接近 RH(out)。对 HTHS 的数据验证结果表明，HTHS 数据与传统人工开箱检测法所得数据一致，证实 HTHS 采用的非侵入式监测方式可有效维持实验蜂群自然状态。

为实现蜂巢微环境参数的实时动态监测与远程数据管理，本研究开发了基于安卓平台的移动终端应用程序

HTHS Mqqt(图1d),该系统集成MQTT协议实现多节点传感器数据同步传输。应用程序主界面设有三态可视化模块:传感器网络拓扑图实时显示设备在线状态及空间分布;数值显示面板精确呈现当前温度及相对湿度监测值;时空分析模块通过双轴折线图同步展示24 h内参数变化趋势(时间分辨率为每10 s显示1个数据点)。

表2 越冬准备期蜂巢内外相对湿度统计值

Tab. 2 Statistical values of relative humidity inside and outside the hive in pre-overwintering period

项目	平均值	标准误差	最小值	中间值	最大值
RH(out)	56.3%	7.6%	29.0%	58.0%	67.0%
RH1	56.9%	3.3%	43.3%	57.0%	66.0%
RH2	53.6%	2.0%	44.0%	54.0%	58.0%
RH3	58.5%	2.7%	49.0%	58.7%	68.0%

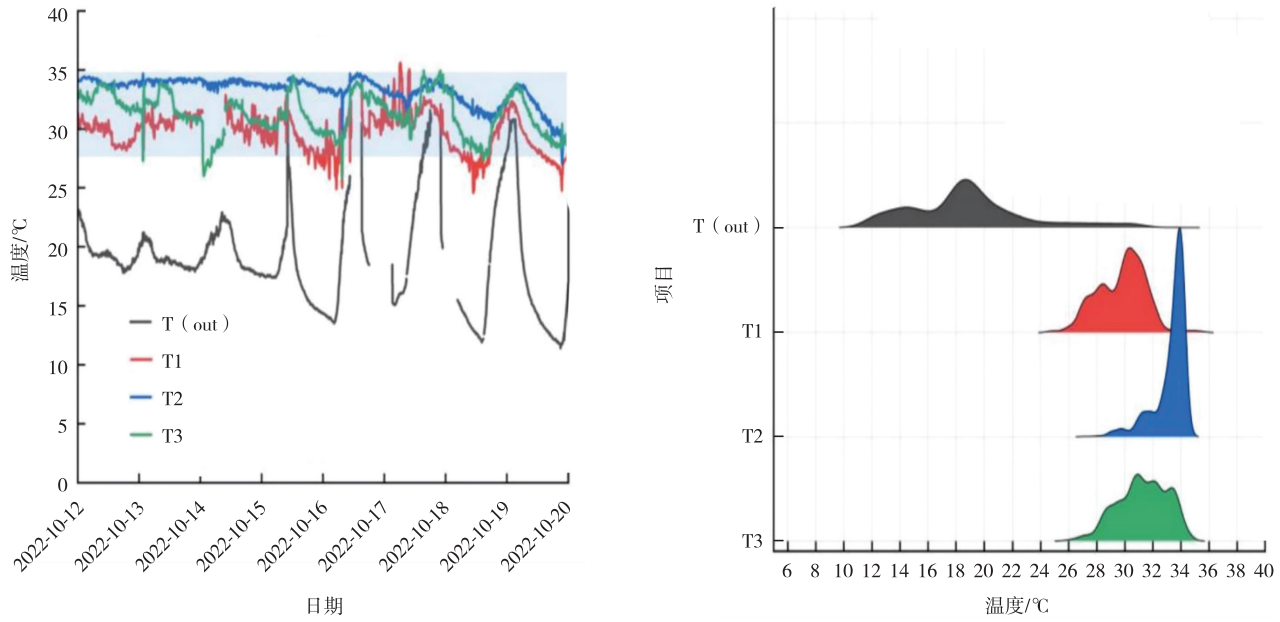
注:RH(out)为蜂巢外部的环境相对湿度,RH2为蜂巢内部中心蜂路相对湿度,RH1和RH3为蜂巢内部边缘区域蜂路相对湿度,下同。

