

胶州湾水生系统中 Pb、Zn 的分布特征 及其在生物体中的浓缩*

叶思源^{1,2} 原晓军^{1,2} 丁喜桂^{1,2} 刘 强³ 宫少军⁴

(1. 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋地质研究所 青岛 266071;
3. 吉林大学 长春 130021; 4. 中国地质大学 北京 100083)

提要 利用在胶州湾采集的 47 组同站位多介质样品,进行了痕量金属 Pb、Zn 及其它环境因子的化学成分测试,讨论了胶州湾水-沉积物-生物系统中 Pb、Zn 的生物地球化学总体特征及其在各介质平面上的分布,揭示了胶州湾水-沉积物-生物系统对陆源物质输入的响应。垂向上表层沉积物是 Pb、Zn 组分的富集带,该系统中的生物相对于其所处水环境具有显著的富集作用,生物体中 Pb、Zn 生物浓缩系数分别为 36、935;横向上,Pb、Zn 在底层水和沉积物介质中的分布主要受控于河口,即高值区分布于胶州湾的各个主要河口区,特别是在沉积物中金属组分浓度的高值区主要集中分布于胶州湾的东部。而孔隙水中 Pb、Zn 的高值主要分布于水交替较弱的海域,如红岛前缘。但生物体中的痕量金属组分化学场空间分布规律与上述各介质的化学场均不吻合,亦即是生物体中痕量金属组分的浓度与其所处环境中的同名金属组分浓度无关。作者认为,生物对痕量金属组分的富集并不简单地取决于它所处环境介质中同名金属组分的总量,而存在形态上的选择性。通过回归分析揭示了孔隙水对生物体中 Pb、Zn 的富集贡献较大。

关键词 Pb, Zn, 底层水, 孔隙水, 沉积物, 蛤仔, 胶州湾

中图分类号 P736.4

水生生物对其所处环境中的痕量金属组分具有生物浓缩、累积和放大作用,这一现象已被众多研究者所认识(Morel *et al.*, 2003; Szeffer *et al.*, 1999)。由于水生系统中较高水平的痕量金属组分浓度不仅会对水生生物产生负面影响,而且会通过食物链危害人类健康。因此近年来有关痕量金属组分的生物富集作用方面的研究受到越来越多的关注(丘耀文等, 2005)。然而研究区以往的研究多局限于单一介质,并且大部分研究集中在沉积物和海水痕量金属的分布(柴松芳, 1998),很少见有孔隙水和生物体中痕量金属研究的报道,至于采用同站位多介质同采的技术方法来研究痕量金属的生物地球化学循环特征的研究更是无人问津。

胶州湾位于黄海的中部,北邻山东半岛,南与黄

海相连,呈长轴为 33.3 km 及短轴为 27.8 km 的椭圆形,水域面积近 300 km²。湾内平均水深为 6—7 m,最大水深分布于南部,为 64 m。湾口两端相距约 3 km,属半封闭的水文系统。胶州湾是青岛市重要的养殖基地,也是我国重点的经济港湾,随着城市化和工业化的进程,胶州湾接纳着从陆地输入的大量污染物质。其中主要污染物质之一是痕量金属,特别是痕量金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 等由于具有致癌、致畸和致突变的危害而受到特别的关注。据此 2003 年和 2004 年作者在胶州湾开展了底层水、孔隙水、表层沉积物和生物等多介质的地球化学调查,并测试了上述 7 项痕量金属。由于 Cu、Cd、Cr、As 和 Hg 等 5 个金属元素分别在另两篇论文中报道,本文将报道 Pb、Zn 在底层海水、孔隙水、表层沉积物、

* 国家自然科学基金项目, 40642009 号; 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室开放基金资助项目, MRE200803 号。叶思源, 博士, 研究员, E-mail: siyuanye@hotmail.com

收稿日期: 2008-08-15, 收修改稿日期: 2009-04-12

菲律宾蛤仔中的循环规律与特征,同时还研究了生物对 Pb、Zn 的浓缩、累积和放大效应,并提出了水-沉积物-生物系统中指示 Pb、Zn 污染的最佳介质。

1 样品采集与测试

于 2003—2004 年 6 月在胶州湾开展了 2 个航次的采样工作,在 64 个站位进行了采样,其中有 47 个站位获得了同站位多介质样品(图 1),即在每个站位分别采集底层水、孔隙水、沉积物和生物样品。其中生物样品均选取生长期为 2—3 年的菲律宾蛤仔的可食部分。采样方法引用鲁静等(2004)提出的方法,具体是:1)底层水取样采用 QCC10 型球阀式采水器,提取接近表层沉积物的底层水,水样用 1:1 的硝酸溶液酸化;2)沉积物的取样采用 0.05 m³ 曙光型采泥斗,采集表层 10—15 cm 处的沉积物;3)孔隙水是由冷冻后的沉积物经过离心分离得到的,用型号为 LXJ-II B 的低速大容量多管离心机以 3000 r/min 的速度离心 15 min 后取离心水,酸化后冷冻保存;4)菲律宾蛤仔

