



新冠病毒环境传播与风险防范的若干重大问题

马瑾¹, 徐建¹, 赵晓丽¹, 霍守亮¹, 段小丽², 穆云松³, 王颖⁴, 魏源¹, 常江¹, 金小伟⁵, 吴丰昌^{1*}

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012;

2. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083;

3. 中国人民大学环境学院, 北京 100872;

4. 北京航空航天大学空间与环境学院, 北京 102206;

5. 中国环境监测总站, 北京 100012

* 通讯作者, E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

收稿日期: 2021-06-30; 收修改稿日期: 2022-01-11; 接受日期: 2022-03-03; 网络版发表日期: 2022-04-20

国家自然科学基金项目(批准号: 42041003、42177221)资助

摘要 新冠肺炎疫情是百年来全球发生的最严重的传染病大流行. 对全人类的健康、生命安全及社会经济发展带来严重影响. 值得注意的是, 自地球进入“人类世”以来, 人类活动成为地球系统演变的最主要驱动力. 与此同时, 全球性的重大人类传染病疫情频率不断增加, 其中70%以上为人畜共患病. 回顾人类历史上发生的若干重大疫情, 会发现存在一个共同的规律, 即生态环境变化对疫情的发生发展有着重要而深刻的影响. 因此, 生态环境对当前的新冠肺炎疫情影响及其作用机制就成为亟待回答的科学问题. 文章从生态环境角度出发, 系统梳理并提出了新冠病毒环境传播与风险防范的若干重大问题. 主要包括从宏观的时间和空间尺度看待和理解生态环境破坏及全球变化对传染病暴发的影响、人畜共患病对人类健康的威胁、病毒在环境介质中扩散、迁移和变异规律, 病毒从动物和环境介质向人传播的机理机制以及重大疫情的环境安全与次生风险防控等. 在此基础上, 对未来的重点研究方向及需要关注的问题提出了建议, 以期为全球新冠肺炎疫情防控工作提供借鉴, 提升应对重大突发公共卫生事件的能力.

关键词 新冠病毒, 环境传播, 风险防范, 人畜共患病, 生态安全

1 引言

新冠肺炎疫情是百年来全球发生的最严重的传染病大流行. 事实上, 人类社会在各个不同的发展阶段, 一直饱受传染病的困扰, 人类发展史本身就是一部人类与传染病斗争的历史. 人类历史上重大传染病的发

生发展都有其内在的规律性, 受多种因素共同影响. 回顾人类历史上发生的历次传染病大流行, 我们会发现生态环境对传染病大流行有着重要而深刻的影响 (Jones等, 2008; Waits等, 2018; 吴丰昌, 2020). 事实上, 人类的安全和健康在很大程度上依赖于繁荣兴盛、自然和谐的生态系统 (Whitmee等, 2015). 在“非典”疫情

中文引用格式: 马瑾, 徐建, 赵晓丽, 霍守亮, 段小丽, 穆云松, 王颖, 魏源, 常江, 金小伟, 吴丰昌. 2022. 新冠病毒环境传播与风险防范的若干重大问题. 中国科学: 地球科学, 52(7): 1243–1252, doi: 10.1360/SSTe-2021-0188

英文引用格式: Ma J, Xu J, Zhao X, Huo S, Duan X, Mu Y, Wang Y, Wei Y, Chang J, Jin X, Wu F. 2022. Several major issues concerning the environmental transmission and risk prevention of SARS-CoV-2. Science China Earth Sciences, 65(6): 1047–1056, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9918-9>

发生后, 有关学者就提出了要关注生态环境安全的问题(宋新伟等, 2004), 然而在人类应对传染病大流行过程中, 这一重要因素仍未引起足够的重视.

事实上, 病毒也是地球生态系统中的重要成员, 作为自然界一种特殊的生命体参与地球物质、能量和各种生态过程(Hochella等, 2019), 其产生、存活、传播、扩散、消亡等过程必然遵循地球生态系统的客观规律. 理论上, 在一个健康、平衡的自然生态系统中, 包括病毒、微生物、植物、动物以及人类在内的各种生命体都能够和平共处. 然而, 当自然生态系统遭到干扰甚至破坏时, 这种和平共处和平衡的局面也同时被打破. 生态环境风险大大增加, 进而导致人类感染传染病特别是人畜共患病的概率也大大增加. 从这个意义来讲, 研究病毒的产生、传播、扩散本身就是生态环境安全建设的应有之义(焦念志等, 2021; Wang等, 2022).

面对新冠肺炎疫情及未来可能发生的其他重大疫情, 我们需要重新审视生态环境在完善国家公共卫生应急体系中的作用, 认真思考生态环境对新冠肺炎疫情发生发展过程的影响(Priyadarsini等, 2020), 从而对新冠病毒产生、变异、环境传播等有更深入的认识, 增强风险防范的科学性和有效性. 基于人与自然一体化健康的理念, 我们以生态环境与人类传染病疫情相互作用关系为主线, 梳理了疫情发生发展过程中各个

阶段(包括病毒的产生、传播扩散、疫情处置、次生风险等)的关键节点(图1). 在此基础上, 从环境归因、环境溯源、环境传播和环境风险等方面提出了四个需要重点关注的问题, 分别在下文进行讨论.

2 需要关注的若干重大问题

2.1 生态环境破坏是否与人类传染病暴发存在关联?

