

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

李永振^{1,2}, 方志伟¹, 鲁煜建^{1,2}, 梁超^{1,2,3}, 施正香^{1,2,3}, 王朝元^{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)

摘要: 对奶牛舍颗粒物浓度和分布进行实时连续监测, 是评估其环境风险和制定科学减排措施的前提。随着大型奶牛舍的快速发展, 对尽可能少且科学地布置测点数量和位置并能够对舍内颗粒物浓度进行精准监测, 提出了新的挑战。为探究测点优化布置方案, 该研究基于物联网技术在大型自然通风奶牛舍内 3 个相邻饲养区域布置 17 个采样点, 对总悬浮颗粒物 (total suspended particle, TSP) 和细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度进行了连续 6 个月监测, 得到舍内浓度平均值 (视为“真值”); 利用系统聚类 and 误差分析方法得到优化的测点方案, 并将其颗粒物浓度结果与 6 种传统测点方案进行对比, 以确定最优的测点数量和位置方案。结果表明, 舍内 3 个饲养区域内颗粒物浓度分布均匀, PM_{2.5} 浓度在不同采样高度上无统计差异 ($P>0.05$), 而 TSP 浓度在屋顶通风口下方 (9.0 m) 明显低于 1.5 和 2.5 m 高度 ($P<0.05$)。与真值相比, 优化测点方案的 TSP 和 PM_{2.5} 浓度监测误差绝对值之和分别为 6.4%~22.6% 和 4.7%~14.2%, 均低于传统测点方案。综合考虑优化方案的科学性和传统方案的易操作性, 确定最优测点方案为: 在奶牛舍中央屋顶通风口下方 1.0~2.0 m 处布置 1 个测点, 在奶牛卧床上方 2.5 m 高度布置 2 个测点, 上述 3 个测点按奶牛舍斜对角线进行布置; 另外, 分别在挤奶通道、饲喂通道、清粪通道上方 2.5 m 高度处各布置 1 个测点; 共计 6 个测点。该优化测点方案可满足监测准确性和易操作性要求。

关键词: 监测; 通风; 优化; 颗粒物; 自然通风奶牛舍; 浓度; 系统聚类

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302038

中图分类号: S815.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0201-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302038 <http://www.tcsae.org>

LI Yongzhen, FANG Zhiwei, LU Yujian, et al. Sampling points number and location optimization of particulate matter concentration monitoring in a large naturally ventilated dairy barn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 201-209. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302038 <http://www.tcsae.org>

0 引言

规模化奶牛舍内会不断产生和聚集包括颗粒物 (particulate matter, PM) 在内的大量空气有害物质^[1-3]。人员和奶牛长时间暴露在高浓度颗粒物环境中容易引发呼吸道感染和疾病传播等健康问题, 影响生产效益^[4-6]; 颗粒物排放到舍外后对场区周边环境造成污染, 易引起投诉事件等^[7-9]。因此, 对奶牛舍颗粒物浓度水平进行精准监测和科学评估至关重要。但由于自然通风奶牛舍空间大、舍内环境变化复杂, 对环境监测布点提出了更高要求, 如何通过尽可能少且科学的测点布置和成本投入来客观反映牛舍颗粒物浓度水平, 充满挑战。

目前关于奶牛舍颗粒物浓度的采样监测研究, 主要

通过单一布点或均匀布点的方式来衡量整舍浓度水平。但布点数量和位置的不同往往造成监测结果存在较大差异。JOO 等^[10]通过在牛舍中央屋顶通风口下方布置 1 个颗粒物浓度采样点, 测得 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 平均浓度分别为 67.8、557 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而 KAASIK 等^[11]以均匀对称的布点方式 (8~13 个测点) 在牛舍不同功能区进行采样, 得到 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度分别为 18、65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 与前者结果相差数倍。另外, 不同功能区测点之间的浓度也可能存在较大差异, 说明颗粒物浓度在舍内空间分布差异较大。此外, 尽管部分研究尝试对颗粒物浓度测点进行更加科学地布置^[11-13], 但受制于采样设备成本和缺乏有效的监测系统, 无法实现颗粒物浓度的多点连续稳定监测, 因而无法获得大批量数据以科学地进行测点优化。

近年来, 基于传感器监测的测点优化方法在城市大气环境、土壤元素监测等领域广泛运用^[14-16], 包括聚类法、数学统计、误差分析等。其中系统聚类法主要根据离差平方和确定类间距, 对数据进行类别划分并创建聚类系谱图, 与其他方法相比, 其分类结果直观、适合大批量数据处理, 结合误差分析法对不同分类进行监测误

收稿日期: 2023-02-09 修订日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31972614); 国家现代农业 (奶牛) 产业技术体系 (CARS-36)。

作者简介: 李永振, 博士生, 研究方向为设施畜禽养殖环境与控制。Email: yongzhenli@cau.edu.cn。

※通信作者: 王朝元, 教授, 研究方向为设施畜禽养殖过程控制与环境。Email: gotowchy@cau.edu.cn。

差比较,从而筛选最优结果,在前人研究中取得较好的应用效果。如董海燕等^[17]利用聚类法将天津市大气降尘监测点位数由32优化为24个;赖锡柳^[18]将聚类与百分位数法结合确定出兰州新区6个空气质量监测点位,检验结果满足误差要求。随着农业物联网技术的推广,基于传感器技术的环境在线监测系统不仅使采样成本大幅降低,而且能够实现环境多点连续准确监测,实时获取海量监测数据,满足畜禽舍环境测点数量和位置优化要求。

本研究基于物联网技术构建自然通风奶牛舍环境在线监测系统,通过对牛舍颗粒物浓度进行多点连续监测以获取“真值”,分析颗粒物空间分布规律,运用系统聚类 and 误差分析方法优化测点数量与位置,并结合传统布点特点,确定最优颗粒物浓度测点方案。

