

# 新型冠状病毒气溶胶传播及实验室检测的最新研究进展

耿 剑, 尹 峰, 徐英华 (泰安市中心医院分院检验科, 山东泰安 271000)

**摘 要:** 自新型冠状病毒肺炎 (corona virus disease 2019, COVID-19) 疫情暴发以来, 气溶胶传播新型冠状病毒 (2019 novel coronavirus, SARS-CoV-2) 的案例相继被报道。SARS-CoV-2 气溶胶作为一种存在于空气中能够进行短期和远程运输的细小颗粒, 具有很强的传播能力。提前预测或者实时监测气溶胶中的 SARS-CoV-2 是控制 COVID-19 疫情大流行的有效措施。该文通过对 SARS-CoV-2 气溶胶的特点、构建数学模型预测、采集检测的研究进展进行综述, 为疫情理论研究和实际防控提供有效的帮助。

**关键词:** 新型冠状病毒; 数学模型; 新型冠状病毒气溶胶传播

**中图分类号:** R373.19; R446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-7414 (2022) 05-199-06

**doi:**10.3969/j.issn.1671-7414.2022.05.040

## Latest Research Progress on the Transmission and Experimental Detection of SARS-CoV-2 Aerosol

GENG Jian, YIN Feng, XU Ying-hua

(Department of Clinical Laboratory, Branch of Tai'an Centre Hospital, Shandong Taian 271000, China)

**Abstract:** Since the outbreak of the novel coronavirus pneumonia (COVID-19) epidemic, many cases of infection caused by aerosol transmission had been reported. 2019 novel coronavirus (SARS-CoV-2) aerosol, as a kind of fine particle existing in the air and capable of short-term and long-distance transportation, has a strong propagation ability. Early prediction or real-time monitoring of novel coronavirus aerosol is an effective measure to control the COVID-19 pandemic. This article summarizes the characteristics of novel coronavirus aerosol, the construction of mathematical model prediction, and the research progress of collection and detection so as to provide effective help for the theoretical research and practical prevention and control of the epidemic situation.

**Keywords:** SARS-CoV-2; mathematical models; SARS-CoV-2 aerosol transmission

2019 年底武汉暴发新型冠状病毒肺炎 (corona virus disease 2019, COVID-19) 疫情, 短时间内导致大量的人员被感染。《新型冠状病毒感染肺炎诊疗方案 (试行第五版)》提出了“气溶胶和消化道等传播途径尚待明确”的内容<sup>[1]</sup>。从此“气溶胶传播”这一途径进入大众的视野。刘元等<sup>[2]</sup>在收治重症患者的三甲医院和轻型患者的方舱医院的内部及周围的气溶胶中, 检测到新型冠状病毒 (2019 novel coronavirus, SARS-CoV-2) RNA, 证实了气溶胶传播的论证。切断传播途径是阻断 SARS-CoV-2 传播的关键措施, 而明确 SARS-CoV-2 气溶胶的传播轨迹并对其精准胶的传播轨迹以及其精准的预测、有效地收集和准确地分析为气溶胶传播途径的切断提供重要的帮助。本文就 SARS-CoV-2 气溶胶的特点、数学模型预测、采集检测的研究进展进行综述。

### 1 SARS-CoV-2 气溶胶的特点

SARS-CoV-2 属于  $\beta$  属冠状病毒, 直径为 60 ~ 140nm<sup>[3]</sup>, 可以作为独立个体或者聚集体的形式存在, 吸附于液滴、颗粒或其他物质而形成气溶胶<sup>[4]</sup>。

一般来说, 受感染者无论在说话、呼吸、咳嗽或打喷嚏时, 都会产生气溶胶, 小颗粒气溶胶更容易进入呼吸道被吸入肺部, 导致肺部感染<sup>[5]</sup>。其中  $< 5 \mu\text{m}$  的气溶胶可能包含  $4 \times 10^5$  个 SARS-CoV-2 颗粒<sup>[6]</sup>, 而且粒子小, 无法沉降, 容易被气流携带, 通过扩散和空气湍流分散进行长距离传播<sup>[7]</sup>, 甚至到达 4m<sup>[8]</sup>。世界卫生组织在受控实验室条件下, 使用高效喷雾器从传染性样本中生成气溶胶的试验研究显示, SARS-CoV-2 病毒 RNA 在空气中存活长达 3h<sup>[9]</sup>, 并且病毒在 16h 内仍具有复制能力<sup>[10]</sup>。通过调查统计发现, 武汉 COVID-19 疫情暴发期间, 平均气温  $> 6.16^\circ\text{C}$  时 COVID-19 发病患者较多, 说明病毒对温度较为敏感<sup>[11]</sup>。在自然环境中, SARS-CoV-2 气溶胶还会受气溶胶大小、空气湿度、风速等多种因素影响。

