doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.05.040

# 夏季奶牛场生物气溶胶分布规律与环境影响因子研究

汝　林[1]　邓书辉[2]　丁露雨[3,4]　吕　阳[3,4]　李奇峰[3,4]　施正香[5]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院,大庆 163319;2.黑龙江八一农垦大学土木水利学院,大庆 163319;
3.北京市农林科学院信息技术研究中心,北京 100097;4.国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097;
5.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

**摘要**:为探究典型季节下的奶牛场生物气溶胶的分布规律和多元环境因子对其影响程度,对天津市某规模化奶牛场生物气溶胶、环境参数进行连续采集,分析了夏季奶牛场生物气溶胶浓度和载体粒径的时空分布规律,同时筛选出对其浓度具有重要影响的环境因子。结果表明,在空间分布上,牛场近地面 1 m 高度处的生物气溶胶浓度显著高于近地面 4 m 高度处浓度($P<0.01$)。在粒径分布上,各采样点的分布规律无显著差异($P>0.05$),不同粒径粒子所占比例接近且存在粒径越小所占比例越小的趋势,粒径大于 2.1 μm 的粒子约占总数的 80 %。运用随机森林模型得到了 10 个影响因子对生物气溶胶浓度的影响程度,其中风向(WD)、温度(T)、紫外辐射强度(UV)、悬浮颗粒物浓度(PM100)等对浓度影响较大。为进一步探究影响因子之间的关系,通过层聚类的方法分析各影响因素之间的共线性关系,发现 PM10、PM1 与 PM2.5 之间以及 UV 与 GHI 之间具有强共线性关系,可以去除强共线性影响因子,保留组内一种环境因子为代表,以节约采集成本。本研究可为国内牛场空气环境污染排放测定提供参考。

**关键词**:生物气溶胶;时空分布规律;浓度预测模型;环境因子影响程度

**中图分类号**:S823;X835　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)05-0376-09　　**OSID**:

# Dispersion and Environmental Influencing for Bioaerosols in Dairy Farm in Summer

RU Lin[1]　DENG Shuhui[2]　DING Luyu[3,4]　LÜ Yang[3,4]　LI Qifeng[3,4]　SHI Zhengxiang[5]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *College of Civil and Hydraulic Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
3. *Research Centre for Information Technology*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
4. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*
5. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: Bioaerosol and environmental parameters were continuously collected in a large-scale dairy farm in Tianjin of China to explore the distribution of bioaerosols and the influence of multiple environmental factors on its concentration for dairy farm in typical a season. The temporal and spatial variations of concentration and particle size for bioaerosols in the dairy farm in summer were analyzed, and the importance of measured environmental factors on the concentration of bioaerosols was illustrated. Results showed that the concentration of bioaerosols at 1 m height above the ground was significantly greater than that at 4 m ($P<0.01$). As for the dispersion of carrier particle size, there was no significant difference between varied sampling points ($P>0.05$). A smaller proportion was observed at the smaller particle size of carriers. About 80% of carriers had the particle size over 2.1 μm. The importance of 10 environmental factors were analyzed on affecting the concentration of bioaerosols based on the random forest algorithm. Wind direction (WD), temperature (T), ultraviolet radiation intensity (UV) and suspended particulate matter concentration (PM100) showed a greater influence than other factors. The collinearity relationship among different influencing factors were analyzed through the hierarchical clustering method. There was a strong collinearity relationship among PM10, PM1 and PM2.5, and so

收稿日期:2021-11-20　修回日期:2022-03-10

**基金项目**:国家自然科学基金项目(32102595)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-36)

**作者简介**:汝林(1996—),男,助理研究员,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail:rulinfighting@163.com

**通信作者**:邓书辉(1973—),男,教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail:dsh@vip.sina.com

did that between UV and GHI. This suggested that the strong collinearity influence factor can be removed to leave one factor within the group to saving the sampling cost. The conclusions obtained can provide a reference for the determination of air pollution emissions from domestic dairy farms.

**Key words**: bioaerosol; spatiotemporal dispersion law; concentration prediction model; importance of environmental factors

## 0　引言

我国奶牛养殖在集约化、标准化方向上快速发展，奶牛场的规模化养殖带来效益的最大化，同时也对周边环境造成了污染[1]。奶牛养殖过程中通过排泄物、饲料、垫料以及动物本身产生大量的微生物，这些微生物常以固体颗粒物或小液滴为载体形成生物气溶胶悬浮在空气中，引起各类气源传播疾病的发生，危害动物和养殖人员的健康，同时，由于环境因素变化，生物气溶胶也可借助气流运动向周边环境传播，从而造成生物污染，引发多点间人和动物的交叉感染[2-4]。生物气溶胶作为引发疾病感染的重要途径之一[5]，对其浓度及环境因子影响机制的研究与奶牛场周围环境生物安全防控息息相关。

随着社会各界关注度的提高，养殖业生物气溶胶相关的研究也逐渐增多[6-7]，李超等[8]分别对 5 个猪舍使用 ANDERSEN－6 级采样器在猪的鼻腔高度进行采样，研究猪舍环境微生物菌群组成；高云航等[9]对不同饲养阶段的牛舍选取 1.2～1.5 m 采样高度进行样品采集，研究空气中的细菌、真菌浓度并分析其粒径分布特征，但现有研究多以畜禽舍内环境及舍内生物气溶胶研究为主[8-11]，缺乏对场区内、畜舍外气溶胶变化规律的研究。相比于猪舍和鸡舍，牛舍多为开放或半开放舍，建筑举架高，舍内与舍外、舍与舍间、场内不同区域间空气交换迅速，生物气溶胶排放后在场内无组织传输，造成整场气溶胶浓度变化。因此，研究场区的生物气溶胶分布规律和影响因素对于了解牛场生物气溶胶传输特征和阻控点更具有指导意义。

华北地区夏季高温多雨，湿度较大，易滋生微生物，但同时紫外辐射较高，对微生物又有杀灭作用。本研究采集夏季天津市某牛场场区不同高度、不同位置的生物气溶胶，研究奶牛场整场生物气溶胶空间的分布规律，并建立浓度预测模型分析舍外温度、相对湿度、风速、风向、总辐射强度、紫外辐射强度、悬浮颗粒物浓度等环境因子对其的影响，为后续牛场生物气溶胶衰减速率及影响因子的研究提供先验知识，为牛场生物污染排放测算、牧场疾病防控提供基础数据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验牛场基本概况

试验于天津市北辰区某标准化奶牛场进行，试验牛场平面图如图 1 所示。天津市夏季主导风向为偏南风，为避免由于环境风因素对采样造成影响，选取其南北为空旷地带的奶牛场生产区 1 及粪污处理区进行试验。该奶牛场奶牛舍为双坡屋顶结构，采用自然风结合斜向风扇通风形式，舍长 180 m、宽 30 m、檐高 4 m。生产区 1 配有奶牛舍 5 栋，由南至北分别为：后备舍、泌乳牛舍（3 栋）、犊牛舍，并配有挤奶厅一个，每日挤奶 3 次（06:30—10:10、14:00—17:30 和 22:00—次日 01:30）。场内奶牛每日投喂

