

# 烟台近岸典型生态区沉积物重金属形态分布及其污染状况

孙启耀<sup>1,3</sup>, 宋建国<sup>1</sup>, 高彦博<sup>2</sup>, 陈 静<sup>3</sup>, 盛彦清<sup>3</sup>

(1. 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264005; 2. 烟台市套子湾污水处理厂, 山东 烟台 264000; 3. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 运用 Tessier 连续提取法, 对烟台海岸带 3 个典型生态敏感区表层沉积物重金属 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的形态分布和污染状况进行了分析研究。结果表明, 研究区域中河口区与排污口区重金属 Cr、Cu、Cd、Zn 和 Ni 的含量较高, 尤其是 Cd 污染严重。养殖区基本符合海洋沉积物质量第 1 类标准; 重金属 Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni 主要以残渣态为主, Cu 和 Pb 的酸溶态所占比例较高, 而 Cd 的可提取态比例较高, 在河口区与排污口区高达 90%, 生物有效性最高。

**关键词:** 烟台海岸带; 生态敏感区; 沉积物; 重金属; 形态分布

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)09-0031-06

海岸带是海岸线向陆海两侧扩展的带状区域, 是海洋系统与陆地系统相连接、复合与交叉的地理单元, 与人类的生存与发展关系密切, 该环境体系具有海陆过渡区域特有的敏感性与脆弱性<sup>[1]</sup>。随着沿海人口不断增加与城市化进程的快速发展, 大量的城市生活污水和工业污染物排入水体, 这些污染水体一般未经过处理或经简单处理后最终排入近岸海域。排入海中的重金属被赋存于近海沉积体系中, 其危害比常规污染物更为严重<sup>[2]</sup>, 当水体环境条件发生变化时, 沉积物中的重金属向上覆水体重新释放, 造成对水体的二次污染<sup>[3-5]</sup>。重金属的污染与其赋存于沉积物中的形态密切相关, 形态不同, 稳定性不同, 生物效应亦不同<sup>[6]</sup>。因此, 为了准确评价海岸带沉积物中重金属污染物的特征与危害, 不仅依靠重金属元素总量的分布, 而且必须分析各元素的具体赋存形态。

烟台市位于山东半岛东部, 市北、西北部濒临渤海, 东北和南部临黄海, 海岸线蜿蜒曲折, 总长度达 909 km, 海域面积约 2.6 万 km<sup>2</sup>, 是具有一定代表性的海岸带研究区域。目前对烟台邻近海域的研究集中在水质污染对近海富营养化的影响以及沉积物中重金属元素含量的分布<sup>[7-10]</sup>, 而运用重金属的赋存形态分析其污染程度及生物有效性的研究尚未见报道。因此, 本文运用 Tessier 连续提取法<sup>[11]</sup>对烟台海岸带河口区、排污口区与养殖区 3 个典型生态敏感区域的表层沉积物中 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的污染特征以及可交换态、酸溶态、氧化态、还原态、

残渣态 5 种赋存形态的分布情况进行了分析研究。

## 1 样品采集与分析

### 1.1 研究区域概括

2009 年 7 月在烟台海岸带选取 3 个典型生态敏感区域, 即河口区 S1、排污口区 S2、养殖区 S3 作为研究区域, 如图 1 所示。河口区 S1 位于夹河河口。夹河是烟台市工农业生产、生活城区的饮水等最重要的淡水资源之一, 位于烟台中心西侧<sup>[12]</sup>, 由外夹河和内夹河两条支流组成, 两条支流在福山区汇合, 经由开发区注入套子湾。排污口区 S2 位于套子湾污水处理厂排污口附近, 该污水处理厂位于烟台市的北部, 是一座集一级处理、二级处理、深度处理为一体的大型综合性污水处理厂, 工程设计处理能力远期为 50 万 t/d, 近期为 25 万 t/d, 处理后污水通过管道排放于芝罘岛北侧海域的深水海域。养殖区 S3 位于烟台市莱山区北部海域四十里湾, 属于半封闭性海域, 水深在 15 m 以内, 是我国北方的一个重要浅海养殖区, 该海域环境质量除受沿岸流, 潮流影响外, 受芝罘区和莱山区工业、生活污水影响较大<sup>[13]</sup>。另选取离海岸较远, 受人类活动影响较小的区域作为参照区 S4。