最近的全球环境变化研究表明, 地球进入了一个由人类主导的地质时代, 即人类世(Anthropocene), 人类世的确立标志着人类和地球的关系发生根本改变, 人类活动成为全球变化唯一的最主要驱动力(Lewis和Maslin, 2015). 人类活动排放了包括二氧化碳在内的大量温室气体, 导致全球变暖. 联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出(IPCC, 2013), 自1850年以来全球地表平均温度增加了0.76℃, 预计到21世纪末, 全球增温幅度将高达1.1~6.4℃. 人类活动还对地球生态系统的结构和功能产生严重影响(Liski等, 2003), 引发了气候异常、生物多样性减少、生态系统功能退化、物种灭绝等当今世界面临的重大生态环境危机(Butchart等, 2010). 全球气候变化改变了病毒自然宿主或中间宿主栖息地的格局和范围, 促进了新发传染病的传播, 对人类健康构成严重威胁, 包括

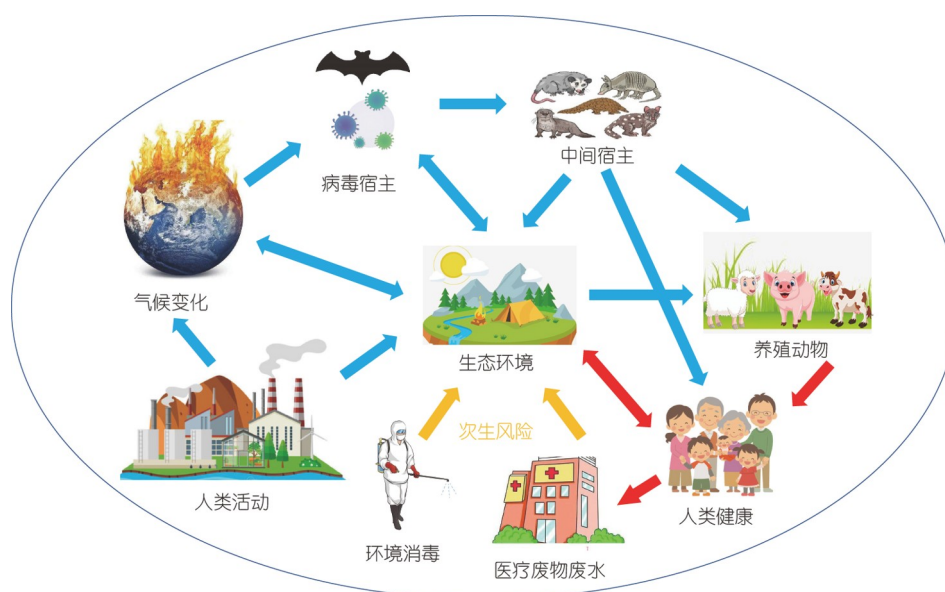


图1 人类传染病疫情发生过程概念图

全球性重大疫情等(McMichael等, 2006; Jones等, 2008).

人类传染病病原体主要来源于自然. 随着人类活动对自然生态系统的影响不断加剧, 如生态退化、环境污染、气候变化等, 病毒等微生物在生态环境变化胁迫下, 会突破种间屏障, 寻找新的宿主动物和/或媒介生物, 发生变异进而出现新病原体的概率大大增加, 为人类传染病疫情暴发埋下伏笔. 回顾人类历史上发生的历次严重疫情, 会发现一个共同的规律, 即与生态环境破坏存在某种必然联系(Waits等, 2018; Priyadarsini等, 2020).

当前, 人类新发传染病的数量呈快速增长趋势, 且多为自然疫源性疾病, 这其中新出现/新发现的病毒不容忽视. 当前, 每年有3种及以上的能够影响人类健康的新病毒种被发现(Woolhouse等, 2012). 新发传染病已经成为全球经济和公共卫生的重大负担, 新发传染病事件随着时间推移显著增加, 且以人畜共患病为主, 其中大部分(71.8%)源自野生动物, 而新发传染病的起源与生态环境因素显著相关(Jones等, 2008).

生态环境对新发传染病发生发展的影响是一个复杂的过程, 特别是在疫情发展的不同阶段, 生态环境发挥的作用也不尽相同(吴丰昌, 2020). 从宏观尺度上来看, 人类活动对全球气候变化和生态系统的结构与功能产生重要影响, 而这些因素又直接或间接地对传染病的发生、传播和变化产生影响(Shakil等, 2020; 王颖等, 2020). 早在2005年, 世界卫生组织(WHO)就将流感、疟疾、登革热等9种传染病列为公共卫生领域的气候敏感性疾病, 并提出了集脆弱性评价、早期预警与检测、控制响应和流行后评估为一体的气候敏感性疾病早期预警系统框架(WHO, 2005). Liu等(2020)研究发现, 2017~2018年冬季, 北半球中纬度人口密集地区的流感大规模暴发与前期秋季快速的天气变化存在密切关系. 吴晓旭等(2013)研究认为, 气候条件限制了传染病的地理和季节性分布, 而环境和气象因子则可能影响了疾病暴发的时间和强度. 事实上, 气候和气象因素对新冠病毒的传播也有一定的影响(Baker等, 2020), 在新冠病毒爆发初期, 由于绝大部分人群普遍易感, 气候、气象和生态环境因素对新冠病毒传播的影响有限, 要有效阻止新冠病毒传播, 需要强有力的人为干预. 随着疫情发展, 在群体免疫水平不断提高的情况下, 新冠病毒传播的季节性特征逐步显现(Carl-

son等, 2020). Huang等(2020)和Liu等(2021)研究发现, 60%的新冠肺炎患者处在温度介于5~15℃的地区, 新冠病毒的传染性和致死率在寒冷的季节均更高, 特别是在高纬度地区, 新冠肺炎的季节性更加明显, 进一步说明了温度对于新冠肺炎疫情影响. 上述研究成果对世界各国乃至全球制定更加科学、合理且有针对性的疫情防控策略具有重要参考价值.

另外, 由于人类活动造成的全球变化和土地利用变化等, 导致病原微生物及其宿主动物栖息地的碎片化, 迫使病毒宿主栖息地迁移, 导致其群落结构发生改变. 原本具有自然疾病控制作用的生物学和生态学屏障消失, 在局部形成“共进化效应”, 加速病原微生物多样性增加, 进而增加传染病跨物种传播的概率(Zohdy等, 2019). Gislason(2015)的研究发现, 人类侵占蝙蝠和其他野生动物的森林栖息地是造成埃博拉病毒传播的重要因素. Jones等(2008)研究了由野生动物病原体导致新发传染病的全球相对风险空间分布特征; 其中, 中国部分地区的相对风险较高, 需要引起注意. 此外, 一些疾病的暴发具有明显的时间和空间分布特征. 例如, 中国历史疫灾除了长期上升趋势和短周期锯齿状波动外, 还存在季节差异. 一年之中, 疫灾主要流行于相对温暖多雨的夏、秋季节. 近2200年来, 中国累积的疫灾年数呈现出从东南到西北逐步减少的空间格局, 这与中国自然地理地带的空间格局高度一致(龚胜生等, 2020).

