

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤*, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明

(清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 当前, 新型冠状病毒肺炎正在全球大范围流行, 严重影响了人类健康和生产生活。目前已明确的新型冠状病毒的传播途径包括飞沫传播和接触传播, 一些传播感染事件的研究间接证明新型冠状病毒可以通过空气传播, 然而对于新型冠状病毒通过气溶胶传播机制的认识仍然不足, 其对疾病传播的相对贡献等还在研究和论证中。本文分析了引起重症急性呼吸综合征、中东呼吸综合征和新型冠状病毒肺炎的不同冠状病毒通过气溶胶传播的研究结果, 评述了病毒气溶胶的产生机制、病毒气溶胶的空气动力学特征、冠状病毒在气溶胶中的存活规律及环境因素的影响、以及冠状病毒在室内外环境气溶胶中的赋存和传播情况, 探讨了当前对于明确新型冠状病毒的气溶胶传播研究的不足以及跨学科研究的展望。

关键词: 冠状病毒; 气溶胶; 传播; 环境影响因素; 存活性

中图分类号: X18 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3091-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010033

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission

LI Xue, JIANG Jing-kun*, WANG Dong-bin, DENG Jian-guo, HE Ke-bin, HAO Ji-ming

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The COVID-19 pandemic has endangered human health and production since 2019. As an emerging disease caused by SARS-CoV-2, its potential transmissibility via aerosols has caused heated debate. This work summarizes the current research findings on virus aerosol generation, aerodynamic properties, and environmental influencing factors on their survivability in order to elucidate coronavirus transmission via aerosols. The occurrence and distinction of SARS-CoV-2, SARS-CoV-1, and MERS-CoV in real atmospheric environments are summarized. The deficiencies of existing research and directions for necessary future research on confirming the airborne transmission mechanism of coronavirus as well as the need for multidisciplinary research are discussed.

Key words: coronavirus; aerosols; transmission; environmental influencing conditions; survivability

2019年以来,一种由新型冠状病毒(SARS-CoV-2, 新冠病毒)引起的新型冠状病毒肺炎(COVID-19, 新冠肺炎)在全球大范围流行。截止2020年11月29日,全球新冠肺炎患病人数已经超过6200万人,死亡人数已超145万人(<https://coronavirus.jhu.edu/map.html>)。相比于以往其他两种由冠状病毒引发的疫情:严重急性呼吸综合征(severe acute respiratory syndrome, SARS)和中东呼吸综合征(Middle East respiratory syndrome, MERS),新冠病毒的传播和感染能力明显高于SARS病毒(SARS-CoV-1)和MERS病毒(MERS-CoV)。对于新冠病毒的传播途径,目前已明确的传播途径包括飞沫传播和接触传播。然而,当前对于新冠病毒能否通过气溶胶传播(或空气传播)尚未形成明确结论。文献[1]中指出,“经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要的传播途径。在相对封闭的环境中长时间暴露于高浓度气溶胶情况下存在经气溶胶传播的可能”。世界卫生组织(WHO)的新冠肺炎防护指南也指出患者诊疗中如气管切管等医疗护理过程会引发新冠病毒通过气溶胶传播的风险^[2,3]。然而上述指南未对新

冠病毒能否在一般室内外空气中通过气溶胶传播,以及气溶胶传播对于新冠肺炎传播的相对贡献做出明确说明。因此,深入理解新冠病毒的气溶胶传播及其对新冠肺炎传播的相对贡献对进一步开展疫情防控,降低公众感染风险具有重要意义。

本文从病毒气溶胶的产生机制、病毒气溶胶的空气动力学特征、冠状病毒在气溶胶中的存活规律及环境因素对其存活的影响、以及空气中冠状病毒在气溶胶中的赋存和传播情况等方面,评述了关于冠状病毒气溶胶传播及环境因素影响的现有认识,并探讨了当前对于明确新型冠状病毒的气溶胶传播所面临的核心问题以及开展跨学科研究的紧迫性。

1 飞沫和病毒气溶胶的产生机制与粒径分布

对于由冠状病毒引起的呼吸系统传染病而言,病毒主要通过感染者呼吸、讲话、咳嗽和喷嚏等活动

收稿日期: 2020-10-09; 修订日期: 2020-12-21

基金项目: 科技部疫情防控科技攻关项目(2020YFC0842500)

作者简介: 李雪(1988~),女,博士(后),主要研究方向为环境气溶胶的组分分析及理化特性, E-mail: lixue191@tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

排放的液滴释放到环境中(环境学科中通常将悬浮在气体中的液态或固态颗粒物定义为气溶胶)。而公共卫生领域在研究呼吸系统传染病时通常使用“飞沫(droplets)”和“飞沫核(droplet nuclei)”,前者一般指人呼出的较大液滴(例如粒径大于 $5\ \mu\text{m}$);后者指飞沫在空气中经过蒸发变小后形成的粒径较小的颗粒物。不同领域研究中通常使用不同的粒径界限。例如,生命医学领域根据不同粒径的气溶胶在呼吸道各部位沉降率,一般以 $10\ \mu\text{m}$ 作为可吸入颗粒物的粒径界限。本文沿用公共卫生领域的术语,所论述的病毒气溶胶泛指飞沫核和人直接呼出的小粒径颗粒物(液滴)。

