

微生物气溶胶采集技术的特点及应用

王彦杰^{1,2} 李琳^{1,2*} 许光素^{1,2} 刘俊新^{1,2} 韩云平^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室 北京 100085)

(2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 微生物气溶胶是悬浮于空气中粒径差异显著的生物粒子。污水处理、垃圾填埋等污水和固体废弃物的处理过程会产生大量的微生物气溶胶。近年来,随着对微生物气溶胶的不断认识,对其产生、逸散以及危害环境和人体的研究越来越多。在过去的150年,研究者们研发了多种微生物气溶胶采集技术和仪器设备,每种采集技术各有特点和适用条件。本文阐述沉降法、惯性采样法和过滤法3种典型微生物气溶胶采集技术的特点和原理,分析各种采样设备的适用性,为微生物气溶胶的采集和研究提供参考。

关键词: 空气污染, 微生物气溶胶, 沉降, 惯性采样, 过滤

The application and characteristics of technologies for bioaerosols collection

WANG Yan-Jie^{1,2} LI Lin^{1,2*} XU Guang-Su^{1,2} LIU Jun-Xin^{1,2} HAN Yun-Ping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Bioaerosols are particles of biological origin that are suspended in the air and cover a wide size range. A large number of bioaerosols are emitted during the process of sewage and solid waste treatment. With an increasing attention towards bioaerosols, their generation, transmission and potential hazards to human health and environment have been extensively investigated. Various sampling technologies and devices have been developed for the collection of bioaerosols in the past 150 years. Each one of these methods and devices has its unique characteristics and suitable application areas. Sedimentation, inertial sampling and filtration are three typical techniques used for bioaerosol collection. This paper summarizes the operational principles, the collection efficiencies and the application scope of these techniques, which will serve as the scientific bases for bioaerosol investigations in future.

Keywords: Air pollution, Bioaerosols, Sedimentation, Inertial sampling, Filtration

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51478456); China Welfare Funds for Environmental Protection (No. 201509008)

*Corresponding author: Tel: 86-10-62923543; E-mail: leel@rcees.ac.cn

Received: April 27, 2016; Accepted: August 30, 2016; Published online (www.cnki.net): October 11, 2016
基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51478456); 环保部环保公益性行业科研专项项目(No. 201509008)

*通讯作者: Tel: 86-10-62923543; E-mail: leel@rcees.ac.cn

收稿日期: 2016-04-27; 接受日期: 2016-08-30; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-10-11

微生物气溶胶由不同种类的微生物、不同粒径的颗粒物和水分组成,具有来源广泛、成分复杂、粒径差异显著的特点。与其他可吸入颗粒物一样,微生物气溶胶易沉着于人体的呼吸系统,沉着部位与微生物气溶胶的粒径有关,如 10 μm –30 μm 的粒子会沉积在支气管,1 μm –5 μm 的粒子可直接侵入肺泡^[1]。气溶胶一般携带细菌、真菌、病毒、动植物碎片等,因此会对人体健康造成危害。随着空气的流动,微生物气溶胶扩散到各处,还可能致区域性环境的影响^[2]。

为了有效监测和量化空气中的微生物气溶胶逸散水平,确定其主要来源和污染程度,多年来研究者们致力于研发高效、便捷、精确的微生物气溶胶采集技术和装置。Pouchet Acroscope 是已报道的研发和使用最早(1860年)的微生物气溶胶采集装置。之后的 150 多年中,研发的采样设备种类繁多^[3-5],它们大多以发明者的名字命名(表 1)。本文论述了常用的微生物气溶胶采集技术和装置的特点、技术原理和使用范围,为微生物气溶胶的采集、分析和研究提供科学依据和参考。

表 1 采样方法和采样器的发展
Table 1 The development of sampling methods and sampling devices

年代 Years	采样方法 Sampling methods	采样设备 Sampling devices
1860	未报道	Pouchet 采样器
1870	未报道	Miquel 采样器
1881	沉降法	气溶胶收集玻璃平板
1890	未报道	Michaelis 采样器
1920	惯性采样法	Greenburg-Smith 撞击器 Owens 多级集尘器 Hill 集尘器
1950	惯性采样法	Battelle 6 号撞击器 Brink 撞击器 安德森采样器
1950–2016	惯性采样法 过滤法 惯性采样法 惯性采样法 惯性采样法 沉降法	全玻璃采样器 总悬浮颗粒物采样器 Buarkard 采样器 组合多管旋风采样器 分级式采样器 静电颗粒采集器

1 微生物气溶胶的采集方法

常用的微生物气溶胶采集方法包括沉降采样法、惯性采样法和过滤采样法^[6],每种方法各有其特点、技术原理和适用条件。

1.1 沉降采样法

1.1.1 重力沉降法:沉降采样法可以分为重力沉降法和静电沉降法,其中,重力沉降也称自然沉降^[3]。1860 年研发和使用的 Pouchet Acroscope 是最早的利用粒子自然沉降原理,采集空气中的微生物气溶胶的采样器。使用自然沉降法采集样品,结合显微镜观察,可以直观地辨别空气中颗粒物与微生物,曾用于研究空气颗粒物和疾病的关系^[3]。自然沉降法利用了空气微生物粒子的重力作用,在一定时间内将微生物粒子收集到带有培养基的平皿内,经过培养可以对微生物进行计数和分析鉴定,从而获得气溶胶中微生物的数量和种类方面的信息^[6]。

