

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20111113003

钟文珏, 曾毅, 祝凌燕. 水体沉积物质量基准研究现状[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(3): 285-294

Zhong W J, Zeng Y, Zhu L Y. Current research status of sediment quality criteria [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(3): 285-294 (in Chinese)

水体沉积物质量基准研究现状

钟文珏, 曾毅, 祝凌燕*

南开大学环境科学与工程学院 教育部环境污染过程与基准重点实验室 天津城市生态环境修复与污染防治重点实验室 天津 300071

摘要: 沉积物质量基准是对水质基准的补充,对水质管理具有重要意义。目前国际上沉积物质量基准计算方法有十几种。对各种方法的理论基础、数据需求、适用范围等方面进行了概述之后,综合分析了各种方法的理论基础。研究结果认为,应将建立沉积物质量基准的方法分为以生物效应数据为基础的生物效应数据库法和以相平衡分配原理为依据的相平衡分配法。而根据统计方法不同,生物效应数据库法又分为单值基准、双值基准和三轴图法。同时还对美国、加拿大、荷兰、英国、澳大利亚和新西兰的沉积物质量基准研究发展和应用概况进行了分析。结合我国实际情况认为,依赖于大量生物效应数据的生物效应数据库法,目前在我国的适用范围有限,只能用于推导少数几种污染物的基准值。相平衡分配法具有可靠的理论基础而且不需要大量的生物效应数据,具有很大的发展潜力。因此,对于目前沉积物质量基准研究处于初级阶段的我国,更适合使用相平衡分配法计算污染物沉积物质量基准。

关键词: 沉积物质量基准; 相平衡分配法; 生物效应数据库法

文章编号: 1673-5897(2013)3-285-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Current Research Status of Sediment Quality Criteria

Zhong Wenjue, Zeng Yi, Zhu Lingyan*

College of Environmental Science and Engineering, Nankai University; Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Nankai University), Ministry of Education; Tianjin Key Laboratory of Remediation & Pollution Control for Urban Ecological Environment, Tianjin 300071, China

Received 13 November 2011 **accepted** 18 January 2012

Abstract: Sediment quality criteria (SQC) are the supplement of current water quality criteria and very important in water quality management. There are many methods for deriving SQC in the world. In this paper, the rationale, applicability, statistical methods and other information of these methods were summarized. According to the rationale of these methods, they could be categorized as two classes: equilibrium partitioning approach and biological effect database of sediment approach. Due to the different statistical techniques applied to the biological effect-database approach, the final criteria could be unilateral, bilateral and triad. The development and applications of SQC in USA, Canada, Netherlands, United Kingdom, Australia and New Zealand are reviewed. The current research situation on SQC in China is also analyzed. According to the actual domestic demand, the appli-

收稿日期: 2011-11-13 录用日期: 2012-01-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003); 天津市自然科学基金重点项目(08ZCGHHZ01000, 07JCZDJC01900); 教育部新世纪人才项目; 中国博士后科学基金(20110490768); 环境水质学国家重点实验室专项经费资助(11K05ESPCR)

作者简介: 钟文珏(1979-),女,博士,研究方向为水环境质量基准与生态风险评价, E-mail: wenjue07@126.com;

* 通讯作者(Corresponding author) E-mail: zhuly@nankai.edu.cn

cable range of biological effect database of sediment approach is limited ,because there isn't enough data. Equilibrium partitioning approach has a reliable theoretical basis ,and doesn't need a lot of biological data. So equilibrium partitioning approach is preferred to derive SQC in China.

Keywords: sediment quality criteria; equilibrium partitioning; biological effect database of sediment

沉积物是水体的重要组成部分,也是水体中有机污染物、重金属和营养盐等的主要蓄积场所,其污染问题普遍存在于全球的淡水和海洋生态系统当中。受污染的沉积物不仅直接危害底栖生物,其中蓄积的污染物在适当的环境条件下会释放到上覆水中,进一步危害到水生生态系统甚至人类健康^[1]。为了能科学有效地评价和治理沉积物污染,北美一些国家于20世纪80年代开始提出了沉积物质量基准的概念并对其进行研究。沉积物质量基准(sediment quality criteria, SQC)是指特定的化学物质在沉积物中不对底栖水生生物或其他有关水体功能产生危害的实际允许值。沉积物质量基准是对水质基准的补充,是客观进行沉积物和水环境质量评价的依据,对底质疏浚及制定污染排放标准具有十分重要的指导意义。随后,欧洲一些国家也逐渐开始重视沉积物基准研究,但其研究较为分散,到目前为止受到普遍认可和应用的沉积物质量基准方法主要源于北美地区^[2]。相对水质基准而言,沉积物质量基准的研究还不够完善,对许多问题仍然存在争议。由于各国家和地区的研究背景、研究条件、可用数据、环境条件等存在一定的差异,国际上尚没有建立沉积物环境质量基准的统一方法。因此,国际上对沉积物质量基准一般不使用“criteria”一词,而是用诸如“benchmark”、“guideline”和“screening level”等来描述^[3-4]。

笔者的主要目的是结合欧美等国家关于沉积物质量基准研究的历史和现状,对现有沉积物质量基准推算方法的分类、发展和应用方面进行梳理和分析,并结合我国实际情况,对我国沉积物环境质量基准体系建立提出相关建议。至于各种基准计算方法的具体操作及其优缺点,已有大量相关文献报道^[4-9],笔者不再做重复阐述。

