



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200106

新型冠状病毒(SARS-CoV-2)采样方法的现状与展望

严新忠¹, 洪大富^{1,2}, 程智², 李抄², 周卫斌¹, 杜耀华²

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222;

2. 军事科学院系统工程研究院卫勤保障技术研究所, 天津 300171)

摘要: 新型冠状病毒(SARS-CoV-2)具有很强的传播性和致病性,人员吸入后极易导致呼吸道感染,继而引发病毒性肺炎。相关研究表明,新型冠状病毒感染者会向其所在环境输送新型冠状病毒。对感染者的环境接触物进行采样分析,可为制定防御措施提供有效依据,从而抑制病毒传播,降低感染概率。本文基于传统病毒采样原理,结合新型冠状病毒的物性特征分别对新型冠状病毒在固态附着、液态携带和生物气溶胶3种形式下的采样方法进行总结与分析,为环境中新型冠状病毒的检测与洗消提供依据。

关键词: 新型冠状病毒; 生物气溶胶; 采样方法; 环境采样

中图分类号: R122.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)06-0001-06

Sampling Methods for SARS-CoV-2: A Survey and Outlook

YAN Xinzhong¹, HONG Dafu^{1,2}, CHENG Zhi², LI Chao², ZHOU Weibin¹, DU Yaohua²

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Institute of Medical Support Technology, Academy of System Engineering, Academy of Military Sciences, Tianjin 300171, China)

Abstract: Novel coronavirus (SARS-CoV-2) has strong transmissibility and pathogenicity, which can easily lead to respiratory tract infection after inhalation and then cause viral pneumonia. The novel coronavirus could be transmitted from an infected person to his or her environment. Sampling and analysis of an infected person's environmental contacts can provide an effective basis for formulating defense measures to curb the spread of the virus and reduce the chance of infection. In this paper, based on the traditional virus sampling principle and combining with the physical characteristics of novel coronavirus, the sampling methods of novel coronavirus under solid attachment, liquid carrier and biological aerosol were summarized and analyzed, providing a basis for the detection and elimination of novel coronavirus in the environment.

Key words: SARS-CoV-2; coronavirus bioaerosol; sampling method; environmental sampling

新型冠状病毒(SARS-CoV-2)具有很强的传播性和致病性,该病毒作用于呼吸道或消化道上皮细胞,经血液循环至肺部,对肺脏功能细胞进行攻击,最终引发病毒性肺炎^[1-2]。新型冠状病毒主要通过两种传播方式实现对人员的感染^[3-7]:(1)接触传播,即通过肢体接触后再经呼吸道或消化道完成传播感染;(2)气溶胶传播,即病毒附着在灰尘、水汽等气溶胶上完成传播感染^[8-9]。

对确诊病人进行一些容易产生气溶胶的操作会增加传播冠状病毒(严重急性呼吸综合征冠状病毒和中东呼吸综合征冠状病毒)的风险,例如气管插管、无创通气、气管切开术、心肺复苏、插管前人工通气和支气管镜检查等。

新型冠状病毒的环境采样为检测分析提供了样品保障。在隔离留观区和隔离重症监护病区等区域,患者通过呼吸向周围环境输出新型冠状病毒。在采

收稿日期: 2020-06-20; 修回日期: 2020-09-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC1202502)

作者简介: 严新忠(1965—),男,江西省泰和县人,副教授; 通信作者: 杜耀华,高级工程师, qsyahua@sina.com

集呼吸道标本、气管插管、气管切开、无创通气、吸痰等可能出现血液、体液和分泌物喷溅的处置操作区,应着重关注冠状病毒气溶胶的存在情况,有效采取相关采样手段对环境进行采样分析。

对感染者接触环境的新型冠状病毒进行高效采样是合理制定相关防御措施和切断病毒传播途径的关键。本文基于传统病毒采样方法与新型冠状病毒的物性特征,总结新型冠状病毒的固态附着、液态携带和生物气溶胶3种形式下的采样方法。

