

水体典型污染物的水生态风险研究进展

刘畅 综述 王红旗 审校

(北京师范大学水科学研究院,北京 100875)

摘要 随着全球人口的迅猛增长以及城市化、工业化进程的不断加速,大量污染物通过地表径流进入水体环境,引发了水体富营养化、生物多样性下降和生态用水短缺等一系列水生态风险问题。本文对近些年国内外水体污染的总体状况和面临的主要问题进行了详细分析,并总结了重金属、邻苯二甲酸酯、抗生素三类典型污染物以及其他生物性和物理性污染物所造成的主要健康危害和水生态风险。以此为基础,从管理和技术等方面提出如何加强水生态风险研究等措施建议,旨在为水污染防治政策的制定和水生态风险的评价提供参考。

关键词 水体;污染物;水质;水生态风险

中图分类号:X52 **文献标识码**:B **文章编号**:1000-9760(2024)12-519-06

Progress in research on the ecological risks of typical water pollutants

LIU Chang, WANG Hongqi

(School of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the rapid increase in global population and the accelerating processes of urbanization and industrialization, a significant amount of pollutants is entering aquatic environments through surface runoff, leading to a series of water ecological risks such as eutrophication, biodiversity loss, and scarcity of ecological water resources. This paper provides a detailed analysis of the general state of water pollution both domestically and internationally in recent years and the main issues faced, and summarizes the major health hazards and water ecological risks caused by three typical pollutants: heavy metals, phthalates and antibiotics, as well as other biological and physical pollutants. Based on this, it proposes measures and suggestions on how to strengthen research on water ecological risks from management and technical perspectives, aiming to provide references for the formulation of water pollution prevention and control policies and the assessment of water ecological risks.

Keywords: Water body; Pollutants; Water quality; Aquatic ecological risk

水不仅是自然环境中基本的构成要素,更是人类生存和发展所必需的物质条件,与人类的健康状况息息相关。然而,伴随人类工业化和城市化步伐的加快,各类水体遭受了大量污染物的侵袭,这些污染物超出了水体的自我净化能力,从而引发了水质恶化的问题。水体污染已成为一个全球性的生态环境难题,给世界各国的经济发展、社会进步以及公众健康带来了严峻挑战。

自国务院 2015 年 4 月发布并实施《水污染防治行动计划》以来,中国高度重视水污染的预防和治理,不断推出一系列以改善水环境质量为核心的配套政策,多措并举,加速改进水污染治理状况。

2021 年 5 月 28 日,国务院办公厅发布了关于易制毒化学品种类的通知,加强了对污染情况的调查和监管。2022

年 5 月 4 日,又发布了《新污染物治理行动方案》,对新污染物进行了全方位的治理部署。

为了更好地完善对环境领域的生态保护法律和法规,并确保水生态系统中的生物多样性得到保护,迫切需要进一步开展各类水环境中污染物的水生态风险评价。本文综合分析了当前国内外水生态系统污染的现状和问题,特别是对重金属、邻苯二甲酸酯和抗生素这三类代表性污染物的污染特性以及它们对水体环境所构成的主要威胁进行了重点梳理,并从管理与技术层面提出了如何加强水生态风险研究等措施建议,旨在为未来相关政策的制定和水生态风险评价提供有力的参考依据。

1 水生态现状

1.1 世界水生态环境总体形势

自上世纪 50 年代开始,全球的人口数量急剧上升,同

时工业也得到了飞速的发展。一方面,人类对于水资源的需求以令人震惊的速度增长;另一方面,水污染的加剧消耗大量的可供使用的水资源。在上一世纪,全球人口激增了两倍,而人类用水量却增加了 5 倍^[1]。

早在 1999 年 9 月,联合国环境规划署公布了一篇题为《2000 年全球环境展望》的研究报告,其中特别强调了 21 世纪人类所面临的前所未有的水资源匮乏和环境污染的挑战。报告还指出,在全球范围内,大约有 20% 的人口在获得安全饮用水方面存在困难,并预测到 2025 年,全球无法获得安全饮用水的人数将从目前的 14 亿增长到 23 亿^[2]。