由此可见, 生态环境对于新发传染病有着重要影响, 然而传染病发生与生态环境变化的相互作用机制仍不明晰. 要有效降低新发传染病特别是人畜共患病的风险, 首先应该从生态环境着手思考问题. “上医治未病”, 从生态环境角度出发, 研究包括病毒在内的病原体进化、传播、扩散规律及其关键影响因素, 有助于提早预判潜在新发传染病的发生发展及其时空规律, 做到早预警、早预防, 构建防范人类重大疫情的生态屏障和第一道防火墙, 从而极大降低疫情对人类社会造成的冲击和影响.

2.2 如何有效防范人畜共患病对人类健康的威胁?

如上所述, 地球进入人类世, 人类活动对地球生态系统产生重要影响. 由于全球变化和地球生态系统结构与功能的改变, 野生动物的栖息地环境遭到严重破坏, 人类与野生动物接触的机会大大增加, 进而导致

人畜共患病的概率也大大增加,即“人畜共疫外溢”,我们也同时进入了一个泛流行病人类世(Lucey等, 2017)。

Allen等(2017)研究表明,大部分新发和再发的传染病是人畜共患病,包括非典型肺炎、禽流感、狂犬病等。2003年引发“非典”疫情的SARS病毒,其自然宿主和中间宿主有大概率是蝙蝠、猴、果子狸等野生动物,通过人类捕捉、运输、售卖和食用动物导致传染到人类(Wang等, 2006)。2012年沙特阿拉伯王国暴发了中东呼吸综合征,病原体为中东呼吸综合征冠状病毒(MERS)。2014年在中国广东清远,一种猪急性腹泻综合征冠状病毒(SADS)通过引起猪的致命性疾病严重破坏家畜生产(丁翠玲等, 2020)。需要注意的是, SARS、MERS以及SADS病毒都属于冠状病毒,造成此次新冠肺炎疫情的则是另外一种新型冠状病毒(SARS-CoV-2)。冠状病毒在自然界中广泛存在,可感染各种家畜、鸟类、野生动物及人类,可以引起呼吸道、胃肠道、肝脏、泌尿生殖道、神经系统等的疾病(Chafekar和Fielding, 2018)。特别是蝙蝠,被认为是冠状病毒的重要宿主,基因组测序研究表明,蝙蝠体内至少有30种冠状病毒,而未经测序的蝙蝠中可能携带的冠状病毒种类更多(Wong等, 2019)。

由于人类活动导致的生态环境破坏,导致野生动物活动范围与行为的改变,更容易将病原微生物传播给家畜甚至人类,增加传染疾病的暴发性的风险(Karsh等, 2012)。Osterholm(2005)研究认为,1968~2005年间,中国人口数量增长近2倍(从7.9亿~13亿),而在此期间猪的饲养量则增长近100倍(从520万到5.08亿头)。随着人类生产生活方式的改变,驯化、饲养和利用动物的数量、种类和规模大幅增加,这也大大增加了人类接触宿主动物的机会,从而增加了暴发流行病的可能性(Daszak等, 2000)。新冠肺炎疫情期间,丹麦由于养殖的水貂传染变异新冠病毒,进而导致养殖场工人被感染,就是典型的案例。事实上,病毒通过野生动物和养殖动物感染人类的例子不胜枚举。

此外,需要注意的是,快速的城市化对全球的健康问题产生了深远影响,我们需要认真审视流行病与城市化之间的关系(Tian等, 2018; Gu, 2019)。频频爆发的全球性传染病表明,城市已成为流行病的传播中心。尤为重要的是,多数发展中国家还未完成城市化的健康转型,传染病依然是发展中国家死亡率和发病率的首要原因(Alirrol等, 2011)。

全球快速的城市化进程客观上也为“人畜共疫外溢”创造了便利条件。城市人口空间紧邻性、居民健康的异质性、频繁的相互接触以及高度人口流动性等,导致大城市疾病传播的高风险,城市成为传染病的孵化器(Qin等, 2021)。另外,与自然生态系统相比,在高度人工化的城市生态系统中,动物、植物以及微生物的种群、结构和功能等特征发生了剧烈变化,无形中也增加了城市传染病发生与传播的风险。例如,拉美城市越来越严重的人畜共患病——利什曼病问题就与城市化密切相关,在城市中养殖的鸡、猪、狗等动物,成为利什曼原虫繁殖的温床,不良的卫生状况和病媒生态系统的变化,造成利什曼原虫大量繁殖,进而通过各种接触途径感染人类,导致利什曼病的传播(Marcondes和Day, 2019)。

过去,人类试图通过以单一宿主和单一寄生虫之间相互作用的方式来理解感染性疾病的发生。然而,越来越多的情况表明,新发感染性疾病往往会嵌入多个宿主及多个载体相互作用的复杂网络中,这就意味着传统的一对一的生物学方法或许并不能有效解决新发疾病的发生(Johnson等, 2015)。需要注意的是,人类对病毒等微生物的认知仍然非常有限,Anthony等(2013)研究认为,在自然界中存在超过32万种能够导致哺乳动物感染的病毒,其中约有超过200种病毒能够感染人类(Woolhouse等, 2012)。然而,由于缺乏快速、准确、可靠的检测和诊断技术,目前只能对有限的已知病原体进行检测和诊断,这部分仅占整个病毒实体的0.07%(Kiselev等, 2020)。

