

# 山东近岸海域表层沉积物 7 种重金属污染特征和生态风险评估研究\*

徐艳东<sup>1,2</sup> 魏 潇<sup>1</sup> 杨建敏<sup>1</sup> 唐海田<sup>3</sup> 吴兴伟<sup>1</sup> 马建新<sup>1</sup>

(1. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室 烟台 264006;

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266100; 3. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站 烟台 264006)

**摘要** 本文综合运用单因子污染指数法、Hakanson 潜在生态风险指数法和沉积物质量基准法 3 种方法, 研究和评价了 2012 年和 2013 年山东近岸海域表层沉积物重金属的污染特征和潜在生态风险。结果表明: 山东近岸海域 94% 以上站位的表层沉积物重金属含量符合第一类海洋沉积物质量标准, 沉积物质量良好; 山东近岸海域重金属综合潜在生态风险低, 各重金属潜在生态风险由高到低为 Hg>As>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn (2012 年) 和 Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn (2013 年), Hg 在个别站位达中潜在生态风险程度, 为主要污染因子; 50% 以上站位 As 含量介于美国佛罗里达州和加拿大沉积物质量基准的 TEL—PEL 之间, 表明负面生物效应偶尔发生。应加强对山东近岸海域表层沉积物中重金属 Hg 和 As 的监测, 重点关注二者相对高值区的潜在生态风险和负面生物效应。

**关键词** 重金属; 沉积物; 生态风险评估; 山东近岸海域

**中图分类号** P76 **doi:** 10.11693/hyhz20141200358

海洋沉积物既是污染物质的主要富集媒介, 也是重要的生物栖息场所。同时, 海洋沉积物作为对区域海洋环境质量状况和趋势具有指示作用的监测要素, 比上覆水层更稳定、更具概括性和显著性, 日益成为海洋环境研究的焦点(Campanella *et al.*, 1995; 吴光红等, 2008)。重金属作为典型的累积性污染物, 具有显著的生物毒性和持久性, 对生态系统构成潜在威胁。海洋的重金属主要集中在沉积物中, 故沉积物既是重金属的“汇”又是“源”, 在某种程度上, 近海沉积物中的重金属含量水平能真实反映一个地区的环境质量现状, 随着沉积环境的改变, 经过长期累积的重金属会从沉积物中释放出来, 导致水体重金属的污染和海洋生态环境的恶化(秦延文等, 2007; 张乃星等, 2011; 秦延文等, 2012)。然而不同于可生物降解的有机污染物, 重金属污染物具有潜在的生物累积和生物放大效应, 对人类健康和生态系统存在潜

在的长期影响(Pan *et al.*, 2012)。因此, 研究沉积物污染状况不仅要分析沉积物中重金属含量的分布特征, 还要探讨重金属污染物的潜在生态风险程度(Armitage *et al.*, 1990)。沉积物环境质量的评价相比水环境的质量评价要更为复杂和不确定, 并且每一种评价方法都有其优势和局限性(王菊英, 2004), 所以需要从不同角度将多种方法综合运用, 才能较全面地掌握沉积物质量状况。

山东省濒临渤海和黄海, 海岸线长达 3345km, 占全国海岸线 1/6 强(侯英民, 2010)。近年来, 随着山东沿海地区经济的发展和人类海洋活动的不断增加, 近岸部分海域环境压力突出。目前, 对山东近岸海域表层沉积物的研究大都集中在某一海湾区域, 而对整个山东近岸海域沉积物重金属的整体污染特征和生态风险评估的研究未见报道。本文通过对山东近岸海域表层沉积物中重金属污染物的系统调查, 综合

\*国家海洋公益性行业专项经费项目, 201105006 号, 201205001 号; 烟台市科学技术发展计划项目, 2008160 号; 黄河三角洲学者——海洋生物遗传育种岗位。徐艳东, 在读博士, 助理研究员, E-mail: xuyandong@163.com

通讯作者: 杨建敏, 研究员, E-mail: ladderup@126.com

收稿日期: 2014-11-06, 收修改稿日期: 2014-12-25

运用单因子污染指数法(single factor index, SFI)、Hakanson 潜在生态风险指数法(potential ecological risk index, PERI)和沉积物质量基准法(sediment quality guidelines, SQG)3种方法研究了山东近岸海域表层沉积物7种重金属的污染特征和生态风险,对掌握山东近岸海域表层沉积物环境质量状况、指导沉积物重金属监测方案优化和指标筛选、保护及修复海洋生态环境具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位、样品采集和分析方法