2012 年,美国启动的国家水生资源调查(National Aquatic Resource Surveys, NARS)项目对美国的 1038 个湖泊、水库和池塘的水生态环境进行了深入研究,根据评估数据,31% 的湖库中的大型底栖无脊椎动物受到了严重影响,21% 的湖库中的浮游动物受到了重大干扰,35% 的湖库受到了总氮的严重影响,而 40% 的湖库则受到了总磷的严重干扰;鱼类种群数量明显下降,微囊藻毒素在湖库的 39% 样本中被检测到,与 2007 年相比,其检出率增加了 9.4%^[3]。

2018 年,欧盟环境署(European Environment Agency, EEA)公布了一篇题为《欧洲水域现状和压力评估》的分析报告,在报告中,对 111072 个水域进行了全面的评估。根据评估数据,在生态状况或潜在价值方面,约有 40% 的地表水都处于良好或极好的状态,而 4% 的水体没有这方面的详细信息;38% 的地表水保持在一个良好的化学状态,46% 的水体没有达到这一状态,另有 16% 的水体化学状态仍然不明确;超过 50% 以上的水体受到重金属及有机化合物的威胁,大多数国家的超标污染物主要是多环芳烃(PAHs)、汞、镉、镍、铅。分析结果表明,全球气候变化及人类活动加剧导致部分地区水质恶化,点源污染、扩散源污染和水文地貌等都是主要的影响因子^[4]。

根据 2021 年由联合国水机制(United Nations-Water)发布的研究报告^[5],在对全球 89 个国家进行调查后发现,包括河流、湖泊和地下水资源在内的 75000 个水体中,有超过 40% 受到了严重的污染,超 30 亿人的饮用水安全受到影响。另据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的调查数据显示,水体污染与人类疾病的 80% 紧密相关,被微生物污染的饮用水可能会成为腹泻、霍乱、痢疾、伤寒等多种水传播疾病的传播者,因腹泻而失去生命的大约每年有 48.5 万人^[6]。水质污染已经演变成一个全球性的生态问题,对全球各国的经济、社会发展和民众的健康造成了严重威胁。

1.2 我国水生态现状

基于环境部门对我国河流、湖泊及水库水质的监测结果,近些年由于工农业废水和城市生活污水排放量的增长,导致主要水体系统遭受不同程度的污染。数据显示,我国的居民生活污水和工业废水的排放量在 1980 年还处于较低水平,但 1997—2006 年 10 年间排放量猛增,而其中大部

分废污水未经任何处理就直接排入了江河湖海。全国 50% 的城市地下水受到不同程度污染。人类排污是水污染的主要原因^[1]。

据生态环境部公布的《中国生态环境状况公报》(简称为《公报》)^[7]所示数据,我国黄河、长江等 7 大流域以及西北、西南诸河等,在 2012—2023 年,优良水质的占比呈现持续增长的趋势,2012 年劣 V 类水质断面比例 10.2%,到 2023 年仅占 0.4%。尽管如此,2023 年松花江流域仍处于轻度污染状态,其主要污染指标包括化学需氧量和高锰酸盐指数以及总磷含量。

与以上主要江河相类似,在 2012—2023 年进行的我国重要湖泊(水库)监测中,Ⅰ~Ⅲ类水质的比例持续增长,2012 年的Ⅰ~Ⅲ类水质断面比例为 61.3%,2023 年占 74.6%。而劣 V 类水质所占比例由 2012 年的 11.3% 下降到 2023 年的 4.8%。从营养状况看,富营养状态湖泊(水库)的占比呈小幅上升趋势,湖泊(水库)主要污染指标变化较少。全国环湖河流水质总体不断改善,但太湖、巢湖、滇池仍呈现轻度污染状态,主要的污染指标为总磷。

地下水存在严重的三氮(硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮)污染,某些地方还检测到有毒有机物和重金属的存在。据《公报》数据,我国在 2012—2023 年对地下水进行的重点监测显示,优质水质的占比逐渐减少,而相对较差的水质所占的比例却在逐渐增加。主要超标污染物包括铁、氯化物和硫酸盐,而某些监测点亦发现铅、锰等重金属含量超标现象。同时,饮用水源地检出的不同含量的新污染物不断涌现,如全氟化合物、药品、内分泌干扰物、抗生素等污染风险,区域水生态和饮用水安全存在隐患,污染物和生物性污染的治理任重道远^[8]。