1.1 飞沫和病毒气溶胶的产生机制

人在咳嗽、喷嚏、说话乃至正常呼吸时都会释放飞沫和气溶胶^[4~10],然而目前对呼吸系统中飞沫和气溶胶的产生机制的研究多基于模型模拟,尚未形成明确的定论。图1简要描述了呼吸道中飞沫和气溶胶产生的两种机制,按照形成原理和产生位置可分为:①上呼吸道内壁上粘液在呼吸气流剪切作用和呼吸道机械振动作用下形成液滴;②下呼吸道(如肺段支气管等)狭窄气道开合时形成液膜并在气流的冲击作用下破碎形成液滴^[5,6]。第一种机制认为,人在呼吸活动中上呼吸道内气流为湍流状态,在湍流涡旋产生的剪切力作用下,呼吸道内壁上的粘液会进入气流形成液滴。此外,咳嗽和喷嚏等活动会使上呼吸道剧烈振动,也会导致上呼吸道内壁上粘液脱离粘液层形成液滴。第二种机制则认为呼气过程中下呼吸道气路压缩呼气时,气管管径缩小导

致内壁上的粘液充满气管,而后在吸气时气管扩张在其截面上形成粘液膜,最终液膜在气流的冲击下破裂形成液滴。由于冠状病毒感染者的呼吸道分泌液中含有大量病毒^[11,12],这些病毒会伴随呼吸道内产生的飞沫和气溶胶排出体外。除上述呼吸活动能产生含病毒的飞沫和气溶胶外,感染者在特定治疗过程中(例如吸痰和呼吸机插管等)也会释放大量含有病毒的飞沫和气溶胶,增加医护人员的感染率^[13,14]。

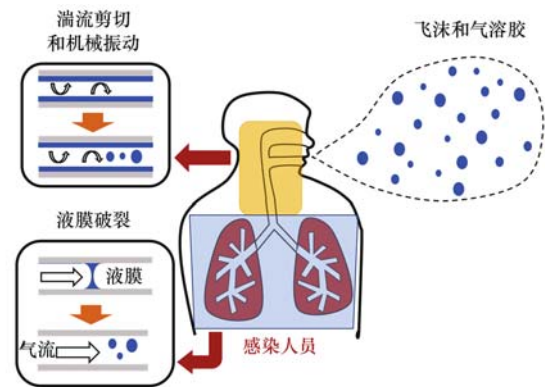


图1 呼吸道中飞沫和气溶胶的主要产生机制示意

Fig. 1 Schematic of droplets and aerosol generation mechanism in human respiratory tract

1.2 飞沫和病毒气溶胶的粒径分布

飞沫和病毒气溶胶进入空气后,粒径是影响其在空气中的停留时间和传输距离的主要因素之一。图2总结了部分研究中报道的人呼出气中飞沫和气溶胶的数浓度粒径分布^[7,10,15~21]。首先需要指出的是,粒径分布测量结果受仪器测量范围和实验方法

