

陈可添, 刘乐, 戴志琦, 等. 低屋面横向通风牛舍夏季恶臭气体分布规律研究 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (5): 35-42.

CHEN K T, LIU L, DAI Z Q, et al. Distribution law of odor in low profile cross ventilated dairy cattle barn in summer [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (5): 35-42.

## 低屋面横向通风牛舍夏季恶臭气体分布规律研究

陈可添, 刘乐, 戴志琦, 李延森, 李春梅\*

(南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 为研究低屋面横向通风 (LPCV) 牛舍内夏季恶臭气体分布规律, 以江苏省淮安市一栋2400头奶牛规模的LPCV牛舍为研究对象, 利用恶臭气体分析仪对LPCV牛舍内臭气浓度单位 (OU) 及主要恶臭气体进行连续定位检测, 探究其时间和空间分布变化规律, 并进一步分析恶臭气体各组分与温度 (T)、相对湿度 (RH)、风速等环境因子间的相关性。结果: LPCV牛舍内检测点9 (风机端饲喂通道中间位点) 的T显著高于舍内其他检测点 ( $P<0.05$ ), RH显著低于舍内其他检测点 ( $P<0.05$ ); 舍内温湿指数 (THI) 变化范围在78~80.5, 各检测点间无明显差异 ( $P>0.05$ ); 检测点8 (风机侧过道近门位点) 风速达到  $(3.17\pm 0.10)$  m/s, 显著高于舍内其他检测点风速 ( $P<0.05$ ); 牛舍各检测点细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 浓度分布无明显差异 ( $P>0.05$ ); OU值在舍内呈差异性分布, 浓度由高到低依次为粪污出口端、风机端、舍中段、湿帘端。牛舍内T、THI自4:00—15:00逐渐升高, 随后逐渐下降, RH与之呈相反趋势; LPCV牛舍内颗粒物浓度基本维持稳定, 舍内风速峰值在16:00, 最低值是4:00和20:00; 舍内OU值在0:00点最低, 在4:00、16:00和20:00最高; 恶臭气体各组分中二甲硫醚 ( $C_2H_6S$ )、二甲二硫醚 ( $C_2H_6S_2$ )、甲硫醇 ( $CH_4S$ ) 及苯乙烯 ( $C_8H_8$ ) 在4:00、12:00和20:00浓度高于0:00、8:00和16:00; 氨气 ( $NH_3$ )、三甲胺 ( $C_3H_9N$ ) 在0:00浓度最高, 0:00—16:00浓度逐渐下降, 20:00浓度上升; 二硫化碳 ( $CS_2$ )、硫化氢 ( $H_2S$ ) 浓度较为稳定。对OU值与牛舍内各环境参数进行斯皮尔曼 (Spearman) 相关性分析, 结果显示, OU值与舍内RH呈显著负相关, 与舍内风速呈显著正相关。结论: LPCV牛舍内检测点1、4、7、8 (粪污出口侧) 恶臭浓度高于其他检测点, 在20:00时OU值及各项组分均处于日浓度较高的时间, 提示后续臭气处理需更加关注此位置/时间的控制。

**关键词:** 低屋面恒向通风牛舍; 恶臭气体; 环境因子; 分布规律

中图分类号: S823.89

文献标志码: A

文章编号: 0529-5130(2025)05-0035-08

## Distribution law of odor in low profile cross ventilated dairy cattle barn in summer

CHEN Ketian, LIU Le, DAI Zhiqi, LI Yansen, LI Chunmei\*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the distribution patterns of odor gases in a low profile cross ventilated (LPCV) dairy cattle barn, accommodating 2400 dairy cows in Huai'an City, Jiangsu Province, during the summer months. The research involved continuous monitoring of odor gas concentrations (odor unit, OU) and key odor substances using an odor gas analyzer to explore the temporal and spatial distribution variations. Additionally, a correlation analysis was carried out between each component of odorous gas and environmental factors, including temperature (T), relative humidity (RH), and wind speed. The results showed that the temperature at detection point 9 (located at the middle of the feeding channel near the fan end) was significantly higher than that at the other detection points within the cowshed ( $P<0.05$ ). Similarly, RH was significantly lower at this point, compared with the others ( $P<0.05$ ). The temperature-humidity index (THI) within the enclosure ranged from 78 to 80.5, with no significant differences observed among the detection points ( $P>0.05$ ). Furthermore, the wind speed at detection point 8 (positioned near the door of the fan side aisle) reached  $(3.17\pm 0.10)$  m/s, significantly exceeding the wind speeds recorded at the other locations ( $P<0.05$ ). The distribution of fine particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) concentrations remained relatively stable across the detection points, with no significant differences ( $P>0.05$ ). The OU values exhibited a differential distribution throughout the cowshed, ranging from the highest at the manure outlet end to the lowest at the wet curtain end. Over the course of the day, T and THI gradually increased from 4:00 to 15:00 before decreasing, whereas RH exhibited an inverse trend. Particulate concentrations

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2025-02-27

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目 (BE2022309); “十四五”重点研发计划项目 (2024YFD200030103)

第一作者: 陈可添, 男, 硕士研究生

\*通信作者: 李春梅, 博士, 教授, 研究方向为畜禽养殖环境控制与智慧生产研究, E-mail: chunmeili@njau.edu.cn.

remained stable, with the peak wind speeds occurring at 16: 00 and the lowest speeds at 4: 00 and 20: 00. The OU values was the lowest at 0: 00 and the highest recorded at 4: 00, 16: 00, and 20: 00. Among the odorous gas components, the concentrations of dimethyl sulfide ( $C_2H_6S$ ), dimethyl disulfide ( $C_2H_6S_2$ ), methyl mercaptan ( $CH_4S$ ), and styrene ( $C_8H_8$ ) were notably higher at 4: 00, 12: 00, and 20: 00, compared with 0: 00, 8: 00, and 16: 00. Additionally, the ammonia ( $NH_3$ ) and trimethylamine ( $C_3H_9N$ ) concentrations peaked at 0: 00, and then gradually declined until 16: 00, before increasing again at 20: 00. The concentrations of carbon disulfide ( $CS_2$ ) and hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) remained relatively stable. A Spearman correlation analysis conducted on the OU values and environmental parameters revealed significant negative correlations with RH and significant positive correlations with wind speed within the cowshed. Based on the above research, it can be seen that the odor concentrations at detection points 1, 4, 7, and 8 in the LPCV cowshed are higher than those at the other detection points. At 20: 00, OU and its components are at a higher daily concentration, which suggests that subsequent odor treatment requires greater attention to the control of this location and the time.

