

污染底质修复目标的制定方法

■ 胡洪营* 宋玉栋 /清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室

编者按 随着我国水环境污染源头治理的有效推进,由突发性环境事故或长期积累造成的底质污染将逐渐成为水环境治理领域的热点。污染底质是一类重要的污染场地,其修复是彻底消除水污染影响的关键措施,而污染底质修复目标的确定又是实施底质修复的基础。本文在介绍污染底质修复目标制定原则和方法的基础上,指出了建立我国污染底质修复目标制定的方法体系和所需要努力的方向。



改革开放以来,伴随着我国经济的快速发展,水环境受到严重的污染。近年来随着废水治理力度的加大,水环境污染的源头控制得到一定改善,而由突发性环境事故或长期积累造成的底质污染问题正逐渐成为水环境治理领域关注的热点。

底质是水生生态系统的重要组成部分,是众多底栖生物的生存场所和食物来源。当水体污染事件发生后,由于底质和水中悬浮物等对污染物的吸附作用以及污染物和悬浮物的沉降作用,一部分进入水环境的污染物将在底质中沉积并逐渐富集。这在一定程度上缓解了上覆水体的污染程度,却造成了底质的污染。重金属、持久性有毒有机物(POPs)等都是常见的底质污染物。随着水质污染逐步得到控制,在底质中积存的污染物对水体水质和生态系统的风险将逐步显现。一方面污染底质可能向水中释放污染物,形成二次污染,影响上覆水体甚至地

下水的水质,影响饮用水的供水安全;另一方面污染底质可能对底栖生物及其他水生生物产生毒害作用,破坏水生生态系统,有些污染物还可通过生物富集、食物链放大等过程,进一步影响陆生生物和人类健康。由于污染物在底质中的扩散速度远没有在水中快,污染物容易在底质中积累,因此污染底质可能对生态系统产生长期的威胁。污染底质是一类重要的污染场地,其修复已成为彻底消除水体污染的关键措施。

目前我国对污染底质的修复还处于起步阶段,对污染底质修复技术和修复目标制定方法的研究也刚刚开始。本文以美国污染底质修复目标的制定方法为参考,对污染底质修复目标的制定方法进行了初步探讨。

● 污染底质修复目标的含义

污染底质修复目标(Cleanup Level)是指通过各

* 胡洪营,男,清华大学环境科学与工程系教授、博士生导师、副系主任。

种修复手段使底质环境中的污染物浓度降低到对人体健康和生态系统不构成威胁的技术和法规可接受水平。底质修复目标的制定是污染底质修复实施前的重要步骤,只有制定了合理的底质修复目标,才能够保证有效降低污染底质对人体健康和生态系统的风险,确定合理的底质修复范围,选择合适的修复手段,将底质修复费用降低到可以接受的水平。

● 污染底质修复目标的制定原则

污染底质修复目标的制定应遵循风险管理的原则、因地制宜的原则、技术可行性原则、经济可行性原则并满足相关法律法规的规定。

基于风险管理的原则

污染底质的修复应采用风险管理的方式,即通过风险评价的方法确定污染底质对人体健康和生态系统产生风险的主要来源及途径,进而采取经济可行的手段对风险进行有效控制。因此底质修复目标的确定也要充分体现风险管理的目标。

因地制宜(site-specific)的原则

由于污染底质现场条件、污染状况及风险水平的多样性和复杂性,污染底质修复技术适用条件及成本的差异性,因此应尽可能针对污染底质的实际情况,制定合理可行的修复目标。

技术可行性原则

修复目标不得超出现有的修复技术和检测技术可以达到的水平,不得高于污染现场的背景水平。

经济可行性原则

修复目标的制定应考虑到国家或当地的经济承受能力,制定经济可行的修复目标。

另外,修复目标应满足各相关法律法规的规定。

● 污染底质修复目标的制定步骤

从确定需要进行污染底质修复到最终确定污染底质的修复目标,通常要经历以下几个步骤。

明确底质修复目的(Remedial Action Objective, RAO)。对污染底质进行污染状况调查,并利用生态

风险评价和人体健康风险评价的方法判定污染底质对生态系统和人体健康是否存在不可接受的风险。如果存在这种风险,就要对污染底质进行修复或限制人群的接触。同时根据风险评价的结果确定底质修复要针对的污染物种类、暴露途径和风险受体,从而明确底质修复的目的。例如,如果污染底质中的多环芳烃(PAHs)给当地的底栖生物带来了不可接受的风险,那么修复目的即是将底质中PAHs的含量降低到底栖生物可接受的水平。