1 新型冠状病毒的采样方法

新型冠状病毒属于 β 属冠状病毒,病毒颗粒的外形特征呈球形或椭球型,常为多形性,其粒径为60~140 nm,通过透射电镜对感染者呼吸道上皮超薄切片进行表征观察,可发现细胞外游离着新型冠状病毒颗粒,同时在细胞质中也观察到囊泡膜包裹的病毒颗粒^[10]。新型冠状病毒在感染者接触环境内的存在形式主要有固态附着形式、液态携带形式和生物气溶胶形式。针对不同的存在形式,应采取不同的采样方法,以达到最佳采样效果。

1.1 固态附着形式

新型冠状病毒的固态附着形式是指新型冠状病毒附着于固体表面的存在形式,如感染者使用过的门把手(2020年2月3日,广州市疾控中心在一名确诊患者家中门把手上发现新型冠状病毒的核酸)、电梯按钮、水杯等。

此类存在形式的新型冠状病毒可以通过棉拭子涂抹法^[11]和滤纸条粘贴法^[12]进行采样。

棉拭子涂抹法:将无菌棉签在含3 mL中和剂采样液的15 mL离心管中沾湿,对检测目标表面约5 cm×5 cm区域进行涂抹采样,横竖往返各8次,覆盖整个采样区域,采样完成后以无菌操作方式将棉签采样端剪入原采样管内。针对表面足够且规整的目标污染区可按该方法在表面不同位置进行采样,对于表面积小于5 cm×5 cm的物体(如EP管等)采样范围覆盖整个表面,对表面不规则部位(如仪器内部部位等)采样应尽量覆盖足够面积。

滤纸条粘贴法:将灭菌滤纸条放于无菌平皿内,加少量灭菌生理盐水润湿,平贴于疑似病毒污染面,1 min后取下,放入50 mL生理盐水中。

1.2 液态携带形式

新型冠状病毒的液态携带形式是指新型冠状病毒存在于悬浊液或污水中,如感染者的唾液、痰、尿

液及感染者使用过的废水等。

针对唾液、痰等小体积液态附着物中携带的新型冠状病毒可以通过棉拭子涂抹法进行取样,其操作步骤与固态附着形式基本相同,在此不多赘述。

液态携带形式的新型冠状病毒还可以采用滴管采样法进行采样,即用滴管吸取可疑液体,注入预先装有200 μ L PBS缓冲液的采样管中,封管后完成采样。

除此两种方法外,针对大体积容量污水中的新型冠状病毒采样可以采用超滤膜富集法^[13-15],即:使用孔径为0.22 μ m的滤芯过滤,去除采样液中的细菌等杂质,再使用超滤膜富集可能存在的新型冠状病毒粒子。

1.3 生物气溶胶形式

新型冠状病毒的生物气溶胶形式是指新型冠状病毒经感染者体内排出后附着在灰尘、水汽等微小颗粒上形成病毒型生物气溶胶。与常规生物气溶胶相比,病毒型生物气溶胶具有更强的不稳定性、传播性和致病性。

相比于固态附着形式和液态携带形式,生物气溶胶形式的新型冠状病毒更容易随着自然风和气流进行扩散,从而具有更强的传播能力和致病能力。因此,对生物气溶胶形式的新型冠状病毒进行采样至关重要。

生物气溶胶形式的新型冠状病毒采样方法可分为被动采样法和主动采样法^[16]两类。

1.3.1 被动采样法

最典型的被动采样法是自然沉降法^[17],该方法常用来评估微生物对检测对象表面污染。其具体采样过程:将直径为90 mm的采样板置于离地面1 m以上(通常选择人体呼吸带1.5 m位置),距墙面1 m以上的位置上,暴露1 h以上。该方法可以用来评价大气中微生物污染程度,从采样结果可以得到大气中微生物污染指数(IMA)。但据研究表明,用此方法进行采样得到的IMA略低于真实值,不能准确地反映空气中新型冠状病毒的实际浓度,采样效率较低,因此不作为传染性病毒的主要采样方法^[18]。

1.3.2 主动采样法

主动采样法是借助外力提高新型冠状病毒采样效率和采样精度的采样方法。此类方法主要有过滤法、冲击法、撞击法、气旋法、静电法、温差迫降法和虚拟浓缩法等。

过滤法^[19]是通过过滤阻留器进行采样,过滤阻留器通过抽气装置将空气吸入采样口,通过扩散、惯

性碰撞和吸附作用阻留新型冠状病毒粒子,使其附着在滤膜上,从而达到采样目的.常用的滤膜材料有硝酸纤维素酯、明胶等,滤膜滤孔一般为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$,采样流量 $1 \sim 50 \text{ L/min}$,采样时间一般不超过 30 min .

