

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.004

日本污水流行病学发展及其在病毒流行趋势预测中的应用

贺凯^{1,2}, 陈诗颖¹, 张钰旋¹, 刘泽军^{1,3}, 齐元峰⁴, 郝爱民⁵,
张锁⁶, 尹启东¹

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 珠海 519082; 3. 东京大学 工学系研究科, 日本; 4. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 5. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035; 6. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 由诺如病毒、脊髓灰质炎病毒和 SARS-CoV-2 等引发的传染病在全球范围内大规模流行, 对人类生活造成巨大冲击, 并带来严重的经济损失。同时, 这些病毒的感染也对患者及其接触人群的健康构成了严重威胁。因此, 如何高效且经济地开展病毒预警监测显得尤为重要。污水流行病学作为一种研究方法, 通过分析污水中的病毒含量, 并结合病毒的存活特征、污水量及服务人口等关键数据可解析地区内的病毒感染趋势。通过整理和分析日本污水流行病学监测技术及应用案例, 指出了污水中低浓度病毒检测面临的巨大挑战。同时, 阐述了日本在污水中病毒检测技术的优化改进以及病毒感染预测模型等方面的研究进展。结合这些研究成果, 探讨了污水流行病学监测作为公共卫生预警和监测系统的应用意义及其未来发展方向, 旨在为我国建立和优化污水流行病学监测系统提供参考。

关键词: 污水流行病学; 病毒检测; 公共卫生预警; 日本

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0026-08

Development of Wastewater-based Epidemiology in Japan and Its Application in Predicting Viral Epidemic Trends

HE Kai^{1,2}, CHEN Shi-ying¹, ZHANG Yu-xuan¹, LIU Ze-jun^{1,3}, QI Yuan-feng⁴,
HAO Ai-min⁵, ZHANG Suo⁶, YIN Qi-dong¹

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Key Laboratory of Marine Civil Engineering of Guangdong Province, Zhuhai 519082, China; 3. School of Engineering, The University of Tokyo, Japan; 4. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 5. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 6. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The outbreaks of infectious diseases caused by Norovirus, Poliovirus, and SARS-CoV-2

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2024A1515011909、2023B1515040028); 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0104900); 佛山市顺德区核心技术攻关项目(2230218004273); 珠海市社会发展领域科技计划项目(2320004000067); 中山大学大学生创新训练项目(202410558126)

通信作者: 郝爱民 E-mail: hao_aimin@wzu.edu.cn

have profoundly impacted human life, causing serious economic damage to society, and posing serious health risks to both infected individuals and their close contacts. Thus, the development of efficient and economical techniques for early warning and monitoring of the virus outbreak is critically important. As a research method, wastewater-based epidemiology examines the virus content in wastewater and integrates factors such as virus survival characteristics, wastewater volume, and the population served to monitor and predict regional trends in virus infections. This study reviews past Japanese virus epidemiological surveillance techniques and application case, and highlights challenges faced in detecting low concentrations of virus in wastewater in Japan. Additionally, this work explores advancements in Japan's wastewater-based virus detection technologies and predictive models. Based on these findings, the study outlines the significance and future directions of wastewater-based epidemiology as a public health early warning and prediction system. Ultimately, this work aims to provide valuable insights for establishing and optimizing wastewater-based epidemiology monitor systems for early virus detection and warning in China.

Key words: wastewater-based epidemiology (WBE); virus detection; public health early warning; Japan

污水流行病学(Wastewater-based Epidemiology, WBE)作为一门新兴科学,自2001年由美国环境保护局(EPA)的Daughton博士首次提出以来,发展迅速^[1]。它融合了分析化学、环境学、微生物学、流行病学、法医学和社会行为学等多学科的知识,通过研究人类消费行为或提供人群健康信息,为公众健康和疫病预防提供了重要的数据和技术支持^[2]。该方法基于消费化学品和传染病病原体随尿液和粪便排入下水道系统的原理,通过提取并分析城市排水系统中的相关药物或生化标记物等物质,运用量化分析技术,能够定性或定量地推演相关化学物或病原体在收集区域内的消费或存在情况^[3]。目前,污水流行病学的应用领域仍然在不断扩展,从传统的毒品滥用调查和药物消费行为预测^[4-5],拓展到病毒感染率等公共健康信息预测。例如,通过监测污水中的诺如病毒、肝炎病毒和脊髓灰质炎病毒等浓度,可以研究相关病毒在人群中的流行状况^[6-8]。自2020年2月中国研究小组报告从感染者粪便中检测出新型冠状病毒肺炎(COVID-19)病毒以来,严重急性呼吸系统综合征冠状病毒2型(SARS-CoV-2)的RNA已在全球多个感染者的排泄物中被检出^[9-13],以上研究发现,患者即使在感染早期,都可以通过排泄释放SARS-CoV-2的RNA到排水系统中,这些信息为污水流行病学在病毒传播预测方面的应用提供了技术支持。以往的研究表明,无症状