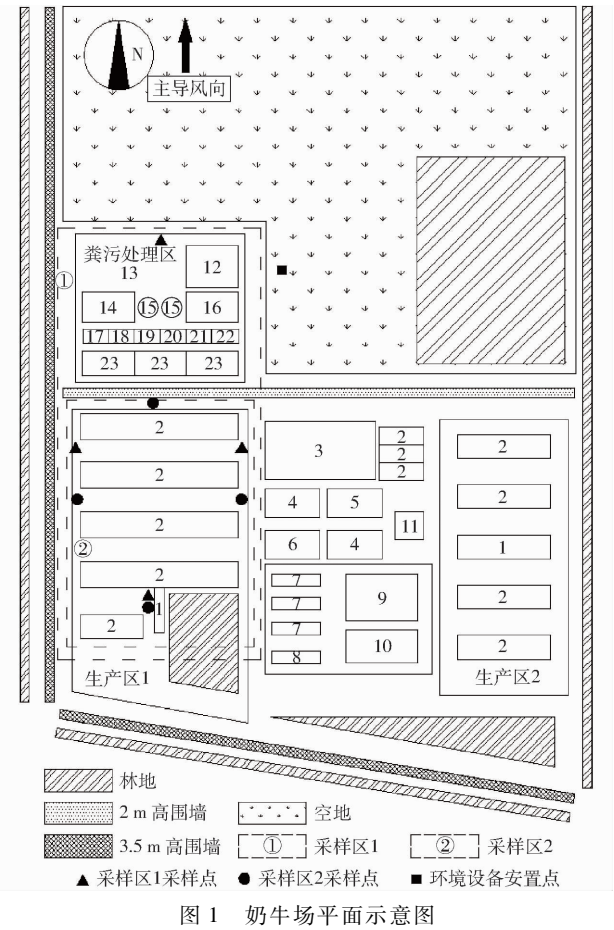



图 1　奶牛场平面示意图

Fig. 1　Plan of dairy farm

1. 奶厅　2. 奶牛舍　3. 青贮窖　4. 草棚　5. 料库　6. 机修及变电车间　7. 宿舍　8. 食堂　9. 果园　10. 办公楼　11. 专家楼　12. 存粪料棚　13. 粪场晾晒场　14. 晾晒场　15. 沼气发酵罐　16. 好氧池　17. 收集池　18. 干湿分离房　19. 联合用房　20. 二沉池　21. 混凝沉淀池　22. 锅炉房　23. 氧化塘

3 次(06:30、14:00 和 17:20),奶牛自由采食,试验期间,场内采用吸粪车进行清粪,每日清粪 2 次(06:30—10:10 和 14:00—17:30),吸粪车直接运到类污处理区进行干湿分离,并在此区域进行干粪平铺、翻转和晾晒,处理后堆至存粪料棚用于垫料回填。场内实行消毒车全天流动消毒,每周 3 次。

### 1.2 采样与分析方法

于 2021 年 5 月 11 日—6 月 1 日进行采样试验,其中 5 月 11—20 日对采样区 1(生产区 1 + 粪污处理区,图 1,表 1)进行采样试验,5 月 22 日—6 月 1 日对采样区 2(生产区 1,图 1,表 2)进行采样试验,选取各测试区域边界方向中间点作为东南西北采样点进行生物气溶胶采集,于当日 13:00—16:00 进行采样,每日采样一次,采样高度选取为近地面1 m 及 4 m。使用安德森六级采样器(TISCH,美国 Tisch Environmental Inc 公司)采集牛场环境中的空气样品,采样介质使用一次性营养琼脂平板(常德比克曼生物科技有限公司),为确保平皿上采集到的需氧菌个数处于 0 ~ 300 之间以减小误差、方便计数,采样时间控制为 5 ~ 10 min,采样主机流量设置为 28.3 L/min。现场采样结束后,于恒温培养箱中 37℃倒置培养 48 h 后开始计数[10-11],计数设备采用全自动菌落计数器(Icount - 30F 型,杭州讯数科技有限公司)。试验过程中确保操作无菌,每次采样后需对设备进行酒精擦拭消毒清理。同时采集环境参数:温度(T)、相对湿度(RH)(1 次/5 min,美国 ONSET 公司 HOBO - MX2301A 型空气温湿度记录仪,测量范围:-40 ~ 70℃和 0 ~ 100% RH,测量精度:±0.25℃(-40 ~ 0℃)、±0.2℃(0 ~ 70℃)和 ±2.5%(从 10% ~ 90% 典型),最大 ±3.5%,包括 25℃时的滞后;RH 低于 10% 或高于 90% 时典型 ±5%);风速(V)、风向(WD)(1 次/30 s,英国 Gill 公司 WINDMASTER PRO 型三维超声风速仪,测量范围:0 ~ 65 m/s 和 0° ~ 359°,精度:< 1.5% RMS 和 ±2°);总辐射强度(GHI,1 次/30 s,日本 EKO 公司MS - 40 型总辐射计,测量范围:285 ~ 3 000 nm,0 ~ 2 000 W/m$^2$,精度:误差小于读数的 5%(方向响应:< 20 W/m$^2$,温度响应(-10 ~ 40℃):< 3%;倾斜响应:±1%));紫外辐射强度(UV,1 次/30 s,荷兰 K&Z 公司 CUV5 型紫外辐照计,测量范围:280 ~ 400 nm,0 ~ 400 W/m$^2$;精度:日不确定性为读数的 5%(方向响应:<5%,非线性误差:<1%,温度响应:< -0.3%/℃));悬浮颗粒物(PM1、PM2.5、PM10、PM100)浓度采用中国农业大学研制的多通路 PMU(1 次/5 min,其中 PM1、PM2.5、PM10 浓度测量采用北京攀藤科技有限公司 PMSX003N 型数字式通用颗粒物传感器,测量范围:0 ~ 1 000 μg/m$^3$,精度:±15 μg/m$^3$;PM100 浓度测量采用济南诺方电子技术有限公司 SDS198 激光 PM100 传感器,测量范围:0 ~ 20 mg/m$^3$,精度:±30 μg/m$^3$)进行测量。

**表 1 采样区 1 各采样点四周地形情况**

**Tab.1 Terrain around each sampling point in sampling area 1**

| 采样点 | 位置 | 东方向 | 西方向 | 南方向 | 北方向 |
|---|---|---|---|---|---|
| 南(A) | 生产区 1 边界 | 奶厅建筑(檐高 4 m) | 运动场 | 病牛舍 | 泌乳牛舍 1 |
| 西(B) | 生产区 1 边界 | 运动场 | 树木(高度大于 10 m)及围墙(高度 3.5 m) | 道路 | 道路 |
| 东(C) | 生产区 1 边界 | 奶牛场机电车间、青储库房、饲料库房及生活区建筑 | 运动场 | 生产道路、树木 | 生产道路 |
| 北(D) | 粪污处理区边界 | 空旷田野 | 空旷田野 | 粪污处理区 | 空旷田野 |
| 中部生产区 1 与粪污处理区连接处 | | | 2 m 高围墙及部分树木 | | |