确定初步修复目标(Preliminary Remediation Goals, PRG)。采用一定的方法针对RAO,确定初步修复目标,即确定污染底质中特定污染物的浓度降低到怎样的水平可以将该污染物在特定暴露途径下的风险降低到可以接受的水平。PRG应当给出对应一系列风险水平的浓度系列,如给出对人体健康造成 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} 致癌风险水平的污染物浓度值,以便于风险管理者做出最终的判断。

制定最终修复目标(Cleanup Level)。在PRG的基础上,综合考虑现场条件、风险评价结果的不确定性、修复技术水平、检测技术水平、背景水平、经济承受能力、相关法律法规等以确定最终在底质修复中采用的修复目标。

● 初步修复目标(PRG)的制定方法

PRG是制定最终修复目标的基础和关键,也是污染底质修复目标科学性的集中体现。PRG的制定主要考虑对人体健康风险和生态系统风险的控制,因此也常作为底质环境质量基准的制定方法,目前通常采用的方法包括以下几类。

生物效应法。通过建立底质中污染物含量同生物负效应的对应关系制定修复目标,主要包括表观效应阈值法(Apparent Effects Threshold Approach, AETA)等。

平衡分配法(Equilibrium Partitioning Approach, EqPA)。利用污染物在底质同水相或底质同生物组织间的分配关系制定修复目标,主要包括水-底质平衡分配法和生物-水-底质平衡分配法。

综合分析法。将各种方法获得的修复目标进行综合分析后再制定更加合理的目标。

表观效应阈值法 (AETA)

表观效应阈值法(AETA)最早由Barrick等提出,开始只是作为对海湾底质进行质量评价的一种手段,用于华盛顿州皮吉特(Puget)海峡底质的环境质量评价工作。表观效应阈值(AET)是某种化学污染物在底质中的浓度值,当该污染物浓度高于此值时,在相对适当的参照条件下必定有统计显著的($p \leq 0.05$)有害生物效应发生。该方法主要针对污染底质对水生生物产生的风险,将底栖群落结构变化、代表性生物致死率等生物效应数据同底质污染物浓度相结合,寻找污染物浓度同生物负效应的关系,从而确定可接受生物效应下允许的污染物浓度。

AETA 所采用的生物效应数据来自对现场底栖生物或上覆水体水生生物群落的调查以及实验室的生物效应实验。不同生物对污染物的敏感程度不同,因此生物效应指标的选取应当根据底质现场生物群落的实际情况。在皮吉特海峡的AET 研究中,采用了4种生物指标:端足类(amphipod, Rhepoxynius abronius)10d的致死率;牡蛎幼体2d的异常率;底栖动物丰度的减少;细菌发光抑制率。

1986年美国对皮吉特海峡底质环境质量的研究中用AET法进行了大规模的考察验证,确定了44类污染物质的AET,即9种重金属:Sb、As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni、Ag、Zn;16种PAHs;5种氯代烃;总PCBs;6种酞酸盐;5种酚类;5种混合剂可提取物;3种挥发性有机物及3种农药类等。

平衡分配法 (EqPA)

平衡分配法(EqPA)是指应用分配系数确定底质中的污染物浓度,在平衡时这一浓度值将使其他环境相如水或生物组织中具有可接受的污染物浓度。该方法基于如下假设:某个环境相(如底质)中的污染物与另一个环境相(如水相)中污染物之间存在快速可逆的交换过程,在取样时已达到平衡(或稳态)。在这样的条件下,污染物在某个环境相中的浓度是其在另一环境相浓度及适当平衡常数的函数。

相平衡分配法于1985年由美国环保局(USEPA)提出,先后在北美地区、荷兰、英国以及澳大利亚和新西兰等地得到应用,是研究较多、应用较广的底质环境质量基准和修复目标确定方法。常用的平衡分配法包括水-底质平衡分配法和生物-水-底质平衡分配法两种。

水-底质平衡分配法水-底质平衡分配法基于以下假设^[8]。

污染物在底质(固相)和间隙水(水相)间的交换是快速而可逆的,处于热力学平衡状态,其平衡分配关系可用平衡分配系数 K_p 表述。

底质中的污染物主要是其在间隙水中的部分具生物有效性。

底栖生物和上覆水生物对同一污染物具有相似的敏感性。因此,如果间隙水中污染物浓度达到可接受的风险水平,如水质标准(WQC),此时底质中该污染物的含量可作为针对该污染物该暴露途径产生风险的修复目标(PRG),即

$$PRG = K_p \cdot WQC$$

表 10.2.1 各种底质修复目标制定方法的比较方法

方法	优点	缺点
AETA	基于污染物的生物效应 对污染物类型及生物效应指标无特殊要求 适合于多种污染物及多种类型底质	需要大量的现场数据 不能明确污染物-生物效应的因果关系 没有考虑污染物的生物有效性
水-底质EqPA	基于成熟的水质标准 能适用于多数类型底质和几乎各种污染物 考虑了污染物的生物有效性	污染物在底质固相-水相间难以达到真正的平衡状态 有些污染物尚无水质标准
生物-水-底质EqPA	考虑了污染物的生物富集性 有利于对高营养级生物的保护	污染物在底质与生物相之间很难达到真正的平衡状态

