

大型自然通风奶牛舍空气颗粒物浓度监测方法中采样间隔优化

鲁煜建^{1,2}, 方志伟¹, 李永振^{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: 规模化奶牛养殖产生的颗粒物会对人员和奶牛的呼吸道以及周边环境健康产生不利影响。对于奶牛舍空气颗粒物的实时连续监测, 除了监测点数量和位置外, 监测设备的采样间隔同样会影响监测结果的准确性。为确定合理的采样间隔, 该研究采用环境物联网技术在大型自然通风奶牛舍内共计布置了 17 个采样点, 对秋季至冬季舍内的总悬浮颗粒物 (total suspended particulate, TSP) 和细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度进行连续 6 个月的实时监测, 计算舍内 17 个采样点的平均浓度 (视为“真值”)。基于误差分析法, 分别计算了 30 min 和 1、2、3、6、12 h 采样间隔下秋季和冬季的颗粒物浓度日均值, 以及 10、15、20、30 min 和 1 h 采样间隔下白天、夜间与生产管理操作期间的颗粒物浓度小时均值及其与真值的相对误差 (E_r), 统计了 E_r 在 5% 与 10% 范围内的占比情况, 以 66.7% 作为可接受标准, 确定了秋冬季节颗粒物浓度日均值和小时均值的最大可接受采样间隔。结果显示, 在 5% 的相对误差允许范围内, 秋冬季节 TSP 日均值的最大可接受采样间隔为 2 h (秋季) 和 1 h (冬季), PM_{2.5} 为 3 h (秋季) 和 1 h (冬季); 白天 TSP 小时均值的最大可接受采样间隔为 20 min (秋季) 和 15 min (冬季), 夜间 TSP 为 30 min (秋季) 和 15 min (冬季), 秋冬季节白天和夜间的 PM_{2.5} 的最大采样间隔均为 30 min; 当 TSP 和 PM_{2.5} 的最大可接受采样间隔为 10 min 和 20 min 时, 测量数据可以较好地反映秋冬季节生产管理操作对舍内颗粒物浓度的影响。研究对于畜禽舍颗粒物监测中传感器采样频率的设定具有重要意义。

关键词: 颗粒物; 通风; 误差分析; 奶牛; 采样间隔; 物联网

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302037

中图分类号: S815.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0210-07

鲁煜建, 方志伟, 李永振, 等. 大型自然通风奶牛舍空气颗粒物浓度监测方法中采样间隔优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 210-216. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302037 <http://www.tcsae.org>

LU Yujian, FANG Zhiwei, LI Yongzhen, et al. Optimization of sampling intervals for 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): 210-216. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302037 <http://www.tcsae.org>

0 引言

规模化奶牛养殖产生的颗粒物会引起奶牛以及牧场工作人员的呼吸道疾病, 污染周边居民的生活环境^[1-2]。MITCHELL 等^[3]监测得到奶牛场的颗粒物浓度水平已经超出了引起呼吸道疾病的颗粒物浓度阈值。近年来, 中国奶牛场规模化比例不断升高, 以开放式和半开放式建筑类型为主的大型奶牛场势必会产生和排放大量颗粒物, 加剧对人和动物的健康危害和环境污染等问题。因此, 采用科学的监测方法对奶牛舍颗粒物浓度进行精准监测是牛舍环境调控和评估的重要保证^[4]。在空间较大的自然通风奶牛舍内, 颗粒物浓度测量结果的准确性除了与采样点的位置与数量有关外, 还会受到采样间隔的影响^[5]。

目前, 多数研究采用间歇式的测量方法对奶牛舍颗粒物浓度进行检测, 即在一个季节或数个季节的检测活

动中, 连续测量一周作为该季节的颗粒物浓度均值^[6], 或者用一天中早、中、晚部分时段测量的平均值代表该日的颗粒物浓度水平, 采样间隔通常在 1 h 到 6 h 不等^[7-9]。周英昊等^[9]将每日早 (07:00-09:00)、中 (12:00-14:00)、晚 (18:00-20:00) 三次测量的均值作为当天的牛舍颗粒物浓度。这种间歇性测量方法的采样间隔多根据经验确定, 虽然可操作性强, 但受到季节和日变化规律的影响, 通常无法准确反映颗粒物真实浓度水平。研究表明, 奶牛舍内颗粒物浓度因受环境调控措施等影响, 一般呈现季节性变化规律, 且日变化总体呈现白天波动大、夜间平稳的特征^[10-11]。除了间歇式采样, 部分研究采用连续性的测量方法, WINKEL 等^[10,12]选取了 1 s 的采样间隔对自然通风奶牛舍的颗粒物浓度进行连续监测。过高的采样频率尽管能够较好的反映颗粒物浓度波动情况, 但也会带来数据冗余, 增大粗大误差引入的风险和传感器的工作负荷等。

近年来, 传感器和物联网技术的快速发展为最大限度的获取环境参数的真实水平提供了新方法。与此同时, 传感器监测方法优化的研究也不断得到重视, 其中误差分析是一种常用的优化方法, 即通过比较不同采样方式下被测数据与真值间的误差确定最优的监测方法。基

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: 鲁煜建, 博士生, 研究方向为设施畜禽养殖环境与控制。Email: luyujian@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。