收稿日期: 2010-10-22; 修回日期: 2011-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40906045); 烟台科技计划基金项目(2008155)

作者简介: 孙启耀(1985-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事海岸带水环境研究, 电话: 15806442180, E-mail: qiyaosun@163.com; 盛彦清, 通信作者, 副研究员, E-mail: yqsheng@yic.ac.cn

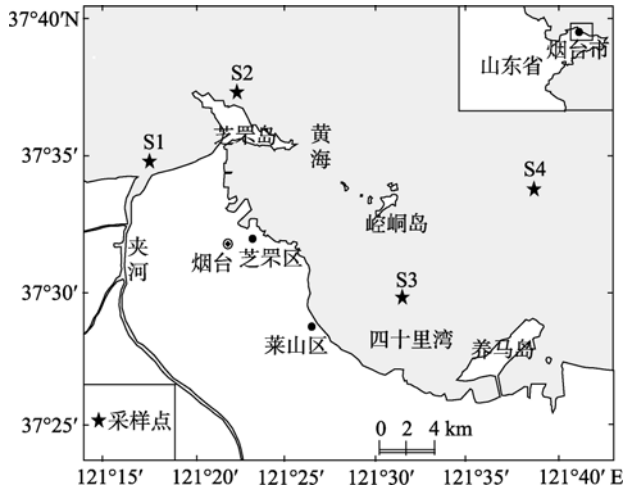


图1 研究区采样布点图

Fig. 1 Map of sampling stations

## 1.2 样品采集

采用抓斗式采泥器采集 4 个区域的表层沉积物样品, 去除贝壳和石块等杂物后, 用塑料勺取其中央未受干扰的表层泥样于聚乙烯袋中。立即带回实验室, 经冷冻干燥后, 研磨并过 100 目尼龙筛, 装入密封袋, 0~4℃冷藏, 待分析测定。

## 1.3 分析方法

沉积物中重金属 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的形态分析, 采用 Tessier 连续提取法<sup>[10]</sup>, 首先称取 1.0000 g 处理过的沉积物样品, 按以下步骤进行提取:

(1)可交换态: 加入 1 mol/L MgCl<sub>2</sub> 溶液(pH=7)8 mL, 在室温下连续振荡 1 h 后离心, 将上清液转移

到事先用酸洗过的 50 mL 比色管中并定容;

(2)酸溶态: 步骤(1)中的残渣加入 1 mol/L NaAc 溶液(pH =5)25 mL, 在室温下连续振荡 5 h 后离心, 将上清液转移到事先用酸洗过的 50 mL 比色管中并定容;

(3)氧化态: 将步骤(2)中的残渣加入 0.04 mol/L NH<sub>2</sub>OH·HCl 的 25% HAc 溶液 20 mL, 在 96℃±3℃下断续振荡 6 h 后离心, 将上清液转移到事先用酸洗过的 50 mL 比色管中并定容;

(4)还原态: 步骤(3)中的残渣加入 0.02 mol/L HNO<sub>3</sub> 3 mL, 再加入 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (用硝酸调节到 pH=2)5 mL, 在 85℃±2℃下振荡 2 h, 再加入 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (pH=2)3 mL, 于 85℃±2℃下断续振荡 3 h, 冷却后加入 3.2 mol/L NH<sub>4</sub>Ac 的 20% HNO<sub>3</sub> 溶液(体积分数) 5 mL, 稀释到 20 mL, 在室温下连续振荡 0.5 h 后离心, 将上清液转移到事先用酸洗过的 50 mL 比色管中并定容;