**表 2 采样区 2 各采样点四周地形情况**

**Tab.2 Terrain around each sampling point in sampling area 2**

| 采样点 | 位置 | 东方向 | 西方向 | 南方向 | 北方向 |
|---|---|---|---|---|---|
| 南(A) | 生产区 1 边界 | 奶厅建筑(檐高 4 m) | 运动场 | 病牛舍 | 泌乳牛舍 1 |
| 西(B) | 生产区 1 边界 | 运动场 | 树木(高度大于 10 m)及围墙(高度 3.5 m) | 道路 | 道路 |
| 东(C) | 生产区 1 边界 | 运动场及生产道路 | 运动场及生产道路 | 犊牛舍 | 粪污处理区、2 m 围墙及高度 5 m 左右树木 |
| 北(D) | 生产区 1 边界 | 机修及变电车间、青储库房、饲料库房及生活区建筑 | 运动场 | 生产道路、树木 | 生产道路 |

### 1.3 计数统计

现场样品采集后,经 48 h 培养,对培养皿上气载需氧菌菌落计数。由于采样器采集时会出现多个细菌由一个孔洞通过而产生重叠,造成计数误差,因

此需对每一级采样菌落数进行校正[12]，校正后计算其气载需氧菌浓度。校正公式为

$$P_r = N\left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N-1} + \cdots + \frac{1}{N-r+1}\right) \quad (1)$$

式中　$P_r$——校正后菌落数，CFU

$N$——采样器各级采样孔数，取 400 个

$r$——实际菌落数，CFU

气载需氧菌浓度公式为

$$C = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6}{tF} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中　$C$——气载需氧菌浓度，CFU/m$^3$

$M_1 \sim M_6$——各级采样器校正后菌落数，CFU

$F$——采样器采样流量，取 28.3 L/min

$t$——采样时间，min

### 1.4　数据处理与分析方法

对每次采样时间点前后 5 min 内的环境参数进行抽取，计算其采样时间段内各项参数平均值，采用 Origin 2018 绘制风玫瑰图，Excel、SPSS、Spyder（Anaconda3）等软件进行数据及可视化处理。利用随机森林模型建立多元环境因子对气溶胶浓度的预测模型，提取各采样点环境参数：风向、风速、温度、相对湿度、总辐射强度、紫外辐射强度、悬浮颗粒物浓度及气溶胶浓度建立环境因子数据集，按照比例 8∶2划分为训练集和测试集参与建模。随后分别将单一环境影响因子设置为 0，输入预测模型，获得 10 组浓度预测值，计算每组浓度预测值与真实值的差值作为环境因子对模型的影响程度，计算式为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - R)}{Q} \quad (3)$$

式中　$E$——环境因子对模型的影响值，CFU/m$^3$

$P_i$——控制单一环境因子设置为 0 后的预测值，CFU/m$^3$

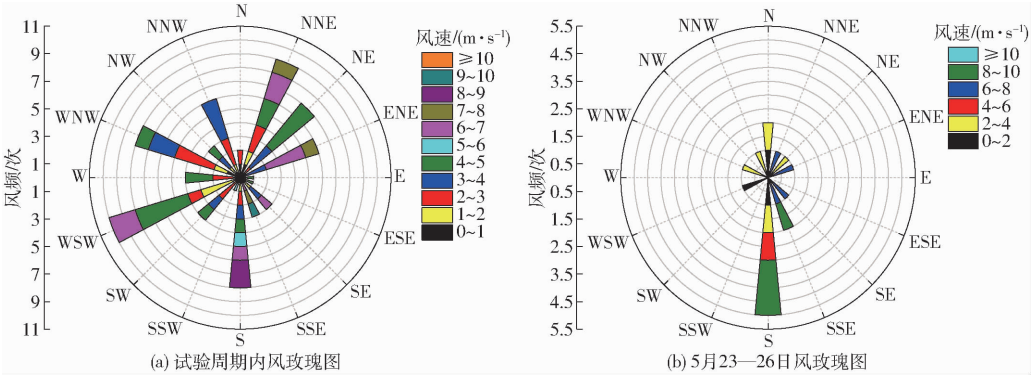
$R$——参与建模的真实值，CFU/m$^3$

$Q$——测试集包含数据量

## 2　结果与分析

### 2.1　采样点环境因素

对采样周期内每日采样时间段内环境数据进行算术平均处理，获得数据进行可视化分析后发现：采样周期内舍外环境的风向变化较为频繁（图 2a），以西南、西北、东北、南风向出现次数最多；舍外风速变化较为稳定，集中在 4 ~ 5 m/s、6 ~ 7 m/s，平均风速为 4.02 m/s。风向风速是生物气溶胶传输的动力因子[13]，风向变化频繁可能对场内不同区域气溶胶浓度分布影响较大。紫外辐照强度与总辐射强度变化一致，部分时间由于阴雨天气原因造成数据突变（图 3a，5 月 15、24、31 日），其余时间变化较为规律。测试期间，舍外温度集中在 20 ~ 30℃之间，变化较为平稳，但相对湿度受降雨影响，采样周期内日间变化较大。空气悬浮颗粒物日间变化差异较大（图 3b），其中 PM1、PM2.5、PM10 变化趋势较为一致，PM100 于 5 月 23—26 日与其余悬浮颗粒物变化差异较大，根据实际情况分析可能是由于采样点位于杂草荒地且距离粪污晾晒棚较近，该时间段内其主导风向为南风，风速集中在 8 ~ 10 m/s（图 2b），易受地形环境及风速影响产生较大变异。综上所述，由于各项环境因素受其他环境因素影响也较为明显，因此在进行室外环境因素影响气溶胶规律的研究时，需要综合考虑多环境因素整体对气溶胶规律的影响进行分析。




(a) 试验周期内风玫瑰图　　(b) 5月23—26日风玫瑰图

图 2　试验周期内风环境变化情况

Fig. 2　Change of air environment in test period

### 2.2　采样点生物气溶胶浓度

对各采样区试验周期内采样点生物气溶胶浓度进行整理，抽取各采样点数据进行分析。由于生物气溶胶浓度试验数据较少且数值间浮动较大，因此采用中间值及最值来表示样品数值间的波动范围。试验结果表明，试验奶牛场生物气溶胶浓度为

