

点源污染对胶州湾海水体系中不同形态 重金属富集的影响

李 玉^{1,2}, 俞志明^{1,*}, 宋秀贤¹, 曹西华¹

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 淮海工学院, 江苏连云港 222005)

摘要:对胶州湾水体中悬浮颗粒物、柱状沉积物和底栖生物中重金属的污染与富集状况进行了分析与评价。结果表明:大量未处理的废水污水的排放入海与陆源物质向外海的有限扩散直接导致了点污染源对水体及生物体中重金属的富集。悬浮物中重金属的富集已明显受到人为因素的影响;柱状样的人为影响因子表明河口区沉积物的污染状况较其它海区重;胶州湾底栖生物体内重金属的含量与离污染源的远近有关系,底栖生物菲律宾蛤仔对重金属 Cd 的富集能力大于其它金属。

关键词:点源污染; 悬浮颗粒物; 重金属; 生物富集; 胶州湾

文章编号:1000-0933(2009)10-5592-08 中图分类号:X171,X52 文献标识码:A

Influence of point sources on heavy metal accumulation in different apartments of Jiaozhou Bay

LI Yu^{1,2}, YU Zhi-Ming^{1,*}, SONG Xiu-Xian¹, CAO Xi-Hua

¹ Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

² Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5592 ~ 5599.

Abstract: The pollution and enrichment states of heavy metals in suspended particulate matter (SPM), sediment core and benthic organisms were analyzed and evaluated in Jiaozhou Bay. Results showed that: (1) The discharge of a large amount of untreated effluents and the insufficient diffusion of the terrestrial contamination to outer bay directly led to point source contamination, which caused the heavy metal enrichment in water and in benthic organism; (2) Anthropogenic activities significantly affected the heavy metals enrichment in SPM. The anthropogenic factors (AF) of sediment cores showed that the pollution at the estuary was more serious than that of other investigated areas; (3) The concentration of heavy metals in benthic organism had close relationship with the distance from the sampling site to the pollution sources. *Venerupis philippinarum*, a benthic organism, was estimated to have higher accumulating capacity to cadmium as compared to any other tested heavy metals.

Key Words: point sources; suspended particulate matter; heavy metal; bio-accumulation; Jiaozhou Bay

半包围型海湾扩散污染物的能力往往比较低,容易受到人类活动的影响,排放入其中的污染物很难向外海扩散而主要集中在排放源邻近海区,导致水质、沉积物和生物体的污染^[1,2]。这些污染物(重金属、合成有机物及氯化物)主要来源于点源污染,包括受污染的河流、居民生活废水和工农业污水排放口等^[3]。胶州湾

基金项目:国家 973 资助项目(2007CB407305); 中国科学院重要方向资助项目(KZCX2-YW-208); 国家自然科学基金资助项目(40576058)

收稿日期:2009-04-03; **修订日期:**2009-06-22

致谢:感谢中国科学院海洋研究所测试中心的林强、俞立东老师在样品测试过程中提供的帮助,同时也感谢本课题组母清林、吴继法同学协助采样

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyu@ms.qdio.ac.cn

系一典型的半封闭型浅水海湾,为青岛市(人口 7×10^6)所包围,湾口仅宽 2.5 km,以此与黄海相通。入湾河流海泊河、李村河、莱山河等常年无自然径流,中、下游已成为市区工业废水和生活污水的排污沟渠。对胶州湾沉积物及底栖生物体中重金属的含量已有报道^[4,5]。表层沉积物中 Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Cr, As 已有不同程度的污染富集,且明显受到点源污染的影响^[6],但鲜见有关点源污染对海湾中悬浮颗粒物、柱状沉积物、生物体中重金属富集影响状况的评价。针对该不足,本文测定了胶州湾悬浮颗粒物、柱状沉积物及底栖生物(菲律宾蛤仔)中金属元素(Zn, Pb, Cd, Cu, Hg, As, Cr, Al, Fe, Mn)的含量并计算了富集因子,以期阐明胶州湾点源污染对不同形态金属元素污染及蓄积的影响,为限制陆源排污,有效保护海湾环境提供基础依据。

