

入海河流中典型新污染物的分布特征及其生态风险 ——以天津市为例

孟令辰, 姚雯芮, 付晓丽, 戚羽霖

(天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072)

摘要: 本研究详细分析了天津市 5 条主要入海河流中新污染物的分布特征及其生态风险。采集 2023 年丰水期和 2024 年枯水期的样品, 运用高效液相色谱-质谱联用技术对该区域 15 种典型新污染物进行了定量分析。研究表明, 新污染物的浓度和生态风险系数 (risk quotient, RQ) 在不同水文时期表现出显著差异, 药品和个人护理品在丰水期的 RQ 显著高于枯水期, 而农药在丰水期因降雨导致的稀释效应表现出较低的风险, 部分新污染物在特定区域的 RQ 超过了安全阈值, 表明这些区域面临较高的生态风险和复合污染。本研究强调了根据水文变化制定差异化的污染物管理策略的重要性, 并为未来天津市及其他类似区域的环境保护和污染控制提供了科学依据。

关键词: 新污染物; 分布特征; 生态风险; 入海河流

中图分类号: X131; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)06-0865-07

Distribution characteristics and ecological risks of typical emerging contaminants in inflowing rivers: a case study of Tianjin

MENG Lingchen, YAO Wenrui, FU Xiaoli, QI Yulin

(School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This study provides a detailed analysis of the distribution characteristics and ecological risks of emerging contaminants in five major inflowing rivers in Tianjin. Samples were collected during the wet season in 2023 and the dry season in 2024 and 15 typical emerging contaminants in the region were quantitatively analyzed using high-performance liquid chromatography-mass spectrometry (HPLC-MS). The results indicate that the concentration and risk quotient (RQ) of these emerging contaminants show significant differences between the hydrological periods. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) exhibited higher RQ values in the wet season compared to the dry season, while pesticides showed lower risks in the wet season due to dilution effect of rainfall. Risk assessments indicated that the RQ values of certain emerging contaminants exceeded safety thresholds in specific areas, indicating high ecological risks. This study highlights the importance of developing differentiated pollution management strategies based on hydrological changes and provides scientific evidence for environmental protection and pollution control in Tianjin and similar regions.

Key words: emerging contaminants; distribution characteristics; ecological risk; inflowing rivers

收稿日期: 2024-07-17, 修订日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277456, 42007290)

作者简介: 孟令辰 (2000—), 男, 天津人, 硕士生, 主要研究方向为有机质与新污染物, E-mail: chen_1215@tju.edu.cn

通信作者: 付晓丽 (1978—), 女, 天津人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为环境和地球化学领域有机质谱谱仪应用, E-mail: fuxiaoli@tju.edu.cn

tju.edu.cn

戚羽霖 (1986—), 男, 浙江舟山人, 教授, 博士, 主要研究方向为有机质和新污染物的环境效应, E-mail: yulin.qi@tju.edu.cn

edu.cn

新污染物(emerging contaminants, ECs)是指对人类健康和生态系统可能构成潜在风险,但尚未纳入环境管理的、新发现的合成或天然存在的化学物质或生物制剂^[1-2]。这些污染物包括药品和个人护理品、全氟烷基和多氟烷基物质、新出现的病原体、蓝藻毒素、其他天然毒素、农药、工业化学品、微/纳米塑料、纳米材料、抗生素抗性基因以及环境中发现的其他外源物质,它们对人类和自然生态系统的影响尚未得到充分探究。这些物质的生物毒性、环境持久性、生物累积性,以及在环境中可能的额外转化和远距离迁移特性,使它们可能在远离源头的地区造成化学污染,其影响尚未被充分探究^[3]。随着工业化加速,新污染物在全球范围内的检出已引发各国政府和民众的广泛关注^[4]。许多国家都对新污染物进行了相应的污染现状调查以及风险评估,并开展了相应的污染控制和修复研究。我国于 2022 年将新污染物的治理纳入“十四五”规划和 2035 年远景目标^[5]。

