

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811016



# 厦门西港近岸海域柱状沉积物重金属 形态分布及生态风险评价

万瑞安<sup>1</sup>, 胡恭任<sup>1,2</sup>, 韩璐<sup>1</sup>, 崔建勇<sup>3</sup>, 于瑞莲<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

3. 核工业北京地质研究院 分析测试研究所, 北京 100029)

**摘要:** 研究厦门西港近岸海域柱状沉积物中, 12 种重金属元素 (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn) 的质量比及分布特征, 并采用改进的 BCR 四步提取法分析赋存形态, 使用地累积指数法和次生相与原生相比值法进行污染评价。结果表明: 除 Ba, Pb, Mn 外, 其余元素的平均质量比均高于厦门 A 层土壤元素的背景值; Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Fe, Mn 在 0~60 cm 深度的可提取态占比明显高于 60~120 cm; 综合两种评价方法, P107 柱状沉积物在整个沉积历史中受到除 Ba, Sr 外其余重金属不同程度的污染, 特别是自 20 世纪 90 年代开始污染程度加重, 与厦门的近代经济发展历史相对应。

**关键词:** 柱状沉积物; 重金属; 化学形态; 生态风险; 地累积指数; 次生相与原生相比值

**中图分类号:** X 55; X 820.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2019)04-0515-07

## Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Coastal Core Sediments From Xiamen Western Bay

WAN Rui'an<sup>1</sup>, HU Gongren<sup>1,2</sup>, HAN Lu<sup>1</sup>,  
CUI Jianyong<sup>3</sup>, YU Ruilian<sup>1</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. Analytical Laboratory, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The content and distribution of heavy metals (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn) in the coastal core sediments from Xiamen Western Bay were studied. The chemical speciation distribution of heavy metals was evaluated by the modified BCR sequential extraction procedure. The pollution degree of heavy metals was assessed by the geo-accumulation index and secondary phase ratio to primary phase. The results show that among the 12 heavy metals, except for Ba, Pb and Mn, the average contents of other heavy metals are higher than those in Xiamen A layer soil. Compared with the depth of 60-120 cm, the extractable fraction of Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Fe, Mn at 0-60 cm depth is obviously higher. In addition, the results of two assessment methods indicated that the P107 core sediment was polluted in different degrees by most heavy metals

**收稿日期:** 2018-11-08

**通信作者:** 于瑞莲(1970-), 女, 教授, 博士, 主要从事环境地球化学的研究. E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(21777049, 21077036); 环境地球化学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLEG2016801); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17013087058)

except for Ba and Sr. Especially since the 1990s, heavy metal pollution has become serious, which is corresponding to the modern development history of Xiamen.

**Keywords:** core sediment; heavy metal; chemical speciation; ecological risk; geo-accumulation index; secondary phase to primary phase ratio

重金属污染物具有较强的生物毒性和危害持久性,且能够通过食物链的富集放大效应富集于鱼类等高营养阶生物体内,并最终威胁人类的健康,因而倍受关注<sup>[1]</sup>.作为水体重金属污染物重要的源和汇,沉积物对水体重金属污染具有指示作用<sup>[2]</sup>,而柱状沉积物中,重金属含量及赋存形态的垂向分布特征既能提供重金属沉积与转化的历史信息,又能显示不同时期受人为和自然影响的程度<sup>[3-4]</sup>.厦门西港是一个近南北走向的哑铃状半封闭型内湾,作为重要的港口区和航道区,近些年来,西港受到船舶业、工业和生活废水污染的困扰,加之水动力条件差,使西港沉积物中污染物含量较高<sup>[5-6]</sup>.诸多学者对厦门西港沉积物中重金属含量及形态分布进行了研究<sup>[7-11]</sup>,但多集中于表层沉积物.本文通过测定厦门西港柱状沉积物不同深度共 8 个样品中的重金属总量和形态含量,对其进行生态风险评价,结合不同深度对应的沉积年代,分析重金属污染状况.

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

样品采集于 2011 年 4 月,根据《海洋监测规范》,在调查厦门西港近岸海域地质和环境状况的基础上,选择沉积环境较稳定的泥质或粉砂质淤泥沉积物地段,借助地质勘查钻机采集了一根有代表性的沉积柱,柱深 120 cm.使用聚乙烯刀进行切割分层,0~60 cm 以 12 cm 分层,60~120 cm 以 20 cm 分层,共分为 8 个样品,将分层后的柱状样装入干净的自封袋中密封保存.采样点所在经、纬度为 118°2'8"E, 24°28'0.1"N.预处理前,将样品放置于-20℃冷冻保存,使用冷冻干燥机去除样品中的水分,剔除杂质后,用玛瑙研钵进行研磨,过 63 μm 尼龙筛,筛下样装入自封袋中,置于阴凉干燥处保存待用.

