

长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属 分布和潜在生态危害评价

滕德强, 吕颂辉, 郭福星, 江涛

(暨南大学 赤潮与水环境研究中心, 广州 510632)

摘要:对长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属 Cu、Mn、Pb、Zn、Cr、Fe、Hg、Cd 的含量分布以及富集状况进行分析, 并采用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价该海域中 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、Cd 污染的程度及其潜在的生态危害, 结果表明: 长江口及其邻近海域表层沉积物中 Cu、Mn、Pb、Zn、Cr、Fe 的分布特征表现为由近岸向远岸递减的趋势, 整体上象山县和舟山群岛近岸海域的含量高于研究区北部含量; Hg 在长江口南端含量较高, 呈由西向东递减的趋势; Cd 在长江口南端以及象山县东含量较高, 在研究区中部含量较低。潜在生态危害评价结果表明, 长江口及其邻近海域表层沉积物只有部分站点处于生态危害的中等级别, 大多站点生态危害轻微, 污染程度顺序为 $Cd > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$; 对长江口及其邻近海域生态环境具有潜在影响的重金属元素首先是 Cd, 其次是 Hg。对底质环境质量进行系统聚类分析结果显示, 象山县和长江口外以及济州岛西南近海海域的底质环境较差, 应予以重视。

关键词:沉积物; 重金属; 潜在生态危害; 长江口

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2012)02-0011-09

重金属是一类持久性和生物累积性污染物, 受人类活动的影响, 重金属通过大气沉降、地表径流和近海排污等多种途径进入海洋, 大部分在吸附、絮凝、沉降等物理和化学过程的作用下转移为颗粒态并最终沉积于沉积物中, 使沉积物成为重金属的主要存储库^[1-3]。沉积物中长期累积的重金属成为对水质具有潜在影响的次生污染源, 在一定条件下, 沉积物中长期累积的重金属释放到水体中, 造成重金属的二次污染, 最终对人类健康产生影响^[4-5]。由于沉积物既是重金属污染物的宿体, 又是水体中重金属污染物的来源, 并且沉积物中重金属具有丰度高、易于准确检测等特点, 因此, 沉积物在重金属污染评价中具有重要的意义^[6]。

长江三角洲经济圈是我国经济最发达的地区之一, 因此, 长江口流域也是受人类活动影响最为强烈的地区。强大的陆源径流每年除带来巨大的入海水

沙和营养物质外, 还带来大量的油类、COD、氨氮、重金属等有机和无机污染物^[7-8]。据国家海洋局发布的全国海洋环境质量公报^[9-11]显示, 不包括入海排污口排放的重金属污染物, 每年由长江口携带入海的重金属就达 2~3 万 t, 因此, 研究此海域的环境质量有很重要的实用价值。目前, 对长江口沉积物中重金属污染的研究, 主要集中在长江三角洲的港湾区域以及近岸沿海区域, 通过不同的研究方法揭示此海域重金属的含量分布和污染状况^[12-13]。本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法并结合聚类分析方法, 以了解长江口及其邻近海域底质环境中重金属污染状况, 为长江口及其邻近海域的生态环境保护、水产养殖业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

2009 年 5 月在长江口及其邻近海域(28.9972°~32.5009°N, 122.0142°~125.0076°E)采集了 43 个站位的表层沉积物样品, 具体站位分布见图 1。用抓斗式采泥器取表层 0~5 cm 的沉积物装入聚乙烯袋中, 密封放入 -20 °C 冰柜保存, 待分析。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U0733006); 教育部科学技术研究重点项目(210259); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB428702); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放研究基金项目(200902)

作者简介: 滕德强(1984—), 男, 硕士生, 水体生态环境专业, E-mail: dede322@163.com

通讯作者: 吕颂辉(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水生生物与水环境研究, E-mail: lusonghui1963@163.com