入海河流是陆地与海洋相互作用的重要通道,同时也是陆源新污染物入海的主要途径。随着渤海沿岸人口和工农业活动的增加,通过河流输入海洋的新污染物也随之增加,对海洋生态环境构成严重威胁^[6]。这些新污染物主要来源于农业径流、工业排放和城市废水,通过河流长距离传输进入海洋,这不仅降低了海洋生态系统的质量,还影响了渔业、娱乐活动等服务功能^[7-8]。因此,厘清入海河流中典型新污染物的分布特征及其生态风险,并开发更有效的新污染物监测以及去除方法,对经济发展和社会福祉具有重要意义^[9-11]。天津市作为渤海地区的代表城市,是海河水系的主要入海地区。同时,天津市还是京津冀地区典型的工业城市,石油化工和机械制造等产业的广泛分布以及高密度的人口活动是其入海河流中新污染物的重要来源^[12]。为此,本研究分析和讨论了天津市入海河流中典型新污染物的时空分布特征,并利用生态风险系数(risk quotient, RQ)对 15 种新污染物的污染风险进行评价,进一步论证入海河流中新污染物的污染状况,以期为其污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

天津市水系分布如图 1 所示。本研究选取流经天津市的 5 条主要河流:蓟运河、潮白新河、永定新河、海河和独流减河作为研究对象。这 5 条河流附近均分布着工业区和农田,下游段有渔业和港口贸易活动。在部分地区,药品和个人护理品等污染物的浓度可达 748 ng/L^[13],对生态环境和人类健康构成了重大威胁。此外,由于降水稀释和长期输入,新污染物在丰水期以及枯水期的变化显著^[14]。因此,系统性地了解该区域新污染物的时空分布特征和环境风险,对于区域生态保护和可持续发展具有重要的科学意义。

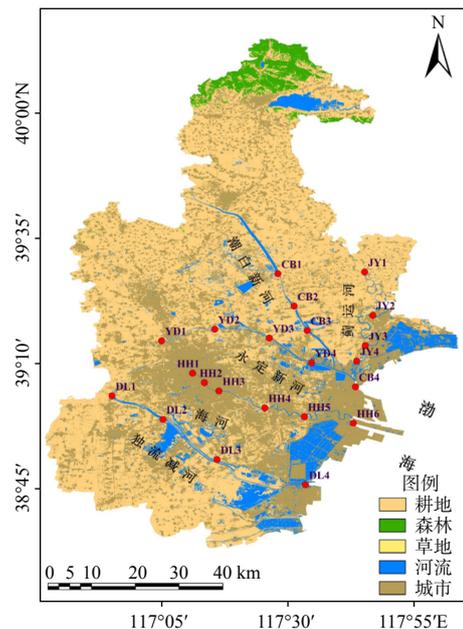


图 1 研究区域及采样点

Fig. 1 Study area and sampling point distribution

综合考虑流域土地利用、人类活动、城镇及水利工程等因素,本研究布设了 22 个采样点。采样时间为 2023 年丰水期(6 月)和 2024 年枯水期(1 月),每个采样点采集 3 个平行样品,采集后置于 4 °C 车载冷藏箱,运回实验室后立即进行前处理。

1.2 仪器与试剂

高效液相色谱(Waters I Class, 美国)—四极杆线性离子阱复合质谱联用仪(SCIEX 6500⁺ QTRAP, 美国),色谱柱为 Waters HSS T3 (2.1 mm ×

100 mm, 1.8 μm); 固相萃取(SPE)小柱选择 Waters Oasis HLB (200 mg, 6 mL); 标准品和同位素内标物购自天津阿尔塔科技有限公司, 甲酸、甲醇和乙腈购自默克公司(Darmstadt, 德国), 甲酸铵购自上海阿拉丁生化科技有限公司。

根据污染物的理化特性、毒理学参数以及筛选水平生态风险评估(SLERA)的结果^[15-18], 本研究选取了6种药品和个人护理品以及9种农药作为目标污染物。具体信息及其生态毒性列于表1。