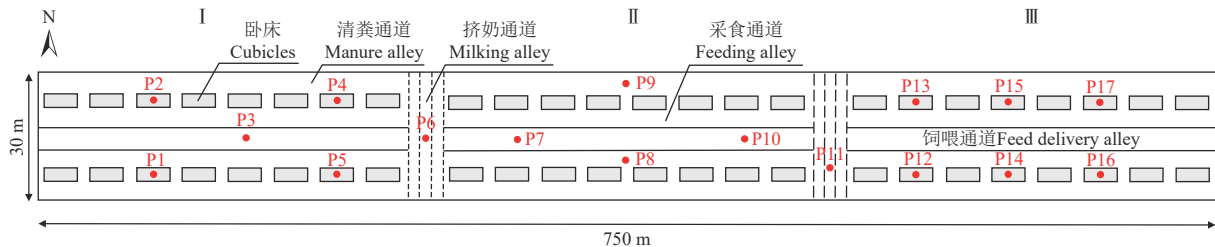
1 材料与方法

1.1 试验牛舍与饲养管理

试验于2021年9月至2022年3月在江苏省盐城市某规模化奶牛场的1栋大型自然通风泌乳牛舍中进行(图1)。牛舍采用双坡式可活动屋面和钟楼屋顶结构,屋脊东西走向,尺寸为750 m(长)×30 m(宽)×4 m(檐高)。舍内共划分6个饲养单元,4列散栏牛床对头式布置,共饲养荷斯坦奶牛约1200头。卧床与饲喂通道两侧上方分别安装一定数量扰流风机,颈夹上方安装有喷淋装置,用于不同季节舍内环境调控。舍内共有2段挤奶通道,将牛舍均分为3个相对独立的饲养区域(I、II、III),各区域间奶牛数量与饲养管理相同。



a. 试验奶牛舍现场图
a. Field figure of the experimental dairy barn



b. 试验奶牛舍平面图与颗粒物浓度采样点布置
b. Planform of the experimental dairy barn and layout of particulate matter concentration sampling points

注: I、II、III表示牛舍3个饲养区域;P1~P17为颗粒物浓度采样点。

Note: I, II, III represent the three parts of the barn; P1~P17 represent PM concentration sampling points.

图1 试验奶牛舍与颗粒物浓度采样点布置

Fig.1 The experimental dairy barn and layout of particulate matter (PM) concentration sampling points

奶牛舍每日05:00–07:00、13:00–15:00、21:00–23:00进行挤奶,期间进行全混合日粮(total mixed rations, TMR)饲喂、机械推料、推粪车清粪、牛床垫料补充与翻耕等机械操作。牛舍以自然通风为主,根据舍内温度变化进行环境调控,当舍内日平均温度超过16℃时开启风机,当日平均温度超过25℃开启喷淋系统。试验期间,牛舍主要处于秋冬季节,舍内温度范围–6.8~31.6℃、相对湿度范围22.7%~99.9%。随着舍外温度降低,牛舍先后采取风机与喷淋开启(EC1)、风机开启与喷淋关闭(EC2)、风机与喷淋关闭(EC3)等3种环控措施。这3种工况对舍内颗粒物浓度分布可能产生影响^[19],因此分别针对不同环控措施进行数据分析。

1.2 颗粒物浓度在线监测系统

1.2.1 监测设备

试验期间,通过颗粒物浓度在线监测设备PCMU(particulate concentration monitoring unit)对牛舍颗粒物浓度(TSP、PM_{2.5})进行连续在线监测。该设备由控制板、颗粒物浓度传感器、时钟模块、数据储存卡和设备外壳组成。其中2个颗粒物浓度传感器均基于激光散射原理分别测量TSP(SDS198, 诺方电子科技有限公司, 河南)和PM_{2.5}浓度(PMS5003, 攀腾科技有限公司, 北京),传感器遵循串口通讯协议为9600 8N1(波特率9600 bps, 数据位:8, 校验位:无, 停止位:1),具体性能参数见表1。设备运行时采样频率为1 min,每5 min通过4G网络自动上传平均浓度数据至数据库。

表 1 颗粒物浓度传感器性能参数

Table 1 Technical specifications of PM concentration sensors

颗粒物浓度传感器 PM concentration sensors	性能参数 Performance indexes
SDS198	供电电压 (TSP): 4.5~5.5 V
	响应时间 (TSP): <6 s
	量程 (TSP): 0~20 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	灵敏度 (TSP): 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PMS5003	供电电压 (PM _{2.5}): 4.5~5.5 V
	响应时间 (PM _{2.5}): <1 s
	量程 (PM _{2.5}): 0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	灵敏度 (PM _{2.5}): 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

注：TSP 为总悬浮颗粒物。

Note: TSP represents total suspended particle.

1.2.2 采样点布置

分别在牛舍 3 个饲养区域内共布置 17 个颗粒物浓度监测点 (图 1b)，包括在区域 I 布置 5 个采样点 (P1~P5)，其中 P3 点位于屋顶通风口下方 1.0~2.0 m 位置 (距地面高度约 9.0 m)，其他采样点均位于卧床上方；在区域 II 布置 6 个采样点 (P6~P11)，分别位于挤奶通道 (P6、P11)、饲喂通道 (P7、P10)、采食通道 (P8) 和清粪通道 (P9)；在区域 III 布置 6 个采样点 (P12~P17)，均位于卧床上方。牛舍内除 P3 测点外，其他测点高度均为 2.5 m。

此外，为探究颗粒物浓度在舍内不同高度分布差异，于 2022 年 2 月 23 日至 3 月 10 日期间分别在 P2 和 P5 测点位置额外设置 1.5 m 高度颗粒物浓度测点，以对比 1.5、2.5 m (P2 与 P5 测点) 和 9.0 m (P3 测点) 高度颗粒物浓度分布规律。测试期间牛舍处于 EC2 环控条件。

1.3 颗粒物测点数量和位置优化方法

将奶牛舍 17 个监测布点平均数据作为颗粒物浓度监测真值，利用系统聚类 and 误差分析方法对牛舍颗粒物浓度数据进行处理，得到不同环控措施下颗粒物浓度优化采样点数量与位置组合。