在山东近海布设38个监测站位(图1),其中,渤海的监测站位18个,黄海的监测站位20个。于2012

年和2013年的8月各开展现场调查一次,获取表层沉积物样品,调查工作由山东省海洋资源与环境研究院等7家监测机构承担。样品采集使用QNC6型抓斗式采泥器(取样面积150 mm×150 mm),用塑料勺取采泥器上部0cm—1cm的沉积物样品。样品采集和贮存和运输按照《海洋监测规范》第3部分:样品采集、贮存和运输(国家质量监督检验检疫总局等,2008)的方法进行。

沉积物分析样品的制备、消化按《海洋监测规范》第5部分:沉积物分析(国家质量监督检验检疫总局等,2008)的方法进行。样品中的Zn、Cr、Cu、Cd和Pb含量用原子吸收分光光度法测定,Hg和As含量用原子荧光法测定。

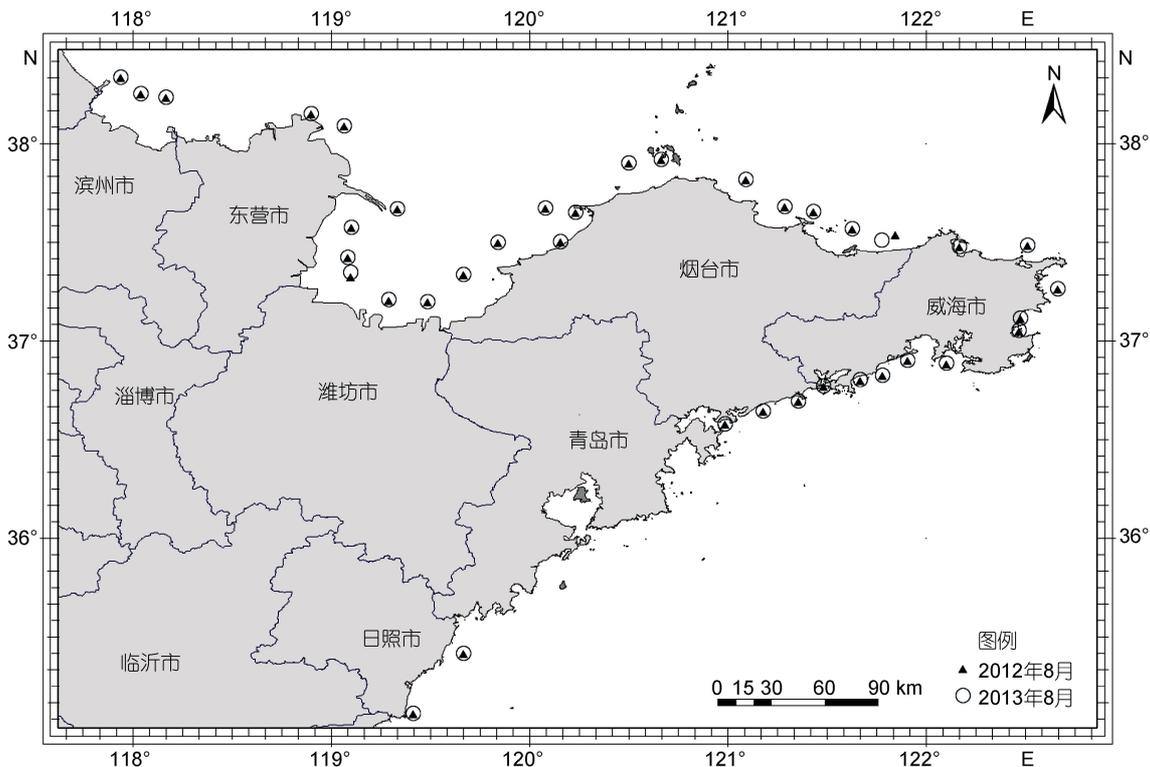


图1 山东省近岸海域表层沉积物监测站位图

Fig.1 Deployment of stations for monitoring pollution in surface sediments in Shandong coastal areas

### 1.2 数据分析和评价方法

本文选取Zn、Cr、Hg、Cu、Cd、Pb和As7种重金属指标进行分析和评价,采用目前常用的单因子污染指数评价法、Hakanson 潜在生态风险指数法和沉积物质量基准法,并利用数理统计软件对重金属含量年度间均值的差异进行 $t$ 检验,对山东近岸海域表层沉积物重金属进行了综合研究与评价。

#### 1.2.1 单因子污染指数法(SFI) 单因子污染指数

法(中华人民共和国环境保护部,2009)是将某种污染物实测浓度与该种污染物的评价标准进行比较以确定其类别的方法。其计算公式为:

$$PI_i = \frac{C_i}{S_{0i}} \quad (1)$$

式中:  $PI_i$  为某监测站位污染物  $i$  的污染指数;  $C_i$  为某监测站位污染物  $i$  的实测浓度;  $S_{0i}$  为污染物  $i$  的评价标准。