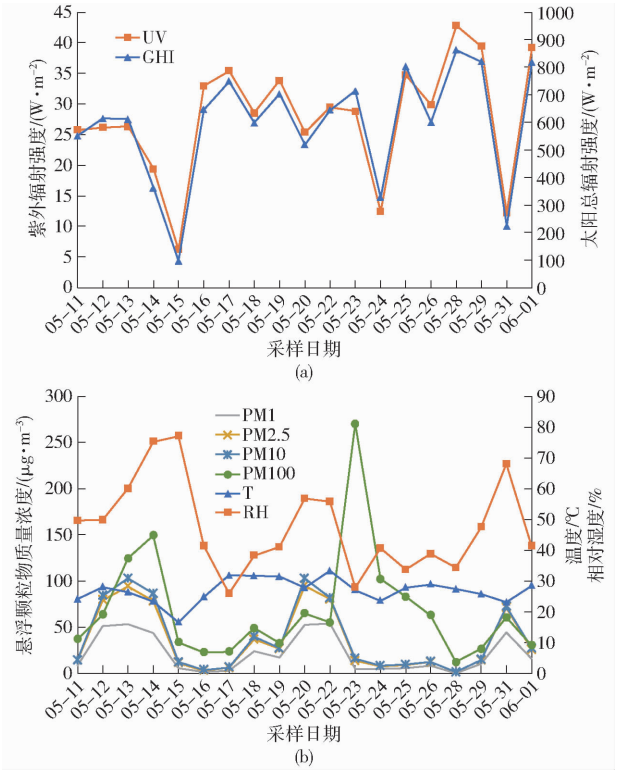



图 3 试验周期内环境因子变化曲线

Fig. 3 Variation curves of environmental factors during test period

$1.50\times10^2\sim1.61\times10^4$ CFU/m³，且多集中在 $10^3$ 数量级。试验期间各采样区试验周期内各采样点数据如表 3 所示。

对采样区不同高度采样点浓度数据进行差异性检验。经分析发现，在采样周期内(20 d)两采样区近地面 1 m 采样点处浓度显著高于 4 m 高度采样点浓度($P<0.01$)。孙宏起[14]、李晏等[15]对奶牛舍内不同位点、不同高度(0.5、1.0、1.5 m)的气溶胶浓度进行了采集，虽然部分采样点存在低处浓度最高的情况，但其浓度与距地面高度无明显相关性($P>0.05$)，分析是由于舍内环境变化较为稳定，气溶胶粒子充分弥漫舍内，因此高度分布上差异不大。而本文舍外环境相较于舍内环境较为开阔，气溶胶粒子充分扩散，因此不同高度上存在差异。慕飞飞[16]对西安市微生物气溶胶垂直分布特征研究时发现，不同高度微生物气溶胶浓度具有差异，即低处浓度略大于高处浓度。本试验中，奶牛场相较于城市地面污染较为严重，因此出现低处浓度显著大于高处浓度的情况。两采样区各采样点数据可视化处理发现，部分日期的个别采样点并不满足低处浓度大于高处的规律(如采样区 2 采样点 B、C，图 4)，结合

**表 3 各采样区周期内生物气溶胶浓度**

**Tab. 3 Bioaerosol concentration in sampling period of each sampling area** CFU/m³

| 采样区 | | A－1 | A－4 | B－1 | B－4 | C－1 | C－4 | D－1 | D－4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 区(5 月 11—20 日) | 最高值 | $5.93\times10^3$ | $2.96\times10^3$ | $1.61\times10^4$ | $7.18\times10^3$ | $7.33\times10^3$ | $3.71\times10^3$ | $3.10\times10^3$ | $2.64\times10^3$ |
| | 最低值 | $1.42\times10^3$ | $6.47\times10^2$ | $1.09\times10^3$ | $6.60\times10^2$ | $2.56\times10^2$ | $1.79\times10^2$ | $2.64\times10^2$ | $1.46\times10^2$ |
| | 中间值 | $2.64\times10^3$ | $1.72\times10^3$ | $2.55\times10^3$ | $1.22\times10^3$ | $2.48\times10^3$ | $1.51\times10^3$ | $1.12\times10^3$ | $7.13\times10^2$ |
| 2 区(5 月 22 日—6 月 1 日) | 最高值 | $7.45\times10^3$ | $5.79\times10^3$ | $4.15\times10^3$ | $4.62\times10^3$ | $7.66\times10^3$ | $7.71\times10^3$ | $9.54\times10^3$ | $7.05\times10^3$ |
| | 最低值 | $1.59\times10^3$ | $1.06\times10^3$ | $1.36\times10^3$ | $9.68\times10^2$ | $1.38\times10^3$ | $2.12\times10^3$ | $3.00\times10^2$ | $8.59\times10^2$ |
| | 中间值 | $3.11\times10^3$ | $2.41\times10^3$ | $1.93\times10^3$ | $1.83\times10^3$ | $5.63\times10^3$ | $4.84\times10^3$ | $2.91\times10^3$ | $1.92\times10^3$ |

注：A－1 为 A 采样点近地面 1 m 处，A－4 为 A 采样点近地面 4 m 处，其余类推。

2.1 节对现场环境条件的分析，可能是由于试验时间内环境因素多变(图 2a 和图 3)，多元环境因子耦合对气溶胶粒子浓度作用的影响。因此后期对环境因素进行相应分析，判定其对气溶胶浓度的影响机制。

### 2.3 采样点粒径分布

对两采样试验区各采样点不同高度采集到的样品培养 48 h，分别计算试验周期内每日各采样点样品不同粒径范围，即各级采样器上不同粒径菌落数所占比例，探究其粒径分布规律。对采样周期内每日各采样点样本粒径分布数据进行可视化处理，选取各区最具有代表性的 5 月 16 日(采样区 1)、5 月 26 日(采样区 2)数据进行分析。对比分析发现，大部分样本在粒径分布上存在粒径越小所占总体百分比越小的情况，且在粒径大于 2.1 μm 的粒子数量上，两采样区不同高度多数采样点达到了 80%，这与方治国等[17]的研究结果一致，各采样点不同层级粒子数量不同，多数采样点第一级粒子数量占比最高，这与钟召兵等[18]的研究相同，且在大部分采样点的不同高度上，其不同粒径范围粒子所占比例趋势接近一致(图 5)。

同时，有个别采样点不遵循以上规律，结合当日环境因素及采样地点进行分析，受风向风速影响，上下风向采样点处易出现粒径分布不规律情况，5 月 16 日采样时间内主导风向为南风(图 6a)，且该采样点位于粪污处理区，生物气溶胶通常伴随着粪便排泄和处理过程而产生[19]，因此采样点 D 出现明显差异情况可能是受到粪污环境因素影响，而对于采样点 A，由于其四周建筑遮挡，风环境变化较为平稳，因此该采样点每日粒径分布情况较为稳定且符