冲击法^[20]是采用喷射气流管使新型冠状病毒生物气溶胶气流通过采样液(如生理盐水、PBS缓冲液等),气流中携带的病毒粒子会在采样液的黏滞力作用下被捕获,完成收集采样.采用这种方法的代表性采样器有全玻璃液体撞击式AGI-30型和Biosampler型采样器,AGI-30型采样器的采样流量为 12.5 L/min ,适用于 $15 \sim 30 \text{ min}$ 的采样;Biosampler型采样器在相同的采样流量下使用非挥发性采样液进行采样,采样时间可以达到 8 h .图1为液体冲击式采样器.



图1 液体冲击式采样器

Fig. 1 Liquid impact bioaerosols sampler

撞击法^[21-23]是采用气流通道的新型冠状病毒生物气溶胶气流撞击培养皿,在惯性和重力的作用下,新型冠状病毒粒子会滞留在固体培养基上,从而达到采样目的.此方法最具代表性的采样器是Anderson型六级采样器(图2),其采样流量为 28.3 L/min .这种方法的局限性在于病毒粒子经撞击后会有较大概率发生轻微破损,采样时间过长还容易导致培养基脱水,以致降低生物活性.在采集过程中应考虑新型冠状病毒的生存方式,新型冠状病毒需要活体细胞作为载体,因此采样器内的培养基不能采样常规的琼脂培养基,应采用血浆凝块培养基作为采集载体.采样工作结束后对血浆凝块进行新型冠状病毒核酸检测^[24].

气旋法^[25-26]是通过气流管将新型冠状病毒生物气溶胶引入采样器,在旋风、惯性和重力等作用下,采样杯内的液体会润湿采样杯壁面,同时气流中的新型冠状病毒粒子会沿着壁面做向心运动,最终被采样液的黏性力吸附,完成收集采样.此方法最具代表的

采样器是法国的Coriolis生物气溶胶采样器(图3),其采样流量能够达到 300 L/min ,适合大流量采样工作.



图2 Anderson六级采样器

Fig. 2 Anderson sampler



图3 Coriolis生物气溶胶采样器

Fig. 3 Coriolis bioaerosols sampler

静电法^[27-28]是对既定空气环境施加高压静电,使空气中的新型冠状病毒生物气溶胶带电,再用带有相反电荷的采样面进行吸附.但是,此方法对新型冠状病毒具有一定的破坏性,会影响后续检测分析.Piri等^[29]经过大量的实验,证明了在放电过程中会产生大量的活性氧(reactive oxygen species, ROS),该物质会溶于采样液中,并对采样液中的生物气溶胶造成破坏.

温差迫降法^[30]是利用新型冠状病毒生物气溶胶粒子的热泳原理进行采样,采样过程复杂,采样环境需冷却,因此仅适用于实验室.

虚拟浓缩法^[31-33]是运用离心力和惯性分离将大流量空气中的新型冠状病毒生物气溶胶粒子富集到小流量中,从而完成浓缩富集.图4为气溶胶富集器.此方法需结合其他采样器进行采样,以提高较低浓度新型冠状病毒生物气溶胶的检出率.

表1为以上7种主动采样法的优缺点分析.单一的采样方法很难准确地反馈环境中真实的样本信

息,因此多方法联合采样可以使采样结果更加接近真实情况.虚拟浓缩法与冲击法联用可以提高低浓度下新型冠状病毒生物气溶胶的收集效率^[34],但对于粒径小于 1 μm 的新型冠状病毒生物气溶胶粒子,这种方式采样效率较低.将冲击法与过滤法联用,可提高不同环境下新型冠状病毒生物气溶胶的采样稳定性和敏感性,采样效率较高^[35],因而适合采集医疗操作环境的新型冠状病毒生物气溶胶样品.