感染者占总感染人数的40%~60%^[14],考虑到无症状感染者和症状前传播在疫情传播中的重要作用^[15],临床监测手段往往不能及时了解地区疫情感染情况,因此需要一个更加健全的动态监测系统进行传染病归趋分析和人群感染情况预测。

2020年3月,荷兰研究团队^[16]首次报道了在污水中成功检测到SARS-CoV-2的RNA,此后美国^[17]、法国^[18]、意大利^[19]等国研究人员均在污水中检测到了SARS-CoV-2的RNA,且发现症状前患者和有、无症状患者的粪便中均有病毒载量^[20-22],这些研究结果证明了污水流行病学作为疫情监测的可行性,并可为预警地区疫情再次暴发提供及时信息。刘然彬等^[23]通过系统总结发现,运用污水流行病学可以早于临床检测进行有效的疫情暴发预警,并有望表征疫情动态变化趋势或预测感染数量。

日本在污水流行病学方向开展了长时间的研究,并在病毒追踪溯源、指导疫情防控和病毒传播预警方面积累了较多应用案例。日本研究者将污水流行病学分析监测技术作为病毒临床检测手段的补充和一种早期疫情预警工具,开展了多项相关应用研究。同时,日本研究者也针对污水系统中SARS-CoV-2的RNA检测及其与疫情发展的关联性进行了研究。通过系统梳理和总结日本污水流行病学的发展及其在污水病毒检测中的应用和案例,分析其在日本传染病监测与防控中的价值与指

导意义,同时提出污水流行病学在实际应用中面临的挑战以及未来的发展方向。

1 日本污水流行病学发展概况

污水流行病学分析技术广泛应用于监测杀虫剂、溶剂、非法及处方药物、环境有机污染物、病原体,以及药品和个人护理品的使用情况,并对这些物质的生态环境风险进行评估^[6]。例如,通过分析污水中抗生素的浓度数据,可以推演污水服务区域内抗生素的使用状况,并调查可能存在的抗生素滥用情况^[24-25]。由于肠道病毒与人体新陈代谢过程紧密相连,这些病毒会随感染者的排泄物进入城市污水系统并被检测出来^[19,26-27]。因此,日本研究人员根据污水流行病学的原理,利用污水中病毒的检出情况来预估污水处理服务区域内的感染状况,并依据污水中病毒核酸的浓度来预测疫情的发展趋势。

近年来,如何在流感暴发地区控制感染者排出的病毒通过污水传播已成为一个重要的研究焦点。同时,由于病毒容易随人体排出,并且依赖于污水收集系统的成熟与发展,采用污水流行病学方法来检测病毒浓度并开展病毒感染预测具有技术上的可行性。2009年,甲型H1N1流感在世界范围内大规模暴发,小宫義人等^[28]使用阴电荷膜方法对甲型H1N1流感病毒进行浓缩(见图1),提取病毒的基因组RNA并逆转录合成其DNA,最后利用RT-qPCR方法测量了流感病毒的浓度。

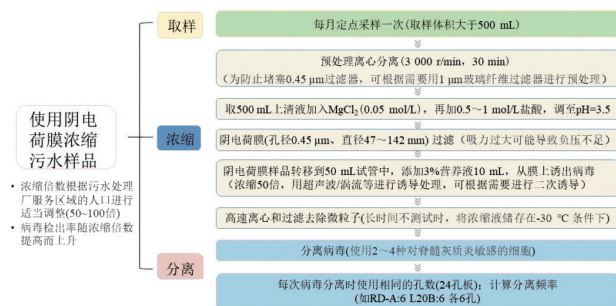


图1 基于阴电荷膜的水环境样品中病毒浓缩分离方法

Fig.1 Method for virus concentration and separation based on negatively charged membrane in aqueous environmental samples

