

城市地表水体中重金属污染分布特征与生态风险评估

陈莎莎

(湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要: 城市地表水体是城市生态系统的重要组成部分, 对维持城市生态平衡、保障居民生产生活用水安全具有不可替代的作用。重金属污染因其持久性、累积性和生物毒性, 已成为影响城市地表水体生态质量的关键问题, 精准把握其分布特征并科学评估生态风险, 是开展污染防控与生态修复的重要前提。基于此, 文章以城市地表水体为研究对象, 系统阐述了城市地表水体的定义与分类, 分析了重金属污染的来源、主要类型及污染特殊性, 深入探究了重金属在空间、时间维度及不同形态下的分布规律, 构建了多维度生态风险评估指标体系, 剖析了污染驱动因素, 提出了针对性的防控与修复策略。研究旨在为城市地表水体生态环境保护、污染治理方案制定提供科学依据, 助力城市生态系统高质量可持续发展。

关键词: 城市地表水体; 重金属; 污染分布特征

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 09-0020-14

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.09.003

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Urban Surface Water Bodies

Shasha Chen

(Hunan University, Changsha, Hunan 410082)

Abstract: Urban surface water bodies are an important component of urban ecosystems, playing an irreplaceable role in maintaining urban ecological balance and ensuring the safety of residents' production and domestic water use. Heavy metal pollution, due to its persistence, accumulation, and biological toxicity, has become a key issue affecting the ecological quality of urban surface water bodies. Accurately grasping its distribution characteristics and scientifically assessing ecological risks are important prerequisites for carrying out pollution prevention and ecological restoration. Based on this, the article takes urban surface water bodies as the research object, systematically expounds the definition and classification of urban surface water bodies, analyzes the sources, main types, and pollution characteristics of heavy metal pollution, deeply explores the distribution patterns of heavy metals in spatial, temporal dimensions, and different forms, constructs a multidimensional ecological risk assessment index system, analyzes the driving factors of pollution, and proposes targeted prevention and remediation strategies. The research aims to provide scientific basis for the protection of urban surface water ecological environment and the formulation of pollution control plans, and to assist in the high-quality and sustainable development of urban ecosystems.

Keywords: urban surface water bodies; heavy metals; pollution distribution characteristics

城市地表水体作为城市水文循环的核心载体, 承担着供水、防洪、生态调节等多重功能, 其生态质量直接关系到城市人居环境与可持续发展能力。随着城市化进程的加快, 工业生产、城市径流等人为活动向地表水体输入大量重金属污染物, 这类污染物难以通过自然过程快速降解, 易在水体中累积并通过食物链传递, 对水生生物生存、水体生态结构及人体健康构成潜在威胁。当前, 城市地表水体中重金属污染的分布规律呈现出显著的时空异质性, 不同形态重金属的生物有效性差异较大, 生态风险评估的复杂性不断提升。开展城市地表水体中重金属污染分布特征

与生态风险评估研究, 能够明确污染空间格局、时间变化规律及关键风险因子, 为污染源头管控、生态修复技术优化及监管机制完善提供科学支撑, 对提升城市地表水体生态安全水平、推动城市生态文明建设具有重要现实意义。

一、城市地表水体的定义与分类

(一) 城市地表水体的定义

城市地表水体指分布于城市行政区域范围内, 存在于地表并参与水循环的天然或人工水体的总称, 是城市生态

作者简介: 陈莎莎, 硕士, 助教, 研究方向为水体重金属污染监测与生态风险评估、水体生态修复技术研发。

系统与水文系统不可或缺的组成部分。这类水体以大气降水为主要补给来源，同时接受城市径流、工业废水、生活污水等人工输入，通过蒸发、下渗、排放等方式参与水循环过程，具有水量时空分布不均、受人为活动影响显著、生态功能多元化等特点。城市地表水体的界定需结合行政边界、水文特征及功能属性，涵盖天然形成的河流、湖泊、沼泽、坑塘等，以及人工修建的运河、水库、景观水体、排污沟渠等。其核心特征是处于城市建成区及周边影响范围内，受城市发展与人类活动的直接调控与干扰，水体的理化性质、生态结构与功能均与城市发展模式密切相关，并因此面临独特的挑战。

城市地表水体不仅是城市生产生活用水的重要储备资源，还承担着调节区域气候、涵养水源、净化环境、维持生物多样性、景观美化等复合生态功能。例如，它们能够调蓄径流、缓解洪涝灾害，并通过蒸发作用调节城市小气候，对缓解城市热岛效应、改善人居环境质量具有重要作用。同时，作为城市水循环的关键环节，其水量与水质状况直接关系到城市防洪排涝安全与水资源可持续利用水平。随着城市生态保护意识的提升，城市地表水体的生态价值被进一步重视，其定义也逐步拓展为兼顾资源属性、生态属性与社会属性的复合型水体系统。这一定义强调水体不仅是自然的产物，更是与城市社会经济活动深度交织的生态基础设施，其健康与否直接影响着城市的宜居性与可持续发展能力。

从功能属性看，城市地表水体具有多重角色。它是城市给水的水源地、排水受纳体和泄洪通道，也可能兼具通航、水产养殖、景观娱乐等功能。环保部门会据此进行功能区划，以协调保护与利用的关系。然而，快速的城市化进程也给这些水体带来了巨大压力，包括水体生态环境破坏、水量失衡以及洪涝灾害风险加剧等问题。因此，现代城市地表水体的管理理念，正从单一的资源利用转向强调“人水和谐”的生态保护与系统修复，致力于构建水质良好、生态系统健康、景观自然美丽、并能造福于民的幸福河湖。这一定义的深化，标志着城市发展与水环境保护进入了追求协同共生、价值转化的新阶段。

（二）城市地表水体的分类

城市地表水体的分类是科学认识与管理城市水环境的基础，有助于从不同角度剖析水体特征，从而为污染防控与生态治理提供更为精准的依据。依据形成方式、功能属性及水文特征等多种标准进行分类，能够系统反映水体的本源性质、服务角色和水力行为，支撑制定差异化的治理

策略。

在按照形成方式的分类体系中，城市地表水体主要可区分为天然地表水体和人工地表水体两大类。这一划分方式有助于清晰辨别水体的自然属性与人为干预程度，进而为构建与各类水体自然本底相适应的保护与修复方案提供依据。

天然地表水体是在自然地质过程与水文循环作用下形成的，主要包括河流、湖泊以及坑塘等类型。河流作为城市天然地表水体的骨干，多为贯穿城区的过境河道或区域内的原生水系，具有水流动态性强、水量季节性变化显著、自然净化能力相对较强的特点。其水质状况受到上游来水质量、沿岸各类排污行为以及城市地表径流汇入的综合影响，呈现出明显的空间异质性和动态变化特征。湖泊通常是天然形成的封闭或半封闭水域，水体流动性较弱，水量较为稳定，因而对外界污染输入较为敏感，容易受到周边污染源的长期累积影响，尤其是一些重金属等持久性污染物易在湖底淤泥中富集，形成具有潜在生态风险的二次污染源。坑塘则多分布于城市郊区或建成较早的区域，常由天然洼地蓄水而成，面积普遍偏小，水位与水量受降水波动影响显著。随着城市发展，部分坑塘被改造为养殖水面或纳入景观体系，其水质与周边人类活动强度及方式紧密相关。

人工地表水体则是通过人类有目的的挖掘、建造而形成的水域，主要包括水库、运河、景观水体、人工湿地以及排污沟等类型。水库是为满足城市供水、防洪调蓄等需求而建设的重要水利设施，具有强大的水量调控能力和相对稳定的水文条件，其水质状况主要取决于入库水源质量、库周污染负荷以及日常调度与管理水平。运河多为实现航运、灌溉或跨区域调水等目的开凿的人工河道，其水流过程受人工调控明显，流动模式相对均匀，水质易受沿线工业与生活排放以及航运活动带来的油污、垃圾等影响。景观水体是城市园林绿化与空间美化的重要构成元素，广泛分布于公园、居住区、广场等公共空间，以观赏休闲为主要功能，通常具有水量有限、流动性差、生态系统结构简单、自净能力较弱，容易因营养物质积累而导致水体富营养化等问题。人工湿地是专门为污水处理、水质净化与生态修复而构建的功能性水生系统，通过模拟自然湿地，利用水生植物、微生物和基质填料的协同作用有效去除污染物，已成为城市水体治理与生态修复的重要技术手段。排污沟则是专门用于输送工业废水或生活污水的人工渠系，作为城市地表水体的重要污染输送通道，其水质通

