

环境气象因素对新型冠状病毒肺炎传播影响的研究进展

蒙丽君¹, 胡国清¹, 姚梦¹, 周翠¹, 周纯良², 李杏莉¹

1. 中南大学湘雅公共卫生学院, 湖南 长沙 410078

2. 湖南省疾病预防控制中心环境与健康科, 湖南 长沙 410005

摘要:

由严重急性呼吸综合征冠状病毒 2(SARS-CoV-2)引起的新型冠状病毒肺炎(COVID-19)在世界范围内迅速蔓延,已成为全球大流行病。气象条件被认为是影响传染病流行和传播的关键因素之一。在此情景下,世界气象组织及国内外学者对环境气象因素与 COVID-19 的关系展开了积极探讨。本文系统收集和整理国内外相关研究,综述了不同统计模型下环境气象因素对 COVID-19 影响的最新研究进展,将环境气象因素分为典型气象因素(温度、湿度、风速等)、局部环境因素(室内封闭环境、通风、空气消毒、空调等)和空气污染。目前研究证据提示,典型气象因素、局部环境因素、空气污染物与 COVID-19 的传播密切相关,但由于影响机制的不明确、研究地域和研究方法的差异等,当前不同研究的结果仍存在分歧。本综述阐明了环境气象因素对 COVID-19 传播的重要性,为控制 COVID-19 进一步的大规模传播及制定不同环境气象条件下的预防和控制措施提供有益的启示。

关键词: 新型冠状病毒肺炎; 气候变化; 环境因素; 气象因素; 空气污染

Research progress on influence of environmental and meteorological parameters on transmission of coronavirus disease 2019 MENG Lijun¹, HU Guoqing¹, YAO Meng¹, ZHOU Cui¹, ZHOU Chunliang², LI Xingli¹ (1. Xiangya School of Public Health, Central South University, Changsha, Hunan 410078, China; 2. Department of Environment and Health, Hunan Provincial Center for Disease Control and Prevention, Changsha, Hunan 410005, China)

Abstract:

Novel coronavirus disease 2019 (COVID-19) caused by severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-COV-2) is spreading rapidly around the world and has become a global pandemic. Meteorological factors have been recognized as one of the critical factors that influence the epidemiology and transmission of infectious diseases. In this context, the World Meteorological Organization and scholars at home and abroad have paid extensive attention to the relationships of environment and meteorology with COVID-19. This paper systematically collected and sorted out relevant domestic and foreign studies, and reviewed the latest research progress on the impact of environmental and meteorological factors on COVID-19, classifying them into typical meteorological factors (such as temperature, humidity, and wind speed), local environmental factors (such as indoor enclosed environment, ventilation, disinfection, and air conditioning), and air pollution. Current research evidence suggests that typical meteorological factors, local environmental factors, and air pollutants are closely related to the transmission of COVID-19. However, the results of different studies are still divergent due to uncertainty about the influencing mechanism, and differences in research areas and methods. This review elucidated the importance of environmental and meteorological factors to the spread of COVID-19, and provided useful implications for the control of further large-scale transmission of COVID-19 and the development of prevention and control strategies under different environmental and meteorological conditions.

Keywords: coronavirus disease 2019; climate change; environmental factor; meteorological parameter; air pollution



DOI 10.11836/JEOM21276

基金项目

湖南省科学技术厅社会发展领域重点研发项目(2020SK3023); 湖南省自然科学基金面上项目(2020JJ4388)

作者简介

蒙丽君(1998—),女,硕士生;
E-mail: 2993328647@qq.com

通信作者

周纯良, E-mail: hncdc4305761@sina.com
李杏莉, E-mail: lixingli@csu.edu.cn

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-06-18

录用日期 2022-02-08

文章编号 2095-9982(2022)03-0348-05

中图分类号 R122

文献标志码 A

►引用

蒙丽君, 胡国清, 姚梦, 等. 环境气象因素对新型冠状病毒肺炎传播影响的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(3): 348-352.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21276

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHOU Chunliang, E-mail: hncdc4305761@sina.com
LI Xingli, E-mail: lixingli@csu.edu.cn