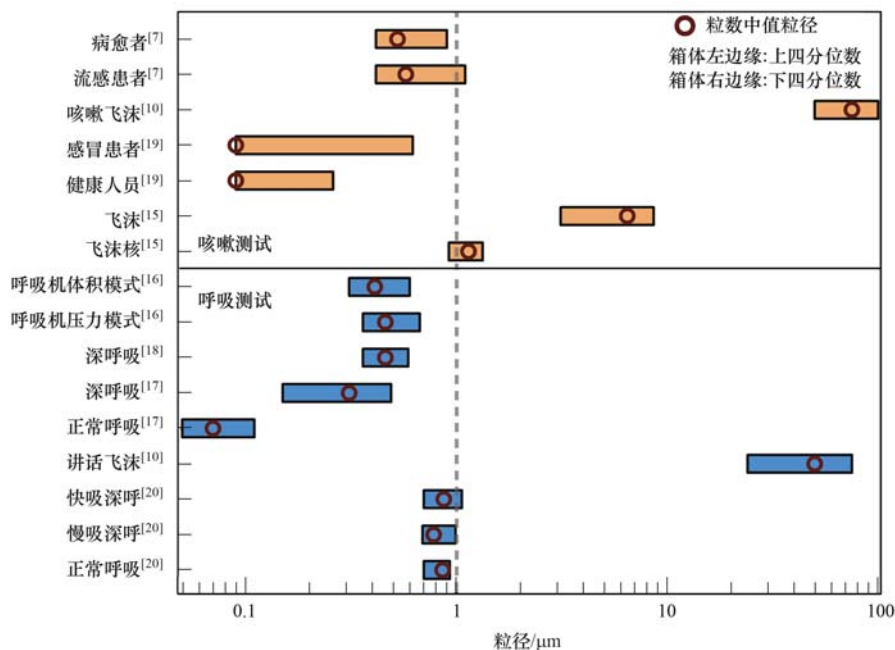


图2 呼吸等活动释放的气溶胶数浓度粒径分布

Fig. 2 Distributions of count median diameter of aerosols in exhaled breath

的显著影响. 例如 Yang 等^[15]使用空气动力学粒径谱仪和扫描电迁移率粒径谱仪分别对 $0.6 \sim 30 \mu\text{m}$ 和 $0.02 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物进行粒径测量, 结果显示咳嗽产生的飞沫核和飞沫的总平均粒径分布为 $0.58 \sim 5.42 \mu\text{m}$ 和 $0.62 \sim 15.9 \mu\text{m}$. Wan 等^[16]使用测量范围 $0.3 \sim 20 \mu\text{m}$ 的德国 Grimm 16 通道粉尘检测仪测量病人使用呼吸机时产生的气溶胶的数浓度粒径分布发现其粒径主要分布在 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$. Lindsley 等^[7]使用 MSP Corporation 的粒子光谱仪观测流感患者与痊愈者呼出气中气溶胶的粒数中值粒径是 $0.63 \mu\text{m}$. Xie 等^[10]利用光学显微镜对沉降(撞击)到载玻片上的液滴/颗粒进行粒径测量, 结果显示所测飞沫粒径在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间. 尽管不同研究中使用的测量仪器存在差异, 多数数浓度粒径分布测量结果表明呼吸和咳嗽等活动释放的气溶胶粒径较大比例集中在亚微米范围内. 此外, 有研究表明大粒径的飞沫在进入空气中后由于蒸发作用也会转化为粒径更小的气溶胶. Morawska 等^[20]观察到人呼出气中气溶胶在呼出后 0.8 s 内已经缩小到稳定的粒径. Redrow 等^[22]使用包括葡萄糖、蛋白质、脂质和生理盐水等混合溶液或单一溶质溶液, 模拟了飞沫进入空气后的蒸发过程及粒径变化, 并发现初始粒径为数十微米的飞沫在数秒内其粒径可能缩小近一个数量级, Holmgren 等^[18]的实验也有类似的结果报道. 因此, 人呼出气中的亚微米气溶胶既可能是直接呼出的, 也可能来自于大粒径飞沫蒸发转化的飞沫核. 这些亚微米气溶胶在空气中的停留时间和传输距离都显著高于飞沫(前者停留时间可达数小时至数天, 传输距离可达数米至数十米), 为病毒的长距离传播提供了潜在载体.

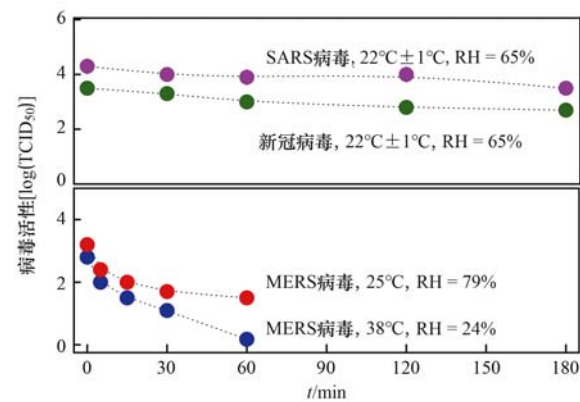
除了呼出气中飞沫和气溶胶的粒径分布, 数浓度也是评估飞沫和气溶胶传播风险的重要指标. 数浓度受到呼吸方式、测试方法、测试者的健康状况等影响^[7,8,17,19~21]. Lindsley 等^[7]的实验检测到每次咳嗽产生的气溶胶数浓度在每个咳嗽 $10^2 \sim 10^5$ 个(均值每个咳嗽 10^4 个). Lee 等^[8]的实验观测到咳嗽产生的飞沫和气溶胶数浓度均值在每个咳嗽 10^6 个. 此外, 呼吸类疾病患者可能会比健康人产生几倍甚至数十倍更多的气溶胶^[7,8,19]. Morawska 等^[20]研究了口鼻呼吸、咳嗽和哈气等方式呼出气中数浓度的变化, 发现通过哈气方式产生的气溶胶数浓度是口鼻呼吸的约 10 倍, 是咳嗽数浓度的 2 倍. 同时, 目前已有证据表明病毒感染者的呼出气(飞沫和气溶胶)中存在大量的冠状病毒. Zhou 等^[23]在武汉采集病人呼出气并进行检测, 发现在病患咽拭子呈阴性

的情况下, 依然在部分康复患者的呼出气样本中检出新冠病毒核酸阳性, 且核酸含量可观 ($10^5 \text{ copies} \cdot \text{m}^{-3}$, 以 RNA 计). Ma 等^[24]的研究发现新冠患者初期可以通过呼吸排放大量的新冠病毒. 此外, 有研究指出呼出气中飞沫和气溶胶的数浓度越高, 携带的病毒含量可能越高^[25].

2 冠状病毒在气溶胶中的存活规律及环境因素影响

冠状病毒在环境气溶胶中的存活能力是影响其通过气溶胶传播能力的因素之一. 温度和湿度等环境因素显著影响冠状病毒在气溶胶中的存活能力^[26~36]. 在实验室中通过模拟环境条件, 检测病毒在控制条件下存活量、存活率和衰减周期等是探究不同因素对病毒活性影响的常用方法. 气溶胶中的病毒与其他环境介质(水和固体介质等)中病毒存活规律的研究方法类似, 通过控制实验体系中的温度和湿度等条件, 在不同时刻采集气溶胶样品并进行病毒宿主细胞感染实验、病毒的 RNA 或特征蛋白含量检测等评估病毒的活性及含量, 从而判断环境因素对病毒的存活量、存活率和衰减周期等的影响. 在上述实验中通常将含有病毒的溶液通过气溶胶发生器雾化产生病毒气溶胶, 均匀分散在实验模拟仓或转鼓式实验箱中, 再通过气溶胶采样器采集病毒气溶胶并进行分析检测. Ijaz 等^[32]的研究发现, 冠状病毒 HCoV-229E 在气溶胶中的半衰期(细胞感染能力下降 50% 的时长)在温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 相对湿度(relative humidity, RH) $80\% \pm 5\%$ 的环境中约为 3 h, 而中等湿度环境有利于病毒的存活(RH = $50\% \pm 5\%$ 下 68 h, RH = $30\% \pm 5\%$ 下 26 h). 同时, 该冠状病毒在 $6^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的低温环境下半衰期显著高于室温下的结果, 表明在同等湿度下低温有利于 HCoV-229E 的存活. 而对于 SARS 病毒、MERS 病毒和新冠病毒, 图 3 比较了不同环境条件下 3 种冠状病毒在气溶胶中的存活特性^[30,33], 即组织细胞半数感染剂量(TCID₅₀, 可使 50% 组织细胞感染的病毒含量)随时间降低. SARS 病毒、新冠病毒及 MERS 病毒在气溶胶发生液中起始滴度分别为 $10^{6.75 \sim 7.0}$ 、 $10^{5.25}$ 和 $10^{5.5} \text{ mL}^{-1}$, 温度 $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 及 RH 65% 的环境条件下, SARS 和新冠病毒的活性衰减变化近似, 3 h 后在气溶胶中还有活病毒. Pyankov 等^[33]的研究发现 MERS 病毒在典型中东地区环境条件下 (38°C , RH = 24%) 活性衰减比在室内环境中 (25°C , RH = 79%) 更快, 并指出环境因素对其存活的影响可能是 MERS 传播远低于 SARS 和新冠病毒的原因之一. 最近的研究报道新冠病毒可以在气溶胶中存活 16 h 并具有细胞感染能力^[35]. 除温度和湿度外,

