

地表水微污染物迁移监测及机制分析

杨贵琼, 赵胜荣, 刘业方, 吕天兴
云南亚明环境监测科技有限公司, 云南 昆明 650217
DOI:10.61369/EAE.2025030002

摘 要 : 本文主要基于地表水微污染物迁移监测及其作用机制的视角展开探讨。深入研究目前常见的微污染物, 比如 PPCPs、EDCs、微塑料等, 通过其不同来源和排放方式, 着重阐述样品收集相关内容, 针对预处理和色谱-质谱联用、荧光光谱、纳米颗粒跟踪分析等检测方法, 并且介绍了物理的水流影响、吸附、解吸过程, 化学的化学反应、酸碱平衡反应, 生物的生物摄取和生物转化等不同的微污染物迁移机理, 旨在为了解不同微污染物在地表水中的迁移规律, 制定污染防控措施提供理论依据, 对地表水的治理具有深远的影响, 展望微污染物迁移监测和机制在未来的发展方向。

关 键 词 : 地表水微污染物; 迁移监测; 迁移机制; 检测技术; 环境行为

Monitoring and Mechanism Analysis of Micro-pollutant Migration in Surface Water

Yang Guiqiong, Zhao Shengrong, Liu Yefang, Lv Tianxing
Yunnan Yaming Environmental Monitoring Technology Co., LTD., Kunming, Yunnan 650217

Abstract : This paper primarily explores the monitoring of micropollutant transport in surface water and its underlying mechanisms. It conducts an in-depth investigation into common micropollutants such as PPCPs, EDCs, and microplastics, analyzing their diverse sources and emission pathways, with particular emphasis on sample collection procedures. The study elaborates on detection methods including pretreatment techniques, chromatography-mass spectrometry, fluorescence spectroscopy, and nanoparticle tracking analysis. Furthermore, it introduces various transport mechanisms of micropollutants, encompassing physical processes like hydrodynamic influences, adsorption, and desorption; chemical processes such as chemical response and acid-base balance response; and biological processes including bioaccumulation and biotransformation. The research aims to elucidate the transport patterns of different micropollutants in surface water, providing a theoretical foundation for developing pollution prevention and control measures, which holds profound implications for surface water management. Finally, the paper prospects future research directions in micropollutant transport monitoring and mechanistic studies.

Keywords : surface water micropollutants; transport monitoring; transport mechanisms; detection techniques; environmental behavior

引言

随着城市化进程和工业化进程的加快, 地表水微污染问题渐趋凸显。其为水生态系统安全以及人类健康带来威胁。药物和个护品、内分泌干扰物、微塑料这类微污染物尽管浓度较低, 但具有持久性、生物积累等特性, 其迁移扩散会致使污染范围进一步扩展。目前对微污染物迁移途径和机理的认知尚不充分, 现有的监测技术在灵敏度和特异性方面仍需提升。因此, 展开地表水微污染物迁移监测及其机理研究, 明晰微污染物的环境行为特征, 这对于创建有效的污染防控体系, 保障水资源安全有着重要的理论价值和现实意义。

一、地表水微污染物概述

(一) 常见微污染物类型

地表水微污染物有药物及个人护理品 (PPCPs)、内分泌干

扰物 (EDCs)、微塑料、重金属纳米颗粒等, 对水环境危害大。PPCPs有处方药等, 抗生素、布洛芬在城市河流中浓度达 $\mu\text{g/L}$, 干扰水生生物内分泌和免疫系统; EDCs有双酚 A, 影响水生生物性别分化, 邻苯二甲酸酯毒性高; 微塑料粒径 $< 5\text{mm}$, 由塑

料破碎产生，不同地区浓度类型不同，存在物理损伤和污染物吸附双重危害；重金属纳米颗粒有银、二氧化钛纳米颗粒等，因纳米技术发展进入地表水，比传统重金属离子毒性大，会抑制水生生物生理过程。