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-06-18

Accepted 2022-02-08

► To cite

MENG Lijun, HU Guoqing, YAO Meng, et al. Research progress on influence of environmental and meteorological parameters on transmission of coronavirus disease 2019[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(3): 348-352.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21276

新型冠状病毒肺炎(coronavirus disease 2019, COVID-19)疫情已在全球范围内迅速蔓延,影响严重,2020年3月11日,世界卫生组织正式宣布 COVID-19 为

全球性大流行病^[1]。COVID-19 是由最新发现的严重急性呼吸综合征冠状病毒 2(severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, SARS-CoV-2)感染引起的一类急性呼吸道传染病,大多数感染者会表现出轻度至中度呼吸道疾病症状,严重病例则会发展为肺炎、肾衰竭、急性呼吸综合征等严重病症,甚至死亡^[2-3]。基于既往研究,气象条件被认为是影响传染病流行和传播的关键因素之一,先前的严重急性呼吸综合征冠状病毒(severe acute respiratory syndrome coronavirus, SARS-CoV)和中东呼吸综合征冠状病毒(Middle East respiratory syndrome coronavirus, MERS-CoV)疫情均在亚热带季风气候地区率先暴发,提示冠状病毒疫情的发生与环境气候条件之间可能存在一定关联^[4-5]。2020 年 8 月 4 日至 6 日世界气象组织召开线上国际会议,共同探讨环境气象因素与 COVID-19 之间的关系,强调疫情可能受环境气象因素的影响^[6]。本文系统收集和整理国内外相关研究,综述了不同统计模型下环境气象因素对 COVID-19 暴发和流行的影响。

1 环境气象因素对 COVID-19 的影响概况

由于对 COVID-19 的研究周期较短,且当前大多数文献主要是通过建立 COVID-19 病例数对典型环境气象因素响应的统计模型(如广义线性模型、广义相加模型、分布滞后非线性模型、随机森林预测模型等)进行分析(详见表 1),尚缺乏统一的实验性机理研究证据,因此针对环境气象因素与 COVID-19 之间潜在的影响机制尚不清楚,但已有的流行病学研究揭示,人类活动模式和免疫力以及病毒的存活可能会受到 COVID-19 疫情期间环境气象参数的影响^[7]。疫情早期数据显示,气温和湿度较低的国家(如韩国、日本和伊朗)的疫情比温暖和潮湿的国家(如新加坡、马来西亚和泰国)的疫情更加严重^[8]。从现有的环境气象条件对 COVID-19 传播影响的研究证据来看,研究因素中温度和空气污染占多数,同时还涉及湿度、风速、降雨等,各环境因素可能是通过传染源、传播途径、易感人群三个环节来影响 COVID-19 的发生与发展。

2 气象因素与 COVID-19 之间的关系

不同的气象因素在 COVID-19 传播过程中起着重要的作用,可能通过影响环境中 SARS-CoV-2 的存活与复制、机体的免疫力和活动行为等来影响 COVID-19 的流行强度,且不同的气象因子对 COVID-19 流行的影响程度不同。

表 1 环境气象因素与 COVID-19 关系研究的常用模型及其特点

Table 1 Typical models and characteristics of research on the relationships between environmental and meteorological factors and COVID-19

常用统计模型	特点
线性回归模型	一般用于分析研究环境气象因素与同期 COVID-19 病例数据之间的线性关系,但易出现过度拟合的情况,且数据适用范围窄、不能用于描述非线性关系
广义线性模型(负二项回归模型、泊松回归模型)	模型中可引入其他混杂因素,进一步克服了线性回归模型的缺点,适用范围更广泛,但仍无法研究环境气象因素与 COVID-19 之间复杂的非线性的情况
广义相加模型	引入非线性函数,能相对准确地发现环境气象因素与 COVID-19 之间的关联程度与形式,同时纳入气象因素和非气象因素的影响,使预测结果更准确
分布滞后非线性模型	用于探究气象因素与 COVID-19 之间的暴露-滞后关系,同时拟合两者之间的非线性关系及滞后效应,但针对温度以外的其他气象因素和非气象因素应用较少
随机森林模型	引入了随机性,抗过拟合能力较强,针对气象数据较多的时间序列能够有效在大数据集上运行,预测精度较高