海洋水环境方面,据《公报》2012—2023 年的数据统计,我国近岸海域的污染状况呈持续改善态势。Ⅰ和Ⅱ类水质海域面积在 2012 年所占比例为 69.4%,至 2023 年逐步提高到 85.0%,劣四类水质海水所占比例也从原来的 18.6% 减少到 7.9%。近年位于长江口、珠江口以及东海、黄海、渤海等经济活动频繁的河口海湾成为严重污染的海域,污染的主要超标指标包括活性磷酸盐 and 无机氮,入海污染物是造成污染的主要来源,防治任务繁重。

2 水生态风险

2.1 重金属

重金属是指密度较大的金属,其污染来源广泛,极难自然降解。水体的重金属污染通常是指金属离子进入水体,且超过了国家要求标准。自然环境中常见的重金属主要有汞(Hg)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、锌(Zn)、铁(Fe)、锗(Ge)、钴(Co)等金属元素。

天然水体中含有的重金属都是少量的,一般情况下不会影响水环境的生态平衡系统,但当重金属超过基本的浓度标准时,其威胁是指数上升的,这主要与人类的生产生活

息息相关。由于工农业的快速发展,我国水环境沉积物和土壤中的重金属污染物很容易被检出。当重金属没有经过科学处理就任意排放或者违规排放时,必然会使周边环境,特别是工厂附近的水源出现较为严重的重金属污染现象。除了为人们所熟知的普通重金属污染外,还有包括镭(Ra)、铀(U)这类具有极大放射性的重金属元素,通过接触和饮用对生物体造成辐射伤害,更加需要引起人们的注意。

早在 20 世纪 80 年代,科研工作者就在锦州湾、湘江、长江等水域中检测出超过浓度标准重金属,每升水体中含量达到了几百微克。当时,其他国家还频有因重金属污染严重而造成人类身体疾病发生的情况。近些年来,随着我国物质生活水平的提高,重金属污染也越发严重,保护好我国的水环境已刻不容缓。

重金属污染物进入水环境中的途径是多种多样的,例如生活和生产废水的排放、固废填埋等,给水域生态系统的平衡带来明显破坏^[9]。重金属被水生生物体吸收后,在体内不断累积,并随环境发生迁移,最终会影响到营养级中更为高级的生物。据调查统计,在很多发展中国家和地区中,地表水是重金属的聚集地。而欧洲等发达地区因为工业发展较为快速,地表水中的重金属大量迁移到河流、湖泊的沉积物中,大量重金属在沉积物中被检出,检出率远远超出了地表水^[10]。有研究表明,我国八大流域中的 10 种重金属中,铜和锌等重金属严重超标,对水生生物所造成的慢性毒性伤害显著,当水生动植物长期而又广泛地生存在重金属污染严重的水域中,其面临的水生态风险是巨大的^[11]。另有研究发现,锰和铁在汉江中的检出率较高,且铁的浓度超过既定标准的 4 倍多,超标率达 13%^[12]。汉江作为河北、山西等省份居民的水源地,又担负着农田灌溉和水产养殖的重任,因此该水域重金属超标,对经济发展和人类健康的威胁都是相当巨大的。对比国外的数据显示,希腊地表水自 1999 年来的 20 年中,重金属污染不断增加,最终超过规定标准值,一些河流甚至达到了高度污染水平^[13]。

水是生命体的重要组成部分,当人们赖以生存的水环境遭受破坏时,对全球各种生物的生存繁衍的打击是致命的。因此,近些年学者们对各种形态的重金属在水体中的污染研究普遍展开,得到了许多有价值的数据与实验成果,但由于重金属污染物的存在形式多种多样,各种形态的重金属污染物之间具有明显的差异性,所以继续深入开展水体重金属存在形态的研究,对于有效预防和治理水体重金属污染具有极其重要的意义。

2.2 邻苯二甲酸甲酯(Phthalate acid esters, PAEs)

