

# 基于粒径谱仪的畜禽养殖场空气颗粒物污染物测量研究\*

常志勇<sup>1,2</sup> 杨 逍<sup>1,2</sup> 慕海锋<sup>1,2</sup> 佟 金<sup>1,2</sup> 陈东辉<sup>1,2</sup> 郭 丽<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 为了分析采用空气动力学粒径谱仪实时测量畜禽养殖场空气颗粒污染物的可行性及效果, 首先使用 APS 和 MOUDI 在实验室对玻璃球粉末和植物油滴进行同步测量与对比分析, 然后在畜禽养殖场实时地对下风向空气颗粒物进行测量。结果表明: 在实验室中, APS 测得的 2 种玻璃球粉末和植物油滴的结果较准确; 通过线性回归证明这 2 种仪器测得的玻璃球粉末和植物油滴的累积质量浓度具有一定相关性,  $R^2$  都大于 0.9, 表明拟合度较好。在使用 APS 实时测量畜禽养殖场的空气颗粒物污染物时, APS 能够较好地反映空气颗粒污染物的变化情况, 能基于其实时测量的颗粒物几何平均直径、数量浓度和质量浓度等指标从多个角度对空气颗粒物进行分析。

**关键词:** 空气动力学粒径谱仪 畜禽养殖 空气颗粒物 几何平均直径 数量浓度 质量浓度

**中图分类号:** TH79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0246-06

## Real-time Measurement of Particulate Matter Emitted from Animal Feeding Operation Based on Aerodynamic Particle Sizer

Chang Zhiyong<sup>1,2</sup> Yang Xiao<sup>1,2</sup> Mu Haifeng<sup>1,2</sup> Tong Jin<sup>1,2</sup> Chen Donghui<sup>1,2</sup> Guo Li<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The composition of particulate matter (PM) emitted from animal feeding operations (AFOs) is complex, and those particulates have negative impact on the health of people and animal in and near the AFOs. To better understand the degree of pollution caused by those PMs, it is necessary to conduct real-time measurement, such as particle sizes and concentrations and so on. The main aim of this study is to evaluate the possibility and effectiveness of the aerodynamic particle sizer (APS) on measuring PM emitted from AFOs. An APS was firstly employed to measure the size distribution of the glass sphere powder and vegetable oil with different attributes in the laboratory. The measurement results were compared with those simultaneously measured by micro-orifice uniform deposit impactor (MOUDI). Then particulate matter emitted from a cattle feedlot was measured by APS at real-time. The result showed that APS performed well when using it to measure two types of glass sphere powder and vegetable oil in the laboratory. According to linear regression analysis, there was correlation between the cumulative mass concentrations of glass sphere powder obtained by APS and MOUDI, as well as the vegetable oil. Both of the values of determination coefficient  $R^2$  were greater than 0.9. APS also performed well when using it to measure the particulate emitted from the cattle feedlot since it well recorded the pollution scenarios and reflected the variation of the air pollutant. APS provided values of geometric mean diameter, number concentration and mass concentration, which can be used to evaluate pollution level of particulates emitted from animal feeding operation from different aspects.

**Key words:** Aerodynamic particle sizer Animal feeding Particulate matter Geometric mean diameter  
Number concentration Mass concentration

收稿日期: 2015-05-08 修回日期: 2015-06-24

\* 中国博士后科学基金面上资助项目(2013M540252)和吉林大学科研配套启动基金资助项目

作者简介: 常志勇, 工程师, 主要从事农业环境与工程仿生研究, E-mail: zychang@jlu.edu.cn

通讯作者: 郭丽, 副教授, 主要从事农业环境与环境仿生研究, E-mail: liguo2012@jlu.edu.cn

## 引言

空气污染物分为气相和颗粒相污染物<sup>[1]</sup>。在畜禽养殖场粪尿等废弃物产生大量氮和硫的氧化物、氨气、氯化氢等气相空气污染物,这些物质在空气中水蒸气的作用下反应生成水合物,成为液相的颗粒污染物,加之畜禽养殖场灰尘、细菌、孢子等在空气中的扩散,导致畜禽养殖场存在大量以颗粒相(固相、液相)存在的空气颗粒物(PM)<sup>[2-5]</sup>。它们通过人的呼吸作用在肺部沉积进而引发诸多健康问题<sup>[6]</sup>。畜禽养殖场的空气颗粒物的粒径及其质量浓度等指标的实时测量有助于监测当地空气的污染程度,以便进一步采取相应措施降低污染程度。