收稿日期: 2011-08-23; 改回日期: 2011-09-19. 张光威编辑

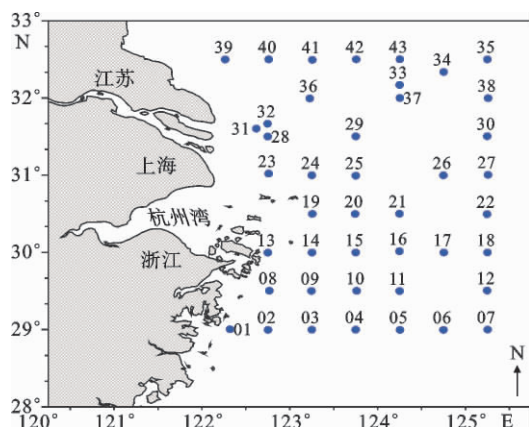


图 1 长江口及其邻近海域采样点的分布

Fig. 1 Study areas and sampling sites

1.2 分析方法

底质重金属元素的分析是由中国科学院南海海洋研究所完成,方法按照《海洋监测规范》(GB17378-2007)中的方法,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HCl}$ 体系进行消解。样品中的 Cu、Fe、Mn、Zn、Pb、Cr 元素采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)进行测定,重金属元素 Cd 采用石墨原子吸收法进行测定,重金属元素 Hg 采用分光光度法进行测定。并对样品总量的 10% 进行平行样的测定,同时,采用国家标准物质——近海海洋沉积物(GBW 07314)全程监控检测数据的精确性和准确性。平行样的相对标准偏差均小于 5%,标准物质的回收率在 80%~125% 之间。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 重金属富集系数

为了定量反映长江口表层沉积物重金属人为污染的影响,用相对富集系数来表示^[14],其计算公式为:

$$\text{REF} = \left[\frac{C_i/C_{\text{Fe}}}{C_i^0/C_{\text{Fe}}^0} \right]$$

式中: C_i 为被测沉积物中重金属的含量; C_{Fe} 为被测沉积物中 Fe 的含量; C_i^0 为沉积物中重金属元素的背景值; C_{Fe}^0 为沉积物中 Fe 元素的背景值。

1.3.2 重金属潜在生态风险指数评价

目前,国内外评价沉积物中重金属污染的方法主要有污染负荷指数法、地质累积指数法、综合指数法、尼梅罗综合指数法、潜在生态危害指数法等。第 1 种方法^[15]能够避免指数加和关系造成的评价结果歪曲的现象,并且对任意给定的区域进行定量的判

断,但该方法没能考虑不同污染源所引起的背景差别。地质累积指数法^[16]综合考虑了人为活动对环境的影响,还考虑了由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素,但是,没有考虑各种重金属毒性效应的环境影响。综合指数法能对受污染的沉积物做出简捷快速的评价,方法也较为简便;尼梅罗指数法突出了污染指数最大的污染物对环境质量的影响和作用,能够全面地反映沉积物的总体质量;但两种方法^[17]没有考虑生物对不同底质条件下重金属的毒性响应特性和重金属毒性的差别,揭示不了各种重金属可能存在的生态危害。而重金属潜在生态危害指数法^[18]综合考虑了重金属元素的毒性、重金属元素的敏感性以及重金属元素区域背景值的差异,消除了区域差异和异源污染的影响,并给出了重金属元素潜在生态风险程度的定量划分,是综合反映沉积物中重金属对生态环境影响潜力的指标,适合于大区域范围沉积物之间进行评价比较。

本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法(RI)进行评价。根据该评价方法,某一区域沉积物中第 i 种重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)及沉积物中多种重金属的潜在危害指数(RI)可分别表示为:

$$E_r^i = T_r^i C_i^i$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n T_r^i C_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