于物联网环境在线监测系统,以17个采样点的5 min连续测量结果为真值,李永振等^[13]采用系统聚类 and 误差分析的方法对自然通风奶牛舍内颗粒物监测设备的布点位置和数量进行了优化,在保证监测结果准确性的前提下降低了设备成本投入。YEO等^[14]采用误差分析法探究能够代表整栋猪舍温度的最佳传感器布点位置。目前,多数研究以优化采样点位置和数量为主,对采样间隔优化的研究鲜有报道。基于误差分析方法,ULENS等^[15]和BJERG等^[16]分别对猪舍氨气排放和奶牛舍甲烷浓度检测的合理采样时间和采样间隔进行了研究,但二者一方面缺乏对不同采样间隔下小时均值、日均值的系统探究;另一方面,相较于气体,畜禽舍内的颗粒物来源更广,影响因素更多,变化更加复杂^[17]。JOO等^[12]的监测结果显示,牛舍内颗粒物与污染气体浓度呈现出不同的日变化规律。宋卿卿等^[18]以10 s采样间隔获取的暴露结果为基准值,探讨了不同采样间隔下(30 s和1、5、10、30、60 min)细颗粒物个体暴露结果与基准值的变异率,

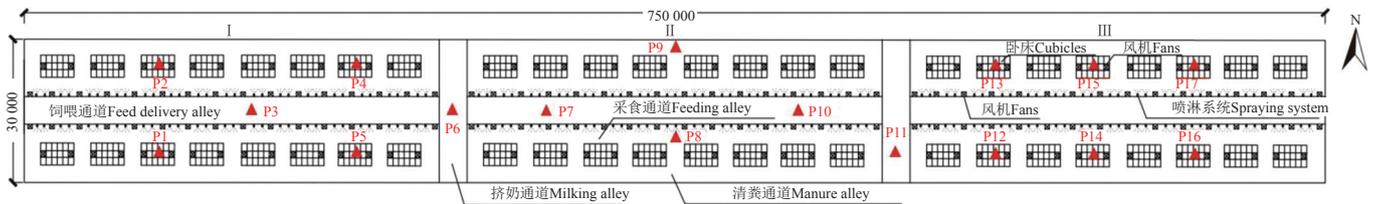
确定最优采样间隔为10 min,但畜禽舍内颗粒物环境与大气和人居环境相差较大,二者不具有可比性。

本研究通过在自然通风奶牛舍内构建物联网颗粒物浓度在线监测系统,以多点、长期的高频率监测结果为真值,采用误差分析的方法,确定秋冬季节奶牛舍颗粒物浓度日均值和小时均值的合理采样间隔。

1 材料与方法

1.1 试验奶牛舍基本信息与日常管理操作

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栋自然通风泌乳奶牛舍中进行。如图1所示,试验牛舍共饲养荷斯坦奶牛约1200头,牛舍采用4列散栏卧床对头布置,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。牛舍尺寸为750 m(长)×30 m(宽)×4 m(檐高),采用双坡可活动屋面和钟楼屋顶的建筑物结构,屋脊东西走向。



注: I、II、III为牛舍3个饲养区域;P1~P17为颗粒物浓度采样点(▲);图中数据的单位为mm。

Note: I, II, III represent the three housing sections of the barn; P1~P17 represent PM concentration sampling points (▲); The unit of data in figure is millimetre.

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 concentration sampling points

日常管理操作,奶牛卧床与饲喂通道上方布置扰流风机,颈夹上方布置喷淋装置,根据牛舍内的温度变化状况对风机和喷淋装置进行调控。每日05:00–07:00、13:00–15:00、21:00–23:00挤奶,期间进行喂料、推料、清粪、牛床垫料更换等操作。

1.2 监测设备

基于物联网的奶牛舍颗粒物浓度在线监测系统主要由监测设备、网络传输和云平台构成。监测设备PCMU(particulate concentration monitoring unit)主要由单片机、TSP(SDS198,诺方电子有限公司,河南)、PM_{2.5}(PMSX003N,攀腾科技有限公司,北京)传感器、时钟模块等组成。TSP传感器的量程为0~20 000 μg/m³,灵敏度为1 μg/m³,精度为±30 μg/m³,功耗0.35 W;PM_{2.5}传感器的量程为0~500 μg/m³,灵敏度为1 μg/m³,精度为±10 μg/m³,功耗1.5 W。二者均采用激光散射原理进行测量。监测设备的采样频率为1 min,每5 min将TSP和PM_{2.5}浓度均值通过4 G网络自动上传云平台并存储至数据库。

1.3 布点位置

如图1所示,在借鉴文献^[10-12]对于奶牛舍环境监测布点方法的基础上,兼顾不同功能区可能产生的颗粒物浓度差异,在试验牛舍的3个区域内共布置了17个颗粒物浓度监测设备,即区域I内的5点(P1~P5),区域II内的6点(P6~P11)和区域III内的6点(P12~

P17)。其中,P3采样点位于屋顶通风口下方,P6和P11位于挤奶通道,P7和P10位于饲喂通道,P8和P9分别位于采食通道和清粪通道,其余采样点均位于卧床上方。除屋顶通风口下方采样高度为距离地面9.0 m外,其他测点高度均为2.5 m(奶牛身高1.5 m,奶牛卧床上边缘距离地面1.2 m)。