采用耙网获取,并选取足够数量的完好贝类样品存于冰箱或保温桶中。将现场采集的清洁海水淋洒在样品上,样品保持润湿状态,但不能浸入水中。

痕量金属 Pb、Zn 的化学测试分别是:沉积物加入浓 HNO₃ 和浓 HClO₄ 置于电热板上消解 2 h,然后用原子吸收石墨炉法测定,同时做试剂空白;水样痕量金属用 5 ml APDC 溶液混合后,再加 50 ml MIBK 振动 30 s,提取有机层溶液,用原子吸收光谱法测 Pb、Zn。水样中的 Fe、Mn 用等离子光谱法测得;生物样取其可食部分,捣碎匀浆、干燥磨碎,经湿法消化后,用无火焰原子吸收分光光度法测 Pb,用火焰原子吸收分光光度法测 Zn(GB17378.6-1998)。

2 结果和讨论

2.1 胶州湾水生系统化学背景

本文中作者虽聚焦于金属组分 Pb、Zn 的研究,但为了掌握研究区化学场背景的总体特征,作者对研究海区的水环境宏量组分、环境因子也进行了测试,

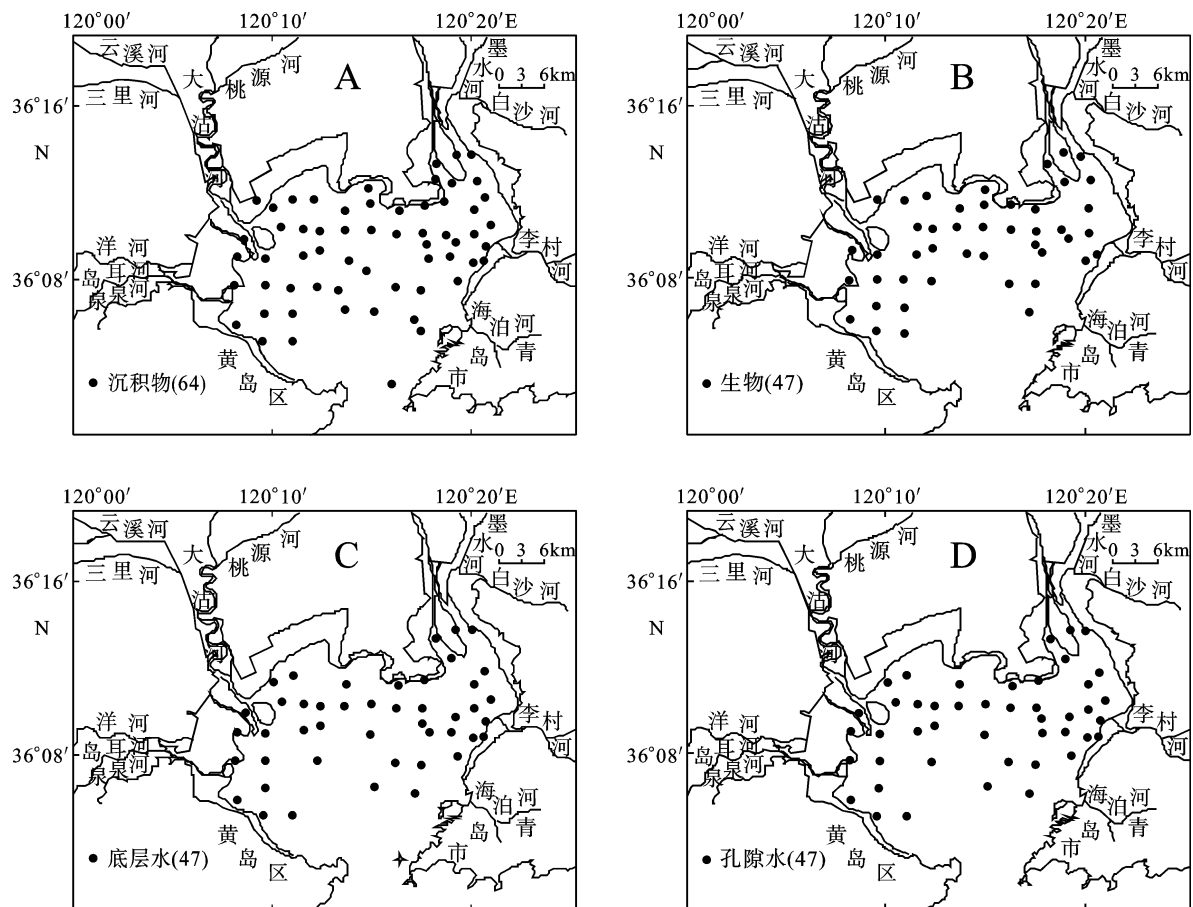


图 1 研究区不同介质实际取样站位图

Fig.1 Sampling station deployment

A. 沉积物; B. 生物; C. 底层水; D. 孔隙水

发现底层水和孔隙水的宏量组分的浓度顺序是相同的, 阴离子为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; 阳离子为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$ 。底层水与孔隙水相比, 底层水的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、TDS 浓度相对较高, 而孔隙水中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 离子显示出较高浓度。将底层水和孔隙水与平均海水比较(表 1), 除了 HCO_3^- 和 K^+ , 其它的宏量组分均保持在较低的浓度水平。据此认为, 近海不同层次水化学成分既相互联系, 又存在各自独立的特征, 底层水和孔隙水均受到陆源物质的影响, 且此影响在孔隙水中更显著。此外, 胶州湾周边

表 1 青岛近海化学成分特征

Tab.1 Chemical composition of bottom water, pore water and other seawater

分类	元素	底层水	孔隙水	平均海水 (冯士筭等, 1999)