Schuit 等^[36]在研究中发现光照能促使新冠病毒活性衰减。



SARS 和新冠病毒结果引自文献[30];

MERS 病毒结果引自文献[33]

图3 SARS 病毒、新冠病毒和 MERS 病毒存活性及影响因素

Fig. 3 Viability of SARS-CoV-1, SARS-CoV-2, and MERS-CoV in aerosols plotted as a function of time and influencing factors

病毒存活的实验结果表明新冠病毒和 SARS 病毒在相同温、湿度条件时在气溶胶中存活特性接近,而基于流行病学和数学模型等研究也表明环境中温度、湿度及光照等因素和冠状病毒的存活及传播有一定相关性^[37~45]. Yao 等^[40]利用中国 62 个城市的新新冠肺炎确诊患者数,分析基本传染数 (basic reproduction number) 和温度、紫外光照条件的关系,未发现累计发病率 (cumulative incidence rate) 受温度与紫外光照影响. 然而, Holtmann 等^[41]对巴塞罗那地区疫情发展初期的数据统计分析后得出低温有利于新冠肺炎疫情传播的结论. Ward 等^[42]的研究发现,悉尼大气中的相对湿度降低新冠肺炎感染病例增加. Sajadi 等^[43]根据新冠肺炎社区暴发情况及流行地区的纬度和气象条件 (温度、湿度),发现新

冠肺炎流行与季节性呼吸道病毒有类似表现. 然而,新冠肺炎当前在全球感染人数已远超 SARS 疫情感染人数 (8 422 人)^[44],随着北半球季节由秋冬季进入春夏季,新冠肺炎疫情的发展并未按照以往预期出现减缓的趋势. 以上现象均表明,与其他冠状病毒和呼吸道病毒相比,新冠病毒在传播和感染能力上具有明显的特异性,现有对病毒存活能力和环境因素影响的认知尚无法完全解释新冠病毒的传播.

3 冠状病毒气溶胶在真实环境空气中赋存特征和传播

冠状病毒能否通过气溶胶进行传播的另一个关键性的证据是真实环境空气的气溶胶中存在冠状病毒且具有感染细胞和生物的能力. 病毒核酸检测能够表征气溶胶中是否存在目标病毒,但无法说明病毒是否存活以及是否具有感染性,因此需要对核酸检测结果呈阳性的样品进一步进行细胞侵染实验. 通常将样品中的病毒与活细胞混合培养,观察细胞是否在一段时间内出现病毒感染的相关病变特征,以此评判气溶胶中是否存在具有感染能力的病毒. 当前大量的真实环境的空气样本检测结果已证实室内以及部分室外环境空气中有 SARS、MERS 和新冠病毒的病毒核酸被检出 (表 1). 同时,在飞沫和气溶胶中检测到 SARS 和 MERS 病毒的样本中使用细胞培养均发现了具有感染性的活病毒,直接证实了 SARS 和 MERS 病毒可以通过气溶胶传播. 对于新冠病毒,一些研究通过流行病学调查和对传播感染事件的回顾分析,间接揭示新冠可以通过气溶胶直接传播,而直到最近才仅有一项研究从室内空气样品中分离出具有感染性的活新冠病毒^[54].

表 1 室内外空气中冠状病毒气溶胶 PCR 和病毒分离培养结果

Table 1 Coronavirus aerosols detected by PCR and cultures in indoor and outdoor environments

病毒种类	采样点	样本数量	PCR 阳性占比	细胞培养 检测病毒活性	文献
SARS 病毒	病房	6	6/6	6	[14]
	病房和阳台	36	10/36	1	[46]
	护士站、走廊和病房和排风口下风向 5 m	76	38/76	0	[47]
	病房和护士站	54	2/10	无	[48]
MERS 病毒	骆驼饲养棚	3	1/3	无	[49]
	病房和走廊	7	7/7	4	[50]
新冠病毒	重症和普通病房	9	6/9	无	[51]
	某医院病区、厕所和仓库	4	2/4	无	[51]
	医护工作区	11	9/11	无	[51]
	隔离病房、发热门诊和护士站等	27	1/27	无	[52]
	意大利某工业基地 ¹⁾	34	12/34	无	[53]
	患者收治病房	4	4/4	4	[54]
	患者收治医院走廊	2	1/2	0	[55]
	走廊	16	12/16	无	[56]