1.3.1 系统聚类

在 EC1、EC2、EC3 的 3 种环控措施下，基于不同监测点数据离差平方和确定不同类之间距离，计算见式 (1)，根据类内与合并成新类的离差平方和大小得到系统聚类谱系图，并根据聚类系数和谱系图确定最优类别数，进而确定不同监测区域 TSP 和 PM_{2.5} 浓度采样点聚类结果。

$$D_{pq}^2 = S_n^2 - S_p^2 - S_q^2 \quad (1)$$

式中 D_{pq}^2 是类 G_p 和 G_q 之间距离的平方和； S_n^2 是类 G_p 和 G_q 合并成新类 G_n 时的类内离差平方和； S_p^2 和 S_q^2 分别是两类数据 G_p 和 G_q 类内平方和。

1.3.2 误差分析

对每种聚类结果进行误差分析，选择均值相对误差和百分数相对误差 (30%、50%、80% 和 90%) 作为误差评价指标，计算不同测点组合与真值之间的误差，筛选出误差均小于 10% 的组合作为优化测点方案组合。其中均值相对误差 (式 (2)) 表示数据样本间总体差异，百分数相对误差 (式 (3)) 反映两组数据之间分布与变化趋势差异。通过计算不同监测点组合误差绝对值之和 (式 (4))，选择其中误差最小的方案作为牛舍颗粒物

浓度监测点数量和位置优化方案。

$$E_M = (M_i - M_r)/M_r \quad (2)$$

$$E_P = (P_i - P_r)/P_r \quad (3)$$

$$\sum E = |E_M| + |E_P| \quad (4)$$

式中 E_M 、 E_P 和 $\sum E$ 分别为奶牛舍颗粒物浓度均值相对误差、百分位数相对误差、误差绝对值之和，%； M_i 和 P_i 分别表示每种聚类组合下均值和不同百分位数值 (30%、50%、80%、90%)； M_r 和 P_r 分别表示颗粒物浓度真值的均值和百分位数值。

1.3.3 优化方案与传统布点方案对比

由于传统布点方案具有布点规则、易操作等特点，本研究在已有监测布点的基础上选择 6 种传统布点方案 (表 2) 进行误差分析。在不同环控措施下，综合比较优化布点与传统布点在监测精度、成本与可操作性等方面优缺点，提出自然通风奶牛舍颗粒物浓度最优测点方案。

表 2 传统颗粒物浓度布点方案描述

Table 2 Description of regular PM concentration sampling schemes

方案序号 Scheme NO.	布点数量 (位置) Sampling numbers (locations)	测点高度 Sampling heights/m	布点形式 Sampling forms
1	1 (P3)	9.0	
2	2 (P2, P5)	2.5	
3	3 (P2, P3, P5)	2.5 (P2, P5); 9.0 (P3)	
4	4 (P1, P2, P4, P5)	2.5	
5	5 (P1, P2, P3, P4, P5)	2.5	
6	6 (P12, P13, P14, P15, P16, P17)	2.5	

注：2022 年 2 月 23 日至 3 月 10 日期间分别在 P2 和 P5 测点额外设置 1.5 m 测点高度。

Note: From February 23 to March 10, 2022, an additional sampling height of 1.5 m were set at the P2 and P5 sampling point respectively.

1.4 数据处理与分析

数据清洗主要包括：1) 剔除超过传感器量程粗大误差；2) 利用箱型图剔除数据分布异常值；3) 有研究表明当外界天气处于雾霾状态时 (大气环境指数 (air quality index), AQI>100)，对畜禽舍内颗粒物浓度分布可能造成干扰^[20]，因此本研究剔除 AQI>100 时对应时间内的监测数据。经过数据清洗，得到数据集中包括 TSP 和 PM_{2.5} 浓度数据各 85 万条，数据种类包括时间序列、监测设备序列号、TSP 和 PM_{2.5} 浓度，其中 TSP 与 PM_{2.5} 浓度数据频率分布四分位数分别为 57.9、28.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，82.5、44.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，119.5、66.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

对清洗数据进行重采样和类型划分，利用 Spearman 非参数检验和线性回归分析颗粒物浓度在牛舍分布规律，并通过方差分析对比不同数组间差异显著性。综合系统聚类 and 误差分析得到优化监测布点方案。试验结果表现形式为：平均值±标准差。利用 Python (3.7) 和 Microsoft Excel (2016) 软件进行数据清洗、分析、作图。

2 结果与分析

2.1 牛舍颗粒物浓度均匀性分析

为了探究牛舍颗粒物浓度监测布点是否满足优化条件，分别针对牛舍不同监测区域和监测高度进行颗粒物浓度分布规律分析。

2.1.1 不同监测区域颗粒物浓度分布

3 个监测区域内试验期间颗粒物平均浓度如表 3、图 2 所示。

试验期间舍内颗粒物浓度变化及 3 种环控措施下

表 3 不同环控措施下各监测区域颗粒物浓度均值

环境措施 Environmental controls	TSP			PM _{2.5}		
	I	II	III	I	II	III
EC1	65.2±33.8 a	62.6±30.2 a	63.4±30.2 a	30.5±18.9 a	30.4±17.9 a	30.0±19.9 a
EC2	101.6±46.2 a	94.2±41.4 a	99.4±39.9 a	51.7±26.2 a	47.3±22.3 a	51.4±27.3 a
EC3	109.4±67.8 a	104.1±63.9 a	103.4±56.7 a	62.4±37.7 a	61.7±42.0 a	63.2±38.4 a

注：EC1、EC2、EC3 分别表示开风机开喷淋、开风机关喷淋、关风机关喷淋；TSP 或 PM_{2.5} 浓度组内同行数据字母不同表示数据差异显著 ($P<0.05$)。
Note: E1, EC2, EC3 represent environmental controls of fans and spraying, fans, and no fans and no spraying; Different letters indicate significant differences ($P<0.05$) in the same row within the TSP or PM_{2.5} concentration groups.