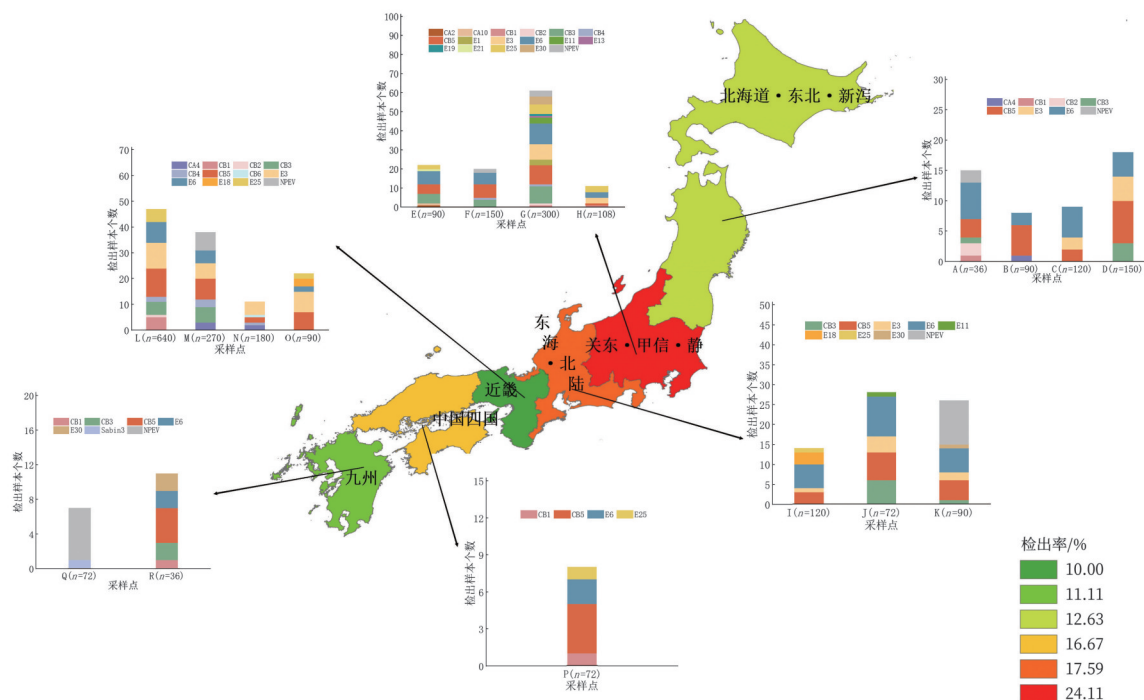
诺如病毒(Norovirus)是一种能引起非细菌性急性胃肠炎的病毒,其在体外环境中的存活时间可长达3周。该病毒的感染全年均有发生,尤其在冬季更为频繁^[29-30]。日本东北大学在仙台市针对诺如病毒进行了深入的污水流行病学研究^[31],并成功开发

出基于该领域的诺如病毒感染早期预测系统。研究结果显示,污水处理厂进水中的诺如病毒浓度在政府报告病例增加之前就已呈现上升趋势。基于该研究成果,日本东北大学建立了一个诺如病毒感染预报网站。该网站通过连续测量污水中诺如病毒GⅡ的RNA浓度,并对病毒浓度结果进行分析,一旦发现病毒浓度增加,便会触发警报,提醒民众采取卫生行为以防止传染性胃肠炎的传播^[32]。小宫義人等^[28]也采用类似方法,研究了感染性胃肠炎患者数量与诺如病毒污水入流浓度之间的关系,结果显示,污水中诺如病毒的年浓度波动可达1 000倍,且其浓度对数与感染性肠胃炎患者人数对数之间存在相关性。日本国土交通省下水道部对全国18家污水厂进水中的诺如病毒浓度进行了长期监测,发现诺如病毒浓度的月平均值为ND(未检出)~ 9.5×10^7 copies/L,变动约为两位数。值得注意的是,污水中诺如病毒浓度的增加与感染性胃肠炎的流行期高度吻合。在非流行期(9月—10月),GⅠ基因型诺如病毒的阳性检出率为36%(22个样本中检出8个),GⅡ基因型诺如病毒的阳性检出率为55%(22个样本中检出12个),均低于流行期(11月—次年3月)的阳性检出率,后者GⅠ基因型诺如病毒检出率超过70%,GⅡ基因型诺如病毒检出率则超过85%。