**Keywords:** low profile cross ventilated dairy cattle barn; odor gas; environmental factors; distribution pattern

奶牛生产性能受诸多因素影响, 牛舍环境因素约占其中的 20%~35%<sup>[1-2]</sup>。牛舍是奶牛长期生活的场所, 通常情况下, 牛舍的建造需结合当地气候条件和牧场饲养管理, 减少不良环境刺激对奶牛造成的影响。常见的牛舍类型包括: 开放式、半开放式和封闭式牛舍。开放式牛舍的应用最为广泛, 造价低廉、运行成本低, 但因采用自然通风, 受外界环境影响较大; 封闭式牛舍通常利用机械通风, 可在一定程度上维持舍内环境的稳定。低屋面横向通风 (low profile cross ventilated, LPCV) 牛舍, 常称为恒温牛舍, 是一种具有舍内环境稳定、饲养密度大、规模化效应明显等优点的密闭机械通风牛舍, 早在 2005 年于美国南达科他州推出, 自 2009 年引入我国后得到了越来越多的推广。LPCV 牛舍中所应用的湿帘风机降温系统相对于其他蒸发降温方式, 具有经济、简便、高效、安全的优点<sup>[3-4]</sup>。近年来, LPCV 牛舍因单栋舍的奶牛饲养量大、围护结构面积小、规模化效应明显而受到广泛关注<sup>[5-7]</sup>。

畜禽舍恶臭气体由多种臭味化合物组成, 成分复杂<sup>[8]</sup>。研究表明, 牛舍中恶臭气体主要来源于舍内粪尿、垫料和饲料残渣等经微生物作用分解产生<sup>[9-10]</sup>。此外, 奶牛胃肠道内未消化分解的饲料经体内发酵后也会产生恶臭气体<sup>[11]</sup>。DB 31/1098—2018《畜禽养殖业污染物排放标准》规定新建畜禽养殖场臭气浓度单位 (OU) 排放限值为 20, 奶牛长期处于 OU 值超标的环境中, 会导致健康水平降低, 对疫病易感性增加, 生产水平下降。长期接触这些气体会给人体造成呼吸道刺激、过敏、哮喘、易怒、紧张、焦虑、慢性头痛、恶心、对传染病的易感性增加等诸多问题<sup>[12-14]</sup>。因此, 畜禽生产过程产生的恶臭气体需

严格控制。了解牛舍恶臭气体的变化规律对养牛业的可持续发展和健康养殖有着重要意义, 基于此, 本文以江苏省淮安市某牧业公司一栋 2 400 头规模、12 列式 LPCV 牛舍为研究对象, 探究牛舍内 OU 值及其各组分的时间和空间分布变化规律, 并进一步分析恶臭气体及各组分与舍内环境因子间的相关性, 为全面了解牛舍恶臭气体排放的规律以及对恶臭气体减排和控制提供参考。

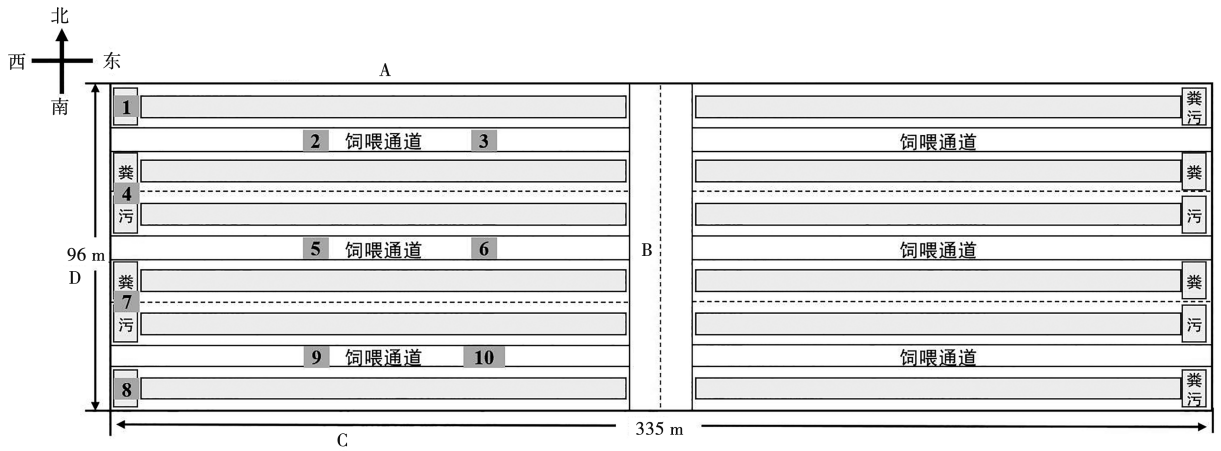
## 1 材料与方法

### 1.1 试验奶牛舍情况

试验在江苏省淮安市洪泽区某牧业公司进行, LPCV 牛舍长 335 m, 宽 96 m, 高 12.1 m, 面积 32 160 m<sup>2</sup>, 呈东西走向, 牛舍内部构造平面图如图 1 所示。舍内横向方向是平行的 3 列饲喂通道, 纵向方向中央是一条通往奶厅的通道。牛舍南面共安装 274 台风机, 北面为湿帘端。试验牛舍的饲喂通道处的大门为自动卷帘门, 在作业车来往、人员出入时会短暂开启, 其他时间持续关闭。

