

付晓, 魏晓莉, 严士超, 等. 畜舍养殖环境智能监控研究现状及展望 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(5): 672-684.

FU Xiao, WEI Xiaoli, YAN Shichao, et al. Status and prospect of research on intelligent monitoring of breeding environment in livestock barns[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(5): 672-684.

特约综述

畜舍养殖环境智能监控研究现状及展望

付晓, 魏晓莉, 严士超, 戴百生, 姜润杰, 周建钊, 张翼, 王鑫杰, 沈维政

(东北农业大学 电气与信息学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 家畜疫病的发生及传播与养殖环境密切相关, 实现畜舍环境信息的精准感知及智能化调控是提高动物健康水平及生产性能的关键, 对我国畜牧产业高质量发展具有重要意义。本文从畜舍养殖环境指标体系、精准感知技术与方法、环境优化调控策略及舒适度评估 4 个方面出发, 介绍了影响家畜健康的环境指标、畜舍养殖环境监控设备、无线数据传输优化技术, 阐述了环境数据预测模型及分布规律的研究, 并重点分析了畜舍调控装备优化设计、多环境参数调控及环境舒适度评估模型等方面的研究和发展现状, 最后总结了当前畜舍环境智能监控应用所存在的问题, 并对今后养殖环境智能监控发展方向进行了展望, 为我国全面发展智慧畜牧业、提升生产效率提供参考。

关键词: 畜舍环境; 智能监控设备; 精准感知; 优化调控; 舒适度评估

中图分类号: S8-1; S815.9; S82

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)05-0672-13

Status and prospect of research on intelligent monitoring of breeding environment in livestock barns

FU Xiao, WEI Xiaoli, YAN Shichao, DAI Baisheng, JIANG Runjie, ZHOU Jianzhao,

ZHANG Yi, WANG Xinjie, SHEN Weizheng

(College of Electrical Engineering and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The occurrence and spread of livestock diseases are closely related to the breeding environment. Achieving accurate perception and intelligent regulation of the environmental information of the barn is the key to improving animal health and production performance, which is of great significance to enhance the high-quality development and transformation of livestock industry in China. Starting from four aspects including the indicator system of the livestock barn breeding environment, accurate perception technology and methods, environment optimization control strategy and comfort assessment, this paper introduces the environmental indicators affecting the livestock health, livestock barn breeding environment monitoring equipment, wireless data transmission optimization technology, and elaborates on the research of environmental data prediction models and distribution laws. It also focuses on analyzing the research and development status of optimization

收稿日期: 2024-05-10 网络首发时间: 2024-07-15 14:06:29

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20240712.0854.002>

作者简介: 付晓, 讲师, 博士, 主要从事动物养殖环境精准调控与动物福利关键技术研究, E-mail: fuxiao@neau.edu.cn;

通信作者: 沈维政, 教授, 博士, 主要从事智慧畜牧研究, E-mail: wzshen@neau.edu.cn

基金项目: “十四五”国家重点研发计划子课题 (2022YFD1301104); 国家重点研发计划重点专项 (2023YFD2000700); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-36); 东北农业大学“青年才俊”项目 (54960112)

design of livestock barn control equipment, multi-environmental parameter regulation and control, and environmental comfort assessment models, etc. Finally, it summarizes the problems existing in the current application of intelligent monitoring of livestock barn environment and looks forward to the future development direction of intelligent monitoring of farming environment, with the aim of providing references for the comprehensive development of intelligent animal husbandry and improvement of production efficiency in our country.

Key words: Livestock barn environment; Intelligent monitoring equipment; Precision sensing; Optimization regulation; Comfort assessment

健康养殖是畜牧业可持续发展的前提条件,是加快建设农业强国的重要保障,更是农业现代化发展的必然方向。2022 年,农业农村部就《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》^[1]中指出,要以物联网、大数据等现代技术为基础,以稳产能、防疫病为重点,全面发展智慧畜牧业,其中养殖环境精准调控是实现智能化养殖全过程的重要任务之一。牛、羊、猪等家畜是恒温动物,品种、饲料和环境是影响家畜健康的三大要素,其中养殖环境是其活动的主要场所,各环境因素之间相互影响、相互制约,从而形成了一个复杂的、非线性养殖系统^[2]。

传统畜舍环境主要依靠人工经验进行判断与管控,调节具有滞后性且效率低下。近年来随着我国畜牧养殖业规模化、集约化程度不断提高,高密度的舍内集中饲养方式已成为养殖场的普遍选择,智能化的养殖环境监控装备及设施也逐渐应用于生产实际中^[3-4]。但环境参数的动态变化与动物个体生理反应、行为特征及生产性能密切相关,如何处理好夏季通风散热、冬季保温除湿,进而营造一个健康、舒适的畜舍环境,对于保障动物福利至关重要^[5]。为改善家畜生长环境条件、实现畜舍养殖环境智能化监控,主要技术和研究方法如下:1) 深入分析多类型环境指标与家畜个体生理、行为及生产性能之间的相关关系,从而确定关键环境因素是实现畜舍环境调控的前提;2) 环境信息数据的精准获取是全面掌握畜舍环境信息的重要依据,环境监控设备研发、数据融合技术、环境数据预测模型及分布规律研究可为畜舍环境智能化调控提供数据支撑;3) 充分挖掘规模化畜舍养殖环境的特点,并基于理论模型及机器学习算法的研究,实现对畜舍散热、保温舍结构的合理设计,以及解决舍内夏季除湿降温、冬季保温除湿与喷淋、通风等控制设备之间的矛盾关系是改善舍内环境质量的关键所在;4) 综合评估畜舍养殖环境从而反映环境舒适度状况,对于进一步指导畜舍管理和环境调控、保障家

畜生产效率和提高福利状况具有重要意义。因此,本文从影响畜舍环境关键指标、数据精准感知技术与方法、畜舍环境优化调控策略、环境舒适度评估模型等方面对近年来的研究进行了总结,全面综述了畜舍养殖环境智能监控中涉及的无线传感器技术、数据传输优化技术、机器学习技术、人工智能等算法的研究及发展现状,并对畜舍养殖环境精准调控及智能装备发展方向进行了展望,从而为智慧畜牧业生产模式的转型升级、加速形成畜牧行业的新质生产力提供参考。

1 畜舍养殖环境指标体系

畜舍环境指标主要为温热环境与空气质量^[6]。前者包括温度、相对湿度、风速以及光照,影响舍内环境热湿平衡及动物机体代谢产热;后者包括由动物自身代谢、畜舍粪尿、垫料及饲料等分解产生的 CO₂、NH₃、CH₄ 及 H₂S 等有害气体,以及由舍内饲养管理和动物活动等产生的粉尘颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 及总悬浮颗粒物 (Total suspended particulates, TSP)。当上述环境因素超过家畜所承受的生理限制,将会导致冷、热应激现象发生,通常表现在动物的生理变化及行为反应^[7-8]。

1.1 温热环境指标

家畜主要通过传导、对流、辐射及蒸发等方式,将自身热量散发至周围环境中,并通过调节生理反应及行为特征与外界环境保持热平衡。其中,温度决定了动物皮肤表面与环境的对流换热温差,温度过高或过低将会影响对流换热量,直接造成动物冷、热应激反应;而相对湿度是指空气中的水汽含量,其过高同样会影响家畜机体热湿调节,降低环境舒适度^[5]。汪开英等^[9-10]研究表明,猪舍内环境温度高于 33.76 ℃ 时,猪只平均体温高达 39.87 ℃,远远超出猪只正常体温 (39.2 ℃),并与猪只心率、行为存在极为显著的相关关系,同时出现饮水量增加、采食量减少、日增质量减缓等不良反应。而当