自然沉降法收集的空气中微生物气溶胶,其浓度是以每 100 cm^2 的培养基表面 5 min 内收集 10 L 空气中所含的微生物粒子数表示的^[6],通常采用奥梅梁斯基经验公式计算(公式 1)。该计算公式没有考虑风速、温度、光照等气象条件的影响,因此结果偏差较大,只能对空气中微生物气溶胶的数量作粗略的估算。

$$C = (N \times 50\,000) / (A \times T) \quad (1)$$

其中:

C : 空气中的菌落数(CFU/ m^3);

N : 平皿菌落数(CFU);

T : 暴露时间(min);

A : 平皿表面积(cm^2)。

自然沉降法适宜在风速小、气流稳定、采样时间较长(8–30 min)的室内环境中使用。采集设备简单、操作便捷、经济实用。根据培养基的种类及其成分,可以有选择地培养不同种类的微生物,适合分离和鉴定目标菌株^[6]。其结果可以初步反映环境空气中可培养微生物群落结构和数量。郭雅蓉等利用自然沉降法采集实验室微生物气溶胶,分析空

气微生物污染程度。研究者将数个平皿分别置于距离地面 1.5 m 的 3 个采样点。5 min 后,再将平皿放入恒温箱内 36 °C 培养 48 h。利用公式(1)计算得到室内空气中细菌总数为 162–7 369 CFU/m³[6]。19 世纪 80 年代至 20 世纪 50 年代,自然沉降法应用广泛,是研究室内空气气溶胶中可培养微生物的便捷有效的采集方法。自然沉降法的缺点是采样过程易受气流、风力等环境因素影响,无法获得不可培养微生物的数量以及微生物气溶胶的粒径尺寸与分布等方面的信息。

1.1.2 静电沉降法: 无论环境中自然存在还是人为产生的微生物气溶胶都带有一定量的电荷。由于静电作用,带电粒子进入电场时会发生偏转,利用这个原理,通过外加电场,可以收集空气中的微生物气溶胶,这种收集方法即为静电沉降法。在采集过程中,电场作用力直接施加于粒子本身,并且速度低、空气阻力小,所以静电沉降法具有捕获率高、可收集粒子的粒径范围广、能耗低、对微生物损伤较少的特点。运用微生物自身携带的电荷,可以采集空气中的细菌、真菌、过敏原和内毒素等微生物粒子[7]。Xu 等在研究大肠杆菌和白色假丝酵母在空气中的存在水平时使用了静电采集装置。研究发现在流量为 10 L/min、电场强度为 7.5 kV/cm 情况下,两种微生物的收集效率较高,分别为 79%和 71%;并且发现大肠杆菌和白色假丝酵母两种微生物气溶胶的粒径大多集中在 1.8 μm 和 1.3 μm–3.1 μm^[8]。

不同种类微生物自身携带的电荷数量有差异,部分微生物气溶胶因自身所携带的电荷少而导致其捕获率低。新型的静电采样器在静电收集区之前设置电晕放电区,即先将荷电少的微生物输入电晕放电区增加荷电,然后再进入静电收集区收集,这样可以提高采样效率^[9]。根据微生物气溶胶的特点,通过调节电压,使每种微生物都可获得理想的捕获率。但是,荷电过高会使微生物活性受损伤。因此采用静电沉降法采集微生物气溶胶时,应注意避免强电场、电晕放电等对微生物的损伤^[9]。

1.2 惯性采样法

空气中的微生物气溶胶粒子获得足够的惯性后会脱离气流,在惯性的作用下,撞击到采样介质上,这种采集气溶胶的方法即为惯性采样法。利用抽气管迫使含有微生物粒子的空气通过采样器上的喷嘴,形成高速喷射气流,并使喷射气流发生偏转,粒径大于或者等于切割粒径的粒子能够被收集,较小的粒子由于惯性小,会随气流发生偏转而逃逸,因此这类采样装置可以将不同粒径的颗粒分开收集。1945 年 May 设计的 May cascade impactor 是最早利用惯性采样法的,既能获得浓度范围又能获得粒径分布的多级采样器^[10]。之后研究者们研发的分级采样设备大多源于 May cascade impactor^[3]。根据收集介质,常用的惯性采样器可以分为固体撞击式采样器和液体冲击式采样器。

1.2.1 固体撞击式采样器: 固体撞击式采样器主要用于分析微生物气溶胶中的微生物种类及粒径分布,具有采集效率高、粒谱范围宽、操作简便的优点。收集介质通常是培养基,易于微生物的培养和鉴定。因此,这类采样装置还具有灵敏度高、选择性好的特点^[11]。与自然沉降法相比,撞击法更具合理性、稳定性和科学性^[7,12-14]。能够检测活性粒子的粒径分布是其独有的特性,该种采样装置尤其适合采集空气中易沉着在人体呼吸道中的粒子,广泛用于分析和鉴定与获得性呼吸系统感染有关的致病微生物^[11]。