宏量组分 (mg/L)	K^+	398.92	449.38	399
	Na^+	10066	10057.54	10770
	Ca^{2+}	377.92	388.38	412
	Mg^{2+}	1265.5	1209.46	1290
	Cl^-	18947	18275.38	19354
	SO_4^{2-}	2623.8	2630.38	2712
	HCO_3^-	167.62	741.08	140
	TDS	33847	33751.62	35077
环境因子 (mg/L)	COD	1.209		0.75*
	BOD	1.754		
	DO	4.734		9.52*

*底层水的 COD 和 DO 浓度与崂山区海域相比

河流流系输入了大量污染物质(如李村河水系的 COD 高达 5—49 mg/L)(牛清山等, 2006), 胶州湾水生系统中底层水的化学耗氧量(COD)偏高, 底层水中化学耗氧量(COD)的均值比崂山湾海域的表层海水的均值含量高近 1 倍, 相应地其溶解氧(DO)含量较崂山湾的含量偏低, 胶州湾底层水中生化需氧量(BOD)均值为 1.754 $\mu\text{g/L}$ 。

2.2 底层水

底层水 Pb 浓度值域为 0.56—2.20 $\mu\text{g/L}$, 均值为 0.99 $\mu\text{g/L}$, 而 Zn 浓度值域为 6.58—15.11 $\mu\text{g/L}$, 均值为 11.28 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。Pb 平面分布呈现东北向和西侧高(并超过一类海水标准 1 $\mu\text{g/L}$), 由此向其它海域递减(图 2A); Zn 浓度分布均未超出国家海水质量标准, 其平面上呈西侧近河口处高, 次高在东北方向近河口处(图 3A)。

从表 2 可知, 本次调查底层水 Pb、Zn 浓度远大于大洋水(Law *et al*, 1994; UNEP, 1993¹⁾; Bryan *et al*, 1992), 显示该海域受到污染是明显的。其中 Pb 浓度值分布于红海苏伊士海湾和中国大亚湾海域的同名组分浓度值范围内(丘耀文等, 2005; EI-Moselhy *et al*, 2004), 但其均值较小, 也小于 1998 年该区域的 Pb 浓度值, 说明胶州湾周边对 Pb 污染控制是有成效的。Zn 浓度与红海苏伊士海湾的浓度值相当(EI-Moselhy *et al*, 2004), 其均值略大于 1998 年该区域的 Zn 浓度值, 远小于大亚湾的同名组分浓度值(表 2)。