环境温度高于 30℃、相对湿度高于 85% 时,湿度对猪只的影响占据主导地位,导致猪只的呼吸频率高于 25~45 次/min 的正常范围,严重时呼吸频率高达 120~168 次/min。原因在于高温高湿时,猪的蒸发散热过程受到了抑制,机体内部热量聚积,热平衡遭到破坏导致应激反应更加严重。养殖舍内适当通风可以带走多余的热量和水汽,通过调整气流分布可改善舍内温、湿度分布情况,在一定程度上起到协调舍内温湿平衡的作用。但过高的风速也会影响动物皮肤表面的水蒸气扩散系数,导致机体散热量增加^[11]。Mader 等^[12]在 18 个实验室及 5 个生猪场进行试验,研究表明空气流速的变化将会影响动物的生长和饲料转化率,当温度低于 10℃,风速的增加导致猪体表面温度下降、躺卧时长增加,当气温高于 40.6℃时,猪体表面温度低于空气温度则失去了对流冷却的作用,猪只热应激更加严重。臧强等^[13]研究发现,躺卧是羊只休息常采用的方式,随着舍内温度从 27℃ 升高至 30℃,更多的羊只选择躺卧在通风较好、无阳光直射的区域。鲁煜建等^[14]对东北地区舍饲散养奶牛场整个夏季舍内环境指标以及奶牛阴道温度、行为参数和产奶性能进行连续监测,结果表明当奶牛遭受不同程度的热应激时,核心体温逐渐上升,站立时间则相应增加,躺卧时间及产奶量显著下降。而冬季条件下太阳辐射至关重要,就生产性能而言,与接受自然长度光照(39~93 Lx, 9~12 h)的奶牛相比,每天 16 h 的光照(114~207 Lx)时长会使奶牛的产奶量增加 10%~15%^[15]。Dahl 等^[16]表明将光照从每天不足 12 h (短日光周期)增加到每天 16~18 h (长日光周期)可将每头牛的日产奶量提高 2.5 kg。Muthuramalingam 等^[17]研究了不同光照强度对褪黑激素的影响水平,当夜晚光照强度高于 50 Lx 时,褪黑激素分泌会受到抑制,明确了光照对产奶量的促进作用。此外,太阳辐射不仅可以提高舍内的温度,家畜个体吸收的太阳辐射能量为自身代谢产热量的数倍,可缓解冬季冷应激状况。

1.2 空气质量指标

集约化养殖方式下,家畜良好的健康状况同样可以增强抵抗外界环境变化的能力^[18]。当体温调节机制无法补偿外界温热环境带来的影响,家畜会启动一系列非特异性的自身免疫反应,使机体的免疫功能呈抑制状态,以缓解应激带来的影响^[19-21]。CO₂、NH₃、CH₄、H₂S 等有害气体随着牲畜饲养密度的增加及排泄物的分解而逐渐增加,而颗粒物携带细菌和病原体,并吸附有害气体,对人畜健康造

成不利影响^[22-23]。尤其是夏季温度升高、冬季封闭养殖方式下,通风不足将会导致舍内空气质量变差,从而引发各种疾病,导致家畜免疫能力下降、体质变弱^[24-25]。研究学者针对空气中有毒气体、粉尘及微生物综合环境质量对动物个体生理、行为及生产性能的影响进行了大量研究。代小蓉等^[26]对华东地区典型保育猪舍进行了空气质量监测,揭示了 CO₂、NH₃、H₂S 及 CH₄ 等指标每日和四季的含量及变化规律,研究表明 CO₂ 浓度超过国家标准质量浓度的时段占 78%,主要发生在春、夏、秋三季的白天;较高的 NH₃ 浓度值出现在外界温度逐渐上升的 4 月份(月平均质量浓度为 23.0±9.0 mg/m³),全年小时平均值超过 20 mg/m³ 的时段占 6%,年平均质量浓度为 10.9 ± 8.4 mg/m³,不能完全满足 NH₃ 质量浓度的控制要求,而 H₂S 及 CH₄ 含量较低,未对猪只的健康状况造成危害。汪开英等^[27]和 Ferrari 等^[28]研究表明呼吸系统疾病发生的因素之一是空气质量差,尤其是在没有适当通风的封闭式屋舍中,高浓度的粉尘环境将严重影响奶牛的健康状况。对家畜个体与环境相互作用的研究方法十分重要,原因在于通过动物的生理状况、行为反应及生产性能等可以进一步指导通风、加热等环境调控方案。

2 畜舍环境数据精准感知技术与方法

环境数据的精准感知是实现畜舍环境智能调控的重要保障,研究者们探索了各种有效获取环境参数的方法,主要包括环境智能监测设备研发、数据传输优化技术、环境参数预测模型构建及分布规律研究等。

2.1 环境智能监控设备研发

在信息化不断发展的过程中,物联网技术在智慧畜牧监控领域得到了有效应用,极大地提高了畜牧养殖效率^[3]。先进的环境监控设备不仅能够采集多种类型的环境数据,还具备存储管理、远程传输及智能调控的能力,可实现分布式监测和通风、散热及补光等系统的集中管理功能^[29],畜舍物联网基本架构如图 1 所示。

国内外学者根据畜舍及用户对环境监测的需求,集成各类传感器,采用多种无线网络组网方式,研制了不同组合的环境智能监测设备,实现了复杂养殖环境条件下的信息感知及远程调控。常用的数据传输技术包括 ZigBee、WiFi、LoRa 等,其应用场景及优点如表 1 所示。为方便规模化养猪场环境监测,Chen 等^[30]和张宇等^[31]提出了一种基于

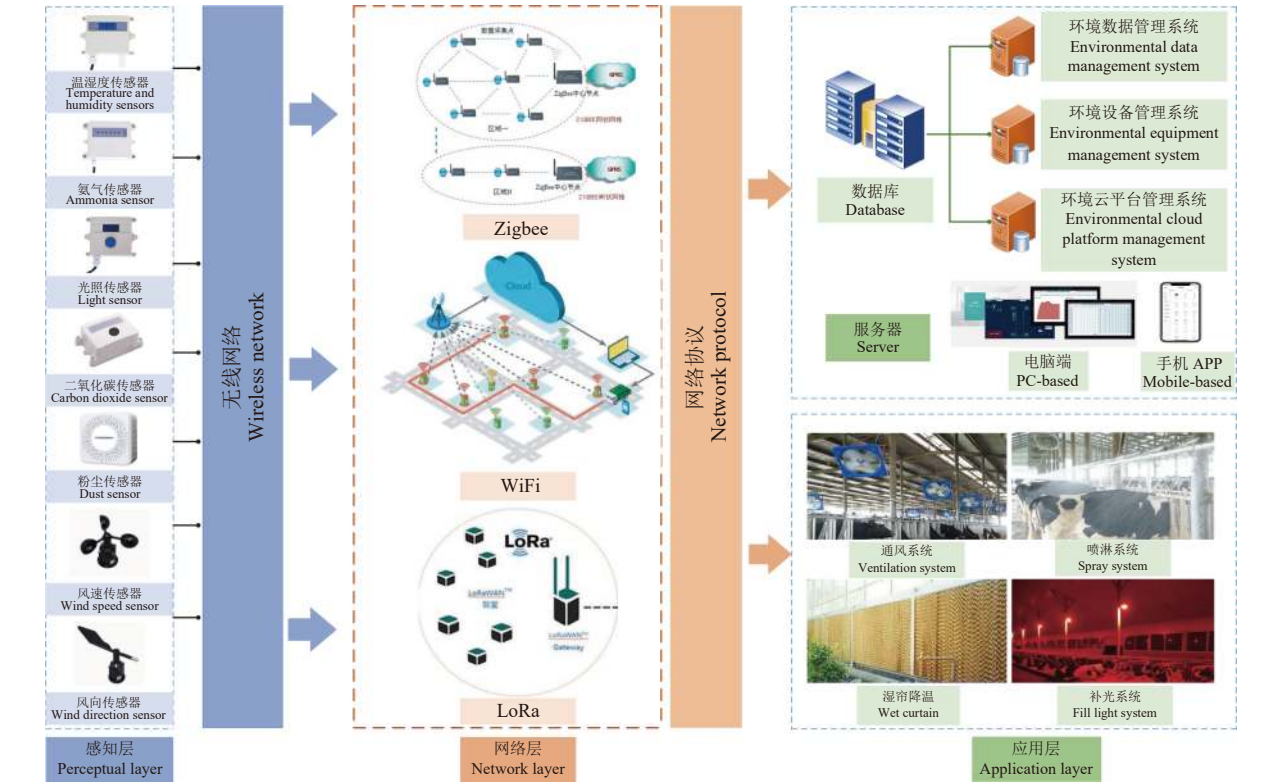


图1 畜禽物联网基本架构

Fig. 1 The basic architecture of the Internet of things in livestock barns

表1 无线数据传输技术应用场景及优点			
Table 1 Application scenarios and advantages of wireless data transmission technology			
无线数据传输技术 Wireless data transmission technology	文献 Literature	应用场景 Application scenario	优势 Dominance
ZigBee	[30]	育肥猪舍	近距离无线传输、高传输速率、功耗较低, 适合单个养殖舍多测点、多设备需求
	[31]	畜禽养殖舍	
WiFi	[32]	育肥猪舍	近距离无线传输、高传输速率、功耗较高, 适合易部署、固定点位的近距离组网
	[33]	奶牛舍	
LoRa	[34]	奶牛舍、犊牛舍	长距离无线传输、低功耗、低运营成本、网络覆盖范围更广, 满足多个养殖舍之间的通信需求
	[35]	奶牛舍	
	[36]	奶牛舍、犊牛舍	
	[37]	繁育猪舍、育肥舍	