### 1.2 日常管理

检测期间, 试验牛舍日常管理模式基本一致。每日饲喂全混合日粮 4 次, 挤奶 3 次, 散栏式饲养, 双列头对头式卧床, 垫料为锯木屑和垫料化干牛粪。清粪工艺采用全自动刮粪机, 24 h 运行, 单趟约 42~46 min。栏舍内奶牛饮水区、卧床残留粪污以及粪污出口处残留粪便每天由工人进行清理。LPCV 牛舍因舍内横向方向平行的 3 列饲喂通道和纵向方向中央的奶厅通道分为 6 行 2 列式饲养栏, 全舍合计 12 个栏舍, 每个栏舍饲养约 220 头泌乳阶段荷斯坦奶牛, 具体牛群数目见表 1。



1~10. 检测位点; A. 湿帘端; B. 奶厅通道; C. 风机端; D. 自动卷帘门。

图1 LPCV牛舍内部构造平面图以及环境指标的检测位置点

表1 LPCV牛舍各栏牛群组成

名称	设计容量/头	实际容量/头	平均月龄
泌乳 1-1	220	83	33.83
泌乳 1-2	220	164	30.70
泌乳 1-3	220	214	30.41
泌乳 1-4	220	213	30.42
泌乳 1-5	220	176	22.48
泌乳 1-6	220	247	31.42
泌乳 1-7	220	215	33.37
泌乳 1-8	220	219	32.92
泌乳 1-9	220	207	20.97
泌乳 1-10	220	248	32.06
泌乳 1-11	220	216	29.69
泌乳 1-12	220	210	34.18
合计	2 640	2 412	30.20

### 1.3 仪器与设备

LPCV牛舍内温湿度采用精创温湿度自动记录仪(RC-4HC,江苏省精创电器股份有限公司)进行连续监测,每10 min记录一次温度(T)和相对湿度(RH)数据,测量范围分别为-30~60℃,0~99%,相对误差分别为±0.5℃和±3%。风速检测采用便携式风速仪[Testo 425,德图仪器国际贸易(上海)有限公司],测量范围0~10 m/s,相对误差±0.1 m/s。细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)浓度使用DYLOS空气质量检测仪测量(DC1700,苏州贝昂智能科技股份有限公司),测量范围0.5 μm及以上的颗粒物数量。OU、氨气(NH<sub>3</sub>)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)、二硫化碳(CS<sub>2</sub>)、甲硫醇(CH<sub>4</sub>S)、苯乙烯(C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)、三甲胺(C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N)、二甲二硫醚(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S<sub>2</sub>)和二甲硫醚(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S)采用恶臭气体分析仪测量(TD600-SH-B-M9,北京天地首和科技发展有限公司),测量范围分别是0~5 000

mg·m<sup>-3</sup>和0~50 mg·m<sup>-3</sup>,相对误差≤±2%。

### 1.4 试验设计

试验期间,于每日0:00、4:00、8:00、12:00、16:00、20:00测定试验牛舍内(10个采样点均匀分布)的环境因素:T、RH、风速,PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub>浓度,OU值以及NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、CS<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>S、C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S浓度。牛舍智能温控系统的传感器位于挡风板下端,基于此,将温湿度计安置在传感器下方位置,此处距地面2.4 m;成年荷斯坦泌乳奶牛平均体高为1.35 m,工作人员呼吸高度基本在1.55 m,考虑牛群与工作人员呼吸高度,将其他环境因素检测高度定为距离地面1.5 m。T、RH每10 min得到一次数据,其他环境因素每次检测时在各检测点稳定记录数据6 min。连续测定8 d,所有环境参数取测定的平均值。

温湿度指数(THI),是综合温度与相对湿度评价热环境的指标,可作为奶牛热应激程度的表征值<sup>[15-16]</sup>。THI计算公式<sup>[17]</sup>:

$$THI = (1.8T + 32) - (0.55 - 0.0055RH) \times (1.8T - 26)$$

### 1.5 数据统计与分析

原始数据采用Excel进行初步整理,再用IBM SPSS Statistics 27.0软件进行统计分析,使用GraphPad Prism 8.0.2软件进行结果绘图。采用ANOVA分析牛舍监测数据差异性,利用斯皮尔曼(Spearman)相关性分析方法分析不同检测位点不同环境参数之间的相关性。 $P < 0.05$ 表示差异显著,结果以“平均值±标准误”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 LPCV牛舍内温热环境分析

如表2所示,对检测期间内所有时间各检测点的

T、RH 及 THI 数据进行总体分析后发现, LPCV 牛舍内, 检测点 9 的 T 显著高于舍内其他位点 ( $P < 0.05$ ); 检测点 9 的 RH 最低, 显著低于舍内其他位置 ( $P < 0.05$ ), 其次是检测点 4。LPCV 牛舍内奶牛 THI 指数无明显差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 LPCV 牛舍内不同检测点 T、RH 和 THI 的变化

测试点	T/°C	RH/%	THI
1	26.0±1.5 <sup>e</sup>	92.3±1.4 <sup>abc</sup>	77.7±2.5
2	25.9±1.5 <sup>e</sup>	93.6±0.5 <sup>ab</sup>	77.9±2.6
3	26.3±1.4 <sup>bc</sup>	93.2±0.7 <sup>abc</sup>	78.6±2.5
4	27.2±1.5 <sup>bc</sup>	85.8±2.4 <sup>e</sup>	79.2±2.4
5	25.9±1.4 <sup>e</sup>	94.0±0.8 <sup>a</sup>	78.0±2.4
6	26.2±1.4 <sup>bc</sup>	89.4±0.7 <sup>ede</sup>	78.0±2.4
7	27.1±1.4 <sup>bc</sup>	89.8±1.2 <sup>bcd</sup>	79.5±2.3
8	27.9±1.4 <sup>ab</sup>	86.8±2.2 <sup>de</sup>	80.4±2.3
9	29.0±1.6 <sup>a</sup>	59.9±9.6 <sup>f</sup>	78.5±3.0
10	26.6±1.4 <sup>bc</sup>	90.4±0.5 <sup>abcd</sup>	78.7±2.4

注: 同列数据肩标不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 字母相同表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。下同。