1) 室外大气气溶胶

对于 SARS 和 MERS 而言,国内外不同研究均发现针对 SARS 患者重症监护室内外空气样本中使用 RT-PCR 或 PCR 检测 SARS 病毒核酸结果呈阳性^[14,46~48].小汤山医院内样本检测结果表明空气样本的 SARS 病毒核酸阳性占比率随病区内空气流动方向有逐渐增加的趋势(图 4)^[47].Azhar 等^[49]和 Kim 等^[50]分别在确诊的 MERS 患者的活动区域(骆驼棚)和病房的空气样本中检测到 MERS 病毒核酸.而证明 SARS 和 MERS 病毒具有气溶胶传播潜能的关键证据是已经从气溶胶样品中分离出有细胞感染能力的活病毒^[14,46,50].徐潜等^[14]和肖文珩等^[46]分别在患者呼吸道、呼吸机旁和患者床头附近距离 1 m 以内的位置采集的部分样品中,使用细胞培养技术分离得到有活性的 SARS 病毒.同样,在患者的治疗单元内和走廊的空气样本中也有具有细胞感染性的活 MERS 病毒检出^[50].而对于新冠病毒,现有研究中对室内环境气溶胶中新冠病毒核酸的检测结果显示存在一定的差异.Liu 等^[51]在武汉新冠患者收治医院 ICU、厕所、医护人员使用区域和仓库等空气中检出新冠病毒的核酸.然而,有研究报道指出,例如 Zhou 等^[23]和 Ong 等^[57]在武汉和新加坡两处治疗医院室内的空气样品中未检出新冠病毒,Jiang 等^[52]采集 27 例室内空气样品中仅在重症监护室发现 1 例阳性.室外环境样品中也有新冠状病毒核酸被检出的报道.Liu 等^[51]在武汉新冠患者收治医院外及附近居民区的公共环境大气样本中检出新冠病毒的核酸.在意大利贝加莫工业区某观测点采集的大气颗粒物样品中也有新冠病毒核酸被检出^[53].而对于气溶胶中新冠病毒活性的研究,Lednicky 等^[54]首次在病房内从距离新冠肺炎患者 2 m 以上的位置采集的气溶胶样本中检出能够感染细胞的活新冠病毒.

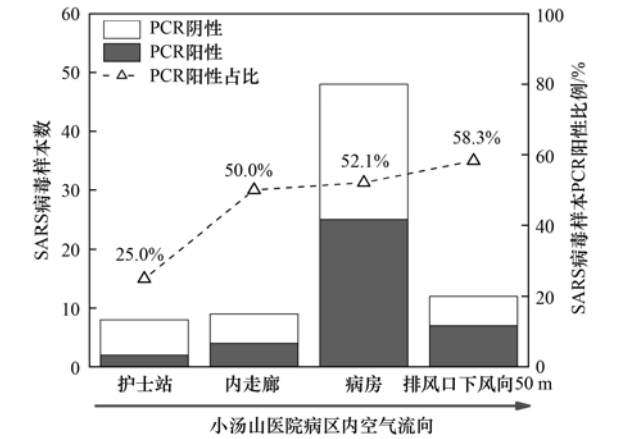


图 4 小汤山医院各采样点样品结果^[46]
Fig. 4 PCR results of SARS-CoV-1 in Xiao Tang-Hill Hospital

有研究针对空气样品中冠状病毒气溶胶粒径和

数浓度特征进行了分析.徐潜等^[14]在 SARS 重症监护病区病人床边和呼吸机旁边分粒径采集了空气样本,如表 2 所示,6 份样品中大粒径和小粒径的气溶胶中检测出病毒的核酸和具有细胞感染性的活病毒.这一研究结果表明 SARS 病毒可以在微米级和亚微米的气溶胶中存在.Liu 等^[51]在武汉新冠患者收治医院病房与外部连接的缓冲区(医护人员更换防护服的区域)和医务人员办公区采集了分粒径的空气样本(0.01~0.25、0.25~0.5、0.5~1.0、1~2.5 和 >2.5 μm),在两个缓冲区的空气中检出新冠病毒核酸,其中 0.25~0.5 μm 和 0.5~1.0 μm 粒径气溶胶中病毒核酸浓度较高;在医务人员办公区的样本显示各粒径段新冠病毒核酸阳性的同时,粒径 >2.5 μm 的样本中核酸载量最高.病房与外部连接的缓冲区和医护办公区的样本病毒载量峰值出现在不同的粒径范围表明两个区域内病毒气溶胶产生的机制可能不同.另外 Chia 等^[58]也在新冠肺炎患者病房采集的空气中粒径 >4 μm 和 1~4 μm 的样本中检测到了新冠病毒核酸.

表 2 分粒径的空气样品 PCR 和 SARS 病毒分离培养的测试结果^[14]
Table 2 PCR and virus culture results of size-segregated air samples

粒径/μm	RT-PCR 阳性样品数/总样品数 ¹⁾	病毒培养阳性样品数/总样品数
>11	1/6	6/6
7~11	2/6	4/6
4.7~7	1/6	6/6
3.3~4.7	3/6	4/6
2.1~3.3	2/6	6/6
1.1~2.1	1/6	4/6
0.65~1.1	0/6	4/6
0.43~0.65	4/6	5/6
<0.43	0/6	4/6

1) SARS 重症监护室采集 5 位 SARS 患者共 6 组样品的聚合酶链反应引物 9 的 PCR 结果^[14]