2.2 越冬准备期蜂巢温度变化分析

结合表1和图2可知:在越冬准备期,T(out)中间值较低,整体不甚稳定,变幅较大;T2的中间值较高,变幅较小;T1和T3的中间值稍低于T2而变幅相较于T2更大。中心蜂路是蜜蜂的卵、幼虫和蛹发育区域,T2平均值较高,正是蜂子发育生长适宜的温度,这也表明了蜂群更加重视调节中心子脾的温度[12]。

2.3 越冬准备期蜂巢湿度变化分析

表2和图3显示:在越冬准备期,RH(out)稳定性低、变幅大;RH2中间值稍低于RH(out)但波动范围小;RH1和RH3中间值接近于RH(out)的中间值,但两者波动范围比RH2的波动范围更大。这一结果这也证明了蜂巢边缘湿度更易受外界环境湿度的影响。对于中心蜂脾而言,由于其中存在卵、幼虫等生命幼体,蜜蜂会调控该区域的湿度以确保这些幼体在适宜的湿度范围内生长发育[13]。



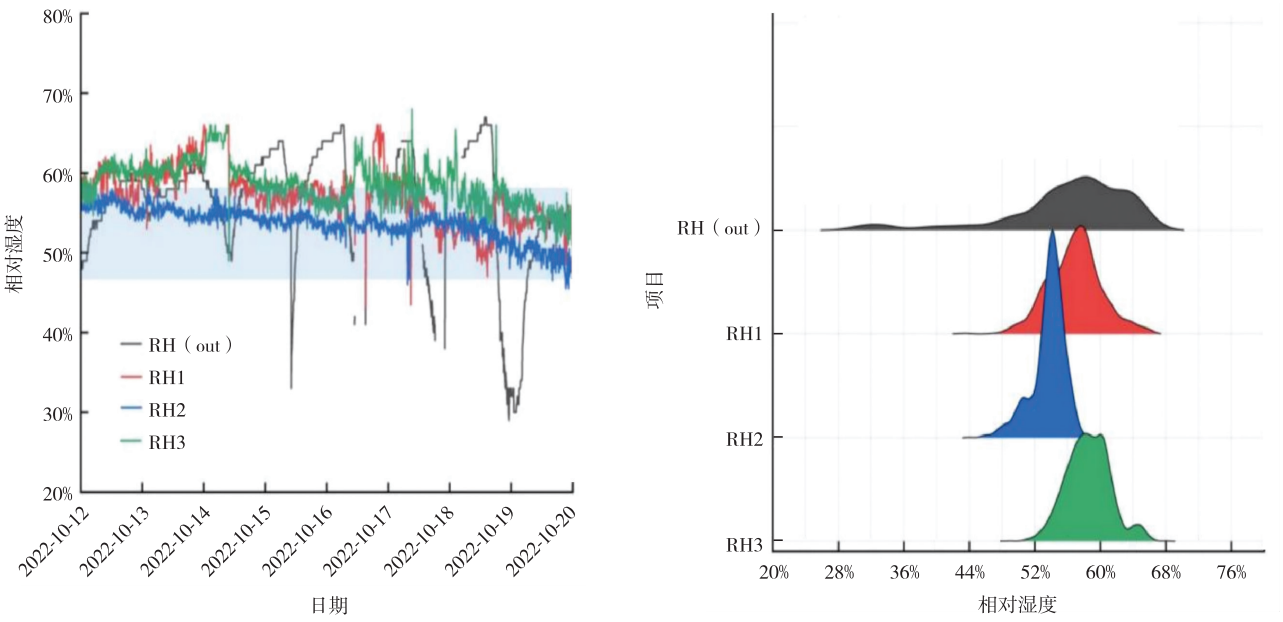
a 温度值变化曲线 b 温度值集中度分析

图2 蜂巢内外的温度值变化曲线和集中度分析

Fig. 2 Temperature variation curves and concentration analysis inside and outside the hive