1.4 相对误差及其分布情况计算

本研究将牛舍内17个采样点的5 min连续测量结果的平均浓度视为整栋舍的颗粒物浓度“真值”,5 min是监测设备上传数据的最高频率。首先分别计算不同采样间隔下颗粒物浓度每日的平均值(日均值)和每小时的平均值(小时均值)与真值的相对误差(E_r),计算见式(1),随后统计所有 E_r 值在5%和10%范围内的占比。依据奶牛舍颗粒物浓度现场采样精度的不同需求,借鉴生物分析检测中的可接受标准,当相对误差占比大于66.7%时,则认为该采样间隔在5%或10%的范围内可接受^[19],否则视为不可接受。

$$E_r = \frac{C_t - C_r}{C_r} \quad (1)$$

式中 E_r 为不同采样间隔下颗粒物浓度日均值或小时均值与真值的相对误差,%; C_t 为不同采样间隔下颗粒物浓度日均值或小时均值,μg/m³; C_r 为17个采样点的日均值或小时均值,μg/m³。

日均值和小时均值的采样间隔优化是基于秋季和

冬季所有的测量数据。采样间隔的选择借鉴了前人研究中的常用设定^[6-9]。在日均值采样间隔优化上, 计算了30 min和1、2、3、6、12 h采样间隔下秋冬季节颗粒物浓度日均值与真值的相对误差占比情况。在小时均值采样间隔优化上, 根据牛舍日常生产管理操作将全天划分为白天(05:00–23:00)与夜间(23:00–05:00), 计算了10、15、20、30 min和1 h采样间隔下白天与夜间颗粒物浓度的小时均值与真值的相对误差占比。此外, 考虑到生产管理操作, 如清粪、喂料等会导致颗粒物浓度升高和波动增加, 对奶牛与工作人员的健康产生影响^[20], 本文计算了生产管理操作期间(05:00–07:00、13:00–15:00、21:00–23:00)颗粒物浓度的小时均值与真值的相对误差占比。

1.5 数据处理与分析

数据清洗可以保证分析数据的可靠性, 主要包括: 剔除超出传感器量程的数据, 利用箱型图剔除由于设备损坏、受扰动等导致的粗大误差。此外, 因为污染天气(例如雾霾天等)会对舍内颗粒物浓度产生显著影响, 研究表明, 当空气质量指数(air quality index, AQI)大于100时, 畜禽舍内的颗粒物浓度会受到舍外颗粒物浓度的影响^[21], 因此删除该部分数据。清洗后的数据通过重采样方式得到日均值和小时均值。采用克鲁斯卡尔-沃利斯检验(K-W检验)的非参数检验方法进行显著性分析可知, $P < 0.05$ 。采用Python(3.7)软件对数据进行处理、

分析和画图。

2 结果与分析

2.1 颗粒物浓度日均值的采样间隔优化

为便于展示不同季节的颗粒物日均浓度的变化情况, 以秋季10月和冬季12月为例, 图2展示了不同采样间隔(5、30 min和1、2、3、6、12 h)下的TSP和PM_{2.5}日均浓度的变化规律。总体而言, 秋季和冬季奶牛舍TSP和PM_{2.5}浓度日均值及其变化存在较大的差异, 但在同一季节内, 不同采样间隔下TSP和PM_{2.5}浓度与真值呈现出相似的变化规律。随着采样间隔的增加, 颗粒物浓度与真值的偏差逐渐增大。例如, 在10月份, 当采样间隔为30 min和1、2、3 h时, TSP与PM_{2.5}日均浓度与真值的变化趋势接近, 当采样间隔扩大至6 h和12 h时, TSP与PM_{2.5}的日均浓度分别为108.7、56.3 μg/m³和104.2、50.3 μg/m³, 与5 min采样间隔下的真值(TSP: 115.8 μg/m³、PM_{2.5}: 57.6 μg/m³)间呈现显著偏差($P < 0.05$)。此外, 相较于TSP, 秋冬季节不同采样间隔下, PM_{2.5}浓度与真值的变化趋势更加接近。这可能是由于牛舍内PM_{2.5}主要来自于奶牛粪便、饲料等, 大部分时间内浓度都处于比较稳定的状态, 而TSP的来源更广、影响其浓度波动的因素更多, 因此受采样间隔的影响更大^[22]。LU等^[20]的研究中同样发现牛舍内TSP浓度的波动较PM_{2.5}更大。