评价标准采用《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002)的第一类沉积物质量标准。

**1.2.2 潜在生态风险指数法(PERI)** 潜在生态风险指数法由 Hakanson (1980)提出, 不仅反映了某一特定环境下沉积物中各种污染物对环境的影响, 以及环境中多种污染物的综合效应, 而且用定量方法划分了潜在生态风险程度(刘成等, 2002), 是沉积物质量评价中应用最为广泛的方法之一(马德毅等, 2003)。其潜在风险指数计算公式为:

$$RI = \sum Er^i \quad (2)$$

$$Er^i = Tr^i \times C_f^i = Tr^i \times C^i / C_n^i \quad (3)$$

式中, RI 为沉积物综合潜在生态风险指数;  $Er^i$  为沉积物单个污染物的潜在生态风险参数;  $Tr^i$  为某一污染物的生物毒性响应参数, 代表不同污染物的毒性水平和生物对不同污染物的敏感程度, 揭示单个污染

物对人体和水生态系统的危害, Hakanson 给出的 PCB、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的毒性响应参数分别为 40、40、30、10、5、5、2 和 1;  $C_f^i$  为某一污染物的污染指数;  $C^i$  为某一污染物含量的实测值;  $C_n^i$  为全球工业化前沉积物中污染物含量, PCB、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 含量分别取 0.01、0.25、1.0、15、50、70、90 和 175 mg/kg。

Hakanson 给出了不同的  $Er^i$  值范围相对应的单个污染物潜在生态风险和不同 RI 值范围相对应的综合潜在生态风险(表 1)。该方法原包括 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 和 PCB 共 8 种污染物, 因本文调查数据未包含 PCB, 故依据刘文新等(1999)、马德毅等(2003)、刘志杰等(2012)对综合潜在生态风险指数的调整方法和各污染因子所占权重值, 对 RI 值进行了调整, 调整值和所对应的等级见表 1。单个污染物潜在风险参数仍采用 Hakanson 给出  $Er^i$  值。

表 1 潜在生态风险分级标准  
Tab.1 Different classification schemes of potential ecological risk

Hakanson 单个污染物潜在生态风险参数 $Er^i$	风险参数 $Er^i$ 程度分级	Hakanson 综合潜在生态风险指数 RI	调整后的综合潜在生态风险指数 RI	风险指数 RI 程度分级
$Er^i < 40$	低潜在生态风险	$RI < 150$	$RI < 105$	低生态风险
$40 \leq Er^i < 80$	中潜在生态风险	$150 \leq RI < 300$	$105 \leq RI < 210$	中生态风险
$80 \leq Er^i < 160$	较高潜在生态风险	$300 \leq RI < 600$	$210 \leq RI < 420$	较高生态风险
$160 \leq Er^i < 320$	高潜在生态风险	$RI \geq 600$	$RI \geq 420$	很高生态风险
$Er^i \geq 320$	很高潜在生态风险			

**1.2.3 沉积物质量基准法(SQG)** 目前, 国际上沉积物质量基准建立方法中流行的主要有基于经验的生物效应数据库法(响应型 SQG)和基于理论的数值型 SQG(高博等, 2013), 其中生物效应数据库法是当前国际上最为广泛接受的制定水体沉积物质量基准的方法(王立新等, 2001)。基于生物效应数据库建立响应型水体沉积物质量基准的方法由 Long 和 Morgan(1990)首次提出。美国、荷兰、加拿大和中国香港地区等国家和地区已利用生物效应数据库法建立了适用于本国或本地区的沉积物质量基准(高博等, 2013), 我国内地的一些学者也在这方面开展了相关研究, 王立新等(2004)、王菊英(2004)各提出了某一区域中沉积物重金属的质量基准值。

在淡水和海洋生态系统中, 大量的沉积物质量基准已用于解释沉积物化学数据和评价沉积物质量(范文宏等, 2006)。应用生物效应数据库法建立水体沉积物质量基准(即确定产生效应的临界浓度 TEL 和

必然产生效应的浓度 PEL)对沉积物污染状况进行评价的判定方法为: 当沉积物中某一污染物浓度低于其 TEL 值时, 意味着负面生物效应几乎不会发生; 高于其 PEL 时, 意味着负面生物效应经常发生; 如介于两者之间, 则意味着负面生物效应会偶尔发生(王立新等, 2004)。本文分别依据美国佛罗里达(MacDonald *et al.*, 1996)、加拿大(Smith, 1996)和王菊英(2004)这三种沉积物质量基准(分别表示为 SQG1、SQG2、SQG3, 基准值见表 2)对 7 种重金属进行评价。