与 SARS 和 MERS 疫情相比,新冠肺炎疫情期间空气飞沫和气溶胶的样本检测结果普遍呈现病毒核酸阳性率偏低、病毒核酸含量低.根据 Wölfel 等^[11]和 Zou 等^[12]通过采集新冠患者咽拭子和鼻拭子,检测发现新冠肺炎患者在上呼吸道中存在病毒,且在患者产生症状初期病毒含量已达到峰值,远远超过 SARS 患者同期病毒含量水平.虽然新冠患者产生的病毒含量高,但样本中冠状病毒检出率较低,可能有如下两个原因:①与 SARS 疫情相比,新冠疫情期间医疗场所内加强了通风换气或者针对室内环境的消杀等防护措施降低了病毒在空气中的含量^[59,60];②采样和检测方法对病毒气溶胶采集和分析结果也可能导致样品病毒核酸阳性率低^[51,55,56].目前对病毒气溶胶的采集大多利用了自然沉降、过

滤和撞击等原理将颗粒物采集在固体表面或液体中. 沉降法是利用气溶胶的扩散运动和重力作用,使其自然沉降在采样表面(如培养皿)上;滤膜法是通过过滤方式将气溶胶截留在滤膜上;撞击法是气流通过小孔或狭缝加速颗粒物使其惯性撞击在采样板上. 与固体介质采样相比,气溶胶的液体采集包括使用液体做收集液(纯水和磷酸盐缓冲溶液等)或利用冷凝生长使气溶胶长大为液滴后采集等方式. 因为病毒的相关检测通常是在液态或半固态基质中进行,因此采集到固体表面的病毒气溶胶通常需要二次转移到液体中. Liu 等^[51]在武汉新冠患者收治医院重症监护室中采集的2个沉降式样本中病毒核酸含量较高(31 copies 和 113 copies),在其他区域使用滤膜采样器(Sartorius Inc.)采集的总悬浮颗粒物和撞击采样器(Sioutas Impactor, SKC Inc.)采集的分粒径气溶胶样本病毒核酸含量偏低(最高值 42 copies). 有研究者采取了冷凝生长原理的采样器(VIVAS 和 Biospot-VIVAS sampler, Aerosol Devices Inc.),在早期研究中检测到病毒核酸但未分出活的新冠病毒^[55],在其后续研究中避免其他呼吸道类病原体的干扰^[54],检测出等效于 $6 \sim 74 \text{ count} \cdot \text{L}^{-1}$ 具有细胞感染能力的新冠病毒,且占总新冠病毒量的 40%~80%. 此工作是首次报道从室内空气样品中分离出具有感染性活新冠病毒. Santarpia 等^[56]在 University of Nebraska Medical Center 利用滤膜采样器 Sartorius Airport MD8 (Sartorius Inc.) 和 Personal Button Sampler (SKC Inc.) 将病毒气溶胶采集在明胶滤膜上,前者样品中新冠病毒核酸含量在 $(0.979 \sim 6.004 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1})$ 低于后者中病毒含量 $(5.366 \sim 67.164 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1})$. 因此,环境中病毒含量低,采样方法和检测手段等不完备等原因,可能导致样品病毒核酸阳性率低以及无法检出的情况.

4 结论

新冠肺炎疫情暴发以来,新冠病毒能否通过气溶胶传播一直是相关研究领域迫切需要解答的科学问题. 为证实新冠病毒的气溶胶传播,需要从病毒气溶胶的产生、气溶胶中病毒的赋存、病毒的存活特征以及能导致人体感染新冠肺炎的病毒最低剂量等多个角度提供直接的科学证据. 当前已有研究结果发现人呼出气中含有大量包含新冠病毒的飞沫和气溶胶,证实了病毒感染者通过呼吸活动会释放大量病毒. 同时,许多研究已在室内外相关环境的气溶胶中检测到新冠病毒核酸,部分研究结果进一步在气溶胶赋存的病毒中发现了具有感染能力的病毒,直接证实了新冠病毒可能通过气溶胶进行传播. 此外,在

病毒气溶胶的空气动力学特征、病毒在气溶胶中的存活规律及环境因素对其存活的影响等方面取得了相关研究进展也间接支撑了新冠病毒通过气溶胶传播的可能性. 然而,目前仍有一些核心科学问题尚未得到直接回答. 例如,新冠患者通过呼吸、咳嗽和说话排放到空气中的新冠病毒的粒径分布和相关的活性如何? 即使室内外环境空气的气溶胶中存在着具有感染能力的新冠病毒,受体在摄入这些病毒后是否一定会感染新冠肺炎? 引发新冠肺炎感染的最低病毒摄入剂量是多少? 新冠病毒通过气溶胶传播造成的人员感染对疫情整体传播的贡献是多大? 以上科学证据的缺失使得新冠肺炎能否通过气溶胶传播这一问题至今仍未形成公认的结论. 因此,亟需针对上述科学问题开展相关研究.

参考文献:

- [1] 国家卫生健康委办公厅, 国家中医药管理局办公室. 关于印发新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)的通知[EB/OL]. <http://www.nhc.gov.cn/zyygj/s7653p/202003/46c9294a7dfc4cef80dc7f5912eb1989.shtml>, 2020-03-03.
- [2] World Health Organization. Clinical management of COVID-19 [EB/OL]. <https://www.who.int/publications/i/item/clinical-management-of-covid-19>, 2020-05-27.
- [3] World Health Organization. Infection prevention and control during health care when coronavirus disease (COVID-19) is suspected or confirmed [EB/OL]. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-IPC-2020.4>, 2020-06-29.
- [4] Bourouiba L, Dehandschoewercker E, Bush J W M. Violent expiratory events: on coughing and sneezing[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, **745**: 537-563.
- [5] Johnson G R, Morawska L. The mechanism of breath aerosol formation[J]. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 2009, **22**(3): 229-237.
- [6] Fairchild C I, Stampfer J F. Particle concentration in exhaled breath[J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1987, **48**(11): 948-949.
- [7] Lindsley W G, Pearce T A, Hudnall J B, et al. Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2012, **9**(7): 443-449.
- [8] Lee J, Yoo D, Ryu S, et al. Quantity, size distribution, and characteristics of cough-generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(4): 840-853.
- [9] Liu L, Li Y, Nielsen P V, et al. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people[J]. *Indoor Air*, 2017, **27**(2): 452-462.
- [10] Xie X J, Li Y G, Sun H Q, et al. Exhaled droplets due to talking and coughing[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2009, **6**(S6): S703-S714.
- [11] Wölfel R, Corman V M, Guggemos W, et al. Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019[J]. *Nature*, 2020, **581**(7809): 465-469.
- [12] Zou L R, Ruan F, Huang M X, et al. SARS-CoV-2 viral load in upper respiratory specimens of infected patients[J]. *The New*