根据研究区底层水 29 组样品的宏量组分(K^+ 、

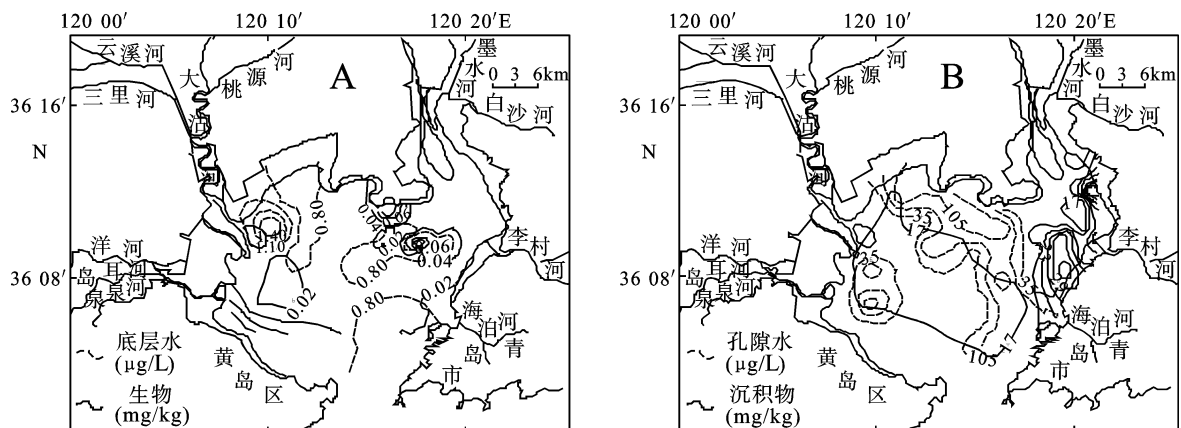


图 2 研究区各介质 Pb 含量分布等值线图

Fig.2 Contour distribution of Pb in study areas

A. 底层水和生物; B. 孔隙水和沉积物

1) UNEP, 1993. Preliminary assessment of the state of pollution of the Mediterranean Sea by zinc, copper and their compounds and proposed measures. Mediterranean Action Plan UNEP (OCA)/MED/WG.66/Inf.3, Athens 3—7 May 1993

Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 TDS 等)及比值系数 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 可知底层海水东部受李村河、墨水河和白沙河影响较大, 西部受大沽河、洋河、岛耳河、泉泉河影响较大。此外, 据底层水化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD_5)和溶解氧(DO)研究发现胶州湾的东部和北部比南部污染严重, 并且是受物源控制的(叶思源等, 2006)。底层水痕(微量组分 Fe、Mn、Pb 和 Zn 的浓度值变化较大, 极值间可以相差几倍或几个数量级。其中底层水微量组分 Fe 浓度值变化幅度为 0.05—2.02 mg/L, 最高值主要分布于大沽河、墨水河和李村河河口处, 由此三个高值区向其它海域减小; 底层水 Mn 浓度值变化幅度为 0.008—0.12 mg/L, 研究区存在两个高值区, 分别分布于大沽河和墨水河河口处, 由此向胶州湾中部减小, 与铁浓度场分布规律类似(叶思源等, 2006)。Fe、Mn 分布态势与 Pb、Zn 的次高值分布基本吻合。环境中的 Fe、Mn 是生物生长不可缺少的元素, 通常被认为是来自母岩风化作用的产物, 而不是来自现代污染物(Reimann *et al.*, 1998)。因此 Pb、Zn 最高值的分布与 Fe、Mn 最高值的分布发生偏差是合乎逻辑的, 而它们某些高值重叠的现象显示 Pb、Zn 与流域内岩石的风化作用造成背景值产生叠加作用。除了现代工业带给胶州湾 Pb、Zn 污染外, 花岗岩的风化产物对 Pb、Zn 也有一定的贡献。

2.3 孔隙水

孔隙水 Pb 浓度变化幅度为 0.83—136.90 $\mu\text{g/L}$, 均值为 23.89 $\mu\text{g/L}$, 其高值区的分布较底层水的 Pb 更集中于研究区中部, 即红岛前缘(图 2B), 与底层水的 Pb 分布规律相反, 其量值高 1—2 个数量级。孔隙水 Zn 浓度变化幅度为 8.20—140.10 $\mu\text{g/L}$, 均值为

41.15 $\mu\text{g/L}$, 其高值区的分布与同介质的 Pb 一致(图 3B), 但与底层水的 Zn 分布规律相反, 其量值比底层水的高 1—10 倍。

孔隙水又是海底底栖生物赖以生存的一个重要的环境因素, 是生物有效物质的搬运介质, 它可将溶解物质从溶解场所搬运到沉积场所, 尤其是在早期成岩阶段, 它比固体对物理、化学及生态环境的变化更为敏感和迅速, 是研究环境物质生物有效性的重要内容。与痕量金属的分布不同, 孔隙水宏量组分浓度, 从量值上虽然比上覆的底层水的高, 但它在空间上的分布仍然反映了河流输入的影响。如宏量组分 Cl^- 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 的空间分布揭示了该海湾受陆源输入影响(叶思源等, 2006)。但孔隙水 Pb、Zn 与其同介质的宏量组分及 Fe、Mn 的分布规律不同, 高值区更集中于研究区的中部, 不具河口控制的规律。由此不难推断孔隙水中的痕量金属组分更敏感地指示现今海底正在进行的“水岩作用”信息。孔隙水痕量金属组分浓度均比其上覆的底层水的高, 且分布态势相反。而宏(微)量组分的分布态势在孔隙水、底层水中又存在一致性。可以认为孔隙水是痕量组分的富集带, 孔隙水系统与其上覆的底层海水是两个相对独立又相互联系的系统。孔隙水与其上覆的底层海水的痕量金属形成较大的浓度差, 可向底层水持续地释放痕量金属, 造成沉积物中痕量金属的再次污染。