在自然界究竟存在多少种病毒,以何种方式存在,通过何种途径传播,是否会对人类健康构成威胁,这些科学问题都亟待解决。因此,需要对环境中包括病毒在内的病原微生物开展系统的调查研究,包括其种类、宿主、基因组、谱系、变异规律、分布特征等,不断建立完善病毒资源数据库、自然疫源性病毒综合应用数据库、人畜共患病毒数据库等数据库资源。在此基础上,未来或许可以采用包括机器学习在内的高效的数学算法,将一种未知病毒的基因组与所有可用的病毒基因组进行比较,并预测其所有可能的特征,包括其致病潜力(Kiselev等, 2020),为应对未知的人类重大传染病疫情提供科技支撑。

另外,鸟类及其他长距离迁徙动物对病毒的传播也不容忽视。例如,研究发现(Altizer等, 2013),携带禽

流感病毒的鸟类可能通过迁徙行为导致病毒的长距离传播, 甚至洲际传播. 除此之外, 流域性的动物迁徙可能导致的病毒传播也值得关注. 这也为研究新冠病毒的环境传播途径提供了新的思路, 同时也为全球新冠肺炎疫情防控敲响了警钟.

人类需要用更加包容和宏观的视角看待人类健康与疾病发生. 人类的健康与地球生态系统和动物的健康密切相关, 人类不能够也不可能独立于地球生态系统之外独善其身, 需要基于一体化健康的理念, 采用协作的、多部门、跨学科的方法, 从地方、区域、国家和全球多个层面重新评估人和动物和生态环境的关系. 通过减少人类活动干扰保护野生动物多样性, 也有助于降低未来人畜共患病出现的可能性, 从而实现保护人类的健康和福祉(Jones等, 2008).

2.3 环境介质能否成为病毒传播的媒介?

如前所述, 病毒作为一种特殊的纳米颗粒或物质参与环境生物地球化学循环和各种生态过程. 在病毒的各种传播和迁移途径中, 环境介质(水、气、土、物体等)扮演了重要的角色, 环境多介质中病毒转移与相互影响的机理机制研究已成为环境科学研究领域的前沿和热点(Bofill-Mas和Girones, 2003; 吴丰昌, 2020; Yao等, 2020; Yeo等, 2020). 近期多项研究证实: 新冠病毒能够通过多种环境介质进行传播. 例如, 气溶胶传播、飞沫传播和接触传播已被证实是新冠病毒的传播途径. Ma等(2021)收集了新冠肺炎患者的呼出气冷凝液, 利用RT-PCR发现早期新冠患者通过呼吸排放大量新冠病毒, 每小时排放高达几百万个. 除通过气溶胶传播途径外, 包括新冠病毒在内的多种病毒能够在环境水体(王珺瑜等, 2020)、污水(Wigginton等, 2015)、地下水(李瑞等, 2020)、新冠肺炎患者病房的地板(Ong等, 2020)环境介质中存活, 进而可能会造成人类感染, 需要引起高度重视.

目前, 多国研究人员在污水处理厂的污水中检测到新冠病毒, 这一发现为监测新冠肺炎疫情提供了一种全新的思路(Michael-Kordatou等, 2020). 作为一种传染性病毒, 人类从感染新冠病毒到出现症状需要一定的时间周期, 甚至还存在无症状感染者, 给疫情防控带来了很大的挑战. 为了监测新冠肺炎流行情况, 国内外开展了多种形式的监测, 包括临床监测、重点人群筛查、症状监测、血清抗体监测以及分子流行病

学监测等, 以废水监测为代表的水环境监测可以作为新冠肺炎监测的重要补充. 通过污水流行病学监测可以快速检测发现新冠病毒, 其预警时间比发现感染者早3~7天, 可以为疫情防控赢得宝贵的时间.

荷兰早在2020年2月初就开始监测废水处理厂污水样本中的新冠病毒核酸. 随着病例的出现, 污水样本中病毒核酸检出从无到有, 最近一次检出早于当地病例出现前3日. 目前已有超过300座废水处理厂将日常污水监测纳入国家新冠肺炎疫情监测. 澳大利亚等国也在积极开展污水流行病学监测, 为疫情防控提供支撑. 当前, 中国疫情防控进入常态化阶段, 污水流行病学监测有助于及时、快速、准确地发现疫情苗头, 特别是在医院、隔离区等重点场所. 因此, 建议中国将污水流行病学监测纳入常态化防控措施.

与其他环境介质相比, 土壤也是一个病毒贮存库, 在病毒传播过程中的作用不可忽视(Yoshimoto等, 2012; 王光华, 2017). 土壤中包括病毒在内的各种病原体也有可能造成动物甚至人类感染, 导致严重的传染病疫情(吴颐杭等, 2020). 土壤环境中休眠着大量未知的致病细菌和病毒, 全球气候变暖可能促进上述微生物的活化和释放, 其中部分更可直接感染人畜, 具备引发疾病大流行的潜力. 例如, 炭疽杆菌以内生孢子的形式隐藏于土壤中, 在极端天气条件下可被人类或动物吸入, 导致其感染炭疽(Qian等, 2021). 一项关于MERS病毒的研究表明, 人类可能通过接触被蝙蝠粪便污染的土壤而感染MERS病毒(Kupferschmidt, 2013). 甲型肝炎在土壤中能够存活较长时间, 研究发现(Parashar等, 2011), 在37℃条件下, 甲型肝炎病毒可在土壤中存活13周, 在印度萨姆河附近采集的403个土壤样品中, 19.1%的土壤样品中检出甲型肝炎病毒, 人类有可能通过接触这些被病毒污染的土壤而感染.

目前, 有关新冠病毒的溯源及传播的研究仍在继续, 不排除动物或人类通过接触被新冠病毒污染的土壤而导致感染的可能性(Steffan等, 2020). 此外, 除了直接暴露于被病毒污染的土壤之外, 土壤中存储的病毒还可能通过地表径流或渗透污染地下水造成更广泛的传播. 土壤中的病毒、病原体及微生物对于生态系统健康、人类健康甚至星球健康都有着至关重要的作用, 需要引起重视并予以更多的关注(Zhu等, 2019).

