· 疾病控制 ·

郑州市和洛阳市污水严重急性呼吸综合征冠状病毒2型监测结果分析

张欣烨，赵秋艳，马小焱，彭靖，魏源，闫晓娜，杨似玉，张杰

河南省疾病预防控制中心，河南 郑州 450016

摘要：目的　比较2024年河南省郑州市和洛阳市污水中严重急性呼吸综合征冠状病毒2型（SARS-CoV-2）检出率、不同靶基因浓度时间变化及变异株构成差异，为区域污水监测工作提供数据参考。**方法**　于2024年1—12月，在郑州市、洛阳市主城区分别选取5、4座生活污水处理厂的主要进水渠道开展连续53周污水样本采集。采用全自动污水采样器在24 h内采集流量比例混合样本，经聚乙二醇沉淀法富集浓缩病毒，采用逆转录实时荧光定量PCR检测N基因和ORF1ab基因，计算SARS-CoV-2检出率，并以标准物质制备标准曲线进行定量分析。采用Illumina测序仪对Ct值≤34的阳性样本进行全基因组测序，分析变异株构成。**结果**　2024年采集并检测郑州市、洛阳市污水样本690份，检出SARS-CoV-2阳性样本477份，检出率为69.13%；N基因和ORF1ab基因浓度M（Q_R）分别为3.43（7.31）、1.24（5.93）copies/mL。郑州市污水SARS-CoV-2检出率为62.82%，低于洛阳市污水的75.82%（P<0.05）；N基因和ORF1ab基因浓度M（Q_R）分别为5.98（10.32）、5.16（17.33）copies/mL，高于洛阳市的2.01（3.81）、0.73（1.03）copies/mL（均P<0.05）。两市污水SARS-CoV-2检出率呈现前期高位、中期波动和后期回落的时间特征。郑州市SARS-CoV-2浓度于第21、28和32周出现3个高峰，ORF1ab基因浓度最高达242.05 copies/mL；洛阳市污水SARS-CoV-2浓度整体较低，于第10、18和33周出现3个高峰。全基因组测序结果显示，两市污水SARS-CoV-2分型均以奥密克戎变异株及其亚分支为主，其中郑州市检出JN.1、BA.2、LB.1、LA.1、LA.2、XDV、KP.1、KP.4和XDP 9种亚分支，洛阳市检出JN.1、EG.5、XBB、XBN、HK.3和BA.2 6种亚分支；郑州市污水监测后期优势型别由JN.1向XDV、KP.1等更替，洛阳市以JN.1为主。**结论**　2024年郑州市和洛阳市污水中SARS-CoV-2检出率、病毒浓度及变异株构成存在区域差异，洛阳市病毒检出率较高，郑州市病毒浓度较高、变异株亚分支多样且更替较活跃。

关键词：污水；严重急性呼吸综合征冠状病毒2型；基因测序；监测

中图分类号：R12；R511　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-5087（2026）10-1026-06

Surveillance results of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in sewage from Zhengzhou City and Luoyang City

ZHANG Xinye, ZHAO Qiuyan, MA Xiaoyan, PENG Jing, WEI Yuan, YAN Xiaona, YANG Siyu, ZHANG Jie

Henan Provincial Center for Disease Control and Prevention, Zhengzhou, Henan 450016, China

Abstract: Objective　To compare the detection rate of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2), the temporal changes in the concentrations of different target genes and the composition of variants in sewage in Zhengzhou City and Luoyang City of Henan Province in 2024, so as to provide data references for regional sewage surveillance. **Methods**　From January to December 2024, the main inlet channels of 5 and 4 domestic wastewater treatment plants were selected in the main urban areas of Zhengzhou City and Luoyang City, respectively, for continuous sewage sample collection for 53 weeks. An automatic sewage sampler was used to collect flow-proportional mixed samples within