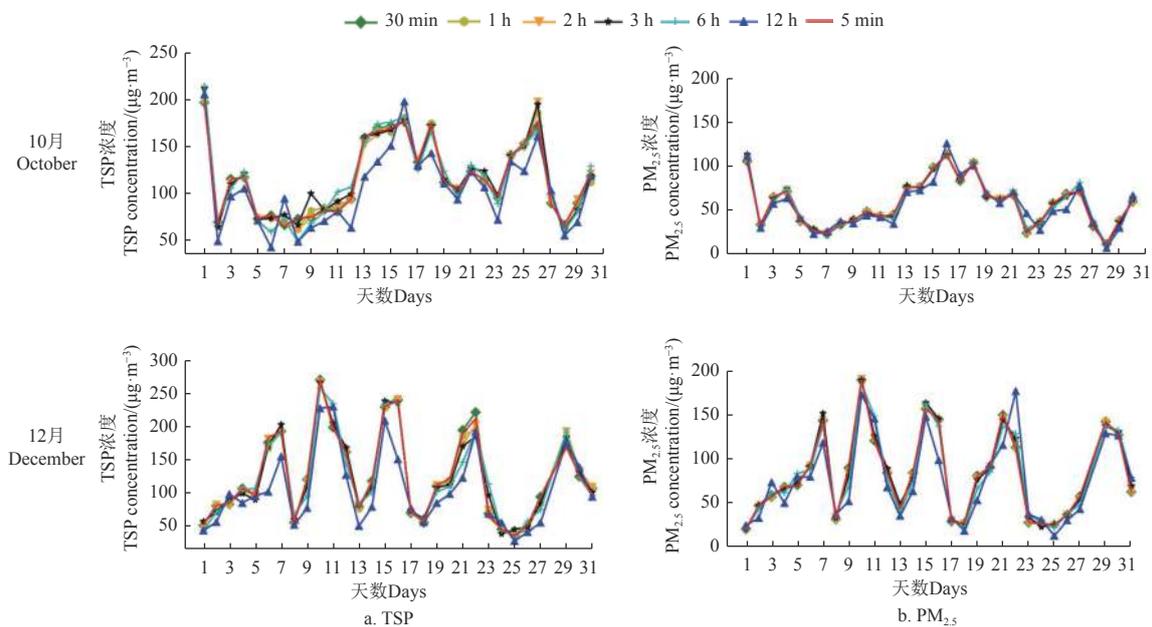


图2 不同采样间隔下10月和12月的总悬浮颗粒物(TSP)和PM_{2.5}日均浓度变化规律

Fig.2 The change of daily average total suspended particulate (TSP) and PM_{2.5} concentrations under varied sampling interval in October and December

综上所述, 在秋冬季节将颗粒物浓度采样间隔延长到30 min至3 h时, 测量的TSP和PM_{2.5}浓度能较好反映在该季节下自然通风奶牛舍颗粒物浓度日均值的变化趋势。但是, 如果要更加准确的测定牛舍内颗粒物日均浓度值, 则需要对不同采样间隔下颗粒物浓度日均值的误差进行量化, 以衡量不同采样间隔可能带来的不确定性。

表1和表2分别展示了不同采样间隔下(30 min和1、2、3、6、12 h)秋季和冬季TSP和PM_{2.5}日均浓度与真值的相对误差在5%和10%范围内的占比。由表1和表2可知, 秋冬季节TSP和PM_{2.5}日均浓度的相对误差在5%和10%范围内的占比均随着采样间隔的增大而减小。在5%的相对误差允许范围内, 秋季和冬季TSP

日均浓度的最大可接受采样间隔分别为 2 h（秋季）和 1 h（冬季），而 $PM_{2.5}$ 的最大可接受采样间隔分别为 3 h（秋季）和 1 h（冬季）。

表 1 秋季不同采样间隔下 TSP 和 $PM_{2.5}$ 日均浓度与真值的相对误差 (E_r) 在 5% 和 10% 范围内的占比

Table 1 The proportion of relative error (E_r) between daily averaged TSP and $PM_{2.5}$ concentrations under varied sampling interval and true value in autumn within the range of 5% and 10% %

采样间隔 Sampling interval	$E_r \leq 5\%$		$E_r \leq 10\%$	
	TSP	$PM_{2.5}$	TSP	$PM_{2.5}$
30 min	98.9	100.0	100.0	100.0
1 h	83.1	95.8	97.2	100.0
2 h	67.6	84.5	90.1	97.2
3 h	50.7	69.0	84.5	95.8
6 h	35.2	42.3	64.8	74.6
12 h	22.5	16.9	36.6	43.7

表 2 冬季不同采样间隔下 TSP 和 $PM_{2.5}$ 日均浓度与真值的 E_r 在 5% 和 10% 范围内的占比

Table 2 The proportion of E_r between daily averaged TSP and $PM_{2.5}$ concentrations under varied sampling interval and true value in winter within the range of 5% and 10% %

采样间隔 Sampling interval	$E_r \leq 5\%$		$E_r \leq 10\%$	
	TSP	$PM_{2.5}$	TSP	$PM_{2.5}$
30 min	87.6	100.0	98.9	100.0
1 h	80.9	76.4	93.3	100.0
2 h	59.5	60.6	84.2	96.6
3 h	41.6	50.1	76.4	85.4
6 h	31.5	33.7	48.3	79.8
12 h	10.1	13.5	24.7	55.1

首先，秋季 TSP 和 $PM_{2.5}$ 日均值的最大可接受采样间隔大于冬季，主要与试验牛舍在秋季和冬季采用了不同环境调控措施有关。秋季由于舍外温度相对较高，试验牛舍的卷帘、可活动屋面全部打开，较高的通风量会加速牛舍内颗粒物的扩散，使得 TSP 与 $PM_{2.5}$ 浓度变化更加平稳^[20]。冬季舍外温度较低，为保证舍内温度，牛舍的卷帘、风机处于关闭状态，相对密闭的舍内环境（低通风量）使颗粒物浓度在受到生产管理操作影响时波动更加剧烈，因此，相较于秋季，冬季 TSP 与 $PM_{2.5}$ 日均浓度的监测需要更小的采样间隔。