如图 2 所示, 检测期间, LPCV 牛舍内 T 和 THI 指数从凌晨 4:00 开始, 至 16:00 期间逐渐升高, 随后持续下降; 舍内 RH 由 5:00 ~ 15:00 期间逐渐下降, 之后持续上升。

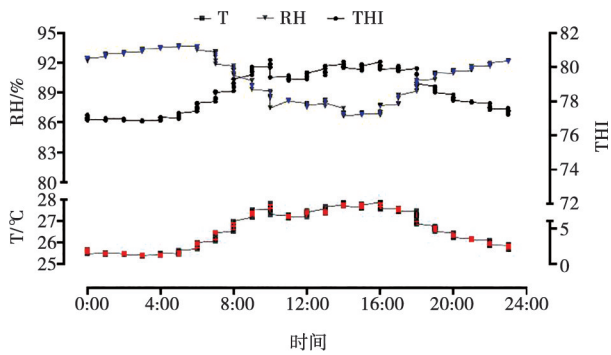
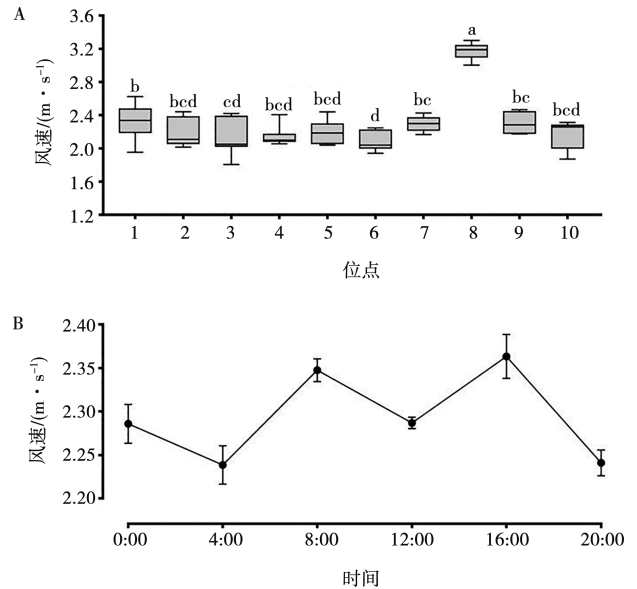


图 2 LPCV 牛舍内不同检测时间的 T、RH 和 THI 变化

## 2.2 LPCV 牛舍内空气环境分析

如图 3 所示, 在检测期间内, LPCV 牛舍内检测点 8 的风速达到 ( $3.17 \pm 0.10$ ) m/s, 显著大于舍内其他位点 ( $P < 0.05$ ), 舍内其他检测点风速值位于 2~2.4 m/s; 从时间上看, 风速日变化在 2.2~2.4 m/s, 其中峰值出现在下午 16:00。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 字母相同表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。下同。

图 3 LPCV 牛舍内不同检测点 (A) 和时间 (B) 的风速变化

不同检测点  $\text{CO}_2$  浓度和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度结果如图 4 所示,  $\text{CO}_2$  浓度呈阶梯式上升, 差异显著 ( $P < 0.05$ ); 舍内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度无明显差异 ( $P > 0.05$ )。由不同检测时间  $\text{CO}_2$  浓度和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度结果可知,  $\text{CO}_2$  浓度日变化呈上午 8:00 最高, 其他时间较为稳定, 而舍内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度由凌晨 4:00 至下午 16:00 呈现下降, 再逐渐上升。

## 2.3 LPCV 牛舍内恶臭气体浓度分析

如图 5 所示, 舍内不同检测点 OU 值差异较大, 从大到小依次是检测点 7、8, 检测点 4, 检测点 1, 检测点 9、10, 检测点 5、6, 检测点 2、3 值最小, 其分布呈差异性 ( $P < 0.05$ )。OU 值在不同检测时间波动的分析结果可知, 0:00 最低, 4:00、16:00 和 20:00 最高。

## 2.4 LPCV 牛舍内恶臭气体有机化合物组分浓度分析

由表 3 可知,  $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$  在检测点 10 浓度最高, 随后是检测点 8、7、1, 检测点 9、6, 检测点 5, 检测点 4、2、3 浓度最低;  $\text{C}_8\text{H}_8$  在检测点 7 浓度最高, 其次是检测点 8、4, 检测点 1、5、9、10, 检测点 2 浓度最低, 分布呈差异性 ( $P < 0.05$ )。此外, 舍内  $\text{CH}_4\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2$  和  $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$  浓度空间分布基本一致, 浓度最高处依次为检测点 7、4、8, 3 处浓度分布呈差异性分布, 均明显高于舍内其他检测点 ( $P < 0.05$ )。