表1 目标污染物基本信息
Tab.1 Basic information on target pollutants

种类	污染物名称	CAS	分子式	分子量	生态毒性
抗生素	磺胺甲恶唑	127-79-7	$\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{N}_3\text{O}_3$	253.28	刺激性、环境污染
	罗红霉素	80214-83-1	$\text{C}_{41}\text{H}_{76}\text{N}_2\text{O}_{15}$	837.05	
止痛类药物	萘普生	22204-53-1	$\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{O}_3$	230.26	剧毒、刺激性、危害健康
激素类药物	卡马西平	298-46-4	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}$	236.27	刺激性、危害健康
个人护理品	双酚A	80-05-7	$\text{C}_{15}\text{H}_{16}\text{O}_2$	228.29	腐蚀性、刺激性、危害健康
	三氯生	3380-34-5	$\text{C}_{12}\text{H}_7\text{Cl}_3\text{O}_2$	287.95	
除草剂	莠去津	1912-24-9	$\text{C}_8\text{H}_{14}\text{ClN}_5$	215.63	持久性、生物积蓄毒性
	西草净	1014-70-6	$\text{C}_8\text{H}_{15}\text{N}_5\text{S}$	213.31	
	异丙甲草胺	87392-12-9	$\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{ClNO}_2$	283.79	
杀虫剂	吡虫啉	138261-41-3	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{ClN}_5\text{O}_2$	255.66	内分泌干扰、人类健康风险
	啶虫脒	135410-20-7	$\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{ClN}_4$	222.67	
	氯虫苯甲酰胺	500008-45-7	$\text{C}_{18}\text{H}_{14}\text{BrCl}_2\text{N}_5\text{O}_2$	483.1	
杀菌剂	多效唑	76738-62-0	$\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{ClN}_3\text{O}$	293.79	持久性、耐药性
	多菌灵	6552-21-2	$\text{C}_{11}\text{H}_{17}\text{O}_3\text{PS}$	292.29	
	甲霜灵	2588-04-7	$\text{C}_7\text{H}_{17}\text{O}_4\text{PS}_3$	279.33	

1.3 污染物分析

1.3.1 样品前处理

采样当天, 水样经 0.7 μm 玻璃纤维膜过滤, 4 $^{\circ}\text{C}$ 下避光保存。应用 SPE 方法对水中污染物进行富集。SPE 小柱选择 Waters Oasis HLB (200 mg, 6 mL)。小柱依次用 6 mL 甲醇和 6 mL Milli-Q 超纯水活化, 运用虹吸原理上样^[19], 流速控制在 4~8 mL/min。然后, 小柱用氮气吹干, 再用 6 mL 甲醇洗脱, 流出液在 35 $^{\circ}\text{C}$ 下氮气吹干, 以甲醇/水 (20 : 80, v/v) 复溶至 1 mL, 置于棕色样品瓶中, 并加入 50 μL 400 $\mu\text{g/L}$ 的混合内标溶液, 待测。

1.3.2 仪器分析

15种新污染物的检测采用 Waters I Class 高效液相色谱 (HPLC) 系统, 进样体积为 2 μL , 流速为 0.3 mL/min, 柱温为 40 $^{\circ}\text{C}$ 。色谱柱为 Waters HSS T3 (2.1 mm \times 100 mm, 1.8 μm), 流动相与梯

度洗脱程序见表 2。质谱条件: ESI 电离源正负同时工作, 离子源电压为 5500/4500 V; 离子源温度为 350 $^{\circ}\text{C}$; 气帘气 50 psi; GS1 和 GS2 均为 50 psi, 质谱采用多反应监测模式进行检测。

1.3.3 质量保证与控制

依据前述方法对标准溶液和样品进行前处理和仪器分析, 选择罗红霉素-D₇、甲霜灵-D₆、多菌灵-D₃ 作为内标物, 在各批次测试时同步建立校准曲线, 确保新污染物定性和定量的准确性。在每批次样品测试时进行仪器空白和程序空白测试, 每 5 个样品测一次程序空白, 空白样品中目标分析物低于仪器检出限。检出限和定量限分别为 3 倍和 10 倍信噪比, 检出限为 0.05~4.32 ng/L, 定量限为 0.32~18.47 ng/L。标准曲线浓度范围为 0.01~100 $\mu\text{g/L}$, 线性相关系数 $R^2 > 0.998$; 水样前处理受到基质效应的影响, 回收率为 56.1%~118.8%, 平均回收率为 91.7%。

表 2 目标污染物所选流动相及色谱梯度洗脱程序

Tab.2 Selected mobile phase and chromatographic gradient elution procedure for target contaminants

药品及个人护理品			农药		
流动相A: 含0.1%甲酸的2mM甲酸铵水体系 流动相B: 乙腈			流动相A: 含0.01%甲酸的2mM甲酸铵水体系 流动相B: 含0.01%甲酸的2mM甲酸铵甲醇体系		
时间/min	流动相A/(%)	流动相B/(%)	时间/min	流动相A/(%)	流动相B/(%)
0	5	95	0	95	5
3	5	95	2	95	5
7	95	5	9	2	98
10	95	5	11	2	98
12	5	95	15	95	5