1 材料与方法

本次调查在胶州湾布设的采样站位如图 1 所示。采集活动在 5 个断面进行,水样用聚乙烯桶采集,回到实验室取 1000mL 水样用事先已称重的滤膜(经过稀酸浸泡,孔径 $0.45 \mu\text{m}$,直径 60mm)抽滤,过滤后的滤膜在 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内烘干 6 ~ 8h,然后再放入硅胶干燥器内冷却 6 ~ 8h 之后称重,并根据有关公式计算出海水悬浮物含量(mg/L)。悬浮颗粒物在 105°C 烘箱内烘干,用氢氟酸-硝酸-高氯酸体系进行微波消解待测。在 Y1、A3、B2 站采集表层 0 ~ 2cm 泥样后取生物样品(现场用海水洗净),在 B6、C2、D4、D6 站用柱状采泥器采集 90cm 长的柱状泥样,现场切分为上层(0 ~ 10cm)、中层(10 ~ 80cm)和下层(80 ~ 90cm),泥样和生物样皆置于聚乙烯袋中, $0 \sim 4^\circ\text{C}$ 下保存,回实验室待测。将泥样在 80°C 烘箱内烘干 24h,用玛瑙研钵将其研碎并全部通过 160 目筛,充分混匀后取样以供测定。生物样撬壳取出软体,称其湿重,而后放入烘箱并在 80°C 脱水干燥,待恒重称其干重。将干样用玛瑙研钵研成细粉,保存于干燥器内备用^[5](为避免样品被玷污,取样及碎样等工具及器皿均先净化处理)。Pb, Cd 用石墨炉原子吸收分光光度仪测定^[7]; Cu, Cr, Zn, Fe, Mn 以火焰原子吸收分光光度法测定, Hg 用冷原子吸收法测定^[8]; Al 用等离子体发射光谱仪测定^[9], As 以原子荧光光谱法测定^[10]。沉积物消解方法见《海洋监测规范》^[11]。