1.2 样品分析

将过筛后的沉积物按水土比 2.5:1.0 混合搅拌 1 min,静置 30 min,用 pH 计测量沉积物样品的 pH 值.参考 Loring 等<sup>[12]</sup>提出的方法,对样品中的 CaCO<sub>3</sub> 质量分数进行测定.将样品置于马弗炉中,在温度 550℃下灼烧 5 h,测定烧失量(LOI).称取 0.100 g 样品于 Teflon 杯中,使用混酸消解体系(2 mL HCl+6 mL HNO<sub>3</sub>+2 mL HF)在电热板上进行消解,以提取重金属总量;使用改进的 BCR 多级连续提取法<sup>[13]</sup>提取样品中重金属的 4 种形态:弱酸溶态(F1,可交换态和碳酸盐结合态)、可还原态(F2,铁、锰氧化物结合态)、可氧化态(F3,有机物及硫化物结合态)和残渣态(F4,与矿物晶体强烈结合态);使用安捷伦 7700cx 型电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS)测定提取液中重金属的质量比.

1.3 生态风险评价方法

1.3.1 基于总量的生态风险评价方法 运用地累积指数法<sup>[14]</sup>对 P107 柱中重金属元素进行污染状况评价,计算式为

$$I_{geo} = \log_2[C_n / (k \cdot B_n)].$$
 (1)

式(1)中: $I_{geo}$ 为地累积指数; $C_n$ , $B_n$ 分别为沉积物中重金属元素  $n$  的实测质量比及地球化学背景值; $k$ 为各地岩石差异的修正系数(一般取值 1.5).采用厦门 A 层土壤背景值<sup>[15]</sup>作为  $B_n$ .依据  $I_{geo}$  数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为 0~6 级,如表 1 所示.

表 1 地累积指数与重金属污染程度的关系

Tab.1 Relation between geo-accumulation index and contamination degree of heavy metal

污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重	严重
级别	0	1	2	3	4	5	6
$I_{geo}$	$\leq 0$	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	$> 5$

1.3.2 基于形态的生态风险评价方法 采用能更有效评价重金属的迁移性和潜在生态风险的次生相与原生相比值( $R_{sp}$ )法<sup>[16]</sup>对 P107 柱状沉积物中的重金属进行污染评价,计算式为

$$R_{SP} = M_{sec}/M_{prim}.$$

(2)

式(2)中: $R_{SP}$ 为污染程度; $M_{sec}$ 为次生相中重金属的质量比(可提取态,即 BCR 前三态之和); $M_{prim}$ 为原生相中重金属的质量比(残渣态,BCR 第四态的质量比). 通过  $R_{SP}$  值将污染程度分为 4 个等级: $R_{SP}<1$ ,表明无污染; $1\leq R_{SP}<2$ ,表明轻度污染; $2\leq R_{SP}<3$ ,表明中度污染; $R_{SP}\geq 3$ ,表明重度污染.

1.4 数据处理方法

使用 Excel 2007 和 GraphPad Prism 7 软件对沉积物中重金属的质量比进行数据处理和作图,使用 SPSS 19.0 软件对数据进行分析.

2 结果与讨论

2.1 柱状沉积物主要理化参数的分布特征

使用李桂海<sup>[17]</sup>研究得出的厦门西港沉积物平均沉积速率( $4.0\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ),计算柱状沉积物不同深度所对应的年代. 厦门西港近岸海域柱状沉积物 P107 的主要理化参数,如表 2 所示. 表 2 中: $d$  为深度; $w_{\text{CaCO}_3}$  为  $\text{CaCO}_3$  的质量分数. 由表 2 可知:柱状沉积物中 pH 值的变化范围为 3.33~6.59,整体呈酸性, pH 值随深度的增加而增大,深度为 0~60 cm 时酸性较强,深度为 60~120 cm 时呈弱酸性. 沉积物  $\text{CaCO}_3$  质量分数随深度变化趋势与 pH 值基本相似,有研究表明,土壤中  $\text{CaCO}_3$  质量分数与 pH 值呈非线性正相关<sup>[18]</sup>,两者在深度 48~80 cm 时变化明显. P107 柱中,深度 0~60 cm 的有机质质量分数明显高于 60~120 cm. 深度 0~60 cm 的沉积物中, pH 值较低,说明近代以来该柱可能受人为源影响较大,表层至 60 cm 深度的有机负荷(12.58%~13.09%)较高,也进一步指明了该柱近代以来可能受到一定程度的外源输入. 何海星等<sup>[19]</sup>研究发现,2001—2011 年间,厦门西港沉积物中重金属的质量比有升高的趋势,这与文中的研究结果相符.