ZigBee 无线传感网络技术的畜禽舍养殖环境调控系统。该系统包括感知层、传输层和应用层, 其中感知层负责对环境参数进行采集, 传输层借助 ZigBee 技术和无线互联网技术完成设备的组网与数据通信, 并通过后台服务器算法完成对数据的分析处理和系统客户端的数据显示与实时调控^[30-31]。周丽萍等^[32]设计了一套无线传感器网络环境监控系统, 该系统在移动巡检车上安装车载终端, 通过无线 WiFi 模块采集猪舍各处的温度、相对湿度、H₂S、NH₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度等, 实现了对猪舍养

殖环境的远程管理和调控。Umega 等^[33]将 WiFi 与 RFID 技术相结合, 开发了一种用于获取奶牛舍内温度、相对湿度以及奶牛心率等参数的畜舍监控系统, 结合奶牛热应激指数实现了对奶牛的健康监测与管控。上述基于无线局域网 (Wireless local area network, WLAN) 技术的畜舍无线监控系统设计为实现环境智能化调控提供了良好的设施平台, 但存在成本高、传输距离受限等问题。例如 ZigBee 虽然自组网能力较强, 但其传输距离较短且通信稳定性较差, 芯片与其他外围器件的成本不低于 60 元, 显

然不适合需要大量节点的畜舍使用。而以 LoRa 为代表的低功耗无线广域网技术正在崛起。如表 1 所示,相比于 WLAN 技术,这种通信技术能够连接并控制大量传感器,具有低功耗和低成本等优点。Germani 等^[34] 基于无线广域网技术的软硬件架构设计、实施和性能,设计了一个小型的无线传感器网络,该网络使用 LoRa 技术监测牛舍环境参数与动物生命参数,并对系统的稳定性与可靠性进行了充分验证。Liu 等^[35] 和 Fu 等^[36] 针对畜舍环境无线监控网络距离短、网络复杂及抗干扰能力弱等问题,设计了一种基于 LoRa 的畜舍环境远程监控系统,结果表明 LoRa 网络技术的传输距离和覆盖范围可以满足畜牧物联网的应用需求。上述监控装置只能感知固定点的环境信息,难以实现对环境整体数据采集,Sun 等^[37] 采用 LoRa 无线通信技术,设计了一种基于物联网机器人的畜禽舍环境自动监控调控系统,可实现对整个畜舍环境数据的全面监控。

畜舍养殖环境现场监测布线复杂,采用无线传感器监测畜舍内环境参数,便于传感器组网,布点灵活。同时结合 4G/5G 通信和云平台,可实现环境信息的远程实时监控。

2.2 无线数据传输优化技术

针对上述环境远程监控装备所获取的数据具有多源、异构等特点,无线数据传输优化技术可将来自不同传感器的数据进行融合,主要包括协调优化同类传感器以及综合处理多类型传感器提供的信息,以实现精准、完整、有效的数据获取。邵林^[38] 提出了一种多测点传感器监测方案以适应复杂的饲养环境,采用最优加权算法对单一环境因子数据进行局部融合,并应用改进后的 D-S 证据理论算法对多种环境因子数据进行整体融合,降低了各环境参数之间的相互作用,为环境精准调控提供了可靠数据。而单个传感器监测的数据无法全面呈现畜舍真实环境,需要对同类型传感器进行节点布置,并通过数据融合算法计算出最接近畜禽舍内该环境因子的真实值结果。李永振等^[39] 采用系统聚类 and 误差分析的方法对自然通风奶牛舍内颗粒物监测设备的布点位置和数量进行了优化,在保证监测结果准确性的前提下降低了设备成本投入。

另一方面,随着数据量的不断增加,应确保通信系统传输数据的准确率,达到节约数据传输时间的目的^[40]。Fu 等^[36] 设计了一种基于 LoRa 无线自组网技术的畜舍环境信息远程监控系统,采用改进的 RBAR 速率自适应算法,为不同的信道环境配置最

优的传输速率,可提高网络吞吐量,降低了数据丢包率。此外,除了监测点数量和位置外,感知设备的采样间隔同样会影响监测结果的准确性。Joo 等^[41] 将采样间隔设置为 1 s,对自然通风奶牛舍的颗粒物浓度进行连续监测,数据分析显示过高的采样频率尽管能够较好地反映颗粒物浓度波动情况,但也会带来数据冗余,增大误差引入的风险和传感器的工作负荷等。鲁煜建等^[42] 在大型自然通风牛舍共计布置了 17 个采样点,利用误差分析法确定了 TSP 和 PM_{2.5} 的最大可接受采样间隔分别为 10 和 20 min,对于畜禽舍颗粒物采样频率的设定具有重要意义。

2.3 环境参数预测模型构建

目前猪舍环境感知设备仅能实现对环境信息的监测,并未对舍内环境指标因素变化趋势作出预判,导致环境调控设备运行存在一定的滞后性。而预测模型的构建可提前决定环境控制设备的运行状态,实现舍内环境优化调控。郭建军等^[43] 提出了基于粒子群优化算法及长短时记忆网络的羊舍湿度非线性组合预测模型,以达到及时掌握湿度浓度变化趋势并提前调控的目的。Shen 等^[44] 构建了一种基于经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 与 Elman 神经网络相结合的猪舍内 NH₃ 质量浓度预测算法, NH₃ 预测值与实际测量值之间的相关系数为 0.985 6,平均绝对误差为 0.491 8 mg/m³,均方根误差为 0.631 2 mg/m³,平均绝对百分比误差为 0.41%,研究结果表明该方法可精准预测猪舍氨气浓度的变化情况。Rodriguez 等^[45] 依据舍外温度及通风量,在体质量均值为 6.9~17.0 kg 断奶仔猪舍内构建了通风量与 CO₂ 质量浓度之间的线性关系模型 ($r=0.82$) 及 CO₂ 质量浓度预测模型,实测值与预测值之间的均方根误差及平均绝对值误差分别为 1.21 和 0.23 mg/m³,实现了 CO₂ 质量浓度的精准预测。

2.4 环境参数分布规律研究

随着计算机性能的不提高,采用计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 技术可对畜舍内环境温度、相对湿度以及气流等环境参数的分布规律进行数值模拟,较小的误差结果表明 CFD 技术具有一定的可靠性。汪开英等^[27] 应用 CFD 技术对采用负压通风和水泡粪保育猪舍的气流场、温度场、湿度场和颗粒物浓度场进行三维稳态模拟,针对不同水平面,测量高度分别为 $z=0.2$ m (保育猪呼吸带)、 $z=1.6$ m (工作人员呼吸带) 的环境参数分布云图如图 2 所示。研究结果表明冬季通风条件下

