·综 述·

# 生物气溶胶快速检测技术研究进展及应用

刘梓峥，杨璐璐，孙玥，刘博涵，杨正雄，鲁波

中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所，北京 100021
通信作者：鲁波，E-mail：lubo@nieh.chinacdc.cn

**【摘 要】**生物气溶胶中的致病性颗粒会危害人体健康，发展快速检测技术对传染病防控意义重大。本文就过滤采样法、撞击采样法等传统采样技术和实时荧光定量 PCR 技术、环介导等温扩增技术等检测技术的原理、优缺点及应用，以及微流控技术、纳米材料、光学分析技术等新型快速检测技术的研究进展进行综述。结果显示，在生物气溶胶现场采集中，应综合多因素选择采样器；现场快速检测时，需依据情况选择合适检测方法。此外，研究表明，新型生物气溶胶采样技术潜力巨大，但在采样效率、成本效益等方面仍面临挑战。未来研究应聚焦优化技术、开发新材料，跨学科合作将推动该领域发展，为环境监测和人类健康保障提供有力支持。

**【关键词】**生物气溶胶；新型快速检测技术；采样器；致病性颗粒

# Research progress and application of rapid bioaerosol detection technologies: a review

LIU Zizheng, YANG Lulu, SUN Yue, LIU Bohan, YANG Zhengxiong, LU Bo (*National Institute of Environmental Health*, *China CDC*, *Beijing* 100021, *China*)
Corresponding author: LU Bo, E-mail: lubo@nieh.chinacdc.cn

**【Abstract】** Pathogenic bioaerosols represent a critical public health challenge, necessitating advanced detection methodologies for effective infectious disease surveillance and mitigation. This review comprehensively examines the intrinsic principles, methodological strengths, inherent limitations, and contextual applications of conventional sampling techniques (encompassing filtration and impactor-based methodologies) and contemporary detection modalities (including real-time quantitative polymerase chain reaction and loop-mediated isothermal amplification). Furthermore, the review examines emerging rapid detection paradigms, with a particular emphasis on innovative approaches such as microfluidic systems, nanomaterials, and sophisticated optical analysis techniques. The investigation reveals that optimal bioaerosol sampling necessitates a multifactorial selection strategy, and the selection of technologies for field rapid detection should be contingent upon environmental conditions, target pathogen characteristics, and operational constraints. While novel bioaerosol sampling technologies demonstrate substantial promise, significant challenges persist regarding sampling efficiency, analytical precision, and economic feasibility. The research underscores the imperative for interdisciplinary collaboration and technological refinement to advance environmental monitoring and public health protection strategies.

**【Keywords】** bioaerosol; novel rapid detection technologies; sampler; pathogenic particles

气溶胶是悬浮在空气中的微小颗粒或液滴，广泛存在于自然环境和人类活动中。当它携带有微生物或其他生物性物质颗粒时，则被称为生物气溶胶，而其中的致病性颗粒能够直接危害人体健康，导致呼吸道疾病等[1]。2024 年 4 月世界卫生组织 WHO 发布了“病原体通过空气传播提议术语的全球技术咨询报告”，对于病原微生物在空气中传播的相关表述给出了具体建议，本文中所表述的生物气溶胶可基本等同于空气中的“感染性颗粒”[2]。近年来新发传染病及传统传染病的流行与暴发、非传统安全隐患的增加，使生物气溶胶的分析检测受到普遍重视；尤其是在环境监测与公共卫生领域，很多机构和团队已经开始制定生物气溶胶检测技术相关的指南和标准。在生物气溶胶的研究领域中，采集与检测是一切工作的前提和基础，而气溶胶具有不稳定、变化快的特性，使得生物气溶胶检测有了更独特的需求，选择准确、高效的采样和检测方法显得十分重要。目前，生物气溶胶快速检测技术对于传染性疾病的早期预警和防控有巨大的推动作用。例如流感、结核病和新型冠状病毒的传播都与空气中的气溶胶传播密切相关。通过精确的采样和分析，科研人员能够追踪病原体的传播路径，为制定公共卫生政策提供科学依据。但是，传统的生