Andersen 采样器是典型的固体撞击式采样器,可分为多级采样器和单级采样器,它们各有特点和适用范围,多级采样器采集到的粒子大小范围比单级采样器广。多级 Andersen 采样器不仅能够把可吸入与非可吸入微粒分离开,而且能够反映微粒进入肺部的分布状况。对于 6 级 Andersen 采样器,第 1–2 级对应人体的上呼吸道,第 3–6 级类似人体的下呼吸道^[13]。根据需要采集气体的流量,Andersen 采样器又分为大流量采样器和小流量采样器。大流量采样器收集的气体量大,因此易于捕获气溶胶中的微量成分。对于小流量采样器,由于流速慢,其

壁损失小, 采样过程中样品较少受到损伤, 因此捕获率高^[15]。在相同条件下, 大流量采样器检测到的气溶胶浓度比小流量采样器获得的结果低, 通常只有小流量的 71%–80%^[15]。六级 Andersen 采样器的每级筛网下面装有皮氏培养皿, 根据所采集的目标微生物, 在培养皿内配制不同的培养基可以获得不同种类的微生物信息。当使用 LB 培养基和孟加拉红培养基时, 可以分析空气中可培养的细菌和真菌。氧化沟工艺污水处理厂微生物气溶胶逸散的研究显示, 各个污水处理工艺段气溶胶中既有细菌又有真菌, 充氧转刷附近细菌气溶胶和真菌气溶胶的逸散水平最高, 是主要的逸散源^[16]。

固体撞击式采样器收集的空气中微生物气溶胶的浓度可以利用公式(2)计算。

$$C = (N \times 1000) / (Q \times T) \quad (2)$$

其中:

C : 菌浓度(CFU/m³);

N : 菌落数(CFU);

T : 采样时间(min);

Q : 气体流量(L/min)。

采样过程中, 由于微生物气溶胶颗粒会撞击在介质表面的同一位置, 前面收集的粒子易被后面撞击的粒子覆盖, 使检测结果出现偏差; 而且空气中微生物气溶胶的浓度越高, 偏差越大^[17]。因此, Andersen 采样器的使用易受空气中微生物气溶胶原有浓度的限制。为了解决这个问题, Andersen 和 Janet 分别设计了针对每层 400 个孔或 200 个孔的采样器的数值校正表, 对结果进行校正^[18-19]。

依据惯性原理制造的固体撞击式采样装置还包括 JW-6 型(6 级)、WSY-6 型(6 级)、KHW-8 型(8 级)、YCW-3 型(8 级)、ETW-6 型(6 级)和 FA-1 型(6 级)等。这些装置结构基本相同, 由撞击器、流量计、定时器和支架等几个部分组成^[20-21]。安德森采样器和 FA-1 型采样器多用于污水处理厂、城市不同功能区等地空气中微生物气溶胶的监测、分析和研究^[22-23]。运用 FA-1 采样器采集污水处理厂各工艺段的微生物气溶胶, 比较各工艺段微生物气溶胶的逸

散特点, 发现预处理工艺段、生化池和污泥脱水等工艺段是污水处理厂微生物气溶胶的主要产生源。细菌和真菌的逸散水平分别为 371–6 136 CFU/m³ 和 100–1 742 CFU/m³; 并且各个工艺段气溶胶中的细菌都具有较高的多样性^[23]。研究还发现, 好氧生物处理单元的曝气方式对生物气溶胶的产生量影响显著, 氧化沟工艺比鼓风曝气工艺产生更多的携带细菌的气溶胶, 研究结果为污水处理工艺设计时控制微生物气溶胶逸散方法的选择提供了科学依据^[24]。通风也会引起密闭空间微生物气溶胶粒径分布和菌群结构的差异, 在相对封闭的污水处理站, 经过 4 h 的通风, 大粒径(>4.7 μm) 和小粒径(0.65 μm–1.10 μm) 的粒子比例显著减少, 0.65 μm–1.10 μm 的细菌减少 89.1%, 同时真菌减少了 92.1%。而细菌的多样性明显增加, *Bacillus* sp. 和 *Lysinibacillus* sp. 是空气中主要的细菌^[25]。研究青岛近海生物气溶胶的分布特征时, 使用了 FA-1 型采样器获得大气微生物气溶胶中大于 2.1 μm 的粒子所占比例, 以说明青岛近海生物气溶胶受到陆地和海洋的影响状况^[26]。

随着流体颗粒动力学理论的发展, 高速计算机和有限积分的应用以及对采样器中流场和颗粒轨迹关系的深入理解, 1970 年学者们相继研发了能分辨不同粒径微生物气溶胶的采样器, 如 Marple 采样器、Lovelace 低流速采样器以及 QCM 多级采样器, 以满足粒径分离和粒径分布分析的研究要求^[3]。