2.4 表层沉积物

Pb 浓度值变动幅度为 14.02—41.21 mg/kg, 均值为 20.25 mg/kg, 其高值区分布于东北方向的一些河口及泉泉河的东南向(图 2B)。表层沉积物 Zn 浓度值变动幅度为 26.5—100.11 mg/kg, 均值为 45.31 mg/kg, 其高值区除分布于东北向的河口地带, 还分布于

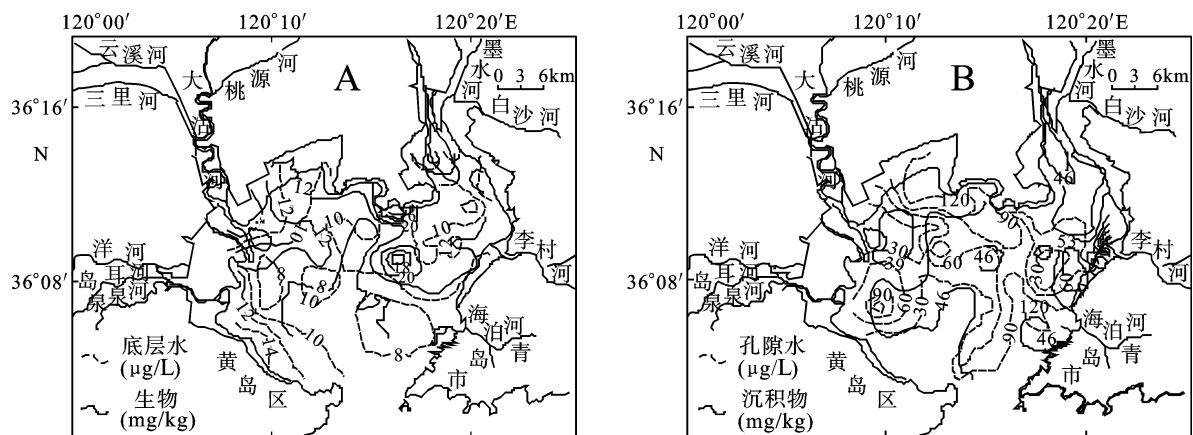


图 3 研究区各介质 Zn 含量分布等值线图

Fig.3 Zn in water, pore water, sediments, and marine organisms in the Jiaozhou Bay
A. 底层水和生物; B. 孔隙水和沉积物

红岛前缘和大沽河等区域(图 3B)。表层沉积物 Pb、Zn 浓度分布均未超出国标。

研究表层沉积物化学场特征对研究海水、孔隙水、特别是生物的化学特征是十分重要的。上述痕量金属组分的空间分布与有机碳浓度分布基本一致(叶思源等, 2006), 显示沉积物痕量金属受到胶州湾东部工业、生活污染水的污染。本次调查的 Pb 浓度均值接近红海苏伊士海湾和马来西亚西海岸的同名组分值(EI-Moselhy *et al.*, 2004; Yap *et al.*, 2002), 远低于美国太平洋沿海和中国的大亚湾的同名组分浓度值(丘耀文, 2005; James *et al.*, 1998)。但本调查区河口的最高值高达 41.21 $\mu\text{g/g}$ 。值得注意的是, 此次调查 Pb 的浓度远高于殷效彩等(2001)在 1997—1998 年测得的值域范围(表 2)。可以推断, 在过去的一段时间里胶州湾 Pb 没有得到有效的控制。与先前数据(殷效彩等, 2001)比较(表 2), 调查区 Zn 浓度有所降低, 且其均值远低于美国太平洋沿海和马来西亚西海岸的均值(Yap *et al.*, 2002; James *et al.*, 1998), 但仍高于红海的苏伊士海湾的同名组分浓度值(EI-Moselhy *et al.*, 2004), 应引起足够的重视(表 2)。

表层沉积物化学组分比底层水的同名组分高

3—4 个数量级, 沉积物对海水的清洁作用是明显的。Fe、Mn 与痕量金属 Pb、Zn 的分布在一定程度上受有机碳的控制, 显示了河口输入的信息。

2.5 生物(菲律宾蛤仔, *Ruditapes philippinarum*)