脊髓灰质炎病毒(Poliovirus)作为小儿麻痹症的病原体,属于小核糖核酸病毒科肠道病毒属,主要通过粪便、饮食及接触途径传播。自2013年起,日本国立感染症研究所便开始了脊髓灰质炎病毒的污水流行病学研究,2016年7月,在某污水取样调查点检出了3型脊髓灰质炎病毒,但经国立感染症研究所确认,该病毒为疫苗株,并且在之后的同一地点未再检测到,因此判断这是一起一时性的输入型案例。从2016年开始,日本国立感染症研究所开展了更为广泛的肠道病毒污水流行病学调查(见图2)。调查结果显示,在EV-A肠道病毒中,柯萨奇病毒A4(Coxsackie virus, CA4)在3处环境水样品中被检出,而病毒CA10和CA2则分别在2处环境水样品中被检出。从环境水样品中分离出来的肠道病毒大多属于EV-B群,其中埃可病毒6(Echovirus 6, E6)在18个环境水样中有16个被检出,检出率高达87.5%。同时,在15个环境水样中检出了柯萨奇病毒B5(CB5),这提示了在一定范围内病毒流行的可能性。与2015年的年度结果相比,CB5的阳性检出

率保持不变,但E6的检出地点从6处增加到16处,柯萨奇病毒B3(CB3)的检出地点也从7处增加到11处。这表明,该地区可能存在已经流行了超过2个月的血清型感染者。至于其他病毒,如埃可病毒E13、E19和E21等,仅在环境水样中被检出,并未有

相关的感染症报告(其中E13最近的一次感染症报告是在2009年,E21和E19则是在2013年)。自2013年以来,E19等病毒每年都在日本不同的调查地点从环境水样中被一次性检出,这表明埃可病毒可能通过输入性病例不断进入日本各地。



有7个样本的检测结果为阳性。这是日本首个通过污水流行病学方式检测出 SARS-CoV-2 的 RNA 案例。值得注意的是,在日本感染人数不到 1/100 000 时,该研究小组在富山县和石川县的污水中都检测出了 SARS-CoV-2 的 RNA,这比医疗报道的感染人数开始增加的时间早了 7~10 d。因此,污水流行病学的结果可以被视为日本病毒流行的关键早期迹象。

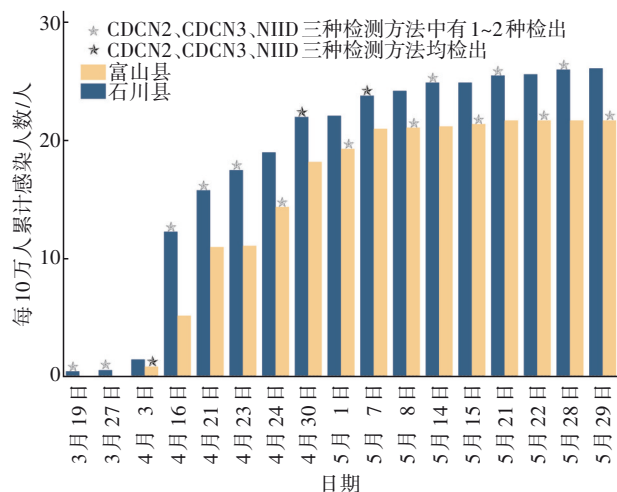


图3 基于三种 RT-qPCR 方法的污水中 SARS-CoV-2 的 RNA 检出情况

Fig.3 RNA detection of SARS-CoV-2 in sewage based on three RT-qPCR methods

在山梨大学原本英司和北海道大学北岛正章研究组的合作下,日本首次报道了在污水和河水中检测到 SARS-CoV-2 的 RNA^[36]。2020 年 3 月 17 日—5 月 7 日,该研究组对山梨县污水处理厂的进水和二沉池出水进行了系统的采样。他们采用两种先进的病毒浓缩方法——阴电荷膜破碎型浓缩法(EMV)和阴电荷膜吸附-直接 RNA 提取法,并结合 6 种不同的 PCR 检测方法,对病毒进行了全面的检测验证。然而,研究结果显示,由于病毒在污水进水和河水中的浓度极低,在 5 个采样期中,仅在 4 月 14 日通过 EMV 和 N_Sarbeco 结合的方法,在二沉池出水中检测到了 SARS-CoV-2 的 RNA 存在。遗憾的是,当时使用相同的方法在进水样品中并未检测到 SARS-CoV-2 的 RNA。

