

凌思源. 污水处理厂药物污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(4): 95-103. Ling Siyuan. Characteristics and ecological risk assessment of drug contamination in wastewater treatment plants[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(4): 95-103.

污水处理厂药物污染特征及生态风险评估

凌思源

(上海市环境科学研究院, 生态环境部新污染物环境健康影响评价重点实验室, 上海 200233)

摘要: 针对后疫情时代药物使用上升所引起的生态环境风险, 该研究建立了污水系统中32种药物的协同监测方法, 明确了2023年呼吸道病毒流行对污水系统进水、排水以及下游地表水中抗病毒等药物含量的影响。研究表明, 呼吸道病毒流行期间由于药物使用量增大, 污水处理厂进水中药物浓度增加。大部分药物能经污水处理设施有效去除, 而抗病毒药物无法被有效去除, 导致污水处理厂成为地表水中抗病毒药物的重要来源。呼吸道病毒流行间接导致污水处理厂下游地表水中抗病毒药物水生生态风险升高。在未来应持续开展典型药物的长期协同监测研究, 掌握抗病毒药物的排放特征与环境负荷, 深入开展典型药物生态毒理和生态风险评估研究, 并同步开发新污染物去除工艺提升污水厂新污染物治理水平。

关键词: 污水系统; 呼吸道病毒流行; 新污染物; 生态风险评估

中图分类号: X832 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1971.24.338 文章编号: 1003-6504(2025)04-0095-09

Characteristics and Ecological Risk Assessment of Drug Contamination in Wastewater Treatment Plants

LING Siyuan

(Key Laboratory of Environmental Health Impact Assessment of Emerging Contaminants, Ministry of Ecology and Environment, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: In the post-epidemic era, the ecological system is facing more risk caused by the rising pharmaceutical use. This study has established a detection method for 32 drugs in the influent, effluent and surface water. The effect of respiratory virus epidemic in 2023 on the antiviral drug concentration in influent and effluent of wastewater sewage plants (WWTPs) and downstream surface water has been studied. The results indicated that during the outbreak of respiratory viruses, the concentration of pharmaceutical in the influent increased due to the increase of pharmaceutical usage. Most drugs can be effectively removed during wastewater treatment, while antiviral drugs cannot be effectively removed, and hence WWTPs have become an important source to the surface water. Subsequently, respiratory virus epidemic indirectly increased the aquatic ecological risk of antiviral drugs in WWTPs downstream. In the future, typical drugs should be into continuously surveillance. The emission characteristics and environmental load of antiviral drugs should be studied. More research on ecotoxicological study and ecological risk assessment of selected drugs is also required. Concurrently, the development of treatment techniques is necessary to enhance the removal efficiency of emerging pollutants.

Key words: sewage system; respiratory virus epidemic; emerging contaminants; ecological risk assessment

在新冠病毒流行期间, 许多国家实施了非药物干预措施以减轻或阻止新冠病毒的传播, 但在相关措施放松和解除后, 2022-2023年全球在非高峰季节观察到常见呼吸道病原体(如呼吸道合胞病毒和流感病毒)流行的异常增加^[1]。2023年1月起我国对新冠病毒感染从“乙类甲管”调整为“乙类乙管”, 当年总体呈

现出“新冠病毒”、“甲流”、“乙流”、“呼吸道合胞病毒”等多种传染病交替甚至叠加流行的模式。研究显示, 非药物干预措施施行期间流感病毒患病率下降所引起的免疫落差可能是2023年呼吸道感染病例大幅增加的一个重要因素^[2]。

污水流行病学方法被用于脊髓灰质炎病毒传播

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-12-14; 修回 2025-02-26

基金项目: 上海市生态环境局科研项目(沪环科[2024]第4号); 上海市第六轮公共卫生体系建设三年行动计划(2023-2025)环境与职业卫生重点学科建设项目(GWVI-11.1-41); 上海市2022年度“科技创新行动计划”科学仪器领域项目(22142202000)

作者简介: 凌思源(1994-), 男, 博士, 研究方向为环境健康与生态毒理学, (电子信箱)lingsy@saes.sh.cn。

的控制^[3]和探查贩毒网络,追踪区域涉毒犯罪^[4]。新冠疫情早期,研究人员便发现患者排泄物核酸阳性,此后在粪便与尿液中分离出新冠病毒^[5,6],引发了世界范围内应用污水流行病学追踪地区病毒流行情况的探索。研究人员还发现污水中的药物检出情况与新冠疫情有一定关联,当新冠病毒感染住院患者人数增加时,就会检出瑞德西韦;当患者使用呼吸机时,就会检出地塞米松^[7],这说明呼吸道病毒流行可能会影响生态环境。新冠疫情爆发期间由于大量消毒剂的使用,发光细菌试验结果显示水中有机物急性毒性上升^[8]。而在后疫情时代,呼吸道疾病的频繁流行造成各种处方和非处方药物的大量使用。大量药物以原药或代谢物的形式排出体外,进入污水处理系统,增加了污水处理厂的药物负荷。全球多个国家和地区已经在污水、地表水环境中检出不同浓度水平的抗病毒药物,部分药物残留及其代谢产物会对水体中生物产物较大影响^[9]。越来越多的研究关注新冠治疗药物的环境行为和污染现状。利巴韦林具有较强的迁移性,而利托那韦则具有很低的毒性阈值^[10],西班牙地表水中阿奇霉素浓度在新冠病毒流行期间增加了200多倍^[11]。