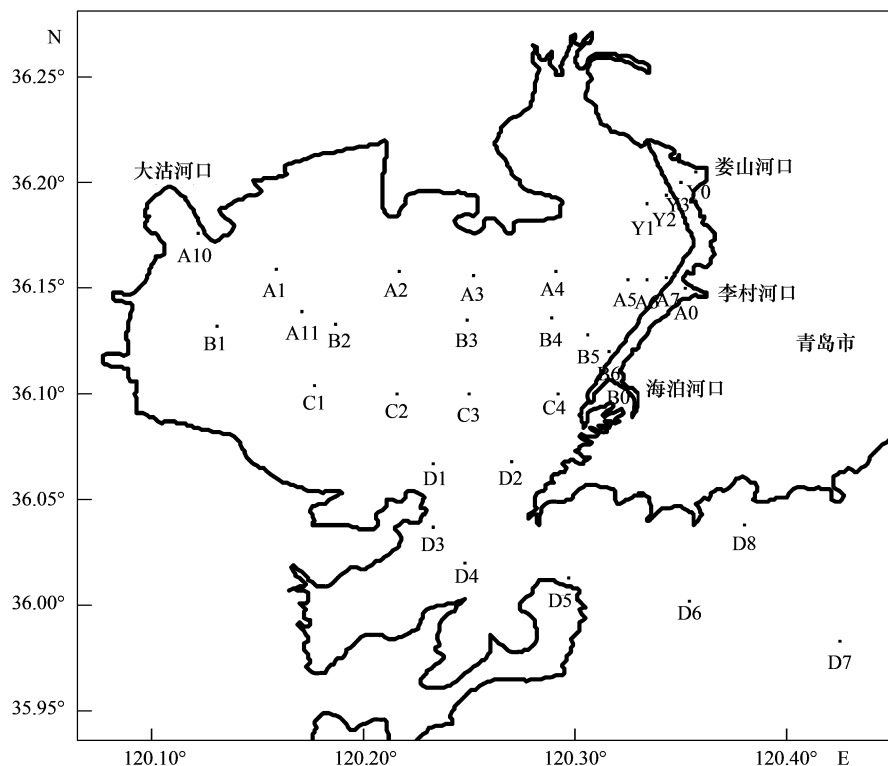


图 1 胶州湾采样站位分布图

Fig. 1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

2 结果与讨论

2.1 点源污染对悬浮颗粒物中重金属含量分布的影响

本研究中悬浮态 Cu 的浓度范围在 26.84 ~ 203.00 mg/kg 之间,均值为 69.54 mg/kg;Zn 在 0.77 ~ 447.00 mg/kg 之间,均值为 162.16 mg/kg;Pb 的浓度范围在 0.36 ~ 160.00 mg/kg 之间,均值为 67.32 mg/kg;Cd 在 0.027 ~ 19.81 mg/kg 之间,均值为 3.31 mg/kg;Cr 在 106.00 ~ 6914.01 mg/kg 之间,均值为 906.81 mg/kg;Mn 在 97.90 ~ 1879.02 mg/kg 之间,均值为 1176.63 mg/kg。与中国长江口^[12]、杭州湾^[12]悬浮体中重金属含量相比,胶州湾颗粒态的 Cu 含量与长江口悬浮体中 Cu 的含量相当,高于杭州湾。胶州湾颗粒态 Zn 的含量 162.16 mg/kg 远远低于 Homebush 湾^[13]悬浮体中 Zn 的含量 600.60 mg/kg,而 Cr 的含量则远远高于 Homebush 湾。胶州湾悬浮体中重金属 Cd 的含量相对来讲比较高,平均值达到 3.31 mg/kg,为长江口悬浮体中 Cd 浓度的 2 倍,而比杭州湾悬浮体中 Cd 的浓度高出数十倍。胶州湾颗粒态 Pb 的含量高于长江口和杭州湾,但低于澳大利亚 Port Jackson 河口的 Homebush 湾。图 2 为本研究中胶州湾海域悬浮颗粒物中金属含量的空间分布图。从各个站位上的浓度水平来看,悬浮体中重金属含量在全湾范围内分布并不均衡,多数重金属浓度高值主要出现在胶州湾东部海泊河口、李村河口、娄山河口及青岛港邻近海域,明显的表明了点源污染对其的影响。Cu, Zn, 和 Mn 的浓度从河口到湾内有降低的趋势。在 Tamar, Beaulieu 和 Scheldt 等河口海域中颗粒态 Zn 也有相似的行为^[14-16],主要是由于河流所携带的高金属含量的物质与海洋低金属含量的沉积物相混合的结果。重金属 Pb 在湾内 B3 站出现浓度高值,除了受到海泊河排污的影响外,此海域的悬浮体含量较低也是一个主要原因。

为了评价点源污染对近岸和河口水域悬浮物质的影响,许多方法被用来判断自然界金属元素浓度的变异。研究者最常用的方法是把铝元素作为标准,其它元素的检测浓度与之相比较来进行说明问题,因为铝在自然界中富集量较大,且和人为输入量无明显相关^[17]。根据这个方法可知,一个调查区域中的样品,来源于自然因素的沉积态金属元素和铝元素的比值应该近似为常数。表 1 为本研究中胶州湾表层海水中悬浮颗粒物的含量及悬浮物中金属元素浓度与铝元素浓度的比值。从结果中可以看出,在所有监测站位 7 种金属元素和铝元素的浓度比值都不是常数,表示胶州湾海域悬浮颗粒态金属的来源除了自然因素外,人为污染是导致其富集的主要途径。当然,水体中颗粒态金属浓度受悬浮体含量大小的影响也是非常大的。结果表明,悬浮体中所有金属都与水体中悬浮体的含量呈负相关,其中有些金属如 Pb, 和悬浮体的相关性为显著性相关(图 3)。这和人^[18]的研究结论相吻合,即人为污染对悬浮颗粒物的贡献在高悬浮体水域会被自然因素掩盖,而当悬浮体含量降低时,人为因素就变得显著了。

表 1 胶州湾水体中悬浮颗粒物的浓度 (mg/L) 及悬浮态金属元素与铝元素的浓度比值

Table 1 Total suspended matter (TSM) and ratios of particulate trace metal concentrations/ Al concentrations from Jiaozhou Bay

