中国农业大学学报 2024,29(8):169-178
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王琦,刘运颖,杜欣怡,赵婉莹,王朝元,施正香. 寒冷地区奶牛舍建筑形式对牛舍热环境舒适性的影响效果[J]. 中国农业大学学报,2024,29(08):169-178.
WANG Qi, LIU Yunying, DU Xinyi, ZHAO Wanying, WANG Chaoyuan, SHI Zhengxiang. Effect of building forms on the thermal comfort of dairy barns in cold regions[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(08): 169-178.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.14

寒冷地区奶牛舍建筑形式对牛舍热环境舒适性的影响效果

王 琦[1,2] 刘运颖[1,2] 杜欣怡[1,2] 赵婉莹[4] 王朝元[1,2,3] 施正香[1,2,3*]

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083;
2. 农业农村部设施农业工程重点实验室,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;
4. 中国农村技术开发中心,北京 100045)

摘 要 针对目前我国奶牛舍在寒冷地区应用时保温隔热性能不足的问题,采用建筑热工评价和奶牛热应激评估相结合的方法,对寒冷地区开放式和密闭有窗式2种牛舍的围护结构热阻进行测算,对牛舍内夏季的热环境参数进行测试并采用温湿指数和奶牛皮肤温度指数对奶牛的热应激程度进行评估,基于已有研究对牛舍内冬季的热环境进行理论预测,对寒冷地区应用不同建筑形式的奶牛舍的舍内热环境舒适性效果进行研究。结果表明:1)开放式和密闭有窗式牛舍的屋面热阻值基本满足要求,但侧墙热阻值均显著低于该地区要求的墙体低限热阻值;2)在夏季,2种建筑形式的牛舍在寒冷地区均可提供较舒适的舍内热环境,舍内奶牛热应激问题不显著;3)冬季应用时舍内温度均无法满足要求。开放式牛舍应用于我国寒冷地区时无法提供适宜的舍内热环境,建议采用密闭有窗式牛舍,要求其墙体热阻值≥1.137 $m^2 \cdot K/W$,屋面热阻值≥1.459 $m^2 \cdot K/W$。

关键词 建筑形式;热环境;环境舒适性;牛舍

中图分类号 S823 **文章编号** 1007-4333(2024)08-0169-10 **文献标志码** A

Effect of building forms on the thermal comfort of dairy barns in cold regions

WANG Qi[1,2], LIU Yunying[1,2], DU Xinyi[1,2], ZHAO Wanying[4],
WANG Chaoyuan[1,2,3], SHI Zhengxiang[1,2,3*]

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China;
3. Beijing Engineering Research Center on Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China;
4. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China)

Abstract In response to the current problems of insufficient thermal insulation and heat preservation in dairy barns in cold regions of China, this study used a combination of the thermal evaluation of the building and heat stress assessment of the cows. The thermal resistances of the enclosure structure of the open barn and the closed window barn in the cold region were measured. The summer thermal environment conditions in the barns were tested and analyzed. The temperature-humidity index (THI) and the skin temperature index for cows (STIC) were used to assess heat stress of the cows. The predictive calculations of

收稿日期:2024-11-24
基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助(CARS36)
第一作者:王琦(ORCID:0009-0001-2595-1713),博士研究生,E-mail:qiwang@cau.edu.cn
通讯作者:施正香(ORCID:0000-0003-3082-5305),教授,主要从事畜禽养殖工艺与环境研究,E-mail:shizhx@cau.edu.cn

theoretical values for the thermal environment in winter in a barn were carried out based on previous studies. The comfort effect of the thermal environment in dairy barns with different building forms in cold regions was studied. The results showed that the thermal resistance and roof thermal resistance of both open and enclosed windowed barns met the requirements, but the thermal resistance of the side walls was significantly lower than the minimum thermal resistance required for the region. In the summer, both types of barns provided a relatively comfortable thermal environment in the cold region. The heat stress was not a serious problem for cows in the barns. However, in the winter, the indoor temperature in both types of barns did not meet the requirements. This study concluded that the open barn could not provide the suitable thermal environment inside the barn in the cold regions of the country. This study recommends the use of a closed windowed barn, which should have a thermal resistance value ≥1.137 m^2·K/W for the walls and ≥1.459 m^2·K/W for the roof.

Keywords construction forms; thermal environment; environment comfort; barns

寒冷地区奶牛舍的建筑形式和围护结构的保温隔热性能对其舍内热环境舒适性影响极大[1]。本研究团队前期针对北方地区80个大型奶牛场(存栏量500头以上)的牛舍建筑形式进行了调研,其中60%的牛场采用开放式牛舍,40%的牛场采用密闭有窗式牛舍,这与郑万萍等[2]的调研结果基本一致。在牛舍建筑形式的选择方面,密闭有窗式牛舍能够有效形成空气对流,阻挡紫外线的进入,但其造价相对开放式牛舍较高、夏季通风不足及窗户管理不便等问题较为突出[3]。为缓解奶牛热应激,寒冷地区牛舍内多采取风机、喷淋、遮阳网和遮阳棚等措施进行防暑降温,其中大多数泌乳牛舍采用风机或风机+喷淋方式降温[4]。相比于密闭有窗式牛舍,开放式牛舍主要通过设置卷帘等来封闭牛舍,使其形成相对密闭的环境。然而对于高寒地区的牛舍,单层卷帘保温隔热性能不足,只能起到挡风的作用,无法满足奶牛舍围护结构低限热阻的要求[5]。目前对于各种建筑形式的牛舍在寒区的应用效果评价的相关研究较为有限,尚不明晰适用于我国寒冷地区的牛舍建筑形式及其应用效果。

本研究拟以寒冷地区2种典型建筑类型的奶牛舍为研究对象,对其夏季舍内热环境舒适性进行分析,并对冬季舍内热环境进行理论预测及改进,以期为寒冷地区奶牛场的牛舍建筑类型应用评价提供参考,为改进奶牛舍的养殖环境质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计及测试环境

试验于2022-08-14—08-20每日9:00—17:00进行,试验地点位于内蒙古自治区呼伦贝尔市阿荣旗的2个奶牛场,各选取1栋泌乳牛舍,分别为开放式牛舍和密闭有窗式牛舍。试验对牛舍内外环境参数进行采样,包括干球温度、相对湿度和风速。测试牛舍基本情况见表1。

