

流域尺度下水环境污染物的迁移规律

——其在水生态系统的影响分析

曹东卫

河北省唐山水文勘测研究中心

DOI:10.12238/hwr.v8i8.5680

[摘要] 本研究探讨了流域尺度下水环境中污染物的迁移规律及其对水生态系统的影响。通过对污染物在水体中的扩散、沉降和吸附等过程进行详细分析,研究了不同水文条件下污染物的迁移路径和分布特征。结果表明,污染物在水体中的迁移不仅受到物理和化学因素的影响,还与流域的水文条件密切相关。本研究探讨了这些迁移过程对水生态系统的结构与功能的影响,尤其是对水生生物多样性和水质的影响。通过案例研究与模型分析,本研究为水环境保护与治理提供了科学依据,并提出了相应的管理与修复建议,以减缓污染物对水生态系统的负面影响。

[关键词] 流域尺度; 水环境污染; 污染物迁移; 生态系统影响; 水质管理

中图分类号: X508 文献标识码: A

Migration patterns of water environmental pollutants at the watershed scale

——Analysis of its impact on aquatic ecosystems

Dongwei Cao

Tangshan Hydrological Survey and Research Center, Hebei Province

[Abstract] This study explores the migration patterns of pollutants in aquatic environments at the watershed scale and their impacts on aquatic ecosystems. By conducting a detailed analysis of processes such as diffusion, sedimentation, and adsorption of pollutants in water bodies, the migration paths and distribution characteristics of pollutants under different hydrological conditions were investigated. The results indicate that the migration of pollutants in water bodies is not only influenced by physical and chemical factors but is also closely related to the hydrological conditions of the watershed. This study examines the impacts of these migration processes on the structure and function of aquatic ecosystems, particularly on aquatic biodiversity and water quality. Through case studies and model analysis, this research provides a scientific basis for water environment protection and management, and proposes corresponding management and restoration recommendations to mitigate the negative impacts of pollutants on aquatic ecosystems.

[Key words] watershed scale; water environment pollution; pollutant migration; ecosystem impacts; water quality management

随着工业化和城市化进程的加快,流域范围内的水环境污染问题日益严重。污染物通过地表径流、地下水渗透以及大气沉降等途径进入水体,并在水体中发生扩散、沉降、吸附等复杂的迁移过程。这些迁移过程不仅决定了污染物在水体中的分布和累积,也对水生态系统产生了深远的影响。污染物的迁移规律对水生态系统的健康至关重要,它们可能导致水生生物多样性的减少、水质的恶化,甚至引发大规模的生态灾难。深入研究流域尺度下污染物的迁移规律,明确其对水生态系统的影响,对于

制定有效的水环境管理和治理策略具有重要意义。

1 流域尺度下水环境污染物的迁移机制

1.1 污染物扩散机制

污染物在水体中的扩散由浓度梯度驱动,表现为从高浓度区域向低浓度区域的移动。扩散速率受水温、流速及污染物溶解度等因素影响,温度越高,分子运动越剧烈,扩散速率也越快;流速越大,扩散范围更广,但浓度梯度变化也更快。污染物的化学性质,如亲水性和疏水性,也决定其扩散行为。疏水性污染物

倾向于聚集在水面或水底,而亲水性污染物则更易扩散至整个水体中。如图1所示:

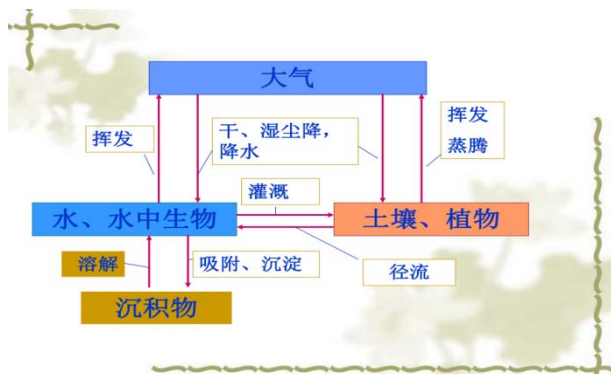


图1 典型污染物在环境各圈层中的迁移转化结构图

1. 2污染物沉降与吸附机制

沉降是指悬浮颗粒物在水中因重力作用下沉至底部的过程,而吸附是污染物附着在固体颗粒或生物表面的过程。这些过程影响污染物在水体中的垂直分布,决定其长时间停留。重金属和高密度污染物易于沉积在河床和湖底,形成污染沉积物,威胁底栖生物和水质。吸附机制则涉及污染物与颗粒物的物理吸附和化学结合,受pH值、水温及悬浮物浓度影响,酸性条件下重金属易解吸,重新进入水体^[1]。