表 2 厦门西港近岸海域柱状沉积物 P107 的主要理化参数  
Tab. 2 Physical-chemical parameters of P107 coastal core sediments from Xiamen Western Bay

样品编号	年份	$d/\text{cm}$	pH 值	$w_{\text{CaCO}_3}/\%$	LOI/%
P107-1	2008—2011 年	0~12	3.36	0.18	12.97
P107-2	2005—2008 年	12~24	3.33	0.25	13.09
P107-3	2002—2005 年	24~36	3.37	0.60	12.84
P107-4	1999—2002 年	36~48	3.38	0.29	12.73
P107-5	1996—1999 年	48~60	3.40	0.46	12.58
P107-6	1991—1996 年	60~80	6.47	0.53	8.39
P107-7	1986—1991 年	80~100	6.51	0.57	8.86
P107-8	1981—1986 年	100~120	6.59	0.64	8.55

2.2 柱状沉积物中重金属质量比的分布特征

重金属元素的质量比随深度的变化,如图 1 所示. 图 1 中: $w$  为质量比;虚线表示厦门 A 层土壤各元素背景值. 由图 1 可知:V,Cr,Co,Ni,Cu,Zn,Sr,Cd,Ba,Pb,Fe,Mn 的平均质量比分别为厦门 A 层土壤元素背景值的 2.42,1.93,2.62,2.80,1.66,1.49,1.02,2.99,0.58,0.91,1.21,0.88 倍. 根据图 1 中各组数据计算可得,这 12 种重金属元素的变异程度为  $\text{Cd}(60.43\%)>\text{Cr}(57.00\%)>\text{Ni}(55.30\%)>\text{Ba}(49.83\%)>\text{Sr}(39.56\%)>\text{Co}(38.91\%)>\text{Cu}(38.52\%)>\text{V}(36.51\%)>\text{Fe}(27.00\%)>\text{Zn}(25.45\%)>\text{Mn}(18.00\%)>\text{Pb}(13.59\%)$ ,其中,Cd,Cr 和 Ni 变异系数较大且超过背景值较多,变异系数大,说明沉积物可能受到一定程度的重金属污染.

由图 1 还可知:Cr,Ni,Cu,Zn 的质量比随深度减小而增加,且在 80 cm(对应 1991 年)至表层的质量比高于背景值,100~48 cm(1986—1999 年)质量比上升显著,48 cm 至表层的质量比变化不大;V,Co,Fe 的变化趋势类似,除在深度 80 cm 左右质量比显著增加达到峰值外,其他深度的质量比在一定范围内波动,峰值段重金属质量比约为背景值的 2~4 倍;Cd 的质量比在 0~60 cm 段高于 60~120 cm 段,最大值在 48 cm 附近(1999 年左右),为背景值的 7 倍;Sr 的质量比最大值仅高出背景值的 0.6 倍,表明 Sr 受人为源影响小;Ba 的质量比虽然随深度变化,但未高出背景值;Pb 的质量比在 80~100 cm (1986—1991 年)略高于背景值,其余深度的质量比均低于背景值;Mn 的质量比随深度呈多峰锯齿状分