2.1 典型气象因素

2.1.1 温度 呼吸道病毒感染暴发的高峰期通常出现在冬季,温度与 SARS-CoV-2 在环境中的存活和传播之间存在潜在的直接联系。已有实验证据表明 SARS-CoV-2 在 4 °C 寒冷环境中高度稳定^[9],而当温度达到 20 °C 以后,随着温度升高病毒存活率下降^[10],因此,低温环境可能在 SARS-CoV-2 的传播中起至关重要的作用。随着 SARS-CoV-2 不断演化出新变种,相关实验室研究也探讨了 SARS-CoV-2 变异株在低温下的稳定性,发现在-20 °C 储存条件下的变异株比 4 °C 储存条件下的变异株表现出更强的稳定性和传染性^[11],说明温度很可能通过影响病毒稳定性进而导致病毒适应性进化。然而基于当前的研究,关于温度在多大程度上影响 SARS-CoV-2 的生态进化,以及温度如何影响变异株在人群中的暴发流行动态报道甚少。

据湖北省气象局统计,武汉市分别于 2019 年 11 月和 12 月中下旬受寒潮空气影响,导致气温骤降^[12],这与疫情早期的出现和后期的暴发情况相吻合,可能是低温为 SARS-CoV-2 提供了有利的生存和繁殖条件。一项基于 154 个国家数据的研究应用随机森林模型模拟温度与 COVID-19 发生风险之间的关联,结果显示在平均环境温度为 0~10 °C 的国家,COVID-19 具有较高的发病和死亡风险,进一步提示低温是感染 COVID-19 的危险因素^[13]。Xie 等^[14]应用广义相加模型对中国 122 个城市的分析表明,当平均温度低于 3 °C 时,温度与 COVID-19 发病数呈线性正相关,温度每升高 1 °C,每日确诊病例数可增加 4.861%,而在 3 °C 以上关系则趋于平缓。此外 Shi 等^[15]采用分布滞后非

线性模型检验中国大陆地区 COVID-19 每日确诊病例数与气温条件的关系,结果提示不同地区温度与确诊病例数之间的曲线呈 V 型、倒 U 型和 L 型等非线性关系,同时该研究也探讨了气象因素与 COVID-19 之间潜在的滞后效应,结果显示无论是否存在滞后时间,气温都会影响 COVID-19 的日发病率。虽然大部分研究都表明温度可以影响 COVID-19 的传播,但一项基于中国 224 个城市的研究结果(采用线性回归模型)并不支持这一观点^[16]。

2.1.2 湿度 目前针对 COVID-19 发病和死亡与湿度之间的关系,不同地区的研究结果仍存在一定争议。实验研究揭示 SARS-CoV-2 在相对湿度较低的外界环境中稳定性更高^[17],且据报道,2019 年 7 月下旬以来湖北省东部(包括武汉市)遭遇了近 40 年来最严重的干旱^[18],这提示干燥的环境可能更利于 SARS-CoV-2 在空气中的传播。湿度可能是通过影响传播介质的粒径、化学成分等物理化学性质进而影响 COVID-19 的发病率。在低相对湿度的条件下,病毒飞沫中的水分迅速蒸发,形成在空气中停留时间更长的飞沫核,从而增加病原体传播的可能性;鉴于 COVID-19 与流感均属于呼吸道疾病,且具有相同的传播途径,通过对流感病毒的研究发现,干燥的空气使人体鼻黏膜容易出现小破裂,降低气道纤毛细胞清除病毒颗粒、分泌黏液和修复气道的能力,从而使宿主更容易感染病毒^[19]。