药物属于国内外关注的新污染物,其中抗菌药已列入《新污染物重点管控清单(2023年版)》。目前,常

规污水处理设施对各种药物的去处能力迥异,其去除效率受到去处工艺、污泥龄、微生物群落结构等多种因素影响,现行污水排放标准中也缺乏各类抗病毒药物等新污染物的排放限值^[12]。因此,很多药物的排放动态和生态风险处于不受监管、甚至未知的状态。随着各类药物大量使用,很可能会间接导致污水厂受纳水体中部分药物含量上升,并引发水生态环境风险。本文旨在通过污水监测,研究呼吸道病毒流行期间,污水处理厂抗病毒等药物的污染特征以及生态环境风险,为呼吸道病毒流行管控和药源新污染物的生态健康风险控制提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

选取上海某市政污水处理厂为研究对象,服务人口约50余万人,污水管道停留时间较短(仅几小时)并且主要泵站流向清晰,执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标准。根据呼吸道病毒流行情况,2023年1-12月,平均每2周采集一次(共24次)样品,每次采集进水、排水和污水厂排口下游1 km处的地表水样品以测定药物含量。选择32种呼吸道常用药物作为研究的目标药物(表1)。

表1 目标药物及质谱多反应监测条件
Table 1 Multiple reaction monitoring method of target pharmaceuticals

序号	类别	名称	保留时间/min	前级离子(<i>m/z</i>)	反应离子(<i>m/z</i>)	锥孔电压/V	碰撞能量/V
1	鼻炎用药	赛洛唑啉	5.93	245.1	189.0 ⁺	10	25
					161.1		25
2	鼻炎用药	氯雷他定	6.88	382.8	336.9 ⁺	10	20
					266.9		30
					341.0 ⁺		30
3	鼻炎用药	西替利嗪	6.19	388.9	298.0	10	35
					200.9 ⁺		20
					166.0		40
4	鼻炎用药	马来酸氯苯那敏	5.13	275.0	200.9 ⁺	10	20
					166.0		40
					230.1 ⁺		20
5	抗病毒药	阿兹夫定	1.15	287.0	167.0	10	45
					111.94 ⁺		30
6	抗病毒药	利托那韦	8.05	720.9	63.0	10	20
					295.9 ⁺		20
7	抗病毒药	奈玛特韦	7.24	500.3	425.9	10	18
					302.0 ⁺		18
					425.9		15
8	抗病毒药	利巴韦林	0.94	224.9	319.0 ⁺	10	20
					111.0		35
					113.0 ⁺		30
9	抗病毒药	奥司他韦	5.25	313.1	96.0	10	10
					113.0 ⁺		10
					165.9 ⁺		15
10	退烧药	对乙酰氨基酚	2.37	151.8	119.9	10	20
					110.1 ⁺		20
					92.0		15
11	退烧药	布洛芬	2.36	204.9	111.1 ⁺	10	20
					93.0		15
					191.1 ⁺		-8
11	退烧药	布洛芬-D3	2.36	208.2	161.2	-33	-21
					161.0 ⁺		-10
					164.1	-20	-10

表1(续)

序号	类别	名称	保留时间/min	前级离子(<i>m/z</i>)	反应离子(<i>m/z</i>)	锥孔电压/V	碰撞能量/V
12	退烧药	乙酰水杨酸	0.68	136.6	93.0 [*] 65.0	-30	-34 -40
		乙酰水杨酸-D2	0.68	140.6	96.5 [*] 97.4	-40	-34 -35
13	止咳药	右美沙芬	5.57	272.0	147.0 [*] 121.0	10	30 30
		右美沙芬-D3	5.57	275.1	218.0 [*] 150.0	10	25 30
14	止咳药	盐酸克仑特罗	4.81	276.9	202.3 [*] 231.9	10	15 15
		克仑特罗-D8	4.81	286.0	203.9 [*] 268.0	10	18 12
15	止咳药	溴己新	5.99	374.8	114.1 [*] 261.7	10	15 25
		溴己新-D3	5.99	379.9	117.1 [*] 263.7	10	20 25
16	止咳药	氨溴索	5.01	378.8	114.11 [*] 263.7	10	15 15
		氨溴索-D5	5.01	383.8	263.6 [*] 121.1	10	20 18
17	止咳药	乙酰半胱氨酸	1.56	164.0	121.9 [*]	10	8
		乙酰半胱氨酸-D3	1.56	166.7	123.0 [*]	10	10
18	抗菌药	地喹氯铵克菌定	4.82	262.9	206.9 [*] 246.1	10	15 15
		阿奇霉素	4.85	749.11	573.1 [*] 591.0	10	35 40
19	抗菌药		阿奇霉素-13C,D3	4.85	753.1	162.1 [*] 595.1	10
		20	抗菌药	头孢拉定	4.31	350.0	175.9 [*] 157.9
头孢拉定-D5	4.31			355.1	181.0 [*] 157.9	10	15 10
21	抗菌药	左氧氟沙星	4.33	362.1	318.0 [*] 261.0	10	25 36
		左氧氟沙星-D8	4.33	370.2	326.1 [*] 265.0	10	25 35
22	抗菌药	头孢克洛	3.67	368.0	173.9 [*] 106.0	10	18 25
		头孢克洛-D5	3.67	373.1	179.0 [*] 111.0	10	20 25
23	抗菌药	头孢地尼	4.01	396.0	227.0 [*] 125.9	10	20 35
		头孢地尼-13C, 15N2	4.01	399.0	223.0 [*] 128.9	10	20 35
24	抗菌药	莫西沙星	4.96	402.1	384.0 [*] 358.1	10	30 25
		莫西沙星-D3	4.96	405.2	387.0 [*] 361.0	10	30 25
25	抗菌药	头孢唑肟	3.99	384.0	226.9 [*] 125.9	10	25 30
		26	抗菌药	头孢克肟	4.46	454.1	284.9 [*] 125.9
27	抗菌药			头孢噻肟钠	4.49	456.1	395.9 [*] 166.9
		头孢噻肟钠-D3	4.49	459.1	399.0 [*] 327.0	10	14 19
28	抗菌药	头孢泊肟酯	6.89	558.1	409.8 [*] 240.9	10	20 25
		29	抗菌药	头孢他美酯	6.97	512.1	240.9 [*] 397.9
30	抗菌药			头孢替坦	4.57	575.8	459.9 [*] 431.6
		31	抗菌药	头孢地嗪	5.07	585.1	395.9 [*] 323.9
32	抗菌药			头孢哌酮	5.20	646.1	142.9 [*] 529.9
		头孢哌酮-D5	5.20	651.1	147.9 [*] 535.0	10	40 15

