

生物气溶胶采样技术及设备研究

楚运浩, 徐勇

中国人民解放军陆军防化学院, 北京

收稿日期: 2024年6月7日; 录用日期: 2024年8月22日; 发布日期: 2024年8月29日

摘要

自然界空气中的微生物对人类生活和健康有着广泛影响。2003年暴发的重症急性呼吸综合症(SARS)、2009年的H1N1、2013年在我国首次发现的H7N9以及2019年爆发的新冠肺炎疫情使得全世界开始更加关注空气传染性疾病的传播。在多种疾病的传播方式中, 空气传播具有传播途径易实现、传播广泛、发病率高等特点, 而其中的生物气溶胶传播更是因其在空气颗粒物中所占比例小, 可通过呼吸道、皮肤和消化道进入人体, 引起感染、过敏性疾病和中毒等特点更加难以预防。所以对空气中病原体的实时监测和预警成为控制疫情传播的关键。本文主要总结了国内外关于微生物气溶胶采样技术及设备研究进展, 尤其是在微生物气溶胶粒度分离与浓缩采样技术方面, 结合研究现状, 提出改进措施。

关键词

生物气溶胶, 粒度分离, 浓缩

Research on Bioaerosol Sampling Technology and Equipment

Yunhao Chu, Yong Xu

PLA Army Chemical Defense College, Beijing

Received: Jun. 7th, 2024; accepted: Aug. 22nd, 2024; published: Aug. 29th, 2024

Abstract

Microorganisms in the air of nature have a wide range of effects on human life and health. The outbreak of severe acute respiratory syndrome (SARS) in 2003, H1N1 in 2009, the first discovery of H7N9 in China in 2013, and the sudden outbreak of COVID-19 this year have raised global concerns about the transmission of air infectious diseases. Among the transmission modes of various diseases, airborne transmission is characterized by easy realization of transmission routes, wide range of transmission, and high incidence rate. Among them, the biological aerosol transmission is

文章引用: 楚运浩, 徐勇. 生物气溶胶采样技术及设备研究[J]. 生物过程, 2024, 14(3): 123-131.

DOI: 10.12677/bp.2024.143016

even more difficult to prevent due to its small proportion in air particles, which can enter the human body through the respiratory tract, skin, and digestive tract, causing infection, allergic diseases, and poisoning. Therefore, the real-time monitoring and early warning of pathogens in the air become the key to controlling the spread of the epidemic. This paper summarizes the research progress of biological aerosol sampling technology and equipment in domestic and overseas, especially in the aspect of particle separation and concentration sampling technology of biological aerosol. Combined with the research status, the improvement measures and development advantages are proposed.

Keywords

Biological Aerosol, Particle Separation, Concentrate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自然界中物种复杂多样, 各种生物之间互相制约。如何正确利用这种关系是全人类应该思考的问题。第一次世界大战期间, 德国军队正式使用生物武器, 拉开了世界上这种非常规战争的大幕, 也让人们意识到生物之间制约关系的重要性。我国一贯反对生物战。1984年11月15日, 中国政府加入1971年12月16日联合国大会制定和通过的《禁止细菌(生物)及毒素武器的发展、生产及储存以及销毁这类武器的公约》(简称《禁止生物武器公约》), 并再次声明: 禁止生物武器公约的基本精神符合中国的一贯立场, 中国是生物(细菌)武器的受害国之一, 中国从未、将来也不会生产和拥有这类武器。

平时在我们的日常生活中生活中也有多种疾病会通过气溶胶传播。其特点为: 在空气颗粒物中所占比例小, 可通过呼吸道、皮肤和消化道进入人体, 引起感染、过敏性疾病和中毒, 正是因为以上特点使其更加难以预防[1][2]。所以对空气中病原体气溶胶的实时监测和提前预警成为控制疫情传播的关键。气溶胶采集方法多种多样, 基本原理也不尽相同, 而现实环境复杂多样, 所以我们要结合实际情况, 研究能够满足各种复杂条件下生物气溶胶采集的方法和设备。

