

河流中典型有机污染物迁移转化行为研究

谢舒成

(四川建筑职业技术大学, 四川 德阳 618000)

摘要:工业化与城镇化的快速推进使得河流有机污染问题日趋突出,多环芳烃、有机氯农药、多氯联苯等典型有机污染物进入水体后,可通过多种途径完成空间迁移与形态转化,兼具环境持久性、生物累积性与生态毒性,严重威胁水生生态安全及人体健康。本文以河流生态系统为研究载体,梳理了水体中主流有机污染物的类别、理化特征与基础环境行为,系统分析水文条件、水质参数、沉积物界面等环境因子对污染物迁移转化过程的调控作用,阐释溶解扩散、吸附解吸、生物富集等迁移机制,以及光化学降解、微生物降解、氧化还原反应等转化路径。研究结果明晰了典型有机污染物在河流中的环境归趋规律,可为流域有机污染管控、水环境修复及生态风险防控提供理论参考与数据支撑。

关键词:河流;有机污染物;迁移转化;生态

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**3134-9803(2026)04-0007-03

河流是陆地水循环的核心组成部分,也是区域水资源供给、生态维系与物质输移的关键载体。伴随现代工业生产、农业规模化发展以及城市生活活动强度不断提升,大量未经有效处理的废水持续排入天然水体,有机污染物已成为河流污染的首要污染源^[1]。开展典型有机污染物在河流中的迁移转化规律研究,厘清不同环境要素对污染物行为的影响机制,明确各类转化路径的作用效能,是精准制定流域污染治理方案、提升水环境管控水平的前提。

1 河流典型有机污染物类别及理化特征

1.1 主要污染物分类及来源

结合污染物化学结构、排放来源与环境属性,可将河流中常见有机污染物分为石油烃类、农药残留、多环芳烃、持久性有机污染物及药物与个人护理品五大类。

石油烃类污染物主要源自工业生产、交通运输及石油泄漏等活动,该类物质普遍具备强疏水性,进入河流后难以稳定溶解于水相,极易附着在水体悬浮颗粒物与河床沉积物表面,会大幅削弱水体天然自净能力,长期累积可造成底泥持续性污染。

农药残留以有机氯、有机磷类农药为主,是农业面源污染的核心组分。农药类污染物在水环境中行为复杂,既能够通过水解、光解等化学反应逐步分解,也可被浮游生物、底栖生物吸收利用,并借助食物链完成生物放大,扩大污染影响范围^[2]。

多环芳烃主要产生于化石燃料不完全燃烧、工业冶炼及化工生产过程,属于强毒性污染物,普遍具备致癌、致突变、致畸效应。该类物质的水环境行为受

溶解度、界面吸附能力、生物可利用性等理化性质制约,在河流中分布范围广、残留时间久。

以多氯联苯、二噁英为代表的持久性有机污染物是水环境中危害极强的一类污染物,其核心特征为化学性质稳定、自然降解难度大,可实现长距离跨区域迁移,同时极易在生物体内富集。该类污染物在河流中涉及水—气、水—底泥等多界面交换,迁移转化过程错综复杂。

药物及个人护理品属于近年来被广泛关注的新兴有机污染物,其排放具有持续性特征,尽管单类物质在水体中检出浓度偏低,但多组分复合存在时仍会产生潜在生态风险。该类污染物的环境行为与自身理化性质、河流水文特征及土著微生物群落结构密切相关。

1.2 典型污染物理化性质——以多氯联苯为例

多氯联苯作为典型的持久性有机污染物,也是河流中检出率极高的有机污染物之一,其理化性质直接决定了环境归趋。多氯联苯化学稳定性极强,自然环境中难以被常规反应分解,同时具备显著的生物累积特性。该物质辛醇—水分配系数数值较高,标志着其更倾向于富集在有机相介质中,不仅易在河流底泥有机质中大量留存,还会富集在水生生物脂肪组织内,为食物链放大提供了基础条件。

多氯联苯的物态随分子结构变化存在明显差异,熔点跨度较大,常温下部分组分呈液态,部分为固态。物态差异直接改变其迁移形式:液态多氯联苯可直接溶解于水体,随水流完成扩散与对流迁移;固态组分则主要依靠吸附作用附着在悬浮颗粒表面实现输移。

在河流汛期,水流流速加快、水体扰动增强,溶解态多氯联苯扩散范围大幅拓宽,吸附于颗粒物表面的污染物也会随泥沙向下游迁移,加剧流域全域污染。

1.3 污染物基础环境行为概述

有机污染物进入河流后,会在多重环境因子共同作用下发生一系列环境行为。以多氯联苯为例,该物质水溶性极差,进入水体后大部分会快速从水相转移至固相介质,或是吸附在水中悬浮颗粒物表面,或是沉积于河床底泥之中。介质间的分配过程,一方面降低了水体中溶解态污染物浓度,另一方面也让底泥成为污染物的“储存库”。