除了上述环境介质外, 研究人员还在多种物体表面检测到新冠病毒, 并对其存活时间和影响因素进行

了分析。Doremalen等(2020)研究发现, 在温度21~23℃、相对湿度为65%的条件下, 新冠病毒在气溶胶中仅能存活3h, 而在低温(21~23℃)、低湿(40%)条件下, 新冠病毒在铜、纸板、不锈钢和塑料表面分别存活8、24、48和72h。近一段时间以来, 中国多地在多种进口冷链食品外包装检测到新冠病毒, 引起国家高度重视。事实上, 除新冠病毒之外的其他多种病毒均能够在物体表面存活一定时间, 需要在制定防控措施中加以考虑(杨书慧等, 2020)。

2020年11月8日, 国务院联防联控机制综合组印发《进口冷链食品预防性全面消毒工作方案》, 该方案适用于进口冷链食品的装载运输工具、产品内外包装的消毒。要求在做好进口冷链食品新冠病毒检测工作的基础上, 充分发挥消毒对新冠病毒的杀灭作用, 有效防范新冠肺炎疫情通过进口冷链食品输入风险。另外, 还出现过由于接触被新冠病毒污染的集装箱而导致人体感染的事件。随着疫情形势的发展, 人们对新冠病毒的传播方式和规律有了更深入的认识, 中国的防控策略也从“防人”转变为“人、物同防”。随着研究的不断深入, 未来中国以及世界各国的防控策略也会进一步完善。

2.4 如何有效化解疫情产生的次生环境风险?

如前所述, 病毒与环境介质之间存在复杂交互作用关系, 环境介质既是病毒传播的重要载体, 又是疫情防控产生次生环境风险和生态损伤的主要受体。建立疫情防控和次生环境风险协同控制体系, 对于实现重大公共卫生事件中疫情防控和环境安全保障, 健全国家公共卫生应急管理体系、提升国家应对重大公共卫生事件能力等, 具有重要的现实和长远意义(吴丰昌, 2020)。

(1) 医疗废物可能会导致病毒二次传播风险。疫情期间的医疗废物处置不当也有可能带来潜在的次生风险, 为应对新冠肺炎疫情, 2020年1月21日生态环境部发布《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗废物环境管理工作的通知》, 随后又发布《新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗废物应急处置管理与技术指南(试行)》, 指导各地安全、规范地处理医疗废物。为了有效阻击新冠肺炎通过医疗垃圾收集、转运阶段的风险, 避免由新冠肺炎疫情引起的次生灾害以及医疗垃圾造成的二次污染, 保证医疗废物全部规范收集并集

中统一处理, 地方各级生态环境部门分别出台医疗废物相关管理方案, 有效阻断了新冠病毒经医疗废物传播的途径。然而目前仍存在一些亟待解决的问题, 如次生风险的途径与评估方法研究不足、医疗废物收集设施缺乏环境生物安全控制标准、基层人员对医疗废物管理知识的认知不足、医疗废物应急管理体系不完善等(罗兰等, 2020)。

(2) 大量消毒剂进入生态环境会产生严重的次生风险。新冠肺炎疫情期间, 由于居民存在过度消毒需求(李晓宁等, 2020), 各种消毒剂被大量使用, 消毒剂进入土壤、水体等环境介质中必然会对生态环境系统造成潜在的影响(朱红霞等, 2020)。为科学指导公众正确使用消毒剂, 充分发挥消毒剂在新冠肺炎疫情防控中的有效作用, 2020年2月18日, 国家卫生健康委印发了《消毒剂使用指南》, 明确提出“不宜对室外环境开展大规模的消毒”。然而, 依然有大量消毒剂进入环境介质。以水环境为例, 疫情期间, 次氯酸钠等含氯消毒剂在全国范围内大量使用甚至过量使用, 余氯必然会进入环境水体, 进而生成多种具有毒性(神经毒性、细胞毒性、基因毒性等)的副产物, 造成长期潜在的次生风险。另外, 余氯还会导致具有硝化作用的微生物的缺失, 影响自然水体氮循环过程, 降低水体自净能力, 对水生环境和水生生物造成危害(楚文海等, 2020; 张瑜等, 2020)。

2020年1月31日, 生态环境部出台了《应对新型冠状病毒感染肺炎疫情应急监测方案》, 要求“疫情防控期间, 在饮用水水源地常规监测的基础上, 增加余氯和生物毒性等疫情防控特征指标的监测, 发现异常情况要及时采取措施, 保障人民群众饮水安全”。目前, 已有学者对疫情防控期间污水处理厂强化消毒下的水环境次生风险开展了实证研究, 建议对重点疫区水环境和污水处理厂接纳水体中的微生物和消毒副产物开展监测评估, 防止水生态损伤。

目前, 对于疫情防治过程中和事件后的次生风险研究仍非常有限, 特别是对土壤等环境介质中消毒副产物的种类、浓度、迁移转化、生态毒性等研究鲜见报道。对于次生风险的其影响程度、范围、作用机制等目前还缺乏深入系统的研究。亟需开展抗疫化学品在污水处理、空气净化、垃圾无害化、环境消毒等条件下毒害副产物的阻控机制与最佳使用方法研究, 做到病毒安全灭活和次生环境风险阻断的协同调控, 为

制定有效、经济、安全的防控对策提供科学依据。

3 建议

当前,新冠肺炎疫情仍在全球蔓延,对经济社会发展和人类健康造成巨大影响。面对疫情,我们要坚持科学防治,精准施策;面对自然,要保持敬畏之心,寻求人类与自然的和谐共处。要解决当前和未来人类可能面临的疫情危机,除了开展疫苗和药物研发外,也迫切需要从地球系统科学和环境与健康一体防控的维度和尺度去寻找科学、有效、可持续的解决方案(吴丰昌, 2020)。