常污染物浓度高、成分复杂,是城市水环境治理中需要重点管控的对象。

此外,若依据功能属性划分,城市地表水体可分为饮用水源水体、工业用水水体、景观娱乐用水水体、农业灌溉用水水体以及排污收纳水体等类别。不同功能定位的水体对应不同的水质标准与管理要求,其污染防治的重点与治理策略也相应存在显著区别。若按照水文动态特征划分,则可分为流动水体和静止水体两大类:前者如河流、运河等,水体持续运动,污染物扩散迁移速度快,自净能力相对较强;后者如湖泊、景观水池等,水体基本处于静止或缓流状态,污染物容易滞留累积,生态系统也呈现出不同的结构特点。两类水体在污染物迁移转化规律、环境容量及生态稳定性方面均表现出明显差异。

科学、多维度的分类体系,有助于深入理解城市地表水体的形成逻辑、功能定位与行为特征,从而为推进城市水体的精细化管理、实施针对性的污染防治措施以及开展有效的生态功能修复构建起清晰、系统的框架支撑。

二、重金属污染的来源与主要污染物类型

(一) 重金属污染的来源

城市地表水体重金属污染的来源复杂多样,主要可分为自然来源与人为来源两大类,其中人为来源是当前城市地表水体重金属污染的主导因素,自然来源则多在特定条件下对水体质量产生影响。两类来源相互叠加,共同决定了城市地表水体中重金属的浓度水平与分布特征,明确各类来源的贡献程度与排放特征,是开展污染源头管控的关键。

自然来源主要包括地质背景释放、土壤侵蚀、大气沉降等。地质背景释放是指城市及周边区域的地层、岩石中含有的重金属元素,在风化作用、水文循环等自然过程中逐步释放到水体中,其释放强度与区域地质构造、岩石类型密切相关。部分城市地处有色金属富集区域,地层中铊、镉、铅等重金属元素含量较高,岩石风化产生的碎屑物随地表径流进入水体,导致水体中重金属浓度自然偏高。土壤侵蚀是自然来源的另一重要途径,地表土壤中含有一定量的重金属元素,在降水冲刷、风力侵蚀等作用下,土壤颗粒携带重金属进入地表水体,尤其在暴雨天气下,土壤侵蚀强度增大,重金属输入量显著增加。大气沉降则是通过降雨、降雪等湿沉降过程,将大气中悬浮的重金属颗粒带入地表水体,大气中的重金属主要来源于自然扬尘、火山喷发等自然过程,其贡献量相对稳定,在远离工业集中区的区域占比相对较高。

人为来源是城市地表水体重金属污染的主要驱动因素,涵盖工业排放、城市径流、农业活动、污水处理设施排放等多个方面。工业排放是最主要的人为来源,各类工业生产过程中产生的废水、废渣、废气均可能向水体输入重金属。金属冶炼、化工、电镀、水泥生产等行业是重金属排放的重点领域,金属冶炼过程中产生的废水含有大量铅、镉、锌、铜等重金属;电镀行业废水则富含铬、镍、铜等元素;水泥生产企业在原料开采、高温煅烧及生产线拆除过程中,窑炉内富集的铊等重金属会随雨水冲刷进入水体,这类污染源易被忽视,管控难度较大。部分工业企业存在废水处理不到位、违规排放等问题,导致高浓度重金属废水直接进入地表水体,对水质造成严重影响。

城市径流是人为来源的另一重要途径,包括道路径流、屋面径流及绿地径流等。道路径流中含有大量重金属,主要来源于机动车尾气排放、轮胎磨损、路面磨损及大气沉降累积,机动车运行过程中轮胎、刹车片磨损产生的颗粒携带铅、锌、铜等重金属,随降雨径流进入地表水体;路面材料中的重金属也会在雨水冲刷下溶出。屋面径流则会携带屋面材料中的重金属元素,如沥青屋面中的锌、铅等。城市径流的重金属含量受降雨强度、降雨历时、地表覆盖状况等因素影响,初期径流的重金属浓度显著高于后期径流,对水体水质构成阶段性冲击。农业活动产生的面源污染也会向地表水体输入重金属,农业生产中使用的化肥、农药含有少量重金属元素,畜禽养殖产生的粪便中也富集一定量的重金属,这些污染物通过地表径流等方式进入水体,在农业集中区域的影响较为明显。

污水处理设施排放也是不可忽视的来源,城市生活污水、工业废水经污水处理厂处理后,部分处理不达标的尾水中仍含有一定浓度的重金属,直接排入地表水体。污水处理设施的运行效率与处理工艺对尾水重金属含量影响较大,部分污水处理厂的处理工艺对重金属的去除效果有限,导致尾水排放成为水体重金属污染的潜在来源。此外,垃圾填埋场渗滤液、河道底泥扰动释放等也会向水体输入重金属,进一步增加了污染来源的复杂性。

(二) 重金属污染的主要污染物类型

城市地表水体中常见的重金属污染物类型多样,依据毒性强度、分布范围及生态影响,可分为高毒性重金属、常见毒性重金属及伴生型重金属三大类,不同类型重金属的污染特征、毒性效应及环境行为存在显著差异,明确主要污染物类型是开展生态风险评估与污染治理的基础。

高毒性重金属是对生态环境与人体健康威胁最大的一

类,主要包括砷、汞、镉、铅等元素,这类重金属具有强毒性、高累积性,即使在低浓度下也能产生显著的生态毒性效应。砷是一种高毒性重金属,其毒性超过铅和汞,易溶于水且无色无味,污染隐蔽性强,主要来源于有色金属采选、冶炼及水泥生产等行业,水体中砷浓度超过0.1微克/升时,就可能对饮用水安全构成威胁。汞具有强神经毒性,易在水体中转化为甲基汞,通过食物链逐级富集,对水生生物及人类健康造成严重危害,其主要来源为化工、电镀、医疗器械生产等行业,以及含汞废弃物的不当处置。镉具有强致癌性,易在人体肾脏、骨骼中累积,导致肾脏损伤、骨质疏松等疾病,主要来源于金属冶炼、电镀、电池生产等行业,水体中镉的浓度即使处于较低水平,长期暴露也会产生显著危害。铅对神经系统、造血系统具有严重损害作用,尤其对未成年人的智力发育影响显著,主要来源于机动车尾气、电镀、蓄电池生产及工业废渣排放等,在城市道路周边水体中分布较为普遍。

常见毒性重金属在城市地表水体中分布范围较广,毒性相对高毒性重金属较弱,但累积到一定浓度后仍会对生态环境产生不利影响,主要包括铜、锌、铬、镍等元素。铜是水生生物生长发育所需的微量元素,但浓度过高时会对水生生物的呼吸系统、神经系统造成损害,导致生物死亡率上升,主要来源于电镀、冶金、化工及城市径流等。锌也是水生生物必需的微量元素,过量摄入会影响生物的代谢功能与繁殖能力,主要来源于机动车轮胎磨损、工业排放及城市径流,在道路周边水体中含量相对较高。铬主要以三价铬和六价铬两种形态存在,其中六价铬毒性较强,具有致癌性,主要来源于电镀、皮革加工、化工等行业,水体中六价铬浓度超标会对水生生态系统造成严重破坏。镍具有潜在致癌性,会对水生生物的细胞结构与功能产生损害,主要来源于电镀、冶金、电池生产等行业,在工业集中区水体中分布较为广泛。

伴生型重金属是指常伴随其他重金属或矿产资源一起出现,在特定工业活动中被释放到水体中的重金属元素,主要包括砷、锑、锰等元素,这类重金属的污染范围相对较窄,但在特定区域污染风险较高。砷具有强毒性与致癌性,常伴生于有色金属矿物中,主要来源于矿山开采、金属冶炼、化工等行业,水体中砷浓度超标会对水生生物及人类健康构成严重威胁,在有色金属富集区域的水体中易出现砷污染问题。锑常与铅、锌等矿产伴生,主要来源于锑矿开采、冶炼及化工行业,具有一定的毒性,会对水生生物的肝脏、肾脏造成损害,在锑矿分布区域的城市地表

水体中污染风险较高。锰是一种常见的伴生重金属,主要来源于矿山开采、冶金及化工行业,过量的锰会对水生生物神经系统产生影响,导致水体富营养化辅助效应,在工业废水排放集中的区域水体中含量相对较高。

不同类型重金属在水体中的存在形态、迁移转化规律及生态效应存在差异,且往往以复合污染形式存在,多种重金属之间可能产生协同毒性效应,加剧对生态环境的危害。因此,明确城市地表水体中主要重金属污染物类型及分布特征,是开展精准风险评估与有效污染防控的重要前提。

三、城市地表水体重金属污染的特殊性

城市地表水体受城市化进程与人类活动的强烈干预,其重金属污染相较于自然水体、农村水体具有显著的特殊性,这些特殊性体现在污染来源、分布规律、迁移转化及生态影响等多个方面,深刻影响着污染防控与生态修复的思路与方法。准确把握这些特殊性,能够为制定针对性的污染治理策略提供科学依据,提升城市地表水体污染治理的有效性。