与此同时,2020 年 7 月 1 日,日本横滨市公共卫生研究所也发布了一份重要报告。该报告详细描述了他们尝试使用 2018 年 1 月—2020 年 5 月的流入污水来检测 SARS-CoV-2 的 RNA 结果。他们的研究验证了病毒浓度与患者人数之间的相关性,从而

进一步证实了污水流行病学检测在监测区域感染方面的应用价值。值得注意的是,该研究所采用的阴电荷膜法原本是用于分离包括脊髓灰质炎病毒在内的肠道病毒的方法,而其在 SARS-CoV-2 病毒检测方面的灵敏度尚未得到充分评估。因此,该报告可能低估了污水中主要致病因子的实际浓度,这也为未来在传染病流行趋势预测应用中研究和开发更适用于检测污水中相应致病因子的分析技术提供了新的启示。展望未来,基于病毒检测的污水流行病学研究将主要聚焦于确定标记物的释放量、标记物在管道中的输送动态变化以及标记物的取样和检测技术(如 PCR 检测等)的深入探索与发展^[3,7]。

3 污水病毒检测结果与疫情发展的关联性

Haramoto 等^[36]从 2020 年 3 月开始调查 SARS-CoV-2 时,山梨县的感染累计数量为 2 例,然而,至 4 月,在二沉池出水中检测到 SARS-CoV-2 的 RNA 时,该县的总感染人数已激增至 36 人,相当于每 10 万人中有 4.4 人感染。PCR 临床检测结果进一步揭示,污水中检测到 SARS-CoV-2 的时间与每日新增病例数的高峰期紧密对应。这表明,即便是在日本 COVID-19 疫情相对低流行的地区,也可以通过检测污水中 SARS-CoV-2 的 RNA 来有效跟踪和监测区域疫情的发展状况。

横滨市卫生研究所选择横滨市南部和北部地区各一座污水处理厂进行长期监测,2018 年 1 月—2020 年 5 月每月至少进行一次采样。此外,在 2019 年 9 月—2020 年 1 月还对北部地区的两座污水处理厂和南部地区的一座污水处理厂进行了采样。检测结果显示,2020 年 4 月 21 日从北部和南部地区采集的样品中均检测到了 SARS-CoV-2 的 RNA。鉴于有报道称 SARS-CoV-2 的 RNA 在粪便中的检出期可达 27.9 d^[34],并结合该地区感染人数在 2020 年 4 月左右开始增加,并于当月 11 日达到感染高峰的情况,可以推断检测到的病毒来源于该市感染者的粪便。而 5 月 20 日的采样中均未检测到该病毒,这表明污水中检测到的病毒量与公布的患者人数之间可能存在相关性。

相较于传统的临床监测方法,基于环境检测的污水流行病学具有独特的优势,它能够及时、省力地反映和预测污水处理服务区域的总体感染状

况^[37-38]。环境水样本的病毒检测不具有随机性,其检测对象更广泛地涵盖了临床确诊患者以外的无症状感染者和症状前感染者,因此能够更准确地推演和预测整个流域的疫情趋势发展状况。

日本东北大学 Zhu 等^[15]根据感染者粪便中的 SARS-CoV-2 载量情况,建立了一个污水中 SARS-CoV-2 的 RNA 负荷模型,并利用东京都地区的 COVID-19 流行数据进行模拟分析,以评估污水流行病学研究提供早期预警的能力(见图4、5)。研究结果表明,虽然污水 SARS-CoV-2 的检测限通常较高,使得以往的污水流行病学难以在疫情的早期阶段提供准确的警告信号,但如果通过改进实验方法、优化采样策略和完善预测模型,东京都污水中 SARS-CoV-2 的 RNA 浓度最早将在 2020 年 4 月(即东京都第一波 COVID-19 疫情期间)超过检测限。此外,在第二波和第三波疫情来临之前,也可以检测到病毒。因此,运用污水流行病学进行早期监测具有显著的社会效益,其分析结果能够为快速决策和处置提供有力依据。