1 常用沉积物质量基准计算方法及分类

目前受到认可并应用较为广泛的沉积物质量基准研究方法有十余种,分别为:筛选水平浓度法(screening level concentration approach, SLCA);效应范围法(effect range approach, ERA);效应水平法(effect level approach, ELA);表观效应阈值法(apparent effect thresh-

old approach, AETA);一致法(consensus approach, CA);沉积物质量三元法(sediment quality triad approach, SQTA);生物效应数据库法(biological effect database for sediment, BEDS);相平衡分配法(equilibrium partitioning approach, EqPA);组织残留法(tissue residue approach, TRA);加标沉积物毒性测试法(spike-sediment toxicity approach, STA);背景值法(background approach, BA);权重法(weight of evidence approach, WEA);水质基准法(water quality standard approach, WQSA)等等。这些方法的理论基础、数据需求、统计方法和适用范围等信息列于表1中。表中,AVS(acid volatile sulfides)表示酸可挥发性硫化物,SEM(simultaneously extracted metal)表示同步提取金属元素,SLC表示目标污染物对某底栖生物的筛选水平浓度,SLC(screening level concentration)表示筛选水平浓度,AET(apparent effect threshold)表示表观效应阈值,ESBs(equilibrium partitioning sediment benchmarks)表示相平衡沉积物基准。

根据各种方法的理论基础,本研究认为可将常用的沉积物基准建立方法分为两大类:一类是以生物效应数据为基础的生物效应数据库法;第二类是以相平衡分配原理为依据的相平衡分配法。这与澳大利亚和新西兰环保署的分类方法相近。澳大利亚和新西兰环保署在2000年的报告中指出,将沉积物质量基准的推算方法分为3类^[10],即以污染沉积物的实验室或者野外暴露实验为基础的数据法;以相平衡原理为基础,将现行水质基准应用于沉积物孔隙水的方法和背景值法。其中背景值法由于缺乏有力的理论基础,虽然仍有所应用,但是不再受到推荐。由于在同一理论基础上推导出的基准值更具可比性,以理论基础为原则进行分类也受到了普遍认同。因此,本研究推荐以理论基础为原则将沉积物质量基准建立方法进行分类。

生物效应数据库法通过收集污染物的生物效应数据建立生物效应数据库,借助简单的统计分析手段建立沉积物环境质量基准。在以往的研究中,生物效应数据库法特指一种基准建立方法,而在本文则是一类基准建立方法的总称,凡是需要大量收集与

表 1 常见沉积物质量基准计算方法概况
Table 1 Overview of common methods for deriving sediment quality criteria

理论基础	方法名称	数据需求	统计方法	适用范围	基准值名称	
沉积物化学污染和生物效应之间关系	SLCA	至少 20 个以上的站点和 20 种以上的底栖生物的毒性数据	统计观察到某一物种的所有监测点的目标污染物浓度分布 90% 分位点记为目标污染物对该底栖生物的筛选水平浓度 SSLC, 然后将各种底栖生物的筛选水平浓度 SSLC 由低到高排列, 选取第 5% 分位点记为最后确定的可保护 95% 底栖生物的筛选水平浓度	各种类型的沉积物及各种污染物	筛选水平浓度 SLC	
	ERA	1) 研究区域内的加标毒性数据的有效数据; 2) 野外调查数据中的有效数据; 3) 其他方法计算出的沉积物质量基准值	将在某化学物质的有效毒性数据按照升序排列, 然后确定每种化合物有效数据列的第 15 个百分点的值计为效应数据列低值(effects range-low, ER-L), 第 50 个百分点浓度值计为效应数据列中值(effects range-median, ER-M)	各种类型的沉积物	效应范围中值 ERM 和效应范围低值 ERL	
	ELA	1) 研究区域内的加标毒性实验数据的有效数据和无效数据; 2) 野外调查数据中的有效数据和无效数据; 3) 其他方法计算出的沉积物质量基准; 4) 相似区域的有效毒性数据和无效毒性数据	阈值效应浓度(TEL) 是效应数据集的第 15 百分位数和无效数据集的第 50 百分位数的几何平均值, 化学浓度低于 TEL 时不良效应很少发生。可能效应浓度(PEL) 是效应数据集的第 50 百分位数和无效数据集的第 85 百分位数的几何平均值, 浓度高于 PEL 时不良效应会经常观察到	各种类型的沉积物	阈值效应浓度 TEL 和可能效应浓度 PEL	
	WEA	与 ELA 相同	与 ELA 相同, 主要区别在于需要给各因素赋予权重	各种类型的沉积物	同 ELA	
	AETA	至少一种生物指标数据库	把与参照点相比较无显著生物效应的点位按污染物浓度进行排序, 未受影响站点的最高浓度即为表现效应阈值	各种类型的沉积物	表现效应浓度 AET	
	SQTA	1) 沉积物化学分析数据; 2) 沉积物生物测试结果; 3) 现场底栖生物调查; 4) 参照点相关数据	将化学分析、生物测试和现场底栖生物调查三方面的数据与参照点数据进行定量比较, 绘制三轴图, 通过三轴图对沉积物质量进行分类和评价	适于建立逐一化学污染物和化学混合污染物的控制基准	SQC	
	BEDS	与 ELA 的 1) 2) 相同	与 ERA 相同	各种类型的沉积物	同 ERA	
	CA	其他方法推算出的沉积物质量基准	阈值效应浓度范畴数据的几何均值(阈值效应浓度 TEC), 可能效应浓度范畴数据的几何均值(可能效应浓度 PEC)	各种类型的沉积物	TEC 和 PEC	
	相平衡分配原理	EqPA	相平衡分配系数, 水质基准, AVS, SEM	根据相平衡分配原理和已建立的水质基准推导相应的沉积物质量基准, 是 WQSA 的升级	已有水质基准且固相与水相分配达到平衡	相平衡沉积物质量基准 ESBs
		TRA	生物富集系数, 组织残留水平	根据污染物在水生食物网中的潜在累积能力和组织残留浓度水平推断保护当地野生动物和人类的组织残留沉积物基准	适用于推导以保护野生动物或人类为目标的基准	SQC