### 2 SARS-CoV-2 气溶胶数学模型预测

数学模型是理论流行病学研究中的一种新兴方法, 根据疾病特征, 利用数学工具进行模拟, 来达到间接地研究认识疾病的目的<sup>[12]</sup>。SARS-CoV-2 气

溶胶采集困难,采集影响因素多,潜在生物危害性大,因此有学者通过建立数学模型对气溶胶的传播进行研究。

雷浩等<sup>[13]</sup>通过构建 COVID-19 传播数学模型,定量研究了一个三人家庭环境中气溶胶传播。该研究显示,当患者呼出飞沫中 SARS-CoV-2 浓度达  $10^7$  mRNA copies/ml,换气次数为 1 次/h 的家庭环境里相处 24h,气溶胶传播风险高达 26%。随着换气频率从 0.5 次/h 增加到 5 次/h,易感者通过气溶胶途径感染病毒的概率从 32% 显著降低为 12%。构建的数学模型,量化了家庭环境中 SARS-CoV-2 通过气溶胶传播的风险,并评估了不同防控措施降低感染风险的效果。吴家麟等<sup>[14]</sup>对一例在湖南省空调大巴中发生的 COVID-19 传播案例,建立数学模型开展计算,研究了颗粒粒径、传染源位置、排风口位置等对含 SARS-CoV-2 的液滴和气溶胶传播的影响,并提出了乘客感染 COVID-19 风险计算模型。研究者将该模型预测结果与实际感染情况进行对比,发现总体与风险分布趋势基本一致,提出了降低空调大巴中 COVID-19 传播风险的可行性建议。

此外,陈田木团队<sup>[15]</sup>利用构建的数学模型,前瞻性地对 SARS-CoV-2 的传染规模、传播情况及相应干预措施进行了准确地预测和评估,为国家防疫工作提供了强有力的信息支撑,并帮助公众修正了对 SARS-CoV-2 的认识。病毒的不断变异,无症状感染者增加,病毒传播风险加大,对精准防控提出了巨大的挑战。数学模型对 SARS-CoV-2 传播特征的研究起到了有效的辅助作用<sup>[16]</sup>。这些数学模型提供的模拟数据对疾控与卫生部门进行疫情防控与决策具有理论指导意义。

### 3 SARS-CoV-2 气溶胶采集与检测的进展

3.1 SARS-CoV-2 气溶胶的采集 按照采样形式,SARS-CoV-2 气溶胶的采集可分为被动的自然沉降法和主动的采样器采样<sup>[17]</sup>。自然沉降法原理是利用气溶胶中微粒自身的重力自然沉降对气溶胶进行收集,这种方法操作简单方便,但对 SARS-CoV-2 气溶胶,该方法效率低于主动采样<sup>[18]</sup>。

主动采样是借助特定的采样器来收集病毒。目前收集 SARS-CoV-2 气溶胶常用的采样器有固体撞击器、液体冲击器和过滤器。固体撞击器是利用抽气装置以恒定的气流量使病毒气溶胶通过一个喷嘴或射流时按惯性原理射向采集面,病毒颗粒撞击并黏附于采集面上被捕获<sup>[19]</sup>。液体冲击器则是利用喷射气流的方式将流感病毒粒子收集在小体积的液体中<sup>[19]</sup>。过滤采样器的原理是通过抽滤装置将微生物粒子阻留在滤膜上<sup>[20]</sup>。BORGES 等<sup>[21]</sup>通过研究 25 篇室内环境中 SARS-CoV-2 采样和检测方法的论文,