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1147005
第一作者：刘梓峥（1996–），研究实习员，学士，研究方向：环境卫生。
收稿日期：2025-01-25 修回日期：2025-10-13 录用日期：2025-12-09
利益冲突：不存在 伦理审查：不需要 出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

物气溶胶采样方法采样时间长、采样效率低[3]；样本采集后处理过程复杂，并可能在处理过程中受到污染；由于传统方法的检测灵敏度有限，对于极低浓度生物气溶胶中的特定微生物或病毒往往无法实现有效的检出；此外，经典的传统检测方法通常需要将样本带回实验室分析，无法实现现场实时监测；并且许多传统采样和检测设备体积较大、重量较重、价格高，难以适应不同地点的快速采样场景（如突发公共卫生事件）的检测需求，需对采样分析检测技术进行升级迭代及优化[3–6]。本文主要通过阐述以及举例分析常见的采样及检测方法的应用进展，并探索国内外新型生物气溶胶快速检测技术的研究，从而分析不同场景下快速检测技术的适用性，旨在提升对环境与健康风险的认知、不断优化新型采样技术，为构建更为精准的监测网络以及保护全球公共健康与环境提供科学依据。

## 1 气溶胶的采样技术

1.1 *沉降法*　沉降法是采集生物气溶胶最经典的采样方法，也是目前国内大部分相关标准采用的采样方法。操作简单，一般是将采样基质（多数为微生物培养平板）在环境中放置一段时间，通过空气中颗粒物的重力作用，自然沉降。采样后培养分析或取沉降基质的表面成分，进行后续分析。该方法操作简单、适用性好，但是采样效率低、培养时间长，同时无法有效采集细颗粒物等难以沉降的成分。此外，该方法受环境空气流动干扰较大，仅适合在气流稳定的场景，具有较好的代表性。所以，沉降法一般不作为现场快速检测的采样方法。

1.2 *过滤采样法*　过滤法的基本原理为空气在抽气装置的作用下，通过多孔滤膜，生物气溶胶颗粒由于滤材小孔的阻留或滤材的吸引从而被捕获在滤材上，并被收集于过滤器内，后被洗脱为液体样本。根据滤膜材质的不同，可具体细分。滤膜孔隙一般为 0.01～10 μm，采样流量 1～50 L/min，代表性仪器有 Sartorius MD8、MF-45 型采样器等[7]。因该类采样器的采样效果主要取决于滤膜，故根据采集需要可选择不同种类的滤膜从而提高采样效率，如 Shimasaki N 等人[8] 采用明胶膜采集并检测到了空气中的流感病毒，Sartorius MD8 采样器使用水溶性滤膜，采样后可直接转移至琼脂培养基或明胶表面，其可迅速溶解于培养基中，并完成培养或快速测定。顾志超等人[9] 以明胶和玻璃纤维分别作为滤材，研究其病毒采样效率，发现虽然其采集率较高，但对于病毒的整体回收率过低，因此在考虑到病毒采集时，应考虑控制流量及采集时间；而且由于受滤膜性质限制，在长时间采样时，不仅会因阻留作用使得滤材的通透性降低，也会因长时间的抽气对样本中不耐干燥的微生物造成损伤。

1.3 *撞击采样法*　撞击法的原理为将获得了足够惯性的气溶胶颗粒，通过喷嘴引导，撞击到出口的收集介质表面并收集。根据喷嘴的不同，又可分为筛孔式和狭缝式，例如安德森六级采样器、BC 500 狭缝式采样器等。安德森六级采样器作为国际微生物会议和美国政府工业卫生学家协会推荐为标准空气微生物采样器，也是应用最广泛的空气微生物采样器。由 6 个带有微孔的金属圆盘组成，自上而下孔径减少的同时气流速度逐级增大，采用固体培养皿作为收集介质，由于其流速逐级增加，故流速需求低。杨文慧等人[10] 以安德森六级采样器为基准，对比其他不同技术原理的采样器，发现撞击法的应用使得采集的粒子明显多于其他传统方法，且菌落失活率低。但由于近年来新冠病毒和流感病毒采样需求日益增加，而常用的安德森采样器使用的培养皿并不能有效地收集并检测病毒。基于此种采样限制，Horve P F 等人[11] 探究了不同收集介质对灭活后的 SARS-CoV-2 的收集效果。这种收集介质种类的增多，有助于未来多种不同生物气溶胶的采样及检测。