(5)残渣态: 步骤(4)中的残渣用 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 法微波消解。

最后用 ICP-MS 测定以上浸提液中的重金属元素 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的浓度, 并计算各形态的含量, 每种重金属元素含量采用 5 种形态的含量之和。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物重金属含量分布特征

烟台海岸带 3 个典型生态敏感区表层沉积物中 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的含量分布如表 1 所示。

表1 研究区域表层沉积物重金属含量(μg/g)

Tab. 1 Concentrations of heavy metals in surface sediments collected from the research areas(μg/g)

采样点	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Ni
河口区 S1	131.45	48.66	1.20	39.79	155.61	290.42
排污口区 S2	127.58	45.91	2.35	37.75	138.88	284.98
养殖区 S3	123.19	34.18	0.51	27.37	122.75	271.72
参照区 S4	123.05	37.43	0.57	27.45	130.97	274.12
泉州湾 <sup>[15]</sup>	82.00	71.40	0.59	67.70	179.60	33.40
西厦门湾 <sup>[16]</sup>	75.00	44.00	0.33	50.00	139.00	37.40
芝罘湾 <sup>[10]</sup>	64.30	19.00	0.75	29.00	86.50	—
胶州湾 <sup>[17]</sup>	—	33.33	0.02	27.74	47.46	—
厦门贝类养殖区 <sup>[18]</sup>	—	21.30	0.14	38.20	108.50	—
山东荣成黑泥湾海带养殖区 <sup>[19]</sup>	50.14	12.82	0.06	37.42	82.04	—
海洋沉积物质量标准 1 类	80.00	35.00	0.50	60.00	150.00	—
海洋沉积物质量标准 2 类	150.00	100.00	1.50	130.00	350.00	—

注: “—”表示文献中未提供数据

Cr 在 4 个采样区域污染比较严重,但其含量变化幅度不大,浓度范围为 123.05~131.45 $\mu\text{g/g}$ ,符合国家海洋沉积物第 2 类质量标准<sup>[14]</sup>(150.00  $\mu\text{g/g}$ )。Cu 含量分布为 34.18~48.66 $\mu\text{g/g}$ ,其中河口区 S1 与排污口区 S2 的 Cu 含量大于 35.00  $\mu\text{g/g}$ ,属于海洋沉积物第 2 类标准区域,但养殖区的 Cu 含量为 34.18  $\mu\text{g/g}$ ,符合第 1 类质量标准。Cd 在河口区 S1 与排污口区 S2 的污染最为严重,含量分别为 1.20  $\mu\text{g/g}$  与 2.35  $\mu\text{g/g}$ ,尤其是排污口区 S2 中 Cd 含量远高于海洋沉积物第 2 类质量标准(1.50  $\mu\text{g/g}$ ),属于海洋沉积物第 3 类标准区域;养殖区 S3 中 Cd 污染轻微,含量略高于第 1 类质量标准值 0.50  $\mu\text{g/g}$ 。Pb 在 4 个采样区中的浓度范围为 27.37~39.79  $\mu\text{g/g}$ ,均低于海洋沉积物质量第 1 类标准的最高值 0.50  $\mu\text{g/g}$ ,Pb 基本无污染。重金属 Zn 在河口区 S1 含量最高,为 155.61  $\mu\text{g/g}$ ,稍超出海洋沉积物质量第 1 类标准最高值 150.00  $\mu\text{g/g}$ ,其他各区 Zn 的含量属于第 1 类标准区域。Ni 污染严重,在 4 个区域的浓度范围为 271.72~290.42  $\mu\text{g/g}$ ,并且各区域变化不大。