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.10.011

基金项目：河南疾控科技攻关专项计划项目（HNCDCYC202513，HNCDCYC202561）；河南省医学科技攻关计划联合共建项目（LHGJ20260166）

作者简介：张欣烨，硕士，副主任技师，主要从事环境健康危害因素监测和理化检验等工作

通信作者：张杰，E-mail：zhangjie_2081@163.com

24 h, and the virus was enriched and concentrated by the polyethylene glycol precipitation method. The N gene and ORF1ab gene were detected by reverse transcription real-time fluorescence quantitative PCR, and the detection rate of SARS-CoV-2 was calculated. A standard curve was prepared with standard substances for quantitative analysis. The Illumina sequencer was used for whole-genome sequencing of positive samples with Ct values ≤34, and the composition of variants was analyzed. **Results** A total of 690 sewage samples were collected and tested in Zhengzhou City and Luoyang City in 2024, and 477 SARS-CoV-2-positive samples were detected, with a detection rate of 69.13%. The median concentrations of N gene and ORF1ab gene were 3.43 (interquartile range, 7.31) copies/mL and 1.24 (interquartile range, 5.93) copies/mL, respectively. The SARS-CoV-2 detection rate in Zhengzhou City was lower than in Luoyang City (62.82% vs. 75.82%, $P<0.05$). The median concentrations of N gene and ORF1ab gene in Zhengzhou City were 5.98 (interquartile range, 10.32) copies/mL and 5.16 (interquartile range, 17.33) copies/mL, respectively, which were higher than 2.01 (interquartile range, 3.81) copies/mL and 0.73 (interquartile range, 1.03) copies/mL in Luoyang City (both $P<0.05$). The SARS-CoV-2 detection rate in both cities showed a temporal trend of a high level in the early stage, fluctuation in the middle stage, and decline in the late stage. The SARS-CoV-2 concentration in Zhengzhou City peaked at weeks 21, 28 and 32, with the maximum ORF1ab gene concentration reaching 242.05 copies/mL. The overall SARS-CoV-2 concentration in Luoyang City was relatively low, with three peaks appearing at weeks 10, 18 and 33. Whole-genome sequencing results showed that Omicron variants and their sublineages were dominant in SARS-CoV-2 lineages from sewage in both cities. Nine sublineages were detected in Zhengzhou City, including JN.1, BA.2, LB.1, LA.1, LA.2, XDV, KP.1, KP.4 and XDP; six sublineages were detected in Luoyang City, including JN.1, EG.5, XBB, XBN, HK.3 and BA.2. The dominant lineage in Zhengzhou City shifted from JN.1 to XDV, KP.1 and other sublineages in the late surveillance period, while JN.1 remained the dominant lineage in Luoyang City. **Conclusions** There were regional differences in SARS-CoV-2 detection rate, viral concentration and variant composition in sewage between Zhengzhou City and Luoyang City in 2024. Luoyang City had a higher viral detection rate, while Zhengzhou City had higher viral concentration and more active variant turnover.

Keywords: sewage; severe acute respiratory syndrome coronavirus 2; gene sequencing; surveillance

污水流行病学（wastewater-based epidemiology，WBE）以城市污水为监测载体，通过对污水中病原体核酸的定性、定量检测及基因组测序分析，估算区域内人群的感染水平与病原体谱系[1-2]。与以个体就诊和实验室确诊为基础的临床监测相比，WBE具有非侵入性、覆盖全人群、不依赖个体检测意愿和可识别无症状感染者等优势[3]。严重急性呼吸综合征冠状病毒2型（severe acute respiratory syndrome coronavirus 2，SARS-CoV-2）是引发新型冠状病毒感染的病原体，传播隐匿、变异频繁，感染者病毒核酸可随粪便排出并进入城市污水管网[4]；其关键抗原位点的持续变异不断产生新的流行谱系，对公共卫生监测的时效性提出了更高要求[5]。我国新型冠状病毒感染已转入“乙类乙管”常态化监测阶段，监测重心转向对病毒流行强度与变异趋势的常态化追踪[6]。河南省既往有关SARS-CoV-2监测以临床病例及境外输入病例的全基因组测序为主[7]，其检测规模受就诊意愿与采样覆盖范围限制，难以反映社区层面的真实感染水平。WBE作为维持常态化有效监测的重要补充手段，以相对较低的成本实现对社区感染水平的持续跟踪。