1.4 *液体冲击法*　液体冲击法的原理是利用喷射气流，将空气中的微生物粒子收集到小体积的液体中，多用于病毒粒子的采集，例如 AGI-30、Porton、Bio Sampler 采样器等。其中 AGI-30 采样器是国际空气生物学会推荐使用的标准采样器[12]。该类采样器可以通过设计喷嘴、调整冲击距离、改变收集介质等提高采样效率。Kesavan J 等人[13] 开展了液体冲击法采样器与气旋式采样器的对比试验，发现 AGI-30（液体冲击式）和 BWWC-EC（气旋式）采样器在 1 h 后对样本的保留效率较低，可能是由于气流长时间鼓吹采样液导致的该结果，因此应严格控制采样时间，防止采样效率的损失。液体冲击法采样器在采集病毒颗粒方面具有的优势，液体收集介质不仅提供了一个缓冲环境，保护了脆弱的微生物颗粒，避免了在采样过程中可能发生的机械损伤，还能够维持微生物的活性，从而提高了后续分析的准确性和可靠性[14]。液体冲击法采样获得的采样液为液体状态，可以与多种生物分析技术直接兼容，避免了样本转移与形态转化、减少了样本损耗、提高了分析效率。此外，这种采样方法在高浓度环境下能够高效捕获大量的微生物颗粒，为实验室分析提供充足的样本量。但由于其采样流量较

小，在低浓度环境中可能难以完成采样工作；又因为主要材质为玻璃制品、不便携带，也不适合现场多次采样[15]。

### 1.5 其他常见方法

1.5.1 气旋式采样 基于旋风及惯性设计的气旋法采样器，使用液体作为收集介质，但与液体冲击法不同，适合大流量采样。结合冲击法和气旋法采样的优点，湿壁气旋法采样优化了传统采样方法，使其有更广泛的应用场景。湿壁气旋法（如 CA-1-300 等采样器），通过对气流的控制，增加了采样速度与采样效率；同时，该方法一般使用一次性树脂耗材，避免了样本的交叉污染、玻璃制品易碎、需反复清洁等缺点，更适合现场实时采样分析。

1.5.2 静电吸附采样 基于静电吸附的原理，对吸入口粒子进行充电后使其沉积在带电板上，Fukuda K 等人[16] 验证了一种静电采样器在不同场景下对 SARS-CoV-2 的采集，均能做到有效采集，但在实际应用中为了提高采样流量，可能导致采集液的蒸发而限制了广泛使用。同时以重力为原理的自然沉降法，虽然对环境无气流扰动的风险，但采集时间非常长，且偏向采集粒径较大的颗粒[17]。

## 2 常见检测方法

经采样器收集得到生物气溶胶粒子样本后，只有采用适合的检测方法，才能分析确认其中粒子。因此通过改变采样器的种类，从而有效收集不同种类的生物气溶胶后，能否快速检测样本，也是面临的一个重要问题。而测定生物气溶胶中微生物的方法主要分为培养法和非培养法，培养法虽然作为经典的微生物检测方法，具有操作简便、成本较低的特点，但由于其培养周期长，难以作为快速检测手段，因此在本文中不予讨论。

### 2.1 实时荧光定量 PCR 技术

实时荧光定量 PCR 技术是一种基于 PCR 原理的检测方法，通过荧光染料或探针标记扩增产物，在扩增过程中实时监测荧光信号变化，从而实现对目标核酸的定量分析。该技术通过在扩增过程中加入荧光标记物，利用荧光信号的累积以监测 PCR 的进程，从而在扩增的每一循环中获得实时数据。王颖[18] 通过用细胞培养法与实时荧光定量 PCR 技术监测流感病毒，对比两者的灵敏度和特异度，发现实时荧光定量 PCR 技术的特异性和灵敏度均较好，具有更高的应用价值。周雪花[19] 以实时荧光定量 PCR 技术检测流感病毒，发现实验周期短，且不易造成环境污染，还具有较高的敏感性和特异性。这种技术虽具有高灵敏度、高特异性和快速检测的优点，但由于技术原理仅针对核酸序列，只能证明流感病毒的存在，不能确定活力或感染力。