与国内其他河口、海湾表层沉积物重金属含量相比,烟台海岸 3 个典型生态敏感区的 Cr、Cu、Cd、Zn、Ni 含量均处于相对较高水平,详见表 1。采样区域 Cd 的浓度范围为 0.57~2.35  $\mu\text{g/g}$ ,远高于文献中国内其他河口海湾的含量 0.02~2.35  $\mu\text{g/g}$ ,尤其排污口区 Cd 的浓度 2.35  $\mu\text{g/g}$  是文献中浓度最低的胶州湾 0.02 $\mu\text{g/g}$  的 100 多倍,比浓度最高的泉州湾 0.59  $\mu\text{g/g}$  也要高出 4 倍,超出海洋沉积物质量标准的 2 类区域范围。Cr 的浓度为 123.05~131.45  $\mu\text{g/g}$ ,高于西厦门湾、芝罘湾和山东荣成黑泥湾海带养殖区 Cr 的含量。Cu 的浓度为 34.18~48.66 略高于其他河口海湾的浓度,差别不是很大。采样区域的 Ni 浓度为 271.12~290.42  $\mu\text{g/g}$  是泉州湾和西厦门湾的 8~10 倍。Zn 的浓度为 122.75~155.61 $\mu\text{g/g}$ ,略低于泉州湾而高于其他区域。Pb 的浓度为 27.37~39.79 $\mu\text{g/g}$ ,与文献中大部分的河口海湾的 Pb 的浓度相差不大,和芝罘湾的浓度也基本处于同一水平。与国内其他养殖区的沉积物中的重金属含量相比,养殖区 S3 的 Cd、Zn 和 Ni 的含量也远高于厦门贝类养殖区和山东荣成黑泥湾海带养殖区,说明养殖区的 Cd、Zn 和 Ni 相对处于较高的含量水平。

由表 1 研究区域表层沉积物重金属含量可以看出,烟台 3 个典型生态敏感区域的重金属污染程度依次为河口区 S1>排污口区 S2>养殖区 S3。河口区

S1 的重金属污染最为严重,由于近年来随着烟台市工农业快速发展和人口数量的急剧增长,各种用水、入水量加大,流域排污量剧增,尤其是流域沿岸的工厂企业,如造纸厂、发酵厂、酿酒厂、化肥厂、合成革厂等的废水均排入夹河,年排废水量达  $6.88 \times 10^6 \text{m}^3$ <sup>[20]</sup>,再加之受气候变暖、降水量减少以及流域径流量锐减等多因素的影响,该流域的水质污染状况严重,使得河口区的污染也日趋加剧。排污口区 S2 接纳污水主要来自套子湾污水处理厂,该污水处理厂设计日处理能力为 25 万 t 污水,但随着排放污水量的增加,逐渐超出处理负荷,污水经排污口区排出后,首先在潮间带和潮下带浅水区向外扩散,在此过程中,部分重金属直接被沉积物吸附,或随吸附的悬浮颗粒在排污口区附近沉降部分沉积物直接被沉积物吸附<sup>[21]</sup>。

养殖区 S3 的 Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的含量均略低于参照区 S4,这可能因为养殖区的生物作用和人为活动对重金属的富集和运移有一定的作用。养殖区的鱼类和贝类等海洋动物在吸收营养物质的同时吸收了部分重金属,从而在动物体内富集和转移;海洋植物,主要有浮游植物(藻类)、海草和高等植物,也可迁移和富集重金属<sup>[21]</sup>。人类的活动如放置养殖网箱、捕捞活动等也会影响沉积物对重金属的吸附和迁移转化。

选取的参照区 S4,虽受人类活动影响较小,但该区域相对其他海域,表层沉积物的重金属的也处在高含量,尤其是 Cr、Cd、Ni 的含量较高。这可能由于烟台周边海域沉积物的环境背景值较高,另一方面,海洋动力条件,如径流、上升流、潮流、余流等会影响水体中重金属的分布和扩散<sup>[22]</sup>,使烟台近岸的污染物可能会受潮流等因素扩散转运至参照区域。

