

# 中国规模化养鸡环境控制关键技术与设施设备研究进展

李保明, 王 阳, 郑炜超, 童 勤

(1. 中国农业大学农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 3. 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘 要:** 近40年来, 养鸡业规模化程度越来越高, 现代鸡种在遗传性能上大幅提升了高产指标, 对养殖环境稳定性要求也愈来愈高, 养殖设施环境条件成为影响鸡只遗传潜力和生产性能充分发挥的保证。该研究从规模养鸡环境调控理论、调控技术和设施设备3个方面对目前的研究进行总结, 主要阐明鸡舍保温隔热、湿帘蒸发降温系统和气流组织理论体系; 围绕不同气候区鸡舍夏季通风湿帘降温系统调控技术, 如鸡舍温度的均匀性控制、温风耦合调控及防温度骤降技术等; 连栋鸡舍建筑、高密度叠层笼养、鸡舍环境净化设备等设施设备的研发与应用研究进展; 并展望了中国畜禽养殖发展的方向, 从智能化养殖管理与监控平台、智能化笼内死鸡识别装置、福利化养殖模式及装备研发等角度展望了未来养鸡业的发展与研究内容, 该研究为规模化养鸡环境调控研究提供了参考依据, 促进现代养鸡产业的绿色高质量转型升级与健康可持续发展。

**关键词:** 养鸡; 环境; 设施; 设备; 通风; 调控技术

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.026

中图分类号: S831.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0212-10

李保明, 王阳, 郑炜超, 等. 中国规模化养鸡环境控制关键技术与设施设备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 212-221. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.026 http://www.tcsae.org

Li Baoming, Wang Yang, Zheng Weichao, et al. Research progress in environmental control key technologies, facilities and equipment for laying hen production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 212-221. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.026 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

鸡是恒温动物, 体温相对较高, 正常体温为 $40.7^{\circ}\text{C}$ 左右, 但环境气温过高或过低, 都影响鸡只机体代谢调节<sup>[1]</sup>。中国地域气候条件差异大, 春秋换季气温波动大且极端气候频繁出现<sup>[2]</sup>, 复杂多变的气候、鸡舍建筑设施、通风气流和饲养模式等都直接影响舍内环境, 造成鸡舍内环境的复杂和多样性, 对养鸡生产极为不利<sup>[3]</sup>, 且现代养鸡生产大多采用高产性能品种鸡只, 对养殖环境温度波动等应激的适应能力相对较弱<sup>[4]</sup>, 养鸡业面临更多的风险与考验, 温度波动等易造成机体免疫力下降、疾病频发, 影响鸡只健康和生产性能, 从而直接导致经济效益的下降。鸡只养殖生产中, 怎样将养殖设施环境条件控制在一定范围内且保持稳定、减小波动是保障高产性能鸡种发挥遗传潜力和生产效率的基础<sup>[1]</sup>, 也是养鸡业持续关注的问题。

养殖环境调控程度低、应激强度大、疾病交叉感染严重和能源浪费大等问题, 直接造成养鸡业高额经济损失<sup>[3]</sup>, 也一定程度上制约了养鸡产业的可持续发展, 主要原因是: 1) 鸡舍建筑保温隔热性能差。养殖环境温度的

稳定性直接受渗透风量和建筑性能的影响<sup>[5-7]</sup>, 舍内温度过低会导致产蛋率减少5%、饲料消耗量增大 $3\text{ g}/(\text{d}\cdot\text{只})$ <sup>[7]</sup>; 2) 气流组织不均匀, 舍内冷、热应激强度大。横向通风系统鸡舍内气流组织不均匀, 存在通风死区, 且舍间交叉污染等问题严重<sup>[8]</sup>; 干、湿球温差大的地区, 湿帘降温系统启动初期温降幅度大, 靠近湿帘端易引发急性冷应激; 中国长江流域及其以南炎热气候区, 蒸发降温湿帘的降温效率受高温高湿天气的影响, 舍内高温( $>30^{\circ}\text{C}$ )、高湿度( $>80\%$ )环境下, 鸡舍内热应激程度较大, 导致饲料消耗、产蛋率均下降, 饮水量上升<sup>[9]</sup>; 3) 鸡舍生物安全防疫差, 场区规划布局随性化, 场区内气流组织紊乱。鸡舍风机端排出的污浊空气在场区滞留, 致使舍间交叉传播; 刮板清粪方式下, 鸡粪处理不及时且清粪周期长, 鸡粪含水量大, 发酵后 $\text{NH}_3$ 和 $\text{CO}_2$ 浓度较高, 蛆蝇滋生等问题严重<sup>[10-11]</sup>; 鸡场环境净化采用消毒剂消毒模式, 消毒防疫频繁、细菌耐药性强和用药量大等问题严重<sup>[12]</sup>。为解决上述养鸡环境调控程度低、应激大、疾病交叉感染与能源浪费大等难题, 实现鸡舍内热环境的稳定性、通风均匀性及场区生物安全, 需从适合中国气候特点的通风模式、环境调控机理、场区净化与生物安全、工艺与设施设备研发等多角度开展产学研协同攻关<sup>[12]</sup>。

本文从规模养鸡环境调控理论、调控技术、设施设备3个方面对目前的研究进展进行总结, 阐明了鸡舍保温隔热、湿帘降温系统和气流组织理论体系的进展, 并

收稿日期: 2020-04-28 修订日期: 2020-07-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0500700); 国家蛋鸡产业技术体系(CARS-40)

作者简介: 李保明, 教授, 博士生导师, 主要从事畜禽设施养殖工艺与环境研究。Email: libm@cau.edu.cn

展望了养殖业的智能化养殖管理与监控平台、智能化笼内死鸡识别装置、福利化养殖模式及装备研发等未来发展方向，为规模化养鸡环境调控及设施设备的相关研究提供参考依据，促进现代养鸡产业的绿色高质量转型升级与健康可持续发展。

## 1 鸡舍热环境调控理论

### 1.1 鸡舍建筑保温隔热性能

不同日龄鸡只对舍内热环境的需求不同，外围护结构保温隔热性能的模型涉及参数多，鸡舍建筑与民用建筑的采暖方式、建筑形式、使用周期等方面有很大差距，参数取自民用建筑假设值使得鸡舍建筑模型准确性降低，难以应用到不同气候区鸡舍建筑保温隔热的实际生产<sup>[13]</sup>，导致鸡舍建筑结构设计建设不合理，鸡舍外围护结构保温隔热性能较差且外围护结构总热阻远小于冬季低限热阻<sup>[11,13-14]</sup>，致使鸡舍内热环境不均匀、冬季舍内温度低和夏季舍内温度高。鸡舍冬季通风和保温矛盾解决的关键是确定影响舍内温度的主导因素，明确围护结构保温隔热性能和饲养密度要求；Wang 等<sup>[15]</sup>推导得出了鸡舍内空气温度的解析式，揭示了外围护结构保温性能、通风量、饲养模式、舍外空气温度、舍外计算温度和舍内蓄热体等关键因素对舍内温度的影响机理。王阳等<sup>[6,10,16]</sup>通过鸡舍热湿空气耦合传递的微环境模拟模型，建立了不同地区无供暖系统蛋鸡舍外围护结构热阻及保温材料经济性模型，得出了不同气候区鸡舍围护结构的热阻（图 1）和控制舍内温度不低于下限值且  $\text{CO}_2$  浓度不超标下鸡舍通风量随舍外温度的变化规律，研究表明当冬季舍外计算温度分别不低于  $-25$ 、 $-15$ 、 $0$   $^{\circ}\text{C}$  时，蛋鸡舍墙体的热阻应分别大于  $0.78$ 、 $0.57$ 、 $0.27$  ( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )/W。