生物效应有关数据的方法均属于生物效应数据库法。SLCA、ELA、ERA、AETA 和 BEDS 等方法均属于生物效应数据库法的范畴, 它们的主要区别在于数据库或

最终统计方法不同。例如, 在数据范围方面, SLCA 法只收入监测区域底栖生物的毒性数据, ERA 法则要收入研究区域加标毒性实验数据、野外调查数据和通

过公式直接计算得到的数值型沉积物质量基准值。各种方法所需的数据已列入表1中。根据统计方法不同(表1),生物效应数据库法又可分为3类,即单值基准、双值基准和三轴图。单值基准法包括 SLCA 和 AETA 法,它们运用简单的统计方法推算出一个单一阈值,当沉积物中的污染物浓度超过阈值时,则认为该污染物对水环境造成了威胁。这种单一基准值相对简单,方便使用,但可能会引起保护不足或过保护的结果。双值基准法包括 ERA、ELA、BEDS、WEA 和 CA 等。双值法是用2个阈值给出3个范围,当污染物浓度低于双值中的低值时,认为产生危害的可能性很小,几乎可以忽略;当污染物浓度高于双值中的高值时,则认为危害发生的可能性很高;如果污染物浓度在二者之间,则为灰色区域,表示会产生和不会产生不良生物效应的概率接近。使用双值法评价沉积物质量基准避免了统计方法过于简单导致单值基准不准确的问题,并且可以根据评价目标选择基准值。如有需要还可以根据评价目标,对灰色区域进行更详细的划分,使评价结果更加可靠合理。三轴图法只包括 SQTA 法。这种方法虽然融合了沉积物化学分析结果、生物测试结果和现场生物调查结果3方面的数据,使得评价结果更加客观真实,但是数据间的转换和分析处理难度很大,操作性不高。因此,目前其应用实例并不多见。因此,在使用生物效应数据库法推算沉积物质量基准时,我们更推荐使用双值基准法。

相平衡分配法以热力学动态平衡分配原理为基础,认为当水体中某污染物浓度达到水质基准时,沉积物中该污染物的浓度即为沉积物质量基准。这类方法具有可靠的理论基础,充分利用水环境质量基准,间接考虑了污染物的生物有效性,而且不需要大量的生物效应数据,具有很大的发展潜力,主要包括了 EqPA 和 TRA 两种方法。这两种方法的基本原理相同,其主要区别在于保护的目标不同,EqPA 法以保护底栖生物为目标,而 TRA 法则是在 EqPA 的基础上考虑生物积累和生物放大作用,以保护野生动物或人类为目标。由于不同地区沉积物性质相差较大,美国环保局(EPA)在进行沉积物质量基准计算时建议用有机碳含量进行标准化,以避免沉积物类型差异所带来的不确定性。同时,还需要进一步深入研究污染物的吸附解吸行为,从而能够更准确地分析分配平衡时污染物在固-液间的分配行为。

2 两类沉积物质量基准方法在各国的应用概况

发达国家对沉积物质量基准的研究始于20世

纪80年代。1983年,美国环保局水质条例与标准办公室成立了一个研究小组,开展建立沉积物质量基准方法的研究。1984年11月,在意大利佛罗伦萨市召开“沉积物中的化学物质在水系统中的归宿和影响”学术讨论会上,来自欧美等国家的科研人员一起讨论了沉积物质量基准的概念和方法,表明对沉积物质量基准的研究取得了初步进展^[11]。随后,各国积极展开了沉积物质量基准研究,下面将对各国沉积物质量基准的发展及应用进行概述。