其次，秋季 TSP 的日均浓度最大可接受采样间隔小于 $PM_{2.5}$ ，这主要是因为试验牛舍秋季多数时间会开启风机进行降温，较高的舍内风速一方面会加速细颗粒物沉降至不同物体的表面，降低舍内 $PM_{2.5}$ 的浓度^[23-24]，另一方面风速会削弱因生产管理操作导致的颗粒物浓度波动^[20]，使得舍内 $PM_{2.5}$ 浓度的波动较小。对于 TSP，尽管位于颈夹上方的喷淋会降低舍内 TSP 浓度，但位于卧床和采食通道上方的风机会吹起饲料、垫料等粗颗粒物，导致舍内 TSP 浓度的增加和剧烈波动。LI 等^[21]在鸡舍中同样发现风机运行会导致 TSP 浓度升高的现象，并认为高风速也会使得已经落至地面的灰尘等粗颗粒物再次悬浮至空气中，从而增加舍内 TSP 浓度和波动。因此，需要较小的采样间隔才能够保证秋季牛舍内 TSP 日均浓度的准确监测。同一环境调控措施下，牛舍内 TSP 日均

值的最大采样间隔小于 $PM_{2.5}$ ，这间接表明环境调控措施对舍内粗颗粒物的影响较大。

2.2 颗粒物浓度小时均值的采样间隔优化

2.2.1 白天与夜间

受奶牛节律和生产管理操作的影响，奶牛舍颗粒物浓度日变化呈现白天波动大，夜间波动小的变化规律^[10-11]。因此，可以在白天和夜间合理地设置不同采样间隔来监测奶牛舍颗粒物的小时均值浓度波动，以便以更小的代价获得准确的结果。

表 3 和表 4 分别展示了秋季和冬季不同采样间隔下（10、15、20、30 min 和 1 h）白天（05:00–23:00）与夜间（23:00–05:00）TSP 和 $PM_{2.5}$ 小时均值浓度与真值的相对误差在 5% 和 10% 范围内的占比。在 5% 相对误差允许范围内，秋季白天 TSP 和 $PM_{2.5}$ 小时均值的最大可接受采样间隔分别为 20 和 30 min，夜间 TSP 和 $PM_{2.5}$ 小时均值的最大可接受采样间隔均为 30 min；冬季白天和夜间的 TSP 和 $PM_{2.5}$ 小时均值的最大可接受采样间隔均为 15 和 30 min。

首先，在 5% 相对误差允许范围内，秋季白天 TSP 浓度的最大可接受采样间隔小于夜间，而冬季白天与夜晚 TSP 浓度的最大可接受采样间隔相同的原因可能是因为秋季昼夜温差较大，牛舍内白天开启风机而夜间关闭风机，由于没有风机和管理操作的影响，秋季夜间的 TSP 浓度变化较白天更加平稳，因而可以适当增大采样间隔。冬季的白天和夜晚均关闭风机，在相对密闭的环境下，白天与夜间的颗粒物小时均值浓度的采样间隔保持一致。

表 3 秋季不同采样间隔下白天与夜间 TSP 和 $PM_{2.5}$ 小时浓度均值与真值的 E_r 在 5% 和 10% 范围内的占比

Table 3 The proportion of E_r between hourly averaged TSP and $PM_{2.5}$ concentrations under varied sampling interval and true value in autumn daytime and nighttime within the range of 5% and 10% %

时间段 Time period	采样间隔 Sampling interval	$E_r \leq 5\%$		$E_r \leq 10\%$	
		TSP	$PM_{2.5}$	TSP	$PM_{2.5}$
白天 Daytime (05:00–23:00)	10 min	91.4	98.3	98.7	99.8
	15 min	80.2	94.7	94.2	99.2
	20 min	70.1	88.7	90.7	97.5
	30 min	55.2	78.5	80.9	93.0
	1 h	31.7	51.1	59.3	75.6
夜间 Nighttime (23:00–05:00)	10 min	95.5	99.1	99.1	100
	15 min	88.3	96.7	95.1	97.4
	20 min	80.0	93.9	93.8	96.7
	30 min	68.1	86.2	88.7	95.5
	1 h	44.0	63.1	70.8	85.9

其次，相较于日均值，秋冬季节 TSP 小时均值的最大可接受采样间隔小于 $PM_{2.5}$ 的规律更加明显，进一步表明舍内粗颗粒物的浓度波动较细颗粒物更加剧烈，需要更短的采样间隔。除了受到环境调控措施的影响，生产管理操作、奶牛的活动等因素通常也会导致舍内粗颗粒物的波动。JOO 等^[12]发现奶牛的活动会导致牛舍内 TSP 浓度的升高。因此，采样间隔的确定应根据不同粒径的颗粒物差异化选择。