采用广义相加模型对 166 个国家的数据进行分析,结果显示,相对湿度与 COVID-19 每日新增病例和死亡人数均呈负相关,相对湿度每增加 1%,COVID-19 的每日新增病例和新增死亡病例分别减少 0.85% 和 0.51%^[20]。Qi 等^[21]同样采用广义相加模型,在探讨中国大陆各地区相对湿度与每日确诊人数间的关系时也得出了类似的结论。然而不同地区的结果表现出空间异质性,同时考虑到各气象因素间的交互作用,通过进一步对湖北省的数据分析,发现湿度与温度的交互作用对 COVID-19 传播具有正向影响。与相对湿度不同,绝对湿度是指单位体积空气中实际的水蒸气重量,不受温度变化的影响。鉴于温度对相对湿度的影响,为了充分说明湿度的单独效应,需要分析绝对湿度对 COVID-19 的影响。Kodera 等^[22]基于多元线性回归模型认为绝对湿度是影响日本 COVID-19 发病率和死亡率的主要环境因素之一,研究结果表明绝对湿度越高,COVID-19 的发病率和死亡率越低。另一项基于中国和美国 COVID-19 数据的横断面研究采用 Fama-MacBeth 回归来确定湿度与 COVID-19 之间的

关联,就美国各州而言,相对湿度和绝对湿度均与 COVID-19 的传播之间存在较强的负相关;然而,在中国各城市,绝对湿度与 COVID-19 传播之间的相关性并没有统计学意义^[23]。Pan 等^[24]基于 8 个国家 202 个地区的数据采用多元线性回归模型得出了与前述相反的结论,认为相对湿度与 COVID-19 之间无相关性,湿度的升高并不会降低 COVID-19 的传播风险。

2.1.3 风速 关于全球范围内 COVID-19 发病率与风速的研究明显少于温度和湿度^[25]。风速是传染病传播的一个重要影响因素,可能会调节病原体及其载体的传播动态。风速对 COVID-19 目前存在两种潜在影响,一是较高的风速能通过降低含有病原体的气溶胶颗粒的浓度而降低人体感染风险^[26],二是较高的风速能提高飞沫的传播速度,扩大传播范围,进而在一定程度上增加人体患病的风险^[27]。

目前对中国、美国、新加坡、巴基斯坦等地区的研究报道了风速与 COVID-19 发病率之间的关系。Guo 等^[28]通过分布滞后非线性模型分析 190 个国家数据,发现风速和 COVID-19 发病率之间呈倒 U 型关系,当风速高于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,风速越高通常与 COVID-19 发病风险越低相关。与此同时,有研究在巴基斯坦各省份水平上利用广义相加模型也刻画出了与前述相似的曲线关系,针对巴基斯坦全国而言,风速越高,病例数越多^[29]。一项来自中国广州地区的研究采用广义相加模型表明,日均风速和 COVID-19 日报告病例数呈正相关,在滞后 3 d 时危害效应最大^[30]。然而,也有研究利用多元回归模型对中国 219 个城市数据分析得出了与之相反的结论,认为风速与 COVID-19 的感染呈负相关关系^[26];来自澳大利亚的研究通过广义相加模型则认为风速对 COVID-19 的传播并无影响^[31]。

2.2 其他气象因素

除温度、湿度和风速之外,还有研究分析了降雨、日照等气象因素对 COVID-19 的影响。有研究利用负二项回归模型分析新加坡气象因素与 COVID-19 感染的关系,结果显示平均降雨量与 COVID-19 病例数呈负相关^[32];另一项印度尼西亚的研究显示日照时长与 COVID-19 的发病和死亡均无统计学意义的相关性,而与患者感染 COVID-19 后的恢复呈正相关^[33]。