表1 测试牛舍基本情况

Table 1 Basic information of the test barns

建筑形式 Building form	存栏量/头 Number	跨度/m Span	长度/m Length	檐高/m Eave height	脊高/m Roof height	侧墙围护结构 Sidewalls form	舍内风机数量/个 Number of fans
开放式 Open barn	900	36	375	4.5	10.5	矮墙上设卷帘	348
密闭有窗式 Enclosed windowed barn	1 000	32	381	4.2	9.5	矮墙上设推拉窗	232

2栋牛舍的颈枷和卧床处均布置相同型号的扰流风机,风机参数为:风叶直径900 mm,风叶转速600转/min,风量23 000 m^3/h,功率550 W。

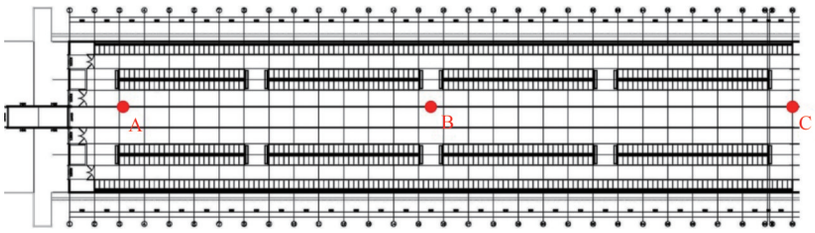
开放式牛舍共348台风机,6列排布,测试期间风机全部开启。

密闭有窗式牛舍共232台风机,4列排布,测试期间风机运行分2种工况:工况1,牛舍西部和东部各运行40台风机;工况2,仅牛舍东部运行40台风机。

1.2　试验测量指标及方法

试验测量指标包括测试牛舍内外的环境温度、相对湿度和风速。

舍外布置1个测点，距离牛舍20 m。舍内试验区域沿牛舍饲喂通道均匀布置3个测点，设置在靠近山墙侧、牛舍1/4处和牛舍中部，分别为A、B、C点（图1）。所有测点均测量环境温度、相对湿度和风速。环境温度和相对湿度采用优利德UT330B温湿度记录仪进行连续自动记录，干球温度测试精度为±0.5 ℃、相对湿度测试精度为±3.0%，记录时间间隔为1 min，仪器布置离地高度2.0 m。风速采用德图Testo 405i热敏风速仪记录，风速测试精度为±0.1 m/s，记录时间间隔为1 h，每次测量并计算10 min内平均值，仪器布置离地高度1.5 m。



A，靠近山墙侧测点；B，牛舍饲喂通道1/4处测点；C，牛舍中部测点。

A, the point closing the gable wall; B, the point locating one-quarter of the barn; C, the point locating half of the barn.

图1　牛舍内试验区域（半舍）仪器布点位置

Fig. 1　The placement positions of instruments in the half barn

1.3　数据处理及评价

依据GB50175—2016《民用建筑热工设计规范》[6]，牛舍围护结构平均热阻值为：

$$R=\sum A_n/\sum\left(A_n/R_n\right) \tag{1}$$

式中：R为围护结构平均热阻，$m^2\cdot K/W$；A_n（n=1，2，…。）为各部分围护结构组件面积，m^2；R_n为各部分围护结构组件热阻，$m^2\cdot K/W$。

热湿环境的改变是导致奶牛发生热应激的主要因素，国内外研究中普遍采用温湿指数（Temperature-humidity index，THI）评价热湿环境并以此预估奶牛遭受热应激的情况[7-8]，计算公式[9]为：

$$\mathrm{THI}=0.8T+(T-14.4)\cdot\mathrm{RH}+46.4 \tag{2}$$

式中：T为干球温度，℃；RH为相对湿度，%。

对于热应激指数的评价和修正已有众多研究，目前最新方法是奶牛皮肤温度指数（Skin temperature index for cows，STIC）模型，该模型更优地考虑了环境温湿度、风速、太阳辐射等的交互影响以进行综合评价，STIC计算公式[10]为：

$$\mathrm{STIC}=\frac{1.73T-(1-\mathrm{RH})\cdot 10^{\frac{7.5T}{237.3+T}}+0.116u^{0.53}(10T-300)+0.05\mathrm{SR}+16.08}{0.116u^{0.53}+1} \tag{3}$$

式中：u为风速，m/s；SR为太阳辐射强度，W/m^2。

本研究中舍内环境数据均在牛舍饲喂通道测量，因此不考虑太阳辐射强度影响。所有试验数据使用SPSS Statistics 22.0软件进行分析，平均值的多重比较采用最小显著差数法，使用Excel 2021软件进行图表绘制。为判断奶牛热应激是否发生及其具体强度等级，本研究的热应激判断标准[11]为：当THI<68或STIC<52时奶牛处于无热应激状态，68≤THI<72或52≤STIC<57时奶牛处于轻度热应激状态，72≤THI<80或57≤STIC<66时奶牛处于中度热应激状态，80≤THI<90或66≤STIC<77时奶牛处于高度热应激状态，90≤THI<99或77≤STIC<87时奶牛处于极高热应激状态，THI≥99或STIC≥87时奶牛处于致死热应激状态。