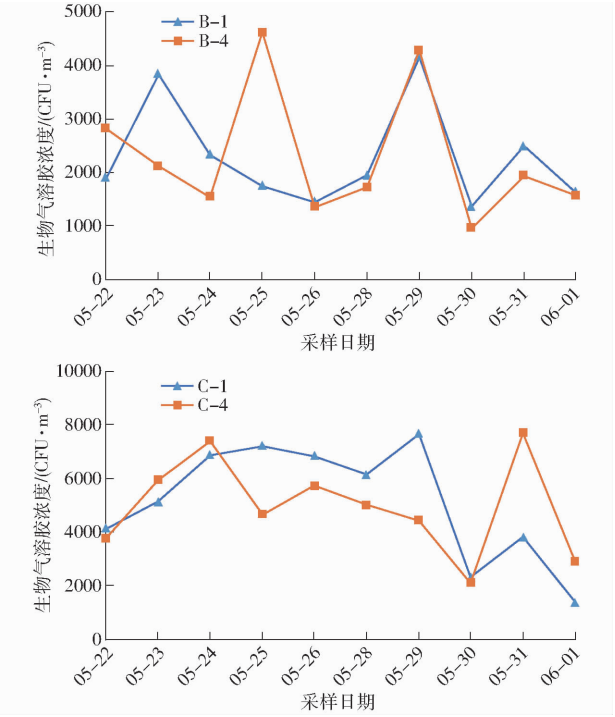



图 4　采样区 2 采样点 B、C 10 日内生物气溶胶浓度变化曲线

Fig. 4　Change curves of bioaerosol concentration in sampling points B and C of sampling area 2 within 10 days

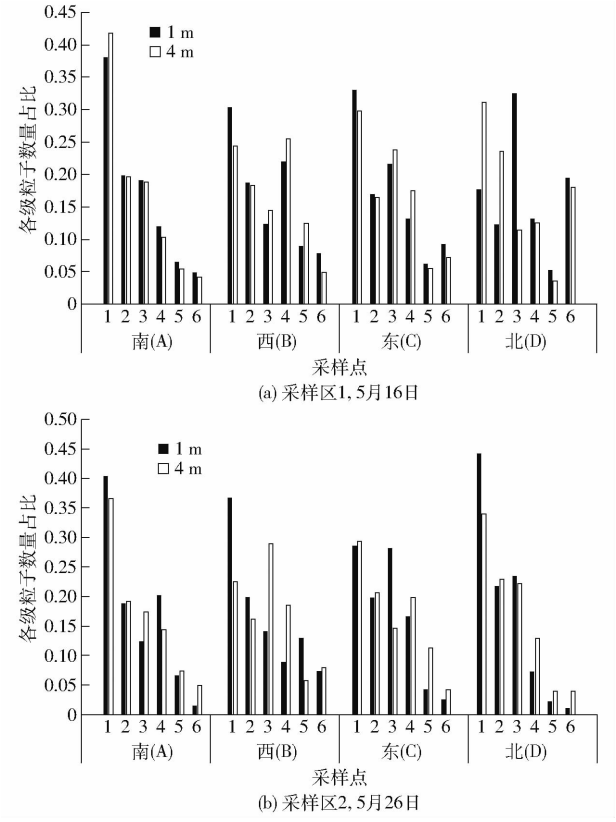



图 5　5 月 16、26 日各采样点粒径分布

Fig. 5　Dispersion of particle size at each sampling point on May 16 and 26

合总体规律。5 月 26 日采样时间内风向多为西风、西北风、西南风(图 6b),因此其东西采样点处规律存在显著差异,而其北侧采样点 D 由于较采样区 1 相比已经远离了粪污堆放车间,因此其粒径分布也较为稳定。

## 2.4　多元环境因子对生物气溶胶浓度的影响

以上对整场浓度分析情况表明,多元环境因子耦合会对生物气溶胶浓度产生影响,因此以随机森林算法(Random forest,RF)为基础构建生物气溶胶浓度预测模型,利用均方误差(Mean squared error,MSE)评价模型效果,MSE 取值范围为[0, +∞),取值越趋近于 0,模型收敛程度越好。利用环境因子数据集训练预测模型,设置训练轮数为 100 轮,保存训练完成后的最优模型判定环境因子对浓度的影响程度。结果表明,生物气溶胶浓度预测模型的 MSE 为 0.009 4,具有很好的预测效果。

对获得数据进行可视化处理,得到各环境因子对生物气溶胶浓度的影响程度。如图 7a 所示,环境因子对生物气溶胶浓度的影响由大到小依次为:WD、PM100、T、UV、GHI、PM1、PM10、V、PM2.5、RH,且部分因子之间极为接近,如 WD 与 PM100 均为 0.078 3 CFU/m$^3$。为进一步判断环境参数间的可替代关系,对环境因子进行层聚类分析,判断各环境因子之间的共线性关系,结合各因子对气溶胶浓度影响程度,筛选出可被替换环境因子,以到达节省现场环境数据采样成本的目的。

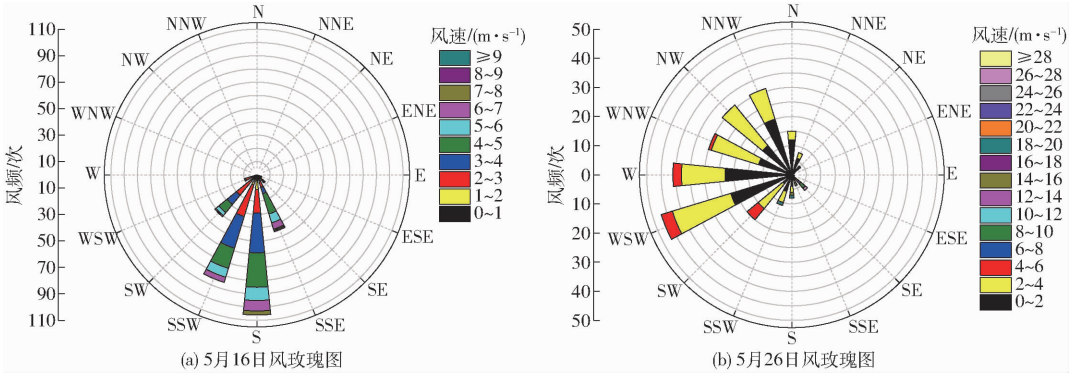



图 6　5 月 16、26 日风环境变化情况

Fig. 6　Wind environment change on May 16 and 26

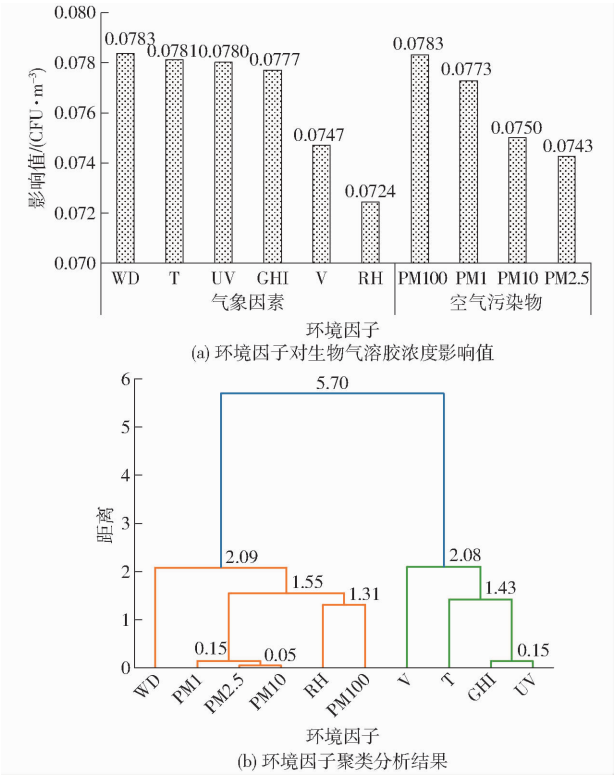



图 7 环境因子对生物气溶胶浓度影响值及层聚类分析结果

Fig. 7 Influence of environmental factors on bioaerosol concentration and results of hierarchical cluster analysis