通过增加外围护结构保温性能可满足鸡舍温度环境要求及减少采暖、制冷能耗，但也增加了外围护结构建设投入成本，且保温层使用寿命有限。Wang 等<sup>[13,16]</sup>利用经济性评价指标和全生命周期理论研究基层热阻和气候因素等对保温材料厚度影响，建立了鸡舍建筑外围护结构保温材料经济厚度模型，并用经济性评价指标分析了保温材料厚度与设计使用年限内建筑投入成本的交互作用，对哈尔滨、北京、重庆、昆明和广州 5 个不同气候区典型城市鸡舍建筑保温材料的选择提出了建议，给出了 5 个典型城市使用玻璃棉毡、矿渣棉、泡沫聚苯乙烯、泡沫聚氨酯、泡沫聚氯乙烯和泡沫聚乙烯 6 种保温材料时的保温层厚度、总成本、净现值及回收周期等相关参数，在满足鸡群冬季舍内环境的前提下，探讨了使用年限内总费用最低的外围护结构保温隔热性能和节能效益。

鸡舍建筑外围护结构不同搭接形式、保温材料、搭接密封方式对舍内压差、渗风量及能耗的作用规律尚不明确，且装配式鸡舍建筑自身关键节点和预制构部件间搭接缝隙的密封技术研究较为欠缺，预制构部件间搭接缝隙使建筑外围护结构的传热耗热量及冷风渗透热增大，且渗透热损失占建筑热负荷的 25% 以上<sup>[15]</sup>。王阳<sup>[12]</sup>针对

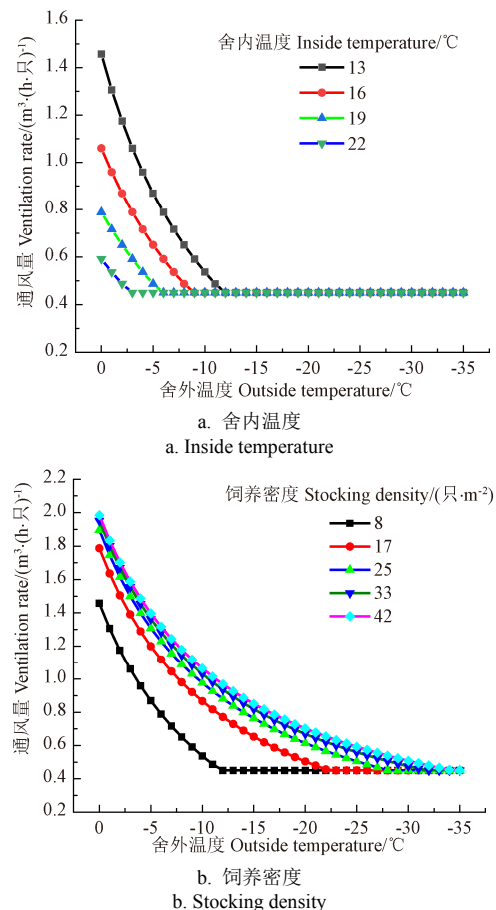


图 1 舍内温度和饲养密度对通风量的影响<sup>[16]</sup>

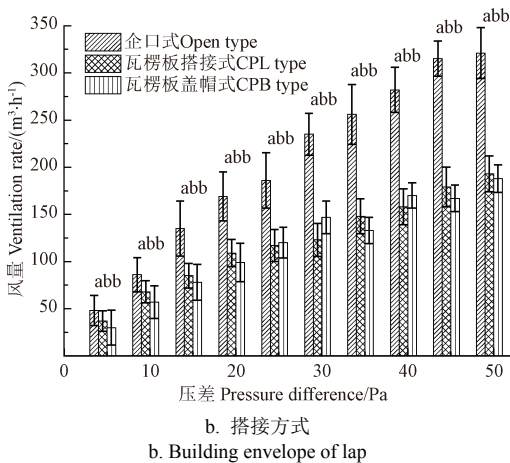
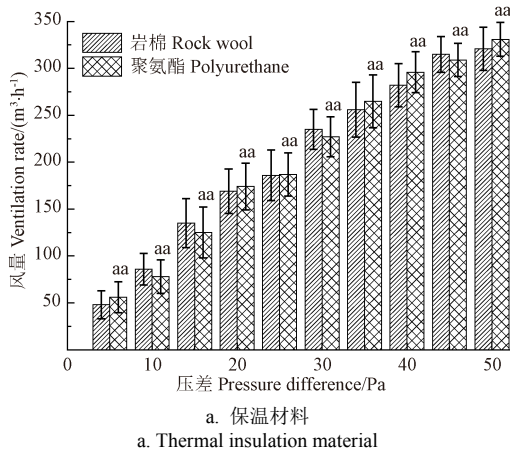
Fig.1 Ventilation rates as affected by inside temperature and stocking density in the house

装配式鸡舍建筑气密性差导致舍内外压差变小且影响夏季湿帘降温效率及冬季能耗、冷热风渗透致使舍内局部冷热应激等问题，研究了装配式鸡舍建筑不同搭接方式、保温材料、搭接密封方式对风压与渗风量的影响，通过现场试验及实验室试验确定了外围护结构不同保温材料、搭接方式、搭接密封方式下的气密性参数指标（图 2），探讨了装配式鸡舍建筑气密性对建筑能耗的影响，并对装配式鸡舍建筑外围护结构的搭接方式选择及搭接缝隙密封设计提出了建议及优化措施。研究结果表明当舍内外压差为 30 Pa 时，建筑外围护结构启口式、瓦楞板搭接式、瓦楞板盖帽式及暗扣隐蔽式 4 种不同搭接方式下的渗透系数为 0~29.35，压差指数为 0~1.83；围护结构暗扣隐蔽式搭接下无渗透风量且其气密性最好，瓦楞板搭接式和瓦楞板盖帽式气密性次之，启口式搭接的气密性较差。压差小于 15 Pa 时，启口式搭接密封处理后渗透风量减小 41.7%~42.2%，压差大于 15 Pa 时，渗透风量减小 33.2%~39.7%；鸡舍外围护结构的密闭性类别由差到中等及由差到密封性能好时，最大热负荷分别下降 15.5% 和 19.9%，最大冷负荷分别下降 4.5% 和 5.7%。

### 1.2 鸡舍湿帘蒸发降温系统

湿帘蒸发降温系统利用湿帘蒸发水汽来吸收空气中的显热量降低温度<sup>[17]</sup>，理论上定量分析湿帘蒸发降温系统在中国各地气候条件下的降温效果，利于湿帘蒸发降