2.4 基于HTHS的越冬期蜂巢温度变化分析

在越冬期,本研究通过HTHS监测到T(out)变幅较大且最大值、最小值和平均值均较低;蜂巢中心的温度T(centre)变幅也较大,但最大值、最小值和平均值均大幅高于T(out)(表3)。



a　相对湿度值变化曲线　　b　相对湿度值集中度分析

图 3　蜂巢内外的相对湿度值变化曲线和集中度分析

Fig. 3　Relative humidity variation curves and concentration analysis inside and outside the hive

表 3　越冬期蜂巢内外温度统计值

Tab. 3　Statistical values of temperature inside and outside the hive in overwintering period　　℃

项目	平均值	标准误差	最小值	中间值	最大值
T(out)	8.4	2.8	0.0	8.7	19.6
T(centre)	25.4	1.9	15.6	25.2	34.7

注：T(centre)为蜂巢中心的温度，下同。

图 4 进一步显示：在越冬期 T(out)不仅波动范围大，且梯度变化较快；T(centre)随着前者的变化也会有一定范围的波动，但工蜂则会将它的变化范围保持在 5.2 ℃左右。同时，本研究发现当 T(out)越低，实验蜂群会聚集得越紧密，工蜂也会相应减少出房活动；当温度(T(out)下降至 15 ℃时，蜂群甚至会聚集成“蜂团”；而随着天气晴朗且 T(out)上升，蜂群也会相对松散，工蜂也会更加活跃并会出巢活动。总之，在环境温度很低时，蜜蜂需要更加努力才能维持蜂巢温度的稳定性，从而保证整个蜂巢的温度均衡[14]。

2.5　基于 HTHS 的越冬期蜂巢湿度变化分析

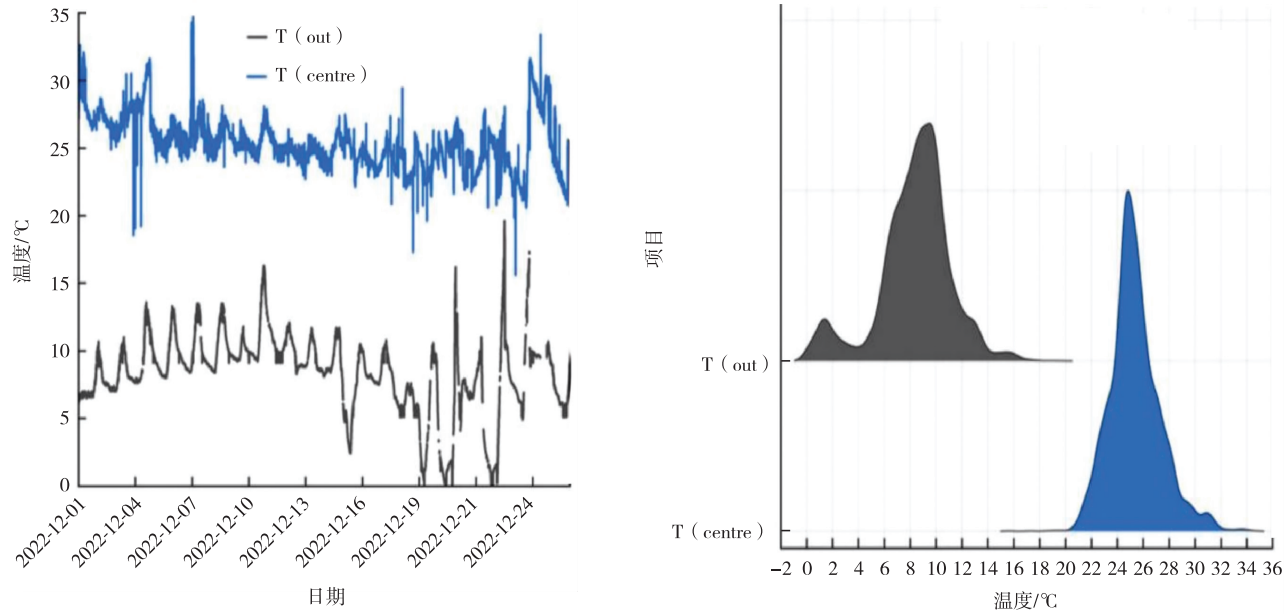
经 HTHS 监测数据显示：在越冬期 RH(out)不稳定且变幅较大，蜂巢中心相对湿度 RH(centre)则保持相对稳定(表 4)。