PAEs 是一种内分泌干扰物,常在水体中被检测到。世界卫生组织在 1995 年将它列为一类环境内分泌干扰物,提出必须对它严加控制^[14]。PAEs 种类繁多,最常见的有邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二甲酯(DMP)等,其物理性质为不易溶于水、难以挥发、可塑性良好、沸点高和较为黏稠等特点,这些特点对涂料、个人护理品、食品包装

材料等产品的制作有极大的帮助,因此滥用泛用问题严重。当这类污染物大量排入水体,便造成了严重的水体污染。据相关数据统计,PAEs 每年在全世界范围内的使用量已经达到 600~800 万吨^[15]。PAEs 不仅在水环境中大量存在,同时在土壤中也存在着较高的检出率,因为其对环境的污染程度、存在范围之广和对生物体的致癌和畸变率之高,PAEs 很早就引起了环境领域科研工作者、国内外环境保护机构和组织的广泛关注,对 PAEs 的水生态风险评价也显得尤为重要。例如美国环保局已经将 DBP、DMP 等 6 种 PAEs 进行严格管控,我国也将 DMP 等 3 种 PAEs 列入环境优先控制污染物黑名单^[16]。在我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)和《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中,DBP 和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)两类物质浓度定为 0.003mg/L 和 0.008mg/L,由此可以看出我国对相关污染物的浓度标准做出了进一步规范。

PAEs 和重金属一样,也是难以被降解,难以溶于水,但是比较容易溶解在甲醇等溶剂中,这类有机物进入水域中,随着水环境和水生生物活动发生迁移,并容易不断在生物体内累积,最后更广范围地污染水体,危及人类身体健康。

自然界中存在 PAEs 这类物质,同时它也可以通过人工合成。一方面,一些微生物可以体内生成 PAEs,某些植物体内也存有少量的这类物质;另一方面,工业生产中可以人为地合成这类有机物质,而通过人工合成方式生成此类有机物的来源占主要的部分。因此,本来在自然界中少量存在的物质,人为干预后大量生成,势必会对生态环境造成严重威胁。当 PAEs 随塑料等污染物质排放到环境中,不断产生迁移和累积,普遍存在于土壤、水体、空气和底泥等环境生态体系中,对环境 and 生物体造成一定的伤害。

国外各大水体和我国各大小河流中均检测到不同浓度的 PAEs。国外 PAEs 的相关研究有很多,比如有学者对德国河流 Brandenburg 的 PAEs 污染状况进行检测,检出浓度远高于国内的其他水域^[17]。PAEs 在巴西淡水河流中被检出的浓度是 97.8 $\mu\text{g/L}$ ^[18]。上述所提到的水体污染较为严重,这仅是较为少数的情况,其实大多数国外水域中 PAEs 的浓度都在合理的标准限值之内,例如西班牙等国家^[19]。

相对来说,国外在水环境生态系统中的 PAEs 等有机物质的研究方面起步较早,我国在初期并没有给予相关有机物的污染问题足够的关注和重视,这使得许多水域,包括七大水系、多数城市地下水和重要河流湖泊中的 PAEs 含量都超出了国家设定的标准。相关数据表明,北京市有 5 座水厂的 DMP 和 DBP 等 5 种 PAEs 有机物的检出率高达 100%,5 种物质的浓度占有 PAEs 有机物总浓度的 80% 以上,存在极大的水生态风险^[20]。在佛山南海区水源中,DIBP 和 DBP 的浓度在所有被检出单体中,排在前列,分别为 14 $\mu\text{g/L}$ 和 29 $\mu\text{g/L}$ ^[21]。PAEs 有机污染物在全国的大多数水域中均有不同程度地被检出,长江武汉段在 2016 年的检出浓度比 2005 年的检出浓度多了一倍多,其污染情况实

不容乐观^[22]。

随着 PAEs 对环境造成的污染不断加剧,学者们对其生理毒性和水生态风险的关注也日益加深。从近年的文献可以看出,对 PAEs 的研究程度目前多基于单体动物试验,而没有更多地考虑多种污染物的共存情况,比如可以研究 PAEs 和重金属或者其他有机物等多种污染物的毒害作用,抑或是探讨多种不同性质的 PAEs 的复合毒害作用,以期更为全面地了解其生态效应^[23]。