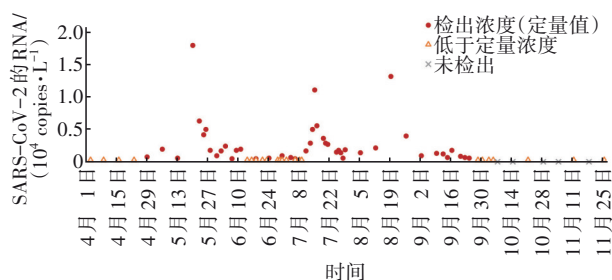


图4 东京都污水中 SARS-CoV-2 的 RNA 检出率

Fig.4 Detection rate of RNA of SARS-CoV-2 in Tokyo

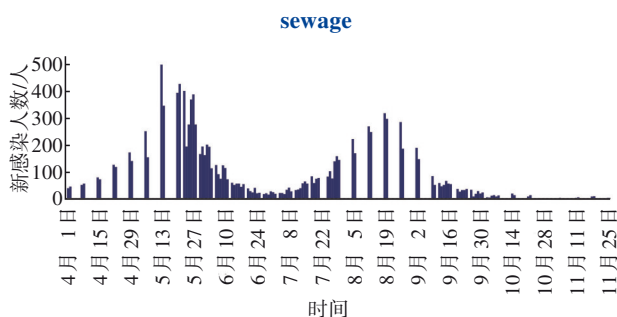


图5 基于东京都污水中 SARS-CoV-2 检测的感染人数

Fig.5 Number of infected individuals based on SARS-CoV-2 detection in Tokyo sewage

4 污水流行病学应用中的挑战和展望

目前,通常采用传播指数(R_t)来描述病毒传播的动态变化,但其准确性仍然高度依赖于大量的临

床检测和流行病学调查。一旦病毒的传播速度超越了检测的速度,疫情预测就可能无法准确反映实际的疫情扩散情况,进而可能导致疫情的进一步恶化^[23]。此外,当感染者人数较少时,使用常规方法检测病毒变得极具挑战性,同时在疫情开始或结束时捕获病毒也变得相当困难。由于污水样本中 SARS-CoV-2 的 RNA 数量通常非常少,北海道大学和盐野义公司针对这一难题,联合研发了一项针对污水样本的独创性病毒检测技术。这项技术实现了病毒 RNA 的高效浓度富集和高灵敏度定量 PCR 检测,其灵敏度比传统方法高出约 100 倍,即使在感染者人数相对较少的地区也能有效捕捉到病毒的传播。

展望未来,污水流行病学的研究不仅需要持续优化病毒的采集和浓缩方法,深入研究病毒的脱落率及其影响因素,探索病毒在污水中的稳定性,并开发感染人数模型,更需要根据具体的研究目标选择合适的方法。当污水流行病学被用于确定感染者数量时,应采用复合样本策略,并注重病毒 RNA 量化数据的精准检测;而当其用于预警或表征感染趋势时,则应采用抓取样本策略,并着重提高在低浓度和接近检测限时病毒 RNA 的检出灵敏度^[23, 35]。这样的策略调整旨在及时、准确地反映传染病感染者数量的变化,为公共卫生管理提供有力的参考依据。综上所述,污水流行病学技术对病毒传播趋势具有显著的预警作用。

5 结论

污水流行病学作为一种独特的研究方法,其优势在于能够在不直接接触病毒感染者的情况下,在相对安全的污水处理厂环境中进行定点采样和检测。这种方法不仅为病毒感染的预警提供了可能,还能够有效预测疫情的发展趋势。

日本的研究者在病毒污水流行病学领域开展了广泛的研究调查。他们利用污水流行病学的检测结果,成功地表征了病毒传播的动态与趋势,并估算了感染群体的比例。更进一步地,研究者们还在一定区域内采用细分网格的取样检测手段,以实现感染群体的追踪,这一方法对于测定和划分区域内的疫情严重程度及输入途径具有重要意义。