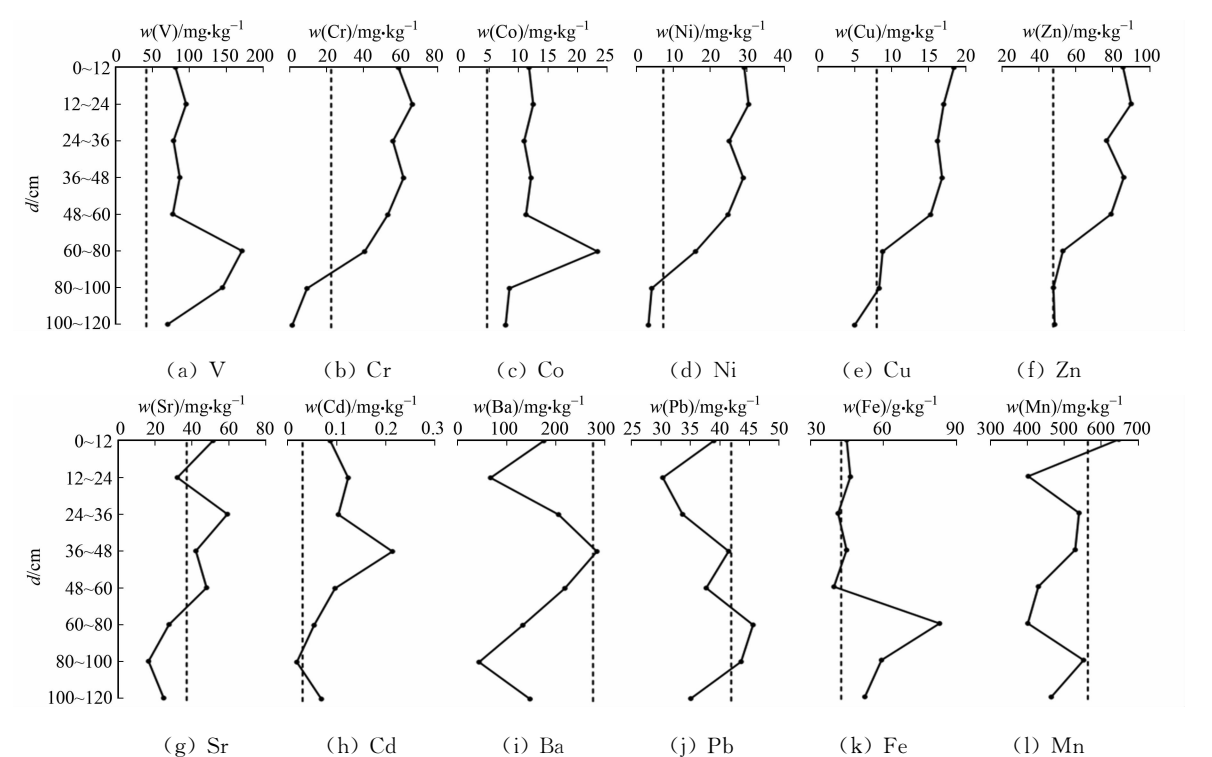


图 1 P107 柱状沉积物中重金属元素质量比垂向分布图

Fig. 1 Vertical distribution of heavy metals contents in P107 core sediments

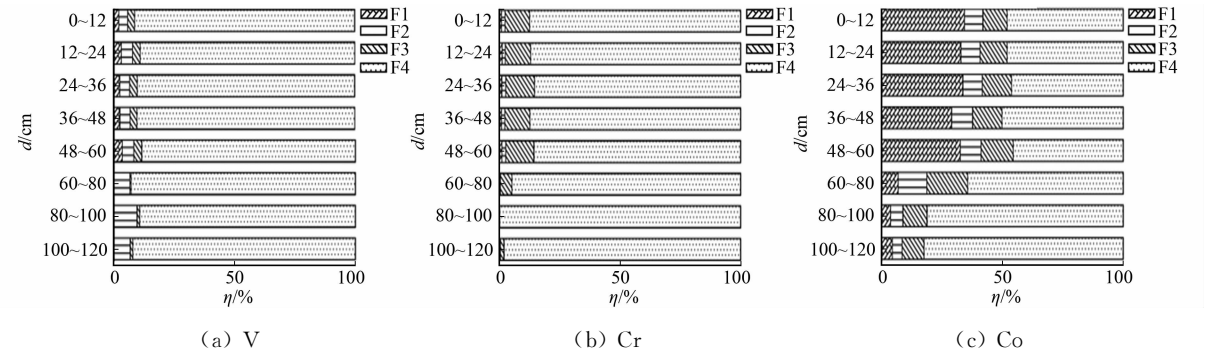
布,除表层质量比略高于背景值外,其余深度的质量比均低于背景值。

12 种重金属质量比的最低值多出现在柱底部附近,而在 20 世纪 90 年代初(深度为 80 cm 左右处)及 21 世纪初(深度为 40 cm 左右处)这两个时间节点附近,均出现重金属质量比明显升高,且有些重金属的质量比达到整个柱状样的峰值,说明受人为活动的影响较大。这是因为当时正处于中国经济快速发展的时期,厦门市也处于改革开放后快速发展的时期,港口的开放、工业的快速发展,加之当时环保监管不够严格,从而导致了重金属的污染。