3 局部环境因素

目前,许多研究已经证实可以在粪便、尿液,甚至废水或某些食物表面等多种外环境中检测到 SARS-CoV-2,虽然从中检测到的病毒含量较低且其环境生存

能力有限,但不能完全排除表面接触传播在特殊情况下成为潜在的传播途径^[34]。由于人们生活、学习和工作大多都在室内进行,COVID-19 聚集性暴发案例的频繁出现,说明 COVID-19 在通风不足的局部环境中更易出现机会性人际传播感染的情况,因此,室内封闭环境是 COVID-19 疫情防控的重要场所。在医疗机构、实验室等特殊环境中,也存在气溶胶传播的可能性^[35]。尽管目前 SARS-CoV-2 通过远距离空气传播的情况未被证实,但有研究认为 SARS-CoV-2 存在室内远距离空气传播的潜在风险,充分有效的通风及空气消毒可作为防止室内 COVID-19 感染的重要措施^[36]。此外,室内环境中的建筑构件也可能会影响 COVID-19 的传播。中国广州的一家餐厅曾发生涉及 3 个家庭的 COVID-19 聚集性疫情,通过调查发现感染者之间接触感染的可能性较低,可能是餐厅内空调的气流促进飞沫传播而导致感染^[37]。与人类生产、生活息息相关的环境都可能影响 COVID-19 的传播,因此,应注意对不同的局部环境采取针对性的防控措施,以降低 SARS-CoV-2 在局部环境中扩散的风险。

4 空气污染与 COVID-19 之间的关系

空气污染已被确定为世界上导致疾病和过早死亡的最大环境因素之一,科学证据表明短期和长期暴露于环境空气污染物与广泛的不良健康结局相关,空气污染导致共病在内的健康问题可与 COVID-19 感染相互促进,加剧病毒感染进程,据估计全球 COVID-19 死亡病例中因空气污染死亡的比例约为 15%^[38]。空气污染对 COVID-19 的潜在影响主要表现在两个方面:一是空气污染物暴露可导致 SARS-CoV-2 感染人体相关的肺细胞表面受体血管紧张素转化酶 2 的活性增强,进而增加肺部对病毒的吸收^[39];二是室外颗粒物可能充当 SARS-CoV-2 的运输载体,导致两者共同进入肺部从而增加感染几率^[40]。

空气污染加重了 COVID-19 对人群的影响,不仅可能导致感染人数增加,并且有可能加重 COVID-19 症状并增加死亡风险^[41]。Zhu 等^[42]采用广义相加模型研究了中国 120 个城市颗粒物与 COVID-19 每日确诊数之间的关系,发现短期暴露(最长 21 d)于 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 NO_2 和 O_3 与 COVID-19 确诊病例数呈正相关,而暴露于 SO_2 可降低 COVID-19 的感染风险。一项对湖北武汉、黄冈和孝感三个疫情严重城市的研究通过泊松回归模型发现,COVID-19 日均发病率与 $PM_{2.5}$ 呈正相关,而 PM_{10} 与 COVID-19 日发病率呈负相关^[43]。哈

佛大学公共卫生学院一项基于负二项回归模型对美国 3 089 个区县的研究发现, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度每增加 $1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, COVID-19 死亡率增加 11%^[44]。虽然尚未完全建立二者之间的因果关系,但现有的证据已充分表明空气污染水平是 COVID-19 防控的重要因素。

5 总结与展望

虽然目前研究证据提示,典型气象因素、局部环境因素、空气污染物与 COVID-19 的传播密切相关,但由于影响机制的不明确、研究地域和研究方法的差异等,当前不同研究的结果仍存在分歧。针对当前研究所存在的问题,今后需加强各环境气象因素对 COVID-19 影响的作用机制及模型预测方面的研究,并进一步探索气象因素、环境因素与 COVID-19 之间的定量因果关系。环境气象因素只是可能影响 COVID-19 传播的重要因素之一,公共隔离政策、群体免疫、人口密度、机体自身免疫力等多种因素也会对 COVID-19 传播产生共同影响,因此防控 COVID-19 的流行应与多部门联合应对。针对典型气象因素和空气污染的影响,应当合理利用当地环境监测和气象资料,采取综合性的防控措施才能有效防止 COVID-19 的大规模传播;针对局部环境因素的影响,建议室内场所应保持良好通风及经常性消毒,进一步加强个体的用手卫生习惯和意识,以防止局部环境中聚集性疫情的发生。