### 2.2 环介导等温扩增技术（loop-mediated isothermal amplification, LAMP）

LAMP 是一种等温核酸扩增技术，通过设计特异性引物和使用 Bst DNA 聚合酶在恒温条件下进行核酸扩增。其基本原理是通过 4～6 个特异性引物识别目标序列的 6 个不同区域，从而在恒温下快速扩增目标 DNA。在没有复杂设备的情况下，该技术可以在 30～60 min 内完成扩增并通过肉眼观察或荧光检测判读结果。LAMP 技术具有操作简便、反应速度快、结果直观等特点，特别适合资源有限的现场检测应用，但由于其扩增产物多为同一片段形成的长拷贝长链，因此该方法易产生假阳性[20]。但是近年来，相关扩增酶生产企业都在优化酶分子的序列与结构，在灵敏性和特异性方面有很大提升，同时减少了假阳性。Thai H T C 等人[21] 开发并评估了一种针对 SARS-CoV 的 LAMP 检测技术，其设计的 LAMP 特异性引物具有较好的特异性，同时灵敏度是普通 RT-PCR 灵敏度的 100 倍，并且检测程序简单，只需 63 ℃ 的等温条件下，不到一小时即可在一个试管内完成扩增并得到结果。同时 LAMP 检测技术的反应结果判定也更为便捷，其阳性副产物焦磷酸镁为白色沉淀，可直接通过肉眼观察，又或者加入染料和金属离子指示剂使得颜色差别更明显[22]。此外 LAMP 技术结合 CRISPR 技术和其他核酸分析技术，也取得了很多进展，已经有研究团队通过技术联合应用，可以快速鉴定新型冠状病毒的亚型[23]。

### 2.3 胶体金免疫层析法

是一种基于免疫层析原理的快速检测方法，通过利用胶体金标记的抗体与待测物结合，形成显色反应以指示检测结果。其基本原理是将胶体金标记的抗体固定在硝酸纤维素膜上，样品中的抗原与抗体结合后，通过毛细作用将复合物带到显色线处，从而产生可见的红色条带，直接显示检测结果。刘涵轩等人[24] 使用胶体金免疫层析法检测布鲁氏菌，发现该方法能够在 15 min 内完成布鲁氏菌的血清样本的检测，且具有较好的特异性和稳定性。李月越等人[25] 使用胶体金免疫层析法与间接免疫荧光法比较同一份样本的甲型及乙型流感病毒的检测效果，从而得出胶体金免疫层析法相比其他检测方法大大缩短了实验时间（仅需 15 min 即可得出报告），对于检测和筛查工作具有较大的应用价值。刘家煜[26] 通过对比胶体金法和荧光定量 PCR 法对于流感病毒的检测效率，发现胶体金法的灵敏度和检出率均低于荧光定量 PCR 法。相较于 PCR 等高灵敏度的分子生物学检测方法，胶

体金法虽灵敏度较低，可能无法检测到样本中低浓度的目标物质，但其简便快捷、成本低廉、易于大规模检测筛查，使其更具有应用价值。

## 3 新型快速检测技术的发展与应用

3.1 微流控技术的应用　作为一种前沿技术，微流控采样检测技术的核心原理是利用微流控芯片，精确捕获并分析复杂的气体环境中的生物粒子。相比于传统采样分析设备，微流控芯片具有体型小、易集成等特点，使其能够在现场或移动环境中实现快速采样与检测，这对于环境监测和公共卫生应急响应尤为重要。由于微流控系统集成传感器可以实现在线分析，减少了样本处理步骤，从而提高了采样效率和数据获取速度[3,23,27–28]。该技术在应对突发性病毒传播和公共卫生监测方面具有广阔的应用前景。尽管微流控采样技术具有明显优势，但仍面临一些挑战，如结构精细易受复杂环境中的干扰物影响、长时间稳定运行的设备维护以及成本问题。解决这些问题需要进一步的研发创新和跨学科合作。