(1) 开展多学科交叉的联合攻关研究。通过多学科交叉,充分考虑气候、地理、地质、生态、环境等自然因素及社会经济等多要素的高度融通,在研究过程中充分发挥环境学、生态学、生物学、化学、植物学、动物学等各学科优势,对现象、机理、过程进行一体化深入研究,解决全球气候变化背景下自然生态系统演变对新冠病毒及相关病毒产生及变异的影响机制等关键科学问题,服务于国家乃至全球的新冠肺炎疫情防控。这其中,特别是要充分发挥地球科学和环境科学的重要作用,从地球系统的形成与演化视角出发,运用地球科学与环境科学的方法论,有助于及时发现并预警可能出现的病毒及其导致的疫情,从而改变人类应对和处置突发公共卫生事件的方式,由“被动应对”转向“主动防御”,筑起应对重大突发公共卫生事件的第一道防火墙。

(2) 深入开展环境介质中的病毒识别与传播规律研究。为有效应对新冠病毒的环境传播,需要深入开展气、水、土、垃圾等多种环境介质中新冠病毒的快速、精准检测方法研究,研发新冠病毒存活能力定量识别技术。探明新冠病毒通过单一介质、跨介质和多介质传播通道、活性变化和交互作用机理,明确环境温度、湿度、介质物化与生物性质等关键因素对新冠病毒存活能力与传播通量的影响机理。

(3) 逐步建立健全针对人类重大疫情的环境应急响应管理机制。重大疫情下的环境应急管理是现代环境治理体系的关键环节,要抓紧补齐这块短板。将重大疫情的环境应急管理纳入相关的法律法规体系,为环境应急管理提供法理依据。进一步强化与卫生部门的联动机制,围绕公共卫生事件中的环境应急管理,

加强环境应急基础能力建设,提升环境应急队伍的能力水平,将生物性指标监测纳入环境日常及应急监测范畴,开发相关的仪器设备,充分发挥环境监测在公共卫生应急事件应对与监控预警中的作用。

(4) 开展重大疫情的生态环境次生风险综合评估及其防控策略研究。深入开展重大疫情下药品和化学品导致环境次生风险和生态损伤的过程机制研究,探明典型药品、化学品及其次生产物在不同环境介质中的浓度水平及迁移转化规律,提出重大疫情中抗疫药品及化学品使用的优化剂量及调控方法。针对新冠肺炎疫情及未来可能发生的重大疫情,亟需构建涵盖病毒/抗疫化学品、多介质/多途径传播、环境污染和生态损伤等要素的多尺度系统风险评估方法,开发重大疫情的环境次生风险累积、暴发和阻控的预测模型,构建基于大数据、人工智能等技术的重大疫情环境安全保障与次生风险调控策略,服务于国家疫情防控工作。

(5) 发挥环境科学综合优势,完善建设国家公共卫生应急体系。在我国突发公共卫生事件应急处置体系中应考虑生态环境这一重要因素,并进行全过程(事前、事中和事后)管理。事前要加强生态环境保护,加强生物性污染的常规调查,开发环境介质中病毒与病原体的监测技术方法和设备,完善早期预警系统;事中要加强病毒存活与传播行为研究,防范次生环境风险,评估环境中病毒对人体健康的风险;事后要预防疫情再次暴发,完善突发公共卫生事件应急体系,实现可持续发展。环境科学研究在公共卫生事件应对与监控预警中应发挥更大的作用。

参考文献

- 楚文海, 沈杰, 栾鑫淼, 肖融, 徐祖信. 2020. 疫情防控期间污水处理厂强化消毒下的水环境次生风险实证研究. 给水排水, 46: 1-5
- 丁翠玲, 赵平, 戚中田. 2020. 蝙蝠相关的冠状病毒. 第二军医大学学报, 41: 935-940
- 龚胜生, 谢海超, 陈发虎. 2020. 2200年来我国瘟疫灾害的时空变化及其与生存环境的关系. 中国科学: 地球科学, 50: 719-722
- 焦念志, 张锐, 陈宜瑜. 2021. 病毒防疫的生态屏障. 中国科学: 地球科学, 51: 167-170
- 李瑞, 徐从超, 姜玉, 郝艳, 杨予宁, 李鸣晓, 姜永海, 许秋瑾, 席北斗. 2020. 病毒对地下水的入侵风险与防控对策浅析. 环境科学研究, 33: 1604-1610