式中: C_i^i 为单个重金属污染系数($C_i^i = C_s^i/C_n^i$); C_s^i 为表层沉积物重金属 i 浓度的实测值, C_n^i 为计算所用的背景值,采用工业化以前沉积物中重金属的背景值(表 1)^[19], T_r^i 为重金属 i 的毒性系数^[20],它主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,揭示了重金属对人体的危害和对水生生态系统的危害。对毒性系数作规范化处理后, T_r^i 定值见表 1。

E_r^i 和 RI 值相对应的污染程度以及潜在生态危害程度的评价标准见表 2^[21]。

表 1 重金属的背景值(C_n^i)和毒性系数(T_r^i)Table 1 Reference values(C_n^i) and toxicity coefficients(T_r^i) of heavy metals

参数	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	Cd	Fe
$C_n^i/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	15	20	65	61	0.025	0.065	3.10
T_r^i	5	5	1	2	40	30	/

注:背景值引自赵一阳,酆明才^[19];毒性系数数据来源于徐争启等^[20]。

表 2 重金属潜在生态风险指数及对应的生态风险程度

Table 2 The ecological risk index of heavy metals and their risk level

轻微	中等	强	很强	极强
$E_i < 40$	$40 \leq E_i < 80$	$80 \leq E_i < 160$	$160 \leq E_i < 320$	$E_i \geq 320$
$RI < 135$	$135 \leq RI < 265$	$265 \leq RI < 525$	$RI \geq 525$	/

注:数据引自孙元敏等^[21]。

2 结果与讨论

2.1 重金属的分布

通过对表层沉积物的分析,测出各重金属元素含量如下,Cu 的含量为 $2.00 \sim 37.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $17.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Mn 的含量为 $256.3 \sim 776.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $431.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Pb 的含量为 $5.75 \sim 29.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $16.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Zn 的含量为 $19.50 \sim 100.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $55.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Cr 的含量为 $14.25 \sim 51.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $31.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Fe 的含量为 $1.10 \sim 7.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $2.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Cd 的含量为 $0.016 \sim 0.347 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $0.110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Hg 的含量为 $0 \sim 0.074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 的含量均低于 2006 年董爱国等^[22-23]调查的含量,也远低于长江口内以及近海海域^[24]的含量,这可能与三峡工程的一期蓄水有很大的关系,但也不排除河口区环境综合治理造成。

长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属的空间分布特征如图 2 所示。Cu、Mn、Pb、Zn、Cr、Fe 等 5 种重金属的分布特征较为相似,总体特征是研究区近岸海域的南部(象山县近海海域的 01、02、03、08 站位)含量最高,长江口中下游近海重金属含量也较高,等值线较为密集,低值区主要分布在研究区的中部(集中在 29、26、25、21、17 站位附近),其中 29 站位含量最低,并分别呈由近海向远海递减的趋势;Hg 的最高值出现在长江三角洲南的 23 站位,在东西方向上有近岸向远岸逐渐递减的趋势,在长江出海口的南端出现显著的高值区,且 Hg 的地区分布差别较大,变异系数达到了 67%(表 3);Cd 在象山县海域(05 站位)出现最大值,低值区出现在研究区的中部,且 Cd 在此海域的分布也明显存在地区差别,如表 3 所示变异系数达到了 56%。

表 3 长江口及其邻近海域表层沉积物重金属含量的统计特征

Table 3 Statistics of heavy metals contents in surface sediments of study areas

元素	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准 偏差	变异 系数%
Cu	2.00	37.75	17.34	16.8	8.306	48
Mn	256.25	776.13	424.73	398.9	121.90	29
Pb	5.75	29.88	16.25	15.38	4.927	30
Zn	19.5	100.25	55.53	54.13	15.728	28
Cr	14.25	51.5	31.65	29.9	8.036	25
Fe	1.1	7.42	2.89	2.60	1.104	38
Hg	0.003	0.079	0.019	0.017	0.013	67
Cd	0.016	0.347	0.106	0.092 6	0.060	56