2.3 柱状沉积物中重金属形态分布特征

重金属元素的总量并不能完全反映重金属的生物可利用性、可迁移性和毒性,而形态分析不仅可以了解重金属在沉积物中的赋存形态,还可以了解重金属受人为和自然来源的影响程度。厦门西港近岸海域柱状沉积物 P107 中,V,Cr,Co,Ni,Cu,Zn,Sr,Cd,Ba,Pb,Fe,Mn 的弱酸溶态(F1)、可还原态(F2)、可氧化态(F3)和残渣态(F4)所占的百分比,如图 2 所示。图 2 中: $\eta$  为各态所占的百分比。

由图 2 可知:Co,Ni,Zn,Cd 在 0~60 cm 的 F1 态比例较高,与节 2.2 总量分析结果相对应,以上元素在 20 世纪 90 年代以来受到了人为源的影响;Sr 在整根柱中的 F1 态比例也较高,且随深度增加而增大,但不能据此断定是否受 Sr 污染,因为 Sr 为生物成因元素,主要富集在含碳酸钙的生物碎屑介质中,以高比例存在于 F1 态中;Mn 在 0~60 cm 的 F1 态比例较高,但仅根据 F1 态比例无法断定其是否受人为源污染,因为海洋自生作用产生的 Mn 大部分也赋存在 F1 态中<sup>[20]</sup>,同时有研究表明,厦门港湾表层