污染来源的复合性与复杂性是城市地表水体重金属污染的核心特殊性。城市作为人口、产业高度集中的区域,工业生产、城市径流、生活排污、交通活动等多种人为活动交织,导致重金属污染来源呈现多元化复合特征,自然来源与人为来源相互叠加,点源污染与面源污染并存。点源污染如工业企业废水排放、污水处理厂尾水排放等,具有污染物浓度高、排放位置固定、成分相对稳定等特点,对局部水体水质造成显著影响;面源污染如城市径流、土壤侵蚀、大气沉降等,具有排放范围广、随机性强、成分复杂等特点,难以精准溯源与管控,对水体整体水质构成潜在威胁。此外,城市地表水体的人工改造程度高,运河、景观水体等人工水体的污染来源还受人工管理方式影响,进一步增加了污染来源的复杂性,单一污染源管控难以实现水质的全面改善。

污染分布的时空异质性显著是城市地表水体重金属污染的另一重要特殊性。空间上,重金属浓度在不同功能区、不同水体段落呈现显著差异,工业集中区水体的重金属浓度普遍高于居民区、商业区,道路周边水体因城市径流影响,铅、锌等重金属含量相对较高,饮用水源地水体则受到严格管控,重金属浓度维持在较低水平。水体上下游及支流与干流的重金属分布也存在差异,上游水体受人类活动影响较小,重金属浓度较低,下游水体因沿途污染物累积,浓度显著升高;支流往往承载着周边区域的污染负荷,

汇入干流后对干流水质产生影响。时间上,重金属浓度受季节性变化、人类活动节律等因素影响,呈现明显的时间波动特征,暴雨季节因城市径流、土壤侵蚀强度增大,水体中重金属浓度显著上升;枯水季节水体流动性减弱,污染物稀释能力下降,重金属浓度也可能维持在较高水平,工业生产的周期性波动也会导致水体重金属浓度出现阶段性变化。

重金属迁移转化的人工干预性强是城市地表水体重金属污染的突出特殊性。城市地表水体的水文过程受人工调控显著,水库、闸门等水利设施改变了水体的自然流动状态,影响重金属的迁移扩散速度与路径,导致重金属在特定区域沉积富集。人工湿地、生态浮床等生态修复设施的建设,也会通过吸附、转化等作用改变重金属的存在形态与迁移规律,部分重金属被水生植物、微生物吸收固定,从水体中去除。同时,城市地表水体的理化性质如pH值、溶解氧含量、有机质含量等受人类活动影响较大,工业废水、生活污水的排放会改变水体的酸碱环境,进而影响重金属的化学形态与迁移转化能力,如酸性条件下重金属的溶解态含量增加,迁移能力增强,生态风险显著提升。

生态影响的叠加性与连锁性也是城市地表水体重金属污染的重要特殊性。城市地表水体的生态系统结构相对单一,生物多样性较低,生态系统的稳定性与自净能力较弱,对重金属污染的耐受能力远低于自然水体。重金属进入水体后,不仅会直接对水生生物造成毒害,导致生物死亡率上升、繁殖能力下降,还会通过食物链逐级富集,影响鸟类、哺乳动物等更高营养级生物,形成连锁生态影响。同时,城市地表水体与人类活动的关联性强,重金属污染不仅影响水体的生态功能,还会通过饮用水、水产品消费等途径对人类健康构成威胁,且城市人口密集,污染的影响范围更广、涉及人群更多,生态与社会影响的叠加效应显著。

此外,城市地表水体重金属污染还具有隐蔽性与累积性的特殊表现,部分重金属如铊、汞等易溶于水且无色无味,污染初期难以通过感官察觉,需借助专业监测设备才能发现;重金属难以通过自然过程降解,易在水体底泥中沉积累积,形成潜在污染隐患,即使外源污染得到控制,底泥中的重金属也可能在环境条件变化时重新释放到水体中,导致污染反复。这些特殊性决定了城市地表水体重金属污染的治理难度更大,需要采取综合性、精细化的管控策略。

四、城市地表水体重金属污染空间分布特征

(一) 不同功能区的污染差异

城市不同功能区的人类活动强度、产业结构、地表覆盖状况存在显著差异,导致地表水体中重金属污染呈现明显的功能区分异特征,工业、居民、商业、绿地等不同功能区周边水体的重金属浓度、污染物类型及污染程度均存在较大差异,明确这种差异是开展精准污染管控的重要基础。

工业区周边水体是重金属污染最为严重的区域,各类工业生产活动产生的废水、废渣及大气沉降是重金属的主要来源,污染程度与工业类型、生产规模密切相关。金属冶炼、电镀、化工等重污染行业集中的工业区,周边水体中铅、镉、铬、铜等重金属浓度普遍偏高,部分区域甚至超过水质标准限值。水泥生产企业周边水体易出现铊污染,这类企业在原料开采、高温煅烧及生产线拆除过程中,窑炉内富集的铊会随雨水冲刷进入水体,且这类污染具有隐蔽性,易被忽视。工业区水体的重金属污染多以点源污染为主,排放位置相对固定,污染物浓度高、成分复杂,部分企业废水处理效率有待提高,导致高浓度重金属废水直接排入水体,对周边水体生态系统造成严重影响。同时,工业区的地表硬化程度高,土壤覆盖少,雨水冲刷产生的地表径流携带工业废渣、粉尘等进入水体,进一步加剧了重金属污染,使得工业区周边水体的重金属浓度显著高于其他功能区。

商业区周边水体的重金属污染主要来源于城市径流、交通活动及商业活动,污染程度介于工业区与居民区之间。商业区人口密集、交通流量大,机动车尾气排放、轮胎磨损、路面磨损产生的铅、锌、铜等重金属,随降雨径流进入周边水体;商业建筑装修、餐饮活动产生的废水也会携带少量重金属进入水体。商业区的地表硬化率高,绿化覆盖面积小,地表径流系数大,初期径流的重金属浓度较高,对水体水质构成阶段性冲击。此外,商业区的垃圾产生量较大,若垃圾收集处置不当,垃圾渗滤液会携带重金属进入水体,进一步增加污染负荷。商业区周边水体的重金属污染物以铅、锌、铜等为主,浓度波动较大,受降雨、交通流量等因素影响显著。

居民区周边水体的重金属污染来源相对单一,主要包括生活污水排放、城市径流及少量农业面源污染,污染程度相对较轻。居民区的生活污水中含有少量重金属,主要来源于洗涤用品、化妆品、生活垃圾等,经污水处理设施处理后排放,对水体的污染贡献有限;但部分老旧居民区

存在污水直排现象，生活污水直接进入周边水体，导致重金属浓度局部升高。城市径流是居民区周边水体重金属的重要来源，居民区的屋面径流、道路径流携带屋面材料、路面磨损产生的重金属进入水体，绿地径流则会携带土壤中的重金属元素。此外，居民区周边的零散农业种植活动、畜禽养殖产生的污染物，也会通过地表径流进入水体，对水质产生一定影响。居民区周边水体的重金属以锌、铜、铅等为主，浓度相对较低，污染分布较为均匀，受人类生活节律影响较大。

绿地及生态保护区周边水体的重金属污染程度最低，主要来源于自然来源与少量城市径流，生态系统自净能力较强。这类区域的地表覆盖以绿地、土壤为主，地表径流系数小，雨水冲刷携带的重金属量较少；同时，绿地中的植被、土壤能够吸附大量重金属，减少进入水体的污染物总量。生态保护区内的人类活动受到严格限制，人为污染源较少，水体的自然本底特征保持较好，重金属浓度主要受地质背景、土壤侵蚀等自然因素影响，浓度较低且相对稳定。部分生态保护区内修建的人工湿地、生态浮床等设施，能够进一步吸附、去除水体中的重金属，维持水体生态平衡。

除上述主要功能区外，交通干线周边水体也呈现出独特的重金属污染特征，主要受机动车交通活动影响，铅、锌、铜等重金属浓度相对较高，且沿交通干线呈带状分布，距离交通干线越近，水体重金属浓度越高。不同功能区的重金属污染差异，反映了人类活动对城市地表水体的影响规律，为针对性制定污染防控策略、优化城市功能区布局提供了科学依据。

（二）水体上下游及支流与干流的污染对比

城市地表水体的上下游及支流与干流之间，因污染源分布、水文条件、稀释能力等因素的差异，重金属污染呈现显著的空间分异特征，这种分异特征直接反映了污染物的迁移扩散规律，对流域尺度的污染防控与水质管理具有重要指导意义。

水体上下游的重金属污染差异主要体现在浓度水平、污染物组成及污染程度上，总体呈现上游浓度低、下游浓度高的梯度分布特征，部分受特殊污染源影响的区域可能出现局部异常。上游水体多位于城市郊区或生态保护区，人类活动强度低，人为污染源少，重金属主要来源于自然地质背景与土壤侵蚀，浓度维持在较低水平，水质相对较好。上游水体的流动性较强，自净能力较好，能够通过稀释、沉淀、生物吸收等作用降低重金属浓度，污染物组成