微孔均匀沉积冲击式采样器(Micro-orifice uniform deposit impactor, MOUDI)是一款常用的颗粒物测量仪<sup>[7-10]</sup>。其测量结果准确,但是实时测量能力较差,无法实时获得空气颗粒物污染数据。激光粒度仪(Laser diffraction, LD)可通过颗粒的衍射或散射光的空间分布来分析颗粒大小,具有测试范围宽和重复性好等特点。Gonzales等<sup>[11]</sup>使用激光粒度分析仪(LS13320)对美国堪萨斯州的某肉牛饲养场排放的颗粒物进行了分析,结果表明其测得的颗粒物几何平均直径与MOUDI测量的结果比较吻合,通过演算获得的PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度与质量法测量仪测得的值也没有显著差异,但是LS13320需要通过其他仪器收集颗粒物样本,并在特定的溶剂内进行分析,所以也存在实时测量能力差等问题。空气动力学粒径谱仪(Aerodynamic particle sizer, APS)操作简便,便于携带,能实时测量<sup>[12]</sup>,是颗粒污染物粒径及其分布的主流测量仪器。Jung等<sup>[13]</sup>用紫外光空气动力学粒径谱仪来实时辨别细菌气溶胶中的生物和非生物颗粒;国内外一些学者也使用APS对大气污染物、灰尘、道路扬尘等颗粒物进行了测量并用不同仪器或不同方法与之比较<sup>[14-16]</sup>。然而,对于空气颗粒物复杂的畜禽养殖场,APS的使用还比较少见。

本文通过使用APS对不同粒子的粒径和粒径分布等进行测量,并与MOUDI的测量结果进行对比分析,来验证APS的可靠性,并对畜禽养殖场的空气颗粒物进行实时测量,实现多指标分析。

## 1 PM测量方法与原理

试验中使用到的仪器主要是美国TSI公司研制的APS 3321型空气动力学粒径谱仪,美国MSP公司生产的MOUDI 110型微孔均匀沉积冲击式采样

器,以下为各仪器的基本工作原理。

### 1.1 APS的PM测量方法与原理

利用双束激光粒径测量原理来测量气溶胶粒子的粒径,其主要依据是双束激光的空气动力学粒径测量方法<sup>[17-19]</sup>。该方法使用两束平行的激光,二者间距离一定,记录气溶胶粒子穿过两束激光的时间,由此可计算出该气溶胶粒子的飞行速度。由于惯性,加速后不同粒子速度不同。可以用已知粒径的标准粒子获得粒子飞行速度和粒径大小之间的关系定标曲线,因此只要测出气溶胶粒子的飞行速度,通过该定标曲线,便可得出粒子的空气动力学直径。进而通过测出该仪器不同通道内粒子的个数算出几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)等数据。APS 3321测量的空气动力学直径范围是0.5~20 μm。

根据数据分析需要,APS数据导出为数量浓度、质量浓度和质量累积百分比浓度。

数量浓度定义为单位体积空气中所含的大气气溶胶粒子数<sup>[20]</sup>。数量浓度用于计算质量浓度和几何平均直径。

试验中,几何平均直径为

$$\bar{x}_g = \exp\left(\frac{\sum_l^n n_l \ln D_a}{N}\right) \quad (1)$$

式中  $u$ ——上通道边界

$l$ ——下通道边界

$n$ ——每通道数量加权浓度,个/m<sup>3</sup>

$D_a$ ——通道空气动力学颗粒直径,μm

$N$ ——总数量浓度,个/m<sup>3</sup>

质量浓度是单位体积空气中所含的大气气溶胶的质量<sup>[21]</sup>。累积质量百分比浓度是小于某一粒径尺寸的颗粒物质量浓度之和占所有颗粒物质量浓度的百分比。累积质量百分比浓度的导出是为了与MOUDI测量值比较。