郑州市作为国家中心城市和交通枢纽，洛阳市作为河南省副中心城市，两市在人口规模、流动性及城市管网结构上存在显著差异。比较两市污水中SARS-CoV-2检出特征，有助于了解不同城市功能定位下病毒的分布差异。本研究基于2024年郑州市和洛阳市连续53周的污水中SARS-CoV-2监测数据，分析污水病毒检出率、不同靶基因浓度时间变化及变异株构成，为优化区域污水监测体系提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 监测点及周期

选择郑州市惠济区、高新技术产业开发区、二七区、郑东新区、管城回族区的5座生活污水处理厂和洛阳市瀍河回族区、西工区、洛龙区、伊滨区的4座生活污水处理厂作为固定监测点位，覆盖两市主城区核心区域，覆盖人口分别约为429万人和282万人。监测周期为2024年1月1日—12月31日，于每周一固定时间采样，共53个监测周次。

1.2 主要试剂与仪器

全自动污水采样器（HK-8840，北京华科仪科技股份有限公司）；高速冷冻离心机（CR-22G，日本日立公司）；病毒核酸提取仪（西安天隆科技有限公司GeneRotex 96）；实时荧光定量PCR仪（CFX96，美

国 Bio-Rad）；Illumina 测序仪（MiSeq，美国 Illumina）。SARS-CoV-2 核酸提取试剂盒购自西安天隆科技有限公司，SARS-CoV-2 荧光 PCR 试剂盒购自江苏硕世生物科技股份有限公司。聚乙二醇（分子生物学级）、NaCl（分子生物学级）均购自生工生物工程（上海）股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 污水样本采集

采样工作在每个污水处理厂的主要进水渠道进行。采用全自动污水采样器在 24 h 内采集流量比例混合样本，每小时采集 100 mL 等分试样，累计 2 400 mL。采样结束后，将等分试样均质化处理，形成具有代表性的混合样本。取 500 mL 子样本于 4 ℃保存，并在 2 h 内运送至实验室，以确保病毒完整性。

1.3.2 样本前处理

依据 WS/T 10042—2025《污水中新型冠状病毒监测技术规范》[8]，对污水样本进行病毒灭活、富集浓缩和定量检测。取 500 mL 待检污水样本，置于密封无酶离心管，于 60 ℃保温 30 min 进行病毒灭活处理，全程避免样本交叉污染。灭活完成后立即将样本冷却至室温，于 4 ℃、2 000×g 离心 2 min，去除大颗粒悬浮物及泥沙杂质，收集澄清上清液备用。采用聚乙二醇沉淀法进行病毒富集浓缩：向预先加入 4.0 g 聚乙二醇和 0.8 g NaCl 的 50 mL 无酶离心管中加入 40 mL 上清液，涡旋振荡至固体完全溶解，于 4 ℃静置孵育 30 min 后 4 800×g 离心 45 min，缓慢弃去上清液，留存 1 mL 液体反复吹吸重悬沉淀，瞬时离心后转移至 1.5 mL 离心管；于 4 ℃、20 000×g 高速离心 8 min，弃去上清液至剩余 0.5 mL，涡旋混匀后获得病毒浓缩液，于 0～4 ℃保存，24 h 内提取 RNA。

1.3.3 污水 SARS-CoV-2 定量

取适量病毒浓缩液，采用病毒核酸提取仪提取 RNA。采用双靶标基因检测[9-10]，针对 N 基因和 ORF1ab 基因，按照 SARS-CoV-2 荧光 PCR 试剂盒说明书步骤配制扩增反应体系并进行逆转录实时荧光定量 PCR 检测。采用中国计量科学研究院研制的新型冠状病毒核糖核酸基因组标准物质制备标准曲线。当扩增效率为 90%～110% 且 R^2≥0.99 时，该标准曲线有效。

