

城市面源污染及河道水质关系研究综述

文 / 黎启贤 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司

李纪湘 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司

摘要：随着我国点源污染治理成效的显著提升，面源污染已成为水环境治理的重点和难点。本文系统梳理了城市面源污染的产污机理、监测方法及其与河道水质的响应关系，重点探讨了城市降雨径流的水质特性、初始冲刷效应、关键影响因素及污染负荷计算模型，全面分析了多尺度监测技术的适用性及其在面源污染管控中的应用前景。研究表明，城市面源污染具有明显的时空异质性和过程复杂性，需要建立基于多源数据融合的监测体系和精细化的模拟预测方法，构建的面源污染综合治理框架，可为城市面源污染的精准监测、科学计算、有效模拟和水质达标治理提供理论依据和技术支撑。

关键词：城市面源污染；监测技术；径流特征；污染机理；河道水质

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.119

引言

城市面源污染是指在降雨条件下，雨水及地表径流冲刷城市各类下垫面，携带地表累积污染物进入受纳水体，从而引发的水环境污染现象。近年来，随着城市建成区面积的不断扩大，不透水地表比例持续增加，改变了天然水文循环过程，导致径流量增大、汇流时间缩短，进而加剧了面源污染的产生和扩散。同时，城市地表累积的污染物种类繁多，包括悬浮固体、营养盐、重金属、有机污染物等，这些污染物在降雨过程中随径流迁移，对受纳水体造成复合污染。面源污染对水体环境的影响日益凸显，成为制约城市水环境质量持续改善的关键因素。因此，深入探究城市面源污染的形成机理、迁移规律及其对河道水质的影响，具有重要的理论价值和现实意义。

本文围绕城市面源污染的产污机理、监测技术及其与河道水质响应关系等核心问题，重点分析面源污染的关键影响因素和控制技术，以期为我国城市面源污染治理提供科学参考。

一、城市降雨面源污染产污机理的研究



面源污染路径示意图

基于国内外学者对城市降雨面源污染的系列研究，城市降雨面源污染产污机理可系统归纳为以下核心维度。

(一) 城市降雨径流水质特征

在非降雨期，大气干湿沉降、交通排放、植物凋落物分解、人类活动等持续向地表输入污染物，累积速率受地表材质、粗糙度、清洁频率等因素制约，这些污染物通过物理吸附、化学键合等方式赋存在下垫面介质中；降雨发生时，雨滴击溅作用和径流冲刷作用共同导致污染物的解吸和悬浮。这一动态过程使得径流水质呈现显著的时间变异性。降雨径流既是污染物迁移的核心载体，也是驱动污染扩散的关键动力。

(二) 污染物的初始冲刷效应

在降雨-径流响应过程中，污染物浓度通常呈现初期峰值随后衰减的典型时序特征，此现象被定义为初始冲刷效应。这一效应的强度可用初始冲刷系数（ FF_{30} ）量化，即前30%的径流量所携带的污染物比例。研究表明，不同污染物的初始冲刷强度存在显著差异，悬浮固体（SS）和重金属通常表现出较强的初始冲刷效应，而溶解性营养盐的初始冲刷特征相对较弱。

初始冲刷效应的产生机理主要源于以下几个方面：首先，地表最容易冲刷的细颗粒物和溶解性污染物在降雨初期优先进入径流；其次，降雨初期径流量较小，污染物的稀释程度有限；再次，长期干旱期后地表污染物的累积量达到峰值。这些因素的共同作用导致降雨初期污染物浓度显著升高。

各国研究者为探讨场次降雨事件中污染物初始冲刷的存在及其强度情况，构建污染物与径流累积量的相关性模型，并基于无量纲累积曲线的离散度来量化，从而系统解析该现象的动态规律。

(三) 影响城市降雨面源污染水质的因子

1. 气候驱动因子：包括降雨强度、历时、降雨总量、前期干旱期、时空分布格局及大气干湿沉降特征。降雨

强度直接决定污染物剥离效率，而降雨总量通过稀释作用影响污染物浓度。前期干旱期的长短影响地表污染物的累积量，一般来说，干旱期越长，初始污染物浓度越高。大气干湿沉降作为重要的污染物输入途径，其化学成分和沉降通量对径流水质具有重要影响。

2. 污染物本身属性：涵盖化学组分、赋存形态、胶体行为及监测方法。不同污染物在环境中的迁移转化行为存在显著差异。重金属的毒性主要取决于其化学形态而非总浓度，污染物的内在属性决定了其在面源污染过程中的效应。

3. 城市空间特征：涉及土地利用结构、不透水表面占比、下垫面粗糙度、市政清洁效能及排水系统特征。土地利用类型决定地表污染物的空间分布规律，商业区和交通干道以重金属和烃类污染为主，居民区则表现出较高的营养盐负荷。不透水表面比例直接影响产汇流过程，通常不透水率超过 10% 就会对水文过程产生显著影响，超过 40% 可能引起严重的水环境问题。