注:*为定量离子。

1.2 前处理与仪器分析方法

污水样品经玻璃纤维滤膜(GF/C, 1.2 μm)过滤, pH调节至 2.0 ± 0.1 , 加入100 pg内标物, 使用固相萃取小柱(Oasis HLB, 500 mg, 6 mL)富集、净化样品, 小柱依次进行活化、上样、淋洗和洗脱, 洗脱液在氮吹仪中吹干, 使用80%乙腈定容至1 mL, 经0.22 μm PTFE滤膜过滤, 待测。

使用LC-MS/MS分别在正离子模式(ESI+)和负离子模式(ESI-)检测样品, 正离子模式采用Waters Acquity UPLC I Class超高效液相色谱串联Waters TQ-XS质谱仪对目标化合物进行检测。色谱柱选用Waters Acquity HSS T3柱(1.8 μm , 2.1 mm \times 100 mm), 柱温为40 $^{\circ}\text{C}$, 流动相A为0.2%的甲酸-超纯水, 流动相B为乙腈, 进样量为1 μL , 流速为0.3 mL/min。梯度洗脱程序为0~1.5 min, 10% B; 5.0 min, 50% B; 8.0~10.0 min, 95% B; 10.2~13 min, 10% B。质谱条件为: 电喷雾离子源正离子模式, 采用多反应监测模式, 碰撞器为氩气, 脱溶剂气温度为500 $^{\circ}\text{C}$, 锥孔电压为3 500 V。

负离子模式采用岛津30A超高效液相色谱串联质AB 5500 Q-trap质谱仪对目标化合物进行检测。色谱柱选用Waters Acquity UPLC BEH C18柱(0.7 μm , 2.1 mm \times 100 mm), 柱温为40 $^{\circ}\text{C}$; 流动相A为0.1%的氨水-超纯水, 流动相B为乙腈, 进样量为2 μL , 流速为0.3 mL/min。梯度洗脱程序为0~1.0 min, 20% B; 2.0~4.8 min, 95% B; 5.0~6.0 min, 20% B。质谱条件为: 电喷雾离子源负离子模式, 采用多反应监测模式, 碰撞气为氮气, 离子源温度为550 $^{\circ}\text{C}$, 离子化电压为-4 500 V。

布洛芬和乙酰水杨酸采用负离子源模式检测, 其余药物使用正离子源模式检测, 各药物及相对应内标的质谱检测条件如表1所示。

1.3 质量控制

采用内标法对样品中的药物定量分析, 所有样品均进行了2个平行样测定, 数据为2个平行样的平均值(RSD<20%), 方法空白加标回收率为76%~115%, 空白样品中均未检出目标物质, 32种药物标准曲线相关系数均在0.99以上, 定量限为0.054~10 ng/L。

1.4 生态风险评估

采用风险熵值(risk quotient, RQ)法评估PAEs环境生态风险等级, 其计算方法为:

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} \quad (1)$$

式(1)中, MEC为实际测定浓度, $\mu\text{g/L}$; PNEC为无效应浓度, $\mu\text{g/L}$ 。当 $0.01 \leq RQ < 0.1$ 时, 表明化学品对环境有低生态风险; 当 $0.1 \leq RQ < 1$ 时, 表明化学品对

环境有中等生态风险; 当 $RQ > 1$ 时, 表明化学品对环境有高生态风险, PNEC值来源于文献报道(表2)。

表2 药物PNEC值
Table 2 Drug PNEC values

药物	PNEC/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	参考文献
奥司他韦	100	[13]
利巴韦林	1.86	[14]
利托那韦	0.028	[15]
阿奇霉素	19	[15]
左氧氟沙星	7.4	[14]
头孢地尼	0.25	[16]
头孢克肟	0.064	[14]
头孢哌酮	0.5	[14]
对乙酰氨基酚	583	[15]
布洛芬	6.6	[15]
乙酰水杨酸	37	[17]

1.5 数据处理

使用相关系数 r 对污水中抗病毒药物浓度与哨点医院病毒阳性率、地表水和排水中抗病毒药物进行Pearson相关性分析, 当 $P < 0.05$ 时具有显著相关性, 且 $r > 0.70$ 时认为有强相关性, $r = 0.4 \sim 0.7$ 时认为有中等的相关性, $r < 0.4$ 时相关性较弱不进行讨论。其他数据采用Origin 2022软件制图。哨点医院报告呼吸道病毒流行情况来源于中国疾病预防控制中心网站公开数据^[18], 该数据可反映全国新冠和流感病毒感染疫情情况, 在本研究中用于近似代表上海市的新冠和流感病毒感染疫情情况。