注:表中 Fe 的最小值和最大值是以 % 计量。

2.2 重金属的富集特征

长江口及其邻近海域各站点表层沉积物重金属的富集系数见图 3,各重金属元素的平均富集系数分别为 Cu:1.22,Pb:0.89,Zn:0.95,Cr:0.58,Hg:0.83,Cd:1.80。沉积物中除 Cr 外,Cu、Pb、Zn、Hg、Cd 元素均存在相对富集,各元素 $EF > 1$ 的站位数与总站位数的比例分别为 Cu:72%、Pb:19%、Zn:49%、Hg:23%、Cd:81%。由此可见 Cd 和 Cu 具有明显的富集现象。总体来看 Cd 在各海域存在很明显的富集现象,其中在 05 站位的富集程度最高($REF_{Hg} = 6.79$),其次为 28 和 15 站位。在舟山市以及象山养殖区的外海、杭州湾的下游和长江口的下游均是富集程度较高的海域。Cu 元素在长江口以及杭州湾沿岸富集程度较高,并且由近岸到远岸有递减趋势,在 20 站位附近的富集程度最低,之后向济州岛方向有增强的趋势。Zn、Hg、Pb 的平均富集系数均小于 1,表明在整体上在长江口及其邻近海域无这 3 种元素的富集,但从各地区来看,Zn 元素的富集区是长江口下游、杭州湾外以及舟山群岛。Hg 和 Pb 所形成的富集区主要集中在长江口以南近岸海域,近岸表现出较高的富集现象,而远岸富集程度较弱。从各等值线图中可以看出除了 Cd 以外,其余元素等值线的划分都有一定的相似性,富集系数较高的区域基本上集中在长江口外和杭州湾外,这与 2006 年董爱国等^[25]调查的黏土组分含量的高值区分布极为相似,说明在重金属元素搬运和沉积过程中,陆源碎屑颗粒的供给是重金属元素分布的主要控制因素;而 Cd 由于其易受悬浮体浓度、有机质含量以及水体盐度等因素的影响,故其来源可能受溶解态和颗粒态之间的转换机制所控制。