因为收集介质是培养基, 固体撞击式采样器只能用于检测可培养和活的微生物, 不可培养和已经死亡的微生物不能检出^[11]。另外, 壁损失和粒子破碎等原因也会导致结果有误差。

1.2.2 液体冲击式采样器: 液体冲击式采样器是利用喷射气流的方式捕获空气中的微生物粒子。在取样瓶中加入适量收集介质, 启动抽气泵, 空气从吸收瓶入口处进入。由于入口末端喷嘴口径狭小, 气流速度加快; 当速度达到一定程度后, 微生物粒子冲击到收集介质中, 利用液体的粘附性, 将微生物

粒子捕获。液体冲击式采样器的收集介质是无菌水、缓冲生理盐水或营养液等液体。液体具有缓冲作用,能够减少微生物的损伤。采用矿物油等黏度高的非挥发性液体作为收集介质时,可以获得较高的捕集效能。在收集介质中加入适当的营养液或保存液,还可以长期保存样本以便随时分析检测^[4,17]。另外,使用该种装置采集的样品可以不经培养而直接进行分析,既可以检测可培养微生物,也可以检测不可培养的微生物,因此增加了检测微生物气溶胶的范围,也能更全面地反映气溶胶中微生物的种群结构。

采样过程中,空气以较高的速度进入液体,随即产生一定数量的气泡。气泡破裂时会引起部分已经进入收集介质的微生物颗粒再次气溶胶化。同时,一部分微生物粒子直接撞击到采样瓶底部发生反弹,反弹的粒子随气流逃逸出采样器。微生物粒子的逃逸和再次气溶胶化,导致计数结果出现偏差。另外,长时间采样引起的收集介质蒸发也会增加误差。因此液体冲击式采样器适用于短时间的收集样品^[4,17]。

常用的液体冲击式采样器是 SKC 公司生产的 BioSampler^[27]。该采样装置由一台高流量的空气采样泵、收集瓶和带有 3 个切线式弯度的喷嘴组成。BioSampler 运用了旋转液体的方法,减少所捕获粒子再次气溶胶化的发生几率^[28]。使用 BioSampler 采集仪器,结合分子生物学分析方法,发现污水厂生化池充氧过程产生的微生物气溶胶的数量、微生物群落结构和化学物质组成差异明显,与环境条件以及主要产生源的距离密切相关^[28-29]。AGI 系列采样器也是液体冲击式采样器,包括 AGI-30 和 AGI-4 两种主要类型,其冲击距离分别为 30 mm 和 4 mm。AGI-30 是国际空气生物学会议推荐使用的采样器。AGI-4 采样器可收集到更细小的颗粒物,但是,在收集过程中微生物的损伤也较大。AGI 系列采样器为玻璃材质,易清洗和灭菌,但是也易碎和便于携带^[6]。

气旋式采样器是液体冲击式采样器的一种。该

种采样器是由旋风除尘器演变而来,利用微生物粒子在气流旋转过程中的惯性离心力,将微生物从气流中分离并捕集于器壁,再借助重力作用使粒子落入采样器底部收集介质中。采集到的样本可以不断地从收集装置移走,因而在连续采样过程中不会发生因收集介质蒸发而导致结果有误差的现象。Burkard 采样器是一种常用的自动多瓶气旋式采样器,可以实时快速地对空气中的孢子和颗粒物进行采集。在评价人类活动对室内空气中真菌孢子的影响时,Buttner 等^[30]使用了 Burkard 采样器。他们的研究结果证明了 Burkard 在室内真菌孢子采集中的有效性和在采集完整微生物方面的优势。但是,气旋式采样器也存在气体流量不稳定、系统压降大、能耗高和流量过低时采样效率低等方面的缺点,因此在实际中应用较少。

1.3 过滤法

除了自然沉降法,过滤式采样器是最简单的一类采样设备。其结构主要包括抽气装置和装有多孔滤膜的收集装置。当空气以一定速度穿过多孔滤膜时,微生物粒子被拦截并滞留在滤膜上。常用的滤膜材料包括玻璃纤维、聚氯乙烯、纤维素等,可捕获粒径在 0.1 μm –6.0 μm 范围的粒子。微生物气溶胶的收集效率与滤膜类型、孔径以及气体流速有关。枯草芽孢杆菌孢子、MS2 病毒粒子、聚丙烯酰胺的收集效果比较试验显示,明胶滤膜对粒子的收集率能够达到 93% 以上,而 PC 滤膜对 0.1 μm 以下的粒子收集效率较低^[31]。

过滤式采样器采集到的样品需要进行二次处理,操作较复杂,与直接捕获粒子的采样器相比,误差较大。环境条件如空气的湿度会影响采集效果,湿度过低的干燥气体流过滤膜时,会使捕获的生物粒子失去活性^[31];湿度过高时,易在滤膜表面形成水膜,不利于微生物捕捉。适宜的相对湿度通常为 30%–85%。另外,过滤法也不适宜长时间采样^[32]。