2.1 相平衡分配法的应用

美国是最早开始关注水体沉积物质量的国家。美国环保局从1985年就开始利用“储存与修复系统”(storage and retrieval system)数据库中的沉积物监测数据评估沉积物污染问题,其评估阈值是将当时的水质基准用有机碳含量归一化后,通过相平衡分配法计算^[12]。1986年,EPA正式成立了“沉积物基准技术咨询委员会”(Sediment Criteria Technical Advisory Committee),专门研究推算沉积物质量基准的方法。1988年,为了全面管理控制沉积物污染问题,EPA又成立了2个监督委员会,即主要负责项目管理的“沉积物监督指导委员会”(Sediment Oversight Steering Committee)和负责技术支撑的“沉积物技术监督委员会”(Sediment Oversight Technical Committee)。这些委员会联合推出了一系列沉积物管理政策,并于1998年正式颁布了“污染沉积物管理政策”^[13]。该委员会继1993年推出范^[14]、荧蒽^[15]和菲^[16]的相平衡沉积物基准(equilibrium partitioning sediment benchmarks, ESBs)之后,提出应继续应用相平衡分配法制定更多的非离子有机污染物的ESBs。为满足“污染沉积物管理政策”的要求,EPA于2003年提出了混合多环芳烃^[17]、杀虫剂狄氏剂^[18]、异狄氏剂^[19]的ESBs。同年还提出了用相平衡法计算非离子有机污染物的标准方法,并提出了苯、林丹等32种非离子有机污染物的ESBs值^[3]。随后于2005年,又出台了6种重金属混合物的ESBs^[20]。表2对美国各项沉积物质量基准的研究区域和研究方法进行了总结,其中包括非美国人对美国区域进行的研究以及部分研究区域属于美国的研究。可见,相平衡分配法是EPA推荐的沉积物质量基准计算方法,这种方法具有可靠的理论基础;充分利用水环境质量基准,间接考虑了污染物的生物有效性,有利于评估污染物与生物效应之间的关系;而且不需要大量的生物效应数据,具有很大的发展潜力。在沉积物质量基准研究初期,生物效应数据较少

表 2 美国沉积物质量基准研究

Table 2 Researches on sediment quality criteria of USA

	研究目标	研究方法	研究时间	数据来源
相平衡分配法	茈、荧蒽、菲的沉积物质量基准	EqPA	1993	EPA ^[14-16]
	混合多环芳烃、狄氏剂、异狄氏剂及 32 种非离子有机污染物沉积物质量基准	EqPA	2003	EPA ^[3, 17-19]
	6 种重金属沉积物质量基准	EqPA	2005	EPA ^[20]
	纽约州沉积物	EqPA	1999	NYSDEC ^[21]
	华盛顿人体健康沉积物基准	TRA	1995	WDOH ^[22]
	纽约保护野生动物和人类健康沉积物质量基准	TRA	1999	NYSDEC ^[21]
生物效应数据库法	北美淡水、河口、海洋沉积物	ERA	1991	NOAA ^[5]
	美国淡水沉积物	ERA	1996	Ingersoll 等 ^[23]
	南加州海湾沉积物	ERA	1997	MacDonald 等 ^[24]
	佛罗里达州近海沉积物	WEA	1996	FDEP ^[25]
	佛罗里达州内陆水体沉积物	WEA	1996	FDEP ^[4]
	五大湖沉积物	SLCA	1986	Neff 等 ^[26]
	华盛顿普吉特海湾淤泥处置沉积物基准	AETA	1986	Tetra Tech Inc ^[27]
	华盛顿淡水沉积物	AETA	1990	WDOE ^[28]
	美国淡水沉积物	AETA	1996	Ingersoll 等 ^[23]

注: EPA 美国环保局; NYSDEC 纽约州环保局; WDOE 华盛顿环保局; WDOH 华盛顿健康署; NOAA 国家海洋与大气管理局; FDEP 佛罗里达环保局; Tetra Tech Inc, Tetra Tech 公司。

时 相平衡分配法是较为可行的计算沉积物质量基准的方法。

荷兰对土壤质量基准有较长时间的研究,为沉积物质量基准的研究奠定了坚实基础。1991 年, Van der van der Kooij 等^[29]等在相平衡分配原理上建立了荷兰沉积物质量基准。这套基准包含两方面的基准值,一方面为基于水生态毒理数据的基准,另一方面为基于生物累积效应的基准值。两者之中较低的值则为最终基准值。目前,荷兰已经制定了 120 种污染物的沉积物质量基准,并且已经被荷兰运输与市政工程部所采用^[30]。荷兰对相平衡分配法的应用与 EPA 有所区别。EPA 应用的相平衡分配法是以热力学动态平衡分配原理为基础,利用污染物的沉积物-水平衡分配系数和水质基准中污染物的最终慢性毒性值计算沉积物质量基准。而荷兰除了用 EPA 的方法计算沉积物质量基准值之外,还要在一般的相平衡分配法基础上引入生物富集因子计算另一套基准值(将最终慢性毒性值修正为鱼类或人类健康基准值除以生物富集因子)。荷兰这种将生物富集因子引入相平衡分配法的做法在其他国家并不多见。他们建立的基准体系不仅包括以保护底栖生物为目的的基准,还包括了保护其他动物和人类为目的的基准。与美国环保局的相平衡分配法相比,荷兰的基准体系更加健

全,但是荷兰却存在着毒性数据缺乏的问题。在相平衡分配法中,需要用到水生生物的慢性毒性数据,最理想的状况是使用无观察效应浓度(NOEC)作为慢性毒性值。当 NOEC 值缺乏时,荷兰选择用 LC₅₀除以 100 替代。以 100 作为评估因子,存在很大的不确定性,不同的国家和不同研究选择的因子不同,没有明确的规定,这就使得最终基准值的不确定性增大。另外,荷兰用相平衡分配法获得的基准值为悬浮沉积物的质量基准,为获得底层沉积物质量基准还要乘以一个转换系数。当计算重金属底层沉积物质量基准时转换系数为 1.5,计算有机物沉积物质量基准时转换系数为 2。由于该方法与经典的相平衡方法不同,所获得的基准值明显与其他方法推算出的基准值不同。例如,荷兰钙的底层沉积物基准值为 8.7 mg·kg⁻¹,明显高于其他国家和地区的基准值。