得出了固体撞击器比液体冲击器或过滤器更有效的结论。但是固体撞击会导致病毒核酸完整性破坏<sup>[22]</sup>,液体冲击器在回收  $<1\mu\text{m}$  的颗粒时效率低下(30 ~ 100nm 粒径范围内的收集效率仅为 10%)<sup>[23]</sup>,而过滤器会显著导致病毒的干燥和活力的损失<sup>[24]</sup>。为了克服单一采样技术的不足,ROBOTTO 等<sup>[23]</sup>描述了一种用不同采样器耦合并行采集 SARS-CoV-2 气溶胶的理论方法,即同时应用三条不同的提取线,使用不同的流量、采样时间和收集液体积来采样。但是此方法未经过试验验证。

LI 等<sup>[25]</sup>将旋风离心器和液体冲击器相结合,建立了一种新型 SARS-CoV-2 气溶胶采样装置:旋转气溶胶收集(swirling aerosol collection, SAC)装置。该收集器的工作原理是利用旋风离心机产生离心分散力和冲击力,使气体通过液体冲击器,SARS-CoV-2 被收集在液体中。使用雾化 SARS-CoV-2 假病毒进行实验室测试,当假病毒源释放  $10^6$  copies/h 的假病毒时,SAC 装置在 10 cm 处 10 s 便可收集到 SARS-CoV-2。并对 SAC 装置进行了 SARS-CoV-2 气溶胶收集的临床试验,经过 qPCR 检测,患者组(27 例)有 17 例与咽拭子结果一致,而健康对照组(12 例)未见阳性结果。由于 SAC 装置同时完成了病毒颗粒的收集和溶解,它还可与微流控系统和 qPCR 相结合,从而实现 SARS-CoV-2 气溶胶的自动连续检测。

3.2 SARS-CoV-2 气溶胶的检测 SARS-CoV-2 气溶胶的检测,需要将收集到液体或固体表面的气溶胶颗粒洗脱后再进行 SARS-CoV-2 病毒的测定<sup>[22]</sup>。

3.2.1 SARS-CoV-2 培养分离与鉴定: SARS-CoV-2 培养分离与鉴定技术是实验室鉴定病原体的金标准。通过培养可以鉴定病毒是否存活。LEDNICKY 等<sup>[26]</sup>从 COVID-19 患者 2 ~ 4.8m 处收集的气溶胶样本中分离出活 SARS-CoV-2,基因组序列与新入院的患者标本中分离到的基因组序列相同。但是空气采样器在收集病毒颗粒的过程中会使病毒失活,导致 SARS-CoV-2 气溶胶的培养分离成功率低。这项技术对实验室及技术人员的要求高,且耗时长。

3.2.2 SARS-CoV-2 核酸检测:聚合酶链反应(polymerase chain reaction, PCR)被广泛应用于各个实验室。目前针对新型冠状病毒的检测主要采用的是实时荧光定量 PCR(real time quantitative PCR, qPCR)。此方法是在 PCR 的基础上,加入合适的荧光基团和淬灭基团,对核酸探针进行双标记,二者共存时无荧光产生,在 TaqMan 水解酶的作用下水解探针而激发荧光,激发的荧光被实时捕获<sup>[27]</sup>。据报道,qPCR 分析已被用于检测空气样本中的冠状病毒,且 qPCR 在 95% 置信区间内能够检测到



4 ~ 8 copies<sup>[28]</sup>。但是在实际的检测中, 还需进行 SARS-CoV-2 核酸提取, 且核酸扩增时间长, 所以耗时久。

环介导等温扩增法 (loop-mediated isothermal amplification, LAMP) 的出现缩短了检测时间, 该方法不需要初始模板变性, 针对 4 ~ 6 种靶基因来设计引物, 利用链置换聚合酶在等温 (通常为 63℃) 条件检测不同的核酸序列, 反应时间最短缩短至 30min<sup>[29]</sup>。而且 qPCR 扩增需要高温, 对传感表面有损害, LAMP 与其他传感 (比色、电化学) 技术相结合弥补了这一缺陷<sup>[30]</sup>。当使用合成的 SARS-CoV-2 靶标时, LAMP 特异度为 100%, 灵敏度低至 10 ~ 100copies<sup>[31]</sup>。

数字 PCR(digital PCR, dPCR) 是另一种新兴技术, dPCR 的特点是可直接检测出样品中的拷贝数, 是对起始样品的绝对定量<sup>[32]</sup>。与 qPCR 相比, dPCR 不需要校准曲线, 而且具有更高的灵敏度<sup>[33]</sup>。采用 qPCR 与 dPCR 技术对 COVID-19 定点医院隔离病区采集到的 86 份气溶胶标本进行 SARS-CoV-2 检测, qPCR 检测结果均为阴性, 而 dPCR 检出率达 16.28%, 结果显示针对气溶胶等环境标本更适合采用 dPCR 检测<sup>[34]</sup>。