## 2.2 表层沉积物重金属形态分布

烟台海岸带 3 个典型生态敏感区及参照区中表层沉积物重金属 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni 的可交换态、酸溶态、氧化态、还原态与残渣态的各形态含量如表 2 所示,各形态所占的比例分布情况见图 2 所示。6 种重金属的 5 种形态在 4 个区域的分布各不相同,具体见图 2。

可交换态的重金属元素在中性条件下就可释放出来,最容易对水体环境造成影响,容易被生物吸收利用,毒性也最强<sup>[23]</sup>。可交换态以 Cd 的比例最高,

表 2 研究区表层沉积物重金属各形态分布( $\mu\text{g/g}$ )Tab. 2 Distribution of heavy metal speciations in surface sediments from the research areas( $\mu\text{g/g}$ )

元素	分布区域	可交换态	酸溶态	氧化态	还原态	残余态
Cr	S1	1.61	9.38	34.88	10.59	75.00
	S2	1.44	10.30	31.27	9.815	74.75
	S3	1.72	9.89	31.19	9.09	71.30
	S4	1.88	11.44	32.04	9.93	67.77
Cu	S1	0.24	6.37	1.10	14.95	26.00
	S2	0.38	6.79	4.61	6.05	28.08
	S3	0.45	6.37	3.20	2.70	21.47
	S4	0.31	8.30	3.42	3.60	21.80
Cd	S1	0.01	0.44	0.57	0.07	0.12
	S2	0.16	0.86	1.12	0.09	0.13
	S3	0.08	0.09	0.10	0.02	0.22
	S4	0.02	0.11	0.08	0.02	0.34
Pb	S1	0.03	8.58	10.01	1.55	19.62
	S2	0.04	11.78	9.59	0.71	15.65
	S3	0.02	6.19	6.30	0.40	14.47
	S4	0.03	7.98	6.42	0.68	12.35
Zn	S1	2.28	18.91	39.74	11.07	83.62
	S2	3.02	17.17	29.33	8.26	81.12
	S3	2.49	7.39	20.51	8.15	84.22
	S4	2.70	7.34	20.14	10.35	90.43
Ni	S1	0.59	20.18	32.35	17.14	220.17
	S2	0.48	9.08	38.13	7.46	229.83
	S3	0.56	4.38	34.49	6.46	225.83
	S4	0.61	5.58	40.49	8.94	218.50

在 4 个区域中的比例分布为养殖区 S3(16%)>排污口区 S2(7%)>参照区 S4(3.5%)>河口区 S1(0.8%), 其中排污口区 S2 的可交换态 Cd 含量最高, 为 0.16  $\mu\text{g/g}$ 。Cr、Cu 和 Zn 在本形态也均有少量分布, 但所占比例很小, 在 4 个区域的分布并无太大差异。

酸溶态是指重金属元素与碳酸盐的结合形态, 该形态受水体环境 pH 的影响较大, 在水体 pH 下降的条件下, 重金属很容易向水体环境迁移转化, Cd、Pb 和 Cu 在此形态的含量比例较高。此形态的 Cd 在河口区 S1 和排污口区 S2 所占比例相同, 均为 37%, 大于养殖区 S3(18%)和参照区 S4(19%); 酸溶态 Pb 所占比例最高为排污口区 S2(31%), 最低为河口区 S1(22%); 3 个生态敏感区酸溶态 Cu 所占比例介于 13%~19%。Cr、Zn 与 Ni 3 种重金属在此形态也有检出, 但所占比例较小并在 4 个区域无明显差异。

氧化态是指与 Fe-Mn 氧化物结合在一起, 通过吸附作用或共沉淀作用积累的重金属形态, 这部分属于较强的离子键结合的化学形态, 当水体中氧化还原电位降低时, 或水体缺氧时, 这种结合形态的重金属被还原, 从而可能造成对水体的污染。Cd、Cr、Pb 和 Zn 在此形态的含量比例较高, 其中 Cd 的氧化态在河口区和排污口区的比例均占到约 47%,