**1.2.4  $t$  检验** 利用数理统计软件 SPSS20.0 的配对样本  $t$  检验方法对各重金属含量年度之间的均值差异进行显著检验,  $P < 0.05$  表示差异显著(张文彤等, 2011)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物重金属含量特征分析和评价

依据自然地理特征, 山东近岸海域可分为山东

表 2 重金属的沉积物质量基准值(mg/kg)  
Tab.2 The guideline values of sediment quality in the concentrations of heavy metals (mg/kg)

重金属质量基准	基准值	Zn	Cr	Hg	Cu	Cd	Pb	As
美国佛罗里达 <sup>[1]</sup> (SQG1)	TEL	124.00	52.30	0.13	18.70	0.68	30.20	7.24
	PEL	271.00	160.00	0.70	108.00	4.21	112.00	41.60
加拿大 <sup>[2]</sup> (SQG2)	TEL	124.00	52.00	0.13	19.00	0.70	30.00	7.20
	PEL	271.00	160.00	0.70	108.00	4.20	112.00	42.00
王菊英 <sup>[3]</sup> (SQG3)	TEL	187.70	47.80	1.67	35.90	3.31	51.30	20.40
	PEL	391.60	128.60	6.39	85.30	8.55	127.03	65.14

注: [1]引自 MacDonald *et al.*, 1996; [2]引自 Smith, 1996; [3]引自王菊英, 2004

近岸海域(渤海部分)和山东近岸海域(黄海部分)。2012年和2013年山东近岸海域渤海部分和黄海部分表层沉积物重金属含量的监测值范围、均值、标准差、中位数和变异系数、单因子评价和配对 *t* 检验 *P* 值等的统计结果见表 3。从表 3 统计结果和各重金属含量的空间分布分析可知:

(1) 单因子污染指数评价结果表明, 2012 年和 2013 年山东近岸海域表层沉积物重金属含量符合第一类海洋沉积物质量标准站次比例均在 94%以上, 沉积物质量良好。其中, 山东近岸海域(渤海部分)两个年度的达标率均为 100%, 山东近岸海域(黄海部分)两个年度的达标率分别为 95%和 90%, 分别为 2012 年 1 个站位的 Cu 含量和 2013 年 2 个站位的 Hg 含量超过第一类标准值。Cu 含量超标区域位于山东海阳近岸海域, 邻近入海河口, 可能与陆源排污有关; Hg 含量超标区域位于山东烟台北部海域, 邻近港口航道区, 可能与船舶排污有关。

(2) 重金属含量分布和离散程度反映了自然和人为因素的影响差异(Celo *et al.*, 1999)。2012 年和 2013 年重金属含量的均值和中位数对比结果显示, 山东近岸海域(渤海部分)2013 年 As 和 Pb 的均值和中位数之间的差值百分比比较大, 统计分布为右偏, 其它指标差值均较小, 表明 As 和 Pb 存在高值区; 山东近岸海域(黄海部分)2012 年的 Hg、Cu 和 Cd 及 2013 年的 Hg 的均值和中位数之间的差值百分比比较大, 统计分布为右偏, 其它指标差值均较小, 其中 Hg 的差值百分比最大, 表明 Hg 空间分布上存在高浓度区、Cu 和 Cd 也存在一些高值区。山东近岸海域(渤海部分)和山东近岸海域(黄海部分)Hg 的变异系数最大, 其它 6 种重金属指标变异系数较小, 表明 Hg 含量空间分布不均匀、离散性较大, 可能较多地受人为扰动或外来因素影响。

(3) 2012 年和 2013 年重金属含量的年度差异配

对 *t* 检验结果表明, 山东近岸海域(渤海部分)Zn、Cr、Hg、Cu 和 As 的 *P* > 0.05, 表明这 4 个指标的含量两年度间不存在显著性差异, Cd 和 Pb 的 *P* < 0.05, 表明 Cd 和 Pb 的含量两年度间存在显著性差异, Cd 和 Pb 均值 2013 年较 2012 年有所增加, Cd 含量增高区域主要位于莱州湾南部、东部海域和蓬莱北部海域, Pb 含量增高区域主要位于莱州湾南部、东部海域和蓬莱及滨州北部海域, 可能与入海河流输入的泥沙和重金属致使沉积速率高值区主要分布在沿岸河口地区(胡邦琦等, 2011)有关; 山东近岸海域(黄海部分)Zn、Cr、Hg、Cu、Cd 和 Pb 的 *P* > 0.05, 表明这 6 个指标的含量两年度间不存在显著性差异, As 的 *P* < 0.05, 表明 As 的含量两年度间存在显著性差异, As 含量的均值增加, 含量增高区域主要位于烟台北部海域、威海东部海域和海阳南部海域, 可能与邻近港口航道区(船舶排污)或入海河流输入有关。