图4 气溶胶富集器

Fig.4 Aerosol concentrator

表1 主动采样法的优缺点分析

Tab.1 Advantages and disadvantages of active sampling method

方法	优点	缺点
过滤法	装置简单	滤膜一次性;膜孔易堵塞;气流不稳定;样本干燥
冲击法	保证样品活性;适合高浓度样品采集;便于下一步检测分析	采样流量不宜过大(冲击速度<70%声速);玻璃制品,易碎
撞击法	分级采样;样本直接进入培养基	固体培养基易脱水,降低活性;采样时间短
气旋法	样本损伤小;采样流量大;连续采样	小粒径不易被捕捉
静电法	采样速度快	破坏样本结构
温差迫降法	高浓度样本采样	操作繁琐
虚拟浓缩法	低浓度样本采样	需结合其他方法使用

对新型冠状病毒生物气溶胶的研究不局限于传统的采样-检测-评估模式,国内外也正在探索一些新方法,其中最具代表性的是基于激光诱导荧光的单粒子检测法^[36-39].该方法通过对光路整形,使新型冠状病毒生物气溶胶粒子逐一通过激光检测区,经激光诱导产生一定波长的荧光信号和散射信号,将所有粒子的荧光信号和散射信号进行聚类分析,可判定其生物属性和环境浓度. Gabbarini 等^[40]用发射 266 nm 的紫外激光照射不同病毒,并用光谱仪记录发射光谱.该分类技术显示了区分病毒的可能性.此方法不仅可以实时反馈环境中荧光信号和散射信号浓度信息,还能通过机器人搭载进行远程检测.但机器感知、算法

优化等技术难点尚未完全攻克,因此还处于试验阶段.

2 新型冠状病毒采样方法在不同环境下的应用

对不同环境下存在新型冠状病毒进行差异性采样可以有效提高采样效率和采样精度.准确的采样数据可以提高新型冠状病毒的检测效率,对指导新型冠状病毒消杀起着至关重要的作用.

新型冠状病毒感染者接触过的门把手、水杯等固体表面极易残留新型冠状病毒,对于此类固体表面采样建议采用棉拭子涂抹法.新型冠状病毒感染者的唾液、尿液和其接触过的液体环境的采样可以采取棉拭子涂抹法和滴管采样法.赵昊宁等^[41]在对新型冠状病毒消毒前进行的物体表面采样,工作人员先将患者频繁接触或多次接触的物品通过棉拭子置于规格板上采样,多次连续采样后,去除工作人员的防护乳胶手套可能触摸到的部分,在试管中先注入 10 mL 试验采样液,再将样品存入试管中,及时送检.

自然沉降法操作简单,使用成本低,可以被用作现场消杀前新型冠状病毒采样.赵昊宁等^[41]在对新型冠状病毒进行现场消毒时,将无菌琼脂板水平敞开静置于空气环境中心处的 0.8 ~ 1.5 m 高度,琼脂板在待消杀环境中水平静置一段时间,将板盖盖好,以保证装置内部封闭,并在装置上做标号记录,及时送检,此处用到的采样方法就是自然沉降法.

街道、小区和住宅等人员相对稀疏的地区,其存在新型冠状病毒的可能性比较小,因此可以采用快速排查方式对其进行检测分析,如果发现异常,则对异常区域及附近区域进行精确检测,以便及时切断传染源.此类区域可以采用冲击法和撞击法进行定点快速采样,经检测一旦发现疑似新型冠状病毒存在,应采用虚拟浓缩法针对性地采样筛查,排除病毒隐患.

对于超市、地铁站等人员较为密集的场所,一旦人群中存在新型冠状病毒感染者,后果将不堪设想.因此,对此类人员相对集中、人员流动性较大的区域,应采取持续采样的实时监测手段对环境中新型冠状病毒的存在情况进行准确反馈.气旋法可以对环境中的新型冠状病毒进行持续采样,对应的采样设备轻巧便携,适用于移动式动态监控.