3.2 纳米材料在采样检测技术中的应用　纳米材料在采样技术中具有广泛的应用，主要得益于其独特的物理化学特性，如高比表面积、优异的导电性和催化性能[29]，这些特性使得纳米材料在提高采样效率和检测灵敏度方面具有显著优势。有研究表明，纳米材料作为一种新型的生物传感器，其原理是通过纳米材料的高表面体积比和量子尺寸效应，从而有效提高生物传感灵敏度[30]，该研究还讨论了纳米孔作为全病毒颗粒的生物传感器的可行性，扩大了对生物传感技术的了解。也有其他团队将纳米材料作为生物传感器的主要应用手段之一[31]。将纳米材料应用在生物气溶胶采样技术中，增强了其特异性，有效提高了采样效率，同时大大缩短了检测耗时，为实时监测提供了新的思路。然而由于纳米材料研发生产复杂，目前常用的相关传感器，多为病毒检测专型，类型较少。同时由于纳米材料制备复杂以及可能存在的潜在生物毒性和环境风险，难以大规模应用和推广。

3.3 光学分析技术　生物气溶胶的检测在关注具体病原微生物种类的同时，也注重总生物颗粒数量的分析和提供必要的数据信息以用于风险预警。生物气溶胶总量的实时分析，主要通过主动式的激光雷达技术（激光诱导荧光）[32–33]，其原理在于生物气溶胶中至少含有一种荧光光团，而大部分非生物气溶胶粒子没有荧光光谱，且少数具有荧光效应的非生物气溶胶粒子的谱线特征并不稳定，从而通过荧光特征判别生物气溶胶种类。也有研究团队以拉曼—荧光光谱为手段，采集生物气溶胶中生物颗粒的光谱，发现其可以有效地分辨花粉、细菌和真菌，同时识别率与准确率较高，效果良好[34]。目前国内外已研制出了生物气溶胶遥测激光雷达系统，如瑞典国防研究机构 FOI 的紫外激光雷达系统，可探测 2 km 外浓度为 $10^6$ μm$^3$ 的气溶胶，识别 1 km 内的生物种类[35]；2019 年北京理工大学研制的单波长荧光—米偏振激光雷达系统，则可利用荧光—米信号强度比以表征低层大气中生物气溶胶的垂直分布[36]。中国人民解放军军事医学科学院的杨子健[5] 利用激光雷达技术进行生物气溶胶监测，国防科技大学的李笑楠[6] 利用荧光光谱法监测大气中的生物气溶胶等。激光诱导荧光的激光雷达技术虽作为主动式遥测生物气溶胶的最主要途径，但其技术复杂程度高、荧光信号较为微弱，探测器易受到噪声影响，且白天探测时难以消除背景光影响，故多为夜晚探测。可以肯定的是，激光雷达技术有效避免了现场采样造成的潜在危害，但仍需丰富生物荧光谱数据库增加可判别生物种类，改善算法或系统设计逐渐增加白天探测距离[37]。

3.4 其他新型技术应用及挑战　基于人工智能和机器学习的智能分析方法，如深度学习，也正在被应用于生物气溶胶采样数据分析中，以提高识别和分类的准确性。复旦大学有团队通过 AI 辅助有图像识别技术，开发了监测空气中花粉的小型装置，可以快速分析空气中花粉的数量和种类[38]。尽管这些技术潜力巨大，但模型的训练数据质量和计算资源需求是当前限制其广泛应用的关键因素。目前新型生物气溶胶采样技术的研究正在不断拓宽现有的认识边界，但同时也面临着技术成熟度、成本效益和实际应用的多重考量。未来，随着科研的深入和跨学科的合作，希望这些新技术能在生物气溶胶监测领域发挥更大的作用[39]。