(4) 通过与历史数据(中国海湾志编纂委员会, 1991, 1993; 山东省海洋与渔业厅, 2001)对比分析发现, 2012 年和 2013 年山东近岸海域 Zn、Cu、Cd 和 Pb 的监测值其平均值均在 20 世纪 80 年代的平均值范围内, 并处于低值区间; 与 1998 年相比, 2013 年 As 含量的平均值减少了 34.6%, Cd、Hg 和 Pb 的含量平均值分别增加了 65.8%、37.5%和 20.2%。

## 2.2 重金属潜在生态风险评价

2012 年和 2013 年的重金属潜在生态风险评价结果见表 4。从中可以看出, 除山东近岸海域部分站位的表层沉积物重金属 Hg 和 As 含量超过 Hakanson (1980)提出的全球工业化前沉积物中相应污染物的背景值外, 其余均低于该背景值; *Er<sup>i</sup>* 除 Hg(2013 年最大值为 41.76 > 40, 为中潜在生态风险; 2012 年最大值为 27.52, 为低潜在生态风险)外, 其它均低于 14(远低于 40), 为低潜在生态风险。因此, Hg 为山东近岸海域重金属主要污染因子, 需要加以关注; 按照 *Er<sup>i</sup>* 排序,

表 3 山东近岸海域表层沉积物的重金属含量统计结果  
Tab.3 The statistics of heavy metals in surface sediments from Shandong coastal areas

统计量		Zn	Cr	Hg	Cu	Cd	Pb	As
2012 年	监测值范围( $10^{-6}$ )	27.0-92.7	1.0-50.2	0.004-0.160	4.1-25.8	0.014-0.338	0.5-42.1	3.57-19.72
	均值( $10^{-6}$ )	56.1	30.2	0.048	12.2	0.177	17.6	8.44
	中位数( $10^{-6}$ )	49.9	34.1	0.042	12.4	0.179	19.1	8.36
	标准差( $10^{-6}$ )	22.3	14.8	0.048	5.4	0.085	10.9	3.67
	变异系数(%)	40	49	100	45	48	62	43
	超标率(%)	0	0	0	0	0	0	0
渤海	监测值范围( $10^{-6}$ )	31.0-117.5	1.6-45.3	0.005-0.095	4.7-26.4	0.063-0.388	6.2-54.3	0.50-17.70
	均值( $10^{-6}$ )	65.3	31.1	0.040	13.2	0.209	25.1	7.15
	中位数( $10^{-6}$ )	68.7	33.5	0.043	13.7	0.195	20.9	5.59
	标准差( $10^{-6}$ )	23.4	12.2	0.027	5.9	0.086	14.0	5.31
	变异系数(%)	36	39	67	45	41	56	74
	超标率(%)	0	0	0	0	0	0	0
配对 <i>t</i> 检验 <i>P</i> 值		0.083	0.803	0.522	0.300	0.037	0.033	0.401
2012 年	监测值范围( $10^{-6}$ )	11.6-63.7	6.6-51.3	0.012-0.172	5.2-36.5	0.060-0.367	6.0-27.4	2.07-10.34
	均值( $10^{-6}$ )	35.3	26.2	0.059	13.2	0.175	15.0	6.35
	中位数( $10^{-6}$ )	33.6	27.9	0.035	11.4	0.142	12.5	7.25
	标准差( $10^{-6}$ )	16.2	13.8	0.048	7.0	0.089	6.2	2.21
	变异系数(%)	46	53	82	53	51	41	35
	超标率(%)	0	0	0	5	0	0	0
黄海	监测值范围( $10^{-6}$ )	12.9-58.7	15.8-47.4	0.019-0.261	6.4-28.8	0.018-0.440	6.4-28.8	2.94-10.50
	均值( $10^{-6}$ )	37.4	30.4	0.079	12.2	0.190	16.8	7.35
	中位数( $10^{-6}$ )	39.2	28.2	0.036	10.6	0.172	16.8	8.16
	标准差( $10^{-6}$ )	13.8	9.0	0.070	5.9	0.101	7.0	2.40
	变异系数(%)	37	29	90	48	53	42	33
	超标率(%)	0	0	10	0	0	0	0
配对 <i>t</i> 检验 <i>P</i> 值		0.344	0.154	0.135	0.095	0.246	0.175	0.024
20 世纪 80 年代 <sup>[1-2]</sup>	监测值范围( $10^{-6}$ )	10.00-203.00	—	—	2.55-44.0	0.048-0.400	0.96-95.00	—
	平均值范围( $10^{-6}$ )	42.54-93.00	—	—	12.36-24.0	0.099-0.400	1.74-46.00	—
1998 年 9 月 <sup>[3]</sup>	监测值范围( $10^{-6}$ )	—	—	0.0025-0.4700	—	0.0023-0.4300	5.32-44.10	2.30-40.10
	平均值( $10^{-6}$ )	—	—	0.0440	—	0.1200	17.30	11.10
第一类沉积物标准值 <sup>[4]</sup> ( $10^{-6}$ )		150.0	80.0	0.20	35.0	0.50	60.0	20.0