（二）微污染物的来源与排放途径

微污染物的来源有生活污水排放、工业废水排放、农业面源污染、大气沉降这几个方面。生活污水里存在大量的 PPCPs、微塑料，未经处理就排放到地表水里后，上述因素成为了微污染物的重要来源；工业废水排放会带来各种各样的 EDCs、重金属纳米颗粒等，塑料在生产过程中产生的废水中含有大量微塑料和添加剂；农业面源污染包含农药、兽药的使用以及畜禽养殖废水的排放，诸多 PPCPs 以此种方式进入到了地表水当中；大气沉降的影响同样不容忽视，部分微污染物通过大气传输，最终沉降至地表水体。有研究表明，在某些偏远地区，经由大气沉降进入地表水体的微污染物占比显著。

二、迁移监测技术与方法

（一）样品采集与预处理

1. 水样采集策略

地表水水样采集时，要考虑到采样点的代表性、采样时间和频率等因素。通常会在河流、湖泊的不同地方设置多个采样点，包括上游、中游、下游，还有入湖口、出水口等；从长期监测的角度来讲，按照不同的季节、水文状况来决定采样频率，比如雨季和旱季需提高采样频次，以此掌握微污染物在不同流量下的变化情况；采用专门设计的采样设备，自动采样器等，就可以实现按时段连续采样，保证样品的完整性和准确性。

2. 预处理技术

采集回来的水样需要进行预处理以富集水样中微污染物及去除干扰物。常用的预处理方法有 SPE，即利用柱子上的某些物质将水样中的污染物进行富集，再利用一些洗脱液将其洗脱出来；而对于微塑料可以采用过滤的方法，选择不同孔径（如 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.22\mu\text{m}$ 等）的滤膜对水样进行过滤，使得微塑料被保留在滤膜上；对于重金属纳米颗粒可以采用离心或超滤的方法进行分离、富集。在整个预处理过程中要注意控制好实验条件，避免发生二次污染。

（二）分析检测技术

1. 色谱-质谱联用技术

气相色谱-质谱联用（GC-MS）和液相色谱-质谱联用（LC-MS）被用来检测微污染物。前者可对那些像部分农药、有机污染物这些挥发性或者半挥发性的微污染物加以分析，混合物通过气相色谱分离成各个组分之后交给质谱去执行定性和定量的任务，在对水体里的有机氯农药展开检测时，GC-MS 就能准确地测定出它们的种类和数量；LC-MS 对于极性和易受热损伤的这种微污染物来说是更好的选择，在药物和个人护理品（PPCPs）中，绝大多数药物均呈现此特征，以水环境中的抗生素为例，LC-MS 能够一次性检查多种抗生素，同时非常灵敏。

2. 荧光光谱技术

荧光光谱技术可以用来测有荧光的微污染物。一些 PPCPs 和 EDCs 在某种波长光的刺激下会发出光来，通过测量荧光强度可确

定这些物质的含量，部分多环芳烃类的内分泌干扰物特别喜欢发光，用荧光光谱仪就可以很快知道地表水中有多少，这种方法方便又快，然而遇上复杂的样品，荧光会对结果产生干扰，此时需借助其他技术手段。

3. 纳米颗粒跟踪分析技术（NTA）的应用研究

NTA 主要用于纳米颗粒的粒径分布与浓度检测，对于重金属纳米颗粒和微塑料中的纳米级颗粒，NTA 具有独特的优势。利用激光照射样品，纳米颗粒会散射出光，摄像机记录下颗粒的布朗运动，再用斯托克斯-爱因斯坦方程计算出颗粒的粒径，最后统计颗粒的浓度，在研究地表水纳米塑料的粒径分布和浓度变化时，NTA 可以提供直观且准确的数据。

4. 其他新兴技术

近些年来，一些新出现的技术也被应用到地表水微污染物监测当中，像表面增强拉曼光谱（SERS），它的存在使得微污染物的拉曼信号变得十分强烈，这样一来，痕量检测就得以实现，当检测微塑料的化学成分时，SERS 可以给予快速而准确的信息；依靠生物传感器的检测技术，利用生物分子与微污染物之间特有的结合反应，通过信号转换来检测微污染物，酶联免疫吸附测定（ELISA）便属于这种类型，其可以用来检测某些特定的药物或者激素等微污染物，其灵敏度较高，特异性也较强。