2　结果与分析

2.1　测试牛舍围护结构热阻

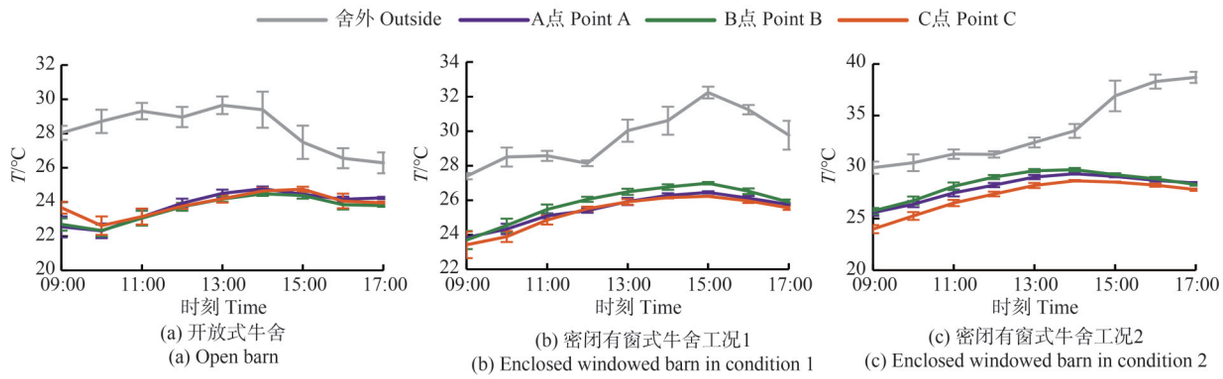
经过现场测算，本研究中开放式牛舍屋面平均热阻值为1.288 $m^2\cdot K/W$，密闭有窗式牛舍屋面平均热阻值为1.952 $m^2\cdot K/W$。在密闭状态下，本研究中开放舍侧墙平均热阻值为0.202 $m^2\cdot K/W$；密闭有窗舍北侧墙平均热阻值为0.770 $m^2\cdot K/W$，南侧墙平均热阻值为0.517 $m^2\cdot K/W$。

2.2　测试牛舍热环境指标参数

开放式牛舍及2种工况密闭有窗式牛舍舍内外

各测点的干球温度、相对湿度和风速测试结果见图2、3、4。

测试期间开放式牛舍外温度为25.5～30.6 ℃，高温环境从13:00持续至14:40，在此外界条件下舍内干球温度为21.9～25.0 ℃，各测点之间无显著差异，舍内温度相比舍外温度平均降低了16%。密闭有窗式牛舍工况1时舍外温度为27.0～33.1 ℃，在此外界条件下舍内干球温度为22.4～27.1 ℃，各测点之间无显著差异，舍内温度相比舍外温度平均降低了14%。密闭有窗式牛舍工况2时舍外温度为29.1～40.0 ℃，在此外界条件下舍内干球温度为23.3～30.0 ℃，各测点之间无显著差异，舍内温度相比舍外温度平均降低了17%（图2）。



图中竖线表示各点数据的误差线，数据为各日同时刻的平均值，误差线为其标准误，下同。

Vertical lines in figure indicate error lines of data at each point. Data are averaged over the same moments of each day and error lines are their standard error. The same below.

图2 开放式牛舍及2种工况密闭有窗式牛舍舍内外干球温度（*T*）

Fig. 2 Dry bulb temperature (*T*) measured inside and outside open barn and enclosed windowed barn in condition 1 and 2

测试期间开放式牛舍外相对湿度为35%～46%，在此外界条件下舍内相对湿度为39%～58%，由牛舍山墙侧至中部逐渐增大。密闭有窗式牛舍工况1时舍外相对湿度为38%～58%，在此外界条件下舍内相对湿度为50%～76%，由牛舍山墙侧至中部逐渐增大。密闭有窗式牛舍工况2时舍外相对湿度为30%～50%，在此外界条件下舍内相对湿度为42%～68%，由牛舍山墙侧至中部逐渐增大（图3）。

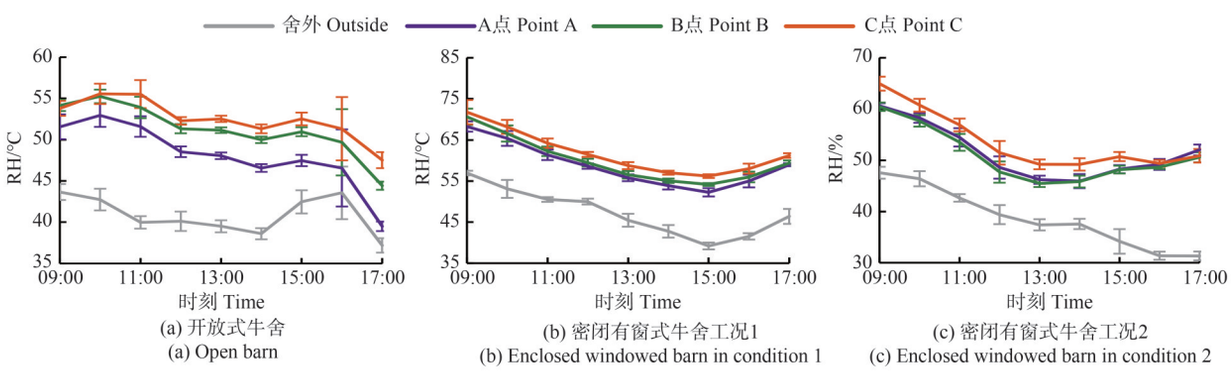


图3 开放式牛舍及2种工况密闭有窗式牛舍舍内外相对湿度（RH）

Fig.3 Relative humidity (RH) measured inside and outside open barn and enclosed windowed barn in condition 1 and 2

测试期间开放式牛舍外风速为0.5～1.3 m/s，在此外界条件下舍内风速为0.6～1.7 m/s，舍外风速对其有显著性影响，舍内靠近山墙侧风速相对较高，风速为0.9～1.7 m/s，舍内靠近中部风速无显著性差异，风速为0.6～1.0 m/s。密闭有窗式牛舍工况1时舍外风速为0.5～1.8 m/s，在此外界条件下舍内风速为0.3～1.6 m/s，舍外风速对其有显著性影响，舍内中部风机开启区域风速相对较高，风速

为1.0～1.6 m/s，未开启区域风速为0.3～0.6 m/s。密闭有窗式牛舍工况2时舍外风速为0.4～1.1 m/s，在此外界条件下舍内风速为0.3～1.7 m/s，舍外风速对其有显著性影响，舍内中部风机开启区域风速相对较高，风速为1.1～1.7 m/s，未开启区域风速为0.3～0.6 m/s（图4）。