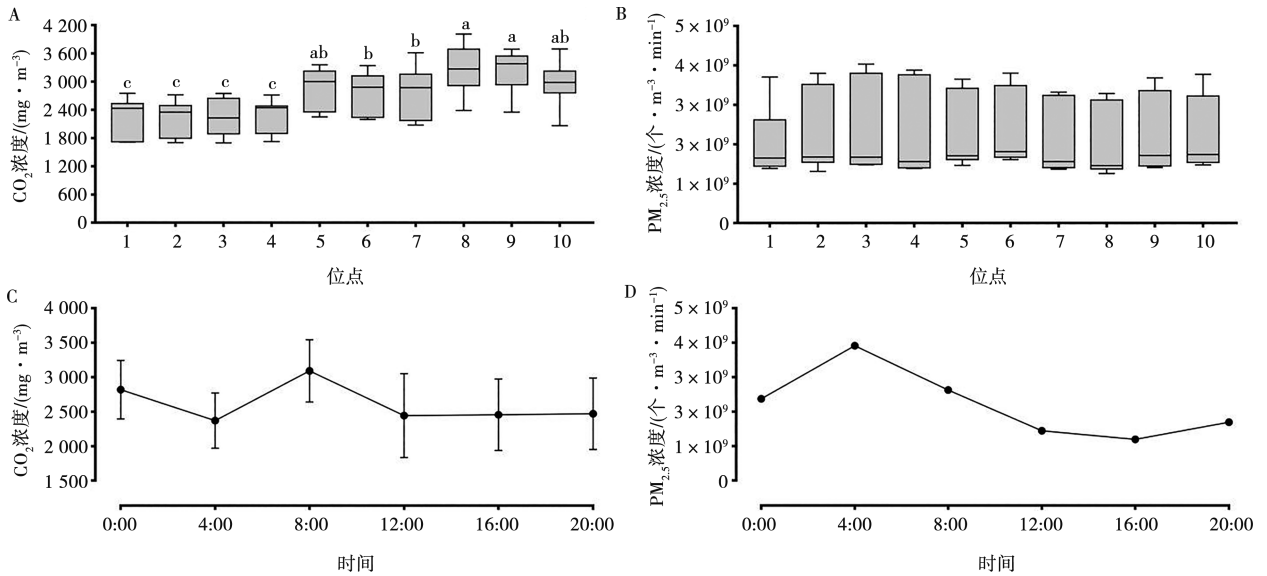


图4 LPCV牛舍内不同检测点(A、B)和时间(C、D)的CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>浓度变化

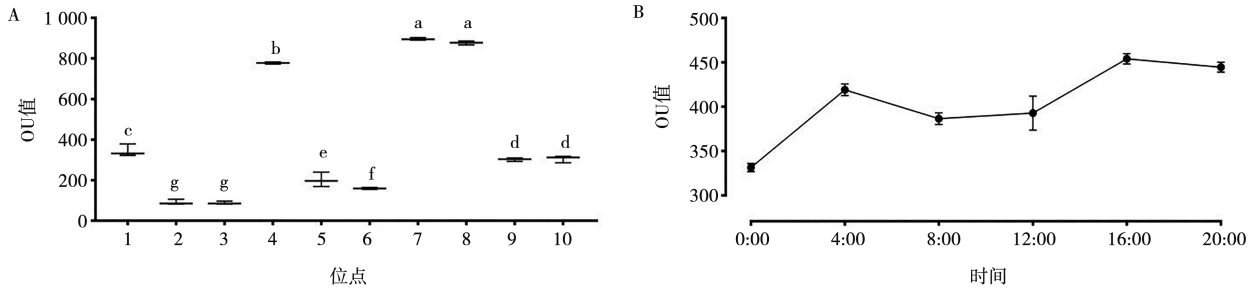


图5 LPCV牛舍内不同检测点(A)和时间(B)OU值的变化

表3 LPCV牛舍内不同检测点恶臭气体有机化合物组分浓度变化

测试点	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>4</sub> S	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S
1	1.586±0.448 <sup>b</sup>	1.987±0.228 <sup>c</sup>	0.270±0.041 <sup>d</sup>	0.764±0.150 <sup>d</sup>	1.351±0.099 <sup>d</sup>
2	0.336±0.121 <sup>ef</sup>	0.206±0.072 <sup>c</sup>	0.012±0.003 <sup>e</sup>	0.106±0.026 <sup>f</sup>	0.165±0.01 <sup>gh</sup>
3	0.071±0.006 <sup>f</sup>	0.313±0.134 <sup>e</sup>	0.0004±0.0005 <sup>e</sup>	0.257±0.048 <sup>ef</sup>	0.031±0.005 <sup>b</sup>
4	0.542±0.051 <sup>cd</sup>	7.266±0.252 <sup>b</sup>	2.598±0.176 <sup>b</sup>	4.931±0.390 <sup>b</sup>	6.384±0.170 <sup>b</sup>
5	0.795±0.048 <sup>d</sup>	1.212±0.258 <sup>d</sup>	0.116±0.025 <sup>de</sup>	0.587±0.162 <sup>de</sup>	0.779±0.042 <sup>e</sup>
6	1.077±0.125 <sup>c</sup>	0.538±0.043 <sup>e</sup>	0.005±0.002 <sup>e</sup>	0.334±0.043 <sup>ef</sup>	0.077±0.021 <sup>gh</sup>
7	1.524±0.090 <sup>b</sup>	7.860±0.105 <sup>a</sup>	2.845±0.197 <sup>a</sup>	5.758±0.335 <sup>a</sup>	7.440±0.164 <sup>a</sup>
8	1.639±0.017 <sup>b</sup>	7.280±0.398 <sup>b</sup>	1.643±0.161 <sup>c</sup>	3.771±0.312 <sup>c</sup>	5.967±0.417 <sup>c</sup>
9	1.204±0.029 <sup>c</sup>	1.150±0.126 <sup>d</sup>	0.049±0.008 <sup>e</sup>	0.612±0.190 <sup>de</sup>	0.579±0.016 <sup>ef</sup>
10	2.025±0.083 <sup>a</sup>	1.494±0.135 <sup>d</sup>	0.030±0.003 <sup>e</sup>	0.800±0.044 <sup>d</sup>	0.335±0.035 <sup>fg</sup>

mg·m<sup>-3</sup>

由图6可知, CH<sub>4</sub>S和C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S浓度日变化呈波浪状, 在4:00、12:00和20:00较0:00、8:00和16:00更高。C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S<sub>2</sub>浓度在4:00—8:00下降, 之后的8:00—16:00持续上升, 随后再逐渐上升。C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>N由0:00开始下降, 至16:00达到最低浓度

后上升至20:00; C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>浓度在4:00和16:00最高, 在0:00浓度最低。

### 2.5 LPCV牛舍内恶臭气体无机化合物组分浓度分析

由表4可知, NH<sub>3</sub>在检测点10浓度最高, 随后

是检测点 8、7、1, 检测点 9、6, 检测点 5, 检测点 4、2、3 浓度最低, 分布呈差异性 ( $P<0.05$ )。检测点 7 的  $H_2S$  浓度最高, 其次是检测点 4、8、3 处位置的  $H_2S$  浓度均显著高于其他检测点 ( $P<0.05$ )。舍内  $CS_2$  浓度由高到低分别是检测点 7、8, 检测点 9、10, 检测点 5 和检测点 4, 在检测点 1、2、3 浓度最低, 分布呈差异性 ( $P<0.05$ )。