各环境因子层聚类分析结果如图 7b 所示,距离越小代表环境因子间共线性越强。结果表明,PM1、PM2.5 与 PM10,GHI 与 UV 之间具有强共线关系。其中,PM2.5 与 PM10 影响值仅相差 0.000 7 CFU/$m^3$ 且二者影响值均小于 PM1,GHI 与 UV 对浓度影响值相近,差值仅为 0.003 CFU/$m^3$,因此保留各组中影响值最高的环境因子,使用 PM1 代替 PM2.5 与 PM10,UV 代替 GHI。

图 7a 中环境因子还可划分为气象因素和空气污染物两类,气象因素影响值(平均值为 0.076 6 CFU/$m^3$)普遍高于空气污染物影响值(平均值为 0.076 2 CFU/$m^3$),证明相对于空气污染物,气象参数对空气细菌群落的影响更大,与文献[20-21]研究结果一致。

气象因素方面,风向因子对生物气溶胶浓度的影响程度最大。有学者对舍内气溶胶浓度研究发现,通风频率对生物气溶胶中大部分颗粒的形态和浓度会产生决定性作用[22],这其中包括风向及风速的变化,但对于舍内通风而言,扰流风扇及换气扇均为单一方向,风向因素较为单一。而根据环境因素可视化分析(图 2a)可知,在奶牛场室外空旷田野环境中,采样周期内风速较为平稳但风向多变,因此本文结果中风向因子较风速因子对整场的气溶胶浓度的影响较大。当气温高于 24℃时,空气中细菌的存活率会普遍下降[23],对气溶胶浓度造成较大影响,而本文的结果也对该分析进行了论证,本试验周期内平均温度为 26.87℃,温度的影响值在气象因素中仅次于风向,高温因素应该对生物气溶胶浓度产生较大影响。其他学者对于城市中不同季节环境参数对于气溶胶浓度的影响研究表明,在各季节环境因素影响程度上,相对湿度影响程度较高,但其他学者提出,对于不同背景下的气溶胶浓度,污染源在空气传播细菌群落方面发挥了主导作用[24-25],这些影响甚至比气象条件造成的影响更大[24],并且由于温度和相对湿度对生物气溶胶的影响存在交互作用[19],两者的综合影响使蛋白质和膜磷脂失活,表现在温度和相对湿度对生物气溶胶的浓度[26]、活性[27]、类型和群落结构[28-29]的影响方面。孔德龙等[30]在对某高校校园夏季微生物浓度研究中也发现,温度对于细菌浓度及总微生物浓度的影响非常显著,而相对湿度对微生物浓度无明显影响。因此本文认为由于试验污染源场地不同,造成了本试验结果中,相对湿度影响排序相较于城市中环境因素对于气溶胶的影响排序不同,并且由于温度因素在本试验中的较高影响程度导致相对湿度的影响并不明显,仅排在了末位。

本试验还采集了日照中紫外辐射强度及总辐射强度。其中紫外辐射常被应用于医疗环境及实验室环境的杀菌技术当中[31-33],DO-KYUN 等[34]使用紫外线发光二极管照射多种菌类及病毒发现,对于紫外辐射强度,细菌抵抗能力最弱,其细胞组成物质(核酸、蛋白质)的分子结构也最易被破坏[35-36],最终死亡。本试验中,紫外线辐射强度影响程度略高于总辐射强度,且根据聚类分析发现,二者之间具有极强的共线性,由此可知,总辐射强度在本试验环境条件下可被紫外辐射强度替代。而紫外辐射对于微生物杀灭效果主要与环境的相对湿度、辐射强度、密闭空间相关[37],奶牛场环境开阔,且本文相对湿度对于气溶胶浓度影响相对不高,因此紫外辐射强度及太阳总辐射强度影响值低于温度、风向等因素。

空气污染物方面,在畜禽场中,动物运动与机械生产导致粪污中空气灰尘飞扬,造成空气污染颗粒物浓度增大,极大地影响了气溶胶的浓度,但 GAO 等[38]运用主成分分析对环境因子影响气溶胶浓度的研究中发现,影响可培养生物气溶胶的因素主要与霾度、采样时间和季节相关。在不同的霾度水平上 PM10 与温度对气溶胶浓度的相关性不同,在霾度高峰值背景下 PM10 影响气溶胶浓度,只与采样时间具有明显关系,而 PM2.5 对气溶

胶浓度只具有季节性影响。而在本文试验中，由于只在夏季中午固定时间内进行样品采集，所以在影响值呈现中，PM10 与 PM2.5 相较于其他因素所占影响值并不高。层聚类分析发现，PM1 与 PM2.5、PM10 具有极强的共线性，因此三者的影响值较为接近，根据前文环境因素分析，PM100 浓度明显高于其他颗粒物浓度，并且在 5 月 23—26 日的采样时间内，其浓度产生了较大变化且大幅增加，附着在空气悬浮颗粒物上的生物气溶胶会随着颗粒物的积累而增加，由于以上原因，PM100 对气溶胶浓度的影响最大。

同时，对替代后的 7 种环境因子重新建立模型，得到 MSE(0.009 0)与采用 10 种环境因子建立模型得到的 MSE(0.009 4)相差极小，因此认为环境因子的取代对模型无较大影响。PM10、PM2.5 与 GHI 等环境因子对生物气溶胶浓度影响可以被其他因子取代，部分保留的因子，这与国内部分学者对于影响生物气溶胶特征环境因子的研究结论相同[39-40]，可为接下来的环境因子研究提供一定借鉴。

综上所述，奶牛场整场生物气溶胶浓度受多种环境因子影响，相较于空气污染物，气象因子总体对奶牛场的生物气溶胶浓度影响较大，通过生物气溶胶浓度预测模型获得环境因子影响程度排序，发现 PM100 和风向对浓度的影响程度最大，为进一步分析各因子之间的可替代性，利用层聚类分析得到两组具有强共线性的环境因子，可将原有 10 个因子缩减为 7 个因子，为后期探究环境因子对气溶胶浓度影响的研究奠定基础，对了解奶牛场生物气溶胶传输特征和阻控点更具有指导意义。