本文结合不同环境下生物气溶胶采样方法的实际应用, 对各种生物气溶胶采样技术和设备进行了归纳总结, 重点梳理总结了生物气溶胶粒度分离及浓缩采样技术及设备研究进展, 并提出了改进措施。

2. 微生物气溶胶采样方法

最早的空气微生物采样只是用液体培养基, 方法原始: 即将一定体积的液体放走, 采集相同体积的空气标本, 对其微生物进行培养并通过简单的显微镜进行观察, 但无法进行分离鉴定。自1881年柯赫发明了固体培养基后, 采样技术就由液体法过渡到固体法, 即自然沉降法。早期的固体法仅用平皿暴露法, 尔后, 由俄国的奥梅梁斯基通过大量的实验, 建立了一个由大气微生物气溶胶沉降量计算大气微生物气溶胶含量的关系式[3]。后人在此基础上, 用实验的方法建立了不同环境条件下, 大气微生物气溶胶含量与沉降量之间的关系或校正值。因此, 自然沉降法作为测定大气微生物气溶胶沉降量的一种经典而又非常经济、简便的方法, 100多年来, 一直被广泛的应用着。

在微生物气溶胶的采样方法中, 根据采集时是否需要外界辅助, 将采样方法分为主动采样法和被动采样法[3]。

2.1. 被动采样法

被动采样方法是指无需外界辅助只依赖粒子自身重力的采样方法, 其最具有代表性的为自然沉降法。自然沉降法是指测定区域空气中的微生物气溶胶颗粒在自身重力的作用下, 一定时间内逐步沉降到带有培养介质的平板内, 再经过一段时间的培养后可以对微生物进行计算和分析鉴定, 从而确定气溶胶中微生物的数量和种类的一种采样方法[4]。

自然沉降法是空气中微生物气溶胶采样最常用的方法之一, 我国的医疗卫生机构在调查空气中微生物气溶胶的分布和粒谱时也常常选择。其在评估微生物表面污染的应用中, 该方法已经进行了标准化, 即将直径为 90 mm 采样板置于地面以上 1 m (实际中通常选择人的平均呼吸高度 1.5 m), 距离墙面 1 m, 暴露时间 1 h, 后得出的采集数据[3]。

该法可评估大气中微生物污染程度, 获得空气微生物污染指数。由于大气中的气溶胶粒子沉积速度范围广, 粒子浓度不高, 又有风的影响, 所以简单的自然沉降法采样并不理想, 采样效率比较低, 目前一般作为辅助的采样方法。

2.2. 主动采样法

主动采样法是依靠粒子质量和惯性且借助外力实现高效率采样的采样方法, 可实现粒度分级。根据应用的实际情况, 可分为常规主动采样法和非常规主动采样法[3]。

2.2.1. 常规主动采样法

常规主动采样法主要包括过滤法、气旋法、撞击法和冲击法, 根据采样方法的原理分别形成了过滤阻留器、气旋式采样器、撞击式采样器和冲击式采样器等设备, 如图 1 所示。