## 4 总结与展望

4.1 生物气溶胶快速检测技术的应用与选择

4.1.1 生物气溶胶的现场采集　在选择采样器时，根据不同的生物气溶胶种类应综合考虑采样效率、采样流量以及收集介质等[40]。刘文成等人[7] 针对几种不同原理的采样器，对比了物理及生物效率，发现液体冲击式较为温和但环境要求高，气旋式采集的微生物存活率较高但对较小粒径的颗粒存在损失，过滤式操作简单但不适宜长时间采样，离心式和静电式对微生物活性有一定影响，固体撞击式微生物存活率高但有从采样面反弹脱离和嵌入培养基内部的风险。在生物气溶胶

快速检测的应用需求日益增加的今天，采样效率不再作为采样器适用性评判的唯一标准，当实际应用时，还需考虑成本、兼容性、灵活度等问题。因此在保证采样效果的条件下，选择可采集不同种类的生物气溶胶的采样器，同时尽量保证后续检测方法的延续性。在保障了采样效率与时间的同时，还要考虑采样后的洗脱效率，否则将成为现场快速检测的瓶颈。在新冠疫情期间，复旦大学科研团队使用 CA-1-300 采样器（湿壁气旋法），仅用 15 min，就在新冠病毒感染患者病房的空气中采集到了新冠病毒，并发现空气中病毒浓度与消杀程度呈负相关[41]，同时结合核酸恒温扩增检测，为现场快速分析的场景提供了一套时间短、操作简单、采样与检测过程匹配度高的方案，为真实的现场快速检测方案提供了思路。

4.1.2 现场快速检测 在检测技术方面，可根据情况选择合适的检测方法。前文提到的 3 种检测方法，实时荧光定量 PCR 技术、LAMP 技术、胶体金免疫层析法均能较快地检测采集样本，如降低实时荧光定量 PCR 技术的实验成本，并简化其操作流程降低技术门槛，同时充分发挥其高灵敏度和特异性，实现对低浓度粒子的有效监测；对于 LAMP 技术可优化其引物设计与反应条件，以减少假阳性的产生，虽然对引物设计人员的要求较高，但对比 PCR 技术无需复杂的温度循环装置，且可在短时间内得到结果，也保证了其广泛的使用率；在前文提及的研究中，研究人员使用湿壁气旋法采样，结合便携式的恒温扩增仪及专用 LAMP 试剂，可以在一小时内快速分析环境物体表面及空气中的新冠病毒，用于评估环境健康风险及消杀效果[41]。鉴于胶体金免疫层析法灵敏度较低的缺点，可考虑优化反应体系和实际配方，以提高灵敏度和特异性，但其不需要复杂设备以及可视化结果的特点，尤其适用于基层或野外等设备条件较差的场景。综合言之，选择合适的采样器，使得采集到的样本更具有代表性，才能更真实地反映出气体环境的实际情况，也更易检出相应的生物粒子，从而为环境监测和传染病控制提供重要依据。

4.2 技术展望 随着科技的不断进步，新型生物气溶胶采样技术正展现出前所未有的潜力和广阔的应用前景。电子束采样技术[42]、微流控技术、纳米材料、光学陷阱法、静电场捕获技术等手段都开始应用于生物气溶胶的检测分析，虽然有些技术尚处于发展阶段，但其独特的原理和潜在的高效性预示着在未来它们可能成为生物气溶胶采样领域的新兴力量[43–46]。在检测技术层面，未来的发展将着重于提升现场快速检测能力的集成化、智能化与精准化。一方面，将微流控技术与 LAMP、CRISPR 等核酸检测方法相结合，构建一体化、便携式的“采样—分析”系统，是实现现场实时检测的重要途径[23,27]；另一方面，通过完善生物气溶胶的光学特征数据库，并融合人工智能算法对激光诱导荧光、拉曼光谱等信号进行实时解析与分类，有望大幅提升远程、在线监测的自动识别能力与准确性[5,34,38]。此外，开发高灵敏、高特异性的纳米生物传感器，以及实现针对多种病原体的同步高通量检测，也是该领域亟待突破的关键方向[29–31]。