当水流扰动、水质条件发生改变时,底泥与颗粒物表面吸附的污染物会再次解吸进入水体,形成二次污染。同时,污染物与不同环境介质的结合状态,还会改变其生物可利用性:吸附态污染物难以被生物摄取,而游离于水相中的溶解态组分更易被水生生物吸收,进而启动生物累积过程,最终引发生态毒性效应。

2 河流环境因子对有机污染物迁移转化的影响

2.1 水文条件的驱动作用

河流水文特征存在明显的季节分异,直接改变污染物的行为模式。雨季降雨集中,地表径流汇入河流,水体流量与水位骤增,水流剪切力随之增强。一方面,大量外源污染物随地表径流进入河流,造成水体污染物负荷短时上升;另一方面,强烈的水流扰动会促使河床底泥再悬浮,底泥中蓄积的有机污染物重新释放至水相,加剧水体污染。进入枯水期后,河流流量锐减、水流平缓,水体扰动减弱,污染物在河道内的停留时间大幅延长。较长的停留时间为水体微生物降解、化学转化反应创造了稳定环境,有机污染物的自然转化效率有所提升,但也容易形成污染聚集区。

2.2 水质参数的调控效应

溶解氧、pH值、水温、盐度等常规水质参数,从化学反应、微生物活性等层面调控有机污染物的转化效率与存在形态^[9]。

溶解氧是影响生物降解过程的关键指标。当水体溶解氧浓度高于5mg/L时,好氧微生物处于高活性状态,可高效分解水体中的有机污染物;若水体出现缺氧、厌氧状态,好氧微生物代谢受到抑制,降解过程随之放缓,厌氧微生物则成为污染物转化的主导菌群。

水体pH值会改变有机污染物的分子存在形态、溶解度以及界面吸附能力。酸性水环境中,部分有机污染物会解离为离子态,水溶性提升,更易在水相中迁移;碱性环境下,污染物分子与底泥、悬浮颗粒的吸附作用力增强,更多污染物被固定在固相介质中。

水温主要通过影响微生物酶活性改变降解速率,在适宜温度区间内,水温升高会加快微生物代谢,有机污染物降解效率同步提升。盐度则会改变水体渗透压,影响微生物群落结构与生理活性,进而对污染物降解过程产生抑制或促进作用。

2.3 沉积物界面的交互作用

沉积物有机质是吸附有机污染物的主要载体,有机质含量越高,表面活性官能团越丰富,对多氯联苯、多环芳烃等疏水性有机污染物的吸附容量就越大,底泥对污染物的固定效果越显著。底泥颗粒粒径同样影响吸附能力,细颗粒泥沙比表面积大,吸附能力远强于粗颗粒,是污染物富集的主要固相介质。沉积物界面的氧化还原状态会诱导不同类型的生物地球化学反应。厌氧环境下,硫酸盐还原菌等厌氧微生物大量繁殖,可推动多氯联苯发生厌氧脱氯反应,生成毒性更低的中间产物,实现污染物无害化转化。

3 典型有机污染物在河流中的迁移机制

3.1 溶解态污染物的扩散与对流

对流与扩散是溶解态有机污染物在水相中迁移的主要形式,其作用强度受河流流速、水深、河床形态等条件制约。对流是水体物质输移的主导力量,水流整体运动带动溶解态污染物沿河道纵向迁移;分子扩散与紊动扩散则促使污染物在水体横向、垂向均匀分布。受流体动力学影响,河流弯道处水体产生环流,离心力会使溶解态污染物在弯道外侧聚集,形成明显的浓度梯度。

3.2 吸附与解吸过程

吸附与解吸是有机污染物在水相和固相介质之间转换的核心过程,直接决定污染物的空间分布与环境停留时间。多氯联苯、多环芳烃等疏水性持久性有机污染物在河流沉积物上吸附能力极强,吸附系数可达数千至数万毫升每克,绝大部分污染物会快速从水相转入底泥,长期储存于沉积物中。解吸是吸附的逆过程,河流洪水扰动、底泥疏浚、pH值与水温变化等外界干扰,都会破坏污染物与固相介质之间的结合力,促使吸附态污染物重新释放至水体,造成阶段性水质恶化。

3.3 生物转运与生物累积

生物转运与累积是有机污染物进入生物链的关键过程,也是污染物生态风险传递的主要途径。生物转运指污染物通过水生生物的呼吸、摄食、体表渗透等方式进入生物体内,并随生物活动完成空间迁移。底栖生物、鱼类是河流中污染物转运的主要载体,受污染物水溶性、生物生理特征影响,水生生物对多氯联苯等物质的摄取效率较高,体内污染物浓度会随暴露时间持续上升。生物累积是污染物在生物体内不断富