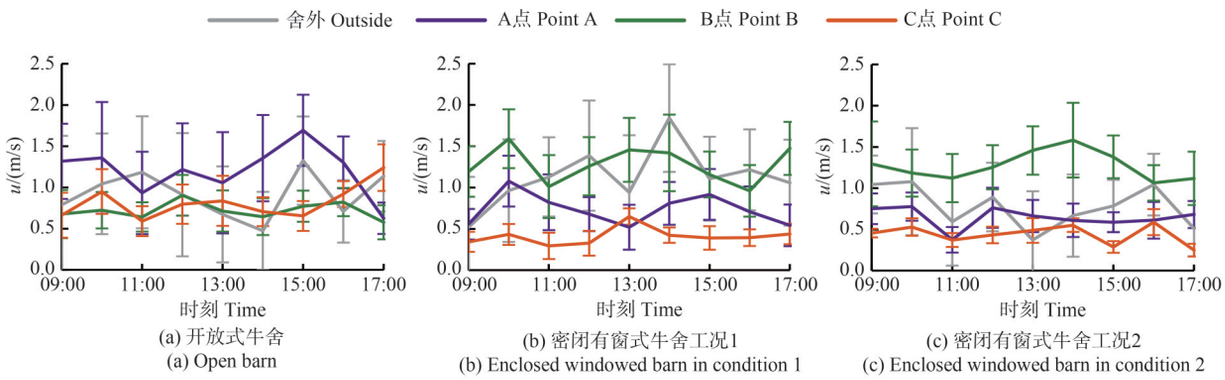


图4　开放式牛舍及2种工况密闭有窗式牛舍舍内外风速（*u*）

Fig.4　Wind speed（*u*）measured inside and outside open barn and enclosed windowed barn in condition 1 and 2

2.3　测试牛舍热环境评价指标情况

依据测试牛舍的干球温度、相对湿度、风速3个指标，计算各时刻开放式牛舍及2种工况下密闭有窗式牛舍舍内外各点位的温湿指数（Temperature-humidity index，THI）和奶牛皮肤温度指数（Skin temperature index for cows，STIC）数值，结果见图5和图6。

测试期间开放式牛舍外THI为72～76，在此外界条件下舍内THI为68～72，各测点之间无显著差异，舍内THI相比舍外THI平均降低了7%。密闭有窗式牛舍工况1时舍外THI为75～79，高温环境从12:50持续至16:30，舍内THI为71～75，各测点之间无显著差异，舍内THI相比舍外THI平均降低了5%。密闭有窗式牛舍工况2时舍外THI为78～85，高温环境从13:00持续至整个下午，舍内THI为72～77，各测点之间无显著差异，舍内THI相比舍外THI平均降低了7%（图5）。

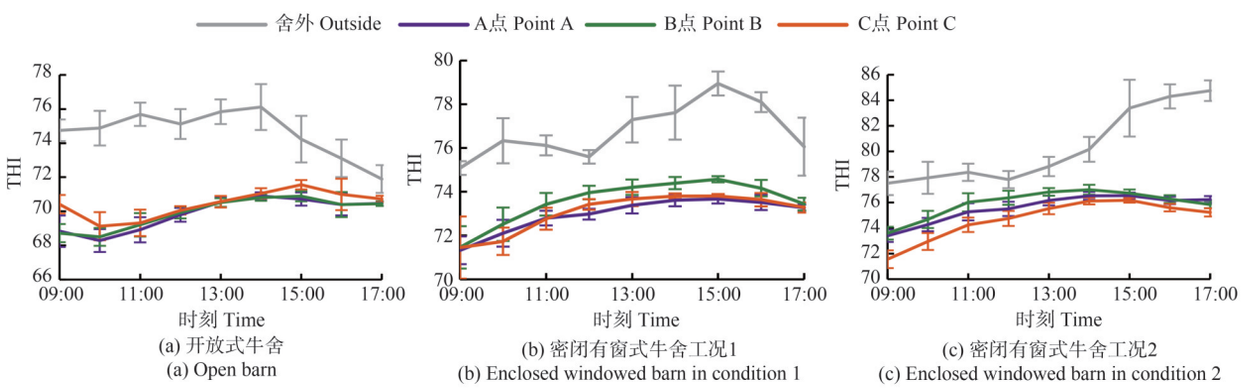


图5　开放式牛舍及2种工况下密闭有窗式牛舍舍内外温湿指数（THI）

Fig. 5　THI calculated inside and outside open barn and enclosed windowed barn in condition 1 and 2

测试期间开放式牛舍外STIC为47～59，在此外界条件下舍内STIC为37～48，各测点之间无显著差异，舍内STIC相比舍外STIC平均降低了19%。密闭有窗式牛舍工况1时舍外STIC为52～62，高温环境从12:50持续至16:30，舍内STIC为42～53，各测点之间无显著差异，舍内STIC相比舍外STIC平均降低了13%。密闭有窗式牛舍工况2时舍外STIC为57～76，高温环境从13:00持续至整个下午，舍内STIC为47～58，各测点之间无显著差异，舍内STIC相比舍外STIC平均降低了17%（图6）。

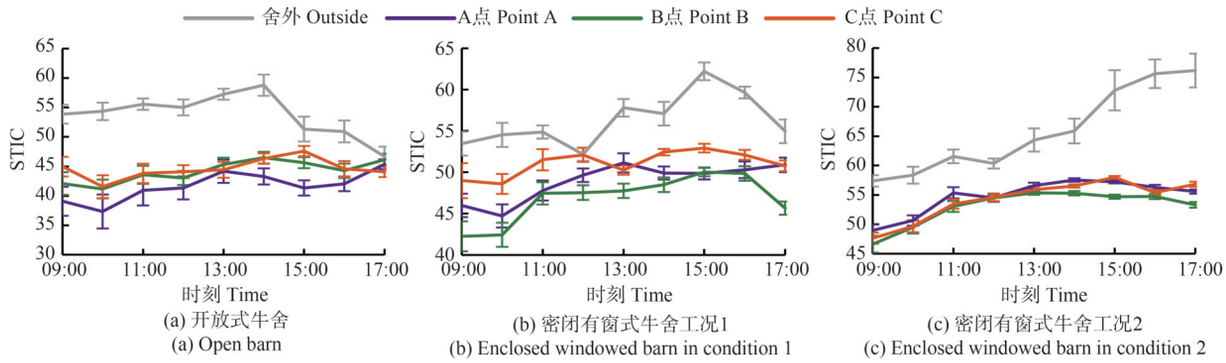


图6 开放式牛舍及2种工况下密闭有窗式牛舍舍内外皮肤温度指数(STIC)