结合实验操作流程，将 SARS-CoV-2 浓度换算为污水样本中 SARS-CoV-2 浓度。为消除各监测点污水流量差异对 SARS-CoV-2 浓度的影响，对每周各监测点的 SARS-CoV-2 浓度进行流量加权归一化处理[11-12]。

1.3.4 SARS-CoV-2 全基因组测序

采用 Illumina 测序仪对逆转录实时荧光定量 PCR 检测 Ct 值≤34 的阳性样本进行全基因组测序。采用北京微未来科技有限公司提供的扩增试剂靶向扩增样本并构建文库，采用 Illumina 测序仪及其配套测序试剂完成上机测序。变异株构成比按某变异株序列数占该样本成功分型 SARS-CoV-2 序列总数的百分比计算。

1.4 统计分析

采用 Excel 2021 软件录入、清洗与整理数据，建立污水监测数据库。采用 R 4.5.0 软件统计分析。定量资料不服从正态分布的采用中位数和四分位数间距［M（Q_R）］描述，组间比较采用 Wilcoxon 秩和检验；定性资料采用相对数描述，组间比较采用 χ^2 检验。检验水准 α=0.05。

2 结 果

2.1 污水 SARS-CoV-2 检出情况

2024 年采集并检测郑州市、洛阳市污水样本分别为 355、335 份，共 690 份；检出 SARS-CoV-2 阳性样本 477 份，检出率为 69.13%；N 基因和 ORF1ab 基因浓度 M（Q_R）分别为 3.43（7.31）、1.24（5.93）copies/mL。郑州市污水检出 SARS-CoV-2 阳性样本 223 份，检出率为 62.82%；洛阳市污水检出 SARS-CoV-2 阳性样本 254 份，检出率为 75.82%。洛阳市污水 SARS-CoV-2 检出率高于郑州市（χ^2=13.658，P<0.001）。郑州市污水 N 基因和 ORF1ab 基因浓度 M（Q_R）分别为 5.98（10.32）、5.16（17.33）copies/mL，高于洛阳市的 2.01（3.81）、0.73（1.03）copies/mL（Z=3.462、4.021，均 P<0.001）。

2.2 污水 SARS-CoV-2 时间分布

2024 年郑州市污水 SARS-CoV-2 检出率波动幅度较大，阶段性明显：第 1—18 周检出率保持在 60%～100% 的较高水平，其中第 16—17 周降至 66.67%；第 19—36 周检出率波动显著，第 25 周降至 11.11%；第 37 周后检出率明显下降，第 39—47 周连续 9 周未检出。洛阳市第 1—36 周 SARS-CoV-2 检出率维持较高水平，平均检出率达 96.05%；第 39 周检出率首次降至 0，之后各周检出率均低于 50%。见图 1。

2024 年郑州市污水 SARS-CoV-2 浓度出现 3 个高峰：第 1 个高峰在第 21 周，ORF1ab 基因浓度达 125.09 copies/mL；第 2 个高峰在第 28 周，ORF1ab 基因浓度升至 138.51 copies/mL；第 3 个高峰为全年最高峰，在第 32 周，ORF1ab 基因浓

度达 242.05 copies/mL，N 基因浓度同步升至 112.06 copies/mL。洛阳市污水 SARS-CoV-2 浓度整体较低，但波动明显，全年出现 3 个峰值，分别在第 10 周、第 18 周和第 33 周。见图 2。