### 1.2 MOUDI的PM测量方法与原理

MOUDI是基于空气动力学直径的微粒采集装置。空气动力学直径是指单位密度( $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$ )的球体,在静止空气中作低雷诺数运动时,达到与实际粒子相同的最终沉降速度时的直径(当量直径)<sup>[22]</sup>。含有气溶胶的粒子气流以30 L/min的流量进入冲击器,在惯性作用下,粒子被分离,其空气动力学分割直径为18.9、9.9、6.2、3.1、1.8、1.0、0.54、0.32、0.18、0.09 μm。粒子根据空气动力学直径范围被分离,最后被冲击介质铝箔捕获,获得微粒粒径分布规律。

## 2 试验方法

### 2.1 实验室比较测量试验

采用 APS 和 MOUDI 2 种仪器,以 2 种粒径已知的玻璃球粉末和经发生器产生的植物油滴为对象,模拟畜禽养殖场以固相、液相存在的空气颗粒污染物,验证 APS 测量结果的准确性。试验主要选取几何平均直径、数量浓度、质量浓度和累积质量百分比浓度等为主要测试指标。

在使用 APS 对颗粒物进行测量之前,根据颗粒物密度判断是否使用斯托克斯校正 (Apply Stokes correction, ASC)。

#### 2.1.1 APS 的“零点”检测

在 APS 采样器空气进口处放置一个低压降高效空气过滤器。该过滤器的特点是空气可以通过,细小的微粒却无法通过。它对直径为  $0.5 \mu\text{m}$  以上的微粒去除效率可达 99.97%,APS 工作时安置低压降高效空气过滤器,正常的显示结果应接近于零,这是 APS 正常工作的基础。

#### 2.1.2 固体颗粒粉末测试

由于在分散期间收集的数据可以更好地反映颗粒真实的几何平均直径,所以将 60P18 和 110P8 玻璃球粉末喷散在实验室空气中约 1 min,再由 APS 和 MOUDI 在实验室同步采样。APS 每 20 s 完成一次采样,约采样 15 min;MOUDI 只完成一次采样。为了进一步与 MOUDI 对比分析,对于 110P8 玻璃球粉末,用 APS 分别测量分散后 15 min 和分散期间的采样值并计算 15 min 采样的平均值。

#### 2.1.3 液体颗粒粉末测试

如图 1 所示,将植物油加入到雾化器中,通过雾化器生成气溶胶;将气溶胶喷入  $3.6 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$  的密封室内;用 APS 经由配备的稀释器(稀释率为 100:1)进行采样。试验用 APS 采样,每 20 s 完成一次采样,采样约 30 min;MOUDI 同时完成一次采样,采样直接在密封室内进行。

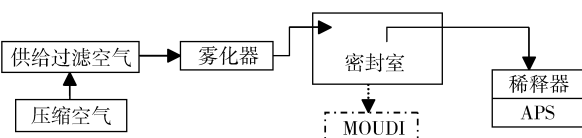


图 1 植物油滴的 APS/MOUDI 测试的试验设置

Fig. 1 Experimental setup for APS/MOUDI tests of vegetable oil

### 2.2 畜禽养殖场实地测量与验证

在前期实验室测量的基础上,使用 APS 对吉林省某开放式肉牛养殖场的空气颗粒污染物进行实时测量。试验选在炎热干燥的 7 月份,在 2014 年进行

了为期 3 d 的连续监测,监测期间该养殖场存栏肉牛 800 余头,采用圈栏开放式饲养,每个圈栏局部搭建遮阳棚,通常牛在此处饲食及避暑降温,其他时候则在圈栏的运动场内自由活动,圈栏地面为稍加夯实的土地,每年清理圈栏 1 次。本试验点选在养牛场的主导下风向的外围边界北面 3 m 远处,测量高度为 2.2 m,试验布置如图 2 所示。