对湿度数据作进一步分析，如图 5 所示：在越冬期 RH(out)不仅波动范围大，且梯度变化较快；RH(centre)也随着 RH(out)变化而波动，但幅度较小，且梯度变化缓慢。这一结果说明实验蜂群调节蜂巢湿度能力较强，从而保持了 RH(centre)的相对稳定。在越冬期需要将蜂巢湿度维持在一定范围来维持蜜蜂的生命活动，但湿度过低或过高都会对蜜蜂产生不良影响——湿度过低会导致蜜蜂体内水分不足；湿度过高则会导致蜂巢内空气潮湿并促进细菌和霉菌的生长，危害蜜蜂的身体健康。通常情况下，采用将蜂箱放置在合适的高度、控制蜂巢内的通风、加装蜂箱防潮垫等方法可以帮助控制蜜蜂在越冬时的蜂巢内部湿度[15-16]。

3　讨论

本研究针对传统蜂群越冬管理依赖人工经验及频繁开启蜂箱测温导致箱内环境扰动的问题，创新性地开发了基于无线传感网络的 HTHS。实证研究结果表明，蜂箱内部温度场呈现中心区向边缘递减的梯度分布，核心区域相对湿度稳定且波动范围明显低于箱外相对湿度的波动范围，由此验证了实验蜂群的自主环境调控能力。

值得注意的是,越冬前蜂箱内相对湿度下降可能与蜜蜂主动促进蜜粉水分蒸发有关。HTHS 较传统监测方式具备明显的技术优势,单节点硬件成本降低,射频信号强度严格控制,符合蜂群生物安全标准。



a　温度值变化曲线　　b　温度值集中度分析

图 4　蜂巢内外的温度值变化曲线和集中度分析

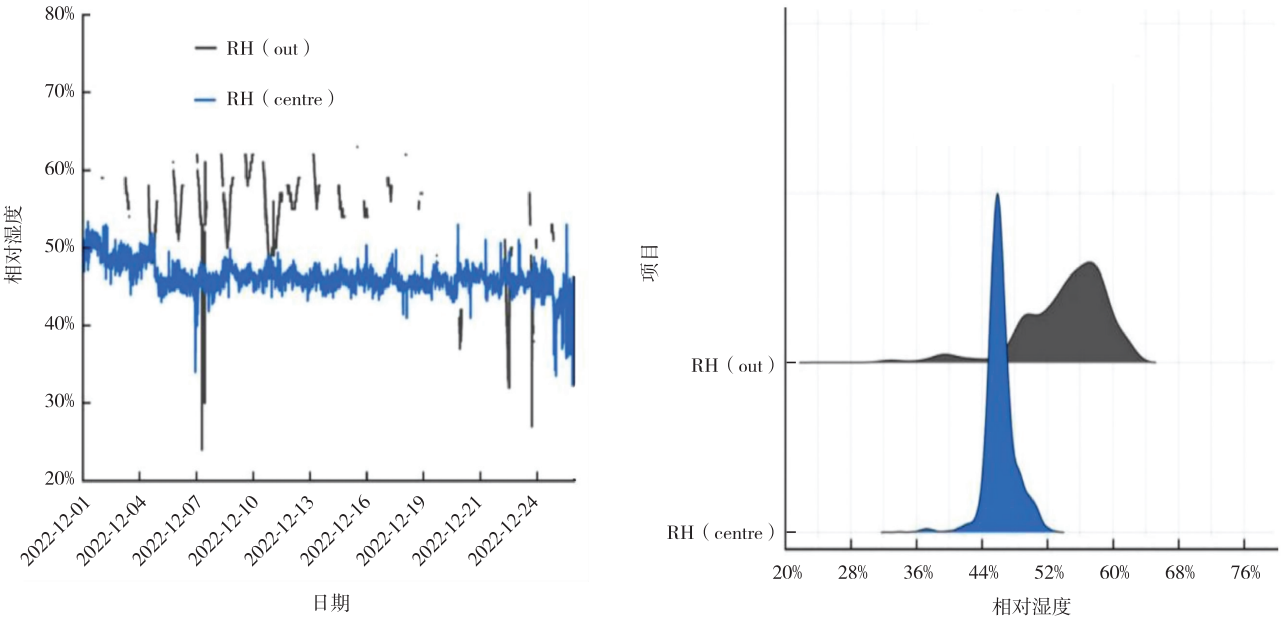
Fig. 4　Temperature variation curves and concentration analysis inside and outside the hive