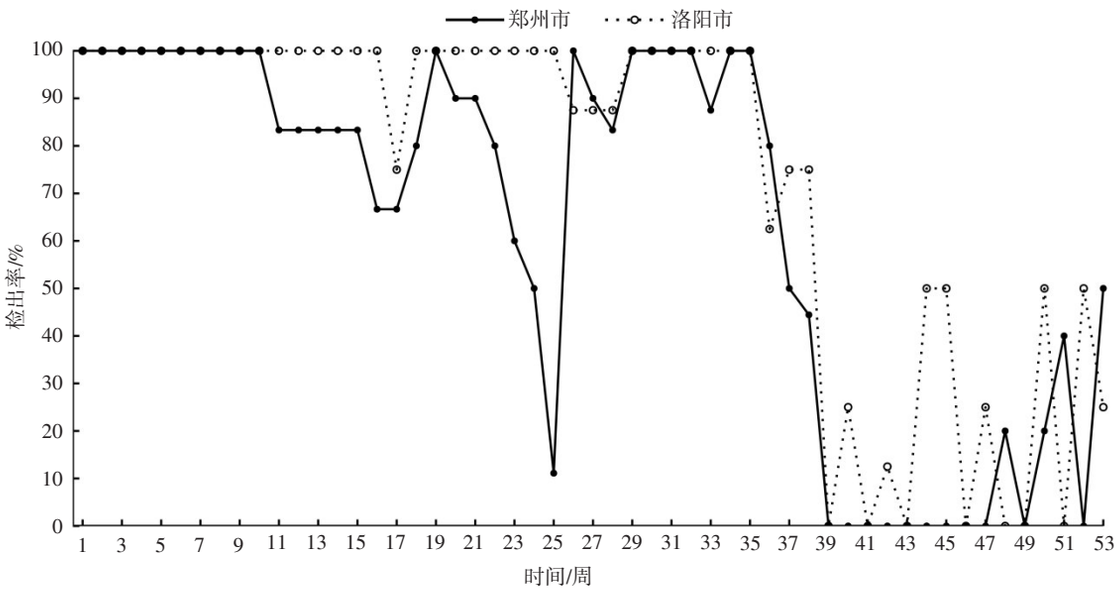
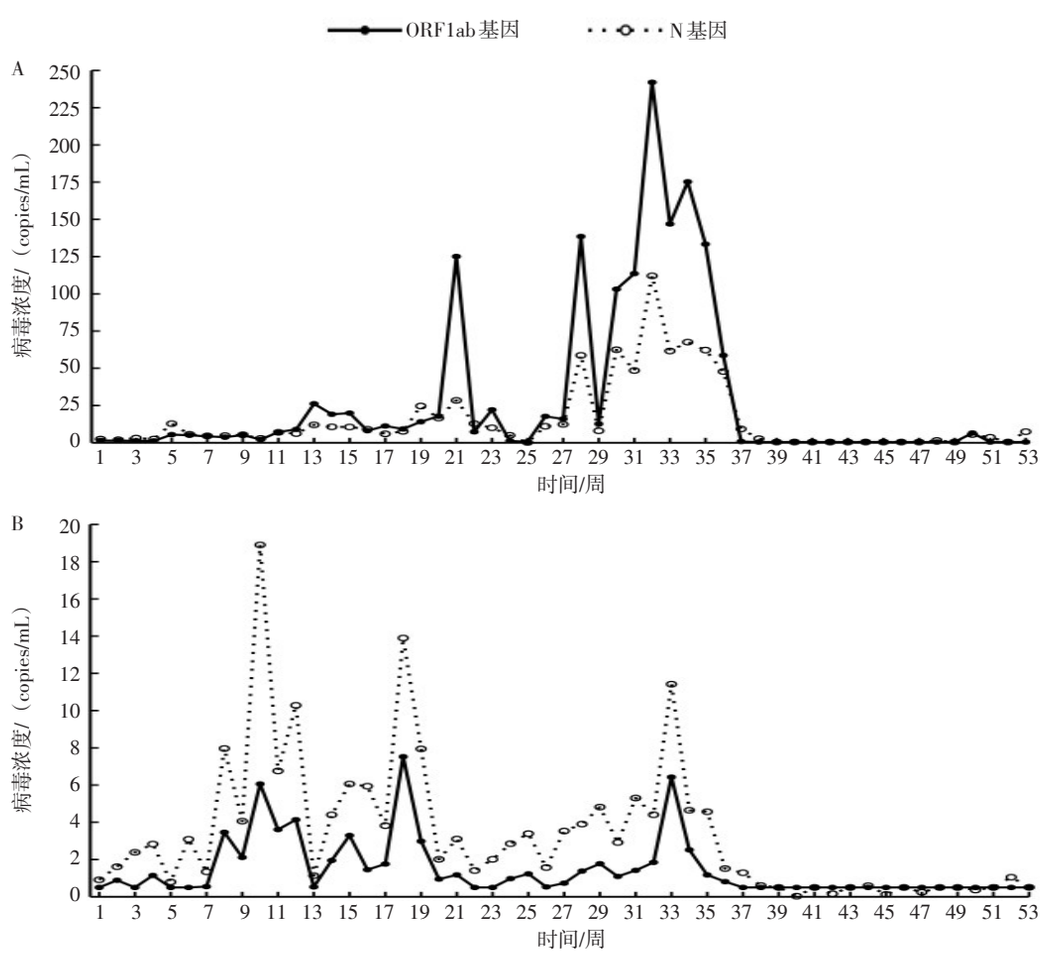