2.3 抗生素

抗生素在医药领域有对抗细菌、治疗身体疾病的功效,但滥用或者多用抗生素会产生超级耐药菌,对身体产生不良反应。抗生素作为一种抗菌类化合物,种类繁多,常见的有四环素类、红霉素类和磺胺类等,同时会通过生物体的排泄物进入到环境中来,其大量的使用,带来了一系列的环境问题,影响生态安全,因而逐渐受到环境学者的关注。2007 年,联合国环境规划署发表了“全球环境展望”报告,明确指出抗生素已然成为一种新型典型污染物,应受到环境科研工作者的广泛重视。

抗生素在我国各大主要流域中存在广泛,其产量占药品总量的大半部分,比其他国家高出很多。抗生素来源复杂,我国作为农业大国,农作物上使用的农药、畜牧养殖的抗生素药物,通过田间等地表水频繁地流入河流中,从而危害到水环境。水体中的抗生素可能会存留于生物体的排泄物中,最终累积到水环境中。另一方面,医疗废水处理的环节出现问题,有些抗生素没有很好地处理,就混在废水中一同排放到附近河流中,最终汇入水环境中。同时,医疗药物的使用过程中也存在着抗生素污染的风险,诸如医疗器械清洗以后产生的废水也是抗生素的重要污染源之一。在养殖业生产中,饲料、农药和肥料等含有抗生素的产品流入生态环境中,也会成为主要的污染来源。有统计显示,人类医用抗生素的比例远远没有农业和畜牧业等领域的使用比例大^[24]。

20 世纪 80 年代,研究人员在英国水域中发现抗生素以一定浓度存在。国际上相关研究层出不穷,美国、英国等欧洲国家也不断地发现抗生素的浓度在逐年提升,其残留浓度在水域中造成的污染不容忽视。Kimosop 等^[25]对肯尼亚维多利亚湖的水体进行取样检测,检出环丙沙星和磺胺甲恶唑等各类抗生素,其浓度已经超过国家标准,具有一定的水生态风险。尽管不同国家或地区的抗生素使用在种类和用量上存在着差异,但抗生素在不同环境下的污染水平是相当的。

我国水域中的抗生素主要有 5 类:磺胺类、喹诺酮类、四环素类、 β -内酰胺类和大环内酯类抗生素。我国抗生素的生产量和使用量在世界上排在前列。2011 年,四环素类、磺胺类等抗生素在辽宁滨水湾被检出,且浓度较高^[26]。2018 年有学者在长江南京段提取水样进行检测,在所检测的 8 种磺胺类药物中,磺胺甲恶唑的含量最高,而抗生素总

浓度最低保持在 13.2ng/L,最高达到 21.0ng/L,平均值为 16.2ng/L^[27]。同时,渤海湾地区、京津冀地区、长江流域等地区的抗生素污染情形更为严峻。抗生素的滥用对生态环境造成了很大的危害,已经构成了对人类健康生存的严峻挑战^[28]。

总体而言,无论是先进国家还是发展中国家,都存在着也非常重视抗生素的污染问题,尤其是在人口比较密集和工业生产比较集中的区域,甚至在欠发达地区对这一问题也有所关注。我国目前虽然还属于发展中国家行列,但因为人口众多,抗生素的生产和使用量较大,随之而来的环境污染问题就更为严重,特别是经济发达、人口密集的长江经济带地区,因而亟需开展对抗生素污染相关问题的深入研究,为我国水域的污染治理和生态保护提供重要的参考。

2.4 其他

上述 3 类污染物在水体中都是常见的,其中重金属属于无机污染物,PAEs 属于有机污染物,二者都是化学污染物,而抗生素则是微生物的次生代谢产物。此外,无机污染物还有砷、氟等,有机污染物种类更加繁多,数量可达数百乃至上千种,如有机磷农药、多环芳烃、全氟化合物等。另有生物性污染物、物理污染物等。

砷和氟作为地壳的构成元素广泛地存在于自然界。当某地区水体中砷、氟含量高于某一水平时,这里的居民如果长时间饮用富含砷和氟的水,有可能导致地方性的饮水砷中毒和氟中毒等健康问题。地方性砷中毒通常会引发皮肤色素沉着等疾病,并可能导致多个系统和多个器官的损伤,而地方性氟中毒主要表现为氟斑牙和氟骨症^[29]。