1.4 数据处理

使用 ArcGis10.8 绘制样点图及空间插值图, 插值分析采用克里金法。运用 Excel 2021 和 Origin 2021 进行统计学分析和绘图。

1.5 风险评估

本研究采用生态风险系数法, 这是一种基于经验数据量化污染物生态风险的方法, 用于评估入海河流中检出的新污染物对生态系统构成的风险。RQ 根据实测浓度和预测无效应浓度 (predicted no effect concentration, PNEC) 进行计算, 公式如下:

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

式中: MEC 为测得的最大环境浓度 (ng/L); PNEC 为预测无效应浓度 (ng/L)。

PNEC 通过将污染物的急性毒性值 (Tox) 除以一个合适的评估因子 (AF) 计算得到。水生生物中新污染物的急性毒性值来源于美国环保署开发的 ECOSAR (<https://www.epa.gov/>) 化合物

生态毒性系统以及现有文献^[20-22], AF 值取 1000。PNEC 计算公式如下:

$$PNEC = \frac{Tox}{AF} \quad (2)$$

一般情况下, 根据单个污染物计算出的 RQ, 可将风险水平分为以下 3 类: 高风险, $RQ \geq 1$; 中等风险, $0.1 \leq RQ < 1$; 低风险, $0.01 \leq RQ < 0.1$ 。当 $RQ < 0.01$ 时, 表示生态风险不显著。每一条入海河流的生态风险系数 (RQ_{Total}) 为入海河流中检测到的所有污染物的 RQ 总和, 计算公式如下:

$$RQ_{Total} = \sum_{i=1}^n RQ_i \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 新污染物浓度分布

各新污染物在丰水期与枯水期的浓度分布如图 2 所示, 其浓度百分比如图 3 所示。新污染物总浓度范围为 0.05 ~ 86.8 μg/L。其中, 主要新污染物为磺胺甲恶唑、莠去津、萘普生、卡马西

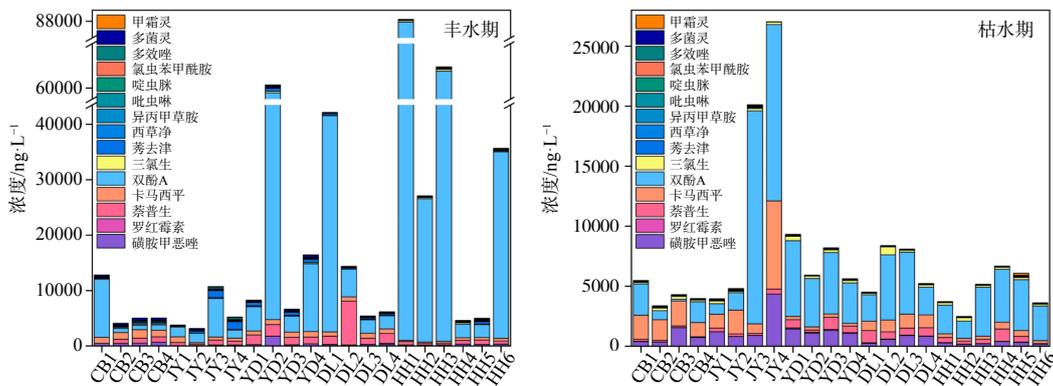


图 2 不同水文时期新污染物的浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of emerging contaminants during different hydrological periods

平和双酚 A。在丰水期,这些新污染物的浓度分别为 $0.33 \mu\text{g/L}$ 、 $0.38 \mu\text{g/L}$ 、 $1.23 \mu\text{g/L}$ 、 $0.74 \mu\text{g/L}$ 和 $16.4 \mu\text{g/L}$ 。在枯水期,除磺胺甲恶唑和卡马西平的浓度有所上升外,其余主要新污染物的浓度均降低了一个数量级。

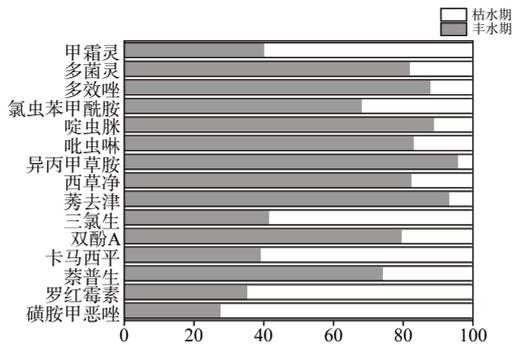


图3 不同水文时期新污染物的浓度占比

Fig. 3 Proportion of pollutant concentrations during different hydrological periods