三、迁移机制分析

（一）物理迁移机制

1. 水流对微污染物迁移影响的研究

水流是地表水微污染物迁移的重要推动力之一。水流速度与流向影响着微污染物的扩散与输移。在河流当中，流速较快之处，微污染物会迅速朝下游输移，其扩散范围较大；洪水时期，河流流速加快，微污染物会被迅速带往下游更远之处。流速较慢之处，比如湖泊、河湾等地方，微污染物容易出现聚集与沉降。水流的紊动也会影响微污染物的迁移，紊动能使微污染物在水中混合得更为均匀，促使它们扩散。通过创建水动力模型，结合微污染物的输移方程，可模拟水流作用下微污染物的迁移进程，预估它在不同水文状况下的分布情形。

2. 吸附与解吸过程

微污染物在水体中会与悬浮颗粒物、沉积物等发生吸附和解吸作用，这会影响微污染物的迁移过程。悬浮颗粒物和沉积物具有较大的比表面积，能够吸附微污染物，一些重金属纳米颗粒和有机微污染物容易被黏土矿物、腐殖质等吸附。吸附使得微污染物从水相转移到固相，进而降低了其在水体中的迁移能力。当环境条件发生变化时，比如 pH 值、离子强度发生变化，被吸附的微污染物可能会解吸，重新回到水相，继续迁移。研究发现，不同种类微污染物在不同的吸附剂上吸附和解吸的特性存在差异，通过实验测定吸附等温线等参数，可以了解这一过程对微污染物迁移的影响。

3. 沉降与再悬浮

微污染物同悬浮颗粒物相融合之后，也许会出现沉降现象，将它们沉积到水底沉积物之中。沉降速度受微污染物和颗粒物结合程度、颗粒物大小、重量等诸多要素的影响，粒径较大、密度较高的颗粒物携带微污染物沉降速度更快。当这些微污染物沉到

沉积物里面之后,在某些情况下又可能再次悬浮起来,例如水流速度突然变大、底栖生物开始活动等情形,这将导致沉积物再次受到扰动,使得微污染物重新回到水中去参与它的迁移进程。在河口地区,潮汐发生得较为频繁,沉积物的沉降和再次悬浮对微污染物的流动与分布有着很大影响。通过实际观察和实验模拟,可以探究出各种因素给这两种过程带来的影响效果,进而更深刻地了解微污染物在水体和沉积物之间动态流转的情形。

（二）化学迁移机制

1. 化学反应对微污染物形态及迁移性的影响研究

微污染物在地表水中会发生各种化学反应,例如氧化还原反应、水解反应、光化学反应等,这些反应都会使微污染物的化学形态发生改变,从而影响其迁移性。例如,某些有机微污染物在光照射下会发生光降解反应,变成小分子物质,它们的亲水性以及迁移性可能会发生改变。对于重金属纳米颗粒而言,氧化还原反应会改变它的表面电荷和化学成分,从而影响其在水体中的稳定程度和迁移行为。

2. 酸碱平衡中离子交换作用机制探讨

地表水的 pH 值和离子组成会干扰微污染物的酸碱平衡以及离子交换过程。带有酸性或者碱性官能团的一些微污染物,比如某些药物、有机酸等, pH 值的变动会影响到它们的解离情况,进而影响其在水体里的溶解能力和迁移能力。酸性环境下,一些弱酸性药物也许是以分子形式存在,这种情况下,它们就比较容易吸附到悬浮颗粒物或者沉积物上,这样一来,它们在水体里的迁移能力就会变小。离子交换作用同样会影响到微污染物的迁移,因为水体中的阳离子,例如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,可以跟吸附在颗粒物表面的微污染物开展离子交换反应,促使微污染物从颗粒物上脱离出来,进入到水相当中,从而加大其迁移能力。通过探究水体的化学组成及其酸碱平衡状况给微污染物带来的影响,可以为制订污染控制方案赋予参照。

（三）生物迁移机制

1. 生物摄取与积累过程

水生生物摄取和累积微污染物是生物迁移的重要环节。浮游生物、鱼类、贝类等水生生物会通过摄食、呼吸等方式吸收水体中的微污染物。浮游动物在摄食时会摄取微塑料和其他微污染物,这些微污染物会在它们体内逐渐累积,沿着食物链传递。微污染物会在高营养级生物体内不断富集,导致生物放大效应。有些持久性有机污染物在顶级捕食者体内的浓度可能比水体中高出数千倍甚至数万倍。通过生物积累实验,测定生物富集因子 (BCF) 等参数,就可以评判微污染物在生物体内的累积情况和迁移风险。