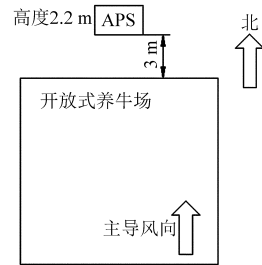


图 2 在肉牛养殖场 APS 的布置图(不按比例)

Fig. 2 Diagram of APS setup at feedlot(not to scale)

白天将 APS 仪器放置在指定位置,对试验养殖场排放空气颗粒污染物进行采样。采样共持续 3 d,每天 07:00—18:00,采样间隔时间为 20 min。

## 3 结果与讨论

### 3.1 APS 实验室测量结果分析

#### 3.1.1 60P18 和 110P8 玻璃球粉末

用 APS 对 60P18 和 110P8 玻璃球粉末的几何平均直径进行测量。斯托克斯校正的应用范围为粒子密度小于  $0.9 \text{ g/cm}^3$  或大于  $1.1 \text{ g/cm}^3$ 。由于 110P8 玻璃球粉末的密度恰好为  $1.1 \text{ g/cm}^3$ ,处于斯托克斯校正范围的边缘,所以有必要先测试斯托克斯校正对试验的影响。

试验以斯托克斯关闭与开启时测得的几何平均直径的差除以斯托克斯关闭时测得的值来衡量其影响,该值越小,则其影响越小。

经过计算,斯托克斯校正关闭对几何平均直径的影响很轻微,只有 0.68%。故可用斯托克斯校正关闭时测得的数据代表 110P8 玻璃球粉末的测量值。

因此,在测量 110P8 玻璃球粉末时,可将斯托克斯校正关闭;而在测量 60P18 玻璃球粉末时,需要将斯托克斯校正开启。两种玻璃球粉末的测量结果如图 3 所示。

在分散初期,110P8 玻璃球粉末的最大几何平均直径为  $10.5 \mu\text{m}$ ,随后所测直径持续减小,最小约为  $7 \mu\text{m}$ ,这真实地反映了较大颗粒直径的粒子沉降引起空气中悬浮颗粒粒径变小的现象。在分散期间,60P18 玻璃球粉末最大几何平均直径为  $13.2 \mu\text{m}$ ,随后几何平均直径持续降低,平均的几何平均直径

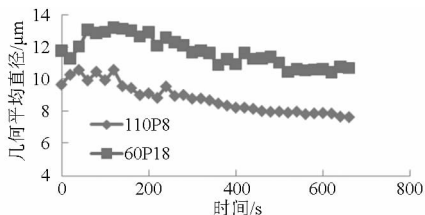


图 3 玻璃球粉末的几何平均直径

Fig. 3 Geometric mean diameter of glass sphere powder

为 11.7 μm。

APS 输出的几何平均直径是基于空气动力学直径的,它需要被转成几何直径才能与已知的平均尺寸进行比较。假定玻璃球粉末的形状因数是 1,滑动修正因数是 1,几何直径为<sup>[23]</sup>

$$D_p = D_{GMD} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_p}} \quad (2)$$

其中  $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$   
 式中  $D_p$ ——几何直径, μm  
 $D_{GMD}$ ——几何平均直径, μm  
 $\rho_p$ ——所测颗粒的密度, g/cm<sup>3</sup>

110P8 玻璃球粉末和 60P18 玻璃球粉末的最大的几何直径分别是 10.1 μm 和 17.0 μm,而 110P8 玻璃球粉末的平均尺寸是 9 ~ 13 μm,60P18 玻璃球粉末的平均尺寸是 16 ~ 20 μm,得到的结果在真实尺寸范围之内。