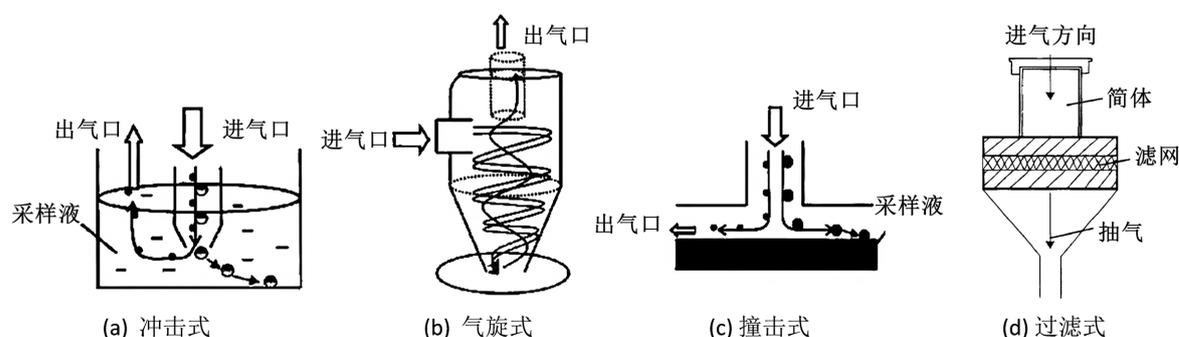


Figure 1. Schematic diagram of the working principle of three active samplers

图 1. 三种主动采样器的工作原理示意图

2.2.2. 非常规主动采样法

主要包括: 静电法、虚拟浓缩法、温差迫降法、生物采样法。

静电法是指利用高压静电场, 使空气中的生物粒子带上一定量的电荷后, 被带相反电荷的采集面吸附。其采集空气样本量大, 捕获小粒子效率高, 但放电过程不利于微生物存活。作为新型采样法, 该法仍在不断发展[3]。

温差迫降法, 基于粒子热泳原理, 使空气中生物粒子沉着于采样面上。该法采样流量小, 时间短且需冷却操作复杂仅在实验室使用[5]。

虚拟浓缩法, 根据离心力和惯性分离气溶胶颗粒, 将大流量空气中的颗粒富集到小流量中, 可与其他采样器联合使用提高低浓度生物粒子检出率, 缩短采样时间[3]。

生物采样法是指选用敏感的动植物进行空气微生物气溶胶的采样的方法。比如 Constantine 用草原狼、狐狸、田鼠等检测洞穴空气中的狂犬病毒。

上述方法特点对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of sampling methods for microbial aerosol

表 1. 微生物气溶胶的采样方法比较

分类方法	代表方法	采样机制	优点	缺点
被动采样法	自然沉降法	依赖粒子重力	无外力, 操作简单	1) 小于 5 微米粒子采样效率低, 难以推断微生物浓度; 2) 受空气运动影响大。
主动采样法	过滤法、撞击法、冲击法、气旋法、静电法、虚拟浓缩法、温差迫降法、生物采样法	依赖粒子质量和惯性和其他物理性质	效率高, 粒径广, 可分级采集; 受环境条件影响小	1) 采样外力可能降低生物活性; 2) 需使用外界器材会消耗资源或产生噪音等污染。

3. 气溶胶粒度分离采样技术

在众多的微生物气溶胶采样的方法中, 能够进行有效的粒度分离的方法主要有: 撞击法、过滤法、旋风分离法、离心法。

3.1. 撞击法

3.1.1. 撞击法采样原理

气溶胶分粒度采样最常用方法是撞击法, 它的基本原理是利用气溶胶粒子的空气动力学特性, 使粒子进入抽气采样装置后发生曲线运动, 从而发生惯性碰撞进而将粒子分离成大小不同的若干部分而分别加以收集[3]。在同样的线速度下, 粒子的粒度越大, 其动量越大, 因而所具有的惯性也就越大。带有气溶胶粒子的空气气流射出喷嘴孔口后, 气流受到撞击板的阻挡将发生急剧的偏转做曲线运动。通过喷嘴的气流发生转弯时, 气流中所有大小的粒子因惯性作用, 都有在线速度方向上保持其原直线运动的趋势。截止距离大到一定程度的粒子, 有可能一直冲到撞击板上, 从而被收集。把被采集的气溶胶粒子由大到小分离成很多个粒径范围而分粒度加以收集, 这就是撞击式分粒度采样装置的基本工作原理。

3.1.2. 典型的撞击式采样器

应用撞击法原理的采样器有: 国外有瀑布式撞击式采样器(cascade impactor)、安德森(Andersen)生物采样器等, 国内有 JWL、THK、SS-1、NHK 等设备。这类采样器的设计都是用抽气泵把气溶胶抽入带有气体的喷嘴且在喷嘴对面自置有撞击介质面。