双酚 A 是一种典型的内分泌干扰物和环境激素,因其广泛应用和环境持久性而引起关注,该物质在人口密度最高的城区检出浓度最高。长期低剂量接触和暴露于水环境中的双酚 A 可能对人体健康产生影响,在低浓度下即可引发毒理效应。磺胺甲恶唑和莠去津是常用的兽用抗菌药物和农业除草剂,长期暴露会对生物体的生殖发育和内分泌系统造成影响^[23-24]。在丰水期,农业区的较高检出率表明,除日常生活中使用的护理品污染之外,农业养殖也是这些新污染物的重要来源。此外,本研究还对比了天津市与其他地区的新污染物浓度水平。例如,太湖附近地区新污染物的浓度范围为 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{g/L}$ ^[25],华北平原典型农药的浓度范围为 $0.17 \sim 0.31 \mu\text{g/L}$ ^[26]。相比之下,天津市的新污染物浓度显著更高,这表明该地区的特定污染源或环境条件可能对污染物的分布产生了重要影响。

从水文时期变化的角度来看,枯水期的新污染物浓度占比普遍低于丰水期。然而,磺胺甲恶唑、罗红霉素、卡马西平、甲霜灵和三氯生这 5 种污染物在枯水期的蓟运河附近浓度占比较高。由于蓟运河附近农业活动频繁,分布着大量村庄和农田,并且入海口有少量工业区,加之枯水期河流水动力较弱,所以这些具有环境持久性

的新污染物在固定区域累积。

2.2 污染物时空分布特征

研究区域入海河流中新污染物总浓度在丰水期和枯水期的空间分布情况如图 4 所示。在丰水期(图 4a),污染物的高浓度区域主要集中在研究区域的西部,浓度最高达到 $88.34 \mu\text{g/L}$;低浓度区域则分布在北部和南部,浓度最低为 $3.17 \mu\text{g/L}$ 。在枯水期(图 4b),高浓度区域主要转移至西南部,浓度最高为 $27.04 \mu\text{g/L}$,低浓度区域则集中在中部和北部,浓度最低为 $2.48 \mu\text{g/L}$ 。综上所述,无论是丰水期还是枯水期,新污染物的高浓度区域均沿西南部的河流分布,尤其集中在永定新河和海河流域,而低浓度区域则主要位于潮白新河和蓟运河流域。

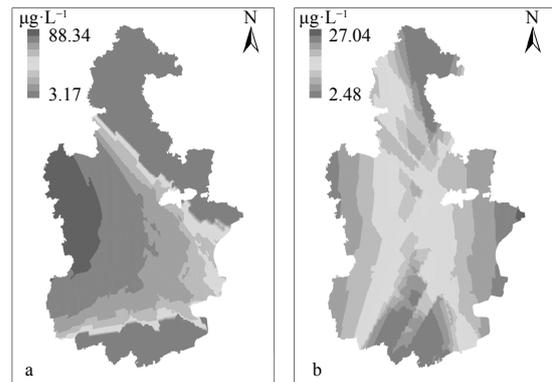


图4 不同水文时期污染物总浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of total pollutant concentrations during different hydrological periods

人类活动、降雨径流及污染源等因素影响着污染物的空间分布。丰水期降雨量增多,农业区的农药和化肥通过地表径流进入河流,导致农业密集区(如西部)的新污染物浓度升高。相反,枯水期农业活动减少,径流量降低,河流的自净能力减弱,但农药和化肥的浓度依然较高,导致新污染物在特定地点积累。丰水期虽然存在降雨稀释效应,但工业区中新污染物的持续排放,特别是在工业集中的区域,仍然导致新污染物浓度维持在较高水平。大量降雨增加了河水量,并扩大了新污染物的扩散范围,导致下游区域新污染物浓度升高。在枯水期,虽然工业废水排放相对稳定,但由于水体流动性降低,新污染物在局部地区积累,特别是入海口附近的工业区,逐渐