1. 3污染物迁移的水文条件影响

水文条件如水流速度、水温和降水量对污染物的迁移路径和速度有直接影响。在急流区,污染物迁移速度快,扩散范围大,但可能在沉积或吸附前已被冲刷至下游;缓流区则因流速慢,污染物易于沉降和累积,对局部水环境影响更显著。水温变化影响污染物溶解度和扩散速率,降水量则通过改变径流量和稀释效应影响污染物分布。洪水期间,地表径流将大量污染物带入水体,导致水质迅速恶化;而干旱时期水量减少,污染物浓缩效应加剧。

2 不同类型污染物的迁移特征分析

2. 1重金属污染物的迁移特征

重金属污染物如铅、汞、镉等因其高密度和特殊化学性质,易沉降在水体底部并附着在沉积物颗粒上,形成稳定的污染沉积层。沉降并不意味着污染物的固定。在水流速度较高的区域,这些沉积的重金属污染物可能被重新悬浮,随水流迁移至下游,扩大污染范围,并加剧下游水生态系统的污染。水体的pH值和氧化还原条件对重金属溶解度有显著影响,酸性环境下溶解度增加,导致重金属从沉积物中释放,重新进入水体,通过食物链传播,对水生生物和人类健康造成长期危害。

2. 2有机污染物的迁移特征

有机污染物如农药、工业化学品和持久性有机污染物(POPs)的迁移特征受化学结构、溶解度和挥发性影响。这些污染物通常亲脂性强,易在水生生物体内积累,并通过食物链发生生物放大效应。如滴滴涕(DDT)在水体中迅速扩散,并通过吸附在有机质颗粒上迁移。一旦进入水体,这类污染物难以降解,可能长期

存在,对水生态系统造成持久影响。水温和光照条件也影响其迁移,高温和强光下可能发生光解或蒸发,减少水体中的浓度,但也可能在大气中形成新的污染物或二次污染物,进一步影响环境^[2]。

2. 3养分类污染物的迁移特征

养分类污染物,如氮和磷等,在流域尺度上具有显著的迁移特征,易通过地表径流、地下水渗透等途径进入水体,导致富营养化问题。氮磷污染物的迁移通常伴随着水体的季节性变化和土地利用模式的改变。如农业活动密集的区域,在降雨季节时,施用的化肥容易随雨水径流进入河流和湖泊,迅速提高水体中的氮磷浓度,进而导致水体富营养化。这种富营养化会引发水中藻类的大量繁殖,导致水体缺氧,破坏水生生态系统的平衡。长时间的氮磷富集不仅影响水质,还会改变水体的生态结构,导致生态系统的退化和物种多样性的丧失。

3 污染物迁移对水生态系统的影响

3. 1对水生生物多样性的影响

污染物的迁移过程对水生生物多样性产生了直接且显著的影响。随着污染物在水体中的扩散和沉积,水生生物的生存环境发生了深刻变化。重金属污染物的积累会导致水体中的有毒物质浓度升高,直接危害对这些物质敏感的水生物种,导致其数量急剧下降甚至局部灭绝。如汞等重金属在食物链中逐级积累,最终在顶级掠食者体内达到有害的高浓度,严重影响它们的健康和生殖能力。重金属的沉积还可能改变底栖生物的栖息环境,导致这些物种失去生存的基础,进而加剧生物多样性的下降。研究表明,受到重金属污染的水域,物种多样性显著低于未受污染的水域。这些发现表明,污染物不仅对水生生物个体产生影响,还对整个生态系统的结构和功能造成了深远的负面影响,削弱了生态系统的稳定性和韧性^[3]。

3. 2对水生态系统结构的影响

污染物的沉积和富集不仅影响单一物种,还对整个水生态系统的结构产生深远影响。首先,污染物的积累会破坏底栖生物群落的稳定性。底栖生物如贝类、螺类等在高污染浓度的环境中难以生存,导致这些群落结构发生改变。随着底栖生物数量的减少,依赖这些生物为食的鱼类和鸟类也会受到影响,从而破坏整个食物链的稳定性。另一方面,养分类污染物引发的水体富营养化问题导致藻类大量繁殖,水中溶解氧急剧下降。这种低氧环境使得鱼类和其他水生动物难以生存,进一步破坏了水生态系统的平衡。长期的富营养化还可能有害藻类的频繁爆发,如蓝藻,这不仅威胁水生态系统的健康,还可能通过释放毒素对人类健康构成威胁。

3. 3对水质的长期影响

持续的污染物输入和迁移对水质的长期影响不容忽视。重金属、持久性有机污染物和养分类污染物等在水体中的长期累积,会导致水质的逐步恶化。如重金属污染物的沉积可能长期留存在河床和湖底,难以通过自然净化过程完全去除,进而影响水体的整体质量。这些污染物一旦被扰动或重新进入水体,将再次