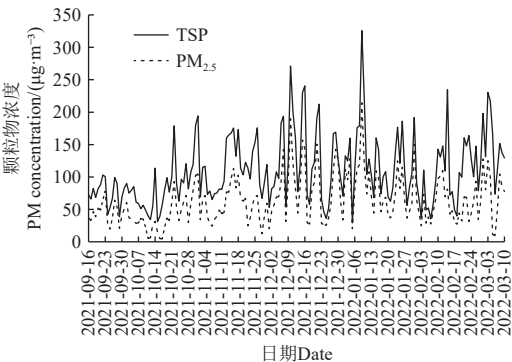


图 2 试验期间舍内 TSP 和 PM_{2.5} 浓度日均值变化
Fig.2 Daily mean variation of TSP and PM_{2.5} concentration inside the dairy barn during the experiment

整体而言，3 个监测区域颗粒物在监测期间平均浓度分别为 92.1、86.7、88.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP)、48.2、46.5、48.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2.5})，未表现出显著差异 ($P>0.05$)；TSP 和 PM_{2.5} 浓度变化规律一致，随着舍外温度降低和牛舍密闭性增加，舍内颗粒物浓度呈上升趋势 (图 2)。通过对不同区域颗粒物浓度进行线性回归分析 (图 3)，发现区域 I、II、III 之间表现出显著相关性 (其中 TSP: R^2 分别为 0.70, 0.75, 0.72; PM_{2.5}: R^2 分别为 0.88, 0.98, 0.85; $P<0.01$)。说明测量期间奶牛舍颗粒物浓度在 3 个监测区域分布较为均匀，这与监测区域间相同的饲养管理方式、奶牛存栏量等有关；同时 3 个区域空间相连，具有较好的环境一致性。因此，适合将 3 个区域作为一个整体进行奶牛舍颗粒物浓度测点优化。

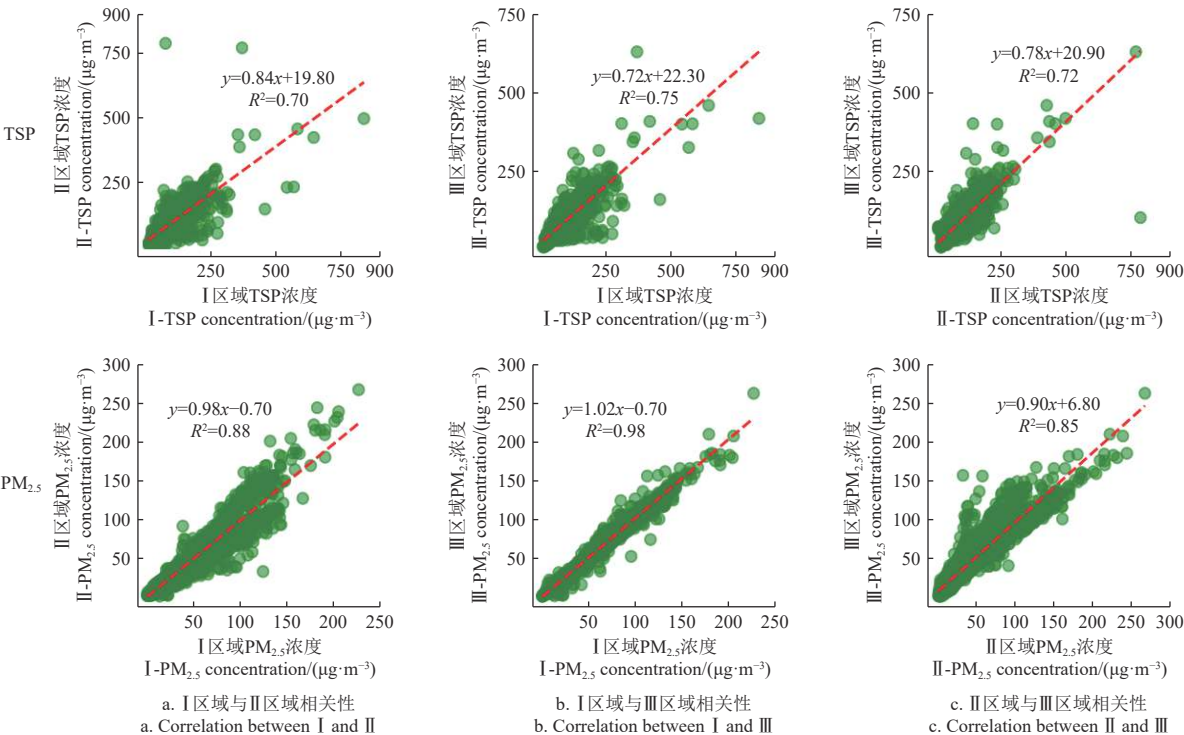


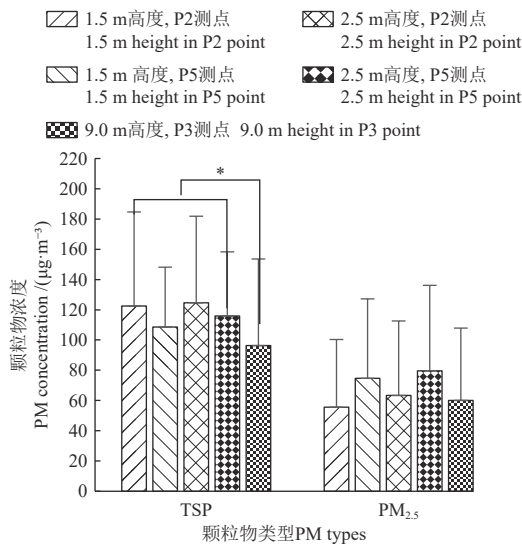
图 3 不同监测区域颗粒物浓度相关性分析
Fig.3 Correlation analysis of PM concentration among the three sections of the barn