2 结果与讨论

2.1 污水系统中药物赋存特征

污水中共检出30种药物, 药物总浓度变化趋势与哨点医院报告呼吸道病毒流行情况基本相似(图1)。2023年A厂进水中药物总浓度为5.8~59.7 $\mu\text{g/L}$, 在2023年上半年甲流和新冠疫情期间, 长期维持在较高的浓度水平, 并于10月秋冬流感季期间再次快速上升。退烧药和抗菌药是进水中含量最高的药物, 平均浓度分别为17.5 $\mu\text{g/L}$ 和7.8 $\mu\text{g/L}$ 。鼻炎药、抗病毒药和止咳药的总浓度均小于1.0 $\mu\text{g/L}$ 。乙酰水杨酸、头孢拉定以及对乙酰氨基酚是进水中平均浓度(10~40 $\mu\text{g/L}$)最高的药物, 这很可能与其作为常用药物使用量大有关。排水中共检出26种药物, 药物总浓度为0.359~0.907 $\mu\text{g/L}$, 说明大部分药物经处理后得到去除, 并且排水中药物总浓度与呼吸道病毒流行情况不相关。抗病毒药和抗菌药含量较高, 平均浓度分别为0.22 $\mu\text{g/L}$ 和0.19 $\mu\text{g/L}$, 阿奇霉素、奈玛特韦、利巴韦林是排水中平均浓度(250~300 ng/L)最高的药物。

进水中抗病毒药物总浓度的周期性变化与2023年病毒流行情况高度相似(图2(a)), 广谱性抗病毒药

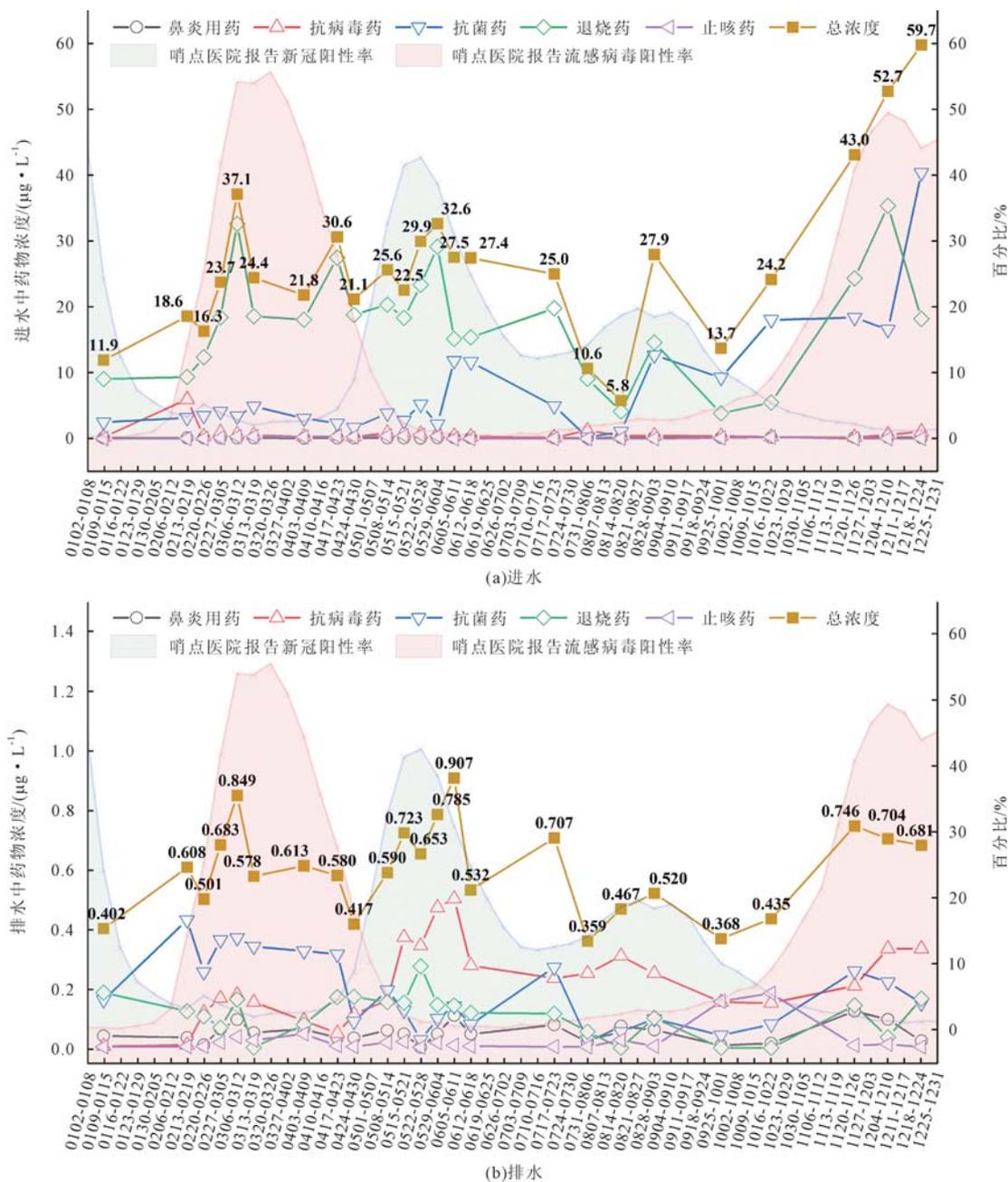


图1 污水系统中进水与排水中药物浓度变化
Fig.1 Concentration of pharmaceutical in influent and effluent of the wastewater system

物利巴韦林的是进水中含量最高的抗病毒药物,平均浓度为 530 ng/L。新冠药物奈玛特韦(辉瑞 Paxlovid 主要成分之一)在4-9月第二波新冠疫情期间有相对较高的浓度,奥司他韦在10月流感病毒流行期间有较高浓度的检出。在排水中抗病毒药物的组成分布也呈现随流行病毒变化而改变的趋势。进一步对污水系统中抗病毒药物和哨点医院病毒阳性率进行相关性分析,结果表明(图2(c)-(e)),抗病毒药物总浓度与病毒阳性率没有显著相关性,但奥司他韦和流感病毒阳性率以及奈玛特韦与新冠病毒阳性率之间有极显著的强相关性($r>0.8, P<0.001$),证实特定呼吸道病毒的流行能导致污水系统中对应治疗药物含量及组分