然而，尽管这些技术展现出巨大潜力，实际应用中仍需解决一些挑战，如采样效率、成本效益、操作简便性以及长期稳定性等问题。因此，未来的研究应聚焦于优化现有技术、开发新型材料和设计，以提高采样效率并减少环境影响。

总之，新型生物气溶胶采样技术的发展前景光明，它将为环境监测、疾病预防、食品安全等多个领域提供更为精准和便捷的解决方案[47]。跨学科的合作和技术创新将加速这一领域的发展，推动其在实际应用中的深度整合。新型生物气溶胶采样技术正向着更高效、智能和环保的方向发展，期待在不久的将来，这些技术能在全球范围内广泛应用，助力人类更好地维护健康和保护环境。

**数据可用性声明** 本研究未生成新的数据。

## 参考文献

[1] Xu Z Q, Wu Y, Shen F X, et al. Bioaerosol science, technology, and engineering: past, present, and future[J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45(11): 1337-1349.

[2] World Health Organization. Global technical consultation report on proposed terminology for pathogens that transmit through the air[EB/OL]. (2024-04-18)[2024-07-17]. https://www.who.int/publications/m/item/global-technical-consultation-report-on-proposed-terminology-for-pathogens-that-transmit-through-the-air.

[3] 马雪征, 魏昭慧, 郑飞, 等. 生物气溶胶的采集和分析方法研究进展 [J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2022, 45(6): 516-520.

[4] Jiang X R, Liu Y C, Liu Q, et al. Rapid capture and analysis of airborne *Staphylococcus aureus* in the hospital using a microfluidic chip[J]. Micromachines, 2016, 7(9): 169.

[5] 杨子健. 基于激光雷达技术的生物气溶胶监测系统构建与关键技术研究 [D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015.

[6] 李笑楠. 大气本底生物气溶胶的荧光光谱法监测与评估 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.

[7] 刘文成, 傅博强, 刘乃毓, 等. 生物气溶胶采样器采样效率计量评价方法研究进展 [J]. 计量学报, 2023, 44(10): 1617-1625.

[8] Shimasaki N, Nojima Y, Okaue A, et al. A novel method of safely measuring influenza virus aerosol using antigen-capture enzyme-linked immunosorbent assay for the performance evaluation of protective clothing materials[J]. Biocontrol Science, 2016, 21(2): 81-89.

[9] 顾志超, 王董明, 贺铮怡. 洁净室空气微生物采样法应用比较 [J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(12): 2989-2991.

[10] 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.

[11] Horve P F, Dietz L, Northcutt D, et al. Evaluation of a bioaerosol sampler for indoor environmental surveillance of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2[J]. PLoS One, 2021, 16(11): e0257689.

[12] 杨柏林, 王晓禹, 李学文, 等. 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.

[13] Kesavan J, Schepers D, McFarland A R. Sampling and retention efficiencies of batch-type liquid-based bioaerosol samplers[J]. Aerosol Science and Technology, 2010, 44(10): 817-829.

[14] 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.

[15] 于玺华, 车凤翔. 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: 87-174.

[16] Fukuda K, Baba H, Yoshida M, et al. Novel virus air sampler based on electrostatic precipitation and air sampling of SARS-CoV-2[J]. Microorganisms, 2023, 11(4): 944.

[17] 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.

[18] 王颖. 流感病毒检测中细胞培养法与实时荧光定量 PCR 法效果比较 [J]. 医学信息, 2021, 34(9): 179-181.

[19] 周雪花. 实时荧光定量 PCR 在流感病毒核酸检测中的应用 [J]. 中国卫生产业, 2014, 11(28): 178-179.

[20] 高瑶, 孟星宇, 罗玉子, 等. 等温扩增技术的原理及其在病原检测中的应用 [J]. 动物医学进展, 2017, 38(8): 103-109.

[21] Thai H T C, Le M Q, Vuong C D, et al. Development and evaluation of a novel loop-mediated isothermal amplification method for rapid detection of severe acute respiratory syndrome coronavirus[J]. Journal of Clinical Microbiology, 2004, 42(5): 1956-1961.

[22] 戴婷婷, 陆辰晨, 郑小波. 环介导等温扩增技术在病原物检测上的应用研究进展 [J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(5): 695-703.