表 4 冬季不同采样间隔下白天与夜间 TSP 和 PM_{2.5} 小时浓度均值与真值的 E_r 在 5% 和 10% 范围内的占比

Table 4 The proportion of E_r between hourly averaged TSP and PM_{2.5} concentrations under varied sampling interval and true value in winter daytime and nighttime within the range of 5% and 10%

时间段 Time period	采样间隔 Sampling interval	$E_r \leq 5\%$		$E_r \leq 1\%$	
		TSP	PM _{2.5}	TSP	PM _{2.5}
白天 Daytime (05:00–23:00)	10 min	82.5	99.7	94.4	100.0
	15 min	69.1	97.4	87.1	99.7
	20 min	62.5	94.	83.4	99.4
	30 min	50.3	81.1	74.3	95.8
	1 h	33.4	55.3	57.4	81.0
夜间 Nighttime (23:00–05:00)	10 min	81.5	99.8	94.3	100.0
	15 min	70.3	98.8	89.0	99.8
	20 min	63.6	95.7	83.8	99.6
	30 min	54.5	85.7	75.5	98.4
	1 h	37.4	63.4	57.8	85.7

图 3 展示了秋季不同采样间隔下 (10、15、20、30 min 和 1 h) 的 TSP 和 PM_{2.5} 小时均值浓度变化规律。总体而言, TSP 和 PM_{2.5} 浓度均呈现白天波动大, 夜间波动小

的特征, 相较于 PM_{2.5}, TSP 的波动更加明显。WINKEL 等^[10] 同样发现自然通风奶牛舍内 PM₁₀ 浓度在白天具有较多的波动峰值, 而在夜间处于相对平稳状态。随着采样间隔增加, 测量值与真值的偏离逐渐增大, 当采样间隔为 1 h 时, TSP 与 PM_{2.5} 浓度的日变化与真值尽管具有相同的变化趋势, 但在小时浓度峰值和谷值点处相差较大 (图 3 局部图), 这说明峰值和谷值浓度测量失准是采样间隔较大时的主要误差来源。此外, 采样时间也会影响检测结果的准确性, 由于牛舍的管理时间不同, 当采样期间未受生产管理操作影响时, 颗粒物检测结果可能会偏小, 当采样时间受管理操作影响时, 监测值可能偏高。陈健等^[8] 在每天 08:00–19:00 时间段内每隔 2 h 采样一次, 得到秋季和冬季自然通风奶牛舍 PM_{2.5} 的最大值分别 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 小于本研究中 PM_{2.5} 在秋季和冬季的峰值 (152.3、250.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。KASSIKA 等^[25] 在挤奶、喂料等过程通过 1 min 的采样间隔得到的不同牛舍的 PM_{2.5} 小时均值浓度峰值均高于 264 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

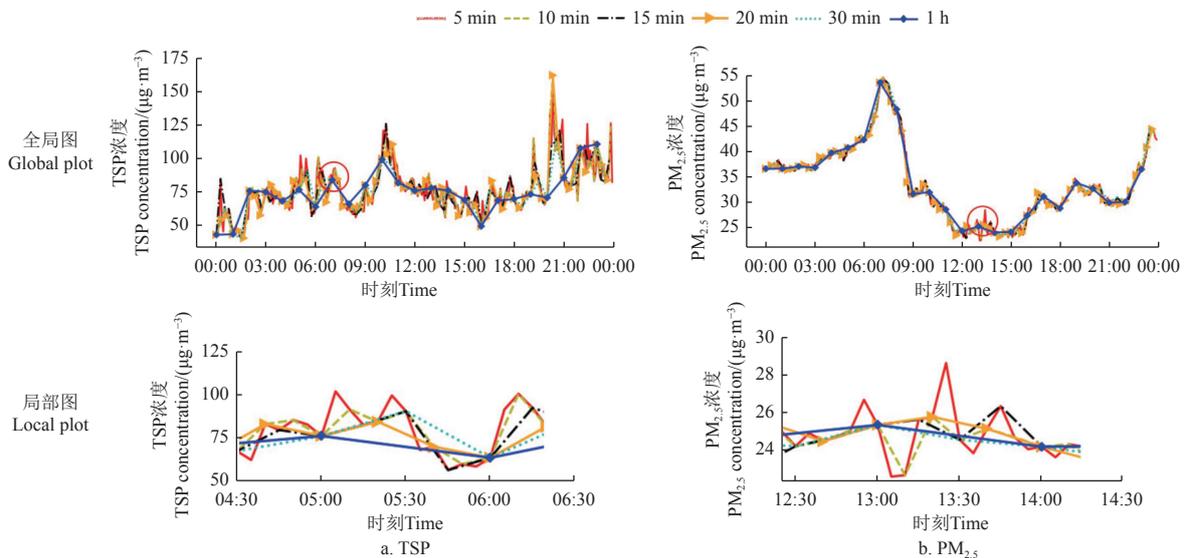


图 3 秋季不同采样间隔下的 TSP 和 PM_{2.5} 小时均值浓度全局和局部变化规律

Fig.3 The global and local variations of hourly mean TSP and PM_{2.5} concentrations under varied sampling interval in autumn