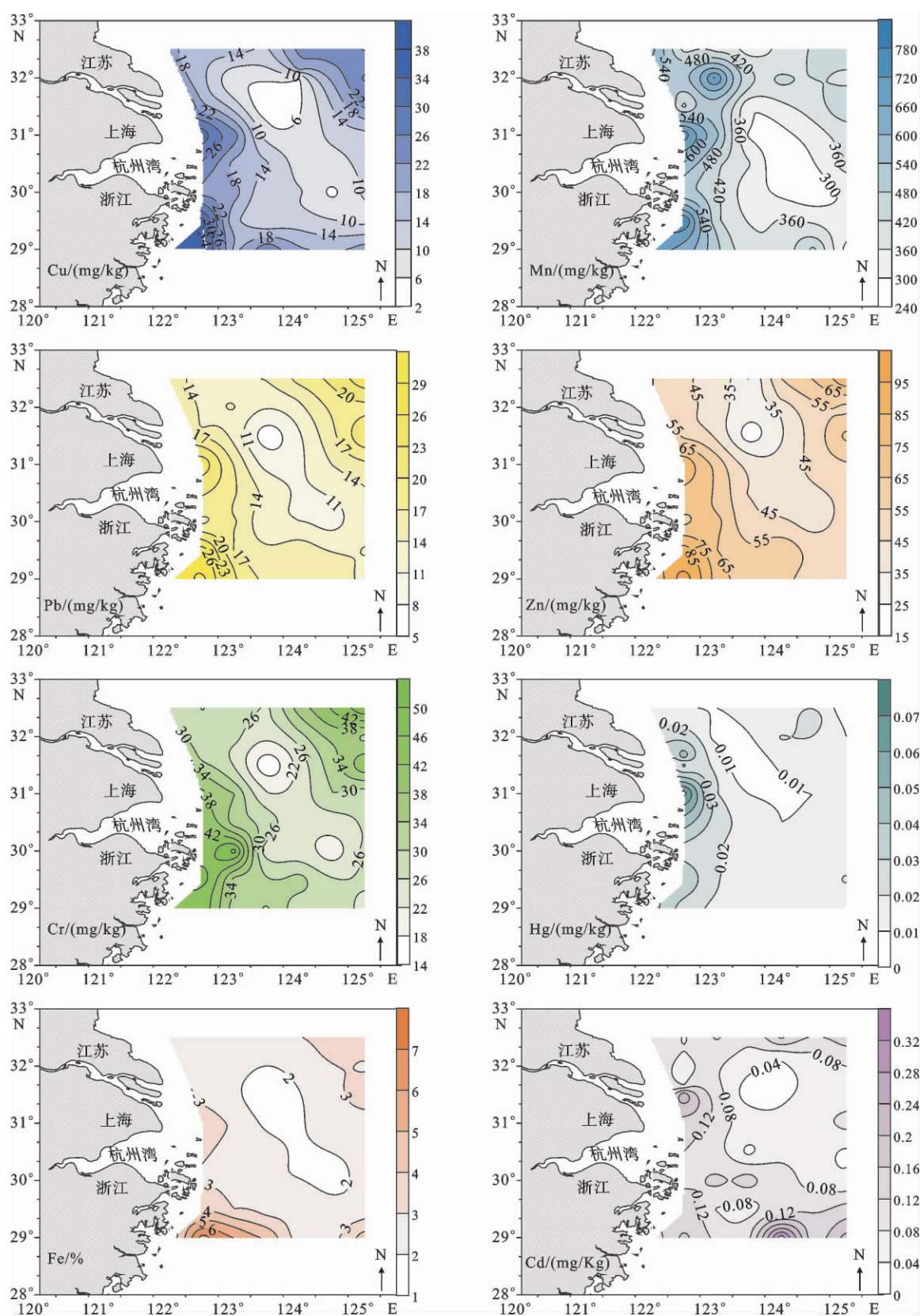


图 2 长江口及其邻近海域表层沉积物重金属含量分布

Fig. 2 Distribution pattern of heavy metals in surface sediments

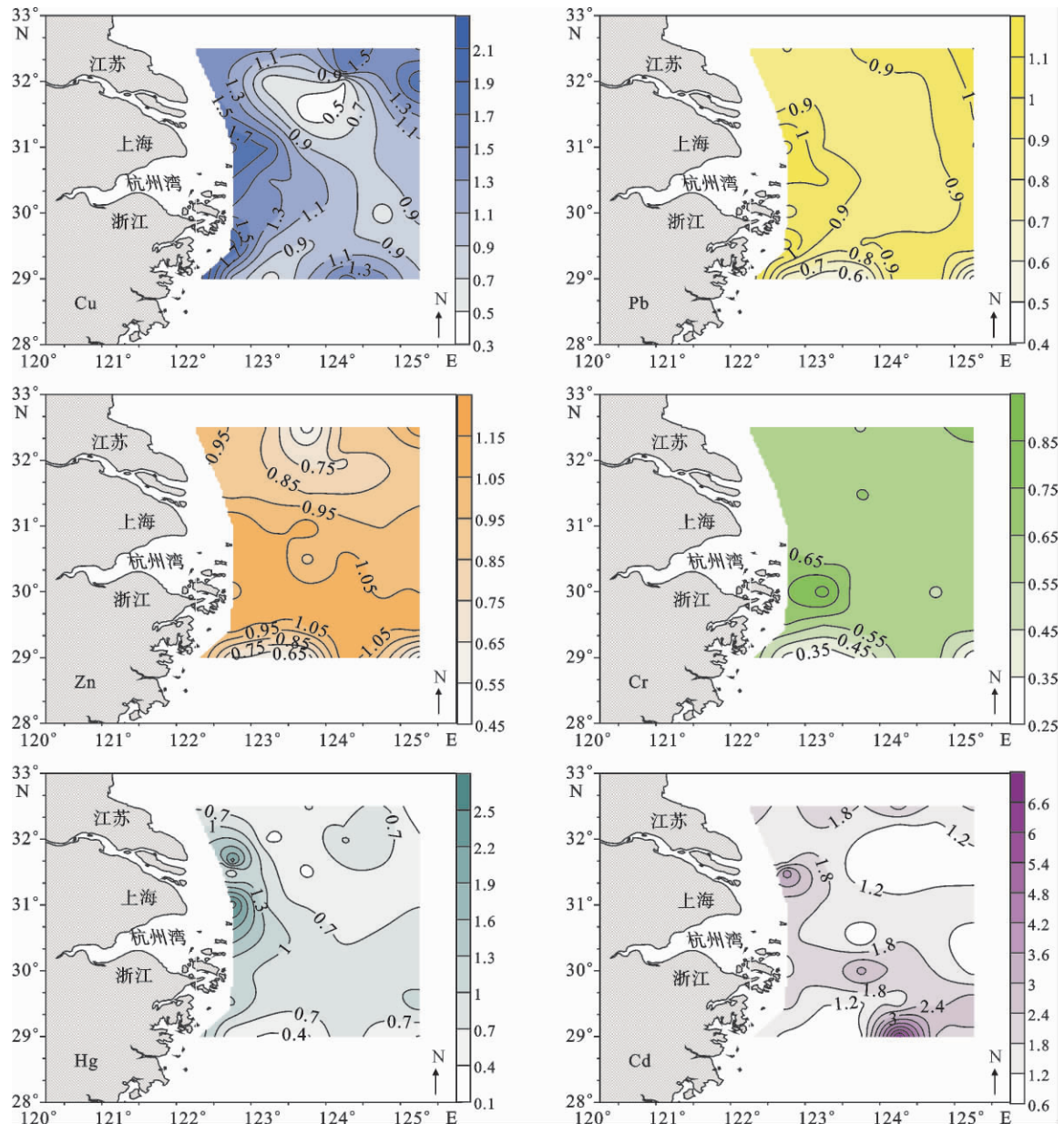


图3 长江口及其邻近海域表层沉积物重金属富集系数

Fig. 3 Enrichment coefficients of the heavy metals in surface sediments

2.3 潜在生态危害评价

长江口及其邻近海域表层沉积物,重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数统计结果见表4。以单个重金属元素潜在生态风险系数评价,长江口及其邻近海域表层沉积物中各重金属元素的潜在生态风险由强到弱,依次为 $Cd > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$,其中 Cd 达到了中等潜在生态风险水平($E_r^i = 48.84$),并且 Cd 的超标率达到了81.4%,从各站点来看,有22个站位的潜在生态风险系数为中等水平,另有05、07、28等3个站点达到了强等级的水平,其中的05站位的潜在生态风险程度最高,接近

了很强等级($E_r^i = 159.92$),又由于 Cd 在此区域富集程度较高,因此, Cd 对此区域的潜在生态危害更大。此外, Hg 的生态潜在风险水平也接近中等,但超标率仅是18.6%,在23站位的潜在生态风险程度最高,达到强等级($E_r^i = 118.40$),另有7个站点点达到了中等水平,尽管 Hg 在此区域的富集程度较低,富集区主要集中在长江口近岸海域,但由于 Hg 元素的高毒性,也致使 Hg 对此海域有较大的潜在危害。与 Cd 和 Hg 相比,尽管 Cu 在此区域的富集程度较高,但由于较低的毒性系数,致使 Cu 的生态风险系数较小,和 Pb 、 Zn 、 Cr 的潜在生态风险系数相似,均小于40,因此,这4种重金属都处于低生态