图 1　2024 年郑州市和洛阳市污水 SARS-CoV-2 检出率

Figure 1　Detection rate of SARS-CoV-2 in sewage from Zhengzhou City and Luoyang City in 2024



注：图A为郑州市，图B为洛阳市。

图 2　2024 年郑州市和洛阳市污水 SARS-CoV-2 ORF1ab 基因和 N 基因浓度

Figure 2　Concentrations of SARS-CoV-2 ORF1ab gene and N gene in sewage from Zhengzhou City and Luoyang City in 2024

2.3 SARS-CoV-2 全基因组测序结果

8 份样本 Ct 值≤34，其中郑州市 5 份、洛阳市 3 份。郑州市、洛阳市污水 SARS-CoV-2 分型均以奥密克戎变异株及其亚分支为主。郑州市共检出 9 种亚分支，包括 JN.1、BA.2、LB.1、LA.1、LA.2、XDV、KP.1、KP.4 和 XDP。其中，5 月 20 日检出阳性样本以 JN.1 及其亚分支（16.19%）和 BA.2 及其亚分支（8.13%）为主，同时检出 LB.1（3.22%）、LA.1（2.17%）和 LA.2（2.17%），其他未分型或低丰度变异株构成比为 68.12%；7 月 29 日检出阳性样本以 JN.1 及其亚分支（68.59%）和 XDV 及其亚分支（30.59%）为主，其他未分型或低丰度变异株构成比不足 1%；8 月 5 日检出阳性样本以 KP.1 及其亚分支（45.73%）、JN.1 及其亚分支（20.34%）和 XDV 及其亚分支（19.66%）为主，KP.4 构成比为 6.67%，其他未分型或低丰度变异株构成比为 7.60%；8 月 7 日检出阳性样本以 JN.1 及其亚分支（80.27%）为主，XDP 构成比为 16.67%，LB.1 构成比为 1.17%，其他未分型或低丰度变异株构成比为 1.89%；8 月 19 日检出阳性样本以 XDV 及其亚分支（44.44%）和 JN.1 及其亚分支（29.63%）为主，LB.1 构成比为 14.81%，其他未分型或低丰度变异株构成比为 11.11%。

洛阳市共检出 6 种亚分支，包括 JN.1、EG.5、XBB、XBN、HK.3 和 BA.2。其中，2 月 20 日检出阳性样本以 JN.1 及其亚分支（86.97%）为主，EG.5（3.43%）、XBB（1.41%）和 XBN（1.07%）构成比较低，其他未分型或低丰度变异株构成比为 7.12%；4 月 29 日检出阳性样本以 HK.3（35.41%）、JN.1（28.44%）和 BA.2（26.25%）为主，XBB 构成比为 8.26%，其他未分型或低丰度变异株构成比为 1.64%；5 月 23 日检出阳性样本以 JN.1 及其亚分支（97.39%）为主，其他未分型或低丰度变异株构成比为 2.61%。