2.2.2 管理操作期间

由图 3 可知, 管理操作期间奶牛舍内颗粒物浓度的波动相对较大。因此, 采用合理的采样间隔测量该时段的颗粒物浓度对于表征牛舍颗粒物浓度峰值以及评估颗粒物对动物和工作人员的潜在健康风险具有重要作用。表 5 展示了秋冬季节不同采样间隔下 (10、15、20、30 min 和 1 h) 生产管理操作期间 TSP 和 PM_{2.5} 小时浓度均值与真值的相对误差在 5% 和 10% 范围内的占比。结果表明, 在 5% 误差范围内, 秋季生产管理期间 TSP 和 PM_{2.5} 小时均值的最大可接受采样间隔为 10 和 20 min, 而冬季 TSP 和 PM_{2.5} 最大可接受采样间隔为 10 和 20 min, 普遍高于 TSP 与 PM_{2.5} 在白天与夜间的小时均值最大可接受采样间隔。由于生产管理期间 TSP 和 PM_{2.5} 浓度的波动更加剧烈, 需要更短的采样间隔来表征颗粒物浓度特征, 这与图 3 中得到的需要在峰值点采用更高的采样间隔的结论一致。

表 5 秋冬季节不同采样间隔下生产管理操作期间的 TSP 和 PM_{2.5} 小时浓度均值与真值的 E_r 在 5% 和 10% 范围内的占比
Table 5 The proportion of E_r between hourly averaged TSP and PM_{2.5} concentrations under varied sampling interval and true value in autumn and winter management time within the range of 5% and 10%

时间段 Time period	采样间隔 Sampling interval	$E_r \leq 5\%$		$E_r \leq 10\%$	
		TSP	PM _{2.5}	TSP	PM _{2.5}
秋季 Autumn	10 min	70.5	92.1	88.2	98.9
	15 min	60.2	86.3	81.3	97.6
	20 min	58.8	78.4	77.3	90.7
	30 min	53.0	63.5	71.3	81.6
	1 h	40.2	50.8	62.2	75.3
冬季 Winter	10 min	74.5	95.7	90.4	99.2
	15 min	61.3	88.4	83.1	97.9
	20 min	56.8	76.4	78.9	88.1
	30 min	54.7	62.0	75.6	83.8
	1 h	44.4	55.3	60.4	79.9

相对于 PM_{2.5}, TSP 具有更小的采样间隔, 表明生产管理操作过程如喂料、清粪、更换垫料等操作对 TSP 浓

度的影响大于 $PM_{2.5}$ 。宋卿卿等^[18]通过误差分析方法得到通常情况下 10 min 的采样频率可以满足个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平的评价,但当调查对象处于交通微环境、频繁更换所处微环境或存在吸烟等对 $PM_{2.5}$ 暴露影响较大的行为时,建议采用 1 min 或更高的采样频率,这与本研究得到的在颗粒物浓度波动更加剧烈的管理操作期间需要减小采样间隔的结论一致。

3 结论

该研究通过在大型自然通风奶牛舍内构建颗粒物浓度在线监测系统,以舍内 17 个采样点 5 min 采样间隔的连续监测结果为真值,基于误差分析方法,对秋冬季节奶牛舍颗粒物浓度的日均值和小时均值采样间隔进行优化,得到如下结论:

1) 为反映奶牛舍 TSP 和 $PM_{2.5}$ 浓度在秋季和冬季的日均浓度, TSP 采样间隔控制在 2 h (秋季) 和 1 h (冬季) 以内, $PM_{2.5}$ 控制在 3 h (秋季) 和 1 h (冬季) 以内。

2) 为反映秋冬季颗粒物浓度的小时均值及其波动,白天 TSP 采样间隔为 20 min (秋季) 和 15 min (冬季),夜间 TSP 采样间隔为 30 min (秋季) 和 15 min (冬季),白天和夜间 $PM_{2.5}$ 采样间隔均为 30 min。

3) 为反映生产管理操作对舍内颗粒物浓度及其波动的影响,秋冬季 TSP 浓度采样间隔为 10 min, $PM_{2.5}$ 浓度采样间隔为 20 min。

[参考文献]