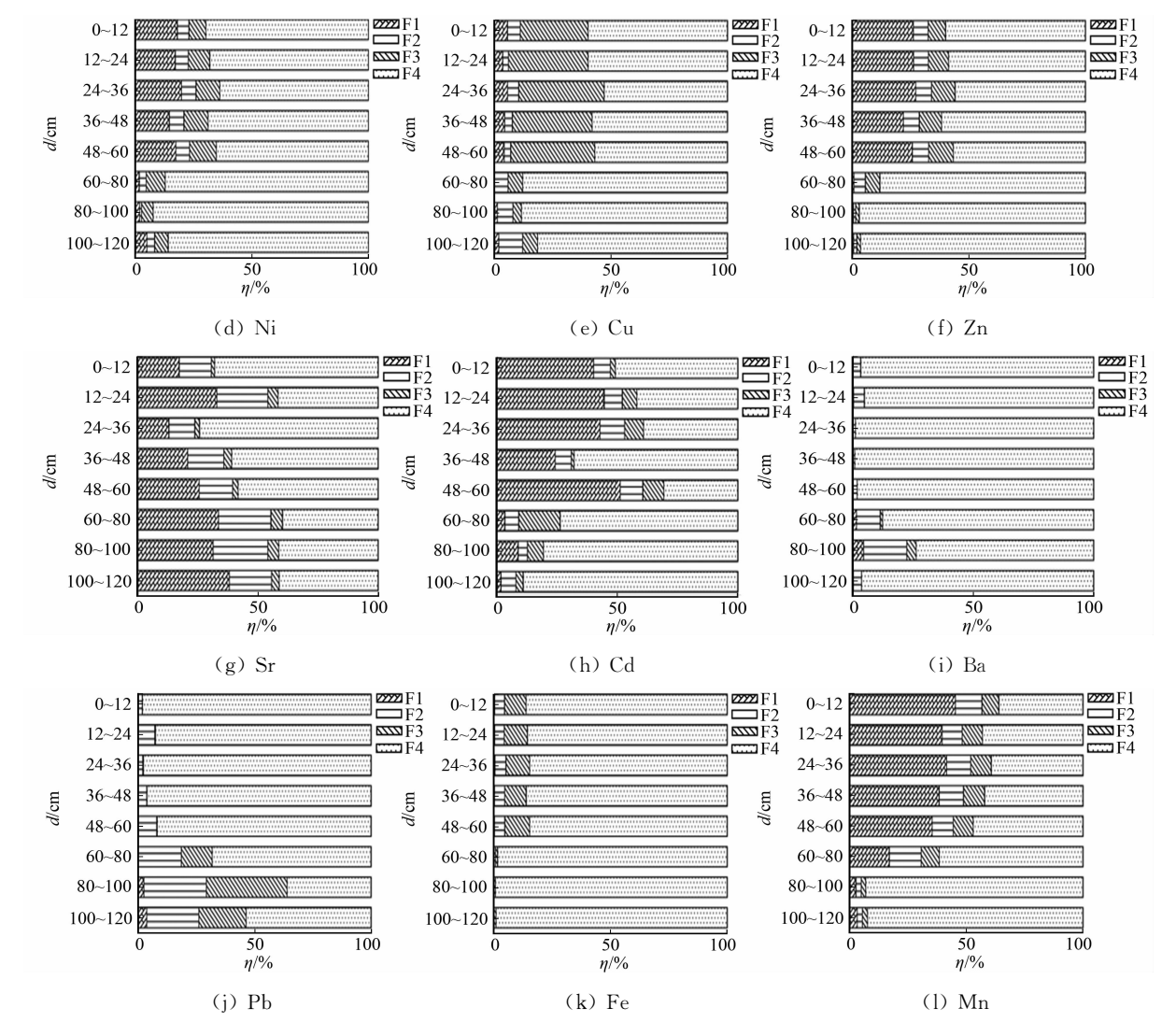


图 2 P107 柱状沉积物中重金属元素赋存形态垂向分布图

Fig. 2 Vertical distribution of heavy metal speciation in P107 core sediments

沉积物中,Mn 有近半存在于 F1 态<sup>[21]</sup>,这与文中研究结果相同,而 Mn 可提取态所占比例随深度增加而明显减小,表明 20 世纪 90 年代以来,Mn 受到一定程度人为源的影响;Pb 在 0~60 cm 以 F4 态占绝对优势,表明 20 世纪 90 年代以来的 Pb 污染并不严重,在 60 cm 以深尤其是 80~100 cm(1986~1991 年)的 F2,F3 态都占一定比例,有研究表明,人为源排放的 Pb 主要赋存在 F2 态中<sup>[22]</sup>;Cu 在 0~60 cm 的 F3 态在前三态中所占比例较高,韩璐等<sup>[23]</sup>发现,Cu 的赋存形态除以 F4 态为主外,在 F3 态中也有一定比例,并与 pH 值存在一定相关性. F4 态主要赋存于矿物晶格中,几乎不被生物利用,V,Cr,Ba,Fe 主要以 F4 态为主,可迁移性低且潜在生态风险相对较低,但 Cr,Fe 在 0~60 cm 的可提取态(F1,F2,F3 态之和)明显高于 60~120 cm,表明 20 世纪 90 年代以来,这两个元素也受到一定程度的人为源的影响.

P107 柱中,0~60 cm 段 Mn,Cd,Co,Sr 的可提取态所占比例较大(25.96%~69.30%),Zn,Cu,Ni 次之(30.31%~47.18%),当可提取态所占比例越大时,重金属越易从沉积物中释放,造成“二次污染”,生物有效性就越大,也可说明该重金属受人为源影响较大. Cr,Co,Ni,Cu,Zn,Cd,Fe,Mn 在 0~60 cm 的可提取态比例明显高于 60~120 cm,表明研究区域自 20 世纪 90 年代开始受到较严重的污染. 自 20 世纪 90 年代以来,厦门港口数量迅速增多,工业和城市化快速发展,厦门西港由于其特殊的地理条件,一直是厦门周边海域中污染较严重的海域,文中的研究结果与当地经济发展历史较吻合. 有研究表明,厦门西港近岸柱状沉积物中重金属的三大主要来源为交通和工业污染、生活废水污染、自然来源<sup>[19]</sup>.

80 cm, Sr 在 24~36 cm 为轻度污染外, Sr, Fe 在其他深度, 以及 Ba, Pb, Mn 在所有深度的  $I_{geo}$  都小于零, 无污染; Cu, Zn 在 60 cm 以深无污染, 在 60 cm 至表层为轻度污染; Cr 在 80 cm 以深无污染, 在 80 cm 至表层为轻度污染; V 和 Co 的污染状况相似, V 在 60~100 cm, Co 在 60~80 cm 表现为中度污染, 其余深度为轻度污染; Ni 在 80 cm 以深无污染, 在 60~80 cm 为轻度污染, 60 cm 至表层为偏中度污染; Cd 在 80~100 cm 无污染, 其余深度(36~48 cm)表现为轻度到中度污染。