- 李晓宁, 周金华, 傅雪松, 李美霞, 刘杰, 伍浩颖, 何荣, 钟贤武, 贺征, 刘远. 2020. 新型冠状病毒肺炎疫情期间居民过度消毒需求及影响因素分析. *中国公共卫生*, 36: 1534–1537
- 罗兰, 张俊丰, 王红梅, 李宇婷. 2020. 我国新冠肺炎疫情期间医疗废物收集管理现状分析及对策研究. *环境科学研究*, 33: 1691–1697
- 宋新伟, 路桃妮, 王晓飞. 2004. “非典”对环境安全提出挑战. *中国环境管理丛书*, 2: 14–15
- 王光华. 2017. 掀开土壤生物“暗物质”: 土壤病毒的神秘面纱. *中国科学院院刊*, 32: 35–44
- 王珺瑜, 赵晓丽, 梁为纲, 牛琳, 汪霞, 王晓蕾. 2020. 环境因素对病毒在水体中生存与传播的影响. *环境科学研究*, 33: 1596–1603
- 王颖, 梁丁元, 李垚, 张浩文, 范文宏, 吴丰昌. 2020. 历史传染病疫情的环境与气候特征初探及对新冠肺炎疫情的思考. *环境科学研究*, 33: 1555–1561
- 吴丰昌. 2020. 新冠肺炎疫情与生态环境研究专刊序言. *环境科学研究*, 3: I–IV
- 吴晓旭, 田怀玉, 周森, 陈丽凡, 徐冰. 2013. 全球变化对人类传染病发生与传播的影响. *中国科学: 地球科学*, 43: 1743–1759
- 吴颐杭, 刘奇缘, 杨书慧, 马瑾. 2020. 病毒在土壤中的存活时间与传播能力及其影响因素. *环境科学研究*, 33: 1611–1617
- 杨书慧, 吴颐杭, 屈雅静, 刘奇缘, 伍海闻, 龚逸伟, 马瑾. 2020. 病毒在无生命物体表面存活时间及其影响因素分析. *环境科学研究*, 33: 1618–1623
- 张瑜, 丁婷婷, 肖欣欣, 张亚辉, 何连生. 2020. 我国淡水环境中卤乙酸类消毒副产物的预测无效应浓度研究. *环境科学研究*, 33: 1624–1631
- 朱红霞, 薛荔栋, 刘进斌, 陈烨, 金小伟, 袁懋. 2020. 含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状. *环境科学研究*, 33: 1649–1648
- Alirol E, Getaz L, Stoll B, Chappuis F, Loutan L. 2011. Urbanisation and infectious diseases in a globalised world. *Lancet Infect Dis*, 11: 131–141
- Allen T, Murray K A, Zambrana-Torrel C, Morse S S, Rondinini C, Di Marco M, Breit N, Olival K J, Daszak P. 2017. Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases. *Nat Commun*, 8: 1124
- Altizer S, Ostfeld R S, Johnson P T J, Kutz S, Harvell C D. 2013. Climate change and infectious diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341: 514–519
- Anthony S J, Epstein J H, Murray K A, Navarrete-Macias I, Zambrana-Torrel C M, Solovoyov A, Ojeda-Flores R, Arrigo N C, Islam A, Ali Khan S, Hosseini P, Bogich T L, Olival K J, Sanchez-Leon M D, Karesh W B, Goldstein T, Luby S P, Morse S S, Mazet J A K, Daszak P, Lipkin W I. 2013. A strategy to estimate unknown viral diversity in mammals. *mBio*, 4: e00598–13
- Baker R E, Yang W, Vecchi G A, Metcalf C J E, Grenfell B T. 2020. Susceptible supply limits the role of climate in the early SARS-CoV-2 pandemic. *Science*, 369: 315–319
- Bofill-Mas S, Girones R. 2003. Role of the environment in the transmission of JC virus. *J Neurovirol*, 9: 54–58
- Butchart S H M, Walpole M, Collen B, van Strien A, Scharlemann J P W, Almond R E A, Baillie J E M, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter K E, Carr G M, Chanson J, Chenery A M, Csirke J, Davidson N C, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway J N, Genovesi P, Gregory R D, Hockings M, Kapos V, Lamarque J F, Leverington F, Loh J, McGeoch M A, McRae L, Minasyan A, Hernández Morcillo M, Oldfield T E E, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer J R, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart S N, Symes A, Tierney M, Tyrrell T D, Vié J C, Watson R. 2010. Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328: 1164–1168
- Carlson C J, Gomez A C R, Bansal S, Ryan S J. 2020. Misconceptions about weather and seasonality must not misguide COVID-19 response. *Nat Commun*, 11: 4312
- Chafekar A, Fielding B C. 2018. MERS-CoV: Understanding the latest human coronavirus threat. *Viruses*, 10: 93
- Daszak P, Cunningham A A, Hyatt A D. 2000. Emerging infectious diseases of wildlife—Threats to biodiversity and human health. *Science*, 287: 443–449
- Doremalen N, Bushmaker T, Morris D H, Holbrook M G, Gamble A, Williamson B N, Tamin A, Harcourt J L, Thornburg N J, Gerber S I, Lloyd-Smith J O, Wit E, Munster V J. 2020. Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1. *N Engl J Med*, 382: 1546–1567
- Gislason M K. 2015. Climate change, health and infectious disease. *Virulence*, 6: 535–538
- Gu C. 2019. Urbanization: Processes and driving forces. *Sci China Earth Sci*, 62: 1351–1360
- Hochella Jr M F, Mogk D W, Ranville J, Allen I C, Luther G W, Marr L C, McGrail B P, Murayama M, Qafoku N P, Rosso K M, Sahai N, Schroeder P A, Vikesland P, Westerhoff P, Yang Y. 2019. Natural, incidental, and engineered nanomaterials and their impacts on the Earth system. *Science*, 363: 1414–1425
- Huang Z, Huang J, Gu Q, Du P, Liang H, Dong Q. 2020. Optimal temperature zone for the dispersal of COVID-19. *Sci Total Environ*, 736: 139487
- IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. In: Church J, Clark P, Cazenave A, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK/New York, NY, USA: Cambridge University Press. 95–123
- Johnson P T J, de Roode J C, Fenton A. 2015. Why infectious disease research needs community ecology. *Science*, 349: 1259504
- Jones K E, Patel N G, Levy M A, Storeygard A, Balk D, Gittleman J L,