对于方舱医院、隔离留观病房、隔离病房和隔离重症监护室等容易产生新型冠状病毒生物气溶胶的区域,应考虑其特殊性和重要性,着重采取多方法联合采样,以降低采样误差和提高采样效率,减少误检误报情况发生.

以上几种典型环境下的新型冠状病毒采样方法总结见表2。

表2 几种典型环境的新型冠状病毒采样方法
Tab. 2 Several SARS-CoV-2 sampling methods for typical environments

环境特点	典型场景	采样方法
疑似新型冠状病毒固体表面	患者接触过的门把手、水杯等表面	棉拭子涂抹法
疑似新型冠状病毒携带液	患者产生的唾液、尿液以及其接触过的液体	棉拭子涂抹法和滴管采样法
人员稀疏区域	街道、小区和住宅等区域	冲击法和撞击法先定点采样,如有异常,换用虚拟浓缩法
人员集中、流动性大区域	超市、地铁站和学校等区域	气旋法
易产生新型冠状病毒区域	方舱医院、隔离留观病房和重症监护室等区域	多方法联合采样

3 展 望

新型冠状病毒具有很强的传播性和致病性,对其进行高效快速的采样可以提高病毒检测效率,并对病毒消杀具有指导意义。常规的病毒采样方法具有一定的局限性,多方法联合采样可以有效增加采样效率和采样精度,但同时也会增加采样成本和采样难度。新型冠状病毒的研究不应该局限于“采样-检测-消杀”的传统模式,建议借助现有成熟的生物检测、数据分析和强大的数据计算单元、数据传输技术,开发集采样、培养、检测和评价为一体的新型检测技术与设备。另外,随着生物检测技术的发展和大数据产业兴起,新的微生物检测技术将得到发展。例如,通过对空气中存在的目标病原体进行检测分析后建立病原基因库,一旦检测到相应传染源,即自动触发报警,从而实现对环境中目标病原体的实时监测。

参考文献:

- [1] Porcheddu R, Serra C, Kelvin D, et al. Similarity in case fatality rates (CFR) of COVID-19/SARS-COV-2 in Italy and China[J]. The Journal of Infection in Developing Countries, 2020, 14(2): 125-128.
- [2] Tang B, Wang X, Li Q, et al. Estimation of the transmission risk of 2019-nCov and its implication for public health interventions[J]. Social Science Electronic Publishing, 2020(9): 462-482.
- [3] 苏石, 李小承, 蒿花, 等. 新型冠状病毒(SARS-CoV-2)的研究进展[J/OL]. 西安交通大学学报: 医学版: 1-8 [2020-06-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1399.R.20200224.0944.010.html>.
- [4] 张铭志. 关注新型冠状病毒肺炎与眼表传播问题[J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(3): 401-403.
- [5] 欧阳芬, 吴荷玉, 杨英, 等. 新型冠状病毒肺炎快速传播的应对措施[J]. 全科护理, 2020, 18(3): 311-312.
- [6] 严丽, 李永胜. 新型冠状病毒肺炎重症患者的识别和处理策略[J]. 新医学, 2020, 51(3): 161-167.
- [7] 宋金鑫, 邢咏新, 吴洁, 等. 警惕冠状病毒经眼传播[J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(4): 726-728.
- [8] 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): 1406-1409.
- [9] Alexander E, Caron P. Sharps injuries in UK health care: A review of injury rates, viral transmission and potential efficacy of safety devices[J]. Occupational Medicine, 2006(8): 566-574.
- [10] 詹菁, 刘倩, 张雨竹, 等. 新型冠状病毒 2019-nCoV 的一些初步认识[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 283-291.
- [11] 李晔, 陆焯, 蔡冉, 等. 载体压印法对医疗机构环境和手表面细菌采样效果研究[J]. 中国消毒学杂志, 2019, 36(8): 561-563.
- [12] 宋立江, 阎玉霞. 涂抹法与粘贴法检测餐具的对比实验[J]. 中国食品卫生杂志, 1991(3): 31.
- [13] 张萍, 左嘉. 环境水污染物监测中的被动采样技术[J]. 黑龙江科技信息, 2016(18): 83.
- [14] 陈军红. 空气和水环境中病毒的富集、检测与净化[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [15] 靳晓军. BSL-3 实验室外环境泄漏的风险分析与风险控制[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2016.
- [16] Yuan B, Zhang Y, Leung N H L, et al. Role of viral bioaerosols in nosocomial infections and measures for prevention and control[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 117: 200-211.
- [17] 王玉寅, 赵琴, 孙宝珍, 等. 空气菌落总数自然沉降法采样时间对结果的影响[J]. 职业与健康, 2001(12): 43.
- [18] Bolookat F, Hassanvand M S, Faridi S, et al. Assessment of bioaerosol particle characteristics at different hospital wards and operating theaters: A case study in Tehran[J]. MethodsX, 2018, 5: 1588-1596.
- [19] 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.
- [20] 陈拼. 微生物气溶胶采样器设计及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