英国最早关心沉积物质量基准也是从解决沉积物疏浚和污水厂污泥处置问题开始的。英国渔业研究理事会海洋污染监测管理组对沉积物疏浚和污水处理厂污泥处置基准问题进行了长期研究,从 1989 年到 1993 年之间提出了 5 份研究报告^[31-35]。英国沉积物质量基准也是应用相平衡分配法推算而得到的,其中一部分基准值是建立在美国的数据之上,还有一些基准值应用欧洲水体数据进行了修正^[36]。

2.2 生物效应数据库法的应用

除 EPA 之外,美国还有很多环保组织和地方环保局对沉积物质量基准进行了大量研究,其中最为突出的是国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和佛罗里达州环保局。1990年,NOAA 提出利用生物效应数据库推算沉积物质量基准的方法,由于该方法由国家现状与发展趋势项目组(National Status and Trends Program, NSTP)实施完成,所以被简称为 NSTP 法^[5]。这种方法以生物效应数据库为基础,收集北美地区的相关数据,包括通过相平衡分配法获得的毒性数据,通过加标沉积物生物实验获得的毒性数据以及可靠的野外调查的生物化学资料。把毒性数据从小到大进行排序,将效应范围低值(ER-L, 10%分位值)和效应范围中值(ER-M, 50%分位值)作为评估沉积物质量的基准值。NSTP 法属于生物效应数据库法的一种,融合了广泛多样的生物效应数据,克服了相平衡分配法中相平衡分配常数 K_p 值影响因素过多、忽略除间隙水外的暴露途径等影响基准准确性和可靠性的因素,因此受到了世界各国的普遍认可。美国的多个州、加拿大、澳大利亚和新西兰以及我国香港地区等用于计算沉积物质量基准的方法都是由 NSTP 法衍生而来。1996年,美国佛罗里达州采用该方法计算了内陆水体沉积物和近海沉积物质量基准。美国用生物效应数据库法建立沉积物质量基准的研究列于表2中。

经过长期的研究,美国在沉积物质量基准方面的工作已硕果累累。但是,美国环保局和各地方政府间产生了脱离现象,环保局在推导沉积物质量基准时均采用 EqP 法,而地方政府除了纽约州之外,却均使用了生物效应数据库类的方法,这就使得结果难于比较,也造成了无法推出普遍适用于全国范围的基准值的问题。

加拿大是使用生物效应数据库法推导沉积物质量基准的典型国家。1988年,加拿大安大略省环境保护局对疏浚沉积物质量基准进行了研究,提出了推导三段式沉积物质量基准的方法,即用2个基准阈值将沉积物质量分为3个水平的方法,这是加拿大较早对沉积物质量基准的研究^[37]。随后多个地区先后提出了沉积物质量基准导则,1991年,Bennett 和 Cabbage^[38]对加拿大各地区的沉积物质量基准推导方法进行了综述,可供参考。随着研究的深入,不断有新版沉积物质量基准计算导则推出,但是

其基本原则并没有改变,均是以生物效应数据库为基础,用2个基准值(效应低值和效应高值)将污染物对底栖生物的长期慢性毒性效应分为3个水平,即无效应水平、最低效应水平和筛选水平。其中筛选水平浓度(相当于效应高值)表示对底栖生物具有显著危害的浓度水平,最低效应水平浓度(相当于效应低值)表示能够保护大多数底栖生物的浓度水平。1992年,加拿大环境部颁布了海洋环境质量基准导则,详细阐述了各种沉积物质量基准计算方法,并推荐应用生物效应数据库方法推导海洋沉积物质量基准^[39]。该报告总体上支持将沉积物质量分为3个水平的理论,并认为直接应用剂量效应关系和更多相关的生态数据得出的基准值要比通过间接生物效应获得基准值(比如相平衡法)更合理。1995年,加拿大环境部长理事会(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)颁布了沉积物质量基准计算导则,并于1999年进行了修改。该方法虽然与美国佛罗里达州沉积物质量基准建立方法相同,但由于数据基础不同,2个地区最终获得的重金属和有机污染物的基准值存在明显差异。同时,比较海洋沉积物质量基准和淡水沉积物质量基准发现两者差异并不明显^[40]。纵观加拿大颁布的各种沉积物质量基准发现,用阈值效应水平(threshold effect level, TEL)和可能效应水平(probably effect level, PEL)双基准将沉积物质量分为3个水平来评估沉积物质量的方法在加拿大受到了普遍认可。虽然加拿大魁北克市提出了应用5个基准值评价沉积物质量^[41],在 TEL 和 PEL 的基础上还增加了频繁效应水平(frequent effect level, FEL)、偶然效应水平(occasional effect level, OEL)和罕见效应水平(rare effect level, REL),但实际还是根据不同的评价目标,应用双值基准作为评价标准。例如,当以防止工业排放污染为目的时,用 REL 和 TEL 值作基准值;当以管理疏浚沉积物为目的时,应用 OEL 和 FEL 作为基准值;当以修复污染点为目的时,则以 PEL 和 FEL 作为基准值。魁北克市的这种做法非常值得借鉴。通常认为,生物效应数据库法由于统计方法简单,很可能造成过保护现象。如果将灰色区域和很可能发生危害的区域进行再次划分,则可以根据研究目的、保护目标和研究区域的实际情况选择不同的基准值,使得评价工作更加合理可行。