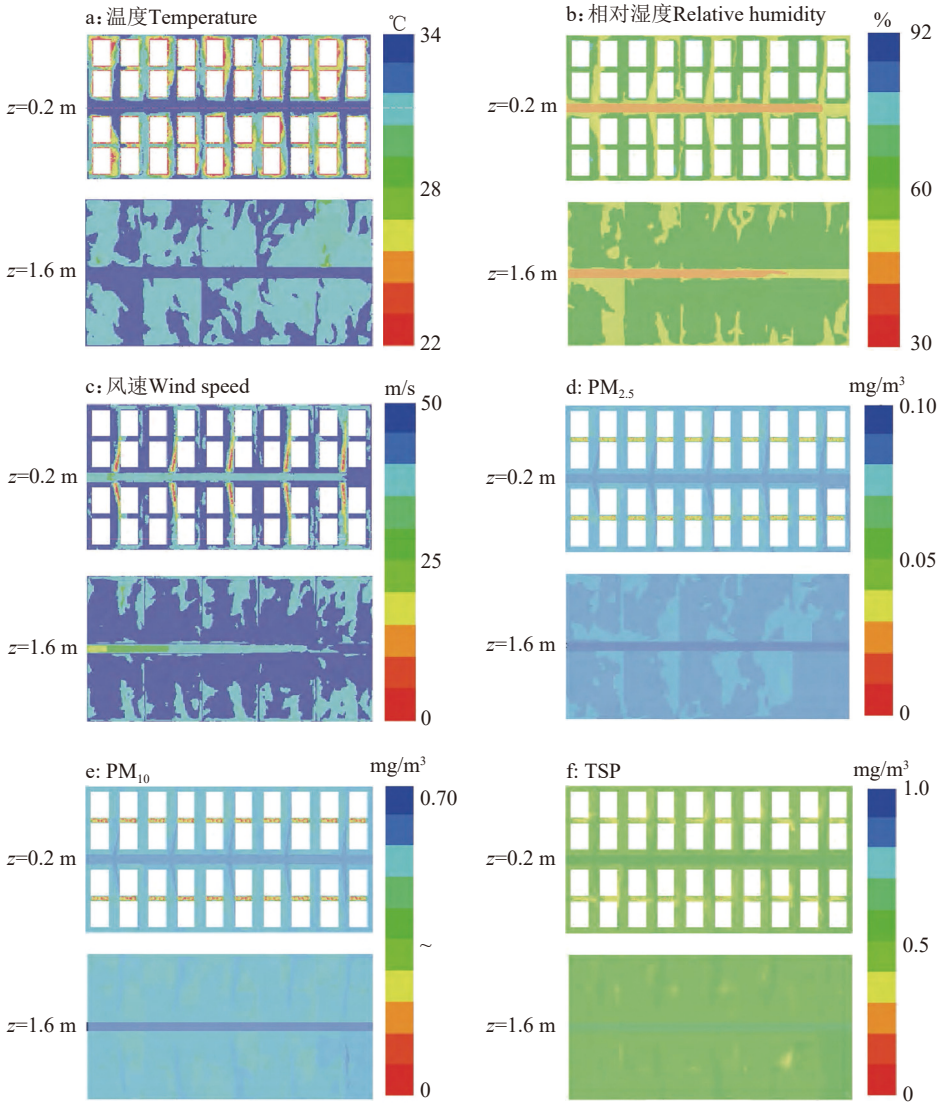


图 2 不同水平高度的环境参数分布云图^[27]

Fig. 2 Cloud maps of environmental parameters distribution at different horizontal heights

舍内风速在 0.1 m/s 以下、舍内平均温度及相对湿度分别维持在 60%~70%、36~34 ℃，大部分区域的 PM_{2.5}、PM₁₀ 及 TSP 质量浓度分别为 0~0.1、0~0.7 和 0~1.0 mg/m³，可为改善保育舍内环境和评估环境质量状况提供有益参考。此外，王鹏鹏^[46]以内蒙古农业大学海流图及萨拉齐科技园区猪舍为研究对象，采用 CFD 技术对育肥舍内的温度场、气流场进行模拟及分析，得出了北方寒冷地区猪舍风速、通风时间与 NH₃ 浓度和温度之间的关系，研究发现当猪舍进风口风速为 0.5 m/s 时既可以保证 NH₃ 浓度控制在合理范围内，又可以降低舍内温度。

3 畜舍环境优化调控方法

畜禽舍环境复杂多变，夏季主要采用通风、喷淋等方式排除畜舍内多余的热量，冬季低温条件下

则更侧重于降低空气中的水分及污染物浓度。因此，热应激区域以开放式养殖结构为主，屋顶通常采用钟楼或双坡形式，而冷应激区域则主要采用密闭或半开放建筑形式，屋面材料以保温性能较好的复合彩钢板为主。另一方面，传统控制畜舍环境的机械设备通常由人工调节，存在调节滞后、误判率高、工作效率低等问题，无法满足规模化畜舍养殖自动化、信息化及智能化的调控需求。当前研究者从畜舍建筑结构及调控装备优化设计、基于数学模型的通风测算模型构建以及基于机器学习的畜舍环境解耦策略研究等 3 个方面对畜舍环境进行优化调控。

3.1 畜舍建筑结构及调控装备优化设计

家畜对环境建筑结构及装备设施有明确要求，必须进行科学规范设计。研究者们深度剖析了畜舍建筑及环境调控设施方面存在的典型问题，并给出

了相应的解决方案,对大型规模化养殖舍建筑结构设计及调控设备选型具有一定的指导意义。

奶牛生产中,普遍采用的夏季降温措施都是依据辐射、对流和蒸发散热的原理提出的,即通过减少太阳辐射、合理组织舍内通风方式、采用蒸发降温系统如喷雾、喷淋、洗浴池等来实现。为确定开放式牛舍中扰流风机的安装参数,邓书辉等^[47-48]建立了风机不同安装参数间组合的 16 个几何模型,对牛舍内的气流场进行了三维稳态模拟,结果表明风机最佳的倾角为:卧栏上方的风机为 20°、颈枷上方风机为 10°,并采用粒子图像测速技术分别对所构建的低屋面横向通风牛舍 (Lower profile cross ventilated barn, LPCV) 模型内的 6 种工况下的空气流场进行了测试,结果显示挡风板能够增加舍内下方奶牛活动区域的气流速度,可为 LPCV 牛舍内挡风板优化设置提供参考。喷淋降温系统是我国夏季常用的降温方法,丁涛等^[49]利用激光雨滴谱仪对 6 种不同标准扇形喷嘴 (9010、9030、9060、9080、90100、90120) 分别在 0.15、0.20、0.25 MPa 工作压力下进行了测试,计算分析了 6 种喷嘴在不同工作压力下水滴粒径的分布,研究了水滴粒径与喷淋流量、单个水滴动能、喷淋强度的关系,结果表明通过控制喷嘴的流量和水滴粒径,即可控制相应的喷淋时间以达到缓解奶牛热应激的目的。为实现夏季猪舍环境的有效调控,国内外通常将风机与湿帘冷却系统相结合作为主要的降温方式。但舍内温、湿度具有耦合关系,高温环境下,湿帘降温技术在降低环境温度的同时增大了环境内空气湿度,不利于猪只有效散发体热,因此湿帘降温方式不适用于高温、高湿的畜舍养殖区域^[9]。当前,李伟等^[50]研究的水冷式猪床为母猪的小群饲养夏季局部降温提供了一种有效方式,母猪的皮肤温度和呼吸频率显著降低。杜欣怡等^[51]以奶牛胸颈部热敏感区产热及散热理论为研究点,开发了一套卧床冷水管局部降温系统,并通过试验组与对照组中奶牛核心体温、呼吸频率、产奶量及躺卧行为差异分析了系统的应用效果,试验证明卧床冷水管局部降温系统能够有效缓解奶牛热应激,可为牛舍环境局部降温提供方法支撑。赵婉莹等^[52]研究了舍内漏缝地板和实体地面 2 种不同地面形式对我国自然通风奶牛舍气体排放量的影响,结果表明漏缝地板牛舍内 CO₂、N₂O、NH₃ 和 CH₄ 的质量浓度均显著高于实体地面牛舍,为降低舍内有害气体浓度需要增加粪坑中粪尿的清除次数。