温系统的合理推广应用。Wang 等<sup>[17-20]</sup>针对中国不同地区的气候特点,利用连续 20 a 各地夏季每日气象数据,应用模糊数学综合评判方法构建了湿帘蒸发降温系统综合评判模型及评价指标,对湿帘蒸发降温系统在中国各地气候下的适应性进行了模糊评判,明确了湿帘蒸发降温系统可完全适用于中国各地的夏季降温,结果表明湿帘蒸发降温系统可将黄河流域及其以北地区鸡舍内的空气温度降低 5℃ 以上,舍内温度小于 28℃;长江流域及其以南地区鸡舍内空气温度可降低 3~7℃,舍内空气温度不超过 30℃。但进一步的研究中发现,干、湿球温差大的地区,湿帘蒸发降温系统启动初期,降温快、温度骤降大<sup>[19-23]</sup>,骤降幅度远大于 5℃<sup>[18,24-25]</sup>,且鸡舍内送、排风口温差大,舍内环境不均匀,对鸡群和饲养人员的健康等产生不利影响,鸡只受冷热应激的影响<sup>[26-31]</sup>,导致禽蛋生产损失严重<sup>[32-34]</sup>。



注: CPL 为瓦楞板搭接式; CPB 为瓦楞板盖帽式; 图中小写字母不同表示同一压差下风量差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: CPL means corrugated plate lap; CPB means corrugated plate lap; With different lowercase indicated significant differences between groups ( $P < 0.05$ ).

图2 保温材料种类和搭接方式对渗透风量的影响<sup>[12]</sup>

Fig.2 The effects of thermal insulation material and building envelope of lap on the air infiltration rate

### 1.3 鸡舍纵向通风气流组织理论

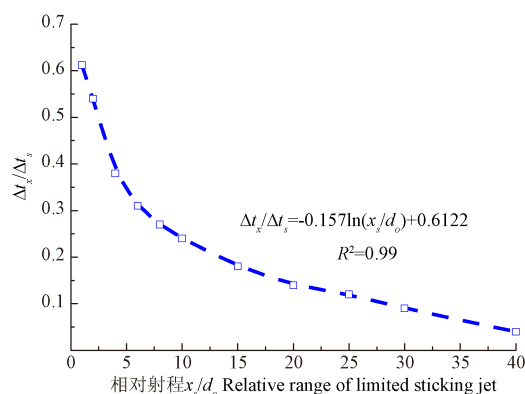
鸡舍通风系统的设计是空气环境调控技术的关键,通风不均、存在通风死区、气流速度小和舍间气流交叉污染等问题在横向通风系统鸡舍内普遍存在<sup>[19-20]</sup>。韩宽襟

等<sup>[21]</sup>研究鸡舍进气口型式和位置对舍内气流影响,较大改善了舍内气流分布,但未从根本上解决舍内气流分布不均、通风死角和流速小等问题。李保明等<sup>[3,18,20,22]</sup>提出了纵向通风气流组织理论与设计方法,在鸡舍通风量相同情况下,纵向通风气流组织的舍内平均风速比横向通风系统高 5~10 倍,舍内气流速度达 1~3 m/s,且鸡舍愈长,风速提高愈明显;纵向通风鸡舍的射流进气口沿侧墙均匀布置,且舍内所有空气都向着鸡舍一端的排气口流动,舍内鸡群可享受 100% 的新鲜空气,舍内通风死区明显减少,污浊气体有效的排除,舍内鸡群处在良好的舍内环境条件下,解决了鸡舍横向通风系统存在的通风死区和舍间交叉感染难题;大直径的低压大流量节能风机在纵向通风系统中应用,风机的安装布置台数减少,但通风效率提高,较常用的鸡舍风机可节省设备投资及安装费 35%,节约电能和运行费 40% 以上,为规模化鸡场的通风系统设计应用提供了理论基础。

### 1.4 基于鸡舍建筑与通风系统耦合作用的鸡舍稳温调控理论

王阳等<sup>[12,31,35]</sup>基于非等温贴附射流理论设计舍内气流组织,探讨了进风口位置、尺寸及进风参数对舍内贴附射流长度、温差衰减的影响规律(图3),构建了回流区域内温度的解析式,解析了基于鸡舍建筑与通风系统耦合作用的鸡舍稳温机理和影响规律,利用非等温贴附射流理论提出降低温度波动及温差的纵墙湿帘缓冲室新风模式,并明确了其理论及设计方法,通过试验对比分析新通风模式及侧墙进风小窗位置对舍内热环境的影响。结果显示新通风模式下鸡舍内水平与垂直方向的最大温差分别为 1.4 和 0.9℃,传统通风模式下的温差为 6.4 和 5.4℃,纵墙湿帘缓冲室山墙排风系统能很好的降低舍内水平及垂直方向温差,与传统纵向通风系统相比,纵墙湿帘缓冲室山墙排风系统舍内温热环境分布更均匀,舍内无冷热应激现象发生。其原因是舍外空气经过湿帘降温后先进入缓冲间,通过非等温贴附射流作用进入鸡舍,每侧进风的射流回流区域均位于鸡笼鸡只活动区域。纵墙湿帘缓冲室新风模式下“缓冲间”的降温效率达 95%,但舍内仍存在一部分降尘(2.4%),其原因可能是沙尘的粒径小于 0.05 mm,重力和惯性作用下不能使其降落,也可能是沙尘暴进入鸡舍缓冲间的速度太大,气流在缓冲间内缓冲后经一系列运动直接进入了舍内。纵墙湿帘缓冲室山墙排风系统通风模式不仅可降低尘降量及舍内温差、温度波动幅度,还可将进入鸡舍的气流进行缓冲预处理,夏季湿帘降温期间,进风先经过湿帘蒸发降温,后经缓冲间缓冲后经侧墙小窗进入鸡舍;冬季预热进入舍内的气流,冷风先进入缓冲间,缓冲间内热交换作用下预热空气,后经侧墙小窗进入鸡舍内。纵墙湿帘缓冲室山墙排风系统可减少鸡舍建筑围护结构与空气的传热,预处理作用下降低建筑能耗,且使进入鸡舍内的气流在水平、垂直方向上保持稳定均匀<sup>[3]</sup>。





注： $\Delta t_x$  为鸡只活动区域的温度波动幅度，℃； $\Delta t_s$  为送风温差，即送风温度与舍内温度之差，℃； $x_s$  为射流长度，m； $d_o$  为进风口面积折算成的圆直径，m。

Note:  $\Delta t_x$  is the decay of the air temperature in poultry-occupied zone;  $\Delta t_s$  is the temperature difference between the supply air at the inlet and the air in the poultry house, °C;  $x_s$  is limited sticking jet length, m;  $d_o$  is circle diameter converted from the air inlet area, m.