远大于养殖区(20%)和参照区(14%)。Cr 与 Pb 在此形态占到了约 23%~26%, 氧化态 Zn 在 4 个研究区域中所占比例为河口区 S1(26%)>排污口区 S2(21%)>养殖区 S3(17%)>参照区 S4(15%), Cu 与 Ni 在此形态分布较少。

还原态即有机物及硫化物结合态, 是指以重金属离子为中心离子, 以有机质活性基团为配位体的结合, 或是硫离子与重金属生成难溶于水的物质, 此种相态的重金属具有较强的稳定性, 只有在较强的氧化条件下才会向水体释放。Cu 在此种形态最高且在 4 个区域分布有很大差异, 在河口区 S1 还原态 Cu 占到了总形态的 31%, 而其他 3 个区此形态 Cu 约占 8%~13%。其他几种重金属在此形态所占比例较小且在 4 个区域的差别不大。

残渣态指主要赋存于原生矿和次生矿的矿物晶格中的重金属形态, 具有极高的稳定性, 几乎不被生物利用, 只有通过化学反应转化成可溶态物质才对生物产生影响<sup>[24]</sup>。此形态的 Cd 在河口区 S1(10%)和排污口区 S2(6%)的所占比例最低, 但在养殖区 S3(43%)和参照区 S4(60%)所占比例较高。Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni 5 种重金属均以此种形态为主, 所占比例达 50%以上, 并在 4 个区域的差异不大。