2.1.2 不同监测高度颗粒物浓度分布

分别选择 I 区域内 P2、P3、P5 采样点监测数据，对比距地面 1.5、2.5 m 高度和屋顶通风口下方距地面 9.0 m 高度上颗粒物浓度分布。监测期间不同高度颗粒物平均

浓度对比如图 4 所示，其中 TSP 浓度在 1.5 和 2.5 m 高度无明显差异，均显著高于屋顶通风口下方距地面 9.0 m 高度浓度 ($P<0.05$)；而 PM_{2.5} 在不同高度上浓度无显著差异 ($P>0.05$)。粗颗粒物由于受重力影响大，随舍内

气流上升高度有限，造成超过一定高度后浓度明显下降的现象，而细颗粒物在空气中悬浮时间长，在舍内垂直方向上分布更加均匀。因此，考虑到总体测点高度情况，对于 TSP 而言，在 2.5 m 高度监测的同时对屋顶通风口下方位置进行监测能够更加客观反映舍内浓度分布；对于 PM_{2.5}，2.5 m 高度能够满足浓度监测需求。同时，相同采样高度上不同采样点之间也存在差异情况（P2、P5），说明在不同高度上进行多点监测对于有效反映舍内浓度水平具有必要性。



注：“*”表示 2 组数据间存在显著性差异 ($P<0.05$)。
Note: “*” between the two groups indicate significant difference with $P<0.05$.

图 4 试验期间不同采样高度平均颗粒物浓度
Fig.4 Mean particulate matter concentration between different sampling heights during the experiment

目前，关于自然通风奶牛舍颗粒物浓度空间分布研究主要集中在舍内外和舍内不同功能区层面对比。水平方向上，多数研究主要对比颗粒物浓度在舍内不同功能区分布。MOSTAFA 等^[21]通过对牛舍不同位置颗粒物浓度进行监测，发现奶牛活动区域 TSP 浓度较高，而 PM_{2.5} 浓度在不同位置分布较为均匀；ZHAO 等^[22]在测

量了美国俄亥俄州奶牛舍内 8 个不同位置后，认为舍内空气环境在空间分布上差异有限，部分位置之间颗粒物浓度差异可能是不同管理方式造成的，该结果与本研究相似。目前还缺乏对同一牛舍不同相对独立区域的浓度对比，这与不同研究中牛舍类型和研究目的有关。垂直方向上，目前多数研究在奶牛舍空气环境监测时选择采样高度范围在 1.5~2.5 m^[23-24]，既保证采样点在动物和人体高度水平，又防止采样设备被奶牛活动干扰破坏。目前仍缺乏针对牛舍空气环境采样高度的系统研究，有研究认为采样点距地面<1.5 m 高度时，气溶胶颗粒物浓度与高度无直接关系^[25]。本研究中颗粒物浓度在 1.5 和 2.5 m 高度处相当，但为了有效衡量颗粒物浓度在整舍分布情况，2.5 m 采样高度仍无法满足要求。尤其对于 TSP 浓度监测，在屋顶通风口下方布置采样点是必要的，也有部分研究只通过监测屋顶通风口处颗粒物浓度以代表舍内整体水平，这在一定程度上不能客观反映牛舍真实浓度水平，尤其对于粗颗粒物浓度。

2.2 牛舍颗粒物浓度测点数量和位置优化

根据系统聚类方法，得到不同环控措施下 3 个监测区域内颗粒物浓度监测点数量和位置聚类结果（表 4）。结果表明，TSP 与 PM_{2.5} 浓度监测点数量经过聚类分析后可由原 5~6 个采样点聚类为 2~3 个采样点。其中区域 I 和 III 内，TSP 聚类后的测点数量高于 PM_{2.5}，而在区域 II 内规律表现不一致，这可能与牛舍不同功能区颗粒物排放强度差异有关，区域 I 与 III 内颗粒物监测点多数布置在奶牛卧床上方，而牛床垫料是粗颗粒物的重要排放源^[26]，造成在该区域内 TSP 浓度较高，且浓度变化易受奶牛活动和饲养管理影响；而区域 II 内监测点位于舍内不同功能分区，其中挤奶通道和饲喂通道是细颗粒物潜在排放区域^[13]，造成 PM_{2.5} 浓度在该区域内波动较大。此外，I 区域内除 EC1，其他环控措施下屋顶通风口（P3）监测点均单独聚为一类，反映出屋顶通风口下方位置监测必要性。II 区域内挤奶通道位置布点在 EC1 和 EC3 环控措施下均被单独聚为一类，说明该功能区监测具有必要性。

表 4 不同环控措施下各区域颗粒物浓度测点系统聚类结果

Table 4 The clustering results of particulate matter concentration sampling points in parts I, II and III of the barn with different environmental controls

环控措施 PM Environmental controls	I					II				III					
	P1	P2	P3	P4	P5	挤奶通道 Milking alley (P6, P11)	饲喂通道 Feed delivery alley (P7, P10)	采食通道 Feeding alley (P8)	清粪通道 Manure alley (P9)	P12	P13	P14	P15	P16	P17
TSP	EC1														
	EC2														
	EC3														
PM _{2.5}	EC1														
	EC2														
	EC3														

注：不同区域同一行内颜色相同方格表示该测点可聚为一类，否则为不同类。
Note: The squares with same color in a row within each part present the sampling points were clustered into same class.