(1) Andersen 采样器

Andersen 于 1958 年研制并定型生产的, 由顶罩、六节筛板、三个弹簧锁及抽气孔构成, 可以同时测空气微生物浓度和粒径分布。Andersen 采样器中, 每一级筛板由金属撞击盘和下面的培养皿构成, 每一级金属撞击盘上有 400 个等直径的环形小孔, 小孔直径从第一级的 1.3208 mm 逐级递减, 第六级的金属撞击盘上小孔制直径为 0.1524 mm。采样时, 气流流量为 28 L/min, 通过狭缝后气流撞击速度最大约为 24 m/s, 根据空气微生物粒径大小不同, 依靠自身的惯性被采集到不同的级别的培养皿上。该采样器可以分级收集 0.3~15 μm 空气微生物。

于玺华[6]等通过对比 Andersen 采样器与液体撞击式(AGI)采样器, 在相同条件下对枯草芽孢杆菌和粘质沙雷菌气溶胶进行采集, 结果发现 AGI 采样器所采集到的微生物仅为 Andersen 采样器的 42%~55%。

同时, Stewart [3]等研究指出, 气流通过 Andersen 采样器时, 局部速度过高会使得微生物在撞击过程中失活。Mainelis 等[7]通过研究采样时间对于撞击式采样器采样结果的影响, 提出当空气中微生物浓度过高或者采样时间过长时, 将使得微生物在撞击处重叠, 使得采样结果偏低, 故而指出该采样器适用于微生物气溶胶浓度低于 5000 cfu/m³ 的环境, 同时采样时间不宜过长。Andersen 采样器特点归纳如表 2 所示。

Table 2. Research summary of Andersen sampler

表 2. Andersen 采样器研究归纳

优点	缺点	改进思路和意见
1) 采集粒谱范围宽; 2) 结构简单; 3) 生物失活率低; 4) 敏感性高; 5) 操作简便; 6) 应用范围广。	1) 被捕集至收集板上的颗粒物容易产生反弹与再悬浮效应, 重新进入气流中, 影响采样效率; 2) 采集流量小, 收集板上的固体培养基会在与气流接触的过程中逐渐变干燥, 从而影响颗粒物的吸附以及后续的培养计数; 3) 采集时需要连接市电且噪音较大; 4) 采样时间过长会使粒子持续撞击在同一位置, 影响采样结果。	1) 去掉锥形口罩, 增加一节筛板, 此方法可以减少粒子的损失[6]; 2) 针对不同的采集环境, 重新设计每节上孔口的排列; 3) 设计可加热型的采样器, 主要针对严寒地区采集时培养基结冰和生物粒子失活的问题; 4) 设计出采样平皿可旋转的采样器, 解决粒子持续撞击在同一点的为题。

(2) THK-201 型采样器

该型采样器是由我国天津环保科学仪器厂研制的国产气溶胶采样器。由采样头、流量计、抽气泵、电源电路构成, 该型采样器的原理仍系固体惯性撞击。当打开电源后, 电动机转动, 带动抽气泵的同心轴转动进行抽气。由于抽气采样头产生负压, 悬浮于空气中的带菌粒子被迫吸入采样头的筛孔(隙), 由于孔(隙)很小, 带菌粒子同气体通过时就产生了加速度, 促使足够大的粒子具有一定大小的作惯性运动的动能, 从而撞击在挡在它前面的带有琼脂培养基的玻璃平板表面上。而那些小粒子因动能不足, 产生不了逃离气流的运行方向的惯性, 粒子被迫在气流的夹持下沿气流方向曳走, 最终逃到采样器外面[6]。

THK-201 型采样器的最大特点是采样头的筛孔(隙)为可调式。它的孔(隙)实际是由两块可调的金属板组成。当两板相向移动时, 采样孔(隙)缩小; 当两板背向移动时, 采样孔(隙)增大。该采样器可以通过调整孔(隙)大小来选择收集的粒子粒径从而达到粒度分离的目的, 当要用于采小粒子的环境中时, 可将采样器孔(隙)调小; 如要用于采大粒子时, 可将采样孔(隙)调大。这样运用自如, 因而大大增加采样器的应用范围。THK201 型采样器特点归纳如表 3 所示。