3 讨 论

本研究基于 2024 年郑州市、洛阳市连续监测的 690 份污水样本，采用聚乙二醇沉淀法富集浓缩、双靶标逆转录实时荧光定量 PCR 检测，并经流量加权归一化处理和全基因组测序，系统比较了两市污水中 SARS-CoV-2 的检出率、N 基因与 ORF1ab 基因浓度时间分布、变异株构成。结果显示，两市污水 SARS-CoV-2 检出率为 69.13%，洛阳市检出率高于郑州市，但郑州市 N 基因、ORF1ab 基因浓度均高于洛阳市；变异株均以奥密克戎变异株及其亚分支为主，但郑州市变异株亚分支多样、洛阳市以 JN.1 及其亚分支为主。本研究结果为后续建立本地化污水监测网络提供了基础数据，污水监测未来可拓展至流行性感冒病毒、呼吸道合胞病毒等多病原监测；上述结果提示，污水监测可作为临床监测的补充手段，为不同层级城市的监测布局、区域疫情研判提供参考。

2024 年郑州市和洛阳市污水 SARS-CoV-2 检出率为 69.13%，高于截至 2023 年 2 月的全球市政污水 SARS-CoV-2 阳性率的平均水平（53.7%）[13] 和我国贵阳市 2023 年 2—12 月城市污水监测结果（56.77%）[14]，低于郑州市 2023 年 3—7 月城市污水监测结果（89.09%）[10]，可能与监测时期、采样点设置、管网覆盖范围及样本处理流程存在差异有关。郑州市和洛阳市 SARS-CoV-2 检出率总体呈现前期高位、中期波动和后期回落的特征，但郑州市检出率低于洛阳市，可能与污水管网条件、污水理化参数、采样点布设位置及服务人口规模等方面的差异有关，不能简单归因于社区感染水平不同。

在基因浓度方面，郑州市 N 基因、ORF1ab 基因浓度均高于洛阳市，且郑州市 ORF1ab 基因浓度于第 21、28 和 32 周出现 3 个高峰，最高达 242.05 copies/mL，提示郑州市病毒浓度整体较高且存在间歇性高强度排放，污水病毒载量的时间波动更为剧烈。N 基因浓度时间变化与 ORF1ab 基因基本一致，与双靶标平行检测可提高污水监测结果稳定性的报道 [9] 相符。既往研究报道，污水病毒浓度可与区域报告病例数同步变化 [12]，但本研究未匹配同期临床数据，尚无法进行验证。

全基因组测序结果显示，郑州市和洛阳市污水 SARS-CoV-2 均属奥密克戎谱系：郑州市检出 JN.1、BA.2、LB.1、LA.1、LA.2、XDV、KP.1、KP.4 和 XDP 9 种亚分支，洛阳市检出 JN.1、EG.5、XBB、XBN、HK.3 和 BA.2 6 种亚分支，郑州市变异株亚分支多样化。郑州市监测后期阳性样本中 XDV、KP.1 等亚分支构成比升高，优势型别呈现由 JN.1 向 XDV、KP.1 等更替的趋势；洛阳市则以 JN.1、HK.3 和 BA.2 为主，亚分支构成相对集中。该更替过程与国外污水监测报道的奥密克戎亚分支持续更替规律 [15] 一致，亦表明污水监测有助于捕捉新出现谱系在人群中流行的早期信号 [16]。

本研究存在一定局限性。本研究为 WBE 的基础监测研究，尚未匹配同期临床确诊数据，暂未开展

污水病毒浓度与人群发病水平、健康结局的量化关联分析，无法直接评估污水监测对人群健康的预警效能[17-18]。病毒浓度仅通过流量加权进行归一化校正，未采用粪便指示病毒（如辣椒轻斑驳病毒）进行内参标准化，可能引入定量偏差。全基因组测序仅针对Ct值≤34的阳性样本开展，符合测序条件的样本量较少，且时间覆盖不均，限制了对变异株谱系动态变化的全面解析。

参考文献

[1] Zhang Q F, Gao C Z, Ge X Y, et al.Tracking viral variants by wastewater surveillance, from laboratory diagnosis towards on-site monitoring: lessons learned from the SARS-CoV-2 pandemic [J/OL].J Environ Manag, 2026, 404 [2026-09-19].https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129353.