菲律宾蛤仔 Pb 浓度值变动幅度为 0.013—0.153 mg/kg, 其高值分布于东北方向(图 2A), 比沉积物低, 比孔隙水略高, 比底层水高 1—2 个数量级。在李村河口和红岛前海等海域局部有超国家一类贝类标准(0.1 mg/kg)现象。菲律宾蛤仔 Zn 浓度值变动幅度为 4.11—43.88 mg/kg, 其高值点分布于大沽河的东北边缘和沧口水道末梢两侧(图 3A), 并且超出国家一类贝类标准(20 mg/kg)。比沉积物的浓度低, 比孔隙水高约 10 倍, 比底层水高近 3 个数量级。

从总体来看, Zn、Pb 在生物体中的含量仅低于沉积物, 但远高于底层海水, 通常高数倍, 最高可达 3 个数量级。生物对痕量金属的富集作用是显著的。菲律宾蛤仔中 Zn 生物浓缩系数 $BCF(BCF=$ 某种元素在有机体中的浓度/某种元素在机体周围环境中的浓度, 本文中作者采用了底层水的浓度)值均值为 935, 而 Pb 生物浓缩系数均值为 36。有关 Pb、Zn 在生物体内的浓缩系数的差别, 应归咎于生物体中生物膜的

表 2 胶州湾水生系统过去的与现在的 Pb、Zn 浓度水平和其它环境相应介质的同名金属浓度
Tab.2 Pb and Zn levels in the Jiaozhou Bay and those in different marine environments

元素	地点	海水 ($\mu\text{g/L}$)	沉积物 ($\mu\text{g/g}$, 干重)	孔隙水 ($\mu\text{g/L}$)	生物 ($\mu\text{g/g}$, 湿重)
Pb	胶州湾以往的调查	1.23—12.51* 5.06	0.3—7.12 1.79(殷效彩等, 2001)		0.31—0.41* 0.35
	世界其它环境	0.02—0.07 (Law <i>et al.</i> , 1994)	20—30(USPHS, 1997 ¹⁾ 47.9(James <i>et al.</i> , 1998) 21.87 (Yap <i>et al.</i> , 2002)		0.3—1.31** 0.76** (Yap <i>et al.</i> , 2002)
	大洋水				
	大亚湾 (丘耀文等, 2005)	0.7—2.8 1.7	58		0.22—0.56 0.28
	红海苏伊士 (EI-Moselhy <i>et al.</i> , 2004)	1.84—2.57 2.14	13.90—28.34 22.06		1.15—4.00 2.14
	本次调查	0.56—2.20 0.99	14.02—41.21 20.25	0.83—136.90 23.89	0.01—0.15 0.03
Zn	胶州湾以往的调查	2.72—13.18* 7.57	35.48—181.49 102(殷效彩等, 2001)		5.55—7.21* 6.47
	世界其它环境	<1 大洋水 (UNEP, 1993; Bryan <i>et al.</i> , 1992)	<100 (UNEP, 1993; Bryan <i>et al.</i> , 1992) 160 (James <i>et al.</i> , 1998), 70.9(Yap <i>et al.</i> , 2002)		1.5—36.6** 14.6** (Yap <i>et al.</i> , 2002)
	大洋水				
	大亚湾 (丘耀文等, 2005)	43—67 55	112		16.8—20.3 18.4
	红海苏伊士海湾 (EI-Moselhy <i>et al.</i> , 2004)	8.13—23.24 11.92	4.26—23.68 13.52		60.24—108.74 80.82
	本次调查	6.58—15.11 11.28	26.50—100.11 45.31	8.20—140.10 41.15	4.11—43.88 11.91

注: 1.23—12.51 表示值域范围, 5.06 表示均值; *引自“青岛市近海水域环境调查报告”, 1999 年, 农业部黄渤海区渔业环境监测站青岛市海洋与水产局, 采样时间为 1998 年; **文献(Yap *et al.*, 2002)中的数据是干重浓度, 在此列出的数据是湿重浓度, 笔者根据多年的调查测试经验, 取贻贝的干湿比为 0.15 进行换算

特异性选择功能, 这种特异性选择使得生物对不同元素富集的程度不同。此次调查菲律宾蛤仔中痕量金属 Pb 的含量值略低于 1998 年测得的量值, 但 Zn 则较先前的高。从表 2 可知, 菲律宾蛤仔(Clam)Pb、Zn 浓度较红海苏伊士海湾、马来西亚西海岸和大亚湾的软体动物(gastropod)的同名组分浓度低(丘耀文等, 2005; EI-Moselhy *et al*, 2004; Yap *et al*, 2002), 这应归结于生物种类(species)的不同造成的差别。从上述平面分布显示, 痕量金属组分高值分布于环红岛前缘和泉泉河入海口等较粗沉积物分布区, 这一现象支持了笔者提出的有关生物有效性的观点, 即在有机碳含量高的地方(通过是细粒沉积物分布区), 伴随着硫循环作用, 痕量金属被沉积物捕获, 生物有效的痕量金属少。反之, 在粗粒沉积物分布区, 生物有效的痕量金属多(叶思源等, 2007)。美国太平洋沿海的调查资料也支持了上述的观点(James *et al*, 1998)。