除了水体中常见的 PAEs,饮用水中还普遍存在三卤甲烷类和卤代乙酸类等具有高风险的有机污染物,即消毒副产物,这些污染物是因水源水中的无机或有机物质与饮用水中的消毒成分发生化学反应所产生的。在日常生活中,人们通过各种用水行为,如饮水、沐浴和游泳等,使个体长期暴露于消毒副产物中。随着对人体致癌作用研究的深入,越来越多的学者开始关注饮用水消毒副产物对人类潜在的风险及相关问题。根据已有的试验结果,许多消毒副产物都显示出细胞毒性、生殖发育毒性、致畸性等多种潜在的健康风险^[30]。

生物性污染物主要有细菌、病毒和原虫等多种微生物,如沙门菌、轮状病毒、隐孢子虫等。在自然界中,微生物是最容易感染人类的生物之一。人们如果饮用或者与这些病原体所污染的水接触时,就有可能产生腹部不适及腹泻、呕吐、发烧、关节痛等症状的困扰,严重者可导致休克乃至死亡^[31]。

由于水体的富营养化,藻类的大量繁殖成为生物性污染的另一大难题。由于藻类对环境条件变化敏感,因此近年来国内外学者对于藻华暴发原因进行了研究。藻类的大量繁殖会扰乱水生态系统的平衡,还可能干扰自来水管厂的净化过程,进而影响供水质量。此外,在藻类生命活动中,

会有多种藻毒素释放,特别是在水中分布较广的微囊藻毒素,其毒性可能有导致肝脏损伤和增加肝癌的风险^[32]。

水物理污染物主要有两种,即热污染和放射性污染。热污染主要来源于工业活动产生的冷却水,它在排入水体后进行的物理热交换会导致水温上升,进而加速水体内的化学反应和生物学反应,并通过影响藻类生长规模和速率,加剧水体富营养化趋势。在水体中,放射性污染根据其来源可划分为天然和人为两大类。地层中的放射性元素或它们的衰变产物是天然放射性物质的主要来源,而宇宙射线,如⁴⁰K、¹⁴C、²³⁸U等,也可能是其中的一部分来源。人为因素导致的放射性污染则主要涉及核试验、核战争以及核能相关活动所产生的废弃物。当人体暴露于或饮用被放射性物质污染的水时,有可能触发来自外界或体内的辐射。放射性物质不仅具有核素本身的毒性,还可能对人体的骨髓、甲状腺、肝脏等多个组织或器官造成放射性损伤,同时也有可能对胎儿或婴幼儿正常的生长发育产生不利影响^[30]。

3 小结与展望

由于全球经济和人口的迅猛增长,再加上城市化和工业化的进程,环境污染已逐渐成为威胁人类健康的主要因素之一。近年来,大量的新污染物不断地生成,并通过地表径流进入到水体环境,对生态安全和饮用水的水质安全构成了严重的威胁。由于传统监测手段无法有效掌握各类新污染物在地表水体中的迁移转化规律,使得对其进行准确识别、分析与预测变得更加困难。这些新污染物及其转化产物广泛分布于全球水体中,种类繁多,致使对其污染机理的研究和风险管控都面临着挑战,水生态风险已然成为制约经济社会发展的主要障碍。当然,随着世界各国在水污染治理方面的步伐不断推进以及相应的配套政策的陆续推出和执行,全球的水生态环境有了明显的改善。面对水资源供需矛盾加剧、生物多样性下降等一系列重大水生态环境问题,近年来我国也高度重视水环境治理与保护工作,采取了一系列措施加强水环境保护力度,取得显著成效。然而,在全球范围内,水生态环境问题仍然非常严重,如水体富营养化、生态用水不足以及新污染物等,这些问题还没有得到根本的解决。因此,必须高度重视水质安全保障工作,建立一套完善有效的监测预警体系,及时掌握水体环境质量动态并采取有效措施进行预防控制。目前国内外对水体环境中的污染物持续开展排查工作,未来应重点考虑解决以下几个方面的问题。