Table 3. Research summary of THK201 sampler

表 3. THK201 型采样器研究归纳

优点	缺点	改进思路和意见
1) 采样器头的孔(隙)为可调式; 2) 捕获率高; 3) 适用范围广; 4) 功能齐全。	1) 操作复杂, 对人员要求较高; 2) 对环境要求高; 3) 需要连接市电, 便携性较差。	结合实际需求采集的粒子列出图谱, 方便使用者操作。

3.2. 过滤法

3.2.1. 过滤法采样原理

应用过滤法采样时, 气流经由进口进入后以一定的流速经过滤膜, 气流中的微生物颗粒则被截留在滤膜上以完成采样过程。采样完成后对滤膜进行洗脱操作可将微生物颗粒分离, 以进行后续的分析过程。

过滤式采样法是最为常用的气溶胶采样方法, 也是最为经济实惠的方法[8]。

Wallis 等用 pH 3.5 的甘油缓冲液湿润滤膜(0.45 μm)后进行空气采样(100 L/min), 用 800 mL pH 10 的甘油缓冲液洗下病毒后, 将其 pH 值调到 3.5, 再加氯化铝(0.0005 mol/L), 以 0.25 μm 微孔滤膜过滤。最后用 6 mL 甘油缓冲液(pH 10)将滤膜上的病毒清洗下来, 成功地测量了空气中脊髓灰质炎病毒的浓度[6]。

该方法特点是采样后的滤材可以放在水中或溶液中溶解, 使被采集的微生物直接释放到溶液中, 无需清洗。因此, 适用于细菌、病毒和毒素气溶胶的采样, 并且可以在严寒条件下适用。但是这种采样方法的缺点是: 结构不均匀, 难于规格化; 易碎裂泄露; 对繁殖体的回收低, 大致为 1% 左右。

3.2.2. 典型的过滤式采样器

该种仪器在我国缺乏相关研究书籍和文献材料。目前国外比较有代表性的过滤式采样器包括 25 mm 和 37 mm 直径的 Filter Cassettes 以及 Buton Inhalable Aerosol Sampler [4] [6]。

在生物气溶胶采样方法中过滤式采样器结构较为简单, 一般由采样头、滤膜、流量计和抽气机组成。滤膜是过滤法在应用是最为重要的组成部分。滤膜的材料、类型、孔径等都会对生物气溶胶的收集效率产生影响。滤膜的材料、类型、孔径等会造成采样阻力增大, 特别是需要粒径的分离度越大时采样阻力越大, 阻力越大, 采样流量越小, 相应的采样效率也低, 无法满足快速高效的采集要求; 另一方面, 滤膜的材料可能会对生物粒子的活性产生影响, 对微生物有抑制或杀灭作用的材料都不宜使用。比较常用的采样滤膜包括可溶性明胶、分子滤膜、醋酸纤维膜、MEC 混合纤维酯膜、银膜以及可溶性滤膜等。孔径一般在 0.01~10 μm 之间, 采样流量为 1~50 L/min [9]。

Wang 等人[8]在 2000 年对这两款采样器的生物效率进行了探究。结果表明, 当采样时间达到 30 min 时, 捕集到的微生物颗粒中只有真菌孢子仍然具有可培养性, 细菌则会在采样过程中快速失去活性; 而随着相对湿度的增高, 捕集到的细菌以及真菌孢子的可培养性均增加。可见造成微生物失活现象的原因主要在于采样中的干燥效应。因此, 过滤式生物气溶胶采样器不适用于相对湿度较低且微生物数浓度较低的场所。过滤式采样器特点归纳如表 4 所示。