相对简单，以自然来源的重金属为主。随着水体向下游流动，沿途接纳工业废水、生活污水、城市径流等各类污染源，重金属污染物不断累积，浓度逐步升高，污染程度加剧。下游水体多位于城市建成区，人口、产业密集，污染负荷大，且下游水体的流动性可能因水利设施调控、地形变化等因素减弱，稀释能力与自净能力下降，进一步导致重金属浓度升高。部分下游水体还会受到底泥中重金属释放的影响，形成内源污染，使得下游水体的重金属浓度显著高于上游。

在特殊情况下，上游水体也可能出现重金属浓度偏高的现象，若上游区域存在矿山开采、工业企业等污染源，会导致上游水体重金属浓度异常升高，对下游水体水质产生不利影响。例如，上游区域的有色金属矿山开采活动，会产生大量含重金属的废渣、废水，随地表径流进入水体，导致上游水体重金属浓度显著超标，进而影响整个流域的水质。此外，上游水体的水利设施建设也会影响重金属的分布，水库等蓄水设施会导致水体流动性减弱，重金属在库区沉积富集，使得库区水体重金属浓度相对较高，出库水体的重金属浓度则相对较低。

支流与干流的重金属污染对比呈现出支流污染贡献显著、干流稀释缓冲的特征，支流是干流重金属污染的重要来源，同时干流的水文条件对支流污染物具有稀释、净化作用。城市地表水体的支流多分布于城市周边区域，承载着周边工业区、居民区、农业区的污染负荷，部分支流因流域内工业企业集中、污水直排现象存在，重金属浓度较高，成为干流重金属污染的主要输入源。支流的水量相对较小，稀释能力与自净能力较弱，对污染源的响应更为敏感，重金属浓度波动较大，污染程度往往高于干流。当支流汇入干流后，干流的大量水量对支流带来的重金属污染物起到稀释作用，使得干流水体重金属浓度低于支流水体，但支流的污染负荷仍会导致干流水体重金属浓度显著升高。

不同支流对干流的污染贡献存在差异，工业集中区的支流重金属污染负荷最大，对干流水质的影响最为显著；居民区、农业区的支流污染负荷相对较小，影响程度较低。部分支流经过生态治理后，重金属浓度显著降低，对干流的污染贡献逐步减小。干流的重金属污染分布还受支流汇入位置、汇入水量的影响，支流汇入处周边的干流水体重金属浓度会出现局部升高，随着水流扩散，浓度逐步降低。此外，干流的水文条件如流速、流量等也会影响支流污染物的扩散速度，流速快、流量大时，污染物扩散速度快，局部浓度升高的现象不明显；流速慢、流量小时，污染物

易在汇入处累积,形成局部高污染区域。

水体上下游及支流与干流的重金属污染对比,清晰反映了污染物在流域内的迁移扩散规律,为流域尺度的污染防控提供了明确方向。针对上游区域,应加强生态保护,严控新增污染源;针对下游区域,应强化污染治理与底泥修复,降低内源污染风险;针对污染严重的支流,应实施针对性治理,减少对干流的污染贡献,实现全流域水质改善。

五、城市地表水体重金属污染时间分布特征

(一) 季节性变化对重金属浓度的影响

城市地表水体重金属浓度受季节性气候条件变化的影响显著,不同季节的降水强度、温度、水文条件等因素存在差异,导致重金属的输入量、迁移转化能力及浓度水平呈现明显的季节性波动,这种波动特征在不同功能区、不同水体类型中均有体现,是城市地表水体污染监测与管控的重要考量因素。

雨季是城市地表水体重金属浓度最高的季节,降水是导致重金属浓度升高的核心驱动因素。雨季降水强度大、降雨历时长,地表径流系数显著增大,雨水冲刷地表土壤、道路、建筑物表面,将累积的重金属颗粒、污染物带入地表水体,导致水体中重金属浓度大幅上升。初期降雨的重金属浓度最高,因为地表累积的重金属污染物在初期降雨的冲刷作用下大量进入水体,随着降雨持续,地表污染物逐步被冲刷干净,后期降雨的重金属浓度逐步降低。城市径流中的重金属浓度受降雨强度影响显著,暴雨天气下,地表侵蚀强度大,土壤颗粒、工业废渣、交通污染物等大量进入水体,使得水体中颗粒态重金属浓度显著升高,同时雨水的稀释作用与冲刷作用叠加,溶解态重金属浓度也会出现阶段性上升。此外,雨季水体的流动性增强,底泥中的重金属易被扰动释放,进一步增加水体重金属浓度,部分水利设施在雨季泄洪时,也会将库区沉积的重金属污染物带入下游水体,导致下游水体重金属浓度升高。

雨季不同重金属的浓度变化存在差异,铅、锌、铜等主要来源于城市径流、交通活动的重金属,浓度增幅最为显著,这类重金属多以颗粒态形式存在,随地表径流大量进入水体;铊、镉等来源于工业排放的重金属,浓度变化受降雨冲刷工业废渣、废水排放等因素影响,增幅相对较小,但在工业集中区周边水体中仍会出现明显升高。不同功能区水体的季节性变化也存在差异,工业区、交通干线周边水体在雨季的重金属浓度增幅显著高于居民区、生态保护区,因为这类区域的地表污染物累积量更大,降雨冲

刷带来的污染物输入量更多。

枯水季节城市地表水体重金属浓度呈现相对稳定的状态,部分水体可能因稀释能力下降导致浓度维持在较高水平。枯水季节降水稀少,地表径流显著减少,通过地表径流输入水体的重金属量大幅降低,重金属的主要来源转变为工业废水、生活污水等点源排放,以及底泥中重金属的缓慢释放。枯水季节水体的流量小、流动性弱,稀释能力差,点源排放的重金属污染物难以快速扩散,易在局部区域累积,导致水体重金属浓度相对较高。同时,枯水季节水体的蒸发量较大,水位下降,底泥暴露面积增加,在氧化作用下,底泥中的重金属易转化为溶解态并释放到水体中,进一步提升水体重金属浓度。部分封闭或半封闭水体如湖泊、景观水体,在枯水季节易出现水质恶化现象,重金属浓度逐步升高,生态风险增加。

春秋两季为过渡季节,城市地表水体重金属浓度介于雨季与枯水季节之间,呈现逐步变化的特征。春季气温回升,降水逐步增多,地表径流开始增加,水体重金属浓度逐步上升,但增幅小于雨季;同时,春季植被开始生长,植被对地表土壤的固定作用增强,土壤侵蚀强度相对雨季较弱,重金属输入量相对较少。秋季降水逐步减少,气温下降,地表径流减少,水体重金属浓度逐步下降,趋于枯水季节的水平;秋季植被枯萎,土壤覆盖度降低,土壤侵蚀强度略有增加,但受降水减少的影响,重金属输入量总体呈下降趋势。过渡季节的重金属浓度波动较小,主要受降水频次、强度及人为活动的影响,工业生产、交通活动等人为活动的稳定性较强,对重金属浓度的影响相对恒定。

温度的季节性变化也会间接影响重金属浓度,高温季节水体中微生物活动旺盛,微生物对重金属的吸附、转化作用增强,可能导致水体中溶解态重金属浓度降低;低温季节微生物活动减弱,重金属的转化能力下降,溶解态重金属浓度相对较高。此外,季节性的农业活动、工业生产调整等也会对重金属浓度产生一定影响,进一步丰富了重金属浓度的季节性变化特征。

(二) 长期监测中的污染趋势分析

基于长期监测数据的城市地表水体重金属污染趋势分析,能够清晰反映污染演变规律,评估污染防控措施的实施效果,为优化污染治理策略提供科学依据。长期来看,城市地表水体重金属污染总体呈现逐步改善的趋势,但不同重金属、不同区域的污染趋势存在差异,部分区域仍面临潜在污染风险。

多数常见重金属污染呈现持续下降趋势,这一趋势得

益于污染防治措施的强化与生态治理工程的推进。随着环保监管力度的加大,工业企业的废水处理设施逐步完善,废水排放达标率显著提高,金属冶炼、电镀、化工等重点行业的重金属排放量大幅减少,导致水体中铅、镉、铜、锌等常见重金属浓度持续下降。城市污水处理设施的建设与升级,也有效降低了生活污水、工业废水对水体的重金属贡献,污水处理厂尾水的重金属浓度逐步降低,对地表水体的污染影响减弱。同时,城市生态治理工程如人工湿地建设、河道生态修复等的实施,提升了水体对重金属的吸附、净化能力,进一步促进了重金属浓度的下降。长期监测数据显示,部分城市地表水体的铅浓度较多年前显著降低,锌、铜等重金属浓度也维持在较低水平,且波动范围逐步缩小,污染状况持续改善。