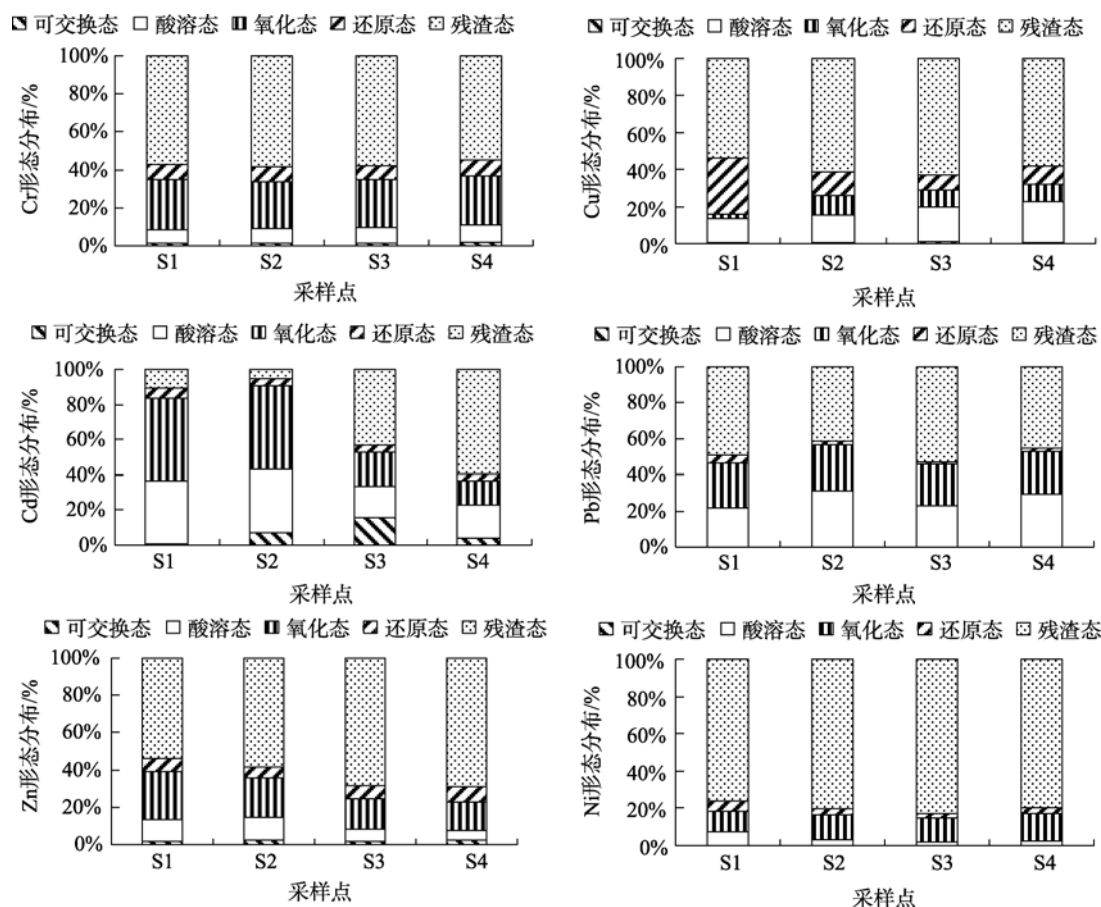


图2 研究区表层沉积物重金属各形态所占比例分布图

Fig. 2 Distribution of the proportions of heavy metal speciations in surface sediments from the research areas

可交换态、酸溶态、氧化态、还原态统称为可提取态,可提取态所占比例越高,越易释放出来造成二次污染,越易被生物所利用,其生物有效性就越大。重金属Cd在河口区S1和排污口区S2的可提取态所占比例最高,均超过90%,其次为养殖区S3,由此可见Cd的生物有效性最高,并且养殖区S3中Cd的可交换态和酸溶态所占比例较高,在水体环境改变的情况下很容易向水体释放,而养殖区的水体环境又很不稳定,所以极易造成在鱼和贝类的体内富集。根据重金属含量与形态分布特征,烟台海岸带3个典型生态敏感区6种重金属的生物有效性呈现 $Cd > Cr > Cu > Pb > Zn > Ni$ 的规律。

### 3 结论

通过对烟台海岸带3个典型生态敏感区表层沉积物重金属Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni的形态分布和污染特征的分析研究,初步得到以下认识:

(1)3个典型生态敏感区的重金属污染程度依次

为河口区S1>排污口区S2>养殖区S3,河口区S1与排污口区S2的表层沉积物重金属污染严重,这与水体的水质污染状况密切相关。养殖区S3重金属污染轻微,仅有Cr和Cd稍超过国家海洋沉积物质量第1类标准最高值,Cu、Pb与Zn的含量属于第1类标准区域,适用于海洋渔业水域,海水养殖区,海水浴场。