总悬浮颗粒物(TSP)采样器是典型的过滤式采样装置,是监测环境大气质量的主要仪器^[33]。由于

空气的湿度会影响分析结果,李中愚等提出了用恒湿箱存放滤膜、采样期间调节湿度等方法,提高分析结果的准确性^[33-34]。TSP-PM10-II型中流量颗粒物采样设备小型便携,可以无人值守全天候工作,还可以随时查阅监测数据,适用于采集空气环境监测中总悬浮颗粒物。当配备不同的切割器时,还可以采集不同粒径大小的颗粒物^[35]。

2 微生物气溶胶采集技术的选择和应用

各类采样技术和设备各具特点,自然沉降法和过滤式采样方法的样品采集设备较简单、便于操作和携带。与过滤法相比,沉降法因空气阻力小,还具有捕获率高、能耗低的特点。静电沉降方法在强电力作用下,对亚微米级的小粒子也能有效地收集,适于空气中浓度很低的微生物气溶胶,如致病微生物的采集。对于过敏原和内毒素等粒子的采集,静电采集装置的捕获率比固体撞击式采样器的捕获率高4-10倍^[6]。惯性采样法捕获微生物粒子的粒谱范围宽、灵敏度高、选择性好。其中液体撞击式采样器壁损失小,微生物损伤少;撞击式采集技术采样压力低,微生物粒子捕获率高、菌落失活率低^[11]。

沉降法主要用于分析室内空气中的微生物气溶胶,如沉降法可应用于化妆品生产车间、办公室、实验室、教室等场所^[36-37]。惯性采样法应用广泛,在垃圾填埋场、污水处理厂、畜禽养殖场等均有应

用(表2)。20世纪以来,Andersen采样器大量应用于检测污水处理过程产生的微生物气溶胶。利用Andersen采样器采集污水处理站空气中气溶胶,研究污水处理产生的微生物气溶胶的特征和影响因素。结果显示污水站空气中的细菌气溶胶在4个季节中均被检出,逸散水平随季节变化明显,夏季细菌的浓度达到4155 CFU/m³,大部分细菌的粒径为1.1 μm-4.7 μm^[38]。惯性采样法也用于检测畜禽养殖场空气细菌总数和活体病原微生物气溶胶粒子的浓度,研究空气中的微生物存活力和繁殖性,为判别病原微生物气溶胶感染养殖场动物的能力提供依据^[39]。

一般地,采集细菌等大的活性粒子时,常用Andersen多级采样器,不仅能测定活性粒子的数量,还能将粒子按粒径分级,也适用于rAdvGFP模式病毒气溶胶的采集^[40]。当微生物浓度过高或过低时,使用液体冲击法采集粒子,微生物计数更准确^[17]。目前已有的微生物气溶胶的采集仪器和设备种类繁多,应根据需要获得的信息和使用条件进行选择。

3 微生物气溶胶采集技术的发展及可能的趋势

1881年创建的自然沉降法可以直观地观察和区分微生物粒子与无机颗粒物,如灰尘等,并且能初步计算空气中微生物粒子的浓度。1945年研发的May cascade impactor不仅能够获得微生物气溶胶

表2 采样方法的应用

Table 2 Application of devices for bioaerosols collection

采样方法 Device for bioaerosols collection	应用场所 Applications	微生物种类 Type of microorganism
沉降法 Sedimentation	自然沉降法 化妆品生产车间、办公室、实验室、教室 ^[36-37]	细菌、真菌、放线菌
	静电沉降法 室内空气 ^[9]	细菌、真菌、放线菌
惯性采样法 Inertial sampling	固体撞击法 垃圾填埋场 ^[41] 、污水处理厂 ^[23-24] 、室外大气 ^[26,42] 、医院、卫生防疫站、畜禽养殖 ^[39]	细菌、真菌、放线菌、病毒
	液体冲击法 室外大气 ^[43] 、污水厂 ^[27] 、医院 ^[44]	细菌、真菌、放线菌、花粉、病毒及其副产物
过滤法 Filtration	室外大气 ^[33]	细菌、真菌、放线菌

的浓度,还能够获得粒径分布的信息。1956年 Andersen 采样器及计数校正方法的出现更加准确地分析微生物气溶胶粒子的粒径分布和数量。随后的几十年,更多的采样仪器和设备如 AGI-30、LWC、Andersen 多级采样器被研发出来,用于各种大气环境的微生物检测。随着公众对微生物气溶胶危害认识程度的提高,近年来对其产生机制、逸散方式、扩散模式以及危害环境和人体等方面的研究也越来越多,并逐渐成为研究热点。早期微生物气溶胶的研究主要集中在工厂、医院的室内环境以及畜禽养殖、污水处理等环境,后来逐渐延伸到城市大气环境等方面;分析的微生物种类也由可培养微生物扩展到不可培养微生物;采样设备也逐渐具有专一性和特定性。2016年韩云平等研制的可调式微生物气溶胶采集设备就是对已有的 TSP 采样器的改进。该装置包括采样系统、延伸系统和延伸固定系统三部分(图 1)^[45]。它可以采集气-液界面及不同垂直高度的微生物气溶胶,具有快速、简易、便携等特点,尤其适用于研究污水处理厂和污水处理站的微生物气溶胶的逸散特征和扩散规律。