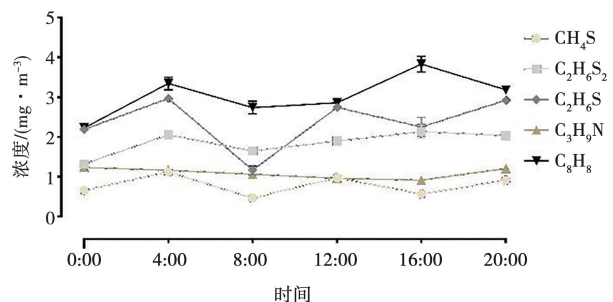


图 6 LPCV 牛舍内不同检测时间恶臭气体有机化合物组分浓度变化

表 4 LPCV 牛舍内不同检测点恶臭气体无机化合物组分浓度变化规律  $mg \cdot m^{-3}$

测试点	$NH_3$	$H_2S$	$CS_2$
1	0.456±0.127 <sup>b</sup>	0.071±0.015 <sup>c</sup>	0.050±0.008 <sup>c</sup>
2	0.105±0.026 <sup>e</sup>	0.004±0.0006 <sup>d</sup>	0.054±0.004 <sup>e</sup>
3	0.021±0.003 <sup>f</sup>	0.0001±0.0002 <sup>d</sup>	0.074±0.006 <sup>e</sup>
4	0.182±0.010 <sup>de</sup>	0.702±0.065 <sup>b</sup>	0.421±0.023 <sup>c</sup>
5	0.228±0.014 <sup>d</sup>	0.035±0.007 <sup>cd</sup>	0.240±0.010 <sup>d</sup>
6	0.316±0.032 <sup>c</sup>	0.0003±0.0003 <sup>d</sup>	0.253±0.028 <sup>d</sup>
7	0.445±0.027 <sup>b</sup>	0.777±0.029 <sup>a</sup>	0.610±0.026 <sup>a</sup>
8	0.465±0.020 <sup>b</sup>	0.456±0.034 <sup>b</sup>	0.587±0.007 <sup>a</sup>
9	0.359±0.017 <sup>c</sup>	0.012±0.003 <sup>d</sup>	0.461±0.008 <sup>b</sup>
10	0.589±0.034 <sup>a</sup>	0.006±0.002 <sup>d</sup>	0.450±0.004 <sup>b</sup>

由图 7 可知,  $H_2S$  浓度在 4: 00、12: 00 和 20: 00 较 0: 00、8: 00 和 16: 00 更高, 浓度分布呈波浪状。 $CS_2$  浓度在 4: 00 和 8: 00 高于其他时间, 其他时刻浓度波动较小;  $NH_3$  浓度全天基本稳定不变。

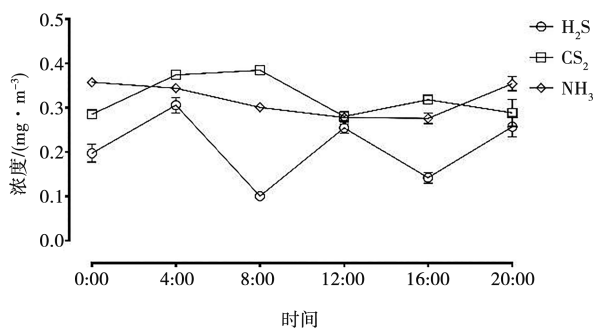


图 7 LPCV 牛舍内不同检测时间恶臭气体无机化合物组分浓度的变化

## 2.6 Spearman 相关性分析

对 LPCV 牛舍内环境因子 (T、RH、THI、风速、 $PM_{2.5}$  浓度和  $CO_2$  浓度) 及 OU 值、恶臭气体各组分浓度进行相关性分析。由表 5 可知, 舍内 T、THI、 $PM_{2.5}$  浓度与 OU 值及恶臭气体各组分浓度间无显著相关性 ( $P>0.05$ ), RH 与 OU 值及恶臭气体各组分浓度间存在显著负相关 ( $P<0.01$ )。舍内风速与 OU 值及  $NH_3$ 、 $CH_4S$ 、 $C_3H_9N$  和  $C_2H_6S_2$  浓度间存在显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与  $H_2S$ 、 $CS_2$ 、 $C_8H_8$  和  $C_2H_6S$  浓度间存在明显正相关 ( $P<0.05$ )。舍内  $CO_2$  浓度与 OU 值及  $NH_3$ 、 $CS_2$ 、 $C_8H_8$  和  $C_3H_9N$  浓度间存在极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与  $H_2S$ 、 $CH_4S$ 、 $C_2H_6S_2$  浓度间存在明显正相关 ( $P<0.05$ )。

表 5 LPCV 牛舍内环境因子相关性分析

环境因子	T	RH	THI	风速	$PM_{2.5}$ 浓度	$CO_2$ 浓度
OU 值	0.196	-0.518 **	0.157	0.396 **	-0.103	0.353 **
$NH_3$ 浓度	0.136	-0.349 **	0.068	0.335 **	-0.129	0.331 **
$H_2S$ 浓度	0.180	-0.369 **	0.145	0.286 *	-0.099	0.242 *
$CS_2$ 浓度	0.134	-0.587 **	-0.019	0.283 *	0.139	0.658 **
$CH_4S$ 浓度	0.191	-0.438 **	0.165	0.326 **	-0.103	0.265 *
$C_8H_8$ 浓度	0.089	-0.376 **	0.092	0.277 *	0.079	0.374 **
$C_3H_9N$ 浓度	0.112	-0.332 **	0.043	0.338 **	-0.114	0.356 **
$C_2H_6S_2$ 浓度	0.147	-0.460 **	0.169	0.310 **	-0.101	0.255 *
$C_2H_6S$ 浓度	0.176	-0.376 **	0.118	0.277 *	-0.035	0.308 **