占比的显著上升。

根据A厂进水和排水结果,有9种药物的去除率高于99%,如对乙酰氨基酚、乙酰水杨酸以及多种抗菌类药物。污水处理厂工艺和药物物质特性可以影响药物的去除率,研究报道25种药物(主要为抗菌药)在奥贝尔氧化沟、厌氧/缺氧/好氧工艺、周期循环活性污泥法的去除率分别为69.6%、62.9%和70.2%^[19]。对于布洛芬、对乙酰氨基酚等药物,由于其生物可降解性,其去除率通常可达87%以上^[20]。需要指出的是,上述药物是否被完全矿化,或以中间产物形式排放,或仅通过污泥吸附未发生降解有待进一步研究。相比之下,多种抗病毒药物去除率低于60%,如利巴韦林去除率为

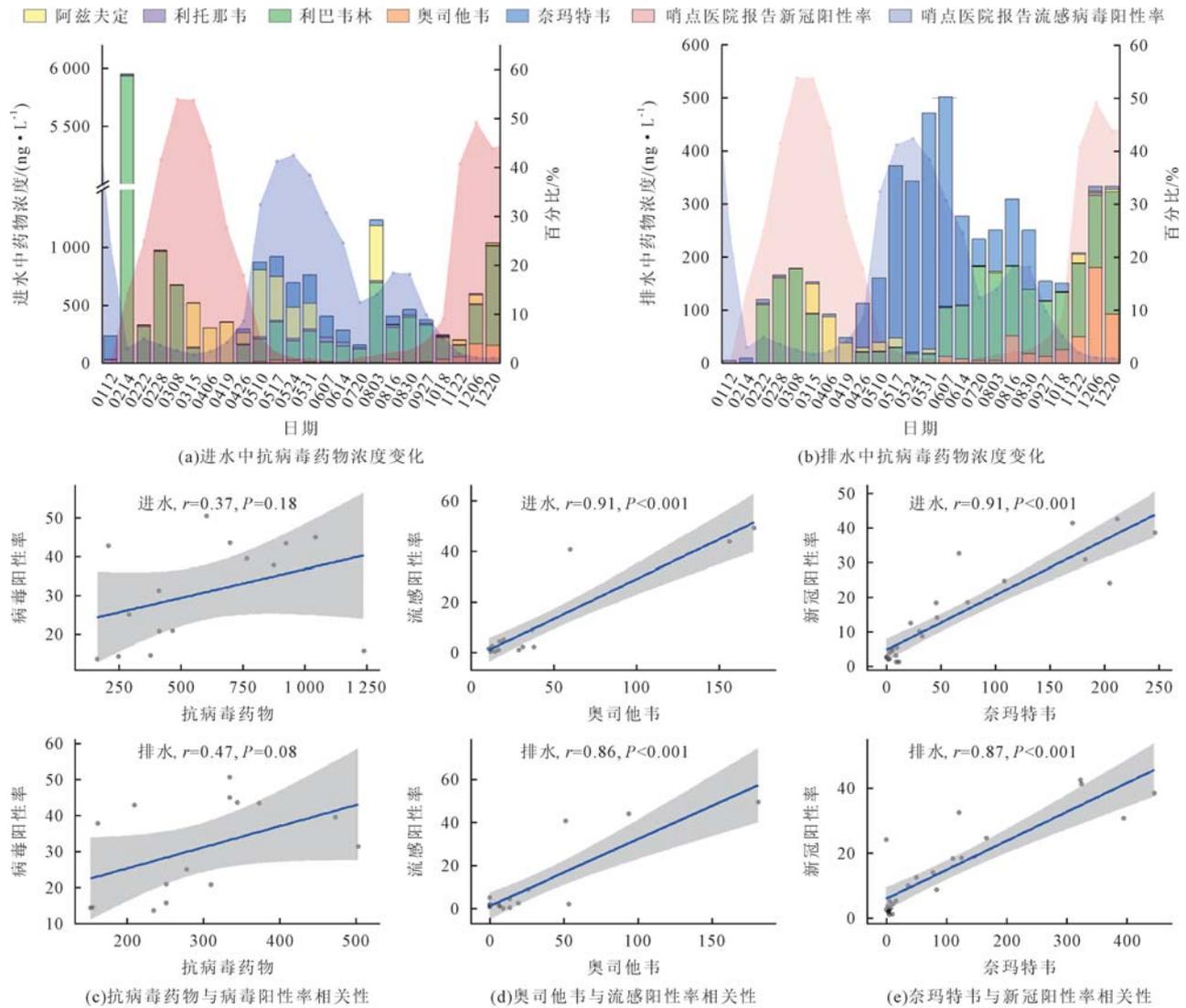


图2 污水系统中抗病毒药物浓度变化以及抗病毒药物与病毒阳性率相关性分析
Fig.2 Concentration of antiviral drugs in the sewage system and correlation analysis of antiviral drugs in influent (effluent) and virus positive rate