1860年至今的150多年里,被研发的微生物气溶胶采集仪器和设备多种多样,在环境监测和风险评估方面发挥了重要的作用。它们不仅能对空气中

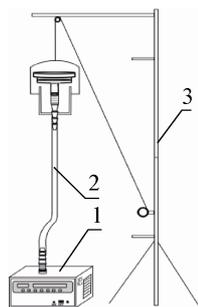


图 1 一种可调式的污水处理厂/处理站微生物气溶胶采集装置示意图

Figure 1 The diagram of an adjustable device for the collection of microbial aerosol from sewage treatment plant/station

注: 1: 采样系统; 2: 延伸系统; 3: 延伸固定系统。

Note: 1: Sampling system; 2: Extension system; 3: Extended fixed system.

的微生物浓度进行量化并进行健康风险评估,还能进行有效的监测以制定相应控制措施并评估措施效果。今后,其研发将着重于提高采集精度、粒径分级程度以及减少微生物损伤等方面。

参考文献

- [1] Yang WH, Wen ZB, Yu L, et al. Evaluation of the sampling efficiency of bioaerosol samplers by the aerosol generating method[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2009, 26(3): 245-248 (in Chinese)
杨文慧, 温占波, 于龙, 等. 应用气溶胶发生法评价空气微生物采样器采样效率[J]. 中国消毒学杂志, 2009, 26(3): 245-248
- [2] Ouyang YS, Xie XB, Chen YB, et al. The concentration and variation of airborne microbe in Guangzhou city[J]. Microbiology China, 2006, 33(3): 47-51 (in Chinese)
欧阳友生, 谢小保, 陈仪本, 等. 广州市空气微生物含量及其变化规律研究[J]. 微生物学通报, 2006, 33(3): 47-51
- [3] Marple VA. History of impactors—the first 110 years[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, 38(3): 247-292
- [4] Ghosh B, Lal H, Srivastava A. Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms[J]. Environment International, 2015, 85: 254-272
- [5] Polednik B. Aerosol and bioaerosol particles in a dental office[J]. Environmental Research, 2014, 134: 405-409
- [6] Guo YR, Liao CR, Liu YM. Detection and analysis of different sampling methods of indoor air microorganisms[J]. Disease Prevention and Control Bulletin, 2014, 29(4): 75-76 (in Chinese)
郭雅蓉, 廖春蓉, 刘玉梅. 室内空气微生物不同采样方法的检测分析[J]. 疾病预防控制通报, 2014, 29(4): 75-76
- [7] Zhang HL, Zhou MH, Zhen SQ, et al. Study on collecting efficiency of electrostatic field sampler for allergens in indoor air[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009, 21(2): 57-59 (in Chinese)
张惠力, 周明浩, 甄世祺, 等. 静电场采样装置对室内空气中过敏原采集效率的研究[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(2): 57-59
- [8] Xu YZ, Zheng C, Liu Z, et al. Electrostatic precipitation of airborne bio-aerosols[J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(3): 204-207
- [9] Mainelis G, Willeke K, Adhikari A, et al. Design and collection efficiency of a new electrostatic precipitator for bioaerosol collection[J]. Aerosol Science and Technology, 2002, 36(11): 1073-1085
- [10] May KR. The cascade impactor: an instrument for sampling coarse aerosols[J]. Journal of Scientific Instruments, 1945, 22(10): 187-195
- [11] Chen LX, Zhou SY. The progress of air microorganism sampler[J]. Journal of Hygiene Research, 1994(S1): 138-144 (in Chinese)
陈烈贤, 周淑玉. 空气微生物采样器的进展[J]. 卫生研究, 1994(S1): 138-144
- [12] Wang YL, Chen DH. Comparison of sampling methods of microorganisms in air[J]. Microbiology China, 1989, 16(5): 277-281 (in Chinese)
王豫林, 陈代鸿. 空气中微生物采样方法的比较[J]. 微生物学通报, 1989, 16(5): 277-281
- [13] Zhang SL, Tong YY, Jiang L, et al. The observation on the