注: \* 表示 99% 的置信水平下显著, 且 \* 表示  $P<0.05$ , \*\* 表示  $P<0.01$ 。

### 3 讨论

夏季高温高湿引起的奶牛热应激一直是制约中国奶业发展的难题。奶牛作为一种耐寒怕热的动物，一旦发生热应激，其采食量、生长、饲料转化率、生产性能、繁殖性能、产奶量和乳品质等均受影响<sup>[18-19]</sup>。准确获取奶牛热应激信息是调整牛舍环境的关键步骤。奶牛热应激水平最常用的指标是 THI。研究表明，荷斯坦奶牛的最佳环境温度在 0~24 °C 之间<sup>[20]</sup>；当环境温度超过 25 °C 且 THI 大于 68 时，奶牛将出现热应激<sup>[21]</sup>；当 THI 超过 72 时，奶牛将进入轻度热应激状态<sup>[22]</sup>。在本研究中，除检测点 9 外，温度高于 27 °C 的有检测点 4、7、8，这可能是因为检测点 4、7、8 临近舍西墙侧面，受阳光照射影响导致，而检测点 1 虽同位于西墙侧面，但同时处于湿帘进风端，所以温度影响不大。舍内平均 RH 除检测点 9 为 59.9% 外，其他检测点 RH 均处于 86.8%~94%，日变化夜间最高达到 94% 左右，最低值在下午 16:00 仍处于 86% 左右。而有关研究表明，奶牛舒适区相对湿度在 50%~70% 的环境<sup>[23]</sup>。结合舍内 THI 均值在 80 左右的结果表明，试验牛舍在检查期间为高湿度环境条件，易使奶牛进入轻度热应激状态。

在理想状态下，LPCV 牛舍需通过通风系统持续引入新鲜空气，在奶牛的休息区创造快速流动的空气来达到夏季降温效果<sup>[24]</sup>。设计通风系统通常包括进风口、出风口和舍内导流板等设置，设计不合理易导致两侧风速高、中部风速低或通风死角等问题<sup>[25]</sup>。在本研究中，试验牛舍除检测点 8 的风速达到 3.17 m/s 外，其他检测点风速均处于 2.08~2.33 m/s 左右；风速在日变化中，波动于 2.20~2.40 m/s 间，控制较为稳定。检测位点 8 风速明显大于其他检测点，可能是因为此处靠近牛舍风机出口一侧，在密闭牛舍中此处风压较大，风机端饲喂通道的卷帘门易走风。为提高奶牛的舒适性，LPCV 牛舍门的数量应尽量减少，同时生产过程中减少牛舍开门频率和开门时长。灰尘或颗粒物是空气中极小颗粒和液滴的复杂混合物<sup>[26]</sup>。畜禽养殖舍内的粉尘主要源于饲料、干粪以及动物自身皮肤、毛发、羽毛等部位<sup>[27]</sup>。在牛舍颗粒物浓度变化规律上，多数测量结果显示颗粒物浓度日变化总体呈白天高，夜间低，白天波动较大，夜间平稳的特征，峰值的出现和波动总体上受到奶牛活动量和管理措施等因素的影响<sup>[28-29]</sup>。与以上结论不同的是，本试验结果显示 PM<sub>2.5</sub> 浓度凌晨 4:00 最高，下午 16:00 最低，呈现夜间高，白天低，夜间波动较大，白天反而更平稳的特征。而这与 Zhao 等<sup>[30]</sup> 结果类似。这可能是由于试验牛场工人轮岗，24 h 持续

终校

运行，不同时间上、空间上奶牛活动量、场区管理模式一致致使不同区域的颗粒物浓度相近。

牛舍内有很多种臭味化合物，这些物质严重影响周边的大气环境。按照国家标准 GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[31]</sup> 规定的环境空气功能区分级和 GB 14554—1993《恶臭污染物排放标准》<sup>[32]</sup> 推荐的标准，牛舍内  $OU \leq 20$ ， $NH_3 \leq 1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $H_2S \leq 0.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $CS_2 \leq 3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $CH_4S \leq 0.007 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $C_8H_8 \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $C_3H_9N \leq 0.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $C_2H_6S_2 \leq 0.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $C_2H_6S \leq 0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。臭气浓度 OU 值这一指标用于限制复合恶臭物质的气味浓度<sup>[33]</sup>。在本研究中，试验牛舍内 OU 值大于上述标准，且存在较大的差异，整体呈现从湿帘端饲喂通道（检测点 2、3）、舍中间饲喂通道（检测点 5、6）、风机端饲喂通道（检测点 9、10）显著上升，粪污出口侧（检测点 1、检测点 4、检测点 7、检测点 8）高于舍内其他检测点。以上分布规律中，湿帘端、舍中间段和风机端浓度依次增加可能是因为舍内气流主要是从上风口流向下风口。当空气被风扇吸入或自然通风时，上风口的臭气会被迅速稀释并带走，导致臭气浓度在上风口降低，而在风速较低或气流停滞的下风口，臭气可能会积聚，因此浓度较高。而粪污出口侧是舍内恶臭气体主要产生源之一，导致此处臭气浓度易积存。舍内恶臭气体 8 项组分所呈现的位置分布规律与 OU 值类似，部分组分  $CH_4S$ 、 $C_2H_6S$ 、 $C_2H_6S_2$ 、 $H_2S$ 、 $CS_2$  浓度检测点 8 的浓度小于检测点 7，这可能是因为检测点 8 风速较大，相关组分气体有效排出牛舍。目前由于现阶段恶臭气体测量仪器体积较大、维护费用昂贵等，恶臭气体及其各组分时间和空间的分布规律的研究较少。在对 LPCV 牛舍内环境因子（T、RH、THI、风速、PM<sub>2.5</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度）及各组分进行相关性分析后发现，OU 值及恶臭气体各组分浓度与 RH 间存在显著负相关，与风速、CO<sub>2</sub> 浓度存在明显正相关。然而，在畜禽养殖舍有害气体浓度与通风之间通常是负相关。本研究结果与之相反的原因可能是对于试验牛舍而言，目前通风量未达到所需排风量，致使舍内恶臭气体积累，呈现增加风速会释放更多恶臭气体的异常相关性。