对以上不同区域的聚类结果进行误差分析，根据不同布点组合误差绝对值之和大小，得到不同环控措施下颗粒物浓度优化布点方案（表 5）。优化后对 TSP 和 PM_{2.5} 在不同环控措施下的监测误差绝对值之和范围分别为 6.4%~22.6%、4.7%~14.2%。其中在 EC2 条件下

颗粒物（TSP 与 PM_{2.5}）浓度监测误差相对较小，在抗流风机开启情况下，舍内气流速度增加，颗粒物沉降和对外扩散速率增加^[27]，颗粒物浓度水平较低且分布均匀，使监测准确性提高；而在另外 2 种环控措施下，受喷淋系统局部降尘作用、奶牛活动和机械操作影响，舍内不

同区域颗粒物排放差异、浓度分布不均且波动明显^[21,28],造成监测误差升高。整体上,TSP 浓度测点数量优化后略多于 PM_{2.5},与聚类分析结果一致。同时,发现不同

环控措施下的颗粒物浓度优化测点需要在挤奶、饲喂通道等位置布置,这也与不同功能区颗粒物排放差异有关。

表 5 不同环控措施下牛舍颗粒物浓度优化测点方案

Table 5 Optimized PM concentration sampling schemes of the barn under different environmental controls			
环控措施	PM	优化测点组合	误差绝对值之和
Environmental controls		(区域 I +区域 II +区域 III)	Sum of absolute errors/%
		Optimized sampling points	
EC1	TSP	P1, P3, P4 + P6/P11, P9 + P13, P14	22.6
	PM _{2.5}	P3, P4 + P6/P11, P7/P10, P9 + P12, P17	14.2
EC2	TSP	P2, P3, P4 + P6/P11, P9 + P14, P16, P17	6.4
	PM _{2.5}	P2, P5 + P6/P11, P7/P10 + P12, P14	6.9
EC3	TSP	P2, P3, P5 + P6/P11, P7/P10, P9 + P13, P16, P17	16.9
	PM _{2.5}	P2, P4 + P6/P11, P7/P10, P9 + P12, P14	4.7

注:“P6/P11”、“P7/P10”分别表示在区域 II 内挤奶通道、饲喂通道位置上的 1 个测点。

Note: “P6/P11” and “P7/P10” represent a sampling point set above the milking alley and feeding alley respectively in section II of the barn.

2.3 优化布点与传统布点比较

在不同环控措施下对已选择的 6 种传统布点方案进行误差分析,根据布点数量多少得到传统方案与优化方案颗粒物浓度监测误差变化趋势,如图 5 所示。整体而言,传统布点形式随着监测点数量增加,其监测误差整体呈下降趋势,说明多点监测对于准确反映舍内颗粒物浓度水平具有重要意义,这也与相关研究结果一致^[29-30]。6 种传统布点方案监测误差均高于优化方案,体现出优化布点在监测准确性和科学性方面优势,但不同环控措施下获得最小误差的颗粒物监测点数量和位置也不尽相同,增加了实际操作难度。此外,从误差趋势变化可以看出,在传统布点中,TSP、PM_{2.5} 浓度分别从监测方案 3 (3 个测点)和方案 2 (2 个测点)开始,其监测误差下降趋势明显减缓,且整体误差与优化方案相近,说明部分传统方案在测点数量有限情况下同样可取得较好的监测准确度,从控制监测成本、增加可操作性角度考虑,可适当减少颗粒物监测点数量。

单点或多点的传统规则布点是目前自然通风奶牛舍颗粒物浓度监测的主要方法,其中在屋顶通风口下方的单点测量在相关研究中较为常见^[10,13,31],这种布点方式容易操作,但忽略了颗粒物在牛舍其他空间位置的分布情况,造成监测结果与其他研究之间差异较大。JOO 等^[10]以单点方式通过 TEOM 连续监测了牛舍 TSP 和 PM₁₀ 浓度,得到监测期间平均浓度分别为 65 和 18 μg/m³,其结果与同样为单测点布置的 WINKEL 等^[31]研究相差数倍。监测结果差异不仅与测点数量与位置有关,还受其他因素影响,如气候、牛舍结构、饲养规模等。也有部分研究为了提高监测结果的准确性,以舍内均匀布点的方式增加颗粒物测点数量,KAASIK 等^[11]在牛舍最多布置 13 个颗粒物采样点以衡量其平均浓度,但测点位置大多位于清粪通道和饲喂通道,无法科学反映牛舍其他功能区域颗粒物分布情况,而且监测成本和操作难度增加。因此,对自然通风奶牛舍颗粒物浓度的科学有效监测需要综合考虑其监测准确性和可操作性。

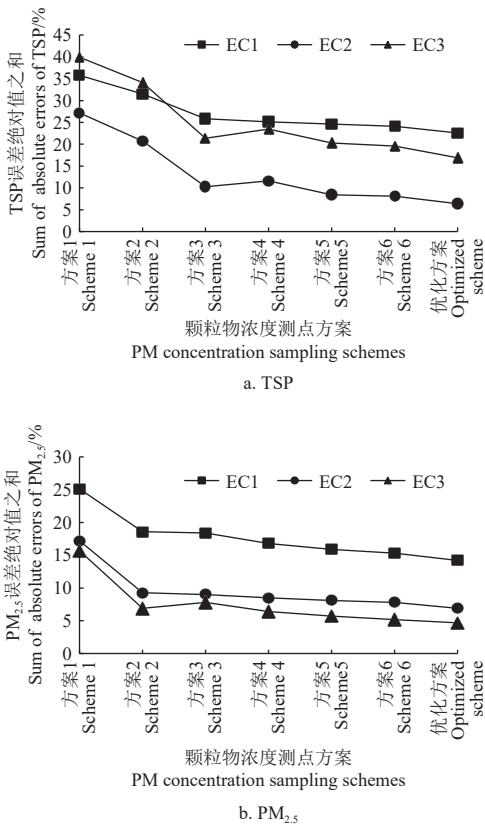


图 5 不同环控措施下传统方案与优化方案误差变化趋势

Fig.5 Change of PM concentration monitoring errors for regular monitoring methods and optimized method with different environmental controls

为了对设置有屋顶通风口的大型自然通风奶牛舍内颗粒物浓度进行实时精准监测,本研究综合考虑了优化布点方案的科学性和传统布点方案的易操作性,确定的最优方案为:在奶牛舍中央屋顶通风口下方 1.0~2.0 m 处布置 1 个测点,在奶牛卧床上方 2.5 m 高度处设置 2 个测点,上述 3 个测点按奶牛舍斜对角线布置,其中通风口下方的测点居中;另外,在挤奶、饲喂、清粪通道