站位 Station	SS	Cu/Al	Zn/Al	Pb/Al	Cd/Al	Cr/Al	Fe/Al	Mn/Al
A10	86.41	29.52	0.79	0.37	0.028	724.79	0.10	466.00
A1	26.70	17.61	1.88	21.71	0.16	50.48	0.062	267.10
A3	16.12	7.98	23.69	9.79	0.099	26.67	0.50	271.25
A0	28.40	6.62	24.72	9.03	0.019	0.45	368.68	192.72
A5	7.53	13.50	20.23	9.09	0.72	57.59	0.58	359.93
B0	8.11	32.90	116.14	14.74	0.55	272.59	0.32	31.58
B1	56.80	4.85	13.43	6.00	0.31	45.50	0.36	136.64
B3	6.90	8.38	20.77	23.24	0.22	50.71	0.51	294.02
C3	8.12	9.86	25.65	13.32	2.41	21.64	0.45	250.71
D5	2.50	12.26	23.77	23.77	0.47	1027.34	0.82	279.20
Y0	53.01	49.15	108.23	12.13	1.55	44.05	0.16	184.52

2.2 柱状样中重金属的含量与富集

柱状样能够反映特定海区地球化学的演变。人类活动等非自然因素对柱状沉积物的影响可以用人为影

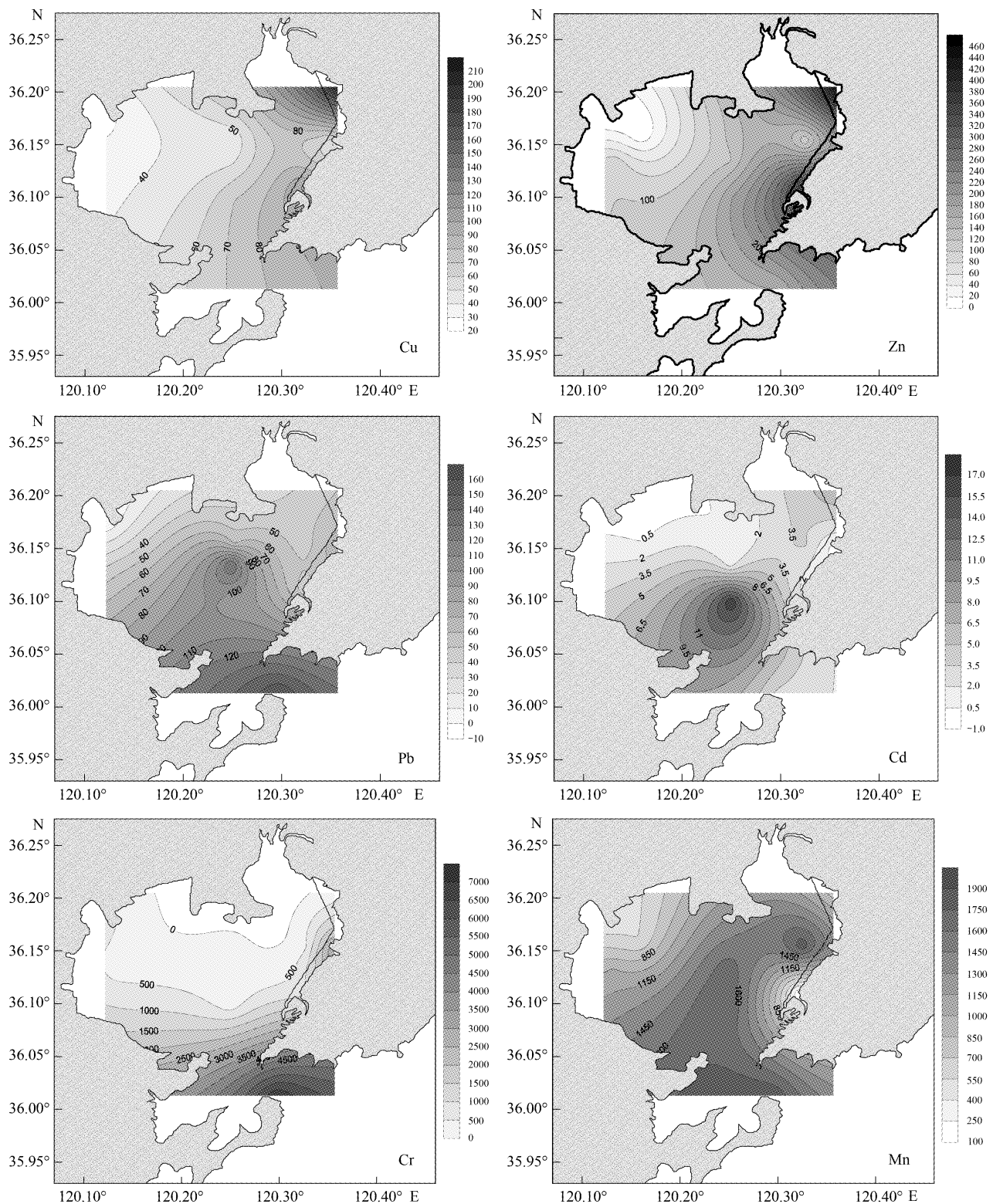


图2 胶州湾海域悬浮体中金属含量空间分布图

Fig. 2 The distribution of metals in SPM from Jiaozhou Bay

响因子(anthropogenic factor, AF)来描述表征。 AF 可以量化柱状沉积物因受点源污染影响而发生的改变^[19], 计算公式如下: $AF = M_s/M_d$ 。式中 M_s 代表柱状样最上层沉积物中金属元素的平均浓度, M_d 代表柱状样最下层沉积物中金属元素的平均浓度。本研究分别在河口(B6)、湾内(C2)、湾口(D4)及湾外(D6)海区各采集了1

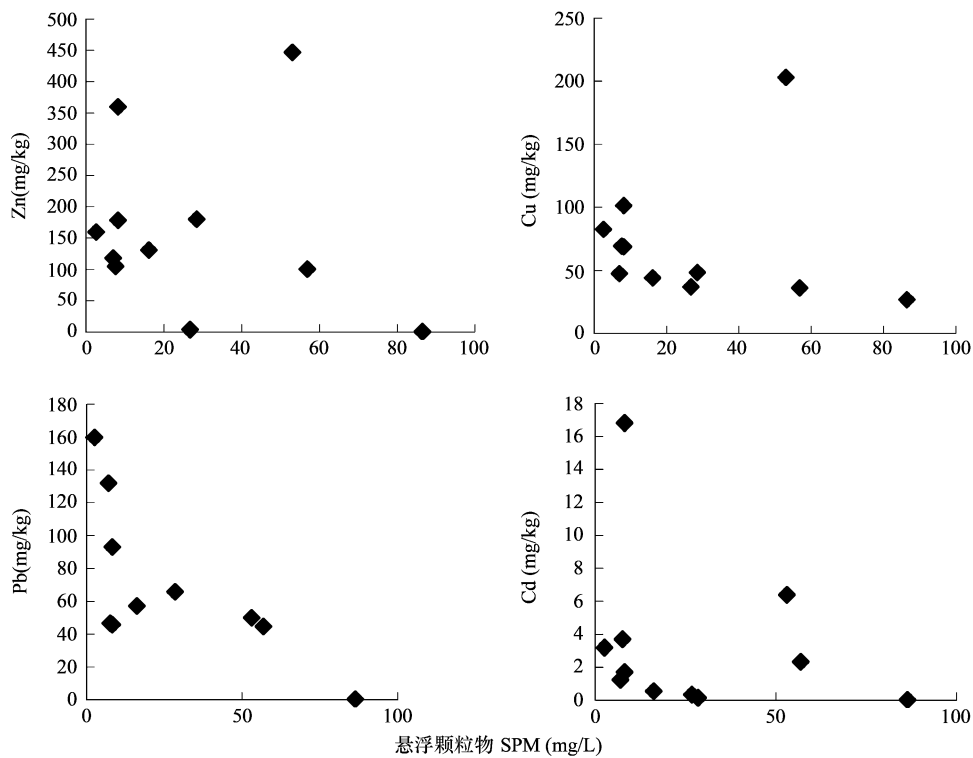


图3 胶州湾海域颗粒态金属浓度随悬浮体含量变化关系图

Fig. 3 Changes in total particulate-bound trace metal concentrations in relation to SPM concentrations in Jiaozhou Bay