表 4　越冬期蜂巢内外湿度统计值

Tab. 4　Statistical values of relative humidity inside and outside the hive in overwintering period

项目	平均值	标准误差	最小值	中间值	最大值
RH(out)	54.1%	5.3%	24.0%	55.0%	63.0%
RH(centre)	46.3%	1.8%	32.3%	46.0%	53.4%

注:RH(centre)为蜂巢中心的相对湿度,下同。



a　相对湿度值变化曲线　　b　相对湿度值集中度分析

图 5　蜂巢内外的相对湿度值变化曲线和集中度分析

Fig. 5　Relative humidity variation curves and concentration analysis inside and outside the hive

此外，基于本研究结果，建议在越冬期采取双重防护策略：一是应用聚氨酯泡沫板、复合毛毡等新型材料构建箱体隔热层；二是规范管理流程，将开箱检查频率控制在每 30 d 进行 2 次以内。

当然，HTHS 仍存在以下局限性：首先，DHT11 传感器精度相对较低，对微环境监测仍有一定影响，后续拟升级为高精度传感器并采用多项式校准方式对相关数据进行校准；其次，单点静态监测无法解析三维温湿度场，计划在未来部署多节点传感器阵列结合空间插值算法构建三维模型；再次，本研究缺乏蜂群行为关联分析，故拟集成精度为±10 g 的压电式质量传感器与声纹模块，通过提取声波特征，建立温、湿度与蜜蜂振翅、结团等行为的时空关联；最后，系统采用的锂电池供电续航仅 72 h，计划开发光伏-电容复合能源模块，结合低功耗协议等方法，预计将供电续航提升至 30 d 以上。此外，本研究团队在后续的研发工作中将重点推进多维度传感器集成，即采用质量传感器监测蜂箱的质量波动，通过麦克风阵列捕捉声波频谱，利用二氧化碳传感器跟踪气体代谢；并通过构建多源数据融合的生物特征矩阵建立蜂群健康动态评估模型，进而为蜂农提供检查优先级排序、取蜜时机判断等全流程的决策支持。

参考文献：

[1] BOTÍAS C，ANDERSON D L，MEANA A，et al. Further evidence of an oriental origin for *Nosema ceranae* (Microsporidia：Nosematidae)[J]. Journal of Invertebrate Pathology，2012，110(1)：108-113.

[2] CATANIA P，VALLONE M. Application of a precision apiculture system to monitor honey daily production[J]. Sensors，2020，20(7)：2012.

[3] KVIESIS A，ZACEPINS A. System architectures for real-time bee colony temperature monitoring[J]. Procedia Computer Science，2015，43：86-94.

[4] GIL-LEBRERO S，QUILES-LATORRE F J，ORTIZ-LÓPEZ M，et al. Honey bee colonies remote monitoring system[J]. Sensors，2017，17(1)：55.

[5] KVIESIS A，ZACEPINS A，DURGUN，M. Application of wireless sensor networks in precision apiculture[J]. Engineering for rural development，2015，20(3)：20-22.

[6] ZHU X J，WEN X Z，ZHOU S J，et al. The temperature increase at one position in the colony can predict honey bee swarming (*Apis cerana*)[J]. Journal of Apicultural Research，2019，58(4)：489-491.

[7] HUMAN H，NICOLSON S W，DIETEMANN V. Do honeybees，*Apis mellifera* scutellata，regulate humidity in their nest?[J]. Naturwissenschaften，2006，93(8)：397-401.