简而言之，降雨强度决定污染物冲刷效率，而降雨总量通过稀释作用控制污染物浓度；土地利用类型决定地表污染物的空间分布规律；大气沉降控制径流污染物的初始值；市政清洁频次则显著影响污染物累积速率。

（四）城市降雨径流中污染物负荷核算

传统点源采样法存在成本高昂、灵活性差及动态模拟能力不足等局限性。当前研究则趋向于整合多源数据如监测数据、城市 GIS 基底、气象水文数据等，通过数学建模与数值仿真技术，构建降雨-径流-污染数学模型，实现面源污染全过程的定量化分析与优化管控。

常用的面源污染模型可分为经验模型和机理模型两大类。经验模型基于统计关系建立输入与输出的响应关系，具有参数少、计算简便的优点，但在外推应用时存在较大不确定性。机理模型则基于物理化学过程，详细描述污染物在环境中的迁移转化，虽然精度较高但对数据需求和计算资源要求也相应提高。

典型模型有 CREAMS 农业管理系统化学径流侵蚀模型、SWMM 暴雨管理模型、HSPF 水文模拟程序、InfoWorks CS 城市排水系统综合模拟平台。这些模型在不同空间尺度和应用场景下各具优势：SWMM 模型适用于城市排水系统的详细模拟，能够精确描述管道水流和污染物传输过程；而 HSPF 模型则更适合流域尺度的长期连续模拟。

近年来，随着人工智能技术的发展，机器学习方法在面源污染负荷估算中展现出巨大潜力，为污染负荷预测提供了新的技术途径。这些智能模型与传统机理模型的融合，将是未来面源污染模型发展的重要方向。

二、面源污染与河道水质关系研究

（一）土地利用与水质响应关系

土地利用通过改变地表覆被格局和水文过程，深刻影响面源污染的产生和输移。根据“源-汇”理论，不同土地利用类型具有差异化的污染特征，直接影响面源污染的产生强度和类型的空间分布，这种空间异质性使得面源污染治理需要采取分区分类的精细化策略。响应影响因素包括以下方面：

1. 土地利用结构。不同土地利用类型的污染排放特征存在显著差异。商业区和交通干道主要排放重金属和烃类污染物，居民区以营养盐和有机物为主，工业区则可能排放特征污染物。土地利用的空间组合方式通过影响污染物的混合和迁移，进一步改变最终进入水体的污染负荷。

2. 不透水表面比例。不透水表面的增加改变天然水文过程，导致径流系数增大、汇流时间缩短，进而增强污染物的输移效率。研究表明，当流域不透水率超过 10% 时，开始对水生生态系统产生明显影响；超过 25% 时，水质恶化趋势显著；超过 50% 时，水生态系统服务功能严重退化。

3. 景观格局特征。景观的破碎化程度、连通性、多样性等指标与水质存在密切关系。较高的景观连通性可能加速污染物的迁移，而合理的景观多样性有助于增强生态系统的污染截留能力。

2006 年陈丰禹等借助 GIS 与水质指数法，揭示西苕溪流域土地利用变化引发的养分流失对水质的影响，发现林地转化为耕地会导致氮磷负荷增加 20%~35%。2010 年郝敬峰基于南京东郊湿地群水质监测指标的变化发现建设用地是水质情况变化的主要影响因子，城市建成区比例每增加 10%，河道氨氮浓度平均上升 0.15 mg/L。

（二）水文过程与水质动态响应

水文过程通过控制污染物的输移和转化，直接影响水质变化。降雨-径流过程将地表累积的污染物冲刷、溶解并输送到受纳水体，形成脉冲式污染，过程的强度和持续时间共同决定了水质的动态变化特征。这种动态响应关系受到水文动力学因素、土壤水分特征、水文因素和时间因素的共同影响。

1. 水文动力学因素。径流形成特征决定了污染物释放速度和持续时间；流速与流态影响污染物混合效率；水文连通性影响污染物的稀释和转化。地下水排泄带通常具有较高的污染物滞留能力，而地表水渗漏区可能成为污染物的快速通道。