上方 2.5 m 高度处各布置 1 个测点。该方案共计 6 个测点,可以兼顾颗粒物浓度监测的准确性和经济性。为了比较最优方案与其他测点方案,基于最优方案中的布点条件,在本研究所有测点中选择 P2、P3、P5、P7、P9、P11 测点组合作为比较案例,经过误差分析,得到该组合在 3 种环控措施下对于 TSP 和 $PM_{2.5}$ 浓度监测的误差绝对值之和范围分别为 9.6%~24.9%、6.5%~12.3%,在测点数量由 17 个筛减为 6 个的情况下,其监测准确性与优化测点方案(表 5)相近,大幅度减少实际监测成本和数据处理量;与传统方案相比,最优方案通过在舍内不同高度和功能区分进行针对性布点,能够更加客观反映颗粒物在舍内分布情况,且降低实际操作难度。

3 结 论

本研究通过构建自然通风奶牛舍颗粒物浓度在线监测系统,以舍内 17 个测点平均浓度为相对真值,利用系统聚类 and 误差分析方法确定最适颗粒物浓度测点方案,根据数据结果得出以下结论:

1) 测试期间牛舍 3 个区域颗粒物浓度无显著差异 ($P>0.05$) 且各区域浓度相关性显著 ($P<0.01$);除总悬浮颗粒物 (total suspended particle, TSP) 在屋顶通风口下方位置浓度显著低于 1.5 和 2.5 m 高度外 ($P<0.05$),TSP 和 $PM_{2.5}$ 浓度在各采样高度上无显著差异 ($P>0.05$)。

2) 基于系统聚类和误差分析确定的不同环控措施下优化测点数量和位置,对 TSP 和 $PM_{2.5}$ 监测误差绝对值之和范围分别为 6.4%~22.6%、4.7%~14.2%,均低于其他 6 种传统布点方案。

3) 结合优化方案监测准确性和传统方案易操作性等特点,确定带屋顶通风口的自然通风奶牛舍颗粒物浓度最优测点方案(共计 6 个测点):在奶牛舍中央屋顶通风口下方 1.0~2.0 m 处布置 1 个测点,在奶牛卧床上方 2.5 m 高度处布置 2 个测点,上述 3 个测点按奶牛舍斜对角线进行布置;另外,分别在挤奶、饲喂、清粪的 3 个通道上方 2.5 m 高度处各布置 1 个测点。

[参 考 文 献]

- [1] CAMBRA-LÓPEZ M, AARNINK A J 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.
- [2] 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.
WANG Kaiying, DAI Shengyan, WANG Lingjuan. Research progress on pollution and monitoring technology of particulate matter from livestock and poultry farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 232-241. (in Chinese with English abstract)
- [3] 鲁煜建, 李永振, 方志伟, 等. 奶牛舍空气颗粒物危害、特性及其关键影响因素研究进展[J]. 中国乳业, 2021(11): 23-33.
LU Yujian, LI Yongzhen, FANG Zhiwei, et al. Research progress on particulate matter harmful effects and its characteristics from dairy barn[J]. China Dairy, 2021(11): 23-33. (in Chinese with English abstract)
- [4] HARTUNG J. Effects of bioaerosol related particulate matter on animal health[C]// Cornell University: Proceedings of the Conference on Particulate Matter In And From Agriculture: 2002. Braunschweig, Germany: Bundesforschungsanstalt Landwirtschaft (FAL), 2002: 119-123.
- [5] EASTMAN C, SCHENKER M B, MITCHELL D C, et al. Acute pulmonary function change associated with work on large dairies in California[J]. Journal of Occupational & Environmental Medicine, 2013, 55(1): 74-79.
- [6] GAINET M, THAON I, WESTEEL V, et al. Twelve-year longitudinal study of respiratory status in dairy farmers[J]. European Respiratory Journal, 2007, 30(1): 97-103.
- [7] de ROOIJ M M T, SMIT L A M, ERBRINK H J, et al. Endotoxin and particulate matter emitted by livestock farms and respiratory health effects in neighboring residents[J]. Environment International, 2019, 132: 105009.
- [8] GARCIA J, BENNETT D H, TANCREDI D, et al. A survey of particulate matter on California dairy farms[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(1): 40-47.
- [9] WILLIAMS D L, BREYSSE P N, MCCORMACK M C, et al. Airborne cow allergen, ammonia and particulate matter at homes vary with distance to industrial scale dairy operations: An exposure assessment[J]. Environmental Health, 2011, 10(1): 72.
- [10] 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.
- [11] KAASIK A, MAASIKMETS M. Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 223-231.
- [12] SCHMIDT D R, JACOBSON L D, JANNI K A. Continuous monitoring of ammonia, hydrogen sulfide and dust emissions from swine, dairy and poultry barns[C]// American Society of Agricultural and Biological Engineers: Proceedings of the 2002 ASAE Annual Meeting. Chicago: ASAE, 2002. 024060.
- [13] TAKAI H, PEDERSEN S, JOHNSEN J O, et al. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(1): 59-77.
- [14] 张武, 张嫚嫚, 洪汛, 等. 基于近邻传播算法的茶园土壤墒情传感器布局优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 107-113.
ZHANG Wu, ZHANG Manman, HONG Xun, et al. Layout optimization of soil moisture sensor in tea plantation based on