积累形成高浓度污染。

2.3 生态效应与风险评价

如图5所示,各条入海河流中新污染物的 RQ 差异明显,不同类型的新污染物表现出不同的风险水平。药品和个人护理品(如三氯生、磺胺类抗生素)在枯水期显示出较高的 RQ ,这反映了它们较高的生物活性和环境稳定性,由于这些

物质在日常生活中被广泛使用,它们在河流中的浓度相对较高。农药在丰水期的 RQ 通常较低,这是由于农业活动中的农药随着雨水径流被大量稀释。在丰水期,双酚A在3条河流中 RQ 均大于1,显示出较高的环境风险。相比之下,莠去津在蓟运河以外的所有河流中均表现为中风险。

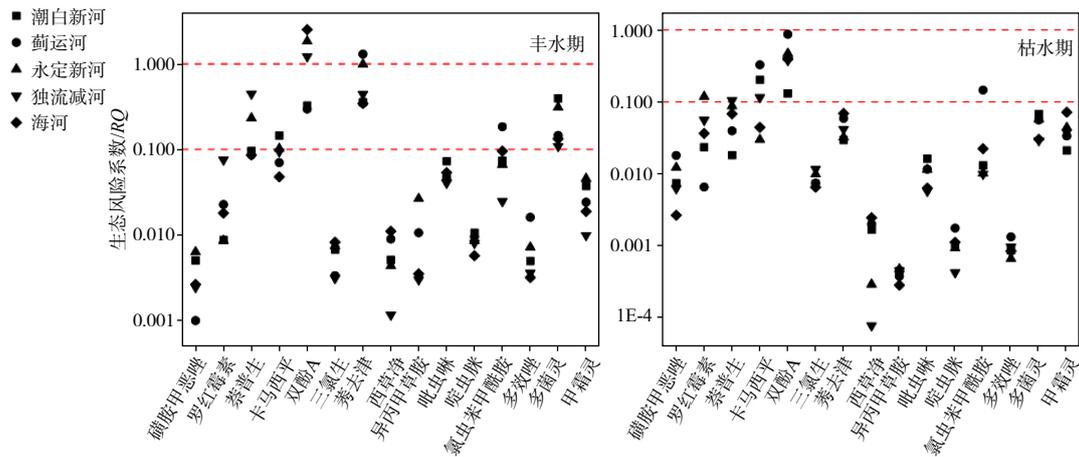


图5 不同水文时期污染物的 RQ 分布

Fig. 5 Distribution of pollutant RQ during different hydrological periods

本研究计算了各条入海河流中新污染物的总风险系数 RQ_{Total} 。结果显示,丰水期5条河流的 RQ_{Total} 为6.19~14.85,平均值为10.65;枯水期 RQ_{Total} 为2.17~6.32,平均值为3.65。这表明这些目标污染物在天津市引发了由低到高不同级别的生态风险,并且因为水文时期的变化,丰水期与枯水期的生态风险级别存在显著差异。

3 结论

(1)天津市5条主要入海河流中新污染物的时空分布特征显示出明显的水文时期变化。丰水期和枯水期的新污染物浓度分别受河流量、降雨模式及人类活动的影响,特别是双酚A和磺胺甲恶唑等药品和个人护理品在不同水文时期 RQ 均较高。

(2)由于降雨的稀释效应,丰水期农药的 RQ 较低;而在枯水期,径流量的减少显著提高了农药的 RQ 。研究表明,新污染物的管理和控制策略必须考虑这些水文时期和空间分布上的变化,以有效减少对海洋生态系统的影响。

(3)新污染物通过河流输送进入海洋,特别是在近岸海域,表现出复杂的迁移和累积过程。这些新污染物的持久性、生物蓄积性及潜在毒性对海洋生态系统和人体健康构成了潜在威胁。因此,未来研究应重点开发更高效的污染物监测与去除技术,深入探讨新污染物在海洋生态系统中的迁移与转化过程,并加强对高风险区域的识别和系统治理。

参考文献:

- [1] WANG F, XIANG L L, LEUNG K S Y, et al. Emerging contaminants: a one health perspective[J]. The Innovation, 2024, 5(4): 100612.
- [2] XIONG Y X, SHI Q Y, LI J, et al. Methylation and demethylation of emerging contaminants in plants[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(4): 1998-2006.
- [3] GAO P. Chasing "emerging" contaminants: an endless journey toward environmental health[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(4): 1790-1792.
- [4] SU L H, WANG Y, WANG Z Y, et al. Simulating and predicting adsorption of organic pollutants onto black phosphorus nanomaterials[J]. Nanomaterials, 2022, 12(4): 590.