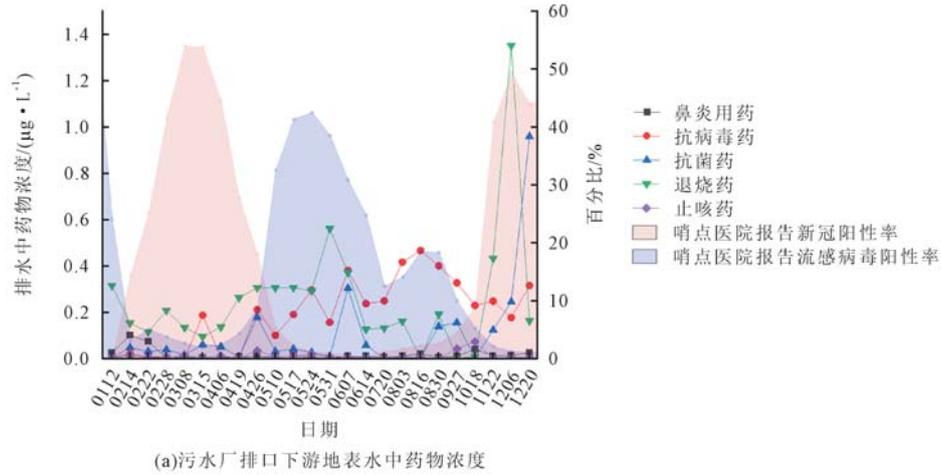
58%,奥司他韦去除率为35%,奈玛特韦则几乎不能被去除。研究显示,多数抗病毒药物能通过传统污水处理工艺去除,但部分抗病毒药物由于生物降解性和亲水性较差需要通过进一步物理化学方法处理^[21]。

2.2 地表水中药物赋存特征

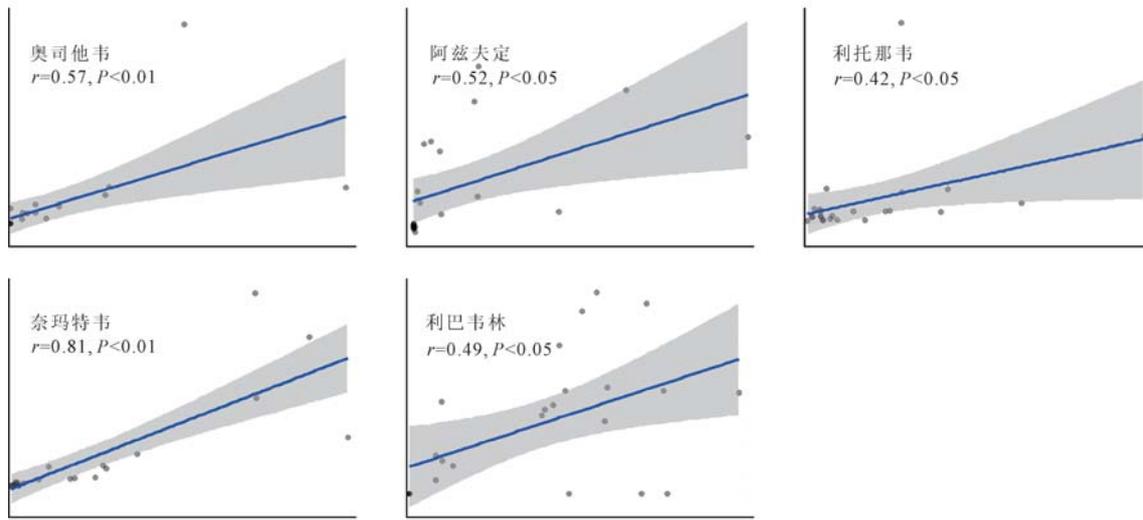
A厂排口下游地表水中共检出27种药物,地表水中药物总浓度为0.17~1.79 μg/L。地表水中退烧药、抗病毒药和抗菌药含量相对较高,平均浓度分别为0.25、0.19和0.11 μg/L,鼻炎药和止咳药浓度较低均低于0.02 μg/L。乙酰水杨酸、利巴韦林、头孢拉定、对乙酰氨基酚、布洛芬和奈玛特韦是地表水中浓度最高的药物,分别为179、146、81.7、44.8、38.0和35.3 ng/L,其余药物平均浓度均小于10 ng/L。2020年夏季和秋季(均为疫情后),武汉主要湖泊和河流中检出27种药物,总浓度为2.61~1 122 ng/L,其中氧氟沙星、阿奇霉

素具有相对较高的浓度和检出率,沉积物中利巴韦林则具有100%的检出率^[14]。长江上海段20种药物(基于2006~2017年报道)的总浓度均值为1 531.8 ng/L,其中咖啡因、卡马西平和红霉素是浓度相对较高,达到几百 ng/L^[22],布洛芬浓度为81.8 ng/L。

如图3(a)所示,退烧药和抗病毒药物浓度变化趋势与呼吸道病毒流行情况相似,并且在5~6月和12月出现极值。进一步对地表水和排水中奥司他韦、阿兹夫定、利托那韦、奈玛特韦和利巴韦林等5种抗病毒药物含量进行相关性分析,结果表明(图3(b)),地表水和排水中5种抗病毒药物都具有显著的中等至强相关性($P<0.05$),这说明由于污水处理厂无法有效去除抗病毒药物,导致其成为地表水中抗病毒药物的主要排放源,证实了呼吸道病毒的流行能在短期内引起地表水中抗病毒药物含量增大。



(a) 污水厂排口下游地表水中药物浓度



(b) 地表水和排水中抗病毒药物相关性

图3 污水厂排口下游地表水中药物浓度变化与地表水和排水中抗病毒药物相关性分析
Fig.3 Concentration of the drug in the surface water surrounding the effluent of the sewage plant and correlation analysis of antiviral drugs in surface water and drainage water

奥司他韦在人体内可代谢为羧酸盐,由于在日本广泛使用,在2010年前就开始对其本体与羧酸盐在污染地表水中的特征进行了研究,研究表明奥司他韦及代谢物只有在流感季期间,在可以地表水(排水下游)中检出,并且在排水口相对较近的点位可测到较高浓度,表明污水处理厂是主要的排放源^[23-25]。德国关于

莱茵河的研究则表明,奥司他韦制药厂也是地表水中奥司他韦主要的排放源^[26],相比之下利巴韦林没有在莱茵河中检出^[26](表3)。总体而言,虽然抗病毒药物作为一种潜在的环境新污染物在近10年被提出,但其污染特征的报道很少。抗病毒药物的污染特征和环境行为需要进一步深入研究。