Table 4. Research summary of filter sampler

表 4. 过滤式采样器研究归纳

优点	缺点	改进思路和意见
1) 捕获效率高; 2) 结构简单, 易操作; 3) 适用范围广; 4) 便携, 可快速架设和撤收。	1) 采样阻力大; 2) 对空气湿度要求高; 3) 对滤膜的材质和洁净程度要求高; 4) 采样流量小; 5) 抽气机需要连接市电。	设计出适合针对采集的不同目标微生物的滤膜, 以解决采样阻力大和生物失活的问题。

3.3. 旋风分离法

3.3.1. 旋风分离法采样原理

应用旋风分离法采样时, 微生物气溶胶进入采样器后, 沿仪器壁自上而下形成外涡旋, 涡旋下降至圆锥体底部后, 沿采样器轴心自下而上形成上升的内涡旋, 内涡旋气流最终从排气管口排出。而旋转气流中的微生物粒子被甩向器壁, 使其最终落入采样器底部采样液中[10] [11]。在采样时根据实际需采集的粒子的粒径范围, 通过调整设备仪器进气速度就可以将不同粒径范围的粒子在器壁进行富集, 达到粒度分离的目的。

3.3.2. 典型的旋风分离式采样器

近年来由于旋风式采样器发展前景较好, 可高效率的对生物气溶胶进行采集, 所以各国都有相应的

发展和研究。

(1) 多旋风联合采样器

2001年美国炭疽杆菌恐怖袭击事件后, Partrieia 等[12]于2002年发明了微型旋风采样器, 它将多个小型旋风采样单元联合采样, 与单旋风法相比, 在保证相同采集液量和流量的情况下降低了进气口的气流流速。据此生产出了“Bi-Guardian”采样器, 流量100~1000 L/min, 收集液10~15 mL, 对粒径为1 μm 的枯草杆菌芽孢的生物收集效率大于70%。

(2) 全玻璃旋风采样器

Spin-Con型全玻璃旋风采样器, 流量450 L/min, 粒子被采集到10 mL的液体中[13], 在人工感染手足日病毒的猪的猪栏中使用Spin-Con采样器收集气溶胶, 之后使用PCR仪进行分析, 结果证明Spin-Con采样器能用于低浓度的病毒粒子的收集; 2003年, Elric等发明了高效湿壁旋风空气采样器, 将其与四通道荧光分析技术相结合就构成了SASS2000^{plus}型空气收集器, 流量325 L/min, 可收集1~10 μm 的粒子, 挪威某研究机构将其应用于细菌气溶胶的采集, 证明SASS2000^{plus}型空气收集器能够采集到低浓度的革兰阴性杆菌并很好地保存细菌的活性[14]。

(3) 大流量旋风采样器

旋风采样器结构简单, 只需要一个抽气机和流量计便可完成微生物气溶胶采样, 整个采样过程操作简单, 得到采样液后转移培养便可进行定性定量分析, 能耗低、成本低, 同时, 在采集空气微生物时, 可不断将旋风采样器收集装置中采样液取走, 因此可用于持续长时间采样, 而不必担心采样液蒸发之类的问题, 发展性较大, 对粒子的粒度分离效率理想, 但是从以上设备来看都有结构复杂, 价格高, 清洗困难的缺点。过滤式采样器特点归纳如表5所示。

Table 5. Summary of whirlwind sampler research

表 5. 旋风式采样器研究归纳

优点	缺点	改进思路和建议
1) 结构简单, 易操作; 2) 耗能低; 3) 成本低; 4) 可连续采样; 5) 粒度分离效果理想; 6) 可与其他采样器联合使用。	1) 仪器清洗难度大; 2) 简单仪器流量小, 大流量仪器不够便携。	1) 采用电池供电, 实现快速机动和采样; 2) 在大流量上进行研究, 提高采样效率。

在研究旋风采样器收集时, 为了提高对微生物的收集效率, 可以采用湿壁旋风法进行采样, 即用液膜将旋风采样器壁上的粒子冲洗入采样容器中, 该方法对于0.8~10 μm 的颗粒能达到50%以上的收集率[15][16]。McFarlan等[17]研制了流量为1250 L/min的湿法旋风微生物采样器(WWC-1250), 对2~10.2 μm 的粒子平均收集率为90%, 对粒径为1.2 μm 的枯草芽孢杆菌采样效率在50%以上, 1.7~9.8 μm 的枯草芽孢杆菌群收集效率达到98%; 当流量为100 L/min, 对枯草芽孢杆菌群的收集率为86%。此种类型采样效率高, 采样流量大, 粒度分离效果好。