高毒性重金属及伴生型重金属污染趋势相对复杂,部分重金属浓度呈现下降趋势,但仍存在局部波动与潜在风险。铊、汞等高毒性重金属因污染来源隐蔽、管控难度大,浓度下降速度相对较慢,部分工业集中区、有色金属富集区域的水体,铊浓度仍可能出现阶段性异常。随着针对性管控措施的实施,如水泥生产企业的窑炉管控、涉铊企业的专项治理等,铊污染的发生频次逐步减少,浓度总体呈下降趋势,但极端天气如暴雨等仍可能导致铊浓度异常升高。砷、锑等伴生型重金属的浓度趋势与区域矿产开发、工业生产活动密切相关,在矿产开发管控严格、工业污染治理到位的区域,浓度呈现下降趋势;在部分矿产资源丰富、工业生产活动活跃的区域,浓度仍维持在较高水平,污染趋势不稳定。

不同区域的污染趋势存在显著差异,城市中心区域、工业集中区的重金属浓度下降幅度较大,郊区及偏远区域的下降幅度相对较小。城市中心区域的环保投入大,污染防治措施落实到位,工业企业逐步搬迁或升级改造,城市径流的治理力度不断加强,使得重金属浓度快速下降。工业集中区通过产业结构调整、污染治理技术升级、严格环保监管等措施,有效控制了工业重金属排放,水体污染状况显著改善。郊区及偏远区域因环保投入相对不足、监管力度有待加强,部分小型工业企业、农业面源污染的管控不到位,导致重金属浓度下降速度较慢,部分区域甚至出现浓度反弹现象。此外,饮用水源地周边水体的重金属浓度长期维持在较低水平,且呈现持续稳定的趋势,这得益于饮用水源地的严格保护与专项治理,确保了饮用水安全。

重金属污染趋势还受城市化进程、产业结构调整等宏观因素影响。城市化进程加快初期,工业扩张、人口增加

导致重金属污染负荷上升,水体重金属浓度呈上升趋势;随着城市化进入高质量发展阶段,产业结构优化升级、环保意识提升、污染防治措施强化,重金属污染负荷逐步降低,浓度呈下降趋势。产业结构调整对污染趋势的影响显著,高耗能、高污染产业的淘汰与转型升级,有效减少了重金属排放;新兴产业的发展注重生态环境保护,对水体的重金属污染贡献较小,推动了污染状况的改善。

长期监测中也发现,重金属污染存在内源污染风险,底泥中累积的重金属在环境条件变化时会重新释放到水体中,导致水体重金属浓度出现阶段性升高,影响污染改善趋势。此外,极端天气事件的频发也可能导致重金属浓度异常波动,对长期污染趋势产生干扰。因此,在推进污染防治的过程中,不仅要控制外源污染,还要加强内源治理,同时建立健全应急监测与防控体系,应对极端天气带来的污染风险,确保城市地表水体重金属污染状况持续改善。

六、不同形态重金属的分布规律

(一) 溶解态与颗粒态重金属的占比

城市地表水体中的重金属主要以溶解态与颗粒态两种形态存在,两种形态的占比受水体理化性质、污染源类型、水文条件等多种因素影响,且相互转化,其分布规律直接影响重金属的迁移扩散能力、生态毒性及环境行为,是研究重金属污染的重要内容。

溶解态重金属指溶解于水体中,以离子态、络合态等形式存在的重金属,能够自由迁移扩散,生态毒性相对较高;颗粒态重金属指吸附于悬浮颗粒物、底泥颗粒表面的重金属,迁移能力受颗粒物运动影响,生态毒性相对较低,但易在底泥中沉积累积,形成潜在污染隐患。两种形态的占比在不同水体、不同时空条件下存在显著差异,总体而言,城市地表水体中颗粒态重金属的占比普遍高于溶解态重金属,尤其是在雨季、工业集中区及浑浊度较高的水体中,颗粒态重金属占比可达60%~90%,溶解态重金属占比仅为10%~40%;在枯水季节、水质清澈的水体及饮用水源地中,溶解态重金属占比相对较高,可达30%~50%,颗粒态重金属占比则降至50%~70%。

污染源类型是影响溶解态与颗粒态重金属占比的核心因素,不同污染源排放的重金属形态存在显著差异。工业废水排放的重金属形态因行业类型而异,金属冶炼、电镀等行业排放的废水多含有大量溶解态重金属,如铬、镍、铜等,这类废水进入水体后,会直接增加溶解态重金属的占比;水泥生产、矿山开采等行业排放的废水及废渣,多

携带大量颗粒态重金属,如铊、铅、锌等,会显著提高颗粒态重金属的占比。城市径流携带的重金属多为颗粒态,来源于路面磨损、轮胎磨损、土壤侵蚀等产生的颗粒物,进入水体后以颗粒态形式存在,使得雨季城市径流汇入后,水体中颗粒态重金属占比显著升高。生活污水排放的重金属多为溶解态,浓度相对较低,对两种形态占比的影响相对较小。

水体理化性质对溶解态与颗粒态重金属的占比及相互转化具有重要影响。pH值是关键影响因素之一,酸性水体中,重金属的吸附能力减弱,易从颗粒物表面解吸,转化为溶解态,导致溶解态重金属占比升高;碱性水体中,重金属易与氢氧根离子结合形成沉淀,或被颗粒物吸附,颗粒态重金属占比显著提高。溶解氧含量也会影响两种形态的转化,厌氧环境下,水体中的硫化物浓度升高,重金属易与硫化物结合形成硫化物沉淀,转化为颗粒态;好氧环境下,硫化物沉淀易被氧化分解,重金属重新释放为溶解态。水体中的有机质含量也会影响形态分布,有机质能够与重金属离子形成络合物,促进重金属的溶解,增加溶解态重金属占比;同时,有机质也会吸附于颗粒物表面,增强颗粒物对重金属的吸附能力,提高颗粒态重金属占比。

水文条件对溶解态与颗粒态重金属占比的影响主要体现在水体流动性与悬浮颗粒物含量上。水体流速快时,水流的扰动作用强,底泥颗粒易被悬浮,悬浮颗粒物含量升高,颗粒态重金属占比显著增加;同时,快速流动的水流也会促进颗粒态重金属的迁移扩散,减少沉积。水体流速慢时,悬浮颗粒物易沉降,悬浮颗粒物含量降低,颗粒态重金属占比下降,溶解态重金属占比相对升高。水库、湖泊等静止水体的悬浮颗粒物含量低,颗粒态重金属占比相对较低,且易在底泥中沉积;河流等流动水体的悬浮颗粒物含量高,颗粒态重金属占比相对较高。

不同重金属的形态分布也存在固有差异,部分重金属易以溶解态存在,部分则易以颗粒态存在。铊、汞等重金属易溶于水,溶解态占比相对较高;铅、锌、镉等重金属易被颗粒物吸附,颗粒态占比相对较高。这种固有差异与重金属的化学性质密切相关,如溶解度、吸附系数等,决定了不同重金属在水体中的形态分布特征。溶解态与颗粒态重金属的相互转化是一个动态过程,受多种环境因素的综合影响,明确其占比与转化规律,能够为精准评估重金属生态风险、制定针对性治理措施提供科学依据。

(二) 重金属的化学形态与生物有效性

重金属的化学形态是指重金属在水体中存在的具体化

学形式,包括不同价态、络合态、沉淀态等,其化学形态直接决定重金属的生物有效性,即重金属被水生生物吸收、累积并产生毒性效应的能力。不同化学形态的重金属,其生物有效性差异显著,深入研究重金属的化学形态与生物有效性的关系,是科学评估生态风险、优化污染治理策略的核心环节。

重金属的化学形态受水体理化性质、有机质含量、共存离子等多种因素影响,呈现复杂的分布规律。按价态划分,部分重金属存在多种价态,且不同价态的生物有效性差异显著。铬主要以三价铬和六价铬两种形态存在,六价铬的生物有效性远高于三价铬,毒性更强,易被水生生物吸收累积,对生态环境造成严重危害;三价铬的生物有效性较低,毒性较弱,且易被颗粒物吸附或形成沉淀,在水体中相对稳定。汞的价态转化较为复杂,可在水体中转化为无机汞、甲基汞、乙基汞等形态,其中甲基汞的生物有效性最高,毒性最强,能够通过食物链逐级富集,对高营养级生物及人类健康构成严重威胁;无机汞的生物有效性相对较低,毒性较弱。砷也存在多种价态,三价砷的生物有效性与毒性高于五价砷,是水体中主要的毒性形态之一。