- effect of using simplified domestic Anderson six stage sampler[J]. Chinese Journal of Public Health, 1994, 10(10): 454-455 (in Chinese)
- 张松乐, 董咏仪, 姜黎, 等. 国产六级安德森空气微生物采样器的简化使用效果观察[J]. 中国公共卫生, 1994, 10(10): 454-455
- [14] Li XX, Fu LY, Qiu YY, et al. Analysis of ERIC-PCR fingerprints of extended-spectrum β -lactamase producing *Escherichia coli* in the air of college student's dormitories[J]. Microbiology China, 2013, 40(9): 1618-1623 (in Chinese)
- 李晓霞, 付丽娅, 邱玉玉, 等. 高校学生宿舍室内空气中产超广谱 β -内酰胺酶大肠埃希菌分离株 ERIC-PCR 指纹图谱分析[J]. 微生物学通报, 2013, 40(9): 1618-1623
- [15] Fu FF, Xu LJ, Watanabe K, et al. Difference of results obtained with high and low volume Andersen samplers respectively in the research of atmospheric aerosols[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(S2): 110-113 (in Chinese)
- 付凤霞, 徐两军, Watanabe K, 等. 气溶胶研究中大流量和小流量安德森采样器间的结果差异[J]. 过程工程学报, 2006, 6(S2): 110-113
- [16] Li L, Gao M, Liu JX, et al. Removal of airborne microorganisms emitted from a wastewater treatment oxidation ditch by adsorption on activated carbon[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(5): 711-717
- [17] Tan SQ, Gu DY, Hou T, et al. Comparison of the solid air-sampler and liquid air-sampler for airborne microorganisms[J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2014, 18(1): 51-54 (in Chinese)
- 谈书勤, 顾大勇, 侯婷, 等. 固体空气微生物采样器与液体空气微生物采样器采样效果的比较[J]. 中华疾病控制杂志, 2014, 18(1): 51-54
- [18] Macher JM. Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms[J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1989, 50(11): 561-568
- [19] Andersen AA. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles[J]. Journal of Bacteriology, 1958, 76(5): 471-484
- [20] Li L, Han YP, Liu JX. Assessing genetic structure, diversity of bacterial aerosol from aeration system in an oxidation ditch wastewater treatment plant by culture methods and bio-molecular tools[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(1): 603-613
- [21] Liu JW, Zhang JC, Ma WL, et al. Pollution and distribution characteristics of bioaerosol in municipal wastewater treatment plant[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 657-661 (in Chinese)
- 刘建伟, 张俊超, 马文林, 等. 城市污水处理厂微生物气溶胶污染和粒径分布特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 657-661
- [22] Fang ZG, Ouyang ZY, Hu LF, et al. Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing[J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 1-5 (in Chinese)
- 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物颗粒度分布特征[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 1-5
- [23] Li L, Gao M, Liu JX. Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process[J]. Process Biochemistry, 2011, 46(4): 910-915
- [24] Gao M, Li L, Liu JX. Dissipation of microbial aerosols from typical municipal wastewater processes[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(9): 146-150 (in Chinese)
- 高敏, 李琳, 刘俊新. 典型城市污水处理工艺微生物气溶胶逸散研究[J]. 给水排水, 2010, 36(9): 146-150
- [25] Guo XS, Wu PP, Ding WJ, et al. Reduction and characterization of bioaerosols in a wastewater treatment station via ventilation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(8): 1575-1583
- [26] Liu MM, Qi JH, Gao DM, et al. Distribution characteristics of bioaerosol in Qingdao coastal region in fall 2007[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 565-571 (in Chinese)
- 刘苗苗, 祁建华, 高冬梅, 等. 青岛近海秋季生物气溶胶分布特征[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 565-571
- [27] Wei K, Zou ZL, Zheng YH, et al. Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 751-759
- [28] Han YP, Li L, Liu JX, et al. Microbial structure and chemical components of aerosols caused by rotating brushes in a wastewater treatment plant[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 19(9): 4097-4108
- [29] Han YP, Li L, Liu JX. Characterization of the airborne bacteria community at different distances from the rotating brushes in a wastewater treatment plant by 16S rRNA gene clone libraries[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(1): 5-15
- [30] Buttner MP, Stetzenbach LD. Monitoring airborne fungal spores in an experimental indoor environment to evaluate sampling methods and the effects of human activity on air sampling[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(1): 219-226
- [31] Jung JH, Hwang GB, Park SY, et al. Antimicrobial air filtration using airborne *Sophora flavescens* natural-product nanoparticles[J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45(12): 1510-1518
- [32] King MD, McFarland AR. Use of an Andersen bioaerosol sampler to simultaneously provide culturable particle and culturable organism size distributions[J]. Aerosol Science and Technology, 2012, 46(8): 852-861
- [33] Li ZY, Luo J, Min SX. Determination of total suspended particles in the air by constant humidity method[J]. Environmental Monitoring in China, 1990, 6(2): 7-10 (in Chinese)
- 李中愚, 罗军, 闵守祥. 恒湿法测定空气中总悬浮微粒 (TSP)[J]. 中国环境监测, 1990, 6(2): 7-10
- [34] Zhao AL. Determinating the general quality of suspended particulate by the method of correcting skit weighing[J]. Arid Environmental Monitoring, 1989(3): 55-58 (in Chinese)
- 赵爱莲. 用校正空白称量法测定总悬浮颗粒物的总结[J]. 干旱环境监测, 1989(3): 55-58
- [35] Tian G, Li JM, Li G, et al. Correlation between dust fall and TSP from construction sites[J]. Environmental Science, 2007, 28(9): 1941-1943 (in Chinese)
- 田刚, 李建民, 李钢, 等. 建筑工地大气降尘与总悬浮颗粒物相关性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1941-1943
- [36] Zhong Y, Guo CS, Li XH, et al. Application and comparison study of natural precipitation method and impacting method for measurement of bacterial count of air[J]. Journal of Environment and Health, 2004, 21(3): 149-152 (in Chinese)
- 钟凝, 郭重山, 李小晖, 等. 自然沉降法和撞击法在空气细菌总数测定中的应用和比较[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(3): 149-152
- [37] Chen XY, Xu QL, Li MZ, et al. Study of natural precipitation method and impacting method for measurement of bacterial count in air[J]. Journal of Tropical Medicine, 2007, 7(3): 282-284 (in Chinese)
- 陈新宇, 徐巧兰, 李名钊, 等. 撞击法和自然沉降法监测室内空气细菌总数捕获效果的研究[J]. 热带医学杂志, 2007, 7(3): 282-284
- [38] Ding WJ, Li L, Han YP, et al. Site-related and seasonal variation