图 3 鸡舍受限射流的温度衰减规律与相对射程关系<sup>[35]</sup>

Fig.3 The relationship between temperature difference attenuation and the relative range of limited sticking jet in the poultry house

## 2 鸡舍环境调控技术

### 2.1 干旱地区夏季通风湿帘降温系统的防温度骤降技术

Hui 等<sup>[25]</sup>通过水泵间歇调控和湿帘淋水面积分级调控技术将温度波动控制在 3.5℃ 内；栋舍间歇喷雾、喷淋等措施可缓解舍内热环境不均匀、热应激，降低鸡体温上升、致死热负荷阈值和死亡率等<sup>[27-28]</sup>。但 Timmons 等<sup>[29-30]</sup>认为应实现蛋鸡舍内鸡活动区域的精准喷雾降温而非整栋鸡舍，因喷雾、喷淋降温的同时会淋湿饲料设备、饲料和鸡粪等，长时间使用会影响设备的使用寿命，并不利于舍内微生物环境的控制。因此，间歇喷雾、喷淋等措施未在西北地区蛋鸡养殖中推广应用<sup>[26]</sup>。Wang 等<sup>[31]</sup>测试分析了一种适用于西北地区蛋鸡舍的新通风降温方式，其特点是降温湿帘均匀的安装在侧墙上，并与侧墙小窗共用进风口，研究结果表明该通风模式可降低舍内温差及热应激程度，且舍内温度波动幅度可控制在 2.7℃ 以内。

### 2.2 南方高温高湿地区纵向通风增大通风效率调控技术

夏季高温湿热天气，湿帘降温系统的降温效果受影响，舍内热应激程度较大，鸡只饲料消耗、产蛋率、抵抗力下降，饮水量上升<sup>[9]</sup>。通过加大鸡活动区域的风速来增强对流散热，促进风冷效应来排除余热降低体感温度，可保持鸡只的生产性能，因受风机静压、通风效率及风量的限制，依赖增加风机台数很难达到效果，且显著增加电费等费用<sup>[3]</sup>。比较可靠的方法可概括为：1) 使用适宜高静压下运行的大直径风机；2) 将屋顶下部空间设导流板引流<sup>[36-37]</sup>；3) 进风口内侧设导流板<sup>[9]</sup>；4) 提高鸡舍建筑的密闭性<sup>[3]</sup>。选用大直径带风筒的风机可降低风机安装台数，设导流板可提高鸡只活动区域的风速，增加建筑的气密性利于气流按预设的运动轨迹活动。研究也发现气密性差会导致舍内外压差变小且热风

渗透处局部热应激存在，高湿环境下舍内霉菌、细菌的繁殖加快等<sup>[3]</sup>。

## 3 养鸡设施设备

### 3.1 高密度叠层笼养

#### 3.1.1 蛋鸡高密度叠层笼养

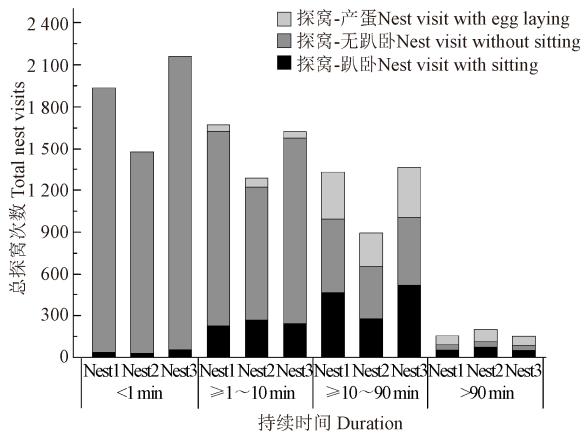
土地成本越来越高和环保导向及“禁止燃煤”政策下能耗成本逐渐增大，集约化、节能型、高效益饲养管理模式是蛋鸡生产发展的趋势。基于舍内空气流动、传热、传湿及边界条件相互耦合建立的热湿空气耦合传递关系，高密度饲养模式可实现无采暖系统下的舍内温度需求<sup>[6,10,16]</sup>。6 层叠层笼养 (48.3~60 只/m<sup>2</sup>) 与 3 层全阶梯 (16.8 只/m<sup>2</sup>)、4 层半阶梯 (22.4 只/m<sup>2</sup>) 笼养相比较，分别可节约土地 63.4%、53.62%，提高劳动生产率 160%~290%，人均饲养量达数万只以上；料蛋比为 (2.2~2.5):1，死淘率小于 15%<sup>[38]</sup>。蛋鸡高密度叠层笼养相对集中，环境污染面减小，特别是清粪工艺及粪污收集与输送技术，粪便日产日清且粪不落地，便于及时处理，节约了清洁用水量，大大改善了鸡舍内及鸡场周围的环境卫生<sup>[39]</sup>。干清粪工艺及粪污收集与输送技术的应用，解决了“水泡粪”模式致使舍内高 NH<sub>3</sub> 浓度问题。传送带清粪蛋鸡舍冬季按最小通风量运行并保持连续通风模式，舍内温度可满足最低温度环境要求，蛋鸡舍内 CO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub> 浓度同增同减，舍内 CO<sub>2</sub> 浓度低于 5 000 mg/m<sup>3</sup> 时，舍内 NH<sub>3</sub> 浓度不超过 30 mg/m<sup>3</sup><sup>[16]</sup>。且舍内 CO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 浓度不超过限定值<sup>[16]</sup>。集约化程度高、土地节约率高、环境污染减少、饲养成本降低、投资利用率和劳动生产率均提高及死淘率降低等是蛋鸡高密度叠层笼养技术与装备的主要优点。

#### 3.1.2 低胸囊肿肉鸡鸡笼底网与笼具设备

肉鸡饲养方式一般为平养和笼养。厚垫料地面平养存在粉尘及 NH<sub>3</sub> 浓度高、病原微生物、冷热应激大等问题，这些均为呼吸道疾病等诱发的因素<sup>[40]</sup>；笼养模式下，鸡只与粪便不直接接触，白痢和球虫病等疾病有效控制，同时不使用垫料，消除了微生物滋生的环境条件，但肉鸡生长速度快，出栏质量大，笼养肉鸡的活动受限，骨骼和肌肉不能运动，腿病发生率升高，且经常与网底摩擦，胸囊肿发病率升高，直接影响肉仔鸡胴体品质和等级<sup>[41]</sup>。赵芙蓉等<sup>[42]</sup>表明笼底类型、密度是影响胸囊肿发生率的主因素，通过影响笼养肉仔鸡行为的时间比例或频次，改变胸部与笼底的接触机率和时间，进一步影响胸囊肿的发生。为降低笼养肉鸡因网底摩擦致高胸囊肿发病率，Zhao 等<sup>[43]</sup>首创了仿竹竿表面形状及条状垫片组合网状结构的底网与笼具，使白羽肉鸡胸囊肿发生率降至 3% 以下。叠层式肉鸡笼养设备一般大于 4 层、小于 8 层，肉鸡大饲养密度下，单位面积养殖量是传统平养模式的 5 倍，单位空间出栏数量高，每层均通过传送带系统清粪，肉鸡出栏也由传送带输送至运输车。叠层式肉鸡笼养便于机械化与自动化管理，饲养员劳动强度大幅降低，有效克服了传统平养存在的管理困难、单位面积饲养密度小等问题，叠层式肉鸡笼养也提高了生产效率与养殖效益。