表3 地表水中抗病毒药物浓度
Table 3 Concentrations of antiviral drugs in surface water

抗病毒药物	地区	时间	浓度/(ng·L ⁻¹)	参考文献
奥司他韦	上海	2023年	n.d.~89.6	本研究
奥司他韦羧酸盐	东京、大阪	2007-2008年流感季	2~58	[23]
奥司他韦羧酸盐	东京、大阪	2007-2008年非流感季	n.d.	[23]
奥司他韦羧酸盐	东京、大阪	2008-2009年流感季	6.6~190.0	[24]
奥司他韦	大阪	2013-2014年	n.d.~41	[25]
奥司他韦羧酸盐	大阪	2013-2014年	n.d.~125	[25]
奥司他韦	莱茵河	2009年9月	17 (Max.)	[26]
利巴韦林	上海	2023年	n.d.~424.7	本研究
利巴韦林	武汉	2020年	1.04~52.20	[14]
利巴韦林	莱茵河	2009年9月	n.d.	[26]

注:n.d.表示为未检出;Max.为最大值。

2.3 生态风险评估

根据上述结果,对可获得PNEC数据的11种药物进行了生态风险评估(图4),结果显示,多数药物的生态风险水平在监测时间内没有明显变化,其中,阿奇霉素和奥司他韦的水生生态风险总体可接受,7种药物在个别时间点存在低水生生态风险,而利巴韦林在6-12月新冠和秋冬流感季期间长时间处于中等风险水平,利托那韦则在年初新冠疫情期间和个别时间点达到中等风险水平,上述结果表明在呼吸道病毒流行期间,由于抗病毒药物的大量使用以及污水厂无法有效去除,对地表水生态环境构成了一定风险。Wu等^[27]在2022年7月对珠江流域地表水中30种药物的分析结果显示,当时的新冠疫情并未对地表水中药物水平产生显著影响,这可能是因为2022年7月仍施行乙类甲管政策,新冠病毒的感染人数远少于2023年呼吸道疾病感染高峰期的感染人数。Xia等^[28]的研究表明,新冠疫情后污水厂排水中多种药物浓度显著上升,部分药物浓度例如苯扎氯铵和对羟基苯甲酸甲酯相比2019年提升了至少200多倍,显著增大了生态风险影响。研究同时发现,新冠疫情后除了抗病毒药物和抗菌药物,污水中增塑剂和精神药物浓度也有明显上升,并提出将洛匹那韦、文拉法辛、苯扎氯铵等新污染物作为重点关注物质^[28]。除了公共卫生事件,畜禽和水产养殖业中使用的兽用药物也可能因生产活动导致水中多种药物残留水平和生态风险发生周期性的变化^[29]。因此,未来有必要进一步探究多种药物复合暴露对水生生态环境的影响,同时提升污水处理设施药物和常规污染物协同去除能力。

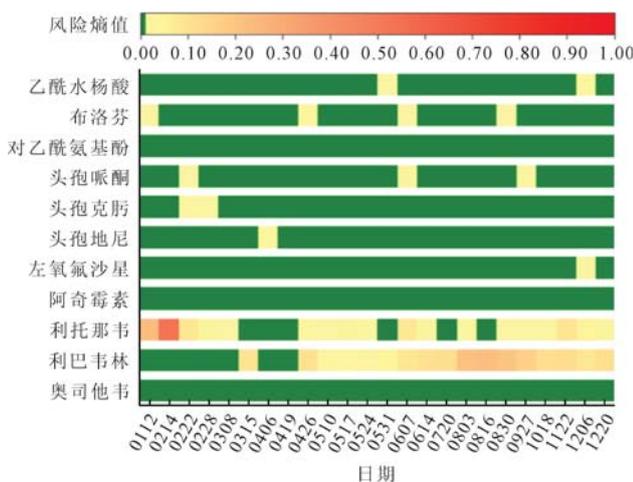


图4 地表水中药物生态风险评估
Fig.4 Ecological risk assessment of pharmaceuticals in surface water

3 结论与展望

本研究结果表明,呼吸道病毒流行导致居民抗病毒等药物使用量增大,引起污水系统进水中奥司他

韦、奈玛特韦、利巴韦林等抗病毒药物含量的上升,由于无法被现有工艺有效去除,污水处理厂成为抗病毒药物的重要排放源,导致利巴韦林和利托那韦等药物在呼吸道病毒流行期间对水生态环境具有中等风险水平。在未来的研究中,需要考虑以下几个方面。

(1)本研究研究对象为中小规模的污水处理设施,大型污水处理设施服务面积与人口更广,污水管道停留时间更长,需要持续开展典型药物的长期协同监测研究,掌握抗病毒药物的排放特征与环境负荷,及时识别抗病毒等药物可能的环境风险并提出相应对策。

(2)针对污水系统中低去除以及地表水中高检出、高水平的典型药物,开展多营养级生态毒理试验,获得毒性阈值,根据风险评估结果筛选出重点关注药源新污染物清单。

(3)深入研究污水管网中典型药物的迁移转化、归趋行为以及去除规律,发展高性能吸附材料与高级氧化协同去除技术,电化学膜技术等前沿新污染物去除技术,探索现有污水处理厂工艺中增加新的模块以去除污水中的药物类新污染物。

[参考文献]