- of bioaerosol emission in an indoor wastewater treatment station: level, characteristics of particle size, and microbial structure[J]. *Aerobiologia*, 2016, 32(2): 211-214
- [39] Liu BJ, Qian HG, Li YH, et al. Study on the change of the concentration of microbial aerosol in the space electric field and the occurrence characteristics of the epidemic disease[J]. *Feed and Aquaculture*, 2006(4): 9-11 (in Chinese)
刘滨疆, 钱宏光, 李蕴华, 等. 畜禽舍空间电场环境中微生物气溶胶浓度变化规律及疫病发生特点的研究[J]. *饲料与养殖*, 2006(4): 9-11
- [40] Chen L, Che H, Ren LL, et al. Study on the viral aerosol sampling by using Andersen microbial air sampler[J]. *Chinese Medicinal Biotechnology*, 2010, 5(5): 342-347 (in Chinese)
陈岚, 车红, 任丽丽, 等. 用安德森空气生物采样器采集病毒气溶胶的研究[J]. *中国医药生物技术*, 2010, 5(5): 342-347
- [41] Frączek K, Różycki H, Ropek D. Statistical analyses of bioaerosol concentration at municipal landfill site[J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2014, 21(2): 229-243
- [42] Hurtado L, Rodríguez G, López J, et al. Characterization of atmospheric bioaerosols at 9 sites in Tijuana, Mexico[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 96: 430-436
- [43] Andreeva IS, Safatov AS, Mokrushina OS, et al. Insecticidal, antimicrobial, and antiviral activity of *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* strains isolated from atmospheric aerosols in the South of Western Siberia[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, 27(6): 479-486
- [44] Liu F, Yu SY, Zhang BY, et al. Study on sampling and detecting of influenza virus aerosol in general hospital[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(7): 599-601 (in Chinese)
刘凡, 余淑苑, 张宝莹, 等. 综合性医院流感病毒气溶胶采样及检测方法研究[J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28(7): 599-601
- [45] Liu JX, Xu GS, Han YP, et al. An adjustable device for the collection of microbial aerosol from sewage treatment plant/station: China, CN105738166A[P]. (2016-07-06). <http://www2.soopat.com/Patent/201610074615> (in Chinese)
刘俊新, 许光素, 韩云平, 等. 一种可调式的污水处理厂/处理站微生物气溶胶采集装置: 中国, CN105738166A[P]. (2016-07-06). <http://www2.soopat.com/Patent/201610074615>

稿件书写规范

高校教改纵横栏目简介及撰稿要求

“高校教改纵横”栏目,是中国微生物学会主办的科技期刊中唯一的教学类栏目,也是中国自然科学核心期刊中为数不多的教学栏目。该栏目专为微生物学及其相关学科领域高校教师开辟,一方面为高校微生物学学科的教师提供一个发表论文的平台,同时微生物关联学科的一部分确实优秀的论文也可以在此发表,是微生物学及相关领域教学研究、交流、提高的园地。

本栏目的文章有别于其他实验类研究报告,特色非常鲜明。要求作者来自教学第一线,撰写的稿件内容必须要有新意、要实用,不是泛泛地叙述教学设计与过程,而是确实有感而发,是教学工作中的创新体会,或者在教学中碰到的值得商榷的、可以与同行讨论的有价值的论题。在内容选材上应该有鲜明的特点和针对性,做到主题明确、重点突出、层次分明、语言流畅。教师的教学思路应与时俱进,注意将国内外新的科技成果和教学理念贯穿到教学之中,只有这样才能真正起到教与学的互动,促进高校生物学教学的发展,更多更好地培养出国家需要的高科技创新人才。这也是本栏目的目的所在。

同时,为了给全国生物学领域的教学工作者提供一个更广阔更高层次的交流平台,本栏目还开辟了“名课讲堂”版块,邀约相关生命科学领域,如微生物学、分子生物学、生物医学、传染病学、环境科学等的教学名师、知名科学家就教学和学生培养发表观点,推荐在教学改革、教学研究、引进先进教学手段或模式以及学生能力培养等方面有突出成绩的优秀论文,为高校教师以及硕士、博士研究生导师提供一个可资交流和学习的平台,促进高校教学和人才培养水平的提高。

欢迎投稿! 欢迎对本栏目多提宝贵意见!