3.2.3 CRISPR/Cas 技术: 规律成簇间隔的短回文重复序列 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR) 及其相关蛋白 (CRISPR-associated protein, Cas) 构成 CRISPR/Cas 系统的基础。CRISPR/Cas 系统主要是通过 CRISPR RNA 与靶序列互补, 引导 Cas 核酸内切酶对靶序列进行特异性识别和切割, 再将切割下来的基因簇与目标载体连接靶向克隆, 从而实现基因检测的目的<sup>[35-36]</sup>。BROUGHTON 等<sup>[37]</sup>报道了一种基于 CRISPR/Cas12 系统的检测 SARS-CoV-2 的方法, 称为 SARS-CoV-2 DNA 内切酶靶向 CRISPR 反式报告基因。该方法是对提取的 RNA 同时进行逆转录和等温扩增, 然后 Cas12 检测预定义的 SARS-CoV-2 序列, 对报告分子进行裂解, 确认病毒的检测。与 qPCR 相比, 阴性符合率为 100%, 阳性符合率 95%, 两者具有高度一致性。

3.3 SARS-CoV-2 气溶胶采集检测一体化 传统对 SARS-CoV-2 气溶胶采集后再进行病毒提取检测的技术, 过程长且复杂, 并且病毒从采样器洗脱和分离的过程容易造成 SARS-CoV-2 的丢失, 于是迫切需要一种将气溶胶采集和检测融为一体的系统。

2020 年 10 月, 清华大学医学院联合多家单位, 为了解决气溶胶检测难题, 经过 8 个月努力, 开发完成了公共空间生物气溶胶 SARS-CoV-2 核酸监测系统。此监测系统分为两部分: 便携式生物气

溶胶采样器和自动化全集成高灵敏病毒核酸检测系统。前者作为前端气溶胶收集装置, 后者则作为检测端分析采集到的样本并生成报告。检测端采用微流控平台结合新型核酸提取与扩增技术, 核心是磁带大小的核酸捕获及原位扩增检测芯片。芯片采用全封闭设计, 只需将芯片插入分子诊断检控一体机, 仪器便可自动进行核酸扩增及分析, 直接生成检测结果。该系统只需要 30 ~ 40min 便能出具结果, 真正实现了“样品入-结果出”式检测。而且经过临床测试验证, 结果显示阳性率是 qPCR 的三倍。并且该系统检测 SARS-CoV-2 的灵敏度低至 20 copies/ml<sup>[38-39]</sup>。同样利用微流控芯片技术, XIONG 等<sup>[40]</sup>构建了一个小体积旋转微流控荧光系统, 以满足 SARS-CoV-2 现场快速采集和检测的需求。该系统利用空气采样器将气溶胶收集在收集室的过滤膜上, 活病毒通过金属浴失去活性, 然后提取 SARS-CoV-2 的核酸加入微流控芯片进行核酸快速扩增。结果通过恒温放大和实时荧光记录信号输出。此系统在快速 SARS-CoV-2 检测中具有 100% 的特异度、高灵敏度 (10 copies/ $\mu$ l) 和高精密密度 ( $CV \leq 5.0\%$ ), 实现了对 SARS-CoV-2 核酸的快速采集和检测。

在 2021 世界 5G 大会和 2021 世界机器人大会中, 应用了中国检验检疫科学研究院自主研发的生物有害因子全自动采集与监测一体化系统来保障会场的生物安全。该系统内置生物气溶胶采集富集仪和荧光 PCR 仪。通过对 SARS-CoV-2 气溶胶的全自动采集、纯化和 qPCR 检测来实现实时监测。该系统可以实时监测 1 ~ 5  $\mu$ m 粒径的生物粒子浓度, 除了监测 SARS-CoV-2 外, 还可以通过检测动物、植物、细菌、真菌管家基因来反映生物气溶胶中的生物成分。但监测 SARS-CoV-2 时, 由于内置荧光定量 PCR 仪软件自动设定的阈值较低, 将波动的曲线误判成指数增长产生的荧光信号, 易导致假阳性的产生, 后期需要进一步改进荧光分析系统, 提高结果的准确度<sup>[41]</sup>。