2. 土壤水分特征。土壤含水率通过控制氧化还原电位影响污染物形态转化。当土壤含水率达到田间持水量的 80% 以上时，反硝化作用显著增强， N_2O 排放通量增加

3-5倍。土壤胶体作为污染物的载体，其释放和迁移受离子强度和水利条件控制。在降雨初期，胶体结合态污染物可占总污染负荷的30-60%。

3. 水文因素。河网密度和结构决定污染物的传输路径和滞留时间。高密度排水网络加速污染物汇入水体，而复杂河网结构增加污染物的河道内处理机会。

4. 时间因素。单次降雨事件中，水文响应的滞后时间和峰值特征直接影响污染脉冲的强度和持续时间。水文响应时间越短，污染峰值越显著；随着季节更替，水文情势的季节性变化导致污染物输移模式的周期性特征。丰水期污染物通量通常是枯水期的2-3倍；在以年为单位记录的过程中，气候变化驱动的水文序列变异影响污染物的长期输移规律。极端水文事件频率增加可能改变既有的污染负荷特征。

（三）生态效应与风险评估

面源污染物通过直接毒性和间接影响两个途径对水生生态系统产生危害。直接毒性作用表现为污染物对水生生物的急性或慢性毒害，影响其生长、繁殖和行为。间接影响则通过改变水体理化性质（如pH、溶解氧）、破坏栖息地条件、改变食物网结构等途径，影响生态系统的结构和功能。这些效应在个体、种群、群落和生态系统多个层次上表现出来，形成一个复杂的效应链。

通过整合现场调查、实验测试与模型模拟等方法，系统揭示污染物对水生生物及生态系统的多重影响，并定量预测其潜在风险。研究者运用生物监测获取野外生态系统的实际响应数据，通过毒性测试明确污染物的剂量-效应关系，并借助生态模型模拟污染物的迁移转化与生态效应。该研究不仅可识别关键致险污染物与敏感生态环节，还能划定优先管控区、指导环境标准修订，为面源污染治理提供科学依据，最终服务于水生态安全维护与水资源可持续管理。

三、降雨产污全过程监测及变化规律研究

城市面源污染伴随径流生成与迁移过程产生，最终汇入自然环境。依据其形成机制，可从三个尺度层级解析排放特征：最小尺度表现为单一下垫面受雨水冲刷直接产生；中观尺度体现为汇流区内多类型下垫面径流汇集形成；宏观尺度则呈现全域汇流区面源的整体叠加效应。

针对上述三尺度特征，可采用三类监测方法：1) 基于下垫面单元的排放量；2) 依托雨水/合流制排放口的排放量；3) 通过地表径流过程的全域污染追踪监测^[3]。

（一）下垫面单元监测技术

操作流程分三步实施：首先按水文情况与污染特征将城市区域划分为多类下垫面；其次在每类下垫面布设

代表性监测点；最终通过点位数据推演全域面源污染物排放总量。

（二）排放口通量监测技术

该方法通过测定汇流区排放口污染物通量推算区域面源总量，进而计算城市区域污染物排放总量。实际实施中按区域汇水特性不同采用两种推算方式：

1. 比例推算法：当下垫面构成与城市全域相似或推测结果精度要求较低时，直接按面积等比例放大监测值；
2. 单位排放强度法：当下垫面构成差异显著时，需计算单位综合下垫面污染排放强度，据此进行科学换算。

（三）地表径流通量监测技术

针对径流路径明确且存在目标河流的城市区域，可通过测定目标河流接纳城市径流前后的污染物通量变化，直接量化全域面源污染排放负荷。该方法要求城市水文边界清晰、径流汇流路径可追溯。

（四）多尺度监测技术的关联性

理论上，三类技术均可获取全域面源污染总量且结果应具可比性；但实际因监测路径与尺度层级的差异，其数据代表性存在显著差异。方法一通过选择性抽样监测，点位代表性直接决定总排放量的准确度；方法二进行区域综合监测，可有效表征汇水单元面源特征；方法三采用终端通量直接监测，反映污染物的最终环境输入量。

在技术适用性方面，方法一因实施条件宽松而具备普适性优势；方法二、三则受限于自然条件、排放口条件、监测条件，适用边界严格：方法二需满足汇水区精准划界、排放口规范化及监测设施完备等前提；方法三仅适用于具有明确的目标河流且径流路径稳定的城市。需特别指出的是，方法一虽适用范围广，但其点位布设的典型性要求极高，故需专项研究优化选址策略。

结语

城市面源污染的治理将是未来水污染治理的重点和难点。城市面源污染的监测、模拟和控制对策方案的一体化研究是未来城市水环境水安全领域的研究热点。基于面源污染负荷及其迁移转化规律的定量研究来制定精细化的“一河一策”的城市面源污染削减对策以实现水体特别是河道水质达标是迫切需要解决的技术问题和现实需求。

参考文献

- [1] 商放泽, 侯志强, 万颖等. 深圳龙岗区道路雨水径流痕量物质污染特征及风险分析[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 161-165.
- [2] 尹航. 基于深度学习的城市雨强识别技术研究[D]. 浙江大学, 2023.
- [3] 王军霞, 唐桂刚, 罗彬等. 城市面源污染物排放量监测技术方法研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(08): 54-58.