### 3.1.2 植物油滴

图 4 所示为采用 APS 测量的植物油滴几何平均直径的变化。试验所得的植物油滴的几何平均直径基本都在 0.7 ~ 0.9 μm 之间,最大值为 0.86 μm,最小值为 0.71 μm,这已经非常接近实际粒径尺寸 0.8 μm。

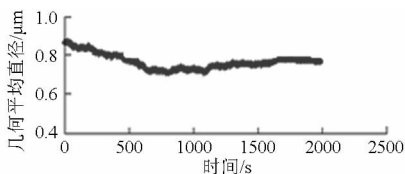


图 4 植物油滴的几何平均直径

Fig. 4 Geometric mean diameter of vegetable oil

### 3.2 APS 与 MOUDI 实验室测量结果的比较

MOUDI 与 APS 同时对 110P8 玻璃球粉末和植物油滴空气颗粒物进行测量,目的在于对测量的累积质量百分比浓度进行比较。

如图 5 所示, APS 和 MOUDI 测量的累积质量百分比在分散初期具有很好的契合度,在粒径大于 6 μm 时开始出现明显差异,最大差异发生在粒径大于 10 μm 之后,在颗粒分散后 15 min 内 APS 测量值与 MOUDI 测量值之间,相差大约为 15%。由于更大粒子的沉降,测量一致性在分散后随着时间增长

而降低。从总体上来说,APS 的测量分布情况较为集中,且主要集中在 8 ~ 13 μm 之间,与实际值较为相符;MOUDI 的结果相对分散。

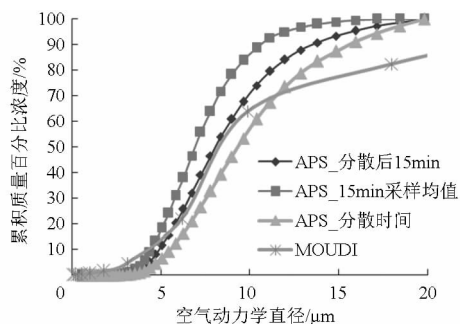


图 5 APS 和 MOUDI 对于 110P8 玻璃球粉末尺寸分布的比较

Fig. 5 Comparison of APS and MOUDI measured size distribution for glass sphere powder 110P8

为进一步评价 2 种仪器的测量结果的相关性,对测量数据进行深入分析。由于 2 种仪器的测量原理不同,采样的数据点(空气动力学直径)也不同,其中,MOUDI 的粒径切割点范围较大。以 MOUDI 的粒径切割点为基准,在 APS 的粒径切割点中寻找与其重合或接近点,确定 7 个拟合点,其对应的空气动力学直径最大相差 3.6%。

然后,在切割点处找到对应的 2 种仪器测得的 110P8 玻璃球粉末的累积质量百分比浓度,建立线性回归方程如图 6 所示,拟合效果非常好。

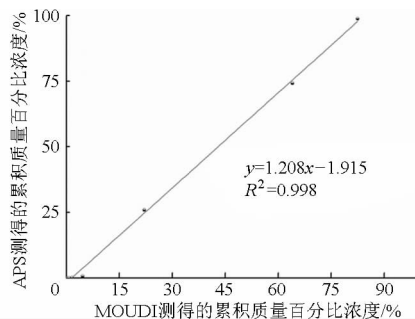


图 6 2 种仪器测得 110P8 玻璃球粉末累积质量百分比浓度拟合结果

Fig. 6 Fitting result of cumulative mass concentration measured by two types of instruments based on 110P8 glass sphere powder

APS 只能准确测出颗粒物的数量浓度,而质量浓度是基于数量浓度反演出来的,质量浓度为<sup>[23]</sup>

$$d_M = 10^6 d_N \times \frac{\pi}{6} D_p^3 D_{en} \quad (3)$$

式中  $d_M$ ——粒子的质量浓度, μg/m<sup>3</sup>  
 $d_N$ ——粒子的数量浓度, 个/m<sup>3</sup>  
 $D_{en}$ ——粒子的密度, g/cm<sup>3</sup>