针对北方寒区卷帘牛舍冬季舍内温度过低的

现状,赵婉莹等^[53]结合黑龙江地区的气候特点,以牛舍温度不低于 5℃ 为设计目标,通过对卷帘材料的传热性能、厚度和面密度等进行测试,研究筛选了 2 种传热系数小于 1.23 W/(m²·℃) 的复合保温卷帘。结果表明,新型保温卷帘虽然比单层卷帘具有更好的保温性能,但是奶牛依旧处于低温高湿的状况下,表明只改善卷帘的保温性能并不能使寒区奶牛舍内温度满足高于最低阈值的要求。王启超等^[54]为解决东北寒区自然通风奶牛舍普遍使用的屋顶烟囱在冬季结冰堵塞严重,导致舍内湿度过大、有害气体难以排出等问题,对黑龙江某典型成乳牛舍的通风系统进行了改造,在冬季最冷时段的应用效果表明,屋顶烟囱风机配合独立进风口可使舍内获得更优的环境质量。李伟等^[55]进一步研究了冬季水冷式猪床前后两端挂帘的保温效果及其对妊娠母猪行为的影响,结果表明当设备温度低于 12℃ 时,均未出现 2 头猪挤在 1 个单元内躺卧的现象,该研究表明冬季猪床门帘可提高母猪躺卧区的局部温度并减少母猪的刻板行为。我国奶牛舍围护结构保温设计缺乏系统的理论依据,而鲁煜建等^[56]和曹哲等^[57]借鉴民用建筑热工设计中低限热阻的计算方法及热成像等技术,测算了东北地区奶牛舍冬季围护结构墙体和屋面的低限热阻值,可为东北地区奶牛舍的建设与改造以及日常通风管理提供参考,畜舍建筑结构及调控装备优化研究方法如表 2 所示。

3.2 基于数学模型的畜舍环境通风测算研究

适宜的通风量对于舍内的空气、物质交换具有非常重要的作用,能够排除余热、缓解夏季热应激,同时调节冬季舍内温度和湿度、改善空气质量,从而维持家畜正常的新陈代谢以提高生产效率^[58-59]。而通风量估算是畜舍环境调控、有害气体排放量测算的基础^[60],研究者以能质平衡原理为基础,实现了对各类型畜舍夏、冬季节通风量的精准测算。

为降低猪舍热应激,齐飞等^[61]利用环境气象资料,结合能质平衡方程,对围护结构传热及通风散热占比进行了分析,构建了保育及育肥舍夏季热量稳态模型及最大通风量的计算公式,热平衡方程式如公式 (1) 所示。该模型考虑了各地的夏季舍外温度状况,使猪舍夏季通风量的计算更符合当地气候。其中北京、武汉、南宁的可调控最高舍外温度为 29.0℃,100 kg 猪的夏季通风量取值可达到 275.7 m³/h;长春和贵阳的可调控最高舍外温度分别为 26.9℃ 和 25.7℃,100 kg 猪的夏季通风量取值分别为 88.9 和 64.1 m³/h。研究为 5 个地区商品猪

表 2 畜舍建筑结构及调控装备优化研究方法
Table 2 Optimization research method for structure and control equipment of livestock barns

文献 Literature	畜舍建筑结构类型 Building structure type of livestock barn	方法 Methodology	调控装备 Control equipment	作用 Effect
[47]	钟楼式开放牛舍	CFD仿真技术	扰流风机	优化风机扩散器性能参数提高降温效果
[48]	低屋面横向通风奶牛舍	粒子图测速技术	挡风板、矮墙	设置挡风板、矮墙工况优化空气流场分布
[49]	开放式奶牛舍	Merkel 焓差理论	喷淋装置	选取最佳喷淋水滴粒径缓解奶牛热应激
[50]	半开放式猪舍	线性回归分析	水冷式猪床	设计降温猪床减轻热应激对猪只的影响
[51]	半开放式奶牛舍	线性回归分析	冷水管卧床设计	研究冷水管局部降温对奶牛热应激影响
[52]	半开放式奶牛舍	线性回归分析	漏缝地板	研究不同地面形式对气体排放量的影响
[53]	半开放式奶牛舍	显著性分析	保温卷帘	测试卷帘材料的传热性能、厚度和面密度
[54]	封闭开放式奶牛舍	方差对比分析	屋顶通风系统	解决屋顶烟囱风机通风口结冰堵塞现象
[55]	半开放式猪舍	显著性分析	水冷式猪床	探讨水冷式猪床保温措施对母猪的影响
[56]	半开放式猪舍	热湿平衡理论	墙体、屋面	测算围护结构低限热阻值及热工参数
[57]	密闭式卷帘奶牛舍	热成像技术	墙体、屋面、门窗	评价牛舍围护结构传热阻及热工性能

舍的小气候通风量估算提供了参考。

$$Q_s + Q_m + Q_h = Q_w + Q_v + Q_e,$$

(1)

式中： Q_s 为猪只产生的显热量，W； Q_m 为设备发热量，W； Q_h 为采暖散热器或热辐射器的补充热量，W； Q_w 为通过外围护结构的建筑耗热量，W； Q_v 为通风的显热损失，W； Q_e 为猪舍内因水分蒸发消耗的显热量，W。

此外，Blanes 等^[62] 基于 CO₂、湿度及热量平衡对猪舍环境内每小时的通风量进行了估算，其中 CO₂ 估算通风量与实际测量通风量相关性最高为 0.92，通风量为 0.185 m³/(h·hpu)，仅低于实际测量值 8%。仲玉婷等^[63] 基于寒区的气候特点，重点进行了单栋饲养 2 400 头的 LPCV 成乳牛舍建筑保温、通风、照明等环境要素设计，并根据热平衡原理，在确定牛舍冬季通风量为 204 000 m³/h 和冬季低限温度为 5℃ 的基础上，采用 150 台 9FJ14.0 和 46 台 9FJ10.0 风机，换气次数为 1.5 次/h 时，可满足舍内温、湿度的控制目标。Bleizgys 等^[64] 通过试验分析了温度和风速对粪便中 NH₃ 蒸发过程的影响，并采用数学公式模拟出牛舍环境热交换过程，完成牛舍环境的通风设计，可进一步优化舍内空气质量。

3.3 基于机器学习的畜舍环境调控方法研究

基于数学模型等的理论方法缺乏对环境调控的自适应能力，且难以反映环境多因素之间的相互作用。机器学习具有强大的非线性复杂系统建模能力，近年来被越来越多地应用到畜舍环境调控中，

并提出了多种具有不同特点的环境多因素耦合关系模型与调控策略。张世功^[65] 所研制的喷淋降温系统，以环境温湿度指数 (Temperature-humidity index, THI) 为主要控制参数，采用比例积分微分控制 (Proportional-integral-derivative control, PID) 技术对舍内环境参数进行控制，使系统能够控制并适时开启通风排气扇及喷淋设施。此外，Gautam 等^[66] 开发了基于机器学习的离线预测模型，该模型能够找到最优的可控通风参数，使猪舍内的设定温度值偏差最小，平均降低了 0.53℃。早期控制算法应对单输入偏差在合理适应性区间内的响应十分迅速，但畜舍中各环境因素相互耦合导致调控结果出现误差过大、调控周期变长及调控系统稳定性差等问题。为此，研究学者开始逐渐考虑基于多因素环境耦合调控理论和机器学习模型的研究。Caglayan 等^[67] 提出了一种基于模糊逻辑的畜舍环境控制器，通过确定模糊推理系统的输入/输出量及隶属度函数，对控制系统进行模糊规则设计，最后进行反模糊化处理，完成了对舍内温度、相对湿度及风速的自适应调节，使喷淋、风机及窗帘的误差率分别降低了 0.45%、1.18% 和 0.68%，提高了环境控制系统的准确性。Chen 等^[30] 将经验知识与模糊推理算法相结合，针对温度与相对湿度之间的耦合关系，设计了补偿控制器以减小相互耦合效应，当外界环境发生变化时可进行自主学习并在线调整权重系数，可将猪舍内环境温度及湿度调控相对误差降低在 5.5% 和 10.1% 以下，模糊控制系统的基本原理如图 3 所示。