此外, 还有一种将 CRISPR/Cas12a 技术和 LAMP 相结合来检测 SARS-CoV-2 的方法。将 CRISPR/Cas12a 试剂倒入试管中, 通过手摇与扩增子溶液混合, 然后进行 LAMP 反应。在 3D 打印仪器的帮助下, 可以直接在智能手机上查看有无 SARS-CoV-2 产生的荧光, 而且整个过程在 40min 内完成, 灵敏度低至 20 copies, 提高了测试的便携性, 降低了成本<sup>[42]</sup>。

与现有技术相比, 一体化的系统不仅能快速进行现场原位核酸检测, 还能对现场的环境起到保护作用。董群雄等<sup>[43]</sup>将激光与光谱仪和移动消杀机器人相结合, 发明了一种基于激光诱导击穿光谱检

测 SARS-CoV-2 气溶胶的装置和方法。既实现了 SARS-CoV-2 气溶胶的实时监测, 又可以对现场环境进行消杀。

#### 4 小结与展望

气溶胶在空气中看不见, 摸不着, 但又无处不在, 除了在空气中, 甚至 COVID-19 患者和无症状感染者粪便、尿液在特殊环境下都能形成气溶胶<sup>[44]</sup>, 这使得疫情的防控更加艰难。数学模型利用模拟的形式展现了气溶胶的传播, 分析了气溶胶的传播轨迹、传播范围、甚至其传染的风险性, 可以对气溶胶的扩散有前瞻性的模拟, 有利于采取及时、有效的防护措施。采样和检测技术的发展, 使得我们对气溶胶中 SARS-CoV-2 采集效率和检测灵敏度提高。一体化系统的出现简化了操作步骤, 提高了整体效率, 实现了现场的实时监控, 还可以对环境进行消杀。这些技术的发展, 可以让我们对 SARS-CoV-2 气溶胶的传播有更好、更深入的了解, 对疫情的防控及自我防护具有重要的意义。

目前, SARS-CoV-2 气溶胶的检测缺乏一个标准化的采样和检测程序, 易造成采样器和检测方法使用不当, 致使采样效率和采集病毒的生物活性不高, 阻碍了对气溶胶的进一步研究。SARS-CoV-2 气溶胶传播过程中自然因素和人为因素的不确定性增加了数学模型预测的复杂性。今后的研究, 应在全面了解 SARS-CoV-2 气溶胶的传播特性和重要影响因素的基础上, 构建科学的数学模型, 做出科学的、合理的疫情发展预测。并将理论模型的预测与实际检测结果相互印证, 相互结合, 不断改进优化, 为 SARS-CoV-2 气溶胶的研究提供一个新的方向, 为实际防控和理论研究提供有效的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 国家卫生健康委员会办公厅, 国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案 (试行第五版) [EB/OL]. (2020-02-04) [2022-07-26]. <http://www.nhc.gov.cn/yzygj/s7653p/202002/3b09b894ac9b4204a79db5b8912d4440.shtml>.  
General Office for National Health Commission and National Administration of Traditional Chinese. Diagnosis and treatment for novel coronavirus pneumonia (Trial Fifth Edition) [EB/OL]. (2020-02-04) [2022-07-26]. <http://www.nhc.gov.cn/yzygj/s7653p/202002/3b09b894ac9b4204a79db5b8912d4440.shtml>.
- [2] LIU Yuan, NING Zhi, CHEN Yu, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals[J]. Nature, 2020, 582(7813): 557-560.
- [3] 国家卫生健康委员会办公厅. 新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案 (试行第九版) [EB/OL]. (2022-03-14) [2022-07-26]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/15/content\\_5679257.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/15/content_5679257.htm).  
General Office of the National Health Commission of the People's Republic of China. Diagnosis and treatment plan for COVID-19 (trial version 9) [EB/OL] (2022-03-14), [2022-07-26]. [http://http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/15/content\\_5679257.htm](http://http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/15/content_5679257.htm).
- [4] World Health Organization. Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care[EB/OL]. Geneva: World Health Organization, 2014.
- [5] JAYAWEEERA M, PERERA H, GUNAWARDANA B, et al. Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy[J]. Environmental Research, 2020, 188:109819.
- [6] SANTA-COLOMA T A. The airborne and gastrointestinal coronavirus SARS-COV-2 pathways [J]. Preprints, 2020, 2020040133. doi: 10.20944/preprints202004.0133.v1.
- [7] WANG Zhongyi, FU Yingying, GUO Zhendong, et al. Transmission and prevention of SARS-CoV-2[J]. Biochemical Society Transactions, 2020, 48(5): 2307-2316.
- [8] GUO Zhendong, WANG Zhongyi, ZHANG Shoufeng, et al. Aerosol and surface distribution of severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2 in hospital wards, wuhan, China, 2020[J]. Emerging Infectious Diseases, 2020, 26(7): 1583-1591.
- [9] VAN DOREMALEN N, BUSHMAKER T, MORRIS D H, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1[J]. The New England Journal of Medicine, 2020, 382(16): 1564-1567.
- [10] FEARS A C, KLIMSTRA W B, DUPREX P, et al. Persistence of severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2 in aerosol suspensions[J]. Emerging Infectious Diseases, 2020, 26(9): 2168-2171.
- [11] 孔令豪, 陶国水, 陆曙, 等. 武汉地区气象数据与新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 发病情况的相关性研究 [J]. 世界中医药, 2020, 15(4): 524-528.  
KONG Linghao, TAO Guoshui, LU Shu, et al. Correlation between meteorological data and incidence of Coronavirus disease 2019 in Wuhan [J]. World Chinese Medicine, 2020, 15(4): 524-528.
- [12] 查文婷. 基于数学模型流行性感冒预测、预警和传播能力评估 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021.  
ZHA Wenting. Prediction, early warning and evaluation of influenza transmission capacity: based on mathematical model [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.
- [13] 雷浩, 肖胜蓝, 张楠, 等. 新型冠状病毒在家庭环境中的主要传播途径 [J]. 科技导报, 2021, 39(9): 78-86.  
LEI Hao, XIAO Shenglan, ZHANG Nan, et al. Exploring dominant transmission routes of COVID-19 in households [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(9): 78-86.
- [14] 吴家麟, 翁文国. 新冠肺炎病毒颗粒在空调大巴中的传播与乘客感染风险 [J]. 清华大学学报 (自然科学版) 2021, 61(2): 89-95.  
WU Jialin, WENG Wenguo. Transmission of