注: “—”表示无数据。[1] 引自中国海湾志编纂委员会, 1991; [2] 引自中国海湾志编纂委员会, 1993; [3]引自山东省海洋与渔业厅, 2001; [4] 引自中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002

表 4 山东近岸海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价结果

Tab.4 The assessment results of potential ecological risk of heavy metal pollution in surface sediments from Shandong coastal areas

时间	统计量	Er(Zn)	Er(Cr)	Er(Hg)	Er(Cu)	Er(Cd)	Er(Pb)	Er(As)	RI
2012 年	最小值	0.07	0.02	0.63	0.41	0.42	0.04	1.38	11.17
	最大值	0.53	1.14	27.52	3.65	11.01	3.01	13.15	43.74
	均值	0.26	0.62	8.62	1.27	5.27	1.16	4.90	22.12
	标准差	0.12	0.32	7.66	0.63	2.57	0.62	2.09	8.41
2013 年	最小值	0.07	0.03	0.75	0.47	0.53	0.44	0.33	11.70
	最大值	0.67	1.05	41.76	2.88	13.20	3.88	11.80	61.87
	均值	0.29	0.68	9.67	1.27	5.96	1.48	4.84	24.20
	标准差	0.13	0.23	9.12	0.58	2.80	0.82	2.66	11.51

各重金属元素潜在风险 2012 年由高到低依次为 Hg>As>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn, 2013 年依次为 Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn。2012 年与 2013 年相比, 除 As、Cd 的排序不同外, 其它元素的排列顺序一致, 这主要是由 2013 年监测的砷含量均值降低所致; 根据本文调整后的综合潜在生态风险指数, RI 统计结果最大值为 61.87, 远低于标准值 105, 为低生态风险, 这主

要因为除部分站位的 Hg 和 As 含量较背景值偏高外, 其它重金属的含量明显低于背景值或与背景值基本持平。

### 2.3 沉积物质量基准法评价分析

依据 SQG1、SQG2 和 SQG3 三种沉积物质量基准值对山东近岸海域表层沉积物重金属含量进行评价, 结果见表 5。由表 5 可知:

表 5 重金属含量在不同生物效应浓度范围内样品数占总样品数的比重(%)  
Tab.5 The proportion of samples in different biological effect ranges of the total number of samples (%)

重金属	范围	2012 年			2013 年		
		SQG1	SQG2	SQG3	SQG1	SQG2	SQG3
Zn	< TEL	100	100	100	100	100	100
	TEL—PEL	0	0	0	0	0	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0
Cr	< TEL	100	100	92.1	100	100	100
	TEL—PEL	0	0	7.9	0	0	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0
Hg	< TEL	89.5	89.5	100	89.5	89.5	100
	TEL—PEL	10.5	10.5	0	10.5	10.5	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0
Cu	< TEL	86.8	86.8	97.4	86.8	86.8	100
	TEL—PEL	13.2	13.2	2.6	13.2	13.2	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0
Cd	< TEL	100	100	100	100	100	100
	TEL—PEL	0	0	0	0	0	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0
Pb	< TEL	94.7	94.7	100	89.5	89.5	94.7
	TEL—PEL	5.3	5.3	0	10.5	10.5	5.3
	> PEL	0	0	0	0	0	0
As	< TEL	42.1	39.5	100	50	50	100
	TEL—PEL	57.9	60.5	0	50	50	0
	> PEL	0	0	0	0	0	0

(1) Zn、Cr、Hg、Cu、Cd、Pb 和 As 7 种重金属的含量均未出现高于三种基准的 PEL 的站位, 意味着不会出现负面生物效应经常发生的情况。

(2) Zn 和 Cd 两种重金属的含量均低于三种基准的 TEL, 意味着负面生物效应几乎不会发生。

(3) 在 SQG1 和 SQG2 两种基准值下, Cr 的含量均低于基准的 TEL, 意味着负面生物效应几乎不会发生; Hg、Cu 和 Pb 三种重金属的含量有部分站位(比例均低于 14%)介于 TEL—PEL, 意味着负面生物效应偶尔发生; As 的含量有 50%—60.5%的站位介于 TEL—PEL, 意味着负面生物效应偶尔发生, 理论上 As 达到了能对底质环境和底栖生物群落产生较大生