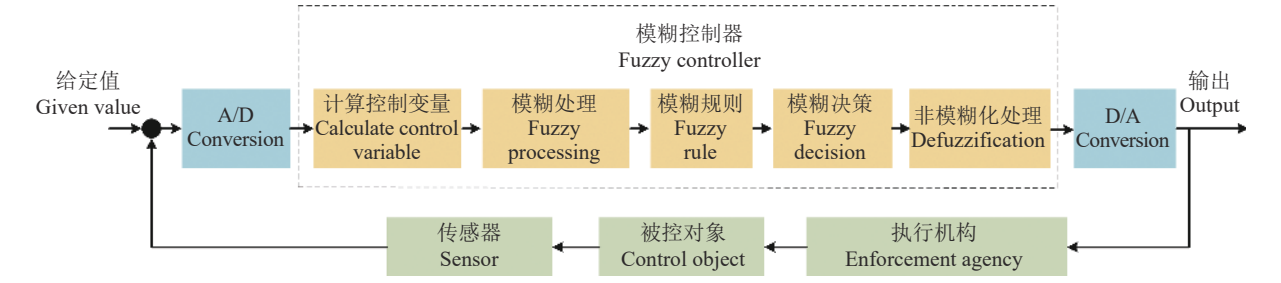


图 3 模糊控制系统的基本原理框图

Fig. 3 Basic principle diagram of fuzzy control system

4 畜舍环境舒适度评估方法

4.1 温热环境舒适度评估方法

“畜舍环境舒适度”对于动物健康养殖十分重要，常见的温热环境评估方法通常采用 2 个或多个温热环境指标进行综合计算得出冷、热应激单个指标数据。严格齐等^[7]和付晓^[68]对家畜常用冷、热应激指数及其涉及的相关因素、应激程度分类依据进行了总结。在奶牛冷应激评估指数中，风寒温度指数 (Wind chill temperature index, WCT) 是将生理指标 (皮肤温度) 作为冷应激指数的修正，温热环境评估指数 THI 及综合气候指数 (Climate change index, CCI) 分别将奶牛的生产性能 (产奶量)、行为特征 (采食量) 作为冷应激程度的阈值分类依据。研究学者在热应激指数研究中提出，热应激指数构建应包含更多的环境参数，这些参数需体现出一定的换热机理，在构建特定气候类型指数的同时还应适当考虑指数在其他环境下的适应性、指数要有适用信息和阈值并能够对阈值进行动态调整。上述指数主要基于环境参数与奶牛生理、行为参数及生产性能建立对应关系并进行相关性分析，利用大量试验数据得到回归公式并进行综合计算。而王校帅^[69]和 Norton 等^[70]采用 CFD 技术模拟了猪舍的温度场、气流场并研究了畜舍在不同通风模式和温度下的舒适程度，从而对猪舍内热环境进行评估。温热环境是影响家畜健康养殖的直接环境参数，但无法充分反映家畜与环境的换热机理。随着数字化技术的应用，多参数获取技术得到了根本性改变，有必要提出更加精细的指数评估模型以满足福利化养殖需求。

4.2 多维度环境舒适度评估方法

对畜舍环境舒适度的感知，可结合空气质量及家畜生理反应、行为特征及生产性能，而如何从多维度因素进行整体分析，进而对家畜健康养殖环境进行综合评估，最终达到改善和提升畜舍

养殖环境的目标已经成为当前研究的热点。Becker 等^[71]采用温湿度指数、呼吸频率、喘息频率、躺卧时间、躺卧次数、体细胞评分以及身体卫生状况等多种因素，建立了热应激评分系统以评估奶牛热应激的严重程度，评分等级为 1~4，其中 1 为无热应激，2 为轻度热应激，3 为重度热应激，4 为奄奄一息。Fu 等^[72]结合奶牛生长的外界环境因素以及内在的生理因素，利用多层次分析法、遗传优化算法与多级模糊理论，构建了一种奶牛冷应激综合评估模型，客观、全面地分析了奶牛在冬季养殖环境下的冷应激状况，研究结果表明与光照条件较好的南侧奶牛相比，北侧奶牛的轻度和中度冷应激时间更长，且持续的冷应激导致奶牛产奶量降低，采食与躺卧时长增加，站立时长减少。此外，Tsai 等^[73]提出使用一种有效且可靠的方法来监测奶牛的行为和周围环境，主要通过视频流上使用卷积神经网络监测奶牛头部是否处于饮水槽上方，进而记录和分析饮水行为数据和环境条件来评估养殖环境，研究结果表明当 THI 值为 68~93 时，奶牛每日饮水总时长和饮水次数与 THI 指数高度相关，验证了视觉环境评估的可行性，该方法可为奶牛养殖环境评估提供一种新的技术支撑。赵晓洋^[74]通过功率谱密度分析奶牛叫声定性揭示了不同热应激状态下奶牛的声音差异，同时在研究奶牛叫声与牛舍热环境相关性的基础上，又对不同空气质量环境下的仔猪和仔鸡叫声进行分析，结果表明智能分析动物叫声可以辅助畜禽舍内环境舒适度评估。Nasirahmadi 等^[75]基于生猪活动场景图像，通过使用三角剖析法来检测生猪由于温度变化而导致卧姿和位置的变化，以评估猪舍内的热环境。家畜应激程度评估方法流程如图 4 所示，与单独使用温热环境参数相比，增加多类型环境指标、生理与行为指标将会在评估个体或群体的冷、热应激程度上更加准确。

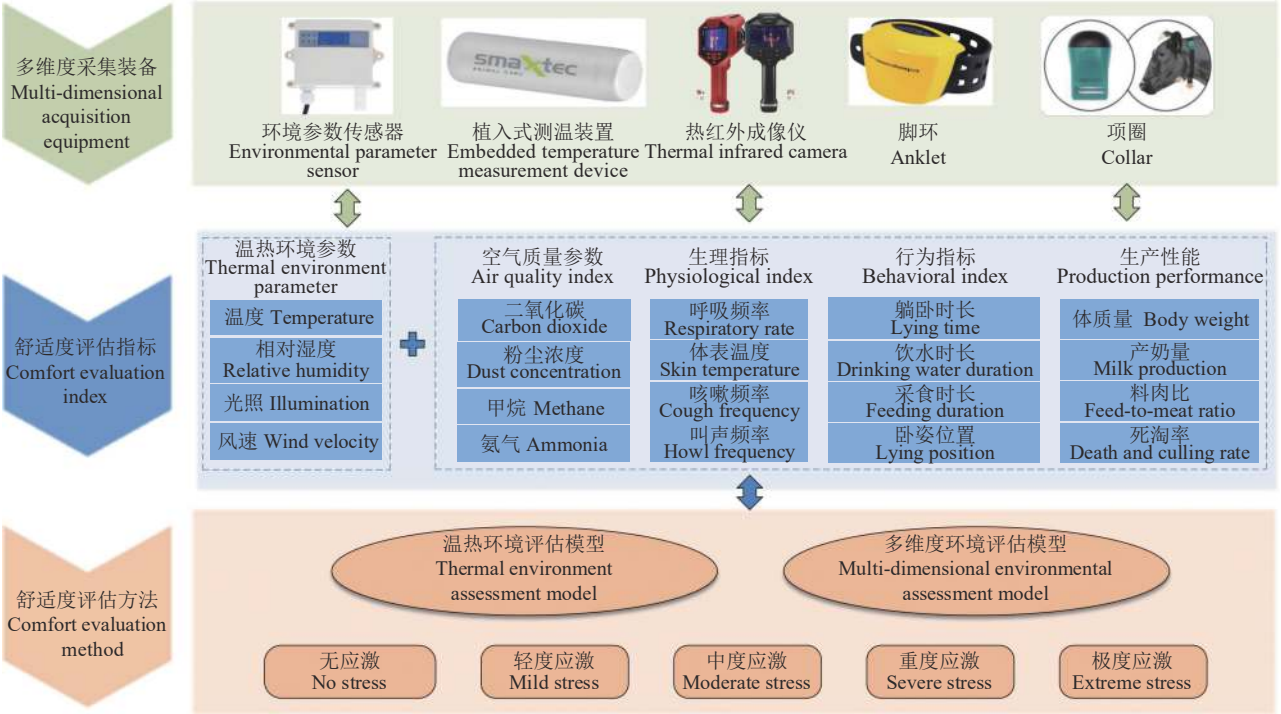


图 4 家畜应激程度评估方法流程

Fig. 4 Flowchart of assessment methods for the degree of livestock stress

5 结论与展望

5.1 结论

当前,以数字化、人工智能等为核心的现代化信息技术在畜牧业健康养殖价值链中的作用快速提升,已成为实现养殖环境智能化监测与调控的良好途径。本文以家畜健康养殖所需的环境指标为切入点,从环境智能监控设备研发、无线数据传输优化技术、舍内环境变化预测模型及分布规律研究等多方面综述了畜舍环境参数精准感知与获取研究现状,并对畜舍整体结构设计、通风量模型构建及智能调控优化算法等 3 个方面的研究与应用进行了分析,最后对基于单一温热环境因素及多维度环境舒适度评估方法进行了总结。然而,依据多类型环境传感器、无线数据传输技术及机器学习调控策略,要最终实现畜舍环境精准感知及智能化调控的目的,仍存在很多问题有待深入研究:1) 通过对环境指标与生理反应、行为特征及生产性能的监测,深入分析各因素的变化规律及其中的相关关系是实现环境智能监控的首要条件,但需保证环境及家畜个体信息数据的监测精度及连续性,才能有效判定影响奶牛健康养殖的关键环境因素;2) 根据不同畜舍养殖环境特点,实现畜舍养殖环境参数监控系统开发是促进现代畜牧养殖业向智能化方向发展的重要途径,而物联网技术在不同的养殖环境中具有不同程度的应用潜力,需充分利用无线传输技术