- affinity propagation clustering algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [15] YOGANATHAN D, KONDEPUDI S, KALLURI B, et al. Optimal sensor placement strategy for office buildings using clustering algorithms[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1206-1225.
- [16] 侯喜福, 曹曼琳, 朱延胜, 等. 城市大气采样点的模糊聚类优选方法[J]. 干旱环境监测, 1993, 7(3): 141-146.
HOU Xifu, CAO Manlin, ZHU Yansheng, et al. Optimum method of fuzzy clustering in atmospheric sampling point of city[J]. Chinese Journal of Arid Environmental Monitoring, 1993, 7(3): 141-146. (in Chinese with English abstract)
- [17] 董海燕, 姜伟, 陈魁, 等. 天津市大气降尘污染特征及监测点位优化研究[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(2): 63-66.
DONG Haiyan, JIANG Wei, CHEN Kui, et al. Characteristics of air dust pollution and optimization of monitoring sites in Tianjin[J]. Environment and Sustainable Development, 2011, 36(2): 63-66. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赖锡柳. 兰州新区环境空气质量监测布点方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
LAI Xiliu. Research on the Distribute Model of Environmental Air Quality Monitoring in Lanzhou New District[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [19] LU Y, YANG X, E L, et al. Characterizing a year-round particulate matter concentration and variation under different environmental controls in a naturally ventilated dairy barn[J]. Agriculture, 2023, 13(4): 902.
- [20] LI Z, WANG C, LI B, et al. Concentration and size distribution of particulate matter in a new aviary system for laying hens in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020, 70(4): 379-392.
- [21] MOSTAFA E, NANNEN C, HENSELER J, et al. Physical properties of particulate matter from animal houses-empirical studies to improve emission modelling[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(12): 12253-12263.
- [22] 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]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3): 339-346.
- [23] KAMMER J, DÉCUQ C, BAISNÉE D, et al. Characterization of particulate and gaseous pollutants from a French dairy and sheep farm[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 135598.
- [24] NGWABIE N M, VANDERZAAG A, JAYASUNDARA S, et al. Measurements of emission factors from a naturally ventilated commercial barn for dairy cows in a cold climate[J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 103-114.
- [25] 李晏, 孙宏起, 刘明, 等. 秋季东北地区奶牛舍内环境中微生物气溶胶分布规律比较研究[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(6): 247-252.
LI Yan, SUN Hongqi, LIU Ming, et al. Comparative study on the distribution of microbial aerosols in dairy house environment in Northeast China in autumn[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(6): 247-252. (in Chinese with English abstract)
- [26] PURDY C W, CLARK R N, STRAUS D C. Ambient and indoor particulate aerosols generated by dairies in the southern High Plains[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(12): 6033-6045.
- [27] THATCHER T L, LAI A, MORENO-JACKSON R, et al. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(11): 1811-1819.
- [28] MIKHAILOV E F, VLASENKO S S, PODGORNÝ I A, et al. Optical properties of soot-water drop agglomerates: An experimental study[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111(D7): D07209.
- [29] BJERG B, CASCONI G, LEE I B, et al. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(3): 259-275.
- [30] NGWABIE N M, JEPSSON K H, NIMMERMARK S, et al. Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 68-77.
- [31] WINKEL A, MOSQUERA J, GROOT KOERKAMP P W G, et al. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands[J]. Atmospheric Environment, 2015, 111: 202-212.

Sampling points number and location optimization of particulate matter concentration monitoring in a large naturally ventilated dairy barn

LI Yongzhen^{1,2}, FANG Zhiwei¹, LU Yujian^{1,2}, LIANG Chao^{1,2,3}, SHI Zhengxiang^{1,2,3}, WANG Chaoyuan^{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, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China; 3. Beijing Engineering Research Center on Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: Particulate matter (PM) concentration can be real-time monitored to assess the environmental risks and make emission reduction measures in dairy barns. However, a great challenge is remained on arranging as few sampling points as possible to accurately monitor the PM concentration in an intensive barn, particularly with the rapid development of large dairy barns in China. This study aims to design an appropriate monitoring layout with the optimal PM sampling number and location. An online monitoring system was built to continuously detect the PM concentration inside a naturally ventilated dairy barn using the Internet of Things (IoT) and sensing technologies. A total of 17 sampling points were set inside three relatively independent sections of the investigated barn. The total suspended particle (TSP) and PM_{2.5} concentrations were monitored in real time for the six months during the field test. The uniformity of PM concentration was evaluated on the spatial distribution of PM concentration among the three sections and the difference in sampling heights. The systematical clustering and error analysis were also performed on the sampling of PM concentration. The optimal sampling was determined to compare the measurement with the six regular ones under three environmental controls (namely, EC1: Fans and spraying, EC2: Fans, EC3: No fans and no spraying). The average PM concentration from the 17 sampling points was treated as the true value during data analysis. Results showed that no significant difference was found for the TSP and PM_{2.5} concentration among the three measuring sections of the barn ($P>0.05$). TSP concentration sampled at the height of 9.0 m was significantly lower than that at the 1.5 and 2.5 m heights ($P<0.05$). There was no statistical difference in the PM_{2.5} concentration among different sampling heights ($P>0.05$). The concentrations of TSP and PM_{2.5} sampled at the height of 2.5 m were uniformly distributed among three sections of the barn. The sampling point setting down the ridge opening (approximately 9.0 m above the floor surface) was necessary for the TSP concentration monitoring. In TSP and PM_{2.5} concentrations, the sum of absolute errors between the true values and the optimized sampling under three ECs were 6.4%-22.6% and 4.7%-14.2%, respectively, indicating all smaller than those of six regular monitoring ($P<0.05$). Generally, the number of PM sampling points was appropriately reduced to consider the monitoring costs and practical operability. The final PM monitoring was determined with the optimized sampling number and location in a naturally ventilated dairy barn. Six PM sampling points were set inside a dairy barn: one sampling point 1.0–2.0 m down the ridge openings in the central of the barn, two sampling points at a 2.5 m height above the cubicles, and three sampling points distributed at milking alley, feed delivery alley and manure alley at a 2.5 m height, respectively. Among them, the three sampling points down the ridge opening and above the cubicles should be diagonally arranged along the barn. The final PM sampling can be expected to achieve both the accuracy and economy of PM real-time monitoring for a naturally ventilated dairy barn.

Keywords: monitoring; ventilation; optimization; particulate matter; naturally ventilated dairy barn; concentration; clustering