[2] Munteanu V, Saldana M A, Dreifuss D, et al. SARS-CoV-2 wastewater genomic surveillance: approaches, challenges, and opportunities [J/OL].Genome Biol, 2026, 27 (1) [2026-09-19].https://doi.org/10.1186/s13059-025-03927-6.

[3] Alhama J, Maestre J P, Martín MÁ, et al.Monitoring COVID-19 through SARS-CoV-2 quantification in wastewater: progress, challenges and prospects [J].Microb Biotechnol, 2022, 15 (6): 1719-1728.

[4] Hu B, Guo H, Zhou P, et al.Characteristics of SARS-CoV-2 and COVID-19 [J].Nat Rev Microbiol, 2021, 19 (3): 141-154.

[5] Holmes E C.The emergence and evolution of SARS-CoV-2 [J].Annu Rev Virol, 2024, 11 (1): 21-42.

[6] Ge J B.The COVID-19 pandemic in China: from dynamic zero-COVID to current policy [J].Herz, 2023, 48 (3): 226-228.

[7] 毋碧聪，宋云，卢世栋，等.河南省2021年境外输入SARS-CoV-2全基因组测序分析[J].郑州大学学报（医学版），2023，58（5）：623-627.

[8] WS/T 10042—2025 污水中新型冠状病毒监测技术规范[S].

[9] Mannarà G, Martinelli M, Giubbi C, et al.Wastewater surveillance for SARS-CoV-2 in northern Italy: an evaluation of three different gene targets [J/OL].Microorganisms, 2025, 13 (2) [2026-09-19].https://doi.org/10.3390/microorganisms13020236.

[10] 董柯，邵束钰，许太彬，等.郑州市城市污水中新型冠状病毒监测结果[J].现代疾病预防控制，2024，35（2）：86-90.

[11] Zheng X W, Leung K, Xu X Q, et al.Wastewater surveillance provides spatiotemporal SARS-CoV-2 infection dynamics [J].Engineering, 2024, 40: 70-77.

[12] Lyu L S, Liu X Y, Sun Q L, et al.Association between SARS-CoV-2 levels in urban wastewater and reported COVID-19 cases in Changsha, Central China [J/OL].BMC Infect Dis, 2025, 25 (1) [2026-09-19].https://doi.org/10.1186/s12879-025-11633-8.

[13] Cheng K Y, Lyu Y, Li C K, et al.Meta-analysis of the SARS-CoV-2 positivity rate in municipal wastewater [J/OL].Environ Geochem Health, 2024, 46 (4) [2026-09-19].https://doi.org/10.1007/s10653-024-01895-7.

[14] 黄金金，倪德航，徐素芹，等.贵阳市2023年1 034份城市污水新型冠状病毒监测结果分析[J].现代预防医学，2024，51（23）：4392-4397.

[15] Nappo A, Petricciuolo M, Berno G, et al.One-year monitoring of the evolution of SARS-CoV-2 omicron subvariants through wastewater analysis (central Italy, August 2023-July 2024) [J/OL].Life (Basel), 2025, 15 (6) [2026-09-19].https://doi.org/10.3390/life15060850.

[16] Veneri C, Brandtner D, Mancini P, et al.Tracking the Spread of the BA.2.86 lineage in Italy through wastewater analysis [J].Food Environ Virol, 2024, 16 (4): 449-457.

[17] Petala M, Kostoglou M, Karapantsios T, et al.Relating SARS-CoV-2 shedding rate in wastewater to daily positive tests data: a consistent model based approach [J/OL].Sci Total Environ, 2022, 807 (Pt2) [2026-09-19].https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150838.

[18] Li X, Zhang S, Shi J, et al.Uncertainties in estimating SARS-CoV-2 prevalence by wastewater-based epidemiology [J/OL].Chem Eng J, 2021, 415 [2026-09-19].https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129039.

收稿日期：2026-06-02 **修回日期**：2026-09-19 **本文编辑**：徐亚慧