Fig. 6 STIC calculated inside and outside open barn and enclosed windowed barn in condition 1 and 2

3 讨 论

3.1 牛舍围护结构对舍内环境的影响

建筑围护结构的隔热和通风性能对牛舍内热环境有较为直接的影响,然而我国在畜禽舍围护结构的热工设计标准方面仍存在一定的不足。通常情况下,在设计及建造过程中会参考民用建筑标准的推荐值或依靠经验,但缺乏更为科学的应用于奶牛舍的指标。GB50175—2016《民用建筑热工设计规范》[6]提供了根据室内外温差和所允许的温差来计算围护结构最小热阻值的方法。而JGJ26—2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》[12]则针对严寒和寒冷地区的民用建筑,设定了传热系数和保温层热阻值的限制值。虽然存在这些标准,但在畜禽舍围护结构方面仍需要进一步发展和完善相关的设计标准。在此基础上,鲁煜建等[13]对东北地区奶牛舍冬季围护结构墙体和屋面的低限热阻值进行了计算,为该地区牛舍的设计提供了参考依据。同时,牛舍围护结构的热阻值应尽量设计在合理区间内,在节约资源和成本的基础上应满足夏季和冬季低限热阻的要求。根据GB50175—2016《民用建筑热工设计规范》[6],测试牛舍所在地区为寒冷和严寒地区。根据不同围护结构的热惰性指标D值范围为1.6~4.1,确定了冬季室外热工计算温度为−30 ℃。计算结果显示,该地区墙体低限热阻值为1.137 m^2·K/W,屋面低限热阻值为1.459 m^2·K/W。结果表明,本研究测试所涉及的开放式牛舍和密闭有窗式牛舍侧墙热阻均显著低于该地区要求的墙体低限热阻值,开放式牛舍的屋面热阻略低于该地区要求的屋面低限热阻值,而密闭有窗式牛舍的屋面热阻达到了该地区要求的屋面低限热阻值要求。部分围护结构热工性能未符合要求对于2种建筑形式的牛舍在夏季和冬季舍内热环境产生了负面影响。需要注意的是,本研究所述牛舍围护结构热阻值均为对围护结构现场测算后的理论计算值,其与真实值存在差异。相关数据标准的引用文献亦提及此情况,奶牛舍围护结构的低限热阻值仅是控制围护结构内表面不结露的最低标准,实际设计中还需要考虑到围护结构中冷/热桥、衰变等的影响[14],奶牛舍墙体和屋面热阻的理论计算值与真实值存在差异的主要因素是材料老化、受潮和施工质量等[15]。

围护结构的屋顶高度、通风口布局、开口形状与面积以及外界风况等因素[16]均会对牛舍的通风量和热交换量产生影响。对冀北地区不同建筑类型牛舍的调研分析表明[17],奶牛舍的通风结构较少、通风窗面积较小时易导致舍内温湿度较高,不利于奶牛健康,对于夏季炎热地区奶牛舍应设置较高的屋顶高度和较大的通风窗面积。因此也有相关研究探究了通风口与舍内温度的相关控制机制[18]。奶牛舍的屋顶在炎热季节接收到的太阳辐射最多,因此屋顶应注重采用导热系数小的材料,此外还需要考虑屋顶的高度。本研究中,开放式牛舍的屋脊高度为10.5 m,密闭有窗式牛舍的屋脊高度为9.5 m,均为较高的屋面高度,这有利于夏季的通风散热,但同时也增加了冬季保温防寒的难度。目前在进行牛舍设计时,很少有根据奶牛场所在气候区调整屋顶设计高度的做法。在寒冷地区,适当降低屋顶的净高可以减少散热面积,有利于保温效果;而在炎热地区,增加屋顶的净高和围护结构的开口面积则是加强通风和缓解高温影响的有效措施。因此,在设计奶牛舍的屋顶时,需要综合考虑当地的气候条件,选择合适的屋顶高度和开口面积,以实现

舒适的环境条件和适宜的奶牛生长环境。

3.2　牛舍夏季热环境舒适性评价

开放式牛舍夏季白天舍内温湿度、温湿指数（Temperature-humidity index，THI）及奶牛皮肤温度指数（Skin temperature index for cows，STIC）基本处于奶牛生产适宜范围，由 THI 评价舍内奶牛处于无热应激状态到轻度热应激状态，而由 STIC 评价舍内奶牛处于无热应激状态，对于舍内良好热环境的影响因素主要包括满足热工性能要求的屋顶结构及持续运行的舍内风机。该地区夏季平均高温为 27 ℃，一般不会超过 34 ℃。适宜的环境温度条件对于缓解奶牛夏季热应激非常重要。对于开放式牛舍，良好热工性能的屋顶结构可以阻隔大量热量进入舍内，目前大型奶牛场的牛舍多采用彩钢保温夹芯板或单层彩钢板下安装保温隔热板等复合板作为屋顶结构[19]。本研究测试数据结果表明，牛舍内的风速主要受舍外风速和舍内风机影响，该牛舍的山墙端存在门斗，形成局部隧道[20]，导致舍内靠近山墙侧测点处形成了风洞，增强了舍外风速和舍内风机的叠加效应，因此风速相对较高；而舍内中部测点风速相对均匀，处于 0.6～1.0 m/s。在测试时的温湿度环境条件下，多种因素综合构成了舍内相对舒适的热环境。