- England Journal of Medicine, 2020, **382**(12): 1177-1179.
- [13] Tran K, Cimon K, Severn M, *et al.* Aerosol generating procedures and risk of transmission of acute respiratory infections to healthcare workers; a systematic review [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0035797.
- [14] 徐潜, 范钦颖, 段宁, 等. 医院 SARS 重症监护病区空气传播途径的研究 [J]. *中华医院感染学杂志*, 2005, **15**(12): 1380-1382.
- Xu Q, Fan Q Y, Duan N, *et al.* Air-borne spread pathway in intensive care unit (ICU) of specialized SARS hospital [J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2005, **15**(12): 1380-1382.
- [15] Yang S H, Lee G W M, Chen C M, *et al.* The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects [J]. *Journal of Aerosol Medicine*, 2007, **20**(4): 484-494.
- [16] Wan G H, Wu C L, Chen Y F, *et al.* Particle size concentration distribution and influences on exhaled breath particles in mechanically ventilated patients [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(1), doi: 10.1371/journal.pone.0087088.
- [17] Holmgren H, Ljungström E, Almstrand A C, *et al.* Size distribution of exhaled particles in the range from 0.01 to 2.0 μm [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, **41**(5): 439-446.
- [18] Holmgren H, Bake B, Olin A C, *et al.* Relation between humidity and size of exhaled particles [J]. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 2011, **24**(5): 253-260.
- [19] Hersen G, Moularat S, Robine E, *et al.* Impact of health on particle size of exhaled respiratory aerosols: case-control study [J]. *Clean: Soil, Air, Water*, 2008, **36**(7): 572-577.
- [20] Morawska L, Johnson G R, Ristovski Z D, *et al.* Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2009, **40**(3): 256-269.
- [21] Schwarz K, Biller H, Windt H, *et al.* Characterization of exhaled particles from the healthy human lung—a systematic analysis in relation to pulmonary function variables [J]. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 2010, **23**(6): 371-379.
- [22] Redrow J, Mao S L, Celik I, *et al.* Modeling the evaporation and dispersion of airborne sputum droplets expelled from a human cough [J]. *Building and Environment*, 2011, **46**(10): 2042-2051.
- [23] Zhou L, Yao M S, Zhang X, *et al.* Detection of SARS-CoV-2 in exhaled breath from COVID-19 patients ready for hospital discharge [J]. *medRxiv*, 2020, doi: 10.1101/2020.05.31.20115196.
- [24] Ma J X, Qi X, Chen H X, *et al.* Coronavirus disease 2019 patients in earlier stages exhaled millions of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 per hour [J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2020, doi: 10.1093/cid/ciaa1283.
- [25] Lindsley W G, Blachere F M, Thewlis R E, *et al.* Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs [J]. *PLoS One*, 2010, **5**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0015100.
- [26] Rabenau H F, Cinatl J, Morgenstern B, *et al.* Stability and inactivation of SARS coronavirus [J]. *Medical Microbiology and Immunology*, 2005, **194**(1-2): 1-6.
- [27] van Doremalen N, Bushmaker T, Munster V J. Stability of Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) under different environmental conditions [J]. *European Communicable Disease Bulletin*, 2013, **18**(38), doi: 10.2807/1560-7917.ES2013.18.38.20590.
- [28] Warnes S L, Little Z R, Keevil C W. Human coronavirus 229E remains infectious on common touch surface materials [J]. *mBio*, 2015, **6**(6), doi: 10.1128/mBio.01697-15.
- [29] Weber D J, Sickbert-Bennett E E, Kanamori H, *et al.* New and emerging infectious diseases (Ebola, Middle Eastern respiratory syndrome coronavirus, carbapenem-resistant *Enterobacteriaceae*, *Candida auris*): focus on environmental survival and germicide susceptibility [J]. *American Journal of Infection Control*, 2019, **47**Suppl 1: A29-A38.
- [30] 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.
- [31] Casanova L M, Jeon S, Rutala W A, *et al.* Effects of air temperature and relative humidity on coronavirus survival on surfaces [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(9): 2712-2717.
- [32] Ijaz M K, Brunner A H, Sattar S A, *et al.* Survival characteristics of airborne human coronavirus 229E [J]. *Journal of General Virology*, 1985, **66**(12): 2743-2748.
- [33] Pyankov O V, Bodnev S A, Pyankova O G, *et al.* Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **115**: 158-163.
- [34] Jiang J K, Fu Y V, Liu L, *et al.* Transmission via aerosols: plausible differences among emerging coronaviruses [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2020, **54**(8): 865-868.
- [35] 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.
- [36] Schuit M, Ratnesar-Shumate S, Yoltz J, *et al.* Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight [J]. *The Journal of Infectious Diseases*, 2020, **222**(4): 564-571.
- [37] Tang J W, Lai F Y L, Wong F, *et al.* Incidence of common respiratory viral infections related to climate factors in hospitalized children in Hong Kong [J]. *Epidemiology & Infection*, 2010, **138**(2): 226-235.
- [38] Lin K, Fong D Y T, Zhu B L, *et al.* Environmental factors on the SARS epidemic: air temperature, passage of time and multiplicative effect of hospital infection [J]. *Epidemiology & Infection*, 2006, **134**(2): 223-230.
- [39] Gunthe S S, Swain B, Patra S S, *et al.* On the global trends and spread of the COVID-19 outbreak: preliminary assessment of the potential relation between location-specific temperature and UV index [J]. *Journal of Public Health*, 2020, doi: 10.1007/s10389-020-01279-y.
- [40] Yao Y, Pan J H, Liu Z X, *et al.* No association of COVID-19 transmission with temperature or UV radiation in Chinese cities [J]. *The European Respiratory Journal*, 2020, **55**(5), doi: 10.1183/13993003.00517-2020.
- [41] Holtmann M, Jones M, Shah A, *et al.* Low ambient temperatures are associated with more rapid spread of COVID-19 in the early phase of the endemic [J]. *Environmental Research*, 2020, **186**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109625.
- [42] Ward M, Xiao S, Zhang Z J. Humidity is a consistent climatic factor contributing to SARS-CoV-2 transmission [J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2020, doi: 10.22541/au.159415001.18173251.
- [43] Sajadi M M, Habibzadeh P, Vintzileos A, *et al.* Temperature, humidity, and latitude analysis to estimate potential spread and seasonality of coronavirus disease 2019 (COVID-19) [J]. *JAMA Network Open*, 2020, **3**(6), doi: 10.1001/jamanetworkopen.