参考文献

- [1] WHO. Coronavirus Disease (COVID-19) Weekly epidemiological update and weekly operational update[EB/OL]. (2020-03-11)[2021-05-04]. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports/>.
- [2] WANG D, HU B, HU C, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China[J]. *JAMA*, 2020, 323(11): 1061-1069.
- [3] 高文静,王波,吕筠,等.新型冠状病毒肺炎流行现状及应对策略进展[J]. *中华流行病学杂志*, 2021, 42(1): 22-27.
GAO WJ, WANG B, LÜ Y, et al. Current status of COVID-19 pandemic and progress in response strateg[J]. *Chin J Epidemiol*, 2021, 42(1): 22-27.
- [4] CASANOVA LM, JEON S, RUTALA WA, et al. Effects of air temperature and relative humidity on coronavirus survival on surfaces[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2010, 76(9): 2712-2717.
- [5] ALTAMIMI A, AHMED AE. Climate factors and incidence of Middle East respiratory syndrome coronavirus[J]. *J Infect Public Health*, 2020, 13(5): 704-708.
- [6] WMO. Climatological, Meteorological and Environmental factors in the COVID-19 pandemic[EB/OL]. (2020-08-10)[2021-03-12]. <https://public.wmo.int/en/events/meetings/covid-19-symposium/outcomes>.
- [7] ZHAO C, FANG X, FENG Y, et al. Emerging role of air pollution and meteorological parameters in COVID-19[J]. *J Evid Based Med*, 2021,