- [1] WILLIAMS D A L, BREYSSE P N, MCCORMACH 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(27): 2-9.
- [2] 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.
- [3] MITCHELL D C, ARMITAGE T L, SCHENKER M B, et al. Particulate matter, endotoxin, and worker respiratory health on large californian dairies[J]. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2015, 57(1): 79-87.
- [4] CALVET S, GATES R S, ZHANG G, et al. Measuring gas emissions from livestock buildings: A review on uncertainty analysis and error sources[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 116: 221-231.
- [5] MUI K W, WONG L T, HUI P S. A new sampling approach for assessing indoor air quality[J]. *Indoor and Built Environment*, 2006, 15(2): 165-172.
- [6] 高玉红, 郭建军, 李宏双, 等. 寒区奶牛舍环境温湿度、粉尘和气载细菌的季节性变化及其相关性研究[J]. *畜牧兽医学报*, 2016, 47(3): 620-629.
Gao Yuhong, Guo Jianjun, Li Hongshuang, et al. Seasonal variation of ambient temperature, relative humidity, dust and airborne bacteria in dairy cowshed and their correlation in chill region[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2016, 47(3): 620-629. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王超, 赵娟娟, 张伟涛, 等. 全舍饲大跨度奶牛舍粉尘浓度的变化规律[J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51(11): 44-48.
WANG Chao, ZHAO Juanjuan, ZHANG Weitao, et al. Variations in dust content in the air in large-span closed houses for dairy cows[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 51(11): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈健, 顾宪红, 彭丹丹, 等. 北京市郊区典型奶牛舍秋季温热环境和空气质量的评价[J]. *中国奶牛*, 2018 (10): 1-5.
CHEN Jiang, GU Xianhong, PENG Dandan, et al. Thermal environment and air quality of autumn in the typical barn of lactating cow in Beijing Suburb[J]. *China Dairy*, 2018 (10): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周英昊, 武震钢, 毛森, 等. 冀北不同建筑类型奶牛舍冬季环境质量比较[J]. *家畜生态学报*, 2021, 42 (2): 50-55.
ZHOU Yinghao, WU Zhengang, MAO Sen, et al. Comparison of environmental quality of cow houses with different building types in north Hebei province in winter[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2021, 42(2): 50-55. (in Chinese with English abstract)
- [10] WINKEL A, MOSQUER 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
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)
- [14] YEO U H, LEE S Y, PARK S J, et al. Determination of the optimal location and the number of sensors for efficient heating, ventilation, and air conditioning system operation in a mechanically ventilated pig house[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 229: 1-17.
- [15] ULENS T, DAELMAN M R, MOSQUERA J, et al. Evaluation of sampling strategies for estimating ammonia emission factors for pig fattening facilities[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 140: 79-90.
- [16] BJERG B, ZHANG G, MADSEN J, et al. Methane emission from naturally ventilated livestock buildings can be determined from gas concentration measurements[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 5989-6000.
- [17] 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)
- [18] 宋卿卿, 孙庆华, 杜艳君, 等. 监测频率对 $PM_{2.5}$ 暴露水平的影响研究[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(11): 951-956.
SONG Qingqing, SUN Qinhua, DU Yanjun, et al. Effects of monitoring frequency on $PM_{2.5}$ personal exposure level[J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(11): 951-956. (in Chinese with English abstract)
- [19] HOFFMAN D. Statistical considerations for assessment of

- bioanalytical incurred sample reproducibility[J]. The American Association of Pharmaceutical Scientists Journal, 2009, 11(3): 570-580.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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)
- [23] KIM J J, HANN T, LEE S J. Effect of flow and humidity on indoor deposition of particulate matter[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113263.
- [24] THATCHER T L, LAI A C K, 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.
- [25] KAASIK A, MAASIKMETS M, IAGRE. Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114: 223-231.

Optimization of sampling intervals for particulate matter concentration monitoring in a large naturally ventilated dairy barn

LU Yujian^{1,2}, FANG Zhiwei¹, LI Yongzhen^{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: Generation and emission of particulate matter (PM) from dairy farming have a potential effect on the health and welfare of the animals, farm workers and even the neighbors. Monitoring accuracy of the PM concentration depends much on the number and location of sampling points as well as the sampling interval (SI). Most PM studies used intermittent sampling methods, such as sampling the concentration for a couple of days in a season or in several seasons, which were unable to accurately reflect the actual PM concentration level and variation inside the intensive dairy building. To determine the reasonable SI of PM sensors, this study developed an Internet of Things (IoT)-based monitoring system for PM concentration in an intensive naturally ventilated dairy barn, in which a 17-point continuous concentration monitoring of PM less than 2.5 μm in aerodynamic diameter ($\text{PM}_{2.5}$) and the total suspended particulate (TSP) was carried out in autumn and winter, and its 5-minute mean values were regarded as relatively true values (RTV). Using error analysis, the daily averaged PM concentration with 30 min and 1, 2, 3, 6, 12 h SI in autumn and winter and the hourly mean PM concentration with 10, 15, 20, 30 min and 1 h SI during the day (05:00-23:00), night (23:00-05:00) and daily management periods (05:00-07:00, 13:00-15:00, 21:00-23:00) were first computed, respectively; then their relative errors (E_r) with RTV were counted within 5% and 10% range; and finally, the maximum accepted SI for daily and hourly mean PM concentration measurements were determined based on acceptance criteria in bioanalytical method (66.7%). The results showed that within 5%, when the SI for TSP concentration were set within 2 h (in autumn) and 1h (in winter), and they were within 3 h (in autumn) and 1 h (in winter) for $\text{PM}_{2.5}$ measuring, respectively. It can accurately obtain the daily average PM concentration of the naturally ventilated dairy barn in autumn and winter. When the SI were at 20 min (in autumn) and 15 min (in winter) in daytime, and 30 min (in autumn) and 15 min (in winter) in nighttime for the TSP measurements, and 30 min for $\text{PM}_{2.5}$ daytime and nighttime (in autumn and winter), an accurate monitoring could be obtained on hourly mean PM concentration and its fluctuations. When the sampling interval for TSP was 10 min, and the interval for $\text{PM}_{2.5}$ was on 20 min in autumn and winter, respectively, the measurement data can reflect the impact of daily management on the PM concentration inside the barn. The findings of this study can be applied as a standardized procedure to continuously track the PM concentration in an intensive naturally ventilated dairy barn.

Keywords: particulate matter; ventilation; error analysis; dairy cow; sampling interval; internet of things