澳大利亚和新西兰环境保护委员会(ANZECC)推荐的沉积物质量基准计算方法也是生物效应数据

库法。ANZECC 使用的主要是北美的生物效应数据库,增加了一些污染点筛选数据和一些用相平衡分配法预测的数据。ANZECC 认为在现有数据条件下,引入无效数据会对基准值造成更大的偏差,因此其生物数据库只包括有效数据。为了降低只使用有效数据计算沉积物基准而带来的偏差,ANZECC 采取了一系列措施。例如,在计算重金属沉积物质量基准时,充分考虑生物可利用性问题,去掉了不可被生物利用的部分(用酸可挥发性硫化物 AVS 表示)。在研究毒性效应时,ANZECC 还考虑了氧化还原电位和 pH 值对生物可利用性的影响。另外,需要对计算得到的 ER-L 和 ER-M 评估其合理性。例如,用生物效应数据库法计算出的砷的 ER-L 值,比砷在澳大利亚很多区域沉积物背景值还要低,显然不合理。因此,砷的 ER-L 值并没有被定义为临时沉积物质量基准低值(ISQG-L),而是把将其修正为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以样品干质量计)。

为了弥补数据不足的问题,ANZECC 开展了多项研究,补充沉积物对底栖生物的毒性数据,并且不断进行更新,以更准确评估沉积物质量基准^[10]。

3 我国沉积物质量基准发展概况

我国在沉积物质量基准方面的研究起步较晚,到目前为止,只有零星的重金属沉积物质量基准研究,关于有机污染物沉积物质量基准的研究鲜有报道。香港是我国沉积物质量基准研究起步最早的地区。20世纪90年代初,为了大规模底泥疏浚工程的需要,香港地方政府急需查明港湾沉积物污染的危害程度,需要有适合当地条件的沉积物质量基准作为识别和管理的手段。为了解决这个问题,香港委托加拿大 EVS 环境咨询委员会建立了重金属的初步沉积物质量基准^[42]。除香港之外,我国还有一些零星的重金属沉积物质量基准的研究。例如,20世纪80年代,湖南省环保所等单位在开展湘江重金属水环境容量研究时,曾用生物毒理学方法进行了株洲江段底泥重金属标准的研究。20世纪90年代以来,张曙光等^[43]、霍文毅等^[44]先后讨论了长江、黄河泥沙重金属质量基准的制定。刘文新等^[45-46]结合鄱阳湖水系乐安河沉积物质量评价工作,探讨了应用沉积物质量三元法和平衡分配法建立河流沉积物重金属质量基准的可能性。国家海洋局海洋环境监测中心根据国际文献和我国近海沉积物性质和污染现状,尝试讨论了海洋沉积物中几种污染物的质量管理标准^[47]。这些研究对我国重金属沉积物

质量基准研究具有一定参考价值。但从总体上说,我国在沉积物质量基准领域的研究工作还十分薄弱,急待开展系统深入研究,尤其是在有机污染物沉积物质量基准方面。有毒有机物是环境中种类最多、影响范围最广的一类污染物,其对沉积物质量的影响不容忽视。为了能够更准确地评估沉积物质量,建立沉积物质量基准,在今后的工作中,科研人员可从这两方面入手,对有机物的沉积物质量基准进行深入研究。

4 展望

虽然欧美一些国家对沉积物质量基准的研究已经开展了很多年,但是仍存在很多问题。与水质基准的研究相比,沉积物质量基准的研究还落后很多。沉积物中的有机碳含量、沉积物性质、酸可挥发性硫化物等因素对沉积物基准的影响还不明确。迄今为止,还不能通过任何一种方法,建立具有普遍意义的沉积物质量基准。虽然相平衡分配法和生物效应数据库法在国际上被认为是具有很大发展前途的方法,但是依然很难仅依靠一种方法建立可靠的基准。今后的研究重点应放在建立多种基准建立方法相结合的基准体系,确定统一的分析方法,综合运用沉积物化学分析、生物调查和毒理学实验手段评价沉积物质量等方面。当数据充足时,可考虑使用 SQTA 建立更加直观可视的三轴图来评价沉积物质量。

生物效应数据库法由于能够充分利用广泛多样的生物效应数据,并且能够随着数据库的扩大和更新而不断改进,受到了国际上的广泛关注。但是这些方法均依赖于大量的生物效应数据,以我国目前的研究状态,很难获得充足的数据支撑。同时对于各种数据的甄别、筛选和校正也存在一定的困难。因此,利用基于生物效应的方法建立沉积物质量基准,目前在我国的适用范围有限。相平衡分配法具有可靠的理论基础;充分利用水环境质量基准,间接考虑了污染物的生物有效性,有利于评估污染物与生物效应之间的关系;而且不需要大量的生物效应数据,具有很大的发展潜力。因此,对于目前沉积物质量基准研究处于初级阶段的我国,更适合使用相平衡分配法计算污染物沉积物质量基准。但是相平衡分配法的关键因子(相平衡分配常数 K_p)由于影响因素过多而很难获得准确值,而且相平衡分配法忽略了除间隙水外其他暴露途径对沉积物质量基准的影响。随着研究的深入,我国应大量开展关于污染沉积物生物效应的研究,弥补生物效应数据不足