态影响的水平(刘金虎, 2013)。因此应关注 As 相对高值区的负面生物效应。

(4) 在 SQG3 基准值下, Hg 和 As 这两种重金属的含量均低于基准的 TEL, 负面生物效应几乎不会发生; Cu、Cr 和 Pb 三种重金属的含量有部分站位(站位比例均低于 8%)介于 TEL—PEL, 意味着负面生物效应偶尔发生。

由于选用的沉积物质量 PEL 和 TEL 基准值不同, 计算结果存在一定的差异。SQG1、SQG2 和 SQG3 基准值的差异主要由特定区域沉积物污染程度的差异、影响沉积物中污染物生物可获得性和毒性因素的复杂性、生物毒性实验中所选择的底栖生物对污染物

的毒理学敏感性的差异及用于建立沉积物质量基准的方法本身的不确定性造成(王菊英, 2004)。通过采用不同基准值评价沉积物各重金属含量所处的水平, 以此评估沉积物的质量、指导沉积物监测指标的选取。

### 3 结论

单因子污染指数法简便易行、并可根据相应的质量标准进行评价分类, 但其过分强调个别受污染较重因子的影响; 重金属潜在生态风险指数法考虑了不同污染物的毒性水平和生物对不同污染物的敏感程度, 评价结果更趋向客观, 但其各污染物的毒性响应参数和污染物的背景值都是基于实验室计算获得的结果; 沉积物质量基准法是基于生物效应数据库建立的, 计算结果科学客观, 但一个区域的 TEL 和 PEL 的获得需要大量的监测数据计算才能获得。本文所列的三种沉积物质量评价方法都有各自的局限性, 采用单一方法不可能得到全面的结果, 因此只有将三种方法综合运用, 才能更准确反映沉积物的污染状况, 为掌握沉积物的污染物特征、控制主要污染因子和修复生态环境提供有力的理论依据。

(1) 单因子污染指数评价结果表明: 山东近岸海域 94%以上站位的表层沉积物重金属含量符合第一类海洋沉积物质量标准, 个别站位的 Cu(2012 年)或 Hg(2013 年)超过第一类标准, 重金属环境质量良好。Hg 含量存在高值区, 且空间分布不均匀、离散性较大, 可能较多地受到人为扰动或外来因素的影响。重金属的含量 2013 年与 2012 年相比, 山东近岸海域(渤海部分)部分海域的 Cd 和 Pb 含量增高、山东近岸海域(黄海部分)部分海域的 As 含量增高, 应关注 Cd、Pb 和 As 的含量增高区域。

(2) 重金属潜在生态风险评价结果表明: 山东近岸海域表层沉积物的重金属综合潜在生态风险程度低。各重金属潜在生态风险由高到低为  $Hg>As>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn$ (2012 年)和  $Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn$ (2013 年); Hg 在个别站位达中潜在生态风险程度, 为山东近岸海域重金属主要污染因子。因此需要关注 Hg 高值区的潜在生态风险。

(3) 沉积物质量基准法评价结果表明: 2012 年和 2013 年所有监测站位的 Zn、Cr、Hg、Cu、Cd、Pb 和 As 7 种重金属均未高于三种基准的 PEL, 不会出现负面生物效应经常发生的情况。有 50%以上站位 As 的含量介于美国佛罗里达州和加拿大沉积物质量基准的 TEL—PEL 之间, 负面生物效应偶尔发生。因

此应关注 As 相对高值区的负面生物效应。

综上所述, 应加强对山东近岸海域表层沉积物中 Hg 和 As 监测, 重点关注 Hg 和 As 相对高值区的潜在生态风险和负面生物效应, 查清其主要来源, 加以有效管理和控制。

### 参 考 文 献

- 山东省海洋与渔业厅, 2001. 山东省海洋环境现状及污染对策. 济南: 山东省海洋与渔业厅, 118
- 马德毅, 王菊英, 2003. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价. 中国环境科学, 23(5): 521—525
- 王立新, 陈静生, 刘华民, 2004. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究——以渤海锦州湾海洋沉积物为例. 内蒙古大学学报(自然科学版), 35(4): 467—472
- 王立新, 陈静生, 洪松等, 2001. 水体沉积物重金属质量基准研究新进展——生物效应数据库法. 环境科学与技术, 24(2): 4—8
- 王菊英, 2004. 海洋沉积物的环境质量评价研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 3—126
- 中国海湾志编纂委员会, 1991. 中国海湾志(第三分册). 北京: 海洋出版社, 58—457
- 中国海湾志编纂委员会, 1993. 中国海湾志(第四分册). 北京: 海洋出版社, 24—95
- 刘文新, 梁兆坤, 汤鸿霄, 1999. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价. 生态学报, 19(2): 206—211
- 刘成, 王兆印, 何耘等, 2002. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价. 环境科学研究, 15(5): 33—37
- 刘志杰, 李培英, 张晓龙等, 2012. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价. 环境科学, 33(4): 1182—1188
- 刘金虎, 2013. 莱州湾多相介质重金属污染特征及其在食物链(网)的传递与生物放大作用. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 50
- 吴光红, 朱兆洲, 刘二保等, 2008. 天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征. 环境科学, 29(2): 413—420
- 张乃星, 曹丛华, 任荣珠等, 2011. 胶州湾外海洋倾倒区表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险. 环境科学, 32(5): 1315—1320
- 张文彤, 邱春伟, 2011. SPSS 统计分析基础教程(第 2 版). 北京: 高等教育出版社, 251—261
- 中华人民共和国环境保护部, 2009. 近岸海域环境监测规范 HJ 442—2008. 北京: 中国环境科学出版社, 1—64
- 范文宏, 张博, 陈静生等, 2006. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价. 环境科学学报, 26(6): 1000—1005
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002. GB 18668-2002 海洋沉积物质量. 北京: 中国标准出版社, 1—2