2. 生物转化与代谢

水生生物对微污染物的转化与代谢同样会影响微污染物的迁移。生物体内的酶系统会对微污染物进行代谢转化,使微污染物转化为其他物质。某些细菌可以将水体中有机微污染物降解为二氧化碳、水等无害物质,然而有的代谢产物可能更具有毒性或迁移性。生物转化过程还会影响微污染物的化学形态,从而影响其在生物体内的累积以及在水生态系统中的迁移。研究生物转化途径及代谢过程,有助于更好地理解微污染物的生物迁移过程。

3. 生物扰动对微污染物迁移的作用机制研究

底栖生物挖掘、摄食、排泄等活动会影响沉积物,影响微污染物在沉积物-水界面的迁移。底栖生物挖掘活动会促进沉积物-水界面之间物质交换,使沉积物中微污染物重新释放到水中。底栖生物排泄的有机质也可能影响沉积物理化性质,影响微污染物的吸附与解吸。例如,蚯蚓等底栖动物在沉积物中挖掘时会增加沉积物孔隙,促进微污染物扩散与迁移。

（四）环境因素交叉作用对迁移的影响

微污染物迁移常常是多种环境因素交叉形成的。水温变动会改变水流黏性 (物理迁移),也会改变水生生物的代谢速率 (生物迁移)。例如,在夏天高温时期,某个湖泊里微塑料的生物摄取速率较冬天提升 37%;而且因为水体分层引发的水流阻隔现象,上层水体里的微塑料浓度比底层高出 2.3 倍。水体里的溶解性有机质 (DOM) 既能通过氢键同 PPCPs 结合从而改善它的吸附能力 (物理机理),又能当作光敏剂促使光化学反应 (化学机理)。在某个水库的检测进程中,发现 DOM 含量较多的地方抗生素光降解速率比清水区快了 1.5 倍;DOM 和沉积物的复合效果致使 30% 的降解中间产物重新吸附累积。此交叉影响表明,单个机制分析难以完全展现微污染物的环境行为,若需构建起多种因素结合的迁移模型,从而为污染防控赋予更准确的参数支撑。

四、结论与展望

研究对地表水微污染物类型与来源做了总结,迁移监测技术及方法被提及,物理、化学、生物迁移机制造成的影响被剖析。监测时多种监测技术结合能提高准确性,不同迁移过程会共同影响它在水环境中的分布与归宿,但现有研究仍显不足,新型微污染物监测方法仍需优化,多机制协同作用的研究尚显薄弱。应该加强高灵敏度检测技术的研发力度,探究复杂环境条件下迁移机制造成影响的综合现象,为地表水微污染处理增添更多科学依据。

参考文献

[1] 万奇霖,刘瑶,洪文俊,等. 钱塘江地表水有机微污染物 AhR 效应分析 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2025, 52(02): 263–274.
[2] 洪涓. 固相微萃取技术在地表水环境农药污染物检测中的应用研究 [J]. 山西化工, 2025, 45(02): 81–83+122.
[3] 王进喜,付怡琳. 污染物总量控制和地表水环境容量的研究进展 [J]. 兰州文理学院学报 (自然科学版), 2024, 38(05): 89–92+128.
[4] 黎文辉. 地表水状态实时监测与重金属污染物特征分布研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(05): 143–146.
[5] 许秋实,关孟欣,田启明,等. 地表水污染物精细化溯源及管理技术研究——评《地表水环境质量自动监测预警理论与实践》[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(03): 116–117.
[6] 黎如昊,严惠华. 地表水污染状态实时监测与污染物特征分布研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(02): 121–124.
[7] 李蕊. 河岸过滤系统中有机微污染物的去除研究 [D]. 桂林理工大学, 2023.
[8] 丁琪琪,龚雄虎,王兆德,等. 基于多指标综合评价法筛选地表水环境优先污染物——以湖北涨渡湖为例 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(01): 90–108.
[9] 孙唯伟. 有机物对重力流超滤处理含铁锰地表水的影响机制及应对突发污染研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
[10] 李希凡. 地表水中复合微污染物致使的纳滤膜污染机制研究 [D]. 河南师范大学, 2021.