2.6 底层水、孔隙水、沉积物与生物间的线性回归分析

以上剖析了底层水、孔隙水、沉积物及生物等多层次介质中痕量污染元素的空间分布规律, 生物体中痕量金属组分的分布并未呈现与其所依存的介质中痕量金属组分化学场一致性, 那么, 痕量元素在生物体类的富集究竟与其所处介质的化学组分关系如何? 是哪种介质化学组分对生物富集的贡献较大? 作者通过在胶州湾所采集的 47 组同站位多介质同采的资料进行多元回归分析法来论证。多元回归分析是指根据多个自变量的最优组合建立回归方程来预测因变量的回归分析。在回归分析中, 采用强行进入法(即所选择的自变量全部进入回归模型)来确定变量之间的定量关系(表 3)。

由表 3 可以看出痕量组分在各介质中的线性回归不明显, 判定系数 R^2 的值均较小。虽然各介质的

表 3 痕量元素在不同介质的线性回归方程

Tab.3 Equation of linear regression on trace metal in bottom water, pore water, sediment and marine organisms

元素	回归方程	判定系数 R^2
Pb	生物 = 13.07 底层水 - 5.17 × 10 ⁻² 孔隙水 - 6.36 × 10 ⁻⁴ 沉积物 + 1.34 × 10 ²	0.205
Zn	生物 = -5.02 × 10 ³ 底层水 - 1.77 × 10 ² 孔隙水 + 1.01 沉积物 + 7.45 × 10 ³	0.284

注: 判定系数 R^2 体现了回归模型所能解释的因变量变异的百分比, R^2 越大, 其线性关系越明显。当 $R^2 = 1$ 时, 表示所有的观测点全部落在回归直线上; $R^2 = 0$, 表示自变量与因变量无线性关系

Pb、Zn 浓度线性关系不明显, 但不同介质对生物体痕量组分的贡献是不同的, 其贡献的大小主要考虑回归分析中的标准化回归系数(表 4)。从表 4 中对比三种介质中标准化回归系数, 孔隙水的绝对值相对较高, 分别为 0.340、0.531。可以看出孔隙水对生物体中 Pb、Zn 富集的贡献较大。

表 4 不同介质的标准化回归系数
Tab.4 Standardized coefficients in bottom water, pore water and sediment

元素	标准化回归系数		
	底层水	孔隙水	沉积物
Pb	0.284	-0.340	-0.120
Zn	-0.494	-0.531	0.197

注: 标准化回归系数绝对值越大, 表明其贡献越大

3 结论

根据水生系统中底层海水、孔隙水、沉积物和生物化学特征及化学场的分布及其多元回归分析, 可做出如下的总结:

(1) 从沉积物、底层水化学场的空间分布态势可看出, 痕量金属在该二介质中的分布主要受控于物源的分布, 且具有河口富集的特征, 高值主要分布于胶州湾东北部河口, 次高值分布于西部河口。

(2) 孔隙水痕量金属化学场相对底层水来说发生了变异, Pb、Zn 均不具河口高值的特征, 因此可推断孔隙水系统与其上覆的底层海水系统既有联系又存在相对独立性, 孔隙水化学是水岩相互作用的产物, 它受控于界面化学平衡及边界场两相物质转移量的参数条件。由此作者提出孔隙水痕量金属化学对指示海底表层沉积物发生的“水岩相互作用”较宏(微量)组分更为敏感, 孔隙水痕量金属化学更有意义。另外, 孔隙水与其上覆的底层海水的痕量金属形成较大的浓度差, 可向底层水持续地释放痕量金属, 这是沉积物痕量金属二次污染的第一步, 是危险的地球化学信息。

(3) 生物体痕量金属在空间上分布却主要分布于沧口水道的末端和环红岛的海域以及泉泉河的入海口处, 由此可推测生物体痕量金属浓度值与所处环境同名金属组分浓度总量无关。生物体对环境物质的吸收具有选择性。

(4) 在水-沉积物-生物系统中, 沉积物是各痕量元素的富集地, 据此, 认为沉积物可较好地作为水生系

1) USPHS, 1997. Toxicological Profile on CD-ROM Agency for Toxic Substances and Disease Registry

统中 Pb、Zn 污染的指示剂。此外生物对痕量金属富集、放大和累积效应是明显的, Pb、Zn 浓缩系数分别为 36 和 935, 并且在局部海域生物体中的 Pb 和 Zn 浓度存在超出国家贝类一类标准的现象。