在密闭有窗式牛舍工况 1 时，夏季白天舍内的温湿度及 THI 略高于奶牛生产适宜范围，STIC 处于奶牛生产适宜范围，由 THI 评价舍内奶牛处于轻度热应激至中度热应激状态，由 STIC 评价舍内奶牛基本处于无热应激状态；工况 2 时，舍内的温湿度及 THI 显著高于奶牛生产适宜范围，STIC 基本高于奶牛生产适宜范围，由 THI 评价舍内奶牛基本处于中度热应激状态，由 STIC 评价舍内奶牛基本处于无热应激至轻度热应激状态，短暂处于中度热应激状态。在应对环境条件负面波动的状况下，舍内环境调控系统的稳定有效运行尤为重要。本研究中，工况 2 时恰逢舍外温度升高，平均温度增长约 4 ℃，平均 THI 增长 2～3，平均 STIC 增长 9～10，此时舍内风机运行数量减少，舍内空气流通及舍内外空气交换效率降低，其综合导致舍内平均温度增长 2～3 ℃，平均 THI 增长 4～5，平均 STIC 增长 6～7，进而导致奶牛更易产生热应激，但相较于工况 1 时 STIC 降幅更大，表明在更热的环境下建筑围护结构所起到的隔热效果更好。测试数据结果表明，牛舍内风速主要受舍外风速和风机影响，风机处在工况 1 时舍内中部风机未开启区域的风速显著低于开启区域的风速，并处于较低水平。在测试时温湿度环境条件下，已不能提供给舍内奶牛足够舒适的热环境条件。目前工况 1 时整舍风机的实际运行比例为 34%，根据目前的测试结果可以推测，当整舍风机实际运行比例达到 100% 时，在该温湿度环境条件下可以为舍内的奶牛提供相对舒适的热环境。

通过上述分析表明，开放式和密闭有窗式 2 种牛舍在使用 2 种热应激指数 THI 和 STIC 进行热环境舒适性评价中，评价结果是有差异的，这主要体现在 STIC 比 THI 更多地考虑了风速等因素的影响。相比于 THI，STIC 能更准确地体现出奶牛的热应激情况并进行评价。测试结果表明，基于 THI 评价的舍内奶牛热应激程度普遍比基于 STIC 评价的热应激程度更严重，这说明仅采用 THI 进行评价易造成牛舍降温系统应用的浪费。从另一个视角讨论，基于 THI 评价的舍内奶牛热应激程度在一定程度上可以视作舍内降温系统应用前的效果，而基于 STIC 评价的舍内奶牛热应激程度相对可以视作舍内降温系统应用后的综合效果，这对于舍内降温系统的应用效果评价具有较好的参考价值。

综上所述，在寒冷地区的夏季，开放式和密闭有窗式牛舍均可为奶牛提供较舒适的热环境，舍内奶牛热应激问题不显著。然而，2 种形式的牛舍都存在一些改进的空间。牛舍的舍内风速偏低，导致牛舍中部更容易出现热滞留的情况，建议调整风机的安装角度，以提高有效风速[21]。和开放式牛舍不同的是，密闭有窗式牛舍山墙侧未设置门斗，这导致靠近山墙位置的风速和舍外风速相近，但缓解奶牛夏季热应激方面，该建筑结构设置并不会产生显著的影响。相较而言，与开放式牛舍相比，密闭有窗式牛舍的舍内干球温度提升了约 8%，舍内外干球温度平均降幅降低了约 13%，舍内相对湿度提升了约 18%，舍内风速降低了约 16%，舍内 THI 提升了约 5%，舍内 STIC 提升了约 18%，舍内外 STIC 平均降幅降低了约 30%。综合评价开放式牛舍在寒冷地区夏季的应用中，舍内温度更低，THI 和 STIC 更低，能更好地为奶牛提供舒适的热环境条件，不过仍需要根据具体情况综合考虑各种因素来选择合适的牛舍形式。

3.3　牛舍冬季保温隔热评价

本研究团队近年来在寒冷地区进行了较多的

牛舍冬季热环境的监测。本研究团队唐玉洁等[22]对吉林省白城市的密闭有窗式奶牛舍的温湿度进行了连续测试，该牛舍屋顶和侧墙材料为100 mm厚聚苯乙烯夹芯彩钢板，侧墙下部为370 mm厚矮墙，结果表明测试期间舍内平均温度为－3.92 ℃，平均相对湿度为85.7%，测试过程中发现了生产过程中存在山墙卷帘门长时间未关闭、围护结构密封不严密等问题。本研究团队吴含萍等[23]对西北地区卷帘牛舍的矮墙进行了研究，结果表明采用1.2 m高的矮墙并添加外保温设计对舍内地面温度有显著提升。本研究团队张琦[24]对黑龙江省齐齐哈尔市的开放式牛舍的温湿度进行了连续监测，该牛舍屋顶为100 mm厚玻璃丝绵夹芯彩钢板，侧墙设置卷帘和砖墙，结果表明测试期间舍内温度保持在－18～－12 ℃，相对湿度基本都在90%以上，测试过程中发现牛舍存在密封性不好导致冷风渗透较为严重的问题。对本研究中测试的2栋牛舍，根据GB50176—2016《民用建筑热工设计规范》[6]，该地区冬季舍外计算温度考虑为－30 ℃。对于开放式牛舍，考虑每日清粪工作共需开门1 h、撒料推料工作共需开门5 h，其余全密闭，经计算冬季舍内的平均温度为－15 ℃。而对于密闭有窗式牛舍，考虑每日撒料推料工作共需开门4 h，开启钟楼南侧1/4数量的窗户，其余全密闭，经计算冬季舍内平均温度为－5 ℃。因此本研究中测试的2栋牛舍冬季舍内温度均无法满足要求，需要进行保温改造。这与曹哲[25]在黑龙江密山市和双城市的测试结果一致：在东北地区，密闭牛舍的建筑形式较为理想，可封闭的开放式牛舍的侧墙传热阻值远低于冬季低限传热阻值，无法满足冬季牛舍舍内温度要求。

本研究所测试的2栋牛舍主要为侧墙保温性能不足的问题。因此针对性地考虑在牛舍侧墙外部搭设钢架，并铺设保温棉毡，通过PE膜进行封闭。针对侧墙保温棉毡的选择，可以采用防水PE编制膜（120 g/m^2）＋珍珠棉（2 mm厚）＋喷胶棉（700 g/m^2）＋防水PE编制膜（120 g/m^2）的组合[24]。在这种情况下，牛舍的南侧墙热阻可以达到1.284 m^2·K/W，北侧墙热阻可以达到1.443 m^2·K/W。以确保侧墙的热阻满足冬季墙体的低限热阻要求，即达到1.137 m^2·K/W。采取该保温措施可以有效提高牛舍侧墙的保温性能，减少能量的损失，提高冬季牛舍内的舒适度。同时这也有助于降低牛舍的能耗，提高能源利用效率。