### 3.1.3 笼内设产蛋窝与磨爪垫的种鸡本交笼养设备

种鸡本交笼养模式可在机械化养殖模式下进行交配行为重新得到关注<sup>[44-45]</sup>, 且种鸡本交笼养提高了空间利用率及集约化程度<sup>[46]</sup>, 但现行本交笼系统缺乏环境富集设施, 同时多层笼具间由于光照均匀性差, 存在伤害性行为频发及受精率不稳定的问题, 严重影响生产效率和经济性。Shi 等<sup>[47]</sup>探究本交笼养模式下隐蔽空间和磨爪资源配置对种鸡啄羽、啄肛类伤害性行为与交配行为等特征社会行为的影响, 结果表明设隐蔽空间组母鸡羽质覆盖、遭受严重啄羽频次、行为恐惧与生理应激、母鸡死淘显著低于未设置组 ( $P<0.05$ ), 啄死淘率与隐蔽空间使用率呈负相关, 啄癖行为受害者具有较高的体尺波动不对称性、较高的血浆皮质酮浓度和嗜异细胞与淋巴细胞比例及较低的 5-羟色胺浓度; 设磨爪资源配置组鸡只的磨爪、觅食、攻击、啄物、交配与求偶行为频次要高于未设置组, 同时其采食频次、严重啄羽频次显著降低 ( $P<0.05$ ), 未设置磨爪资源配置组鸡只对行为应激测试更加敏感与恐惧 ( $P<0.01$ ), 且皮质酮含量与因啄死淘率要显著高于设置磨爪资源配置组鸡只 ( $P<0.05$ )。笼内 3 种不同类型产蛋窝鸡只的探窝-产蛋、探窝-无趴卧及探窝-趴卧次数如图 4 所示, 探窝包括进入及离开产蛋窝, 进入产蛋窝定义为头部及一条腿进入, 离开产蛋窝定义为双腿可能施加于身体其他部位; 产蛋为鸡只呈现企鹅状姿态; 趴卧为鸡只坐下, 龙骨接触产蛋窝底网, 腿部压于身体之下, 鸡只不移动或者转动身体<sup>[45]</sup>。



注: Nest 1 为 90 cm×40 cm×60 cm 的隐蔽空间, Nest 2 为 45 cm×40 cm×60 cm 的隐蔽空间, Nest 3 为 70 cm×52 cm×60 cm 的隐蔽空间。  
Note: Nest1 concealed spaces parameters (length×width×height, 90 cm×40 cm×60 cm), Nest 2 concealed spaces parameters (length×width×height, 45 cm×40 cm×60 cm), Nest 3 concealed spaces parameters (length×width×height, 70 cm×52 cm×60 cm).

图 4 不同类型产蛋窝鸡只的总探窝次数<sup>[45]</sup>

Fig.4 Total nest visits of in different nest boxes types

### 3.2 新型微酸性电解水高效消毒工艺与环境净化

中国农业大学开发的新型微酸性电解水消毒工艺及设备与无害化消毒及环境净化技术, 可解决养殖消毒防疫频繁、细菌耐药性强和用药量大问题, 实现国际养殖倡导的健康、环保、无药理念。微酸性电解水可在畜禽养殖的环境净化、饮水系统及物品等消毒环节中替代现行化学消毒剂<sup>[48]</sup>。微酸性电解水主要以次氯酸分子 (HClO) 的形式存在, 稳定性好, 且杀菌能力强, 其杀菌

能力是次氯酸钠 (NaClO) 的 80 倍<sup>[49-50]</sup>, 微酸性电解水属于绿色、环保、安全、高效的杀菌消毒剂<sup>[50-52]</sup>, 因次氯酸分子杀菌后还原为普通水, 无任何残留和污染, 对人、动物和设备均无副作用产生, 且微酸性电解水机以氯化钠溶液、稀盐酸为原料, 价格相对低。微酸性电解水消毒技术及环境净化技术已应用在畜禽养殖场环境净化、通道、设备、鸡蛋及饮水管线消毒等各个方面<sup>[3,52]</sup>。

### 3.3 节能节地连栋鸡舍设计与环境综合调控

根据中国人多地少、能源与资源有限等国情, 研究开发节约土地、节能、节水与节省投资等方面的新型鸡舍建筑与环境控制技术意义重大。李保明等<sup>[22,53]</sup>建立了大型连栋鸡舍建筑的围护结构传热与舍内空气热环境数学模型, 连栋鸡舍的特点是相邻 2 栋鸡舍之间没有间距。每一连栋鸡舍即为一个分场, 采用整场全进全出的工艺, 鸡舍排风口与场区污道布局相结合, 配合微酸性电解水消毒工艺, 实现了场区内净污完全分离, 切断了前后批次鸡只间的交叉感染, 疾病传播有效控制, 保证了场区生物安全。连栋鸡舍设计与环境综合调控技术可节约占地面积、建筑造价分别达 50%~60%、30%~53%, 且提高饲养密度达 30%以上。连栋鸡舍设计与环境综合调控技术不仅节省土地资源, 降低建筑造价, 且有限空间内的养殖效率提高<sup>[12]</sup>。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

为实现鸡舍内热环境的稳定性、通风均匀性及场区生物安全, 解决制约中国养鸡业健康发展的鸡舍环境调控程度低、环境应激强度大、疾病交叉感染严重与能源浪费大等问题, 研究者在适合中国气候特点的鸡舍通风模式、环境稳定性调控机理、鸡舍及场区环境净化、养鸡工艺模式与设施设备、新型鸡舍建筑与环境控制技术方向开展了系列探索, 并取得了较好的研究成果, 有效缓解了制约养鸡生产的难题。该研究系统的介绍了养鸡环境调控理论、环境调控技术与设施装备的相关研究内容并综述研究进展, 以期规模化养鸡环境调控技术提供参考依据, 促进现代养鸡产业的绿色高质量转型升级与健康可持续发展, 主要研究成果如下:

1) 湿帘风机降温系统加纵向通风气流组织理论, 实现了舍内无通风死区、整舍气流均匀, 鸡舍夏季高温减产、死淘率高问题解决, 横向通风气流组织模式下的通风死区、舍内环境不均和舍间交叉感染难题破解。

2) 水泵间歇调控和湿帘淋水面积分级调控缓解了干旱地区鸡舍夏季通风湿帘降温系统启动初期骤降问题; 鸡舍建筑与通风系统耦合作用下的鸡舍稳温调控机理-非等温贴附射流理论提出的降低温度波动及温差的纵墙湿帘缓冲室山墙排风新通风模式, 不仅可降低舍内温差及温度波动幅度, 还可将进入鸡舍的气流预处理, 冬季预热气流, 夏季减缓湿帘降温后冷气流对鸡造成的冷应激。