(2)重金属Cd在河口区与排污口区的污染最为严重,可提取态所占比例均超过90%,而在养殖区和参照区却以残渣态为主,河口区和排污口区Cd的生物有效性极高,极易对水体造成污染;Pb和Cu主要以残渣态为主,但酸溶态所占比例较高,当水体环境改变时会对水体造成一定程度污染。Cr、Zn和Ni主要以残渣态为主,生物有效性不高。除了Cd之外其他几种金属的形态在4个区域的分布基本趋于一致,无太大差异。研究区域表层沉积物中6种重金属的生物有效性顺序表现为 $Cd > Cr > Cu > Pb > Zn > Ni$ ,因此该海域沉积物的Cd污染问题应予以重视,研究结果对海岸带综合管理决策的制定具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 范学忠, 袁琳, 戴晓, 等. 海岸带综合管理及其研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2756-2765.
- [2] 谷河泉, 陈庆强. 中国近海持久性毒害污染物研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6243-6251.
- [3] Zwolsman J J. Spatial and temporal distribution of trace metals in sediments from Scheldt Estuary, South-West Netherlands Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, 43(1): 55-79.
- [4] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 327-356.
- [5] 张丽洁, 王贵, 姚德, 等. 近海沉积物重金属研究及环境意义[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(3): 6-9.
- [6] 王菊英, 张曼平. 重金属的存在形态和生态毒理[J]. 海洋与沼泽, 1992, 23(2): 84-89.
- [7] 刘艳, 纪灵, 郭建国, 等. 烟台邻近海域水质与富营养化时空变化趋势分析[J]. 海洋通报, 2009, 28(2): 18-22.
- [8] 吴玉霖, 周成旭, 张永山, 等. 烟台四十里湾海域红色裸甲藻赤潮发展过程及其成因[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2): 159-167.
- [9] 梁源, 刘健, 孔祥淮, 等. 重金属在山东半岛东北部滨浅海区表层沉积物中的分布和污染评价[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(3): 27-32.
- [10] 吴建政, 余晓玲, 鲍鹏, 等. 芝罘湾近期沉积物中重金属元素记录[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 141-144.
- [11] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M, et al. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-850.
- [12] 李嘉竹, 刘贤赵. 烟台大沽夹河流域水质演变与趋势分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(6): 20-24.
- [13] 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, 27(3): 419-423.
- [14] GB18668—2002[S]. 海洋沉积物质量标准.
- [15] Ruilian Yu, Xing Yuan, Yuanhui Zhao, et al. Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 664-669.
- [16] Luoping Zhang, Xin Ye, Huan Feng, et al. Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China[J]. Mar Pollut Bull, 54(7): 974-982.
- [17] 张丽洁, 王贵, 姚德, 等. 胶州湾李村河口沉积物重金属污染特征研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2003, 17(1): 8-14.
- [18] 阮金山, 钟硕良, 杨妙峰, 等. 厦门贝类养殖区沉积物中重金属的污染水平及其潜在生态危害[J]. 福建水产, 2007, (1): 3-8.
- [19] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 黑泥湾海带养殖区沉积物重金属分布特征与富集机制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3): 398-407.
- [20] 丁海燕, 张振克, 何华春. 套子湾现代沉积物元素化学特点及环境意义[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(11): 1-6.
- [21] 王永红, 张经, 沈焕庭. 潮滩沉积物重金属累积特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 69-77.
- [22] 阮金山, 吴立峰, 罗冬莲, 等. 泉州大港湾海水、沉积物及水生物体内重金属的含量分布[J]. 海洋通报, 2004, 23(3): 41-45.
- [23] 单志新, 郑振虎, 邢红艳, 等. 四十里湾养殖水域环境监测与分析[J]. 齐鲁渔业, 2001, 18(4): 37-40.
- [24] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 921-929.

## Distribution of heavy metals speciation and pollution in surface sediment from typical ecologically regions of Yantai coastal zone

SUN Qi-yao<sup>1,3</sup>, SONG Jian-guo<sup>1</sup>, GAO Yan-bo<sup>2</sup>, CHEN Jing<sup>3</sup>, SHENG Yan-qing<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Materials Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Taozi Bay Sewage Treatment Plant of Yantai, Yantai 264000, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Oct., 22, 2010

**Key words:** Yantai coastal zone; ecologically sensitive regions; surface sediment; heavy metal; speciation

**Abstract:** The distribution of heavy metal (Cr, Cu, Cd, Pb, Zn and Ni) speciations in surface sediments from the typical ecologically sensitive regions of Yantai coastal zone were analyzed by the Tessier sequential extraction method. The results showed that the concentrations of heavy metals (Cr, Cu, Zn and Ni), especially Cd, were quite high in the estuary region and sewage outlet region. The concentrations of heavy metals in the mariculture region were basically consistent with the first class standard of Marine Sediment Quality of China. The heavy metals of Cr, Cu, Pb, Zn and Ni in research regions were mainly existing in residual fraction. However, the extractable phase proportion of Cd in the estuary region and sewage outlet region were up to 90% and the bioavailability of Cd was highest among these heavy metals.

(本文编辑: 康亦兼)