首先,全面修订水环境质量标准,完善水环境法律法规。水中污染物来源相当广泛,不同污染物对水环境质量产生的影响也各不相同。针对重金属、PAEs、抗生素等水生态风险较大的污染物,制定相应的水环境质量标准,加大重点污染源集中整治力度。根据水环境污染特征和水生态风险危害程度,建立污染物动态排放清单,并修订相关政策法规,健全水污染物监测管理体系,提高环境监管及科学治

理技术能力和水平,为综合治污和科学治污提供支撑。

其次,制定具有差异性的湖库氮磷营养物标准,推进湖库水生态分区治理。基于湖库富营养状况评估准则,对重要湖库流域实行污染物总量控制。选择不同区域的典型湖库作为试点对象,进行氮磷负荷总量控制实验,随后依据这些实验结果,定期组织开展湖库水生态安全评估,科学确定湖库富营养化控制的阶段性目标,分步推进重点湖库流域氮磷总量控制。

第三,深化水生态监测和评估,建立水生态信息库。鉴于水环境污染具有结构性、复合性及流域性等特征,应加强污染成因及规律的研究。着力开展当前水污染所面临化学性污染物复合暴露对水生态风险的评价研究,强化新污染物的水生态风险研究,探索建立新污染物标准体系。针对病原微生物、藻类等生物性污染,重点加强对水生态风险的预警、阻控等技术的研究。

构建全方位水生态效益评价体系,增强污染治理的精准度和协同性。研发湖库精准治理决策支持系统,联合多部门、跨学科对不同区域和水体开展水生态风险评估调查,促进治理措施的优化调度。同时,加大对自然因素在水环境质量上的影响及应对策略的研究力度。鉴于气候变化背景下湖库富营养化严重威胁区域饮用水安全的这一实际情况,应全面整合湖库富营养化防控和气象气候条件、人为活动的影响等最新的研究成果,进一步深入探讨气候变化条件下饮用水安全保障问题研究,并对全球气候变化提出积极应对策略。

利益冲突:所有作者均申明不存在利益冲突。

参考文献:

- [1] 刘宝珺,廖声萍.水资源的现状、利用与保护[J].西南石油大学学报,2007,29(6):1-11. DOI:10.3863/j.issn.1674-5086.2007.06.001.
- [2] 张慧芳.全球环境状况令人堪忧[J].经济论坛,2001(11):28-29. DOI:10.3969/j.issn.1003-3580.2001.11.014.
- [3] US Environmental Protection Agency. National lakes assessment 2012:a collaborative survey of lakes in the United States [R]. Washington DC:US Environmental Protection Agency,2016.
- [4] European Environment Agency. European waters:assessment of status and pressures 2018 [R]. Denmark:Publications Office of the European Union,2018.
- [5] Weiss JS,Rapuano CJ,Seitz B,et al. IC3D classification of corneal dystrophies-edition 3 [J]. Cornea, 2024, 43 (4): 466-527. DOI:10.1097/ICO.0000000000003420.
- [6] World Health Organization. Home/newsroom/fact sheets/detail/drinking-water [EB/OL]. (2022-03-21) [2024-08-01] <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>, 2022-03-21.
- [7] 中华人民共和国生态环境部.中国生态环境状况公报(2012-2023) [EB/OL]. (2024-06-05) [2024-08-01] <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>, 2013-05-28~2024-06-05.
- [8] 吴丰昌.我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望