3) 蛋鸡高密度叠层笼养、低胸囊肿肉鸡鸡笼底网与笼具设备、笼内设产蛋窝与磨爪垫的本交笼养设备、新

型微酸性电解水高效消毒工艺与设备及连栋鸡舍建筑等,可提高有限空间内的养殖效率、节省土地资源、降低单位饲养密度下的建筑造价。

## 4.2 展望

中国畜禽养殖发展,未来 5~10 a 将是智慧畜牧业的快速发展阶段,首先要突破 1.0 阶段—数字化阶段,信息化和智能化的发展必须以数字化为基础,数字化阶段包括畜禽环境参数、动物生长参数、生产性能参数、个体采食饮水量、动物行为及健康等相关参数的信息资源采集;其次,IT 企业的介入及其在物联网技术方面的优势可帮助快速越过 2.0 阶段—网络化阶段,包括互联网、大数据的建立和应用等信息资源的整合发布,及其在模型算法的优势可助力动物健康生长与管理模型的构建,并有助于畜牧业信息化 3.0 阶段—智慧畜牧业的实施、信息的挖掘及准确利用。中国基本是 1.0~3.0 阶段的同步推进,但 1.0 数字化阶段还停留在环境参数阶段,对动物的生长参数,如质量、体温、行为等健康相关参数的数字化程度还不够。2.0 网络化阶段中的数据库还停留在一些公共云上,有需要的养殖企业一定程度上无法使用,使得一些企业不得不重新研发能够自主采集相关数据的环境控制系统及数据库等。若 1.0 数字化阶段未很好解决,会影响 2.0 和 3.0 阶段的实施及发挥,如何解决数据库和用户需求问题,将使得 2.0 和 3.0 反过来迫使 1.0 阶段实现突破。中国在养鸡环境调控理论、环境调控技术与设施装备开发等方面虽已经取得了大量研究成果,但目前养鸡数据化与智能化管理监控、智能化笼内死鸡识别装置及福利化养殖模式及技术装备等方面还亟待深入研究,未来还有很多问题有待解决,展望未来中国养鸡产业的发展方向与研究内容主要包括:

### 4.2.1 智能化养殖管理与监控平台

对中小规模的养殖场来说,数据化与智能化可能大多仅处于自动化阶段,只体现在自动化上料给水、自动化环控设备、自动化清粪及集蛋等技术<sup>[54-55]</sup>。中国的养殖业在数据化与智能化领域还处于初级阶段,因此,如何打造精准化、高效化的综合调控技术体系是关键。针对养殖户、养殖管理层及消费者的需求,通过智能化养殖管理软件与网络化视频监控,智能化养殖管理与监控平台需同时满足养殖户、养殖管理层及消费者的需求,使养殖户、养殖管理层及消费者等多方信赖。1) 确保养殖人员可实现环境因子变化下的整体智能调控;2) 实现鸡场管理人员和企业高层管理者对鸡舍和场区环控系统的实时操控及远程实时监测,远程监控舍内环控器,通过远程通信及报警系统,确保安全生产;3) 实现养殖产品的可追溯性,消费者可从源头追溯养殖产品的系列相关信息,有效保障食品安全、健康。

### 4.2.2 智能化笼内死鸡识别装置

随着饲养规模的日趋扩大,人工定时巡视、检查和清除笼内死鸡是一项劳动密集型工作<sup>[56]</sup>。人工巡检死鸡实时性低,且高密度叠层笼养(6层、8层、10层)下,人工巡检死鸡需借助攀爬和可移动的设备,劳动强度相对较高、危险性大且难以保证工作效率。鸡只采食时容

易计算笼内鸡只数量,但采食位置不能同时满足笼内所有鸡只的采食,一般会有 1~2 只鸡在采食槽后方等待采食,无法通过计算采食的鸡只来确定笼内是否有死鸡。基于机器视觉的规模养鸡场死鸡探测系统和监视系统的算法整体效率过多依赖于图像采集和处理,但养鸡场内照度有限,存在粉尘且高密度饲养下鸡只相互紧挨,致使图像采集与处理相对复杂,基于机器视觉的探测系统和监视系统无法很好推广应用<sup>[57-58]</sup>。研究智能化笼内死鸡探测系统、设计研发一款由饲养员手持或自动设备承载的智能化笼内死鸡识别装置,经过鸡笼时可检测笼内是否有死鸡的可移动自动检测装置具有很好的科学意义和商业价值,也是规模化多层笼养模式下提高生产效率的必然趋势。

### 4.2.3 福利化养殖模式及装备

随物质生活的提高,人们对优质蛋白的市场需求也在不断扩大,对动物福利的认可度及需求也在逐渐提高,食品安全呼唤养殖业减抗、无抗生产,从消费者的价值观以及消费趋向和国际社会的发展可以看出,福利养殖问题亟待考虑、解决<sup>[59-60]</sup>,福利养殖模式符合畜牧业生产模式转型升级的发展方向和需求,摸索出一条具有中国特色的动物福利养殖之路对养殖业的可持续发展至关重要。根据养殖业的发展现状及市场需求特点,开发特色福利化养殖设施装备同时配套养殖环境调控设备,通过提高畜禽心理、生理健康,且让畜禽回归各种自然习性,以提高畜禽的健康和抗病能力,减少或最终取缔疫苗、抗生素或抗菌药等药物在养殖业的使用。利用资源条件与市场优势,发展出中国特色的动物福利养殖模式及理论体系,并创立中国特色品牌,值得深思<sup>[61-62]</sup>。

## [参 考 文 献]

- [1] Abbas T E, Yousuf M M, Ahmed M E, et al. Effect of fluctuating ambient temperature on the performance of laying hens in the closed poultry house[J]. Research Opinions in Animal and Veterinary Sciences, 2011, 1(4): 547-560.
- [2] Olgun M, Celik M Y, Polat H E. Determining of heat balance design criteria for laying hen houses under continental climate conditions[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 355-365.
- [3] 李保明, 王阳, 郑炜超. 我国规模化养鸡环境控制技术的最新进展[J]. 中国家禽, 2019, 41(9): 1-7.  
Li Baoming, Wang Yang, Zheng Weichao. Advances in environment control technology of poultry in China[J]. China Poultry, 2019, 41(9): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] Dawkins M S, Donnelly C A, Jones T A. Chicken welfare is influenced more by housing conditions than by stocking density[J]. Nature, 2004, 427(6972): 342-344.
- [5] 王阳, 郑炜超, 石海鹏, 等. 夏季鸡舍屋顶隔热改善舍内热环境及蛋鸡生产性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 207-213.  
Wang Yang, Zheng Weichao, Shi Haipeng, et al. Roof insulation improving thermal environment and laying