- COVID-19 viral particles and the risk of infection among passengers in air-conditioned buses [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2021, 61(2): 89-95.
- [15] 陈田木, 赵泽宇, 芮佳, 等. 厦门市新型冠状病毒肺炎人群传播能力计算与防控措施效果的模拟评估 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2020, 59(3): 298-303.
- CHEN Tianmu, ZHAO Zeyu, RUI Jia, et al. Estimating the transmissibility of coronavirus disease 2019 and assessing the effectiveness of the countermeasures to control the disease in Xiamen City [J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2020, 59(3): 288-303.
- [16] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M, Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study [J]. *Lancet*, 2020, 395(10225): 689-697.
- [17] 严新忠, 洪大富, 程智, 等. 新型冠状病毒 (SARS-CoV-2) 采样方法的现状与展望 [J]. *天津科技大学学报*, 2020, 35(6): 1-6.
- YAN Xinzong, HONG Dafu, CHENG Zhi, et al. Sampling methods for SARS-CoV-2: A survey and outlook [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2020, 35(6): 1-6.
- [18] BABOLI Z, NEISI N, BABAEI AA, et al. On the airborne transmission of SARS-CoV-2 and relationship with indoor conditions at a hospital [J]. *Atmos Environ*, 2021, 261: 118563.
- [19] 吴彦, 王旭初, 王兵, 等. 空气中流感病毒气溶胶采样技术研究进展 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2019, 29(11): 1406-1408, 封3.
- WU Yan, WANG Xuchu, WANG Bing, et al. Research progress of aerosol sampling technology for airborne influenza viruses [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2019, 29(11): 1406-1409, F4.
- [20] 常留栓, 李蓉, 李倩, 等. 生物气溶胶采样方法及吸入危害研究进展 [J]. *军事医学*, 2020, 44(11): 860-864.
- CHANG Liushuan, LI Rong, LI Qian, et al. Sampling methods and inhalation hazards of bioaerosol: research advances [J]. *Military Medical Sciences*, 2020, 44(11): 860-864.
- [21] BORGES J T, NAKADA L, MANIERO M G, et al. SARS-CoV-2: a systematic review of indoor air sampling for virus detection [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(30): 40460-40473.
- [22] BHARDWAJ J, HONG S, JANG J, et al. Recent advancements in the measurement of pathogenic airborne viruses [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126574.
- [23] ROBOTTO A, QUAGLINO P, LEMBO D, et al. SARS-CoV-2 and indoor/outdoor air samples: a methodological approach to have consistent and comparable results [J]. *Environmental Research*, 2021, 195: 110847.
- [24] BRESHEARS L E, NGUYEN B T, MATA ROBLES S, et al. Biosensor detection of airborne respiratory viruses such as SARS-CoV-2 [J]. *SLAS Technology*, 2022, 27(1): 4-17.
- [25] LI Xiaoguang, LI Jing, GE Qinggang, et al. Detecting SARS-CoV-2 in the breath of COVID-19 patients [J]. *Frontiers in Medicine*, 2021, 8: 604392.
- [26] LEDNICKY J A, LAUZARDO M, FAN Z H, et al. Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients [J]. *Int J Infect Dis*, 2020, 100: 476-482.
- [27] SAFIABADI TALI S H, LEBLANC J J, SADIQ Z, et al. Tools and techniques for severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2)/COVID-19 detection [J]. *Clin Microbiol Rev*, 2021, 34(3): e00228-20.
- [28] RAHMANI A R, LEILI M, AZARIAN G, et al. Sampling and detection of corona viruses in air: A mini review [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 740: 140207.
- [29] 赵大重. 逆转录环介导等温扩增技术检测新冠病毒方法的建立与优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHAO Dazhong. Establishment and optimization of novel coronavirus assay by reverse transcription-loop mediated isothermal amplification [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [30] GUPTA N, AUGUSTINE S, NARAYAN T, et al. Point-of-care PCR assays for COVID-19 detection [J]. *Biosensors*, 2021, 11(5): 141.
- [31] FOWLER V L, ARMSON B, GONZALES J L, et al. A highly effective reverse-transcription loop-mediated isothermal amplification (RT-LAMP) assay for the rapid detection of SARS-CoV-2 infection [J]. *Journal of Infection*, 2021, 82(1): 117-125.
- [32] 张瑾, 张娟, 徐翮飞, 等. 数字 PCR 技术及在病原微生物检测中的应用 [J]. *口岸卫生控制*, 2019, 24(5): 16-20.
- ZHANG Jin, ZHANG Juan, XU Hefei, et al. Digital PCR technology and its application in the detection of pathogenic microorganisms [J]. *Port Health Control*, 2019, 24(5): 16-20.
- [33] YOO H M, KIM I H, KIM S. Nucleic acid testing of SARS-CoV-2 [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(11): 6150.
- [34] 吴洪敏, 刘明星, 刘璇, 等. 某新冠肺炎定点医院环境气溶胶 SARS-CoV-2 核酸检测结果 [J]. *中华医院感染学杂志*, 2022, 32(9): 1426-1429.
- WU Hongmin, LIU Mingxing, LIU Xuan, et al. Result of SARS-CoV-2 nucleic acid test for aerosol in a designated COVID-19 hospital [J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2022, 32(9): 1426-1429.
- [35] 徐冬梅, 赵学金. 基于 CRISPR/Cas 系统的天然产物生物合成基因簇克隆和编辑技术 [J/OL]. *微生物学通报*, 2022. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.220106.
- XU Dongmei, ZHAO Xuejin. Cloning and refactoring of natural product biosynthetic gene clusters based on CRISPR/Cas system [J/OL]. *Microbiology China*, 2022. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.220106.
- [36] 吴永彬, 李凌. CRISPR/Cas 系统在新型冠状病毒肺炎快速诊断中的应用 [J]. *现代检验医学杂志*, 2022, 37(3): 1-5.