- [21] 赵岩,张经纬,王书梅,等. 采样前不同消毒灭菌处理方式对安德森空气采样器医院内浮游菌采样结果影响分析[J]. 公共卫生与预防医学,2019,30(6):17-20.
- [22] 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.
- [23] 张惠力,甄世祺,周明浩,等. 生物气溶胶采样技术研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2011,23(4):18-21.
- [24] 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.
- [25] 张越. 虚旋风生物气溶胶采样器的性能测试[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [26] Macher J, Chen B, Rao C. Field evaluation of a personal, bioaerosol cyclone sampler[J]. Journal of Occupational & Environmental Hygiene, 2008, 5(11):724-734.
- [27] 徐羽贞. 微生物气溶胶静电收集技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [28] Ferguson R M W, Alcega S G, Coulon F, et al. Bioaerosol biomonitoring: Sampling optimization for molecular microbial ecology[J]. Molecular Ecology Resources, 2019, 19(3):13002.
- [29] Piri A, Kim H R, Hwang J. Prevention of damage caused by corona discharge-generated reactive oxygen species under electrostatic aerosol-to-hydrosol sampling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384:121477.
- [30] 亓春花. 医院环境微生物气溶胶含量与传播及其指示菌耐药性的分子鉴定[D]. 泰安:山东农业大学,2009.
- [31] 梁晓军,刘凡. 低浓度空气微生物采样与效果评价技术研究进展[J]. 环境与健康杂志,2011,28(3):278-282.
- [32] 梁晓军. 一种低浓度微生物气溶胶浓缩器的设计和性能验证[D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2011.
- [33] Geller M D, Biswas S, Fine P M, et al. A new compact aerosol concentrator for use in conjunction with low flow-rate continuous aerosol instrumentation[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(8):1006-1022.
- [34] 梁晓军,张宝莹,葛覃兮,等. 虚拟浓缩器与 Biosampler 采样器联用采集空气微生物气溶胶性能的现场评价[J]. 环境与健康杂志,2012,29(7):593-596.
- [35] 华利忠,武昱孜,白方方,等. 猪肺炎支原体气溶胶富集检测技术的初步研究[J]. 中国农学通报,2013,29(5):42-47.
- [36] 刘方武. 激光诱导荧光微生物检测技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院上海技术物理研究所,2014.
- [37] 李鑫,吴慧云,黄志松,等. 生物战剂检测技术及其研究进展[J]. 军事医学,2014,38(4):312-316.
- [38] 徐傲,熊超,张佩,等. 基于本征荧光测量的双通道生物气溶胶检测技术研究[J]. 光学学报,2013,33(8):138-143.
- [39] Bhangar S, Adams R I, Pasut W, et al. Chamber bioaerosol study: Human emissions of size-resolved fluorescent biological aerosol particles[J]. Indoor Air, 2016, 26(2):193-206.
- [40] Gabbarini V, Rossi R, Ciparisse J F, et al. Laser-induced fluorescence(LIF) as a smart method for fast environmental virological analyses: Validation on picornaviruses[J]. Scientific Reports, 2019, 9(4):63-79.
- [41] 赵昊宁,魏凌,孙红云,等. 新型冠状病毒肺炎防控现场消毒技术研究[J]. 生物医学工程学杂志,2020,37(4):566-571.

责任编辑:郎婧