- [J]. 水利发展研究, 2023, 23 (12): 1-8. DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2023. 12. 001.
- [9] 徐贝贝, 余爱华. 土壤重金属污染源解析的应用与展望[J]. 应用化工, 2021, 50 (4): 1077-1081, 1086. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-3206. 2021. 04. 046.
- [10] Huang HG, Lin C, Chang CF, et al. The individual and synergistic indexes for assessments of heavy metal contamination in global rivers and risk: a review[J]. *Current Pollution Reports*, 2021, 7 (3): 247-262.
- [11] 何佳, 时迪, 王贝贝, 等. 10 种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2970-2982. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2019. 07. 034.
- [12] 王珍, 刘敏, 林莉, 等. 汉江中下游水体重金属时空分布及污染评价[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(9): 40-47. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20200737.
- [13] Karaouzas I, Kapentanaki N, Mentzafou A, et al. Heavy metal contamination status in Greek surface waters: a review with application and evaluation of pollution indices[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128192.
- [14] 朱振宇, 姬亚芹, 赵静波, 等. 天津市大气 PM10 与降尘中邻苯二甲酸酯的污染特征及相关性分析[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(12): 24-28. DOI: 10. 15985/j. cnki. 1001-3865. 2015. 12. 005.
- [15] Acharee K, Thanh VC, Chitsan L, et al. Occurrence of phthalate esters around the major plastic industrial area in southern Taiwan [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(12): 457-467.
- [16] 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 等. 太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39 (8): 3614-3621. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201712230.
- [17] Serpe FP, Esposito M, Gallo P, et al. Optimization and validation of an HPLC method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mussels[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122 (3): 920-925.
- [18] Da L, Sanches F, Hasse D, et al. Evaluation of surface sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in colony Z3- (Patos Lagoon, Brazil) [J]. *Microchemical Journal*, 2010, 96(1): 161-166.
- [19] Guart A, Bono-Blay F, Borrell A, et al. Effect of bottling and storage on the migration of plastic constituents in Spanish bottled waters [J]. *Food Chem*, 2014, 156: 73-80. DOI: 10. 1016/j. foodchem. 2014. 01. 075.
- [20] 王龙, 徐雄, 朱丹, 等. 城市再生水厂出水中典型有机污染物的赋存情况及其生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2021, 41 (5): 1910-1919. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2020. 0412.
- [21] 冯耀基, 黎少映, 吴雪梅, 等. 佛山市南海区水源水邻苯二甲酸酯污染现状与风险分析[J]. *微量元素与健康研究*, 2022, 39(3): 54-57.
- [22] 董磊, 汤显强, 林莉, 等. 长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2588-2599. DOI: 10. 13227 / j. hjkx. 201710014.
- [23] 徐玉金, 黄辉, 孔博宁, 等. 邻苯二甲酸酯在水环境中的分布及去除技术研究进展[J]. *净水技术*, 2022, 41 (2): 24-33, 149. DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2022. 02. 004.
- [24] Liu L, He S, Tang M, et al. Pseudo toxicity abatement effect of norfloxacin and copper combined exposure on *Caenorhabditis elegans* [J]. *Chemosphere*, 2022, 287 (Pt 1): 132019. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2021. 132019.
- [25] Kimosop SJ, Getenga ZM, Orata F, et al. Residue levels and discharge loads of antibiotics in wastewater treatment plants (WWTPs), hospital lagoons, and rivers within Lake Victoria Basin, Kenya [J]. *Environ Monit Assess*, 2016, 188(9): 532.
- [26] Jia A, Hu J, Wu X, et al. Occurrence and source apportionment of sulfonamides and their metabolites in Liaodong Bay and the adjacent Liao River basin, North China [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2011, 30(6): 1252-1260. DOI: 10. 1002/etc. 508
- [27] 唐娜, 张圣虎, 陈致宏, 等. 长江南京段表层水体中 12 种磺胺类抗生素的污染水平及风险评价[J]. *环境化学*, 2018, 37 (3): 505-512. DOI: 10. 7524/j. issn. 0254-6108. 2017062705.
- [28] 陈小平, 王萌, 杨长明, 等. 四环素类抗生素在我国水环境污染现状及其对水生生物的毒性研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50 (10): 2780-2785. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-3206. 2021. 10. 033.
- [29] 杨克敌. *环境卫生学* [M]. 8 版. 北京: 人民卫生出版社 2017: 44-231.
- [30] 鲁文清. *水污染与健康* [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2015: 241-243.
- [31] 曾强, 邬堂春. 中国水污染状况及其引起的健康危害与对策 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2023, 27(5): 503-507, 521. DOI: 10. 16462/j. cnki. zhjbkz. 2023. 05. 002.
- [32] Li Y, Chen JA, Zhao Q, et al. A cross-sectional investigation of chronic exposure to microcystin in relationship to childhood liver damage in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Environ Health Perspect*, 2011, 119 (10): 1483-1488. DOI: 10. 1289/ehp. 1002412.

(收稿日期 2024-08-01)

(本文编辑:石俊强)