表 3 P107 柱状沉积物中重金属元素地累积指数

Tab. 3 Index of geo-accumulation of heavy metals in P107 core sediments												
样品编号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Cd	Ba	Pb	Fe	Mn
P107-1	0.38	0.80	0.74	1.43	0.63	0.26	-0.11	0.86	-1.24	-0.69	-0.51	-0.38
P107-2	0.62	0.98	0.83	1.49	0.52	0.33	-0.80	1.37	-2.62	-1.05	-0.46	-1.07
P107-3	0.33	0.73	0.64	1.22	0.45	0.10	0.09	1.11	-1.01	-0.90	-0.63	-0.65
P107-4	0.48	0.87	0.79	1.42	0.50	0.27	-0.40	2.16	-0.54	-0.60	-0.51	-0.68
P107-5	0.31	0.65	0.68	1.20	0.36	0.15	-0.21	1.01	-0.92	-0.74	-0.69	-0.98
P107-6	1.46	0.27	1.73	0.56	-0.44	-0.43	-1.02	0.16	-1.64	-0.46	0.37	-1.08
P107-7	1.22	-1.85	0.27	-1.41	-0.53	-0.58	-1.78	-1.38	-3.25	-0.53	-0.11	-0.61
P107-8	0.18	-4.61	0.15	-1.77	-1.27	-0.56	-1.18	0.52	-1.49	-0.84	-0.29	-0.87

2.4.2 次生相与原生相比值法 基于重金属总量的污染评价方法, 只能单一地评价重金属的污染程度, 而基于重金属赋存形态的污染评价方法能更好地反映重金属的污染状况和来源, 有效地评价重金属的迁移性和潜在生态风险. P107 柱状沉积物中, 重金属元素次生相与原生相的比值, 如表 4 所示. 次生相与原生相比值法与地累积指数法的评价结果均显示该柱未受 Ba 的污染, 但受到了 Co 和 Cd 的污染. 由于 Sr 并不适用于次生相与原生相比值法, 因此, 根据地累积指数法的评价结果, P107 柱中 Sr 未受到人为污染. 由地累积指数法得出, 沉积物中 Pb, Mn 未达到污染程度, 但根据  $R_{sp}$  值可知, Mn 在 0~60 cm, Pb 在 80~100 cm 为轻度污染, 说明 Pb 和 Mn 具有轻度的潜在生态风险, 该柱状沉积物某些层位受到 Pb 和 Mn 的轻度污染. 由表 4 可知: P107 柱状沉积物中, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Fe 无生态风险, 但根据地累积指数可知, Fe 和 V 在 60~80 cm 深度受到了污染, Cr, Ni, Cu, Zn 在 0~60 cm 处于轻度到偏中度污染水平. 因此, 以上重金属虽未构成一定的生态风险, 但均受到了不同程度的污染, 应引起相关部门的重视.

表 4 P107 柱状沉积物中重金属元素次生相与原生相的比值

Tab. 4 Secondary phase to primary phase ratio values of heavy metals in P107 core sediments												
样品编号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Cd	Ba	Pb	Fe	Mn
P107-1	0.10	0.15	1.08	0.43	0.67	0.67	0.47	0.97	0.04	0.02	0.16	1.78
P107-2	0.12	0.15	1.08	0.47	0.67	0.71	1.41	1.39	0.05	0.08	0.17	1.32
P107-3	0.11	0.17	1.17	0.57	0.89	0.79	0.35	1.56	0.01	0.03	0.18	1.55
P107-4	0.11	0.15	0.99	0.45	0.72	0.62	0.65	0.47	0.01	0.04	0.16	1.37
P107-5	0.13	0.17	1.20	0.53	0.76	0.77	0.72	2.26	0.02	0.09	0.18	1.13
P107-6	0.08	0.06	0.55	0.15	0.14	0.13	1.52	0.36	0.14	0.47	0.02	0.63
P107-7	0.12	0.00	0.23	0.08	0.13	0.03	1.42	0.24	0.36	1.78	0.01	0.08
P107-8	0.09	0.02	0.21	0.17	0.23	0.04	1.44	0.12	0.04	0.87	0.01	0.08

3 结论

- 1) 厦门西港近岸海域 P107 柱状沉积物中, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn 这 12 种重金属中, 除 Ba, Pb, Mn 外, 其余元素的平均质量比均高于厦门 A 层土壤元素背景值.
- 2) 12 种重金属质量比的最低值均出现在柱底部附近; 该柱状沉积物在沉积过程中部分深度受一定程度 V, Co, Fe 的人为源影响; Sr, Ba, Pb, Mn 受人为源影响较小; Cr, Ni, Cu, Zn, Cd 在该柱沉积历史中(尤其是 20 世纪 90 年代以来)明显受人为源的影响.
- 3) 分析认为, P107 柱状沉积物受到人为源影响较严重, 除未受到 Ba, Sr 的污染外, 在不同阶段受到不同程度重金属的污染, 特别是 20 世纪 90 年代以来污染加重, 这与厦门的经济发展历史相对应.