- 2020.11834.
- [44] World Health Organization. Summary table of SARS cases by country, 1 November 2002-7 August 2003 [EB/OL]. https://www.who.int/csr/sars/country/country2003_08_15.pdf?ua=1, 2003-08-15.
- [45] Yao M S, Zhang L, Ma J X, *et al.* On airborne transmission and control of SARS-CoV-2 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139178.
- [46] 肖文珺, 王明连, 魏巍, 等. SARS 患者某定点收治医院空气样本中 SARS-CoV 及其 RNA 的检测 [J]. *中华流行病学杂志*, 2004, **25**(10): 882-885.
- Xiao W J, Wang M L, Wei W, *et al.* Detection of SARS-CoV and RNA on aerosol samples from SARS-patients admitted to hospital [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2004, **25**(10): 882-885.
- [47] 魏巍, 李劲松, 肖文珺, 等. 小汤山医院 SARS 病房内外空气中 SARS 病毒及其 RNA 的检测 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2005, **15**(6): 648-651.
- Wei W, Li J S, Xiao W J, *et al.* Detection of SARS coronavirus RNA in air samples from the sickroom and out-sickroom of Xiao Tang-Hill hospital [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2005, **15**(6): 648-651.
- [48] Booth T F, Kournikakis B, Bastien N, *et al.* Detection of airborne severe acute respiratory syndrome (SARS) coronavirus and environmental contamination in SARS outbreak units [J]. *The Journal of Infectious Diseases*, 2005, **191**(9): 1472-1477.
- [49] Azhar E I, Hashem A M, El-Kafrawy S A, *et al.* Detection of the Middle East respiratory syndrome coronavirus genome in an air sample originating from a camel barn owned by an infected patient [J]. *mBio*, 2014, **5**(4), doi: 10.1128/mBio.01450-14.
- [50] Kim S H, Chang S Y, Sung M, *et al.* Extensive viable Middle East respiratory syndrome (MERS) coronavirus contamination in air and surrounding environment in MERS isolation wards [J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2016, **63**(3): 363-369.
- [51] Liu Y, Ning Z, Chen Y, *et al.* Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals [J]. *Nature*, 2020, **582**(7813): 557-560.
- [52] Jiang Y F, Wang H F, Chen Y K, *et al.* Clinical data on hospital environmental hygiene monitoring and medical staff protection during the coronavirus disease 2019 outbreak [J]. *medRxiv*, 2020, doi: 10.1101/2020.02.25.20028043.
- [53] Setti L, Passarini F, De Gennaro G, *et al.* SARS-Cov-2 RNA found on particulate matter of Bergamo in Northern Italy: first evidence [J]. *Environmental Research*, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109754.
- [54] 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]. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, **100**: 476-482.
- [55] Lednicky J A, Shankar S N, Elbadry M A, *et al.* Collection of SARS-CoV-2 virus from the air of a clinic within a university student health care center and analyses of the viral genomic sequence [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(6): 1167-1171.
- [56] Santarpia J L, Rivera D N, Herrera V L, *et al.* Author Correction: aerosol and surface contamination of SARS-CoV-2 observed in quarantine and isolation care [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-70939-6.
- [57] Ong S W X, Tan Y K, Chia P Y, *et al.* Air, surface environmental, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient [J]. *JAMA*, 2020, **323**(16): 1610-1612.
- [58] Chia P Y, Coleman K K, Tan Y K, *et al.* Detection of air and surface contamination by SARS-CoV-2 in hospital rooms of infected patients [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-16670-2.
- [59] Tobias A, Molina T. Is temperature reducing the transmission of COVID-19? [J]. *Environmental Research*, 2020, **186**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109553.
- [60] Jiang Y, Zhao B, Li X F, *et al.* Investigating a safe ventilation rate for the prevention of indoor SARS transmission: an attempt based on a simulation approach [J]. *Building Simulation*, 2009, **2**(4): 281-289.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)