- [5] 王新红, 于晓璇, 王思权, 等. 河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 [J]. 环境科学, 2022, 43(11): 4810-4821.
- [6] 吴光红, 邱梦璇, 李建玲, 等. 辽东湾入海河流水质时空变化与污染物来源分析 [J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 177-188.
- [7] 王少露, 吴思怡, 雷宇, 等. 海南昌化江入海河口区微塑料污染特征及风险评估 [J]. 海洋环境科学, 2024, 43(2): 292-300.
- [8] 袁行知, 许雪峰, 俞亮亮, 等. 复杂动力条件下台州近海余流季节性特征及其对污染物运移的影响 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42(4): 589-596.
- [9] CHEN S S, REN X Q, YU Y, et al. Metabolic disturbance of short- and medium-chain chlorinated paraffins to zebrafish larva[J]. Science of the Total Environment, 2024, 923: 171372.
- [10] ZOU L L, NI Y W, GAO Y, et al. Spatial variation of PCDD/F and PCB emissions and their composition profiles in stack flue gas from the typical cement plants in China[J]. Chemosphere, 2018, 195: 491-497.
- [11] CHEN X, HAN W J, XIE H J, et al. Release kinetics and risk assessment of additives in plastic advertising banners[J]. Science of the Total Environment, 2024, 923: 171411.
- [12] YAO W R, QI Y L, HAN Y F, et al. Seasonal variation and dissolved organic matter influence on the distribution, transformation, and environmental risk of pharmaceuticals and personal care products in coastal zone: a case study of Tianjin, China[J]. Water Research, 2024, 249: 120881.
- [13] CAO S S, DUAN Y P, TU Y J, et al. Pharmaceuticals and personal care products in a drinking water resource of Yangtze River Delta Ecology and Greenery Integration Development Demonstration Zone in China: occurrence and human health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 721: 137624.
- [14] SUN Q, LI Y, LI M, et al. PPCPs in Jiulong River estuary (China): spatiotemporal distributions, fate, and their use as chemical markers of wastewater[J]. Chemosphere, 2016, 150: 596-604.
- [15] BU Q W, WANG B, HUANG J, et al. Pharmaceuticals and personal care products in the aquatic environment in China: a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 262: 189-211.
- [16] HUGHES S R, KAY P, BROWN L E. Global synthesis and critical evaluation of pharmaceutical data sets collected from river systems[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(2): 661-677.
- [17] XU W H, ZHANG G, ZOU S C, et al. Determination of selected antibiotics in the Victoria Harbour and the Pearl River, South China using high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(3): 672-679.
- [18] YAO B, YAN S W, LIAN L S, et al. Occurrence and indicators of pharmaceuticals in Chinese streams: a nationwide study[J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 889-898.
- [19] YAO W R, GE J F, HU Q Z, et al. An advanced LC-MS/MS protocol for simultaneous detection of pharmaceuticals and personal care products in the environment[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2023, 37(1): e9397.
- [20] GU J, GUO M, YIN X G, et al. A systematic comparison of neurotoxicity of bisphenol A and its derivatives in zebrafish[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150210.
- [21] 王蔚青, 徐雄, 刘权震, 等. 农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价 [J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2678-2685.
- [22] 黄文平, 鲍轶凡, 胡霞林, 等. 黄浦江上游水源地上游31种内分泌干扰物的分布特征以及生态风险评价 [J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1488-1495.
- [23] PRASANAMEDHA G, KUMAR P S. A review on contamination and removal of sulfamethoxazole from aqueous solution using cleaner techniques: present and future perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119553.
- [24] CHANG J N, FANG W, CHEN L, et al. Toxicological effects, environmental behaviors and remediation technologies of herbicide atrazine in soil and sediment: a comprehensive review [J]. Chemosphere, 2022, 307: 136006.
- [25] WANG T L, ZHONG M M, LU M L, et al. Occurrence, spatiotemporal distribution, and risk assessment of current-use pesticides in surface water: a case study near Taihu Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146826.
- [26] WANG J W, TENG Y G, ZHAI Y Z, et al. Spatiotemporal distribution and risk assessment of organophosphorus pesticides in surface water and groundwater on the North China Plain, China[J]. Environmental Research, 2022, 204: 112310.

(本文编辑: 胡莹莹)