- WU Yongbin, LI Ling. Application of CRISPR/Cas systems in the rapid diagnosis of Coronavirus disease 2019 [J]. Journal of Modern Laboratory Medicine, 2022, 37(5): 1-5.
- [37] BROUGHTON J P, DENG Xianding, YU Guixia, et al. CRISPR-Cas12-based detection of SARS-CoV-2[J]. Nature Biotechnology, 2020, 38(7): 870-874.
- [38] 王诗堃, 刘长欣, 席聪聪. “揪出”空气中的病毒[N]. 南方日报, 2022-01-20: A14.
- WANG Shikun, LIU Changxin, XI Congcong. Find viruses in the air[N]. Southern Daily, 2022-01-20: A14.
- [39] 王群, 赵亮, 雷宇翔. “走出”实验室, “落进”生产线[N]. 工人日报, 2022-01-25: 006.
- WANG Qun, ZHAO Liang, LEI Yuxiang. “Out” of the lab, “onto” the production line [N]. Workers' Daily, 2022-01-25: 006.
- [40] XIONG Huiwen, YE Xin, LI Yang, et al. Efficient microfluidic-based air sampling/monitoring platform for detection of aerosol SARS-CoV2 on-site[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(9): 4270-4276.
- [41] 赵可心, 王盼, 刘莹莹, 等. 自动监测生物气溶胶粒子浓度及组分[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2022, 45(2): 104-108.
- ZHAO Kexin, WANG Pan, LIU Yingying, et al. Automatic monitoring of the concentration and composition of bioaerosol particles [J]. Chinese Journal of Frontier Health and Quarantine, 2022, 45(2): 104-108.
- [42] CHEN Yanju, SHI Ya, CHEN Yin, et al. Contamination-free visual detection of SARS-CoV-2 with CRISPR/Cas12a: A promising method in the point-of-care detection [J]. Biosens Bioelectron, 2020, 169: 112642.
- [43] 董群雄, 杨剑, 陈涛. 一种基于激光诱导击穿光谱监测新冠气溶胶的装置和方法, 中国, CN112414994A [P]. (2020-10-22) [2021-02-26].
- DONG Qunxiong, YANG Jian, CHEN Tao. Device and method for monitoring SARS-CoV-2 aerosol based on laser-induced breakdown spectroscopy, China, CN112414994A [P]. (2020-10-22) [2021-02-26].
- [44] 国家卫生健康委员会办公厅. 新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案(试行第七版)[EB/OL]. (2020-03-03) [2022-07-26]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/04/content\\_5486705.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/04/content_5486705.htm).
- General Office of the National Health Commission of the People's Republic of China. Diagnosis and treatment of novel coronavirus infection pneumonia( Trial version 7) [EB/OL]. (2020-03-03) [2022-07-26]. [http://http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/04/content\\_5486705.htm](http://http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/04/content_5486705.htm).
- 收稿日期: 2022-06-04  
修回日期: 2022-07-13