## 3　结论

(1)奶牛场室外环境低处生物气溶胶浓度明显高于高处生物气溶胶浓度，在奶牛场整场区域范围内，生物气溶胶浓度在空间分布上 1 m 处明显大于 4 m 处($P<0.01$)，但受风向、风速等环境因素影响，会在个别采样点存在变异点。

(2)奶牛场整场不同采样点不同粒径粒子的分布上，粒径大于 2.1 μm 的粒子数量多数采样点达到了 80%，高度 1 m 和 4 m 处不同粒径粒子所占比例趋势趋于一致。同时，采样点受大气环境因子尤其是风速、风向的影响较大，对其粒径分布规律易造成较大影响。

(3)奶牛场整场生物气溶胶浓度受多种环境因子影响，气象因子相较于空气污染物对微生物气溶胶浓度具有较大影响，且各环境因素对生物气溶胶浓度的影响由大到小依次为：WD(0.078 3 CFU/m$^3$)、PM100(0.078 30 CFU/m$^3$)、T(0.078 10 CFU/m$^3$)、UV(0.078 00 CFU/m$^3$)、GHI(0.077 70 CFU/m$^3$)、PM1(0.077 30 CFU/m$^3$)、PM10(0.075 00 CFU/m$^3$)、V(0.074 7 CFU/m$^3$)、PM2.5(0.074 30 CFU/m$^3$)、RH(0.072 40 CFU/m$^3$)，其中，WD 和 PM100 对浓度影响最大。通过层聚类分析可知，可利用 PM1 与 UV 分别替代 PM10、PM2.5 与 GHI，且不影响浓度预测模型的精度。

## 参　考　文　献


[1] 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)

[2] MILLNER P D. Bioaerosols associated with animal production operations[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22): 5379－5385.

[3] ZHAO Y, AARNINK A, DE J, et al. Airborne microorganisms from livestock production systems and their relation to dust[J]. Critical Reviews in Environmental Science & Technology, 2014, 44(10): 1071－1128.

[4] 王友玲，邱慧珍，PHILIP G，等. 通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：313－320.
WANG Youling, QIU Huizhen, PHILIP G, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 313－320. (in Chinese)

[5] 钟召兵，柴同杰，段会勇，等. 鸡舍环境金黄色葡萄球菌气溶胶产生及其传播的 REP－PCR 鉴定[J]. 畜牧兽医学报，2008，39(10)：1395－1401.
ZHONG Zhaobing, CHAI Tongjie, DUAN Huiyong, et al. REP－PCR identification of airborne staphylococcus aureus isolated from chicken houses and their spreading around the farms[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2008, 39(10): 1395－1401. (in Chinese)

[6] 张博，郭康康，陈立功，等. 畜禽舍中微生物气溶胶的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医，2020(7)：38－41.
ZHANG Bo, GUO Kangkang, CHEN Ligong, et al. Research progress on microbial aerosols in livestock houses[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020(7): 38－41. (in Chinese)

[7] 张喜庆，勾长龙，娄玉杰，等. 畜禽养殖环境中微生物气溶胶的研究进展[J]. 中国畜牧杂志，2017，53(6)：20－24.
ZHANG Xiqing, GOU Changlong, LOU Yujie, et al. Research progress on microorganism aerosol of livestock breeding environment[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(6): 20－24. (in Chinese)

[8] 李超，郝海玉，孙玲玉，等. 猪舍环境气载微生物监测[J]. 畜牧兽医学报，2014，45(10)：1684－1692.
LI Chao, HAO Haiyu, SUN Lingyu, et al. Airborne microbiological of swine houses monitoring[J]. Acta Veterinaria et

Zootechnica Sinica, 2014, 45(10): 1684 - 1692. (in Chinese)
[9] 高云航,张喜庆,勾长龙,等. 奶牛舍气溶胶微生物监测及环境影响因素分析[J]. 吉林农业大学学报,2018,40(4):480 - 485.
GAO Yunhang, ZHANG Xiqing, GOU Changlong, et al. Monitoring of aerosol microorganism in cowsheds and analysis of environmental factors[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(4): 480 - 485. (in Chinese)
[10] 刘敬博,柴同杰,苗增民,等. 奶牛舍环境中气载微生物含量的检测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(5):56 - 60.
LIU Jingbo, CHAI Tongjie, MIAO Zengmin, et al. Concentration detection of airborne microbes in cow environments[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.),2010, 38(5): 56 - 60. (in Chinese)
[11] 高玉红,李宏双,邱殿锐,等. 奶牛舍内外环境夏季气载微生物的检测[J]. 畜牧与兽医,2016,48(10):51 - 54.
GAO Yuhong, LI Hongshuang, QIU Dianrui, et al. Investigation on indoor and outdoor airborne microorganism in dairy cowsheds of different styles in summer season[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2016, 48(10): 51 - 54. (in Chinese)
[12] 高敏,仇天雷,贾瑞志,等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. 环境科学,2014,35(12):4415 - 4421.
GAO Min, QIU Tianlei, JIA Ruizhi, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze and haze days in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4415 - 4421. (in Chinese)
[13] 李磊. 通风房间内微生物气溶胶传播的 CFD 模拟[D]. 西安:长安大学,2014.
LI Lei. The CFD simulation of microbial aerosol transport in ventilated room[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
[14] 孙宏起. 奶牛舍内环境中微生物气溶胶分布规律研究[D]. 长春:吉林农业大学,2017.
SUN Hongqi. Study on the distribution regularity of microbial aerosols in cow house[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2017. (in Chinese)
[15] 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 barn environment in Northeast China in autumn[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(6): 247 - 252. (in Chinese)
[16] 慕飞飞. 西安市秋冬季微生物气溶胶的垂直分布特征研究[D]. 西安:长安大学,2020.
MU Feifei. Vertical distribution characteristics of bioaerosols during autumn and winter in Xi'an, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
[17] 方治国,欧阳志云,胡利锋,等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. 环境科学,2004(6):1 - 5.
FANG Zhiguo, OUYANG Zhiyun, HU Lifeng, et al. Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing[J]. Environmental Science, 2004(6): 1 - 5. (in Chinese)
[18] 钟召兵,王宁. 养殖环境细菌微生物气溶胶粒径分布及其健康危害评估[J]. 中国动物检疫,2014,31(11):101 - 105.
ZHONG Zhaobing, WANG Ning. The size distribution and health risk assessment of microbe bacterial aerosol in livestock and poultry house[J]. China Animal Health Inspection, 2014, 31(11): 101 - 105. (in Chinese)
[19] DUNGAN R S. Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures[J]. Journal of Animal Science, 2010,88(11): 3693 - 3706.
[20] 郭二果,王成,彭镇华,等. 城市空气悬浮颗粒物的理化性质及其健康效应[J]. 生态环境,2008,17(2): 851 - 857.
GUO Erguo, WANG Cheng, PENG Zhenhua, et al. Advances in physical and chemical character of urban airborne suspended particulate matter and its health effect[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008, 17(2): 851 - 857. (in Chinese)
[21] ZHEN Q, DENG Y, WANG Y, et al. Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants[J]. Science of the Total Environment, 2017,601: 703 - 712.
[22] SEEDORF J, HARTUNG J, SCHRODER M, et al. Concentrations and emissions of airborne endotoxins and microorganisms in livestock buildings in Northern Europe[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(1): 97 - 109.
[23] TANG J L. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2009(6): 737 - 746.
[24] BOWERS R M, MCLETCHIE S, KNIGHT R, et al. Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments[J]. ISME Journal, 2011, 5(4): 601 - 612.
[25] GANDOLFI I, BERTOLINI V, BESTETTI G, et al. Spatio-temporal variability of airborne bacterial communities and their correlationwith particulate matter chemical composition across two urban areas[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2015, 99(11): 4867 - 4877.
[26] 胡晓苗,张丹俊,赵瑞宏,等. 不同类型商品肉鸡舍冬季环境指标调查[J]. 家畜生态学报,2013,34(6):58 - 61.
HU Xiaomiao, ZHANG Danjun, ZHAO Ruihong, et al. Survey on main environmental indicators for commercial broiler houses in Anhui Province in winter[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2013, 34(6): 58 - 61. (in Chinese)
[27] KIM K Y, KIM H T, KIM D, et al. Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the feedstuff-manufacturing factories[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1 - 3): 1054 - 1060.
[28] KIRYCHUK S P, DOSMAN J A, REYNOLDS S J, et al. Total dust and endotoxin in poultry operations: comparison between cage and floor housing and respiratory effects in workers[J]. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2006, 48(7): 741 - 748.
[29] JUST N, KIRYCHUK S, GILBERT Y, et al. Bacterial diversity characterization of bioaerosols from cage-housed and floor housed poultry operations[J]. Environmental Research, 2011, 111(4): 492 - 498.
[30] 孔德龙,狄育慧,陈希,等. 西安市某高校春夏季空气颗粒物与微生物污染特性分析[J]. 西安工程大学学报,2018,32(2):186 - 190.
KONG Delong, DI Yuhui, CHEN Xi, et al. Analysis of airborne particulates and microorganism contamination characteristics of spring and summer in a university in Xi'an[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2018,32(2): 186 - 190. (in Chinese)