各自的优势,实现在特定场景下的最大化使用;另一方面,随着数据类型及数据量的不断增加,应确保无线通信系统传输数据的准确性,构建优化传输模型以满足大型规模化畜舍养殖环境信息精准获取与设施管理的长期需求;3) 环境调控策略不再局限于对畜舍建筑结构及单一环境因子的调控,虽然 CFD 技术可以作为对畜舍环境模拟评估与控制的有效工具,但需要建立精确的数学模型,且其运行成本较高、缺乏长期在线学习的能力,然而,当前基于机器学习算法模型的构建实现了对多环境因素的解耦控制,使畜舍环境调控具有显著的智能化发展趋势。

5.2 展望

中国是畜牧业大国,其发展在国民经济中占有极其重要的地位。据国家统计局数据显示,2016 年中国畜牧总产值达到 30461.17 亿元,首次突破 3 万亿元,未来随着对农业现代化技术的支持,总产值在 2024 年将要超过 3.2 万亿元^[76]。为加快推进畜牧业现代化,“降本增效”是大势所趋,家畜健康管理方面更加突出“防重于治”,而建立集饲养环境感知、控制设备管理于一体的畜舍高效安全养殖信息智能监控系统十分重要。

1) 基于先进传感器、物联网和人工智能技术的快速发展,有必要根据畜舍环境调控实际需求和关键参数选择传感器类型及无线数据传输方式,通过

预测模型探索环境参数变化趋势及分布规律,从而获取可靠的环境数据并进行全面精准调控,以满足不同类型的畜禽养殖需要。

2) 大多数环境控制系统仅针对单一固定位置数据来确定控制设备的运行状态,无法全面反映畜禽真实环境状况;当增加感知节点的个数后又无法进行有效部署,未来仍需借助数据融合等算法,对数据分析处理后再进行传输,从而提高数据利用率。

3) 当前关于规模畜禽建设的标准和规范不够全面、不同地区畜禽设计水平参差不齐,规模畜禽建筑形式及舍内环境调控设施的选取方面存在不足。通过优化建筑结构来降低环境调控成本,可为动物健康和生产性能的发挥提供保障。

4) 早期的畜禽环境调控方法主要通过选取关键因素作为环境模型的控制对象,普遍基于单一环境因素的负反馈控制理论且局限于夏季环境调控,但畜禽舍内各类环境参数具有较强的耦合性,对风机、湿帘及加热器等设备的有效调控离不开集中、联动的智能控制系统。而预测及分布规律模型的构建可为今后畜禽环境的提前控制提供参考。

5) 畜禽环境对动物健康与动物福利的影响需要引起足够重视,当前的环境调控方法仅局限于所调控的环境参数是否满足环境质量标准要求,并未考虑动物个体对于外界环境的感受。随着数字化技术的应用,多参数获取技术得到了根本性改变,人们期望采用智能传感器、探测器、摄像头和麦克风等技术应用,不断从动物身上收集信息,从而连续测量动物反应及外界环境变化,开展适合我国养殖特点的畜禽环境舒适度综合评估方法,进一步为畜禽环境的精准调控提供依据,可极大避免动物冷、热应激事件及疫病的发生。我国畜牧养殖行业智能化需求日趋强劲,未来畜禽养殖环境监测与调控的研究重点应放在形成“精准感知-可靠传输-智能调控-全面评估”一体化解决方案,才能使畜牧产业朝着高质量、智慧化的方向发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部.《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》[EB/OL]. (2022-03-09). https://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202203/t20220309_6391341.htm?eqid=b30f5dcc0006fdd20000000264367dd1.
- [2] FOURNEL S, ROUSSEAU A N, LABERGE B. Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 155: 96-123.
- [3] 熊本海, 杨振刚, 杨亮, 等. 中国畜牧业物联网技术应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 237-246.
- [4] 李保明, 王阳, 郑炜超, 等. 畜禽养殖智能装备与信息化技术研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 18-26.
- [5] QI F, ZHAO X D, SHI Z X, et al. Environmental factor detection and analysis technologies in livestock and poultry houses: A review[J]. *Agriculture*, 2023, 13(8): 1489.
- [6] TURNPENNY J R, WATHES C M, CLARK J A, et al. Thermal balance of livestock: 2. Applications of a parsimonious model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(1): 29-52.
- [7] 严格齐, 李浩, 施正香, 等. 奶牛热应激指数的研究现状及问题分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 226-233.
- [8] 李林贵, 陈翔宇, 阿不夏合满·穆巴拉克, 等. 反刍动物冷应激作用机理及其调控技术研究进展[J]. *饲料研究*, 2024(6): 148-153.
- [9] 汪开英, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 中国东南地区猪舍夏季降温效果的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2002(3): 80-83.
- [10] 汪开英, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 猪舍环境温湿度对育成猪的生理及生产指标的影响[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 99-102.
- [11] YAN G, SHI Z, CUI B, et al. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 214: 72-89.
- [12] MADER T, DAVIS M, GAUGHAN J B, et al. Wind speed and solar radiation adjustments for the temperature-humidity index[C]//16th Conference on Biometeorology and Aerobiology. Vancouver, BC, Canada: American Meteorological Society, 2004: 36-42.
- [13] 臧强, 李保明, 施正香, 等. 规模化羊场羊舍夏季环境与小尾寒羊的行为观察[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 183-185.
- [14] 鲁煜建, 王朝元, 赵浩翔, 等. 东北地区奶牛夏季热应激对其行为和产奶量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 225-231.
- [15] PETERS R, CHAPIN L, EMERY R, et al. Milk yield, feed intake, prolactin, growth hormone, and glucocorticoid response of cows to supplemented light[J]. *Journal of Dairy Science*, 1981, 64(8): 1671-1678.
- [16] DAHL G, BUCHANAN B, TUCKER H, et al. Photoperiodic effects on dairy cattle: A review[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(4): 885-893.
- [17] MUTHURAMALINGAM P, KENNEDY A, BERRY R, et al. Plasma melatonin and insulin-like growth factor-1 responses to dim light at night in dairy heifers[J]. *Journal of Pineal Research*, 2006, 40(3): 225-229.
- [18] TUCKER C, ROGERS A, VERKERK G A, et al. Effects of shelter and body condition on the behaviour and physiology of dairy cattle in winter[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2007, 105(1/2/3): 1-13.
- [19] JENTSCH W, PIATKOWSKI B, DERNOW M. Relationship between carbon dioxide production and performance in cattle and pigs[J]. *Archives Animal Breeding*, 2009, 52(5): 485-496.

[20] SANCHIS E, CALVET S, DEL PRADO A, et al. A meta-analysis of environmental factor effects on ammonia emissions from dairy cattle houses[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 178: 176-183.

[21] WU W, ZHANG G, KA P. Ammonia and methane emissions from two naturally ventilated dairy cattle buildings and the influence of climatic factors on ammonia emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 61: 232-243.

[22] 汪开英, 戴圣炎, 王玲娟. 畜禽场空气悬浮颗粒物污染与其监控技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 232-241.

[23] 汪开英, 代小蓉. 畜禽场空气污染对人畜健康的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2008, 44(10): 32-35.

[24] CAMBRA-LÓPEZ M L, AARNINK A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 1-17.

[25] BUCZINSKI S, ACHARD D, TIMSIT E. Effects of calf-hood respiratory disease on health and performance of dairy cattle: A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104: 8214-8227.

[26] 代小蓉, NI J, 潘乔纳, 等. 华东地区典型保育猪舍温湿度和空气质量监测[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 315-322.

[27] 汪开英, 李开泰, 李王林娟, 等. 保育舍冬季湿热环境与颗粒物 CFD 模拟研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 270-278.