生物-水-底质平衡分配法 生物-水-底质平衡分配法也称为组织残留法 (Tissue Residual Approach, TRA), 主要基于底质中污染物浓度同生物组织中污染物浓度间的分配关系。最常采用的分配系数是生物累积因子 (Bioaccumulation Factor, BAF) 和生物/底质累积因子 (Biota/Sediment Accumulation Factor, BSAF)。其定义分别为:

$$BAF = C_{tis}/C_s$$

$$BSAF = (C_{tis}/Lipid_{tis}) / (C_s/foc)$$

其中 C_{tis} 为组织中污染物浓度, C_s 为底质中污染物的浓度, $Lipid_{tis}$ 为组织中脂肪含量, foc 为底质中有机碳含量。

该方法主要针对污染底质对食物链中高营养级水生生物或陆生生物 (包括人) 产生的风险, 通过风险评价等方式确定生物 (被捕食者) 组织中允许的污染物浓度, 再结合其他数据, 计算允许的底质污染物浓度。

该方法的优点之一就是在 PRG 的制定过程考虑了污染物的生物富集作用。当底质修复目标旨在控制底质中持久性可富集污染物对高营养级生物的风险时, 经常采用生物-水-底质平衡分配法

PRG 制定方法的比较

由于研究方法以及指导思想等方面的不同, 每种 PRG 制定方法都有其优点和局限性, 并在适用范围上存在差异。迄今还没有建立普适的污染底质修复目标的制定方法。现有底质修复目标制定方法的比较如下表所示。

● 结语

随着水污染治理力度的加大, 污染底质的修复将逐渐成为我国水环境治理工作的重要内容, 因此广泛开展污染底质修复技术和污染底质修复目标制定方面的研究, 建立适合我国国情的污染底质管理与修复体系, 具有重要的现实意义。污染底质修复目标的制定是污染底质修复的基础。从污染底质修复目标的制定过程来看, 要建立适合我国国情的污染底质修复目标制定的方法体系, 应开展以下几方面

的工作: 一方面应当建立和健全底质样品的采集、保存和分析规范, 为底质污染状况监测以及污染底质的风险评价提供基础; 另一方面应当筛选我国水生生态系统的代表性生物, 开展生物毒性方面的研究, 建立生物毒性数据库, 为污染底质的筛选和修复标准的制定提供科学依据。同时应开展风险评价相关基础数据的研究, 如人对鱼类的摄食速率等, 为利用风险管理的方法指导污染底质的修复创造条件。③

参考文献

- [1] SSC (SPAWAR Systems Center) San Diego. Implication Guide for Assessing and Managing Contaminated Sediment at Navy Facilities. NAVAL Facilities Engineering Command. Washington DC, 2003:93-96.
- [2] 蒲家彬. 用AET法建立海洋沉积物环境质量基准. 海洋通报. 1994, 13(6): 85-61.
- [3] Cubbage J, Batts D. Evaluation of freshwater sediment quality values including apparent effects thresholds of *Hyalella azteca* and *Microtox*. Second SETAC World Congress (16th Annual Meeting). Pensacola Florida, SETAC Press, 1995.
- [4] Barrick R, Becker S, Brown L, Beller H, Pastorok R. Sediment Quality Values Refinement: 1988 Update and Evaluation of Puget Sound AET, EPA Contract No. 68-01-4341, US Department of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, 1988.
- [5] 文湘华. 水体沉积物质量基准研究. 环境化学, 1993, 12(5): 334 -341.
- [6] US EPA. Evaluation of the Equilibrium Partitioning EqP Approach for Assessing Sediment Quality. Report of the Sediment Criteria Subcommittee of the Ecological Processes and Effects Committee. Washington DC, 1990:4-24.
- [7] Science Applications International Corporation. Example Approach for the Development of Site-Specific Preliminary Remediation Goals for Protection of Ecological and Human Health at Navy Aquatic Sites, 2001
- [8] US EPA. Draft Implementation Framework for the Use of Equilibrium Partitioning Sediment Quality Guideline. Washington DC, 2000:4-17.