[8] OCHOA I Z，GUTIERREZ S，RODRÍGUEZ F. Internet of Things：low cost monitoring BeeHive system using wireless sensor network[C]//2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV). Boca del Rio：IEEE，2019：1-7.

[9] TASHAKKORI R，HAMZA A S，CRAWFORD M B. Beemon：an IoT-based beehive monitoring system[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2021，190：106427.

[10] 方鹏，李维波，郝春昊，等. 基于 ESP8266 的双 CPU 小功率多通道充电智能控制终端[J]. 现代电子技术，2022，45(22)：150-156.
FANG P，LI W B，HAO C H，et al. ESP8266-based intelligent control terminal for dual-CPU low power multi-channel charging [J]. Modern Electronics Technique，2022，45(22)：150-156.

[11] HOLOVATYY A. Development of IoT weather monitoring system based on arduino and ESP8266 Wi-Fi module[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2021，1016(1)：012014.

[12] CHEN C，WANG H H，LIU Z G，et al. Population genomics provide insights into the evolution and adaptation of the eastern honey bee (*Apis cerana*)[J]. Molecular Biology and Evolution，2018，35(9)：2260-2271.

[13] MEIKLE W G，RECTOR B G，MERCADIER G，et al. Within-day variation in continuous hive weight data as a measure of honey bee colony activity[J]. Apidologie，2008，39(6)：694-707.

[14] HAMBLETON J I. The quantitative and qualitative effect of weather upon colony weight changes[J]. Journal of Economic Entomology，1925，18(3)：447-448.

[15] NICOLAS G，SILLANS D. Immediate and latent effects of carbon dioxide on insects[J]. Annual Review of Entomology，1989，34：97-116.

[16] SEELEY T D. Atmospheric carbon dioxide regulation in honey-bee (*Apis mellifera*) colonies[J]. Journal of Insect Physiology，1974，20(11)：2301-2305.

Animal Sciences

Development of a Temperature and Humidity Monitoring System for *Apis cerana cerana* and Its Application in Overwintering Colonies

PI Anjuan[1,2], YANG Yan[1,2], ZHANG Xiaoyan[1,2]

(1. College of Life Sciences, Chongqing Normal University; 2. Key Laboratory of Pollinating Insect Resources Conservation and Utilization in the Upper Reaches of the Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Exploring the optimization mechanism of non-invasive temperature and humidity monitoring technology for bee colony health management during the overwintering period of Chinese honeybees (*Apis cerana cerana*), and constructing a precise and low-cost Internet of Things (IoT) monitoring system to improve the survival rate and feeding management efficiency of bee colonies in autumn and winter. Developing a honeycomb temperature and humidity monitoring system (HTHS) based on the IoT architecture, which integrates the main control module, ESP8266 WIFI chip, and DHT11 sensor. By deploying honeycomb center, edge, and environmental monitoring nodes, data collection was conducted every 5 minutes. Combined with Z-score outlier removal, Pearson correlation analysis in SPSS 26.0 statistical software, and temperature gradient curve fitting using Matlab 7.0 software, continuous monitoring data during the wintering preparation period and wintering period were compared. HTHS monitoring data shows that bee colonies maintain stable temperature and humidity in the central area at (33.3±1.2) ℃ and 53.6%±2.0% through aggregation behavior, while the edge areas are significantly affected by environmental infiltration. The above monitoring data is highly consistent with the results of manual unboxing inspection. HTHS monitoring data further shows that during the overwintering stage, bee colonies have outstanding ability to regulate the temperature at the center of the hive. When the ambient temperature is 0～19.6 ℃, the nest temperature can be maintained at (25.4±1.9) ℃. HTHS provides IoT technology support for extreme climate warning and bee colony health management through non-invasive continuous monitoring and precise analysis of honeycomb temperature and humidity spatiotemporal dynamics. The low-cost and low interference characteristics of this system help promote the transformation of traditional beekeeping industry towards data-driven "precision beekeeping" mode.

Keywords: *Apis cerana cerana*; temperature; relative humidity; monitoring system; Internet of Things

(责任编辑 方 兴)