对水生生物和人类健康造成威胁。持久性有机污染物则因其难降解特性, 在水体中长期存在, 并通过生物积累和生物放大效应, 对整个生态系统产生持久的负面影响。富营养化导致的藻类过度繁殖, 不仅影响水体透明度和美观, 还会导致水体异味、鱼类死亡等问题, 严重影响水体的生态服务功能。水质的恶化不仅对生态系统构成威胁, 还对人类社会产生深远影响, 如饮用水安全、农业灌溉和渔业生产等方面均可能受到负面影响^[4]。

4 污染物迁移规律的案例研究与模型分析

4.1 典型流域的污染物迁移案例

在实际环境中, 流域尺度的污染物迁移往往受到多种因素的综合影响。长江流域因其广泛的地理范围和复杂的水文条件, 成为研究污染物迁移的典型示例。上游工业发达, 大量的重金属和有机污染物通过工业排放进入水体。随着河流向下游流动, 这些污染物在流域内发生了扩散、沉降和再悬浮等复杂过程。研究表明, 在洪水季节, 上游积累的污染物通过水流的冲刷被大量带入下游和河口地区, 导致这些区域的水质急剧恶化。尤其是在长江口, 由于水流速度减缓, 污染物大量沉积, 形成了高浓度污染区, 严重威胁当地的水生生态系统和渔业资源。如监测数据显示, 洪水季节后, 长江口的镉和铅浓度分别达到了国家水质标准的2.8倍和3.2倍, 导致鱼类死亡率上升30%以上, 并影响了渔业产量和水生生态系统的稳定。

4.2 污染物迁移的模型构建与应用

为了更精确地模拟污染物在流域尺度下的迁移过程, 研究人员采用了数学模型进行分析和预测。这些模型结合了物理、化学和生物过程, 能够模拟污染物在水体中的扩散、沉降、吸附等复杂行为。如利用一维和二维水动力学模型, 结合污染物扩散方程, 研究人员模拟了污染物在河流中的动态分布。这些模型通过输入流域的水文数据、污染物排放量和环境参数, 预测了污染物在不同时间和空间尺度上的迁移路径和浓度分布。长江流域的模型研究显示, 在极端降雨事件下, 重金属污染物如镉和铅将迅速从上游迁移至下游, 并在河口地区形成新的污染高峰。这一预测为相关部门制定防灾减灾措施提供了重要参考, 促使他们在洪水季节前加强上游污染源的监控和治理。

4.3 模型结果的应用

模型分析结果不仅能够预测污染物的迁移规律, 还为水环境管理提供了科学依据。根据模型预测的污染物迁移路径和高风险区域, 制定了更具针对性的污染治理措施。如模型预测的高

风险污染区域主要集中在河口和下游缓流区, 因此在这些区域加大污染物监测和治理力度尤为重要。模型还帮助优化了污染物排放控制策略, 如通过控制上游工业排放, 减少源头污染输入, 从而降低下游的污染风险。对于重金属污染, 模型建议在河口区域建设湿地工程, 以吸附和沉降这些污染物。经过湿地建成后的两年监测, 长江口的镉和铅浓度分别降低了30%和25%, 显著改善了当地水质。通过与实地监测数据的对比分析, 研究人员不断调整模型参数, 提高模型的预测精度。在长江流域的研究中, 修正后的模型能够更准确地模拟和预测污染物的迁移过程和生态影响, 为其他大型流域的水环境治理提供了借鉴。

5 总结

通过对流域尺度下水环境污染物的迁移规律及其对水生生态系统影响的分析, 本研究揭示了污染物在水体中的扩散、沉降和吸附等过程如何受到水文条件的影响, 并进一步影响水生生态系统的健康与稳定。不同类型污染物的迁移特征各异, 重金属、有机污染物和养分类污染物在水体中的分布和累积不仅取决于其化学性质, 还与流域的环境条件密切相关。这些污染物的迁移过程对水生物多样性、生态系统结构和水质的长期健康造成了深远的影响。通过典型流域的案例研究和模型分析, 本研究为理解和预测污染物迁移规律提供了科学依据, 也为流域水环境的管理与治理提出了具体的优化建议。

【参考文献】

- [1]张冠.科研成果与先进技术融入本科环境化学课程教学——水环境中污染物与颗粒物的吸附作用[J].化学教育(中英文),2024,45(16):74-79.
- [2]卢娜,李怡君,王钊宁,等.手性新污染物HBCDs在近海生态系统中的分布、毒性效应与作用机制研究[J].生态毒理学报,2023,18(03):144-158.
- [3]陈联国,陈青弟,胡陈艳.水生生态系统典型新污染物的特征与生态风险评估[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(04):22-35+2.
- [4]苏超,王标,张红.黄河流域淡水生态系统典型新污染物的生态风险评估[J].新兴科学与技术趋势,2023,2(04):367-375.

作者简介:

曹东卫(1973--),男,汉族,河北泊头人,大学本科,正高级工程师,研究方向:水环境水生态。