按络合与沉淀形态划分,重金属可分为自由离子态、络合态、沉淀态等,其中自由离子态与部分络合态重金属的生物有效性较高,沉淀态重金属的生物有效性较低。自由离子态重金属是生物吸收的主要形式,能够直接穿过生物细胞膜,被生物吸收运用并产生毒性效应,其含量越高,重金属的生物有效性越强。络合态重金属的生物有效性取决于络合物的稳定性,不稳定络合物易分解释放出自由离子态重金属,生物有效性较高;稳定络合物如与有机质形成的络合物,不易分解,生物有效性较低。沉淀态重金属如硫化物沉淀、氢氧化物沉淀等,难以被水生生物吸收,生物有效性极低,但在环境条件变化时,如pH值、溶解氧含量改变,沉淀态重金属易转化为自由离子态或络合态,重新获得生物有效性,形成潜在生态风险。

水体理化性质对重金属化学形态与生物有效性的影响显著,pH值通过改变重金属的价态、络合反应及沉淀溶解平衡,调控重金属的化学形态与生物有效性。酸性条件下,重金属的沉淀溶解平衡向溶解方向移动,自由离子态重金属含量增加,生物有效性升高;同时,酸性条件也有利于重金属低价态的稳定存在,部分低价态重金属如三价砷、二价汞的毒性较强,进一步提升了生态风险。碱性条件下,重金属易形成氢氧化物沉淀,自由离子态含量减少,生物有效性降低;同时,碱性条件有利于重金属高价态的稳定存在,

部分高价态重金属如六价铬的毒性较强，需重点关注。

溶解氧含量通过影响重金属的氧化还原反应，改变重金属的价态与化学形态，进而影响生物有效性。好氧环境下，重金属易被氧化为高价态，如二价铁被氧化为三价铁、二价锰被氧化为四价锰，这些高价态重金属易形成沉淀，生物有效性降低；但好氧环境也有利于甲基汞的生成，部分区域需警惕甲基汞带来的高生物有效性风险。厌氧环境下，重金属易被还原为低价态，溶解态含量增加，生物有效性升高；同时，厌氧环境下硫化物浓度升高，重金属易形成硫化物沉淀，部分抵消低价态带来的高生物有效性。

水体中的有机质与共存离子也会影响重金属的化学形态与生物有效性。有机质能够与重金属离子形成稳定络合物，减少自由离子态重金属含量，降低生物有效性；同时，有机质也能促进重金属的溶解，增加络合态重金属含量，部分不稳定络合物仍具有一定生物有效性。共存离子通过竞争吸附、络合反应等方式，影响重金属的化学形态，如钙离子、镁离子等能够与重金属离子竞争颗粒物表面的吸附位点，减少颗粒态重金属含量，增加自由离子态重金属含量，提高生物有效性；氯离子、硫酸根离子等能够与重金属离子形成络合物，改变重金属的生物有效性。

不同水生生物对重金属不同化学形态的吸收能力存在差异，进一步影响重金属的生物有效性表现。藻类、浮游生物等低等水生生物对自由离子态重金属的吸收能力较强，而鱼类等高等水生生物则可通过摄食低等生物，间接吸收累积重金属，使得络合态、颗粒态重金属通过食物链传递转化，逐步提高生物有效性。重金属的化学形态与生物有效性的关系复杂，受多种因素综合影响，明确这一关系，能够精准评估重金属对水生生态系统的潜在风险，为制定针对性的污染治理措施提供科学支撑。

七、城市地表水体重金属污染的生态风险评估

（一）生态风险评估指标体系构建

城市地表水体重金属污染生态风险评估指标体系的构建，需结合重金属的污染特征、生态毒性效应、水体生态系统结构等因素，选取具有代表性、科学性、可操作性的指标，形成多维度、多层次的评估体系，为精准量化生态风险提供支撑。指标体系的构建应遵循系统性、针对性、实用性原则，全面反映重金属污染对水生生态系统的潜在影响。

常用评估指标包括暴露特征指标、毒性效应指标、生态系统响应指标三大类，各类指标相互补充，共同构成完

整的评估指标体系。暴露特征指标用于反映重金属在水体中的暴露水平，主要包括重金属浓度、形态占比、生物累积系数等。重金属浓度指标包括溶解态浓度、颗粒态浓度及总浓度，是评估风险的基础指标，能够直接反映重金属的暴露强度，常用单位为微克/升，不同重金属的浓度限值参考相应水质标准。形态占比指标包括溶解态占比、自由离子态占比等，能够反映重金属的生物有效性，溶解态占比、自由离子态占比越高，重金属的暴露风险越大。生物累积系数是指生物体内重金属含量与水体中重金属浓度的比值，能够反映重金属在生物体内的累积能力，生物累积系数越高，重金属通过食物链传递的风险越大，常用鱼类、藻类等典型水生生物作为监测对象。

毒性效应指标用于反映重金属对水生生物的毒性强度，主要包括毒性效应阈值、急性毒性系数、慢性毒性系数等。毒性效应阈值是指重金属对水生生物产生毒性效应的最低浓度，包括急性毒性阈值与慢性毒性阈值，急性毒性阈值反映短时间暴露下的毒性强度，慢性毒性阈值反映长期暴露下的毒性强度，阈值越低，重金属的毒性越强。急性毒性系数、慢性毒性系数是通过生物毒性试验获得的量化指标，能够反映重金属对不同水生生物的毒性差异，系数越高，毒性效应越显著。此外，重金属的复合毒性系数也是重要的毒性效应指标，能够反映多种重金属共存时的协同或拮抗毒性效应，为复合污染风险评估提供依据。

生态系统响应指标用于反映重金属污染对水生生态系统结构与功能的影响，主要包括生物多样性指数、生物量、群落结构变化率等。生物多样性指数反映水生生物群落的丰富度与均匀度，重金属污染会导致生物多样性下降，指数越低，生态系统受影响越严重。生物量指标包括浮游植物生物量、浮游动物生物量、底栖生物量等，重金属污染会抑制生物生长繁殖，导致生物量减少，生物量的变化能够直接反映生态系统的受损程度。群落结构变化率反映水生生物群落组成的变化，重金属污染会导致敏感物种消失、耐污物种增多，群落结构变化率越高，生态系统的稳定性越差。

多指标综合评估方法是生态风险评估的核心方法，能够克服单一指标评估的局限性，全面反映重金属污染的生态风险。常用的多指标综合评估方法包括污染负荷指数法、潜在生态风险指数法、模糊综合评价法等。污染负荷指数法通过计算不同重金属的污染指数，再综合得到总体污染负荷指数，能够反映重金属的总体污染水平，污染负荷指数越高，污染程度越严重。潜在生态风险指数法结合重金

属的浓度与毒性响应因子,计算潜在生态风险指数,能够量化重金属的生态风险等级,考虑了不同重金属的毒性差异,评估结果更为科学准确。

模糊综合评价法通过建立模糊评价矩阵,结合指标权重,对重金属污染的生态风险进行综合评价,能够处理评估过程中的模糊性与不确定性,适用于复杂生态系统的风险评估。在实际评估过程中,需根据评估对象、数据可获得性等因素,选择合适的评估方法,同时合理确定各指标的权重,权重的确定可采用层次分析法、熵权法等,确保评估结果的客观性与准确性。构建科学完善的生态风险评估指标体系,采用合理的综合评估方法,能够精准量化城市地表水体重金属污染的生态风险,为污染防控与生态修复提供科学依据。

(二) 不同重金属的生态毒性效应

不同重金属的生态毒性效应存在显著差异,这种差异源于重金属的化学性质、生物有效性、暴露浓度及暴露时间等多种因素,且单一重金属与复合重金属的毒性效应表现不同,明确不同重金属的生态毒性效应,是开展生态风险评估与污染治理的重要基础。

单一重金属的毒性等级可根据其毒性强度、对水生生物的影响程度划分为高毒性、中等毒性、低毒性三个等级。高毒性重金属包括铊、汞、镉、铅、砷等,这类重金属在低浓度下就能对水生生物产生显著毒性效应,且具有强累积性与强致癌性。铊对水生生物的毒性极强,浓度为0.01微克/升~0.1微克/升时,就会抑制水生生物的生长繁殖,导致生物死亡率上升;汞的毒性主要来源于甲基汞,甲基汞能够破坏水生生物的神经系统、生殖系统,导致生物畸形、繁殖能力下降,且通过食物链逐级富集,对高营养级生物危害显著;镉能够抑制水生生物的酶活性,破坏细胞结构,导致生物生长迟缓、免疫力下降,长期暴露会导致生物死亡;铅对水生生物的神经系统、造血系统具有严重损害作用,影响生物的代谢功能与繁殖能力,对幼体生物的毒性更强;砷具有强毒性,能够破坏水生生物的DNA结构,导致基因突变,具有显著的致癌、致畸效应。