## 参考文献:

- [1] 马青清,王博,张责研,等. 太湖北部表层沉积物重金属污染及其生物毒性研究[J]. 生态毒理学报,2016,11(3):204-210. DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20150901001.
- [2] 于瑞莲,胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2008,29(3):419-423. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2008.03.0419.
- [3] WANG Yi,HU Jiwei,XIONG Kangning,*et al.* Distribution of heavy metals in core sediments from Baihua Lake[J]. Procedia Environmental Sciences,2012,16(4):51-58. DOI:10.1016/j.proenv.2012.10.008.
- [4] VALLIUS H. Heavy metal concentrations in sediment cores from the northern Baltic Sea: Declines over the last two decades[J]. Marine Pollution Bulletin,2014,79(12):359-364. DOI:10.1016/j.marpolbul.2013.11.017.
- [5] 袁东星,杨东宁,陈猛,等. 厦门西港及闽江口表层沉积物中多环芳烃和有机氯污染物的含量及分布[J]. 环境科学学报,2001,21(1):107-112. DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2001.01.021.
- [6] ZHANG Luoping,YE Xin,FENG Huang,*et al.* Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China[J]. Marine Pollution Bulletin,2007,54(7):974-982. DOI:10.1016/j.marpolbul.2007.02.010.
- [7] 李桂海,蓝东兆,曹志敏,等. 厦门海域沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 海洋通报,2007,26(1):67-72. DOI:10.3969/j.issn.1001-6392.2007.01.011.
- [8] 李庆召,李国新,罗专溪,等. 厦门湾海域表层沉积物重金属和多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学,2009,28(6):93-99. DOI:10.3321/j.issn:0254-6108.2009.06.019.
- [9] 杨春霖,欧阳通,张路平,等. 厦门西海域表层沉积物中重金属的赋存形态[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2007,46(增刊1):89-93. DOI:10.3321/j.issn:0438-0479.2007.z1.019.
- [10] LIN Cai,LIU Yang,LI Wenquan,*et al.* Speciation, distribution, and potential ecological risk assessment of heavy metals in Xiamen Bay surface sediment[J]. Acta Oceanologica Sinica,2014,33(4):131. DOI:10.1007/s13131-014-0453-2.
- [11] YAN Changzhou,LI Qingzhao,ZHANG Xian,*et al.* Mobility and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Xiamen Bay and its adjacent areas, China[J]. Environmental Earth Sciences,2010,60(7):1469-1479. DOI:10.1007/s12665-009-0282-3.
- [12] LORING D H,RANTALA R T T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter[J]. Earth-Science Reviews,1992,32(4):235-283. DOI:10.1016/0012-8252(92)90001-A.
- [13] YU Ruilian,HU Gongren,WANG Lijuan. Speciation and ecological risk of heavy metals in intertidal sediments of Quanzhou Bay, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2010,163(14):241-252. DOI:10.1007/s10661-009-0830-z.
- [14] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal,1969,2(3):108-118.
- [15] 国家环境保护局,中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [16] 陈静生,董林,邓宝山,等. 铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究:以鄱阳湖为例[J]. 环境科学学报,1987,7(2):140-149. DOI:10.13671/j.hjkxxb.1987.02.003.
- [17] 李桂海. 厦门海域现代沉积环境及重金属元素的环境地球化学研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2007.
- [18] 刘世全,张世熔,伍钧,等. 土壤 pH 与碳酸钙含量的关系[J]. 土壤,2002,34(5):279-282. DOI:10.13758/j.cnki.tr.2002.05.006.
- [19] 何海星,于瑞莲,胡恭任,等. 厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析[J]. 中国环境科学,2014,34(4):1045-1050. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2014.04.046.
- [20] 钱华. 厦门湾沉积物元素地球化学的研究[D]. 厦门:厦门大学,2001.
- [21] 陈松,许爱玉,骆炳坤. 厦门港湾表层沉积物中重金属的富集和来源探讨[J]. 台湾海峡,1987,6(2):139-145.
- [22] WANG Jie,LIU Guijian,LIU Houqi,*et al.* Tracking historical mobility behavior and sources of lead in the 59-year sediment core from the Huaihe River using lead isotopic compositions[J]. Chemosphere,2017,184:584-593. DOI:10.1016/j.chemosphere.2017.06.022.
- [23] 韩璐,于瑞莲,胡恭任,等. 厦门西港潮间带柱状沉积物重金属赋存形态与污染评价[J]. 地球与环境,2017,45(3):342-347. DOI:10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.03.013.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)