因此,形状系数和密度设置的偏差是造成斜率略有偏差的主要原因。

对于植物油滴,如图7所示,APS与MOUDI的累积质量百分比浓度拟合度较好,最大的差异出现在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右,差异约为5%。

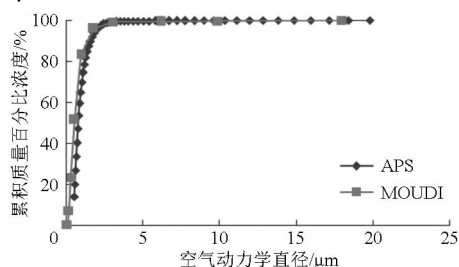


图7 APS和MOUDI对于植物油滴尺寸分布的比较

Fig. 7 Comparison of APS and MOUDI measured size distribution for vegetable oil

与110P8玻璃球粉末的测量结果相关性分析一样,确定7个拟合点,经过数据处理,得到APS和MOUDI测得的植物油滴的累积质量百分比浓度的线性回归方程如图8所示,拟合效果非常好。

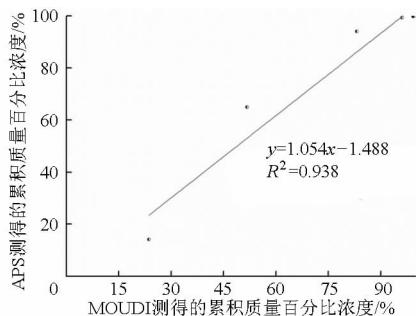


图8 2种仪器测得植物油滴累积质量百分比浓度拟合结果

Fig. 8 Fitting result of cumulative mass concentration measured by two types of instruments based on vegetable oil

以上分析说明2种仪器的测量结果有较大的相关性,APS可以替换MOUDI进行测量。

### 3.3 APS的畜禽养殖场空气颗粒污染物实地测量试验

图9所示为连续3d实时测量得出的肉牛养殖场排出的空气颗粒污染物的几何平均直径随时间的变化情况,每天的测量时间大约为07:00—18:00。可见,第1天傍晚由于起风,出现了灰尘较小的峰值,导致几何平均直径在第1天的傍晚略有增长,但整体比较稳定,保持在 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 之间。第2天,直到中午,几何平均直径比较稳定,平均值在 $6\ \mu\text{m}$ 左右,当天下午有降雨,几何平均直径值有明显减小,平均值在 $4\ \mu\text{m}$ 左右。第3天该肉牛养殖场天气晴朗,早晨,几何平均直径非常小,在 $3\ \mu\text{m}$ 左右,随着气温升高,土地表面变得干燥,空气中颗粒物明显增多,午后,几何平均直径值在 $4\sim 6\ \mu\text{m}$ 之间,但是由于降雨,短时间内几何平均直径没有增长到第1天的水平。通过3d的测量,空气颗粒污染物的几何