个柱状样,分层测定了其中重金属的含量(表3),并根据上述公式计算了柱状沉积物中重金属的 AF 值(表4),以此来说明点源污染对柱状沉积物中重金属含量与富集的影响。从表3中可以看出,在湾口B6站,柱状样下层沉积物中重金属Cu,Zn,Pb,Cd,Hg,Cr的含量与其它站位相差不大,但上层沉积物中这些重金属的含量则明显高于其它站。柱状沉积物中Cu,Zn,Pb,Cd,Hg,Cr的这种空间分布特点表现出了点源污染对柱状样的影响痕迹。由表4可知,除砷外B6站各金属的人为影响因子值都大于其它各站。Szefer^[19]指出,金属元素的 AF 值小于3说明柱状沉积物中此种金属为中度富集,大于3则为严重富集。所以总体上看,胶州湾柱状沉积物中大多数重金属属于轻度到中度富集,但B6站的Cu、Zn、Cd、Hg和D4站的Hg则富集比较严重($AF>3$)。

表3 柱状沉积物中重金属的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Concentrations of heavy metals in sediment cores

站位 Station		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	Fe	As	Mn	Al ₂ O ₃
B6	上层 Surface layer	79.78	150.30	34.91	0.16	128.80	5.79	3.13	4.19	269.80	8.49
	中层 Middle layer	68.18	117.91	29.31	0.087	123.21	1.01	3.00	3.12	307.40	7.25
	下层 Deeper layer	18.34	44.07	19.30	0.047	55.00	0.87	2.09	3.69	229.21	6.61
C2	上层 Surface layer	33.11	84.31	26.30	0.013	88.50	0.79	3.11	5.18	549.70	9.05
	中层 Middle layer	31.71	100.51	31.64	0.011	84.01	0.26	2.78	9.71	534.71	8.95
	下层 Deeper layer	30.80	141.30	23.10	0.023	75.68	0.87	2.88	5.56	519.24	8.42
D4	上层 Surface layer	20.66	42.49	21.62	0.013	38.70	0.62	2.15	4.19	343.20	6.71
	中层 Middle layer	25.22	52.00	19.24	0.026	81.12	1.39	2.33	4.28	386.84	6.84
	下层 Deeper layer	18.89	40.87	18.71	0.014	68.66	0.20	1.91	4.91	299.72	6.33
D6	上层 Surface layer	25.69	47.80	19.10	0.014	83.79	1.16	2.43	5.08	512.60	6.95
	中层 Middle layer	29.16	88.97	21.91	0.013	89.59	0.80	2.75	6.31	505.80	7.77
	下层 Middle layer	32.40	40.95	20.24	0.012	93.94	1.29	2.69	4.37	491.31	7.98

表 4 胶州湾柱状沉积物中重金属的人为影响因子 *AF*

Table 4 Anthropogenic factors for heavy metals of sediment cores from Jiaozhou Bay

站位 Station	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	Fe	As	Mn	Al ₂ O ₃
B6	4.35	3.41	1.81	3.47	2.34	6.63	1.50	1.14	1.18	1.28
C2	1.08	0.60	1.14	1.17	0.91	0.91	1.08	0.93	1.06	1.07
D4	1.04	1.04	1.16	0.93	0.56	3.06	1.12	0.85	1.14	1.06
D6	0.79	1.17	0.94	1.17	0.89	0.90	0.90	1.16	1.04	0.87

2.3 点源污染对底栖生物体内富集重金属的影响

用测定双壳类软体动物的痕量金属含量评述水域生态系统的污染状况的方法已被广泛采用,国际上已有许多学者以贻贝、牡蛎等双壳类软体动物作为指示生物去研究某些海区的重金属污染情况^[20]。本研究采集沉积物的同时,在 Y1、B2 和 A3 三个站采集底栖生物菲律宾蛤仔,测定其肉体的重金属含量,并用生物-沉积物富集因子(biota-sediment accumulation factors, *BSAF*)来评价底栖生物体内和沉积物中重金属含量的平衡关系^[21]。计算公式如下: $BSAF = C_x/C_s$ 。式中 C_x 和 C_s 分别代表生物体中和沉积物中金属元素的平均浓度。由表 5 可见,Y1 站生物体内大多数金属元素的含量高于 B2 站及 A3 站,此结果与上述胶州湾水体中各金属的来源相对应,即胶州湾底栖生物体内重金属的含量与离污染源的远近有关系。从各金属元素的 *BSAF* 值来看,菲律宾蛤仔对镉的富集因子最高,从河口到湾内分别为 6.26、3.47、2.07,平均值为 3.93,而其它重金属的 *BSAF* 值则都接近 1 或小于 1。*BSAF* 值小于 1 说明相对于沉积物中重金属的浓度水平生物体富集可利用型重金属的能力较差,因此可以说,胶州湾底栖生物菲律宾蛤仔对重金属镉的积累能力比对其它金属强。