- Daszak P. 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451: 990–993
- Karesh W B, Dobson A, Lloyd-Smith J O, Lubroth J, Dixon M A, Bennett M, Aldrich S, Harrington T, Formenty P, Loh E H, Machalaba C C, Thomas M J, Heymann D L. 2012. Ecology of zoonoses: Natural and unnatural histories. *Lancet*, 380: 1936–1945
- Kiselev D, Matsvay A, Abramov I, Dedkov V, Shipulin G, Khafizov K. 2020. Current trends in diagnostics of viral infections of unknown etiology. *Viruses*, 12: 211
- Kupferschmidt K. 2013. Emerging infectious diseases link to MERS virus underscores bats' puzzling threat. *Science*, 341: 948–949
- Priyadarsini S L, Suresh M, Huisinsh D. 2020. What can we learn from previous pandemics to reduce the frequency of emerging infectious diseases like COVID-19? *Glob Transs*, 2: 202–220
- Lewis S L, Maslin M A. 2015. Defining the anthropocene. *Nature*, 519: 171–180
- Liski J, Nissinen A, Erhard M, Taskinen O. 2003. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Glob Change Biol*, 9: 575–584
- Liu Q, Tan Z M, Sun J, Hou Y, Fu C, Wu Z. 2020. Changing rapid weather variability increases influenza epidemic risk in a warming climate. *Environ Res Lett*, 15: 044004
- Liu X, Huang J, Li C, Zhao Y, Wang D, Huang Z, Yang K. 2021. The role of seasonality in the spread of COVID-19 pandemic. *Environ Res*, 195: 110874
- Lucey D R, Sholts S, Donaldson H, White J, Mitchell S R. 2017. One health education for future physicians in the pan-epidemic “Age of Humans”. *Int J Infect Dis*, 64: 1–3
- Ma J, Qi X, Chen H, Li X, Zhang Z, Wang H, Sun L, Zhang L, Guo J, Morawska L, Grinshpun S A, Biswas P, Flagan R C, Yao M. 2021. Coronavirus disease 2019 patients in earlier stages exhaled millions of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 per hour. *Clin Infect Dis*, 72: e652–e654
- Marcondes M, Day M J. 2019. Current status and management of canine leishmaniasis in Latin America. *Res Vet Sci*, 123: 261–272
- McMichael A J, Woodruff R E, Hales S. 2006. Climate change and human health: Present and future risks. *Lancet*, 367: 859–869
- Michael-Kordatou I, Karaolia P, Fatta-Kassinos D. 2020. Sewage analysis as a tool for the COVID-19 pandemic response and management: The urgent need for optimised protocols for SARS-CoV-2 detection and quantification. *J Environ Chem Eng*, 8: 104306
- Ong S W X, Tan Y K, Chia P Y, Lee T H, Ng O T, Wong M S Y, Marimuthu K. 2020. Air, surface environment al, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient. *JAMA*, 323: 1610–1612
- Osterholm M T. 2005. Preparing for the next pandemic. *N Engl J Med*, 352: 1839–1842
- Parashar D, Khalkar P, Arankalle V A. 2011. Survival of hepatitis A and E viruses in soil samples. *Clin Microbiol Infect*, 17: E1–E4
- Qian H, Zhang Q, Lu T, Peijnenburg W J G M, Penuelas J, Zhu Y G. 2021. Lessons learned from COVID-19 on potentially pathogenic soil microorganisms. *Soil Ecol Lett*, 3: 1–5
- Qin T, Ruan X, Duan Z, Cao J, Liang J, Yang J, Jiang Y, Shi M, Xu J. 2021. Wildlife-borne microorganisms and strategies to prevent and control emerging infectious diseases. *J Biosaf Biosecu*, 3: 67–71
- Shakil M H, Munim Z H, Tasnia M, Sarowar S. 2020. COVID-19 and the environment: A critical review and research agenda. *Sci Total Environ*, 745: 141022
- Steffan J J, Derby J A, Brevik E C. 2020. Soil pathogens that may potentially cause pandemics, including severe acute respiratory syndrome (SARS) coronaviruses. *Curr Opin Environ Sci Health*, 17: 35–40
- Tian H, Hu S, Cazelles B, Chowell G, Gao L, Laine M, Li Y, Yang H, Li Y, Yang Q, Tong X, Huang R, Bjornstad O N, Xiao H, Stenseth N C. 2018. Urbanization prolongs hantavirus epidemics in cities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 4707–4712
- Waits A, Emelyanova A, Oksanen A, Abass K, Rautio A. 2018. Human infectious diseases and the changing climate in the Arctic. *Environ Int*, 121: 703–713
- Wang L F, Shi Z, Zhang S, Field H, Daszak P, Eaton B T. 2006. Review of bats and SARS. *Emerg Infect Dis*, 12: 1834–1840
- Wang X, Wu F, Zhao X, Zhang X, Wang J, Niu L, Liang W, Leung K M Y, Giesy J P. 2022. Enlightenment from the COVID-19 pandemic: The roles of environmental factors in future public health emergency response. *Engineering*, 8: 108–115
- Whitmee S, Haines A, Beyrer C, Boltz F, Capon A G, de Souza Dias B F, Ezeh A, Frumkin H, Gong P, Head P, Horton R, Mace G M, Marten R, Myers S S, Nishtar S, Osofsky S A, Pattanayak S K, Pongsiri M J, Romanelli C, Soucat A, Vega J, Yach D. 2015. Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: Report of the Rockefeller foundation-lancet commission on planetary health. *Lancet*, 386: 1973–2028
- WHO. 2005. Using Climate to Predict Infectious Disease Epidemics. Geneva: World Health Organization
- Wigginton K R, Ye Y, Ellenberg R M. 2015. Emerging investigators series: The source and fate of pandemic viruses in the urban water cycle. *Environ Sci-Water Res Technol*, 1: 735–746
- Wong A C P, Li X, Lau S K P, Woo P C Y. 2019. Global epidemiology of bat coronaviruses. *Viruses*, 11: 174
- Woolhouse M, Scott F, Hudson Z, Howey R, Chase-Topping M. 2012. Human viruses: Discovery and emergence. *Phil Trans R Soc B*, 367:

2864–2871

Yao M, Zhang L, Ma J, Zhou L. 2020. On airborne transmission and control of SARS-Cov-2. [Sci Total Environ](#), 731: 139178

Yeo C, Kaushal S, Yeo D. 2020. Enteric involvement of coronaviruses: Is faecal-oral transmission of SARS-CoV-2 possible? [Lancet Gastroenterol Hepatol](#), 5: 335–337

Yoshimoto R, Sasaki H, Takahashi T, Kanno H, Nanzyo M. 2012.

Contribution of soil components to adsorption of pepper mild mottle virus by Japanese soils. [Soil Biol Biochem](#), 46: 96–102

Zhu Y G, Zhao Y, Zhu D, Gillings M, Penuelas J, Ok Y S, Capon A, Banwart S. 2019. Soil biota, antimicrobial resistance and planetary health. [Environ Int](#), 131: 105059

Zohdy S, Schwartz T S, Oaks J R. 2019. The coevolution effect as a driver of spillover. [Trends Parasitol](#), 35: 399–408

(责任编辑: 陈建徽)