[28] FERRARI S, PICCININI R, SILVA M, et al. Cough sound description in relation to respiratory diseases in dairy calves[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2010, 96(3/4): 276-280.

[29] ALONSO R S, SITTÓN-CANDANEDO I, GARCÍA Ó, et al. An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario[J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, 98: 102047.

[30] CHEN C, LIU X. An intelligent monitoring system for a pig breeding environment based on a wireless sensor network[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2019, 29(4): 275.

[31] 张宇, 沈维政, 张译元. 畜禽舍养殖环境智能调控系统应用研究[C]//中国畜牧兽医学会信息技术分会第十届学术研讨会论文集. 北京: 中国畜牧兽医分会, 2015: 66-70.

[32] 周丽萍, 陈志, 苑严伟, 等. 猪舍环境无线传感器网络监控系统研究[J]. *自动化技术与应用*, 2016, 35(1): 56-60.

[33] UMEGA R, RAJA M A. Design and implementation of livestock barn monitoring system[C]//2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT). Coimbatore: IEEE, 2017: 1-6.

[34] GERMANI L, MECARELLI V, BARUFFA G, et al. An IoT architecture for continuous livestock monitoring using LoRa LPWAN[J]. *Electronics*, 2019, 8(12): 1435.

[35] LIU X, HUO C. Research on remote measurement and control system of piggery environment based on LoRa[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan: IEEE, 2017: 7016-7019.

[36] FU X, SHEN W, YIN Y, et al. Remote monitoring system for livestock environmental information based on LoRa wireless ad hoc network technology[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(4): 79-89.

[37] SUN H, PALAOAG T, QUAN Q, et al. Design of automatic monitoring and control system for livestock and poultry house environment based on internet of things robot[C]//Proceedings of the 2022 4th Asia Pacific Information Technology Conference. Bangkok, Thailand: ACM, 2022: 224-230.

[38] 邵林. 多传感器数据融合技术在畜禽舍环境监测系统中的应用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.

[39] 李永振, 方志伟, 鲁煜建, 等. 大型自然通风奶牛舍空气颗粒物浓度监测方法中测点数和位置优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 201-209.

[40] RAMIREZ B, GAO Y, HOFF S J, et al. Thermal environment sensor array: Part 1 development and field performance assessment[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 174: 329-340.

[41] JOO H S, NDEGWA P M, HEBER A J, et al. Particulate matter dynamics in naturally ventilated freestall dairy barns[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 69: 182-190.

[42] 鲁煜建, 方志伟, 李永振, 等. 大型自然通风奶牛舍空气颗粒物浓度监测方法中采样间隔优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 210-216.

[43] 郭建军, 韩铃钰, 董佳琦, 等. 基于 SSA-PSO-LSTM 模型的羊舍相对湿度预测技术[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 365-373.

[44] SHEN W Z, FU X, WANG R T, et al. A prediction model of NH₃ concentration for swine house in cold region based on empirical mode decomposition and elman neural network [J]. *Information Processing in Agriculture*, 2019, 6(2): 297-305.

[45] RODRIGUEZ M R, BESTEIRO R, ORTEGA J A, et al. Evolution and neural network prediction of CO₂ emissions in weaned piglet farms[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2910.

[46] 王鹏鹏. 基于 CFD 的北方寒冷地区猪舍通风环境研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.

[47] 邓书辉, 施正香, 范淋佳, 等. 基于 CFD 的开放式牛舍扰流风机安装参数优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 269-274.

[48] 邓书辉, 施正香, 李保明, 等. 挡风板对低屋面横向通风牛舍内空气流场影响的 PIV 测试[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 188-194.

[49] 丁涛, 宏帅, 施正香, 等. 缓解奶牛热应激的喷淋水滴特性试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 323-331.

[50] 李伟, 李保明, 施正香, 等. 夏季水冷式猪床的降温效果及其对母猪躺卧行为的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 242-246.

[51] 杜欣怡, 仲玉婷, 施正香, 等. 奶牛卧床冷水管局部降温系统应用效果分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15):

197-203.

[52] 赵婉莹, 许立新, 王朝元, 等. 不同地面形式自然通风奶牛舍冬季温室气体和氨气排放量[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(1): 142-151.

[53] 赵婉莹, 张琦, 施正香. 复合保温卷帘改善寒区开放式牛舍冬季热湿环境[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 215-221.

[54] 王启超, 曹哲, 施正香. 东北寒区奶牛舍屋顶烟囱风机应用效果研究[J]. *中国奶牛*, 2017(1): 42-46.

[55] 李伟, 林保忠, 刘作华, 等. 水冷式猪床冬季保温措施对妊娠母猪小群饲养的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 222-226.

[56] 鲁煜建, 张璐, 王朝元, 等. 东北地区奶牛舍围护结构的低限热阻计算与验证[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 216-222.

[57] 曹哲, 施正香, 安欣, 等. 基于热成像技术的牛舍围护结构传热阻测试方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 235-241.

[58] SEEDORF J, HARTUNG J, SCHRODER M, et al. A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(1): 39-47.

[59] SAHA C K, AMMON C, BERG W, et al. The effect of external wind speed and direction on sampling point concentrations, air change rate and emissions from a naturally ventilated dairy building[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(3): 267-278.

[60] 丁露雨, 鄂雷, 李奇峰, 等. 畜舍自然通风理论分析与通风量估算[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 189-201.

[61] 齐飞, 施正香, 黄金军, 等. 不同气候区猪舍最大通风量确定及湿帘降温系统应用效果[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 202-209.

[62] BLANES V, PEDERSEN S. Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(4): 483-493.

[63] 仲玉婷, 施正香, 赵婉莹, 等. 寒区低屋面横向通风牛舍建筑和环境设计初探[J]. *中国奶牛*, 2019(11): 51-55.

[64] BLEIZGYS R, BAGDONIENE I. Control of ammonia air pollution through the management of thermal processes in cowsheds[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 990-997.

[65] 张世功. 基于温湿度指数的牛舍喷淋降温系统的控制[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.

[66] GAUTAM K R, ZHANG G, LANDWEHR N, et al. Machine learning for improvement of thermal conditions inside a hybrid ventilated animal building[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 187(1): 106259.

[67] CAGLAYAN N, ERTEKIN B C. Intelligent control based fuzzy logic for climate control of livestock buildings [C]//CIGR-AgEng Conference. Aarhus, Denmark: International Society of Agricultural Engineering, 2016: 1-6.

[68] 付晓. 多因素协同的奶牛冷应激评估及冬季舍饲环境智能调控方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.

[69] 王校帅. 基于 CFD 的畜禽舍热环境模拟及优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[70] NORTON T, GRANT J, FALLON R, et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 78-99.

[71] BECKER C A, AGHALARI A, MARUFUZZAMAN M, et al. Predicting dairy cattle heat stress using machine learning techniques[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(1): 501-524.

[72] FU X, ZHANG Y, ZHANG Y G, et al. Research and application of a new multilevel fuzzy comprehensive evaluation method for cold stress in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(11): 9137-9161.

[73] TSAI Y C, HSU J T, DING S T, et al. Assessment of dairy cow heat stress by monitoring drinking behaviour using an embedded imaging system[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 199: 97-108.

[74] 赵晓洋. 基于动物发声分析的畜禽舍环境评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[75] NASIRAHMADI A, HENSEL O, EDWARDS S A, et al. A new approach for categorizing pig lying behaviour based on a delaunay triangulation method[J]. *Animal*, 2017, 11(1): 131-139.

[76] 李胜利, 姚琨, 曹志军, 等. 2022 年奶牛产业技术发展报告[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(3): 316-322.



沈维政, 工学博士, 东北农业大学电气与信息学院教授, 博士生导师。国家现代农业产业技术体系奶牛智能化养殖岗位科学家, 中国畜牧兽医学会信息技术分委会常务理事。主要从事农业信息技术的研究与应用, 先后主持国家、省部级项目 14 项, 主要包括: “十三五”“十四五”国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、中央引导地方科技发展专项等。获黑龙江省科技进步二等奖 1 项、黑龙江省自然科学三等奖 2 项、黑龙江省教学成果一等奖 1 项。发表学术论文 80 余篇, 其中 SCI、EI 检索 41 篇。获专利、软件著作权 28 项, 主编、副主编教材 4 部。

【责任编辑 庄 延】