中等毒性重金属包括铜、锌、铬、镍等,这类重金属在低浓度下对部分水生生物具有一定的营养作用,如铜、锌是水生生物生长发育所需的微量元素,参与酶的合成与代谢过程,对生物生长繁殖有促进作用,但浓度超过一定限值后,会产生显著毒性效应。铜浓度超过1微克/升~5微克/升时,会对水生生物的呼吸系统造成损害,导致藻类光合作用受抑制、叶绿素合成受阻,鱼类出现呼吸困难、鳃

组织损伤等症状;锌浓度超过10微克/升~20微克/升时,会干扰水生生物的代谢功能与离子平衡,导致生物生长迟缓、繁殖能力下降,幼体生物对锌的毒性更为敏感,易出现发育畸形;六价铬浓度超过5微克/升~10微克/升时,会对水生生物的细胞产生强氧化损伤,破坏细胞膜完整性与DNA结构,导致生物死亡率上升,而三价铬的毒性仅为六价铬的1/100左右,生物有效性较低,多以颗粒态形式存在于水体中,对水生生态系统的影响相对温和,但浓度过高时仍会抑制生物生长。镍浓度超过20微克/升~30微克/升时,会影响水生生物的酶活性与生殖功能,导致生物产卵量下降、幼体存活率降低,长期暴露还会在生物体内累积,产生慢性毒性效应。

低毒性重金属主要包括锰、钼、钴等,这类重金属的毒性较弱,对水生生物的危害阈值较高,且多数是水生生物生长发育所需的微量元素,在自然水体浓度范围内一般不会产生毒性效应,仅在工业废水大量排放、局部区域严重累积时,才会显现出轻微毒性。锰浓度超过100微克/升时,会对水生生物的神经系统产生轻微影响,导致藻类生长速率下降,鱼类出现游动迟缓等症状;钼作为固氮酶的组成成分,低浓度下可促进水生植物生长,浓度超过50微克/升时,会干扰生物的氮代谢过程,抑制生物生长繁殖;钴浓度超过100微克/升时,会影响水生生物的造血功能与酶活性,对幼体生物的生长发育产生一定抑制作用,但这类重金属的毒性可逆性较强,当水体浓度降低后,生物毒性效应可逐步缓解。

复合重金属的毒性效应更为复杂,并非单一重金属毒性的简单叠加,可能表现为协同、拮抗或相加效应,显著影响生态风险评估的准确性。协同效应是指多种重金属共存时,毒性效应超过各单一重金属毒性之和,如汞与镉共存时,会相互促进对方在生物体内的累积,增强对神经系统、生殖系统的损害;拮抗效应是指一种重金属可降低另一种重金属的毒性,如锌可通过竞争生物吸附位点,减少镉在生物体内的吸收,降低镉的毒性效应;相加效应则是指复合重金属的毒性效应近似于各单一重金属毒性之和,常见于低浓度、同类毒性重金属的复合污染。复合毒性效应的强度受重金属组合类型、浓度比例、水体理化性质等因素影响,在城市地表水体复合污染普遍存在的背景下,需重点关注复合毒性效应,才能更精准地评估重金属污染的生态风险。

单一重金属的毒性等级可根据其毒性强度、对水生生物的影响程度划分为高毒性、中等毒性、低毒性三个等级。

高毒性重金属包括铊、汞、镉、铅、砷等，这类重金属在低浓度下就能对水生生物产生显著毒性效应，且具有强累积性与强致癌性。铊对水生生物的毒性极强，浓度为0.01微克/升~0.1微克/升时，就会抑制水生生物的生长繁殖，导致生物死亡率上升；汞的毒性主要来源于甲基汞，甲基汞能够破坏水生生物的神经系统、生殖系统，导致生物畸形、繁殖能力下降，且通过食物链逐级富集，对高营养级生物危害显著；镉能够抑制水生生物的酶活性，破坏细胞结构，导致生物生长迟缓、免疫力下降，长期暴露会导致生物死亡；铅对水生生物的神经系统、造血系统具有严重损害作用，影响生物的代谢功能与繁殖能力，对幼体生物的毒性更强；砷具有强毒性，能够破坏水生生物的DNA结构，导致基因突变，具有显著的致癌、致畸效应。

八、城市地表水体重金属污染的驱动因素分析

（一）自然因素

自然因素作为城市地表水体重金属污染的基础驱动力，虽影响强度整体弱于人为因素，但通过调控重金属的本底含量、迁移路径与存在形态，对污染时空格局形成重要制约，且常与人为因素叠加放大污染效应，其作用机制与区域自然环境特征紧密关联。

地质背景与土壤侵蚀是自然因素中影响重金属污染的核心环节，决定了水体重金属的自然本底水平与面源输入强度。地质背景赋予区域重金属固有含量特征，不同岩石类型与地质构造区域的水体本底差异显著：有色金属矿集区地层中铊、镉、铅、砷等元素含量远高于普通区域，岩石经长期物理风化、化学溶蚀作用，逐步将重金属释放至土壤与地下水，再通过地表径流汇入城市地表水体，导致这类区域水体重金属本底浓度偏高。土壤侵蚀则是自然状态下重金属向水体迁移的主要载体，地表土壤不仅富集自然风化产生的重金属，还吸附了大气沉降、历史人为排放等外源污染物，在降水冲刷、风力侵蚀等作用下，土壤颗粒携带重金属进入水体，形成面源污染。土壤侵蚀强度受地形、植被覆盖度、降水特征等影响，坡度较大、植被覆盖率低的区域侵蚀现象更突出，雨季暴雨会加剧土壤颗粒流失，向水体输入大量颗粒态重金属，同时土壤质地也会调控迁移效率，重金属易随渗流补给地表水；黏质土壤吸附能力强，重金属多累积于土壤中，侵蚀时则携带大量吸附态重金属进入水体，进一步提升污染负荷。

水文条件通过改变水体动力环境、稀释能力与迁移路径，对重金属污染扩散与分布形成关键调控。水体流速直

接影响重金属扩散速率与底泥扰动强度：流速较快的河流等流动水体，可加速重金属扩散稀释，降低局部浓度，但强水动力会扰动底泥，使沉积态重金属重新释放至水体，增加溶解态重金属含量；流速缓慢的湖泊、坑塘等静止或半静止水体，稀释与扩散能力弱，重金属易在局部累积，且底泥沉积速率快，形成潜在内源污染隐患。水量季节变化也会影响污染程度，丰水期水量充足，稀释能力强，可降低重金属浓度，但同步增加的地表径流会提升外源污染输入量；枯水期水量锐减，稀释能力下降，点源排放的重金属难以扩散，易导致局部浓度超标，且水位下降使底泥暴露面积扩大，氧化作用下重金属易转化为溶解态释放，加剧污染。此外，水文连通性决定污染扩散范围，连通性良好的水体网络可促进重金属跨区域迁移，扩大影响范围；孤立水体污染虽局限于局部，但自我净化能力弱，污染持续时间更长，水温、水体混合度等特征还会通过影响重金属化学形态转化，间接调控其生态风险强度。

（二）人为因素

人为因素是城市地表水体重金属污染的主导驱动力，城市化进程中的工业生产、城市建设、生活排污等人类活动，以点源、面源等多种形式向水体输入大量重金属，其影响范围、强度与持续性均远超自然因素，是导致水体污染加剧、生态风险上升的核心原因。

工业排放与城市径流是人为污染源的两大核心载体，直接决定污染负荷与分布特征。工业排放作为典型点源污染，其贡献度与产业结构、生产工艺及污染治理水平密切相关：金属冶炼、电镀、化工、水泥生产等重污染行业，生产过程中产生的废水、废渣、废气均可能携带重金属，废水若处理不达标直接排放，会向水体输入高浓度重金属；废渣堆放过程中经雨水淋溶，重金属会渗入土壤再汇入地表水；废气中的重金属颗粒经大气沉降，最终也会进入地表水体。不同行业排放重金属类型存在差异，金属冶炼以铅、镉、锌、铜为主，电镀行业聚焦铬、镍、铜，水泥生产易排放铊等隐蔽性重金属，形成复合污染格局。城市径流作为主要面源污染载体，承载着交通、建筑、生活等活动产生的重金属，机动车轮胎磨损、刹车片损耗、尾气排放会释放铅、锌、铜等，建筑施工扬尘与废渣携带铬、铅等，生活垃圾与洗涤废水也会输入少量重金属，这些污染物在降雨冲刷作用下随径流进入水体，初期径流重金属浓度显著偏高，对水体形成阶段性冲击，且因排放范围广、随机性强，管控难度极大。