- performance of poultry houses in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 34(17): 207-213. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王阳, 李保明. 密闭式蛋鸡舍外围护结构冬季保温性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 190-196.  
Wang Yang, Li Baoming. Analysis and experiment on thermal insulation performance of outer building envelope for closed layer house in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 190-196. (in Chinese with English abstract).
- [7] 俞宏军, 李保明, 施正香, 等. 北京密闭式商品蛋鸡舍冬季环境研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(5): 68-72.  
Yu Hongjun, Li Baoming, Shi Zhengxiang, et al. Winter environment analysis on enclosed commercial layer housing in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(5): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李保明, 周允将, 崔引安. 夏季鸡舍纵向通风系统的应用与研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(4): 83-89.  
Li Baoming, Zhou Yunjiang, Cui Yin'an. Study and use of tunnel ventilation system for poultry houses in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1992, 8(4): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [9] 程琼仪, 穆钰, 李保明. 进风位置对纵向通风叠层鸡舍气流和温度影响 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 192-199.  
Cheng Qiongyi, Mu Yu, Li Baoming. CFD simulation of influence of air supply location on airflow and temperature in stacked-cage hen house with tunnel ventilation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(15): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王阳, 王朝元, 李保明. 蛋鸡舍冬季 CO<sub>2</sub> 浓度控制标准与最小通风量确定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 240-244.  
Wang Yang, Wang Chaoyuan, Li Baoming. Determination of carbon dioxide concentration standards and minimum ventilation rates of layer house in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 240-244. (in Chinese with English abstract)
- [11] Reece F N, Deaton J W, Harwood F W. Roof insulation and its effect on broiler chicken mortality in hot weather[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(4): 733-735
- [12] 王阳. 健康高效养鸡稳温机理及热环境调控规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.  
Wang Yang. Temperature Stability Mechanism and Thermal Environment Regulation for Healthy and Efficient Poultry Stocking[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wang Y, Li B M. An optimized solar-air degree-days method to evaluate energy demands for poultry building in different climate zones[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering (FASE), 2019, <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019289>
- [14] 谢明文, 李广才, 孙洪飞, 等. 沈阳地区集约化猪场和鸡场环境现状调查[J]. 沈阳农业大学学报, 1996, 27(4): 317-322.  
Xie Mingwen, Li Guangcai, Sun Hongfei, et al. Investigation on the environmental condition of intensive pig and chicken farms in Shenyang[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1996, 27(4): 317-322. (in Chinese with English abstract)
- [15] Wang Y, Li B M, Liang C, et al. Dynamic simulation of thermal load and energy efficiency in poultry buildings in the cold zone of China[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105127.
- [16] Wang Y, Zheng W C, Shi H P, et al. Optimising the design of confined laying hen house insulation requirements in cold climates without using supplementary heat[J]. Biosystems Engineering, 2018(174): 282-294.
- [17] Wang C Y, Cao W, Li B M, et al. A fuzzy mathematical method to evaluate the sustainability of an evaporative cooling pad system for poultry houses in China[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(3): 370-375.
- [18] 李保明. 湿垫蒸发降温对上海地区气候条件的适应性[J]. 北京农业工程大学学报, 1990, 10(2): 66-70.  
Li Baoming. Adaptability of an evaporative pad cooling system to climate condition in Shanghai[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1990, 10(2): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- [19] Li Z, Wang H, Zheng W, et al. A tracing method of airborne bacteria transmission across built environments[J]. Building and Environment, 2019(164): 106335.
- [20] 李保明. 鸡舍纵向通风系统设计与应用中的几个问题[J]. 农业工程学报, 1993, 9(增刊 1): 82-85.  
Li Baoming. Discussion on design and application of the tunnel ventilation system for poultry housing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1993, 9(Suppl.): 82-85. (in Chinese with English abstract)
- [21] 韩宽襟, 冯云田. 密闭式鸡舍负压通风系统的气流分布[J]. 北京农业工程大学学报, 1992, 12(3): 46-55.  
Han Kuanjin, Feng Yuntian. Airflow distribution in a confinement poultry house with negative-pressure ventilation system[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering

- University, 1992, 12(3): 46-55 (in Chinese with English abstract)
- [22] 李保明, 周允将, 崔引安. 鸡舍纵向通风的气流组织[J]. 北京农业工程大学学报, 1991, 11(2): 61-66.
- Li Baoming, Zhou Yunjiang, Cui Yin'an. Improving the airflow organization of tunnel ventilation for a chicken house[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1991, 11(2): 61-66 (in Chinese with English abstract)
- [23] Kocaman B, Esenbuga N, Yildiz A, et al. Effect of environmental conditions in poultry houses on the performance of laying hens[J]. International Journal of Poultry Science, 2006, 5(1): 26-30.
- [24] Hui X, Zhu Q, Ni J Q, et al. Effect of cooling pad installation on indoor airflow distribution in a tunnel-ventilated laying-hen house[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 169-177.
- [25] Hui X, Li B, Xin H, et al. New control strategy against temperature sudden-drop in the initial stage of pad cooling process in poultry houses[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 66-73.
- [26] 王阳, 郑炜超, 李绚阳, 等. 西北地区纵墙湿帘山墙排风系统改善蛋鸡舍内热环境[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 202-207.
- Wang Yang, Zheng Weichao, Li Xuanyang, et al. Vertical walls-wetted pad and gable-exhaust-air-ventilation system improving poultry house thermal environment in Northwest region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 202-207. (in Chinese with English abstract)
- [27] Mutaf S, Kahraman N S, Firat M Z. Surface wetting and its effect on body and surface temperatures of domestic laying hens at different thermal conditions[J]. Poultry Science, 2008, 87(12): 2441-2450.
- [28] Chepete H J, Xin H. Cooling laying hens by intermittent partial surface sprinkling[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2000, 43(4): 965-971.
- [29] Timmons M B, Baughman G R. Experimental evaluation of poultry mist-fog systems[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1983, 26(1): 207-210.
- [30] Ikeguchi A. Field evaluation of a sprinkling system for cooling commercial laying hens in Iowa[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(2): 217-224.
- [31] Wang Y, Zheng W, Li B. A new ventilation system to reduce temperature fluctuations in laying hen housing in continental climate[J]. Biosystems Engineering, 2019(181): 52-62.
- [32] Xuan J, Liu G, Du K. Dust emission inventory in Northern China[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(26), 4565-4570.
- [33] Zhenghu D, Honglang X, Zhibao D, et al. Morphological, physical and chemical properties of aeolian sandy soils in northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(1): 66-76.
- [34] Zhao Q, Zeng D H, Lee D K, et al. Effects of pinus sylvestris var. mongolica afforestation on soil phosphorus status of the Keerqin sandy lands in China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 69(4): 569-582.
- [35] Wang Y, Zheng W, Tong Q, et al. Reducing dust deposition and temperature fluctuations in the laying hen houses of Northwest China using a surge chamber[J]. Biosystems Engineering, 2018(175): 206-218.
- [36] Cheng Q, Li H, Li R, et al. Using CFD to assess the influence of ceiling deflector design on airflow distribution in hen house with tunnel ventilation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018(151): 165-174.
- [37] Cheng Q, Wu W, Li H, et al. CFD study of the influence of laying hen geometry, distribution and weight on airflow resistance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018(144): 181-189.
- [38] 潘强, 黄之栋, 张天柱, 等. 蛋鸡高密度叠层笼养工艺的初步研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(5): 86-89.
- Pan Qiang, Huang Zhidong, Zhang Tianzhu, et al. Study on high density stacked-cage-raising system of layer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(5): 86-89. (in Chinese with English abstract)
- [39] 张天柱, 潘强, 黄之栋, 等. 海口地区蛋鸡高密度叠层笼养工艺饲养效果的实验研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(5): 90-95.
- Zhang Tianzhu, Pan Qiang, Huang Zhidong, et al. Feeding effect study on confined high-density stacked-cage laying houses in Haikou[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(5): 90-95. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王建田. 塑料垫网上养肉鸡胸囊肿发病率高[J]. 农业工程学报, 1993(增刊 1): 208-209.
- [41] 赵芙蓉, 李保明, 耿爱莲, 等. 笼底材料、密度和性别组群对肉鸡胸囊肿发生及胸肌成分的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 168-171.
- Zhao Furong, Li Baoming, Geng Ailian, et al. Effects of floor material, stocking density and sex management on breast blister incidence and breast muscle composition of broilers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(12): 168-171. (in Chinese with English abstract)
- [42] 赵芙蓉, 李保明, 施正香, 等. 笼养肉仔鸡生产性能及其胴体品质影响因素的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(14): 112-116.
- Zhao Furong, Li Baoming, Shi Zhengxiang, et al. Effects of