- 14(2): 123-138.
- [8] WHO. Coronavirus (COVID-19) Dashboard-Situation by Region, Country, Territory & Area[EB/OL]. (2020-02-16)[2021-03-16]. <https://covid19.who.int/table>.
- [9] CHIN A W H, CHU J T S, PERERA M R A, et al. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions[J]. *Lancet Microbe*, 2020, 1(1): e10.
- [10] RIDDELL S, GOLDIE S, HILL A, et al. The effect of temperature on persistence of SARS-CoV-2 on common surfaces[J]. *Virol J*, 2020, 17(1): 145.
- [11] HUANG S Y, KUNG Y A, HUANG P N, et al. Stability of SARS-CoV-2 spike G614 variant surpasses that of the D614 variant after cold storage[J]. *mSphere*, 2021, 6(2): e00104-21.
- [12] 范逸品, 王燕平, 张华敏, 等. 试析从寒疫论治新型冠状病毒肺炎[J]. *中医杂志*, 2020, 61(5): 369-374.
- FAN Y P, WANG Y P, ZHANG H M, et al. Analysis on the treatment of new coronavirus pneumonia (COVID-19) from the cold epidemic treatment[J]. *J Trad Chin Med*, 2020, 61(5): 369-374.
- [13] YANG H Y, LEE J K W. The impact of temperature on the risk of COVID-19: a multinational study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(8): 4052.
- [14] XIE J, ZHU Y. Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 724: 138201.
- [15] SHI P, DONG Y, YAN H, et al. Impact of temperature on the dynamics of the COVID-19 outbreak in China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 728: 138890.
- [16] YAO Y, PAN J, LIU Z, et al. No association of COVID-19 transmission with temperature or UV radiation in Chinese cities[J]. *Eur Respir J*, 2020, 55(5): 2000517.
- [17] BIRYUKOV J, BOYDSTON J A, DUNNING R A, et al. Increasing temperature and relative humidity accelerates inactivation of SARS-CoV-2 on surfaces[J]. *mSphere*, 2020, 5(4): e00441-20.
- [18] 人民网. 长江中下游等地旱情较重[EB/OL]. (2019-11-07)[2021-08-20]. <http://society.people.com.cn/n1/2019/1107/c1008-31441698.html>.
- People Net. Heavy drought in the middle and lower reaches of Yangtze Rive[EB/OL]. (2019-11-07)[2021-08-20]. <http://society.people.com.cn/n1/2019/1107/c1008-31441698.html>.
- [19] KUDO E, SONG E, YOCKEY L J, et al. Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116(22): 10905-10910.
- [20] WU Y, JING W, LIU J, et al. Effects of temperature and humidity on the daily new cases and new deaths of COVID-19 in 166 countries[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 729: 139051.
- [21] QI H, XIAO S, SHI R, et al. COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: a time-series analysis[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 728: 138778.
- [22] KODERA S, RASHED E A, HIRATA A. Correlation between COVID-19 morbidity and mortality rates in japan and local population density, temperature, and absolute humidity[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(15): 5477.
- [23] WANG J, TANG K, FENG K, et al. Impact of temperature and relative humidity on the transmission of COVID-19: a modelling study in China and the United States[J]. *BMJ Open*, 2021, 11(2): e043863.
- [24] PAN J, YAO Y, LIU Z, et al. Warmer weather unlikely to reduce the COVID-19 transmission: an ecological study in 202 locations in 8 countries[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 753: 142272.
- [25] MCCLYMONT H, HU W. Weather variability and COVID-19 transmission: a review of recent research[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(2): 396.
- [26] ZHANG Z, XUE T, JIN X. Effects of meteorological conditions and air pollution on COVID-19 transmission: evidence from 219 Chinese cities[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 741: 140244.
- [27] ŞAHİN M. Impact of weather on COVID-19 pandemic in Turkey[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 728: 138810.
- [28] GUO C, BO Y, LIN C, et al. Meteorological factors and COVID-19 incidence in 190 countries: an observational study[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 757: 143783.
- [29] ALI Q, RAZA A, SAGHIR S, et al. Impact of wind speed and air pollution on COVID-19 transmission in Pakistan[J]. *Int J Environ Sci Technol (Tehran)*, 2021, 18(5): 1287-1298.
- [30] 汪慧, 狄飏, 林巧绚, 等. 气象因素对广州市新型冠状病毒肺炎流行的短期效应研究[J]. *热带医学杂志*, 2020, 20(9): 1226-1231.
- WANG H, DI B, LIN Q X, et al. The short-term impact of meteorological factors on the transmission of COVID-19 in Guangzhou[J]. *J Trop Med*, 2020, 20(9): 1226-1231.
- [31] WARD M P, XIAO S, ZHANG Z. Humidity is a consistent climatic factor contributing to SARS-CoV-2 transmission[J]. *Transbound Emerg Dis*, 2020, 67(6): 3069-3074.
- [32] LORENZO J S L, TAM W W S, SEOW W J. Association between air quality, meteorological factors and COVID-19 infection case numbers[J]. *Environ Res*, 2021, 197: 111024.
- [33] ASYARY A, VERUSWATI M. Sunlight exposure increased Covid-19 recovery rates: a study in the central pandemic area of indonesia[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 729: 139016.
- [34] LIU Z, SKOWRON K, GRUDLEWSKA-BUDA K, et al. The existence, spread, and strategies for environmental monitoring and control of SARS-CoV-2 in environmental media[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 795: 148949.
- [35] ANDERSON E L, TURNHAM P, GRIFFIN J R, et al. Consideration of the aerosol transmission for COVID-19 and public health[J]. *Risk Anal*, 2020, 40(5): 902-907.
- [36] MORAWSKA L, TANG J W, BAHNFLETH W, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?[J]. *Environ Int*, 2020, 142: 105832.
- [37] LU J, YANG Z. COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020[J]. *Emerg Infect Dis*, 2020, 26(11): 2789-2791.
- [38] POZZER A, DOMINICI F, HAINES A, et al. Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19[J]. *Cardiovasc Res*, 2020, 116(14): 2247-2253.
- [39] FRONTERA A, CIANFANELLI L, VLACHOS K, et al. Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: the "double-hit" hypothesis[J]. *J Infect*, 2020, 81(2): 255-259.
- [40] 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]. *Environ Res*, 2020, 188: 109754.
- [41] BOURDREL T, ANNESI-MAESANO I, ALAHMAD B, et al. The impact of outdoor air pollution on COVID-19: a review of evidence from *in vitro*, animal, and human studies[J]. *Eur Respir Rev*, 2021, 30(159): 200242.
- [42] ZHU Y, XIE J, HUANG F, et al. Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: evidence from China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 727: 138704.
- [43] JIANG Y, WU X J, GUAN Y J. Effect of ambient air pollutants and meteorological variables on COVID-19 incidence[J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2020, 41(9): 1011-1015.
- [44] WU X, NETHERY R C, SABATH M B, et al. Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: strengths and limitations of an ecological regression analysis[J]. *Sci Adv*, 2020, 6(45): eabd4049.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)