污水处理设施的运行效率与监管力度，直接决定人为

污染源的最终排放效果，是污染防治的关键防线。污水处理设施作为拦截重金属的核心环节，其处理工艺、运行稳定性与维护水平，直接影响尾水重金属浓度：常规处理工艺对重金属去除效果有限，部分设施因维护不当、参数调控不合理，处理效率不足，导致尾水中残留的重金属直接排入水体，成为潜在污染源；而采用沉淀、吸附、离子交换等先进工艺的设施，可显著提升重金属去除率，降低排放风险。监管力度是保障设施有效运行的重要支撑，完善的监管体系、严格的执法力度，能督促企业落实环保责任，确保工业废水、生活污水经处理达标后排放；若监管存在漏洞、执法宽松，部分企业可能存在偷排漏排、超标排放等行为，高浓度重金属废水直接污染水体，同时监管技术水平也会影响防控效果，精准在线监测设备与高效溯源技术可及时发现污染异常，而技术滞后则可能导致污染问题延误处置，加剧生态损害。此外，垃圾填埋场渗滤液、河道底泥人工扰动、农业面源等辅助人为来源，进一步增加了污染来源的复杂性，形成多源叠加污染格局。

九、城市地表水体重金属污染防治建议

（一）污染源控制策略

污染源控制是重金属污染防治的源头核心，通过强化源头管控、过程拦截、末端治理等全链条措施，减少重金属向水体的输入，从根本上降低污染负荷，为水体生态修复与质量改善奠定基础，是实现精准防控的首要路径。

强化工业废水排放标准与执行力度，精准管控点源污染。相关部门需结合不同行业污染特征，修订完善差异化重金属排放标准，针对砷、汞、镉等高毒性重金属，制定更为严格的排放限值，明确企业污染治理主体责任。同时建立常态化监管执法机制，整合在线监测、随机抽查、溯源核查等手段，实现对工业企业排污的全流程监管，对超标排放、违规排污企业依法实施处罚、停产整改，情节严重的予以关停搬迁。企业需加大环保投入，优化生产工艺，推广清洁生产技术，从源头减少重金属污染物产生；针对含重金属废水，配套高效处理设备，采用先进工艺提升去除效率，确保废水达标排放，同时建立环保信用评价体系，将排污达标情况与企业信用、政策扶持挂钩，形成“激励+约束”的长效机制，推动产业结构优化升级，降低工业污染风险。

优化城市径流重金属拦截与处理技术，有效管控面源污染。在城市规划建设中，融入海绵城市理念，增加绿地、透水铺装、雨水花园等设施比例，减少地表径流产生量，

降低径流携带的重金属负荷。针对道路、商业区、居民区等不同区域，构建针对性拦截处理体系：道路周边设置初期雨水收集池、截污挂篮，收集污染浓度最高的初期降雨，经沉淀、过滤、吸附处理后再排放或回用；在居民区与商业区推广植被缓冲带，通过土壤吸附、植物吸收作用削减径流重金属，同时加强路面清扫保洁与垃圾清运，及时清除地表累积的污染物，从源头减少径流重金属含量。此外，研发应用低重金属含量的路面材料、建筑涂料，减少材料溶出污染，通过技术与管理手段结合，实现城市径流面源污染的系统化管控。

（二）生态修复措施

生态修复作为污染治理的辅助核心手段，依托水生生物、微生物及人工生态系统的净化功能，去除水体与底泥中的重金属，修复受损生态结构，提升水体自我净化能力，实现污染治理与生态保护的协同推进，兼具环保性与可持续性。

推广沉水植物与微生物联合修复技术，提升水体净化效能。沉水植物如金鱼藻、狐尾藻、苦草等，可通过根系吸附、体表吸收作用富集水体中的重金属，同时释放氧气改善水体溶解氧环境，为微生物生长提供适宜条件，部分植物还能分泌络合物质，促进重金属沉淀固定。微生物如芽孢杆菌、假单胞菌等，可通过生物吸附、代谢转化作用，将重金属转化为毒性较低的形态，或直接富集去除重金属，两者形成协同效应——植物为微生物提供生长载体与营养，微生物促进植物生长与重金属富集效率，显著提升修复效果。实际应用，需结合水体污染特征与生态条件，筛选耐污性强、富集能力高的物种，构建复合修复体系，定期收割富集重金属的植物，避免腐烂导致重金属二次释放，同时监测微生物群落结构变化，确保修复系统稳定运行。

发挥人工湿地的吸附与降解功能，构建生态拦截屏障。人工湿地通过基质、水生植物、微生物的协同作用去除重金属：基质如土壤、砂石、活性炭、沸石等，具有强吸附能力，可吸附水体中重金属离子；芦苇、香蒲、美人蕉等水生植物通过根系吸收富集重金属；微生物则通过代谢转化降低重金属毒性。根据污染程度与处理需求，可构建表面流、潜流等不同类型湿地，针对重金属污染严重区域，优化基质配比，增加活性炭、沸石等高效吸附材料比例，提升去除能力。人工湿地可结合河道整治、景观建设，布局于河流支流、排污口附近、湖泊周边，拦截处理含重金属废水与城市径流，减少对主干流水体的污染，同时为水生生物提供栖息地，提升生物多样性，修复水体生态功能。

日常运维中,需定期清理基质、收割植物,维持湿地系统稳定,确保长期发挥净化效能。

(三) 政策与管理优化

政策与管理优化是污染防治的制度保障,通过完善政策体系、强化监管机制、凝聚社会共识,为各项防控措施落地见效提供支撑,构建全方位、常态化、多元化的污染防治格局。

完善跨部门协同监管机制,形成防控合力。城市地表水体重金属污染防治涉及环保、水利、工业、交通、住建等多个部门,需明确各部门职责边界,建立跨部门专项工作小组,统筹推进监测、执法、治理等工作,定期召开协调会议,破解跨领域难点问题。搭建统一的监测数据共享平台,整合各部门水质监测、污染源监测、水文监测数据,实现实时共享、动态更新,为监管决策提供科学依据。强化联合执法力度,开展常态化联合检查,严厉打击违规排污、偷排漏排等行为,形成监管震慑力;建立跨部门应急联动机制,针对重金属污染突发事件,快速响应、协同处置,降低污染影响范围与损失。同时完善流域协同防控体系,针对跨区域水体,明确上下游责任,加强联防联控,避免污染跨区域扩散,实现全流域共治。

推广公众参与和环保教育,构建全民共治格局。加强环保宣传教育,通过电视、广播、网络、社区宣传栏等多渠道,普及水体重金属污染危害、防控知识与政策法规,提升公众环保意识,引导养成绿色低碳生活习惯,减少日常生活对水体的污染。畅通公众监督举报渠道,设立举报电话、邮箱等平台,对举报属实的予以奖励,鼓励公众参与污染监督。定期开展志愿活动,如河道清理、生态监测体验等,增强公众参与感与责任感,同时督促企业主动公开污染治理情况,接受社会监督。推动科研机构、高校开展科普宣传与技术推广,提升公众对生态修复技术、污染治理措施的认识,营造全社会共同关注、支持、参与城市地表水体保护的良好氛围,为污染防治提供坚实社会基础。

十、结束语

城市地表水体是城市生态系统的核心,承担供水、生态调节与景观美化等重要功能,其重金属污染状况直接关系到人居环境安全、生态稳定与城市可持续发展。当前治理面临复合污染突出、内源风险潜藏、管控复杂等挑战。未来需贯彻精准防控理念,根据区域污染特征与水体功能优化策略,推动技术应用,提升治理针对性与有效性。一方面要严控外源,加强对工业废水、城市径流等污染源的监管,完善监测体系,从源头削减污染负荷;另一方面需推进内源治理,实施底泥修复与生态重构,提升水体自净能力,实现内外协同治理。同时,应完善政策体系,强化跨部门、跨区域协同,凝聚政府、企业与社会公众合力,构建长效防控机制。通过系统推进各项措施,有望改善水质、降低生态风险、修复水体功能,促进水体生态与城市发展协调共生。这不仅保障用水安全、提升人居环境,也为城市生态文明建设提供支撑,为后续水生态环境保护工作积累实践经验。未来还需加强多学科交叉研究,深化重金属迁移机制与复合风险评估,研发高效低成本治理技术,持续提升城市地表水体污染防治与生态保护水平。

参考文献:

- [1] 薛雪儿,潘永春,王婵,等.北京市小清河重金属调查与风险评价[J].生态学与可持续发展研究,2025,2(04):110-114.
- [2] 蒋沐成,郭永利,陈会会,等.张家口市洋河地表水重金属污染与风险评价[J].生态学与可持续发展研究,2025,2(02):38-42.
- [3] 陈莎莎.城市地表水重金属污染特征及风险评价[J].皮革制作与环保科技,2022,3(17):139-142.
- [4] 郑家传,王刚.城市地表水重金属污染特征及风险评估——以苏州市为例[J].环境保护科学,2022,48(01):25-32.
- [5] 任丽江,张妍,张鑫,等.渭河流域关中段地表水重金属的污染特征与健康风险评价[J].生态环境学报,2022,31(01):131-141.