在寒冷地区冬季的牛舍内，经常出现舍内湿度过大、水汽过饱和和钢架结冰棱等问题，这是未能满足需排出舍内多余水汽的冬季最小通风量所导致的[26]。因此针对性地考虑在舍内饲喂通道上方安装正反转吊扇，推荐使用AWP-73-6大型工业风扇，其风量为13 000 m^3/h，功率为1.5 kW，在冬季通过反转运行以进行除湿，运行频率为40 Hz[27]。风机的布置高度为6 m，每2个风机之间的间隔为30 m。为防止不必要的热量损失，冬季应严格密封南北侧墙的所有洞口、钟楼北侧的洞口以及钟楼南侧的其余洞口。对于本研究所测试的开放式牛舍，应将钟楼南侧卷帘打开1/3；而对于密闭有窗式牛舍，应将钟楼南侧窗户打开1/4。经初步测算得出，开门时因热压、风压造成的热量损失达到了1.8～3.6×10^6 kJ/h，相当于舍内温度下降了4～8 ℃，因此每日进行撒料、堆料、清粪等工作时，场区的员工必须严格遵守随手关门的制度，以避免不必要的热量损失。

3.4 寒区新建牛舍设计需重点解决的问题

基于上述分析本研究认为：寒冷地区应重点考虑冬季的保温要求，建议采用密闭舍建筑形式，牛舍墙体热阻值≥1.137 m^2·K/W，屋面热阻值≥1.459 m^2·K/W；尤其注意侧墙热阻不能过小。为缓解冬季舍内湿度过大的问题，可通过有组织通风的方式，如选择递进式正压送风、风管送风、烟囱风机排风等加以解决。此外，鉴于目前常采用通过TMR车撒料饲喂时频繁开启牛舍门导致的牛舍保温困难的问题，可考虑采用饲料厨房配合传送带进行撒料饲喂。建议牛舍内选择漏缝地板而非实体地面清粪通道，防止地面粪尿积聚和经常性的清粪作业导致的热量损失。

未来牛舍设计应更加重视绿色化和低碳化，选择绿色建材，设计满足要求的牛舍围护结构，减少冗余的能源损耗；通过优化舍内饮水设备、通风设备、照明设备和清粪设备等，提高牛舍的能源综合利用效率；利用牛舍屋面和牛场闲置空间，开源光伏、风能等可再生能源利用路径，积极推动奶牛场向低碳或零碳奶牛场方向发展。

4 结 论

本研究对寒冷地区开放式和密闭有窗式2种建筑形式牛舍的围护结构及应用效果进行了评价并提出建议，得出以下结论：

1)开放式牛舍和密闭有窗式牛舍的屋面热阻基本满足行业标准的要求,但侧墙热阻均显著低于该地区要求的墙体低限热阻值的要求。

2)测试期间,开放式和密闭有窗式牛舍中夏季白天舍内奶牛均基本处于无热应激状态。相比于开放式牛舍,密闭有窗式牛舍内热环境指标数值相对更高。相比于温湿指数,奶牛皮肤温度指数能更准确地体现出奶牛的热应激情况并进行评价。当密闭有窗式牛舍中风机开启更少时,舍内热环境指标数值有一定幅度增长,进而增加奶牛产生热应激的风险。对于奶牛场管理来说,在外部环境不适宜奶牛的生产和健康时,保持舍内环境调控系统的稳定有效运行非常重要。开放式牛舍和密闭有窗式两种建筑形式牛舍在寒冷地区夏季应用均可提供较舒适的舍内热环境,舍内奶牛的热应激较小。

3)在寒冷地区的冬季,开放式牛舍很难保持适宜的舍内温度以满足奶牛的正常需求,因此建议采用密闭有窗式牛舍来提供更好的保温效果,其墙体热阻值≥1.137 m^2·K/W,屋面热阻值≥ 1.459 m^2·K/W。在目前设计理念的基础上,应特别关注牛舍侧墙的设计,加强其保温性能。可以考虑使用高性能保温材料,在侧墙外部设置保温层,以提高侧墙的热阻值。同时需要对舍内进行有组织通风,以保持良好的空气质量。还应严格规范作业流程,减少能耗,避免不必要的热量损失。

参考文献　References

[1] Kavolelis B, Sateikis I. Effective cowshed insulating and ventilation system parameters[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(9): 969-973

[2] 郑万萍, 施正香. 冷热应激区域规模奶牛场建筑设施的调查与分析[J]. 中国奶牛, 2016(4): 53-56
Zheng W P, Shi Z X. Investigation and analysis of constructions and facilities in large-scale dairy farms under cold or hot stress regions[J]. *China Dairy Cattle*, 2016(4): 53-56 (in Chinese)

[3] 王卓铎, 姚辉冉, 何宏寓, 古立然, 杨金波. 华南地区有窗式奶牛舍的应用效果研究[J]. 中国草食动物, 2007, 27(3): 59-61
Wang Z D, Yao H R, He H Y, Gu L R, Yang J B. Study on the application effect of window cowshed in South China[J]. *China Herbivores*, 2007, 27(3): 59-61 (in Chinese)

[4] 周英昊, 毛森, 武震钢, 许翊冉, 于滨, 张久德. 河北省泌乳牛舍建筑结构及其配套设施调查[J]. 中国奶牛, 2019(7): 51-55
Zhou Y H, Mao S, Wu Z G, Xu Y R, Yu B, Zhang J D. Investigation of architecture and ancillary facility of lactating cowshed in Hebei Province[J]. *China Dairy Cattle*, 2019(7): 51-55 (in Chinese)

[5] 冯英, 田真, 高继伟, 曹凯军, 孟洪卫. 散栏式牛舍在南方地区应用的几点体会[J]. 中国奶牛, 2007(12): 44-46
Feng Y, Tian Z, Gao J W, Cao K J, Meng H W. Some experiences in the application of scattered cowshed in Southern China[J]. *China Dairy Cattle*, 2007(12): 44-46 (in Chinese)

[6] GB50175—2016民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017
GB50175—2016 Code for thermal design of civil building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese)

[7] 严格齐, 李浩, 施正香, 王朝元. 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
Yan G Q, Li H, Shi Z X, Wang C Y. Research status and existing problems in establishing cow heat stress indices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 226-233 (in Chinese)