[23] Zhang T, Zhao W, Zhao W, et al. Universally stable and precise CRISPR-LAMP detection platform for precise multiple respiratory tract virus diagnosis including mutant SARS-CoV-2 spike N501Y[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(48): 16184-16193.

[24] 刘涵轩, 伍波, 赵正春, 等. 布鲁氏菌血清 IgM, IgG 抗体胶体金免疫层析检测方法的建立及初步临床应用 [J]. 现代检验医学杂志, 2020, 35(6): 102-105,143.

[25] 李月越, 陈杭薇, 王萍, 等. 胶体金免疫层析法快速检测流感病毒应用研究 [J]. 第四军医大学学报, 2008, 29(18): 1652-1654.

[26] 刘家煜. 胶体金法与荧光定量聚合酶链反应法在流感样呼吸道感染病原体实验室检测的对比分析 [J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(3): 110-112.

[27] Yang N, Song W, Xiao Y, et al. Minimum minutes machine-learning microfluidic microbe monitoring method (M7)[J]. ACS Nano, 2024, 18(6): 4862-4870.

[28] Lee I, Jeon E, Lee J. On-site bioaerosol sampling and detection in microfluidic platforms[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023, 158: 116880.

[29] Baig N, Kammakakam I, Falath W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges[J]. Materials Advances, 2021, 2(6): 1821-1871.

[30] Ramalingam M, Jaisankar A, Cheng L J, et al. Impact of nanotechnology on conventional and artificial intelligence-based biosensing strategies for the detection of viruses[J]. Discover Nano, 2023, 18(1): 58.

[31] Naikoo G A, Arshad F, Hassan I U, et al. Nanomaterials-based sensors for the detection of COVID-19: a review[J]. Bioengineering and Translational Medicine, 2022, 7(3): e10305.

[32] Pohanka M. Current trends in the biosensors for biological warfare agents assay[J]. Materials, 2019, 12(14): 2303.

[33] 杨荣, 董吉辉, 杨泽后, 等. 生物气溶胶激光远程侦测技术进展 [J]. 激光杂志, 2023, 44(1): 1-7.

[34] 王杰. 基于拉曼光谱和荧光光谱技术的生物气溶胶检测及识别方法研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.

[35] Hayes N W, Tremlett C J, Melfi P J, et al. Electro-optical remote sensing, detection, and photonic technologies and their Aapplications[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2007: 781736.

[36] 李保卫, 陈思颖, 张寅超, 等. 荧光—米偏振激光雷达系统定标 [J]. 光学技术, 2019, 45(5): 590-595.

[37] 饶志敏. 大气边界层内生物气溶胶荧光激光雷达探测技术与实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[38] Chen K, Chen X, Sui G. Pollen detection through integrated microfluidics and smartphone-driven deep learning systems[J]. Results in Engineering, 2024, 24: 102867.

[39] 马元婧. 基于深度学习的大气环境监测系统关键技术研究 [D]. 沈阳: 中国科学院大学 (中国科学院沈阳计算技术研究所), 2021: 119.

[40] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 颗粒 生物气溶胶采样和分析通则: GB/T 38517—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

[41] Wan B, Zhang X L, Luo D X, et al. On-site analysis of COVID-19 on the surfaces in wards[J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 141758.

[42] Kavouras I G, Koutrakis P. Use of polyurethane foam as the impaction substrate/collection medium in conventional inertial impactors[J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 34(1): 46-56.

[43] 卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 296-304.

[44] 郭和庆, 张圣梓, 刘晓萌, 等. 基于荧光法的生物气溶胶实时检测系统的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2339-2347.

[45] 李正强, 谢一淞, 张莹, 等. 大气气溶胶成分遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2019, 23(3): 359-373.

[46] 高友鹤, 钱小红. 生物质谱研究方法与应用新进展 [J]. 中国科学: 生命科学, 2018, 48(2): 111-112.

[47] 李晓旭, 翁祖峰, 曹爱丽, 等. 室内空气中致病微生物的种类及检测技术概述 [J]. 科学通报, 2018, 63(21): 2116-2127.