当面对感染者人数较少的情况时,污水流行病学技术在传染病预测中的应用需要更加关注病毒

在低浓度情况下的检出灵敏度,并致力于降低检测限。与此同时,通过提升污水流行病学预测模型的稳定性和准确性,能够更好地评估污水流行病学在早期干预和公共卫生决策支持方面的效果。

参考文献:

- [1] DAUGHTON C G. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Overarching Issues and Overview [M]. US:ACS Publications, 2001.
- [2] 王德高. 污水流行病学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- WANG Degao. Wastewater-based Epidemiology [M]. Beijing: Science Press, 2018(in Chinese).
- [3] LORENZO M, PICO Y. Wastewater-based epidemiology: current status and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2019, 9: 77-84.
- [4] 侯琳琳, 李素娟, 李喜青, 等. 环境中违禁药物的污水流行病学研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(10): 106-110.
- HOU Linlin, LI Sujuan, LI Xiqing, *et al.* Review on sewage epidemiology of illicit drugs [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (10) : 106-110 (in Chinese).
- [5] 郑晓雨, 袁明俊, 王德高, 等. 基于污水流行病学的毒情研判技术研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 79-87.
- ZHENG Xiaoyu, YUAN Mingjun, WANG Degao, *et al.* Sewage epidemiology for drug situation assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15 (4) : 79-87 (in Chinese).
- [6] CHOI P M, TSCHARKE B J, DONNER E, *et al.* Wastewater-based epidemiology biomarkers: past, present and future [J]. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 2018, 105: 453-469.
- [7] XAGORARAKI I, O' BRIEN E. Wastewater-based Epidemiology for Early Detection of Viral Outbreaks [M]. US:Women in Water Quality, 2020.
- [8] ASGHAR H, DIOP O M, WELDEGEBRIEL G, *et al.* Environmental surveillance for polioviruses in the global polio eradication initiative [J]. Journal of Infectious Diseases, 2014, 210(S1): S294-S303.
- [9] HOLSHUE M L, DEBOLT C, LINDQUIST S, *et al.* First case of 2019 novel coronavirus in the United States [J]. New England Journal of Medicine, 2020, 382 (10): 929-936.
- [10] XIAO F, TANG M W, ZHENG X B, *et al.* Evidence for gastrointestinal infection of SARS-CoV-2 [J]. Gastroenterology, 2020, 158(6): 1831-1833.
- [11] WANG W L, XU Y L, GAO R Q, *et al.* Detection of SARS-CoV-2 in different types of clinical specimens [J]. JAMA, 2020, 323(18): 1843-1844.
- [12] WANG D W, 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.
- [13] SUN J, ZHU A R, LI H Y, *et al.* Isolation of infectious SARS-CoV-2 from urine of a COVID-19 patient [J]. Emerging Microbes & Infections, 2020, 9(1): 991-993.
- [14] HONDA R, MURAKAMI M, HATA A, *et al.* Public health benefits and ethical aspects in the collection and open sharing of wastewater-based epidemic data on COVID-19 [J]. Data Science Journal, 2021, 20(1): 027.
- [15] ZHU Y F, OISHI W, SAITO M, *et al.* Early warning of COVID-19 in Tokyo via wastewater-based epidemiology: how feasible it really is? [J]. Journal of Water and Environment Technology, 2021, 19(3): 170-183.
- [16] MEDEMA G, HEIJNEN L, ELSINGA G, *et al.* Presence of SARS-Coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in the Netherlands [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, 7 (7): 511-516.
- [17] WU F Q, ZHANG J B, XIAO A, *et al.* SARS-CoV-2 titers in wastewater are higher than expected from clinically confirmed cases [J]. mSystems, 2020, 5(4): 14-20.
- [18] WURTZER S, MARECHAL V, MOUCHEL J M, *et al.* Time course quantitative detection of SARS-CoV-2 in Parisian wastewaters correlates with COVID-19 confirmed cases [J]. Eurosurveillance, 2020. DOI: 10.1101/2020.04.12.20062679.
- [19] LA ROSA G, IACONELLI M, MANCINI P, *et al.* First detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewaters in Italy [J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139652.
- [20] TANG A, TONG Z D, WANG H L, *et al.* Detection of novel coronavirus by RT-PCR in stool specimen from asymptomatic child, China [J]. Emerging Infectious Diseases, 2020, 26(6): 1337-1339.
- [21] AHMED W, ANGEL N, EDSON J, *et al.* First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated

- wastewater in Australia: a proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138764.
- [22] RANDAZZO W, TRUCHADO P, CUEVAS- FERRANDO E, *et al.* SARS-CoV-2 RNA in wastewater anticipated COVID-19 occurrence in a low prevalence area [J]. *Water Research*, 2020, 181: 115942.
- [23] 刘然彬, 郝晓地, VAN LOOSDRECHT M, 等. 污水流行病学用于新冠肺炎预警研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(14): 37-45.
- LIU Ranbin, HAO Xiaodi, VAN LOOSDRECHT M, *et al.* Research progress of wastewater-based epidemiology as an early warning system for COVID-19 pandemic [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(14): 37-45 (in Chinese).
- [24] AZUMA T, NAKADA N, YAMASHITA N, *et al.* Evaluation of concentrations of pharmaceuticals detected in sewage influents in Japan by using annual shipping and sales data [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 770-776.
- [25] HANAMOTO S, YAMAMOTO-IKEMOTO R, TANAKA H. Predicting mass loadings of sulfamonomethoxine, sulfamethoxazole, and lincomycin discharged into surface waters in Japanese river catchments [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: 146032.
- [26] BISSEUX M, COLOMBET J, MIRAND A, *et al.* Monitoring human enteric viruses in wastewater and relevance to infections encountered in the clinical setting: a one-year experiment in central France, 2014 to 2015 [J]. *Eurosurveillance*, 2018, 23(7): 17-00237.
- [27] HELLMER M, PAXEUS N, MAGNIUS L, *et al.* Detection of pathogenic viruses in sewage provided early warnings of hepatitis a virus and norovirus outbreaks [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(21): 6771-6781.
- [28] 小宮義人, 藤原隆司, 小越眞佐司. 下水中の病原ウイルス調査 [J]. *土木技術資料*, 2010, 52(6): 26-29.
- [29] KATAYAMA H, HARAMOTO E, OGUMA K, *et al.* One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan [J]. *Water Research*, 2008, 42(6/7): 1441-1448.
- [30] YAN H N, YAGYU F, OKITSU S, *et al.* Detection of Norovirus (G I, G II), Sapovirus and Astrovirus in fecal samples using reverse transcription single-round multiplex PCR [J]. *Journal of Virological Methods*, 2003, 114(1): 37-44.
- [31] KAZAMA S, MIURA T, MASAGO Y, *et al.* Environmental surveillance of Norovirus genogroups I and II for sensitive detection of epidemic variants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2017, 83(9): 03406-16.
- [32] 大石若菜, ZHU Yifan, 丸尾知佳子, 等. ウイルス感染症流行制御のための下水疫学調査のエッセンス [J]. *水環境学会誌*, 2021, 44(5): 125-133.
- [33] ZHENG S F, FAN J, YU F, *et al.* Viral load dynamics and disease severity in patients infected with SARS-CoV-2 in Zhejiang Province, China, January-March 2020: retrospective cohort study [J]. *BMJ*, 2020, 369: m1443.
- [34] WU Y J, GUO C, TANG L T, *et al.* Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples [J]. *Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 2020, 5(5): 434-435.
- [35] HATA A, HARA-YAMAMURA H, MEUCHI Y, *et al.* Detection of SARS-CoV-2 in wastewater in Japan during a COVID-19 outbreak [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143578.
- [36] HARAMOTO E, MALLA B, THAKALI O, *et al.* First environmental surveillance for the presence of SARS-CoV-2 RNA in wastewater and river water in Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 140405.
- [37] MURAKAMI M, HATA A, HONDA R, *et al.* Letter to the editor: wastewater-based epidemiology can overcome representativeness and stigma issues related to COVID-19 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(9): 5311.
- [38] HATA A, HONDA R. Potential sensitivity of wastewater monitoring for SARS-CoV-2: comparison with Norovirus cases [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(11): 6451-6452.
-
- 作者简介: 贺凯(1986-), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为流域新污染物溯源与分析。
- E-mail: hekai7@mail.sysu.edu.cn
- 收稿日期: 2022-02-23
- 修回日期: 2024-06-13

(编辑: 丁彩娟)