(下转第 399 页)

2020, 10(14): 59 – 63,70.
FAN Chunyang, WU Shoupeng, LIU Xiaowen, et al. Fault feature analysis method for rolling bearings based on wavelet packet transform and random forest[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2020, 10(14): 59 – 63,70. (in Chinese)
[22] 高惠旋. 应用多元统计分析[M]. 北京:北京大学出版社, 2005.
[23] 张棣, 殷勇, 于慧春, 等. 高光谱融合马氏距离的贮藏黄瓜腐败预警方法[J]. 核农学报. 2020, 34(12): 2749 – 2755.
ZHANG Di, YIN Yong, YU Huichun, et al. Early warning method of cucumber spoilage during storage based on hyperspectral technology and mahalanobis distance[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences. 2020, 34(12): 2749 – 2755. (in Chinese)
[24] 肖先勇, 崔灿, 汪洋, 等. 电压暂降分类特征可比性、相关性及马氏距离分类法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6):1299 – 1305.
XIAO Xianyong, CUI Can, WANG Yang, et al. Comparability and relevance of voltage sag classifying features and classification methods based on mahalanobis distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6):1299 – 1305. (in Chinese)
[25] 卢先勇, 何文绚, 陈昊聪, 等. 基于植物油三维荧光光谱的茶油鉴定模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 208 – 213.
LU Xianyong, HE Wenxuan, CHEN Haocong, et al. Identification model of camellia oil based on 3D fluorescence spectra of vegetable oils[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 208 – 213. (in Chinese)

(上接第 384 页)

[31] 王陈龙,胡龙飞,龙军,等.脉冲紫外强光杀菌技术的作用机理及应用前景[J].中国消毒学杂志,2016,33(11):1104 – 1107.
WANG Chenlong, HU Longfei, LONG Jun, et al. Action mechanism and application prospect of pulsed ultraviolet strong light sterilization technology[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2016, 33(11): 1104 – 1107. (in Chinese)
[32] 赵中开,王欢.两种微生物洁净室消毒方法对比初探[J].轻工科技,2020,36(9):142 – 143.
ZHAO Zhongkai, WANG Huan. A preliminary study on the comparison of two disinfection methods of microbial clean room [J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(9): 142 – 143. (in Chinese)
[33] 张敏.紫外灯照射空气消毒对静脉用药集中调配中心臭氧浓度及洁净度的影响[J].中国民康医学,2021,33(12):103 – 104.
ZHANG Min. Influence of air disinfection by UV lamp irradiation on ozone concentration and cleanliness of pharmacy intravenous admixture services[J]. Medical Journal of Chinese People's Health, 2021, 33(12): 103 – 104. (in Chinese)
[34] DO-KYUN K, DONG-HYUN K. UVC – LED irradiation effectively inactivates aerosolized viruses, bacteria, and fungi in a chamber-type air disinfection system[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2018, 84(17): e00944 – 18.
[35] 李建兴,涂光备,涂岱昕.室内微生物污染的三种工程控制方法[J].暖通空调,2004(12):29 – 33.
LI Jianxing, TU Guangbei, TU Daixin. Three engineering control methods of indoor airborne microbes[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004(12): 29 – 33. (in Chinese)
[36] 代彩红,王彦飞,吴志峰,等.紫外辐射消毒中 UVC 辐射照度的测量与溯源[J].照明工程学报,2020,31(2):1 – 5.
DAI Caihong, WANG Yanfei, WU Zhifeng, et al. Measurement and traceability of UVC irradiance in ultraviolet disinfection [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020,31(2): 1 – 5. (in Chinese)
[37] 孙婷,刘凤娟.室内空气中微生物污染控制方法研究进展[J].环境生态学,2021,3(9):79 – 82.
SUN Ting, LIU Fengjuan. Research progress of microbial pollution control methods in indoor-air[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 79 – 82. (in Chinese)
[38] GAO M, YAN X, QIU T L, et al. Variation of correlations between factors and culturable airborne bacteria and fungi[J]. Atmospheric Environment, 2016, 128(3): 10 – 19.
[39] 马丽新,齐虹,孙霞忠. 大气气溶胶粒径分布特征与呼吸系统暴露评估研究进展[J]. 环境科学学报,2020,40(10): 3549 – 3558.
MA Lixin, QI Hong, SUN Xiazhong. Research progress on aerosol particle size distribution characteristics and respiratory system exposure assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3549 – 3558. (in Chinese)
[40] 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)