(5)通过回归分析揭示了孔隙水对生物体中 Pb、Zn 富集的贡献较大。

参 考 文 献

- 牛清山, 亓 靓, 2006. 影响胶州湾海域海水水质的主要污染源分析——李村河及其主要支流流域水质现状评价. 海岸工程, 25(3): 50—59
- 丘耀文, 颜 文, 王肇鼎等, 2005. 大亚湾海水、沉积物和生物体中重金属分布及其生态危害. 热带海洋学报, 24(5): 69—76
- 冯士筌, 李凤岐, 李少菁等, 1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 120—499
- 叶思源, 周永青, 丁喜桂, 2006. 胶州湾水生系统中痕量金属组分场态特征. 中国地质, 33(5): 1107—1116
- 叶思源, 钟少军, 丁喜桂, 袁红明, 2007. 椒江河口沉积物 As、Hg 黄铁矿矿化程度及其生物有效性. 地质论评, 53(4): 498—505
- 柴松芳, 1998. 胶州湾海水总汞含量及其分布特征. 黄渤海海洋, 16(4): 60—63
- 殷效彩, 杨永亮, 余季金等, 2001. 胶州湾表层沉积物重金属分布研究. 青岛大学学报, 14(1): 76—80
- 鲁 静, 原晓军, 姜竹田等, 2004. 近岸海域生态地球化学评价方法及内容探讨——海底沉积物-水-底栖生物系统调查评价. 中国地质, 31(增刊): 45—50
- Bryan G W, Langston W J, 1992. Bioavailability, Accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries :a review. Environ. Pollut, 76: 89—131
- El-Moselhy K M, Gabal M N, 2004. Trace metals in water, sediments and marine organisms from the northern part of the Gulf of Suez, Red Sea. Journal of Marine Systems, 46(1—4): 39—46
- James P M, Paul A R, Robisch R C *et al*, 1998. Elements in fish and sediment from the Pacific coast of the United States. Marine Pollution Bulletin, 37(1—2): 56—66
- Law R J, Waldoock M J, Allchin C R *et al*, 1994. Comtaminants in seawater around England and Wales :results from monitoring surveys 1990—1992. Mar Pollut Bull, 28(11): 668—675
- Morel F M M, Price N M, 2003. The biogeochemical cycles of trace metals in the Oceans. Science, 300(5621): 944—947
- Reimann C, Caritat P D, 1998. Chemical elements in the environment : factsheets for the geochemist and environmental scientist. Germany: Springer, Springer-verlag Berlin Heidelberg, 42—378
- Szeffer P, Wolowicz M, Kusak A *et al*, 1999. Distribution of mercury and other trace metals in the cockle *Cerastoderma glaucum* from the Mediterranean Lagoon Etangde Thau. Arch Environ Contam Toxicol, 36: 56—63
- Yap C K, Ismail A, Tan S G *et al*, 2002. Correlations between speciation of Cd, Cu, Pb and their concentrations in total soft tissue of green-lipped mussel *Perna viridis* from the west coast of Peninsular Malaysia. Environment International, 28: 117—126

BIOGEOCHEMICAL CYCLES AND BIOACCUMULATION OF PB AND ZN IN JIAOZHOU BAY, CHINA

YE Si-Yuan^{1,2}, YUAN Xiao-Jun^{1,2}, DING Xi-Gui^{1,2}, LIU Qiang³, GONG Shao-Jun⁴

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, 266071;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao, 266071; 3. Jilin University, Changchun, Jilin, 130021;

4. China University of Geosciences, Beijing, 100083)

Abstract Concentrations of Pb, Zn and other environmental elements were determined in bottom waters, pore waters, sediments, and clams collected from 47 stations in the Jiaozhou Bay, Qingdao City, China in summer 2003 and 2004. The trace metals contents were the highest in surficial sediment over those in bottom water, pore water, and organisms. Bioaccumulation in clam was obvious for having factors at 36 for Pb, and 935 for Zn. Lately, the amounts of trace metals in both bottom water and sediments were mainly controlled by the proximity to the estuary, as high concentrations were generally found in estuaries. In this study, high value area of trace metals in sediment occurred mainly in the east of the Jiaozhou Bay; and high contents of the metals Pb, Zn in pore water was mainly limited in hydro-dynamically quiet area in the western front of Hongdao due to low exchange rate. However, distributions of Pb and Zn in clam are different from the above-mentioned scenario, indicating that trace metals in clams were irrelevant with metal concentrations in ambient sediment or seawater. Therefore, bioaccumulation of trace metals was not simply related with the ambient concentration, but with the chemical forms of metal in sediment or water. Regression analysis shows that pore water contributed more to the enrichment of Pb, Zn in the organism.

Key words Pb, Zn, Bottom water, Pore water, Sediment, Clam, the Jiaozhou Bay