- 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008. GB 17378.3-2007 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输. 北京: 中国标准出版社, 1—13
- 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008. GB 17378.5-2007 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析. 北京: 中国标准出版社, 1—95
- 胡邦琦, 李国刚, 李 军等, 2011. 黄海、渤海铅-210 沉积速率的分布特征及其影响因素. 海洋学报(中文版), 33(6): 125—133
- 侯英民, 2010. 山东海情. 北京: 海洋出版社, 1
- 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉等, 2007. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价. 海洋科学, 31(12): 28—33
- 秦延文, 郑丙辉, 李小宝等, 2012. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响. 环境科学, 33(7): 2359—2367
- 高 博, 李 强, 周怀东等, 2013. 水体沉积物重金属质量基准研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 11(2): 99—106
- Armitage P D, Pardo I, Furse M T *et al*, 1990. Assessment and prediction of biological quality. A demonstration of a British macroinvertebrate-based method in two Spanish rivers. *Limnetica*, 6: 147—156
- Campanella L, D'Orazio D, Petronio B M *et al*, 1995. Proposal for a metal speciation study in sediments. *Analytica Chimica Acta*, 309(1—3): 387—393
- Celo V, Babi D, Baraj B *et al*, 1999. An assessment of heavy metal pollution in the sediments along the Albanian coast. *Water Air & Soil Pollution*, 111(1—4): 235—250
- Hakanson L, 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach. *Water Research*, 14(8): 975—1001
- Long E R, Morgan L G, 1990. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. Seattle: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1—167
- MacDonald D D, Carr R S, Calder F D *et al*, 1996. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5(4): 253—278
- Pan K, Wang W X, 2012. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China. *Science of the Total Environment*, 421—422: 3—16
- Smith S L, 1996. The development and implementation of Canadian sediment quality guidelines. Netherlands: Development and progress in sediment quality assessment: rational, challenge, techniques & strategies. SPB Academic Publishing, Amsterdam, 233—249

## CONTAMINANT CHARACTERISTICS AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT ON POLLUTION BY SEVEN HEAVY METALS IN SURFACE SEDIMENTS IN SHANDONG COASTAL AREAS

XU Yan-Dong<sup>1,2</sup>, WEI Xiao<sup>1</sup>, YANG Jian-Min<sup>1</sup>, TANG Hai-Tian<sup>3</sup>, WU Xing-Wei<sup>1</sup>, MA Jian-Xin<sup>1</sup>

(1. *Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Yantai*, 264006; 2. *College of Environment Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao*, 266100; 3. *Yantai Marine Environment Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Yantai* 264006, China)

**Abstract** With field observation data of heavy metal pollution in surface sediments in Shandong coastal areas in 2012 and 2013, we assessed the ecological risk in these areas by adopting three different indices, i.e., single factor index (SFI), Hakanson's potential ecological risk index (PERI), and sediment quality guidelines (SQG). The results show that among 38 monitoring stations, 94% of them were in rather good status whose heavy metal contents in surface sediments comply with the national first-class benchmark in marine sediment quality. The heavy metals were at the low level of comprehensive potential ecological risk, in descending order of Hg>As>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn (in 2012) and Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn (in 2013). Mercury was determined as the principal pollution factor, as its potential ecological risk was moderate in few stations; arsenic contents were between the TEL (threshold effect level) and PEL (probable effect level) in American (Florida) and Canadian guidelines in over half of the stations, showing occasional adverse biological effects. Therefore, close watchout and stringent control shall be taken to prevent mercury and arsenic pollutions, and special attentions shall be paid to potential ecological risk and adverse biological effects in the coastal areas to lower relatively high values.

**Key words** heavy metals; sediments; ecological risk assessment; Shandong coastal areas