## 《现代检验医学杂志》广告招商函

●《现代检验医学杂志》于1986年1月创刊, 迄今已有37年办刊历史, 刊号: CN61-1398/R, ISSN 1671-7414。是陕西省卫生健康委员会主管, 陕西省临床检验中心和陕西省人民医院共同主办的国内外公开发行的检验医学领域重要的专业学术期刊。本刊为中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊); 中国科技论文与引文数据库收录期刊; 美国化学文摘社《化学文摘》收录期刊; 美国《剑桥科学文摘(自然科学)》来源期刊; 英国《农业与生物科学研究文摘》、英国《全球健康》、WHO西太平洋地区医学索引(WPRIM)、美国EBSCO期刊全文数据库等多家国内外权威数据库所收录期刊。

●刊期及发行范围: 双月刊, 逢单月30日出版, 邮发代号: 国内52-116/国外BM6452; 广告许可证号: 陕工商广字证6100004000018号。

●读者对象: 从事检验医学及实验医学研究的科学工作者、临床医学检验专业技师(医师)、医药院校的师生及其他相关学科工作者。

### ●广告发布:

#### 1、刊登广告范围:

- (1) 检验设备类广告; (2) 检验试剂类广告;  
(3) 输血类广告; (4) 医学检验辅助用品。

#### 2、刊登要求:

- (1) 所有刊登广告需遵守《中华人民共和国广告法》及其他相关法律规定, 广告内容不存在第三方法律争议;  
(2) 广告客户需提供指定格式的广告电子版样稿。

●广告合作服务客户所提供信息材料需确保真实、准确、有效, 严禁虚夸。

●诚邀国内外临床检验装备优秀企业合作共赢, 共同为推动检验医学领域发展而努力!

●《现代检验医学杂志》广告服务招商由北京嘉德和文化有限公司独家代理, 联系方式:

电话: 010-68630688

联系人: 薄云

手机: 13466732897

E-mail: xdjyxx@163.com

《现代检验医学杂志》社

2022年8月25日