的缺点,为应用生物效应数据库法建立沉积物质量基准奠定基础。在目前的沉积物质量基准研究中,建议采用2种方法推算沉积物质量基准值,并建立多元评价标准。研究相平衡分配法计算的基准值与用生物效应数据库法计算的基准值的符合程度,从可比性、可靠性和可预测性3方面综合分析两种方法推算出的沉积物质量基准的合理性和可用性,从而获得最终的污染物沉积物质量基准值,为全面评价水环境生态风险提供可靠依据。

通讯作者简介:祝凌燕(1968—),女,博士,教授,博导,主要从事水体沉积物环境质量基准,持久性有机污染物的环境污染过程及生物有效性等方面的研究。

参考文献:

- [1] USEPA. Sediment Classification Methods Compendium (823-R-92-006) [R]. Washington DC: USEPA, 1992
- [2] Crane M. Proposed development of sediment quality guidelines under the European water framework directive: A Critique [J]. *Toxicology Letters*, 2003, 142(3): 195-206
- [3] USEPA. Technical Basis for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Nonionic Organics [R]. Washington DC: USEPA, 2003
- [4] MacDonald D D, Ingersoll C G, Smorong D E, et al. Development and Evaluation of Numerical Sediment Quality Assessment Guidelines for Florida Inland Waters [R]. Tallahassee: Florida Department of Environmental Protection, 2003
- [5] Long E R, Morgan L G. The Potential for Biological Effects of Sediment-Sorbed Contaminants Tested in the National Status and Trends Program [R]. Washington DC: United States Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration/National Ocean Service Virginia Tipple, 1990
- [6] Di Toro D M, Zarba C S, Hansen D J, et al. Technical basis for establishing sediment quality criteria for non-ionic organic chemicals using equilibrium partitioning [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1991, 10(12): 1541-1583
- [7] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life [R]. Winnipeg: CCME, 1999
- [8] Adams W J, Kimerle R A, Barnerr J W, et al. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, 26(10): 1864-1875
- [9] 陈云增,杨浩,张振克,等. 水体沉积物环境质量基准建立方法研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(1): 53-61
- Chen Y Z, Yang H, Zhang Z K, et al. Review of approaches for deriving sediment quality guidelines [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(1): 53-61 (in Chinese)
- [10] Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality: Volume 2-Aquatic Ecosystems-Rational and Background Information [R]. Canberra: ANZECC and ARMCANZ, 2000
- [11] 陈静生,王飞越. 关于水体沉积物质量基准问题[J]. *环境化学*, 1992, 11(3): 60-70
- Chen J S, Wang Y F. Some problems on sediment quality criteria [J]. *Environmental Chemistry*, 1992, 11(3): 60-70 (in Chinese)
- [12] Bolton S H, Breteler R J, Vigon B W, et al. National Perspective on Sediment Quality [R]. Washington DC: US EPA, 1985
- [13] USEPA. EPA's Contaminated Sediment Management Strategy (EPA-823-R-98-001) [R]. Washington DC: USEPA, 1998
- [14] USEPA. Sediment Quality Criteria for the Protection of Benthic Organisms: Acenaphthene (EPA822-R-93-013) [R]. Washington DC: USEPA, 1993
- [15] USEPA. Sediment Quality Criteria for the Protection of Benthic Organisms: Fluoranthene (EPA822-R-93-012) [R]. Washington DC: USEPA, 1993
- [16] USEPA. Sediment Quality Criteria for the Protection of Benthic Organisms: Phenanthrene (EPA822-R-93-014) [R]. Washington DC: USEPA, 1993
- [17] USEPA. Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: PAH Mixtures (EPA/600/R-02/013) [R]. Washington DC: USEPA, 2003
- [18] USEPA. Procedure for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Endrin (EPA-600-R-02-009) [R]. Washington DC: USEPA, 2003
- [19] USEPA. Procedure for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: Dieldrin (EPA-600-R-02-010) [R]. Washington DC: USEPA, 2003
- [20] USEPA. Procedure for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmark (ESBs) for the Pro-