4. 气溶胶浓缩采样研究

在日常生活中, 我们接触到的可染病的或有研究价值的生物气溶胶的浓度其实并不高(如表6所示), 此时直接进行粒度分离采样得到的效果可能会不理想。所以为了对在浓度较低或成分复杂时的生物气溶胶进行采样时就需要对其进行浓缩富集[18]。

Table 6. Air concentrations of various pathogens in different places
表 6. 各种病原体在不同场所间空气的浓度

场所	微生物总数(个)	微生物	个/L
办公室	1.40	口腔链球菌	0.011
		涎链球菌	0.0014
教室	2.5	链球菌	0.036
		草绿色链球菌	0.018
		涎链球菌	0.011
		肠球菌	0.007
		乙型溶血链球菌	0.0011
医院	1.1	金黄色葡萄球菌	0.007
		革兰氏阴性杆菌	0.11
		魏氏产气荚膜梭菌	0.0035
结核病房	————	结核菌	3.3×10^{-6}
柯萨奇病毒感染者的兵营	————	腺病毒	1.4×10^{-4}

4.1. 气溶胶采样提升效率基本方法

① 增大采样器的采气流量或延长采样时间来提高采气量。例如：大流量旋风采样器和大流量的静电采样器流量每分钟可达几千升，Biosampler 采样器和输水薄膜型采样器的采样时间可持续 1 h 甚至更长。

② 提高采样器的物理收集效率和生物收集效率，如：大流量新型液体冲击器通过改变冲击角度和冲击方式来提高物理和生物收集效率，而静电采样法则可以大幅度地提高生物收集效率；改变采样器的冲击结构和方式会使其结构复杂、加工复杂、成本增高，推广应用性降低。

③ 采用浓缩法：使用单级、两级甚至虚拟浓缩技术可大幅度提高浓缩比，空气经浓缩器浓缩后粒子浓度增高，与前两者方法相比，浓缩法最大的特点是在不改变现有采样冲击结构和方式的情况下而提高其进气口粒子浓度，可以与现有采样技术相联合使用，这样与使用单一采样器相比，采集相同气体量所需要的时间就会大大缩短，这样不仅满足现场大样本量采集的需要，而且避免了长时间采样对微生物活性的损伤，采集相同时间，采集到的气体量增多，这样也提高了低浓度微生物被检出的可能性[19]。

4.2. 浓缩法

4.2.1. 虚拟冲击浓缩法

虚拟冲击浓缩法[19]，与传统的撞击收集不同，冲击平板由接收喷嘴代替，气流在通过收缩喷嘴的加速后，大于切割粒径的粒子由于惯性大，其运动方向不随主流量向两侧发生偏转，而是直接向前运动进入接收喷嘴，形成小流量，而小于切割粒径的粒子则会随主流量发生 90° 偏转。这样总流量中大于切割粒径的粒子就“浓缩”或“分离”在小流量中。与下面的虚拟旋风浓缩相同，气流在分离过程中都没有发生急性的碰撞，所以它们都属于非撞击性分离方法，因此它们都能更好地维护粒子本身特征。

4.2.2. 虚拟旋风浓缩法

虚拟旋风浓缩法[19]，将传统的旋风采样器的底部开一个小流量的出口，这样的采样器就为旋风浓缩器，当粒子动力学直径比较小时，粒子被主流量所带走，随着粒子直径的增加，越来越多的粒子被小流量带走，当到切割粒径时，小流量内的粒子量达到最大，大于切割粒径的粒子在采样器内壁沉积的越来越多，直到所有的粒子都沉积在此，而没有粒子从小流量或主流量中流出。