平均直径都小于 $8\ \mu\text{m}$ 。APS的实时测量空气颗粒污染物的效果较好,能反映出空气颗粒污染物的变化情况。

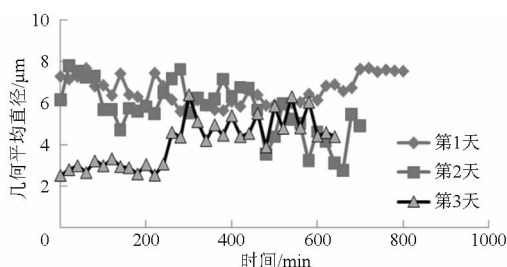


图9 肉牛养殖场排放的空气颗粒污染物的几何平均直径

Fig. 9 Geometric mean diameter of particulates emitted from feedlot

图10所示为该肉牛养殖场第1天空气中 $\text{PM}_{10}$ 随时间的变化情况,从图中可以看出,上午因牛采食等活动使 $\text{PM}_{10}$ 略有升高,但随着温度升高,牛的运动量降低, $\text{PM}_{10}$ 变化并不大,从600 min,即17:00左右, $\text{PM}_{10}$ 开始逐渐上升,从最初的 $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增长到 $400\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,峰值达到 $600\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,这是由于傍晚天气变得凉爽,环境舒适,牛开始频繁地跑动,运动量加大,圈舍地表未压实的土壤因牛的跑动而被带起,使得 $\text{PM}_{10}$ 在傍晚时迅速增大,出现了颗粒污染物的峰值。

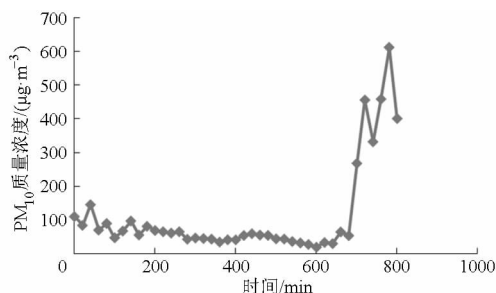


图10 肉牛养殖场 $\text{PM}_{10}$ 的质量浓度

Fig. 10  $\text{PM}_{10}$  mass concentration of air pollutant from feedlot

可见APS在实地实时测量颗粒污染物的不同指标时结果与实际情况基本吻合,比较准确,并且能给出不同指标,从多个角度对颗粒污染物进行分析。

## 4 结论

(1) APS测得玻璃球粉末110P8和60P18的最大的几何直径分别为 $10.1\ \mu\text{m}$ 和 $17.0\ \mu\text{m}$ ,分别在 $9\sim 13\ \mu\text{m}$ 和 $16\sim 20\ \mu\text{m}$ 实际粒径尺寸范围内;测得植物油滴平均直径均值为 $0.75\ \mu\text{m}$ ,非常接近实际粒径尺寸 $0.8\ \mu\text{m}$ 。

(2) 在对比分析APS与MOUDI测得的质量浓度时,对于植物油滴的测量结果,两者较为接近;对于110P8玻璃球粉末的测量结果,APS测量的分布

情况较为集中,而 MOUDI 相对分散。通过对 110P8 玻璃球粉末和植物油滴的 2 种仪器测得的累积质量百分比浓度分析,分别获得了数据的相关性, $R^2$ 分别为 0.998 和 0.938。

(3) APS 在实时测量畜禽养殖场的空气颗粒污染物时效果较好,能反映出空气颗粒污染物的变化情况,可以通过几何平均直径、数量浓度和质量浓度这些指标从多个角度对颗粒污染物进行分析。