- tection of Benthic Organisms: Metal Mixtures (Cadmium , Copper , Lead , Nickel , Silver and Zinc) (EPA/600/R-02/011) [R]. Washington DC: USEPA ,2005
- [21] New York State Department of Environmental Conservation. Technical Guidance for Screening Contaminated Sediments [R]. New York: Division of Fish , Wildlife , and Marine Resources ,1999
- [22] Washington State Department of Health. Development of Sediment Quality Criteria for the Protection of Human Health. Tier I Report. [R]. Washington DC: WSDH ,1995
- [23] Ingersoll C G , Haverland P S , Brunson E L , et al. Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Hyaella azteca* and the Midge *Chironomus riparius* [J]. Journal of Great Lakes Research ,1996 ,22(3) : 602-623
- [24] MacDonald D D. Sediment Injury in the Southern California Bight: Review of the Toxic Effects of DDTs and PCBs in Sediments [R]. Long Beach: National Oceanic and Atmospheric Administration , US Department of Commerce ,1997
- [25] MacDonald D D , Carr R S , Calder F D , et al. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida Coastal waters [J]. Ecotoxicology ,1996 ,5(4) : 253-278
- [26] Neff J M , Bean D J , Cornaby B W , et al. Sediment Quality Criteria Methodology Validation: Calculation of Screening Level Concentrations from Field Data [R]. Washington DC: USEPA ,1986
- [27] Tetra Tech Inc. Development of Sediment Quality Values for Puget Sound. Volume 1: Puget Sound Dredged Disposal Analysis Report [R]. Washington DC: Tetra Tech Inc ,1986
- [28] Washington State Department of Ecology. Sediment Management Standards: Chapter 173-204 WAC [R]. Washington DC: Washington State Department of Ecology ,1990
- [29] van der Kooij L A , van de Meent D , van Leeuwenet C J , et al. Deriving quality criteria for water and sediment from the results of aquatic toxicity tests and product standards: Application of the equilibrium partitioning method [J]. Water Research ,1991 ,25(6) : 679-705
- [30] Stortelder P B M , van der Gaag M A , van der Kooij L A . et al. Perspectives for Water Organisms [R]. Lelystad: Institute for Inland Water Management and Wastewater Treatment ,1989
- [31] Ministry of Agriculture , Fisheries & Food (MAFF) . First Report of the Marine Pollution Monitoring Management Group's Co-ordinating Group on Monitoring of Sewage-Sludge Disposal Sites [R]. London: MAFF ,1989
- [32] Ministry of Agriculture , Fisheries & Food (MAFF) . Second Report of the Marine Pollution Monitoring Management Group's Co-ordinating Group on Monitoring of Sewage-Sludge Disposal Sites [R]. London: MAFF ,1991
- [33] Ministry of Agriculture , Fisheries & Food (MAFF) . Third Report of the Marine Pollution Monitoring Management Group's Co-ordinating Group on Monitoring of Sewage-Sludge Disposal Sites [R]. London: MAFF ,1991
- [34] Ministry of Agriculture , Fisheries & Food (MAFF) . Fourth Report of the Marine Pollution Monitoring Management Group's Coordinating Group on Monitoring of Sewage-Sludge Disposal Sites [R]. London: MAFF ,1992
- [35] Ministry of Agriculture , Fisheries & Food (MAFF) . Fifth Report of the Marine Pollution Monitoring Management Group's Co-ordinating Group on Monitoring of Sewage-Sludge Disposal Sites [R]. London: MAFF ,1993
- [36] Webster J , Ridgway I. The application of the equilibrium partitioning approach for establishing sediment quality criteria at two UK sea disposal and outfall sites [J]. Marine Pollution Bulletin ,1994 ,28(11) : 653-661
- [37] Hart D R. Development of Sediment Quality Guidelines. Phase II Guidelines Development [R]. Brampton: Beak Consultants ,Ltd. ,1988
- [38] Bennett J , Cabbage J. Summary of Criteria and Guidelines for Contaminate Freshwater Sediment [R]. Washington DC: The Washington State Department of Ecology ,1991
- [39] MacDonald D D , Smith S L , Wong M P , et al. The Development of Canadian Marine Environmental Quality Guidelines [R]. Ottawa: Environment Canada and Ministry of the Environment of Quebec ,1992
- [40] Smith S L. A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for fresh water ecosystems [J]. Journal of Great Lakes Research ,1996 ,22(3) : 624-638
- [41] Environment Canada and Ministry of the Environment of Quebec (EC and MENVIQ) . Criteria for the Assessment of Sediment Quality in Quebec and Application Frameworks: Prevention , Dredging and Remediation [R]. Ottawa: EC and MENVIQ ,2008
- [42] Chapman P M , Allard P J , Vigers G A. Development of sediment quality values for Hong Kong special adminis-

- trative region: A possible model for other jurisdictions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38(3): 161 - 169
- [43] 张曙光, 祁世莲, 赵玉仙, 等. 多泥沙河流水质评价标准研究 [J]. *人民黄河*, 1996(7): 29 - 33
Zhang S G, Qi S L, Zhao Y X, et al. Study of water quality simulation of poisonous substances delivery and change in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 1996(7): 29-33 (in Chinese)
- [44] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用 [J]. *环境科学*, 1997, 18(4): 10 - 13
Huo W Y, Chen J S. Water-particulate distribution coefficient of heavy metal and application in sediment quality criteria in China river [J]. *Environmental Science*, 1997, 18(4): 10-13 (in Chinese)
- [45] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 I. C-B-T 质量三合一方法 (Triad) [J]. *环境科学学报*, 1999, 19(2): 120 - 126
Liu W X, Tang H X. Sediment quality criteria for heavy metal pollution in the Lean River I. Sediment quality triad approach [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 120 - 126 (in Chinese)
- [46] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 II. 相平衡分配法 (EqP) [J]. *环境科学学报*, 1999, 19(3): 230 - 235
Liu W X, Luan Z K, Tang H X. Sediment quality criteria for heavy metal pollution in the Lean River II. Equilibrium partitioning approach [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3): 230 - 235 (in Chinese)
- [47] 陈静生, 王立新, 洪松, 等. 各国水体沉积物重金属质量基准的差异及原因分析 [J]. *环境化学*, 2001, 20(5): 417 - 424
Chen J S, Wang L X, Hong S, et al. The difference and the cause analyses of the aquatic sediment quality guidelines for heavy metals [J]. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(5): 417 - 424 (in Chinese) ◆

致 谢

中国科学院生态环境研究中心曹雪艳老师和李建中老师为本期封面提供了中华大刀螂照片, 军事医学科学院疾病预防控制中心毒理学评价研究中心史慧勤老师和彭双清老师提供了斑马鱼照片, 广东海洋大学薛明老师和厦门大学柯才焕老师提供了方斑东风螺照片, 贵州大学吴寅老师和吴永贵老师提供了斑马鱼胚胎和仔鱼照片。特向他们表示衷心的感谢。