- floor material, stocking density on growth performance and carcass quality of broilers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(14): 112-116. (in Chinese with English abstract)
- [43] Zhao F R, Geng A L, Li B M, et al. Effects of environmental factors on breast blister incidence, growth performance, and some biochemical indexes in broilers[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2009, 18(4): 699-706.
- [44] 李恒, 李腾飞, 王红英, 等. 我国蛋种鸡本交笼养模式应用现状与研究方向[J]. 中国家禽, 2013, 35(4): 3-6.
- [45] 石海鹏. 空间环境与光诱导对本交笼养种鸡社会行为作用规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- Shi Haipeng. Effects of Spatial Environment and Light Induction on Social Behavior of Layer Breeders in Natural Mating Colony Cages[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [46] 张国栋, 李腾飞, 彭飞, 等. 蛋种鸡小阶梯式本交笼养设备养殖成本与收益及其影响因素[J]. 中国家禽, 2015, 37(14): 35-39.
- Zhang Guodong, Li Tengfei, Peng Fei, et al. Breeding cost and economic benefits of the little-step cage-rearing equipment used in laying breeder chicken with natural-service model and its influencing factors[J]. China Poultry, 2015, 37(14): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [47] Shi H, Zheng W, Tu Jiang, et al. Reducing feather pecking and cloacal cannibalism by providing layer breeders with nest boxes in colony cages for natural mating[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 11(6): 27-32.
- [48] Zheng W, Kang R, Wang H, et al. Airborne bacterial reduction by spraying slightly acidic electrolyzed water in a laying-hen house[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2013, 63(10): 1205-1211.
- [49] Zheng W, Zhao Y, Xin H, et al. Concentrations and size distributions of airborne particulate matter and bacteria in an experimental aviary laying-hen chamber[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(6): 1493-1501.
- [50] Zheng W, Li Z, Shah S B, et al. Removal of ammonia and airborne culturable bacteria by proof-of-concept windbreak wall with slightly acidic electrolyzed water spray for a layer breeding house[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 32(3): 393-399.
- [51] Zheng W, Ni L, Hui X, et al. Optimization of slightly acidic electrolyzed water spray for airborne culturable bacteria reduction in animal housing[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 185-191.
- [52] Hao X, Li B, Wang C, et al. Application of slightly acidic electrolyzed water for inactivating microbes in a layer breeding house[J]. Poultry Science, 2013(92): 2560-2566.
- [53] 李保明. 再谈我国工厂化养鸡场的技术改造[J]. 中国家禽, 1994(3): 23-24.
- [54] 谢伟, 明保清. 优质蛋鸡智能化健康养殖技术示范与推广[J]. 现代化农业, 2018(1): 64-64.
- [55] 白士宝, 滕光辉, 杜晓冬, 等. 基于 LabVIEW 平台的蛋鸡舍环境舒适度实时监测系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 237-244.
- Bai Shibao, Teng Guanghui, Du Xiaodong, et al. Design and implementation on real-time monitoring system of laying hens environmental comfort based on LabVIEW[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 237-244. (in Chinese with English abstract)
- [56] 陆晨芳. 基于机器视觉的规模养鸡场死鸡探测系统设计研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- Lu Chenfang. Study on Dead Birds Detection System Based on Machine Vision in Modern Chicken Farm[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [57] 彭彦松. 基于支持向量机的养鸡场死鸡检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- Peng Yansong. Using a Theory Based on Statistical-support Vector Machine (SYM) Algorithm to Detect Dead Chickens[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [58] 陆晨芳, 朱伟兴, 浦雪峰. 养鸡场死鸡探测系统研究初报[J]. 中国家禽, 2008, 30(21): 39-40.
- [59] 李保明, 王朝元, 杨柳. 从欧洲精准畜牧业研讨会看蛋鸡精准养殖技术的研究进展[J]. 中国家禽, 2016, 38(3): 1-4.
- [60] 耿爱莲, 李保明. 蛋鸡笼养福利问题以及蛋鸡养殖模式[J]. 农业工程学报, 2006, 22(14): 121-126.
- Geng Ailian, Li Baoming. Discussion on welfare Problems of caged layer and layer's rearing system in future[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(14): 121-126. (in Chinese with English abstract)
- [61] 杨柳, 李保明. 蛋鸡福利化养殖模式及技术装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 214-221.
- Yang Liu, Li Baoming. Research progress of welfare-oriented breeding mode and technical equipment for laying hen[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 214-221. (in Chinese with English abstract)
- [62] 杨柳, 李保明. 蛋鸡栖架立体散养系统研究的发展趋势与问题[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(3): 1-2.

## Research progress in environmental control key technologies, facilities and equipment for laying hen production in China

Li Baoming, Wang Yang, Zheng Weichao, Tong Qin

(1. *Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China*; 2. *College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*; 3. *Beijing Engineering Research Center for Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Poultry industry is increasing constantly at the level of scale, intensity, and industrialized production in last 40 years. Environmental factors have become much more significant effects on laying hen, due to the high-yielding layer needs much higher requirement for the comfortable thermal environment, while the low adaptability to environmental fluctuating conditions. Maintaining a suitable living environment conditions, such as temperature, relative humidity, CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub>, is essential for the birds to ensure their well-being, efficient utilization of feed, and the maximum productivity. Large fluctuations of air temperature can pose multiple adverse effects on bird health, resulting in considerable losses in egg production. Thus, the key factors, including the uniformity of hygro-thermal parameters, and air quality, can affect poultry health, even to increase the bird mortality. In this study, three main aspects were reviewed: environmental regulation theory, environmental control technology, together with the facilities and equipment of poultry farming. The breakthrough was addressed on the thermal insulation performance of outer building envelope, wet-pad evaporative cooling system, ventilation system, and air distribution theory in closed layer house. (1) The laying hen are usually kept in isolated houses with a well-insulated structure, where the thermoneutral temperature can generally be maintained using sensible heat from the birds. Currently, it is becoming increasingly obvious that the layers houses need more insulation to retain heat in cold climates. In order to reduce heat loads in livestock buildings, the optimization of thermal insulation thicknesses of building envelopes can offer an effective way to ensure thermal comfort environment, while to significantly decrease the energy requirements. (2) The ventilation systems also play an important role in reducing excessive heat, moisture, air pollutants, and airborne pathogens in poultry facilities. Generally, the ventilation system is developed to make the fresh air go through a surge chamber before entering the houses. A new ventilation system was designed to alleviate the variations of air temperature for the uniformity, while reduce dust deposition rates in poultry houses, particularly that located in continental climate regions. The wet-pad evaporative cooling system was summarized in different climate zones, including the control of temperature uniformity, and the air distribution technology of poultry houses. (3) The development and application of current facilities and equipment were addressed for poultry housing system, including high density caged system, natural mating colony cages, even the poultry buildings with a slightly acidic electrolyzed water ionizer. The future development direction was predicted on intelligent livestock management and monitoring platform, intelligent caged dead layer identification devices, as well as the welfare-oriented breeding mode and technical equipment for laying hen. This review can provide a theoretical basis for automatically environmental control of large-scale poultry farming, and thereby to promote the high-quality transformation, for the sustainable development of modern poultry stocking industry.

**Keywords:** layer hen; environment; facility; equipment; ventilation; regulation technology