综上，在当前已有的采样器前加装高流量的浓缩器，使需要的粒子在短时间内浓缩采样器中，避采

样器长时间采样带来的微生物活性的损失, 提高采样器的现场应用性, 实现“浓缩 + 采样”模式是针对低浓度微生物气溶胶采样相对简单同时又有效的方法。或者也可以探究将粒子在同一采样器中同时进行“粒度分离 + 浓缩”。

5. 结论

本文结合不同环境下生物气溶胶采样方法的实际应用, 对各种生物气溶胶采样技术及装备进行了归纳总结, 重点结合生物气溶胶粒度分离及浓缩采样技术及装备的研究现状, 进行了比较全面的评价, 并提出了相应的改进措施。在现有条件下, 结合不同的任务和使用环境, 可选用不同的设备来完成。如在室内进行采样研究时, 可以采用过滤式采样器, 虽然其在采样时阻力大, 对仪器滤膜性质要求较为严格, 但是该仪器捕获率高, 适合空气流动较小的室内环境中使用; 如配合车载采样时, 可以选用撞击式采样器, 因为该种采样器结构简单、操作便捷、采样效率优良、完成一次采样时间较短且采样环境多样。将该种采样器装载在车辆上时还可以实现快速机动采样等等。

参考文献

- [1] Haas, D., Galler, H., Luxner, J., Zarfel, G., Buzina, W., Friedl, H., *et al.* (2013) The Concentrations of Culturable Microorganisms in Relation to Particulate Matter in Urban Air. *Atmospheric Environment*, **65**, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.031>
- [2] 程培青, 王蕴, 刘仙娜. 大气微生物污染分布研究及防治对策[J]. 中国环境管理, 2003(S1): 58-60.
- [3] 杨柏林, 王晓禹, 李学文, 姬祥, 邹慧云, 迟小惠, 韩辉. 微生物气溶胶的采集方法及研究进展[J]. 中国消毒学杂志, 2017, 34(12): 1174-1177.
- [4] 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.
- [5] 李涛. 空气微生物采样及发展趋势[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(5): 538-539.
- [6] Yao, M. and Mainelis, G. (2006) Effect of Physical and Biological Parameters on Enumeration of Bioaerosols by Portable Microbial Impactors. *Journal of Aerosol Science*, **37**, 1467-1483. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.06.005>
- [7] Burge, H. (1995) *Bioaerosols*. Lewis Publishers, 7.
- [8] 刘洋, 王木根, 谢珊珊, 金晓敏, 曹巧玲, 田葆萍. 空气中微生物气溶胶采样技术研究进展[J]. 职业与健康, 2017, 33(5): 713-716.
- [9] Krames, J. and Büttner, H. (1994) The Cyclone Scrubber—A High Efficiency Wet Separator. *Chemical Engineering & Technology*, **17**, 73-80. <https://doi.org/10.1002/ceat.270170202>
- [10] Mainelis, G. and Tabayoyong, M. (2010) The Effect of Sampling Time on the Overall Performance of Portable Microbial Impactors. *Aerosol Science and Technology*, **44**, 75-82. <https://doi.org/10.1080/02786820903390372>
- [11] Han, T. and Mainelis, G. (2012) Investigation of Inherent and Latent Internal Losses in Liquid-Based Bioaerosol Samplers. *Journal of Aerosol Science*, **45**, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.11.001>
- [12] 于玺华. 现代空气微生物学及采检鉴技术[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 1998.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Lohmann, U. and Lesins, G. (2002) Stronger Constraints on the Anthropogenic Indirect Aerosol Effect. *Science*, **298**, 1012-1015. <https://doi.org/10.1126/science.1075405>
- [16] 黄宪果. 气溶胶分粒度取样技术研究[J]. 中国核科技报告, 2008(2): 126-132.
- [17] 王彦杰, 李琳, 许光素, 刘俊新, 韩云平. 微生物气溶胶采集技术的特点及应用[J]. 微生物学通报, 2017, 44(3): 701-709.
- [18] 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.
- [19] 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.