刘明星等^[5]认为,虽然影响胶州湾菲律宾蛤仔的痕量金属含量变化的因素很多,但环境的影响是首要的。Y1 站位于娄山河口,一方面是工业及生活排污直接影响了生物体内重金属的吸收,另一方面是河水把淤积在河床上的污物冲起,使悬浮体的金属浓度增加,由此使以悬浮体作为饵料的蛤仔的体内金属浓度也相应增加。

表 5 生物体内重金属含量及生物-沉积物富集因子 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Concentrations of heavy metals in organisms and their biota-sediment accumulation factors

金 属 Heavy metal	Y1		B2		A3	
	<i>EC</i> _{生物体}	<i>BSAF</i>	<i>EC</i> _{生物体}	<i>BSAF</i>	<i>EC</i> _{生物体}	<i>BSAF</i>
Cu	18.85	0.55	8.23	0.47	11.34	0.45
Zn	82.00	0.74	53.22	0.66	46.48	0.57
Pb	0.57	0.012	0.32	0.013	0.71	0.024
Cd	0.62	6.26	0.67	2.07	0.62	3.47
Hg	0.99×10^{-3}	0.011	0.51×10^{-3}	0.021		
Fe	1555.00	0.088	1130.00		2012.00	0.11
As	1.19	0.046	1.35		1.26	0.040
Mn	47.00	0.090	29.43		55.67	0.13

Owen 和 Sandhu^[22]指出判断半包围型海湾能否造成污染主要取决于工业废水与生活污水的排放和细沉积物扩散之间的平衡。近年来,尽管在胶州湾东部河流的入海处建成了大型的污水处理厂,但每年仍有数千万吨未经处理的废水污水排放入海。而影响胶州湾海水运动的主要因子是潮流,且湾内涨潮流流速大于落潮流流速(差值为 10.7cm/s)。因此,涨潮流不但阻止了陆源物质的向外海扩散,而且能将沿途的一部分早期沉积下来的细粒沉积物搅起,顺流而上,带至湾顶水动力条件较为稳定的地区沉积,加大了那里的沉积速率,以致能通过湾口输到黄海的陆源物质甚少^[23]。所以,污水废水的大量排放与细沉积物的有限扩散造成了胶州湾东部局部海区的污染。黄海的潮波经过狭窄的薛团海峡传入湾内后,分别沿 3 个水道向湾顶扩散,基本上具有往复流的性质,从而使河流输入湾内的物质主要沿潮流传播的方向扩散,而不利于海湾东西两侧的物质

交换。由此出现了分析中悬浮物、沉积物与生物体对重金属的富集主要在点污染源邻近海区的结果。

3 结论

胶州湾的点源污染主要来自被工农业废水与生活污水污染的河流及受海事影响的青岛港,大量未处理的废水污水的排放入海及陆源物质向外海的有限扩散是造成胶州湾污染的主要因素。胶州湾东部的主要点污染源对悬浮物中重金属造成了一定程度的富集。河口区柱状样的人为影响因子高于其它海区,大多数重金属属于轻度到中度富集,B6 站的 Cu、Zn、Cd、Hg 和 D4 站的 Hg 则富集比较严重。胶州湾底栖生物体内重金属的含量与离污染源的远近有关系,菲律宾蛤仔积累重金属镉的能力比积累其它金属能力强。

References:

- [1] Cobelo-García A, Prego R. Influence of point sources on trace metal contamination and distribution in a semi-enclosed industrial embayment: the Ferrol Ria (NW Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60: 695—703.
- [2] Dassenakis M, Adrianos H, Depiazi G, Konstantas A, *et al.* The use of various methods for the study metal pollution in marine sediments, the case of Euvoikos Gulf, Greece. *Applied Geochemistry*, 2003, 18: 781—794.
- [3] Zago C, Giblin A E, Bergamasco A. Changes in the metal content of surficial sediments of Boston Harbor since the cessation of sludge discharge. *Marine Environmental Research*, 2001, 51: 389—415.
- [4] Zang L J, Wang G, Yao D, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in the Licun River Estuary, Jiaozhou Bay, Qingdao. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2003, 17(1): 8—14.
- [5] Liu M X, Bao W Y, Zhang S L. The seasonal variation of some trace metals in the *Ruditapes Philippinus* in Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983, 14, 22—29.
- [6] Li Y, Yu Z M, Cao X H. Distribution and enrichment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36: 580—589.
- [7] Bay S M, Zeng E Y, Lorenson T D, *et al.* Temporal and spatial distributions of contaminants in sediments of Santa Monica Bay, California. *Marine Environmental Research*, 2003, 56: 255—276.
- [8] Huang H R. Distribution and transfer of some heavy metallic and other elements in the Bohai Bay. *Studia Marine Sinica*, 1988, 29: 191—210.
- [9] Leivuori M. Heavy metal contamination in surface sediments in the gulf of Finland and comparison with the gulf of Bothnia. *Chemosphere*, 1998, 36: 43—59.
- [10] Qiao Y M, Huang C J, Lin C P. A study on mercury and arsenic in surface sediment of Zhelin Bay, eastern Guangdong Province. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23: 28—35.
- [11] State oceanic administration People's Republic of China. *Marine Monitoring Criteria*. Beijing, Ocean Press, 1998. 340—380.
- [12] Che Y, He Q, Lin W Q. The distributions of particulate heavy metals and its indication to the transfer of sediments in the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46: 123—131.
- [13] Hatje V, Birch G F, Hill D M. Spatial and temporal variability of particulate trace metals in Port Jackson Estuary, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 53: 63—77.
- [14] Liu Y P, Millward G E, Harris J R W. Modelling the distributions of dissolved Zn and Ni in the Tamar Estuary using hydrodynamics coupled with chemical kinetics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47: 535—546.
- [15] Turner A, Nimmo M, Thuresson K A. Speciation and sorptive behaviour of nickel in an organic-rich estuary (Beaulieu, UK). *Marine Chemistry*, 1998, 63: 105—118.
- [16] Zwolsman J J G, van Eck G T M. Geochemistry of major elements and trace metals in suspended matter of the Scheldt estuary, southwest Netherlands. *Marine Chemistry*, 1999, 66: 91—111.
- [17] Niencheski L F, Windom H L, Smith R. Distribution of particulate trace metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28 (2): 96—102.
- [18] Windom H L, Byrd J T, Smith R, Huan F. Inadequacy of NASQAN data for assessing metal trends in the nation's rivers. *Environment Science Technology*, 1991, 25: 1137—1142.

- [19] Szefer P, Kusak A, Szefer K, *et al.* Distribution of selected metals in sediment Cores of Puck Bay, Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30: 615—618.
- [20] Stenner R D and Nickless G. Heavy metals in organisms of the Atlantic Coast of S. W. Spain and Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 1975, 6: 89—92.
- [21] Soto-Jiménez M, Páez-Osuna F, Morales-Hernández. Selected trace metals in oysters (*Crassostrea iridescens*) and sediments from the discharge zone of the submarine sewage outfall in Mazatlán Bay (southeast Gulf of California): chemical fractions and bioaccumulation factors. *Environmental Pollution*, 2001, 114: 357—370.
- [22] Owen P B, Sandhu N. Heavy metal accumulation and anthropogenic impacts on Tolo Harbor, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 174—180.
- [23] Liu R Y. Ecology and living resources of Jiaozhou bay. Beijing: Science Press, 1992. 15—55.

参考文献:

- [4] 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. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 17(1): 8~14.
- [5] 刘明星,包万友,张守临. 胶州湾蛤子体中某些痕量金属含量季节变化. *海洋与湖沼*, 1983, 14: 22~29.
- [6] 李玉,俞志明,曹西华等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集. *海洋与湖沼*, 2005, 36: 580~589.
- [8] 黄华瑞. 渤海湾某些重金属及其他元素的分布与转移. *海洋科学集刊*, 1988, 29: 191~210.
- [10] 乔永民,黄长江,林潮平等. 粤东柘林湾表层沉积物的汞和砷研究. *热带海洋学报*, 2004, 23: 28~35.
- [11] 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社, 1998. 340~380.
- [23] 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1992. 15~55.