[8] Mader T L, Davis M S, Brown-Brandl T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2006, 84(3): 712-719

[9] Thom E C. The discomfort index[J]. *Weatherwise*, 1959, 12(2): 57-61

[10] Yan G Q, Shi Z X, Cui B, Li H. 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

[11] 严格齐. 高温环境成乳牛换热机制与热应激评价方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2022
Yan G Q. Heat exchange mechanisms and heat stress assessment of lactating cows in hot environments[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022 (in Chinese)

[12] JGJ26—2018严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018
JGJ26—2018 Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese)

[13] 鲁煜建, 王朝元, 赵浩翔, 董礼, 施正香, 李保明. 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
Lu Y J, Wang C Y, Zhao H X, Dong L, Shi Z X, Li B M. Effect of heat stress of dairy cow on its behavior and milk yield in Northeastern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(16): 225-231 (in Chinese)

[14] 曹哲, 施正香, 安欣, 王朝元. 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
Cao Z, Shi Z X, An X, Wang C Y. Evaluation on measure method of heat transfer resistance for enveloped structure of cattle barn based on infrared imaging method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 235-241 (in Chinese)

[15] Seifert J, Li Y G, Axley J, Rösler M. Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(12): 925-947

[16] 丁露雨, 鄂雷, 李奇峰, 姚春霞, 王朝元, 余礼根, 高荣华, 马为红, 郑文刚, 于沁杨. 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
Ding L Y, E L, Li Q F, Yao C X, Wang C Y, Yu L G, Gao R H, Ma W H, Zheng W G, Yu Q Y. Mechanism analysis and airflow rate estimation of natural ventilation in livestock buildings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 189-201 (in Chinese)

[17] 周英昊, 武震钢, 毛森, 王亚男, 冯曼, 张彤, 于滨, 许翊冉, 徐强, 邱殿锐. 冀北不同建筑类型奶牛舍夏季环境质量研究[J]. 畜牧与兽医, 2020, 52(11): 35-41
Zhou Y H, Wu Z G, Mao S, Wang Y N, Feng M, Zhang T, Yu B, Xu Y

R, Xu Q, Qiu D R. Environmental quality of cow houses of different building types in summer in North Hebei Province[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2020, 52(11): 35-41 (in Chinese)

[18] Shen X, Zhang G Q, Wu W T, Bjerg B. Model-based control of natural ventilation in dairy buildings[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 94: 47-57

[19] 仲玉婷, 施正香, 赵婉莹, 王朝元. 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
Zhong Y T, Shi Z X, Zhao W Y, Wang C Y. Preliminary study on the architectural and environment design of low cross profile ventilated barn in cold region[J]. *China Dairy Cattle*, 2019(11): 51-55 (in Chinese)

[20] Goubran S, Qi D H, Saleh W F, Wang L Z. Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 579-590

[21] 邓书辉, 施正香, 范淋佳, 丁涛. 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
Deng S H, Shi Z X, Fan L J, Ding T. Optimization of installation parameters of mixing fans in open dairy cow house based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 269-274 (in Chinese)

[22] 唐玉洁, 施正香, 邓书辉. 寒冷地区奶牛舍冬季温湿度测试与分析[J]. 现代化农业, 2019(7): 62-63
Tang Y J, Shi Z X, Deng S H. Measurement and analysis of winter temperature and humidity in cowshed in cold area [J]. *Modernizing Agriculture*, 2019(7): 62-63 (in Chinese)

[23] 吴含萍, 施正香, 袁小艳. 卷帘牛舍矮墙对舍内清粪通道地面温度影响的数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 151-157
Wu H P, Shi Z X, Yuan X Y. Numerical simulation of curtain barn's low-wall affecting the surface temperature of internal clearance channel[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(6): 151-157 (in Chinese)

[24] 张琦. 高寒地区可封闭开放式牛舍新型保温卷帘系统试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
Zhang Q. Experimental study on the new insulation shutter of the enclosed open-ended cowshed in cold region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)

[25] 曹哲. 围护结构对冬季寒区牛舍环境影响的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018
Cao Z. Study on the influence of envelope structure of dairy barns in cold area for the inner environment in winter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[26] 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:239-246
Ma C W, Miao X W. *Agricultural Bio-environment Engineering*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005:239-246(in Chinese)

[27] 孙乐乐. 严寒地区奶牛舍垂直式通风系统冬季调控方案研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021
Sun L L. Study on winter regulation scheme of vertical ventilation system in cow barns in frigid regions[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春

第一作者简介: 王琦,博士研究生。获中国农业大学2020—2021学年博士生一等学业奖学金、2021—2022学年、2022—2023学年博士生二等学业奖学金。主要研究方向为畜禽养殖工艺优化与环境控制,多次参与牛舍设计与优化改造方案。参与国家现代农业产业技术体系-奶牛(CARS-36)。参与撰写《现代化商品猪场设计案例图集》《模块化装配式畜禽舍建筑图集》等。以学生第1作者身份被授权实用新型专利1项、实质审查发明专利1项、接收受理实用新型专利1项。发表国际学术会议论文1篇,国际学术会议论文摘要1篇。获国际学术会议优秀论文与汇报奖1项。获省部级学科竞赛特等奖1项、一等奖1项。坚持与行业内一线设计企业、养殖生产企业联系,深入沟通交流学习。

通讯作者简介: 施正香,教授,博士生导师。国家奶牛产业技术体系岗位科学家,中国农业工程学会畜牧工程分会副理事长,中国畜牧兽医学会家畜环境卫生学分会副理事长,农业部畜牧业科技(环境)咨询专家组成员。主要研究方向为畜牧工程、畜牧环境、动物福利。主持或参加了国家科技攻关、科技支撑项目、重要技术标准专项、公益性行业(农业)专项、重点研发计划项目等重大课题20余项。获省部级科技进步一等奖4项、二等奖5项。在 *Biosystems Engineering*, *Animals*, *Computers and Electronics in Agriculture*,《农业工程学报》《中国农业大学学报》等国内外学术刊物上发表论文150余篇,出版专著及教材22部,授权发明专利28项、实用新型专利30项,制订国家及行业标准7项。坚持在学术领域不断探索创新,同时长期深入产业一线,开展技术培训和现场指导。