综上，LPCV 牛舍内不同区域的温度和 THI 指数较为接近，但需注意高湿度导致的热应激。牛舍通风系统还需优化，控制舍内湿度能在一定程度上降低恶臭气体浓度。

### 参考文献：

- [1] LAMBERTZ C, SANKER C, GAULY M. Climatic effects on milk

- production traits and somatic cell score in lactating holstein-friesian cows in different housing systems [J]. *J Dairy Sci*, 2014, 97 (1): 319-329.
- [2] 夏海斌, 王健, 翟云飞, 等. 秋季不同牛舍环境参数及其对荷斯坦牛泌乳性能、生理和血液生化指标的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46 (6): 1134-1141.
- [3] 李守忠. LPCV 牛舍概述 [J]. *中国奶牛*, 2014 (Z1): 45-49.
- [4] 赵淑梅, 山口智治, 周清, 等. 现代温室湿帘风机降温系统的研究 [J]. *农机化研究*, 2007 (9): 147-152.
- [5] 吕慧洁, 李景琦, 丁蕊, 等. LPCV 牛舍湿帘风机自动温度控制系统设计 [J]. *甘肃科技纵横*, 2021, 50 (8): 22-24.
- [6] 郑玉琳. 大跨度横向通风牛舍在西藏牦牛养殖中的应用 [J]. *畜牧兽医杂志*, 2022, 41 (6): 99-100.
- [7] 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.
- [8] DUNLOP M W, BLACKALL P J, STUETZ R M. Odour emissions from poultry litter: a review litter properties, odour formation and odorant emissions from porous materials [J]. *J Environ Manage*, 2016, 177: 306-319.
- [9] 王得春. 规模化牛场环境污染的综合防治 [J]. *兽医导刊*, 2020 (23): 66.
- [10] ZHANG Y, LIANG Z, TANG C, et al. Malodorous gases production from food wastes decomposition by indigenous microorganisms [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 717: 137175-137185.
- [11] 刘明, 张恩平, 宋宇轩. 牛舍有害气体排放规律及减除措施研究进展 [J]. *家畜生态学报*, 2019, 40 (5): 76-81.
- [12] BOERS D, GEELEN L, ERBRINK H, et al. The relation between modeled odor exposure from livestock farming and odor annoyance among neighboring residents [J]. *Int Arch Occ Env Hea*, 2016, 89 (3): 521-530.
- [13] DALTON P, CLAESON A S, HORENZIAK S. The impact of indoor malodor: historical perspective, modern challenges, negative effects, and approaches for mitigation [J]. *Atmosphere - Basel*, 2020, 11 (2): 126-141.
- [14] HIRASAWA Y, SHIRASU M, OKAMOTO M, et al. Subjective unpleasantness of malodors induces a stress response [J]. *Psychoneuroendocrino*, 2019, 106: 206-215.
- [15] SCHIRMANN K, WEARY D M, HEUWIESER W, et al. Short communication: rumination and feeding behaviors differ between healthy and sick dairy cows during the transition period [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99 (12): 9917-9924.
- [16] 任义方, 杨章平, 零丰华, 等. 江苏奶牛热应激风险区划及其受气候变化的影响 [J]. *中国农业科学*, 2022, 55 (22): 4513-4525.
- [17] 陈昭辉, 任方杰, 于桐, 等. 加装大风量风机对夏季湿帘降温奶牛舍的防暑降温效果分析 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (5): 198-208.
- [18] BECKER C A, COLLIER R J, STONE A E. Invited review: physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103 (8): 6751-6770.
- [19] 张志登, 敬盈嘉, 刘影, 等. 热应激对泌乳奶牛生理指标及生产性能的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2020, 56 (4): 169-172.
- [20] LIU J, LI L, CHEN X, et al. Effects of heat stress on body temperature, milk production, and reproduction in dairy cows: a novel idea for monitoring and evaluation of heat stress - review [J]. *Asian-Australas J Anim Sci*, 2019, 32 (9): 1332-1339.
- [21] COLLIER R J, RENQUIST B J, XIAO Y. A 100-year review: stress physiology including heat stress [J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100 (12): 10367-10380.
- [22] COWLEY F C, BARBER D G, HOULIHAN A V, et al. Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism [J]. *J Dairy Sci*, 2015, 98 (4): 2356-2368.
- [23] 刘影. 基于 CFD 的牛舍热环境模拟、优化及制冷系统的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [24] MONDACA M R, COOK N B. Modeled construction and operating costs of different ventilation systems for lactating dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2019, 102 (1): 896-908.
- [25] 颜志辉, 施正香, 王朝元, 等. 大跨度横向机械通风奶牛舍环境状况的分析与思考 [J]. *中国畜牧杂志*, 2012, 48 (16): 43-46.
- [26] NI J Q, ERASMUS M A, CRONEY C C, et al. A critical review of advancement in scientific research on food animal welfare-related air pollution [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 408: 124468-124481.
- [27] SHEN D, WU S, LI Z, et al. Distribution and physicochemical properties of particulate matter in swine confinement barns [J]. *Environ Pollut*, 2019, 250: 746-753.
- [28] WINKEL A, MOSQUERA J, KOERKAMP P W G G, et al. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands [J]. *Atmos Environ*, 2015, 111: 202-212.
- [29] PURDY C W, CLARK R N, STRAUS D C. Ambient and indoor particulate aerosols generated by dairies in the southern High Plains [J]. *J Dairy Sci*, 2009, 92 (12): 6033-6045.
- [30] ZHAO L Y, BRUGGER M F, MANUZON R B, et al. Variations in air quality of new ohio dairy facilities with natural ventilation systems [J]. *Appl Eng Agric*, 2007, 23 (3): 339-346.
- [31] 环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [32] 国家环境保护局. 恶臭污染物排放标准: GB 14554—93 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [33] 刘德钊, 朱怀群. 基于嗅觉的臭气浓度测定方法综述 [J]. *环境化学*, 2023, 42 (1): 222-230.