- [1] Willyard C. Flu and colds are back with a vengeance: why now[J]. Nature, 2022.
- [2] Ai J W, Wang H Y, Zhang H C, et al. Alterations of pathogen transmission patterns and attenuated immune stimulation might be the cause of increased adult respiratory infections cases in 2023, results from a multi-center study in mainland China[J]. Heliyon, 2024,10(12):e32304.
- [3] World Health Organization. Guidelines for Environmental Surveillance of Poliovirus Circulation[EB/OL]. (2003-03) [2025-01-17]. <https://iris.who.int/handle/10665/67854>.
- [4] Cyranoski D. China expands surveillance of sewage to police illegal drug use[J]. Nature, 2018,559(7714):310-311.
- [5] 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.
- [6] Xiao F, Sun J, Xu Y H, et al. Infectious SARS-CoV-2 in feces of patient with severe COVID-19[J]. Emerging Infectious Diseases, 2020,26(8):1920-1922.
- [7] Hayden K R, Jones M, Elkin K R, et al. Impacts of the COVID-19 pandemic on pharmaceuticals in wastewater treated for beneficial reuse: two case studies in central Pennsylvania[J]. Journal of Environmental Quality, 2022,51(5):1066-1082.
- [8] 徐辉,刘洋,齐维晓,等. 发光细菌法评价疫情暴发对长江流域地表水生态毒性的影响[J]. 生态毒理学报, 2023,18(1):

- 440–447.
- Xu Hui, Liu Yang, Qi Weixiao, et al. Evaluation of impact of COVID-19 outbreaks on ecotoxicity of surface water in the Yangtze River by luminescent bacteria method[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023,18(1):440–447.
- [9] 董紫君,张禄禄,吉莉,等. 水中抗病毒药物污染现状及高级氧化降解研究[J]. *环境科学与技术*, 2023,46(8):37–47.
- Dong Zijun, Zhang Lulu, Ji Li, et al. Study on pollution status and advanced oxidative degradation of antiviral drugs in water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(8):37–47.
- [10] Zou Y F, Peng P, Zou H, et al. Transport and retention of COVID-19-related antiviral drugs in saturated porous media under various hydrochemical conditions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024,285:117028.
- [11] Morales-Paredes C A, Rodríguez-Díaz J M, Boluda-Botella N. Pharmaceutical compounds used in the COVID-19 pandemic: a review of their presence in water and treatment techniques for their elimination[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,814:152691.
- [12] Gros M, Petrović M, Ginebreda A, et al. Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes[J]. *Environment International*, 2010,36(1):15–26.
- [13] Straub J O. An environmental risk assessment for oseltamivir (Tamiflu®) for sewage works and surface waters under seasonal-influenza-and pandemic-use conditions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(6): 1625–1634.
- [14] Chen X P, Lei L, Liu S T, et al. Occurrence and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) against COVID-19 in lakes and WWTP-river-estuary system in Wuhan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,792:148352.
- [15] Escher B I, Baumgartner R, Koller M, et al. Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater[J]. *Water Research*, 2011,45(1):75–92.
- [16] Bengtsson-Palme J, Joakim Larsson D G. Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria: proposed limits for environmental regulation[J]. *Environment International*, 2016,86:140–149.
- [17] Thalla A K, Vannarath A S. Occurrence and environmental risks of nonsteroidal anti-inflammatory drugs in urban wastewater in the southwest monsoon region of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(3): 193.
- [18] 中国疾病预防控制中心. 全国新型冠状病毒感染疫情情况[EB/OL]. (2025-01-07)[2025-01-17]. <https://www.chinacdc.cn/jksj/xgbdyq>.
- Chinese Center for Disease Control and Prevention. National COVID-19 Infection Situation[EB/OL].(2025-01-07)[2025-01-17]. <https://www.chinacdc.cn/jksj/xgbdyq>.
- [19] Zhou Y Q, Meng J, Zhang M, et al. Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants: traditional or emerging pollutants[J]. *Environment International*, 2019,131:104982.
- [20] Wu J L, Liu Z H, Ma Q G, et al. Occurrence, removal and risk evaluation of ibuprofen and acetaminophen in municipal wastewater treatment plants: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,891:164600.
- [21] Wang R M, Luo J M, Li C X, et al. Antiviral drugs in wastewater are on the rise as emerging contaminants: a comprehensive review of spatiotemporal characteristics, removal technologies and environmental risks[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,457:131694.
- [22] Yang Y J, Chen Z L, Zhang J L, et al. The challenge of micropollutants in surface water of the Yangtze River[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,780:146537.
- [23] Söderström H, Järhult J D, Olsen B, et al. Detection of the antiviral drug oseltamivir in aquatic environments[J]. *PLoS One*, 2009,4(6):e6064.
- [24] Ghosh G C, Nakada N, Yamashita N, et al. Oseltamivir carboxylate, the active metabolite of oseltamivir phosphate (Tamiflu), detected in sewage discharge and river water in Japan[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(1): 103–107.
- [25] Azuma T, Ishiuchi H, Inoyama T, et al. Detection of peramivir and laninamivir, new anti-influenza drugs, in sewage effluent and river waters in Japan[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0131412.
- [26] Prasse C, Schlüsener M P, Schulz R, et al. Antiviral drugs in wastewater and surface waters: a new pharmaceutical class of environmental relevance[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010,44(5):1728–1735.
- [27] Wu H Z, Bin L Y, Guo P R, et al. Ecological risk assessment of the typical anti-epidemic drugs in the Pearl River Delta by tracing their source and residual characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024,463:132914.
- [28] Xia X H, Mu H Z, Li Y Q, et al. Which emerging micropollutants deserve more attention in wastewater in the post-COVID-19 pandemic period? Based on distribution, risk, and exposure analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,951:175511.
- [29] 王芝玉,李秋,张扬忠,等. 珠江三角洲北江饮用水源地新污染物的非靶向筛查与生态风险评估[J]. *环境科学*, 2024,45(11):6555–6564.
- Wang Zhiyu, Li Qiu, Zhang Yangzhong, et al. Non-targeted screening and ecological risk assessment of new pollutants in Beijiang drinking water source area of Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2024,45(11):6555–6564.