集的现象,滤食性、底栖栖息类生物因生存习性特殊,往往成为污染物累积的重点对象,部分底栖生物体内多氯联苯浓度可达周边水体浓度的数千倍。

4 典型有机污染物在河流中的转化途径

4.1 光化学降解与光催化反应

光照是驱动水体有机污染物转化的重要自然条件,光化学降解普遍发生在河流表层水体,主要依靠太阳光中的紫外辐射破坏污染物分子化学键。多环芳烃在紫外线照射下可发生直接光解,分子结构逐步改变,生成羟基化中间产物,中间产物可进一步被氧化分解,最终实现彻底矿化,转化为无毒小分子物质。

光催化反应则需要借助二氧化钛等光催化剂完成,催化剂受光照激发后会产生羟基自由基等强氧化性活性物质,该类物质氧化能力极强,可无选择性地分解各类有机污染物。在天然河流环境中,水体悬浮矿物颗粒可发挥天然光催化作用,辅助有机污染物降解,但受水体浊度、水深影响,光照穿透能力有限,光化学降解主要作用于表层水体,对深层水体及底泥中的污染物作用微弱。

4.2 生物降解与微生物作用

河流水体、底泥中分布着细菌、真菌、藻类等丰富的微生物群落,可通过自身代谢作用将复杂有机大分子分解为简单无机物。假单胞菌属、分枝杆菌属等功能微生物,能够以多环芳烃、石油烃、农药残留作为碳源与能量来源,通过一系列酶促反应完成污染物降解。

微生物降解过程严格依赖水体溶解氧条件:好氧环境中,好氧菌群主导降解反应,降解速率快、反应彻底;厌氧环境下,厌氧微生物发挥主要作用,降解路径与产物和好氧反应存在显著区别。沉积物界面微生物群落丰富、生存环境稳定,是微生物降解的核心区域。

4.3 化学转化与氧化还原反应

在富氧水体环境中,氧化反应占据主导,多氯联苯发生羟基化、氧化脱氯反应,分子毒性大幅降低,生成的中间产物结构更简单,更易被微生物进一步分解。在水体底层、底泥等厌氧区域,还原脱氯反应成为主要转化路径,该过程虽无法将污染物彻底矿化,但能够改变氯原子取代位置与数量,降低污染物生物累积性与生态毒性。

河流中的铁锰氧化物、有机质等物质可作为电子受体或供体,参与氧化还原反应,推动污染物转化。同时,水生生物的代谢活动也会改变局部水环境的氧化还原状态,间接影响污染物化学转化进程。各类化学转化反应与微生物降解相互耦合,共同完成河流有机污染物的自然净化。

5 结论

本文系统分析了河流中石油烃、多环芳烃、持久性有机污染物等典型有机污染物的类别、理化特征与基础环境行为,明确了水文条件、水质参数、沉积物界面三大环境体系对污染物迁移转化的调控机制,厘清了溶解扩散、吸附解吸、生物累积三大迁移机制,以及光解、微生物降解、氧化还原反应三类核心转化路径,旨在为守护河流生态安全、保障水资源质量提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 宋雷,刘思强.河流有机污染物协同治理及资源化利用[J].中国资源综合利用,2026,44(5):158-160.
- [2] 孙菁婕,王智源,王轶虹,等.人工运河持久性有机污染物分布与生态风险[J].长江科学院院报,2026,43(2):18-28.
- [3] 杨鸿鹄.河流沉积物中典型全氟化合物释放机制研究[J].水利技术监督,2025,(7):189-193.

Study on the Migration and Transformation Behavior of Typical Organic Pollutants in Rivers

Xie Shucheng

(Sichuan Vocational and Technical University of Architecture, Deyang, Sichuan 618000)

Abstract: The rapid advancement of industrialization and urbanization has made organic pollution in rivers increasingly prominent. After entering water bodies, typical organic pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons, organochlorine pesticides, and polychlorinated biphenyls can undergo spatial migration and transformation through multiple pathways. These pollutants exhibit environmental persistence, bioaccumulation, and ecological toxicity, posing serious threats to aquatic ecological security and human health. Taking river ecosystems as the research context, this paper reviews the categories, physicochemical characteristics, and fundamental environmental behaviors of major organic pollutants in water bodies; systematically analyzes the regulatory effects of environmental factors, including hydrological conditions, water quality parameters, and sediment interfaces, on pollutant migration and transformation processes; and elucidates migration mechanisms such as dissolved diffusion, adsorption and desorption, and biological accumulation, as well as transformation pathways including photochemical degradation, microbial degradation, and oxidation-reduction reactions. The results clarify the environmental fate patterns of typical organic pollutants in rivers and can provide theoretical references and data support for organic pollution control in river basins, water environment restoration, and ecological risk prevention and control.

Keywords: river; organic pollutants; migration and transformation; ecology