### 参 考 文 献

- 1 Schauer J J, Cass G R. Source apportionment of wintertime gas-phase and particle-phase air pollutants using organic compounds as tracers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(9): 1821 - 1832.
- 2 蔡长霞. 畜禽环境卫生[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- 3 Shepherd T A, Zhao Y, Li H, et al. Environmental assessment of three egg production systems—Part II. Ammonia, greenhouse gas, and particulate matter emissions[J]. *Poultry Science*, 2015, 94(3): 534 - 543.
- 4 Bencs L, Ravindra K, de Hoog J, et al. Mass and ionic composition of atmospheric fine particles over Belgium and their relation with gaseous air pollutants[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, 10(10): 1148 - 1157.
- 5 阎波杰, 潘瑜春. 规模化畜禽养殖场粪便养分数据空间化表征方法[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 154 - 158.  
Yan Bojie, Pan Yuchun. Research on characterization method of statistical data of scale raising farms[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 154 - 158. (in Chinese)
- 6 魏复盛, 胡伟. 空气污染对人体健康影响研究的进展[J]. *世界科技研究与发展*, 2000, 22(3): 14 - 18.
- 7 Marple V, Olson B, Romay F, et al. Second generation micro-orifice uniform deposit impactor, 120 MOUDI-II: design, evaluation, and application to long-term ambient sampling[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, 48(4): 427 - 433.
- 8 赵鹏, 朱彤, 梁宝生, 等. 北京郊区农田夏季大气颗粒物质量和离子成分谱分布特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(2): 193 - 199.  
Zhao Peng, Zhu Tong, Liang Baosheng, et al. Characteristics of mass distributions of aerosol particle and its inorganic water-soluble ions in summer over a suburb farmland in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 193 - 199. (in Chinese)
- 9 梅德清, 王书龙, 袁银男, 等. 基于 MOUDI 采样装置的 186FA 柴油机微粒物粒径分布特性研究[J]. *车用发动机*, 2013(1): 70 - 74.  
Mei Deqing, Wang Shulong, Yuan Yinnan, et al. Research on particulate size distribution characteristics of 186FA diesel engine with MOUDI device[J]. *Vehicle Engine*, 2013(1): 70 - 74. (in Chinese)
- 10 李铭迪, 王忠, 李立琳, 等. 乙醇/柴油燃烧颗粒状态特征试验研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 28 - 32.  
Li Mingdi, Wang Zhong, Li Lilin, et al. Particulate status of diesel engine fueled with ethanol/diesel blends[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 28 - 32. (in Chinese)
- 11 Gonzales H B, Maghirang R G, Wilson J D, et al. Measuring cattle feedlot dust using laser diffraction analysis[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(6): 2319 - 2327.
- 12 朱传雨, 刘建国, 陆亦怀, 等. 基于双口 RAM 的高速大容量气溶胶空气动力学粒径信息提取[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(10): 2168 - 2173.  
Zhu Chuanyu, Liu Jianguo, Lu Yihuai, et al. High speed and large capacity information extraction of aerosol aerodynamic particle diameter using dual port RAM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2168 - 2173. (in Chinese)
- 13 Jung J H, Park S Y, Lee J E, et al. Distinguishing biotic and abiotic particles using an ultraviolet aerodynamic particle sizer for real-time detection of bacterial bioaerosols[J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29(9): 866 - 874.
- 14 李海军, 赵越, 魏强, 等. 空气动力学粒径谱与微量振荡天平颗粒物质量浓度的测量比较[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(4): 315 - 320.
- 15 Peters T M, Ott D, O'Shaughnessy P T. Comparison of the Grimm 1. 108 and 1. 109 portable aerosol spectrometer to the TSI 3321 aerodynamic particle sizer for dry particles[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2006, 50(8): 843 - 850.
- 16 黄嫣旻, 束炯, 顾莹. 上海道路扬尘粒径两种分析方法的比较[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2007(6): 37 - 43.
- 17 Gard E, Mayre J E, Morrical B D. Real-time analysis of individual atmospheric aerosol particles: design and performance of a portable ATOFMS[J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69(20): 4083 - 4091.
- 18 Gard E, Mayer J E, Morrical B D, et al. Real-time characterization of individual aerosol particles using time-of-flight mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 1994, 66(9): 1403 - 1407.
- 19 Salt K, Noble C A, Prather K A, et al. Aerodynamic particle sizing versus light scattering intensity measurement as methods for real-time particle sizing coupled with time-of-flight mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 1996, 68(1): 230 - 234.
- 20 王蓓, 刘建国, 刘增东, 等. 利用 APS 实现大气气溶胶数密度和质量浓度的测量[J]. *现代仪器*, 2006, 12(6): 15 - 17.
- 21 Volckens J, Peters T M. Counting and particle transmission efficiency of the aerodynamic particle sizer[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, 36(12): 1400 - 1408.
- 22 保罗·巴伦, 克劳斯·维勒克. 气溶胶测量原理、技术及应用[M]. 白志鹏, 张灿, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 23 Peters T M. Use of the aerodynamic particle sizer to measure ambient PM10-2. 5: the coarse fraction of PM10[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(4): 411 - 416.