风险水平,其中 Cu、Zn、Pb 的超标率分别为 58.1%、20.9%和 16.3%。上述结果可以明显看出除 Cd 以外,其他重金属元素的富集程度与其潜在生态危害程度的顺序均不一致,可能是因为有些重金属元素富集程度较高,但是具有亲颗粒性,容易被悬浮物迁移进入沉积物中矿化埋藏使它们对生物的毒性降低^[26],这就说明了只有把重金属在沉积环境中的富集程度,与其对海洋生态系统的潜在生态危害程度相结合,才能比较全面地反映沉积物中重金属的污染状况。

而以多元素综合的潜在生态风险指数(RI)评价,有 01、02、05、08、23、28 等 6 个站位点的潜在生态风险等级达到中等强度,其他站点均为低生态风险水平,其中 07 和 32 站位的综合潜在生态风险指数也较高,接近中等生态风险强度。同时,本研究还利用 SPSS19.0 对 43 个站位的重金属污染进行了 Q 型系统聚类分析,分析采用欧氏距离、华氏法(Ward's method)得到聚类树谱图(图 4)。结合重金属潜在风险评价,将 43 个站位的底质环境质量分为三大类,第 1 类,底质综合环境较好,包括站 5、6、7、10、12、15、16、17、18、20、21、22、25、26、27、28、29、32、33、36、37、39、40、41、42;第 2 类,底质综合环境一般,包括站 3、4、9、11、13、14、19、24、30、31、34、38、43;第 3 类,底质综合环境较差,包括站 1、2、8、23、35,其中 1、2、8 站位位于象山县近海海域,23 站位位于长江口外的近海海域,而 35 站位却靠近济州岛,表明以上近海海域底质已经受到了一定的污染,应引起足够的重视。

表 4 长江口及其邻近海域表层沉积物重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数

Table 4 Ecological risk coefficient and risk index of heavy metals in surface sediments of the Yangtze Estuary and its adjacent areas

站位	E_i						RI
	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	Cd	
01	12.58	6.50	1.20	1.39	67.20	46.99	135.86
02	12.25	7.47	1.54	1.47	38.40	78.06	139.19
03	5.71	5.09	1.09	1.05	27.20	50.56	90.71
04	8.54	4.03	0.90	1.13	22.40	50.70	87.71
05	6.21	3.84	0.88	0.89	28.80	159.92	200.54
06	5.80	4.13	0.77	0.98	16.00	59.41	87.09
07	6.71	3.25	0.77	0.80	22.40	99.17	133.10
08	11.71	6.84	1.38	1.56	64.00	72.09	157.58

09	4.92	4.19	1.01	1.07	33.60	36.11	80.89
10	3.46	3.63	0.86	0.99	27.20	27.12	63.25
11	4.00	4.06	1.00	1.05	28.80	38.38	77.29
12	2.83	3.53	0.84	0.88	33.60	63.35	105.02
13	6.92	4.09	0.96	1.42	40.00	50.01	103.40
14	6.58	4.34	1.06	1.69	33.60	59.24	106.51
15	3.67	2.81	0.72	0.74	22.40	65.63	95.97
16	3.50	2.75	0.71	0.79	22.40	46.31	76.46
17	1.71	2.38	0.60	0.62	22.40	31.11	58.81
18	3.63	3.38	0.76	0.89	22.40	21.26	52.30
19	5.46	4.31	0.97	1.04	40.00	42.75	94.53
20	4.85	3.36	0.68	0.94	28.80	12.75	51.38
21	2.96	2.69	0.67	0.80	16.00	32.64	55.75
22	3.83	3.34	0.74	0.87	28.80	15.02	52.61
23	10.71	6.25	1.27	1.27	118.40	66.87	204.77
24	7.96	4.19	0.95	1.12	33.60	48.63	96.45
25	2.67	2.47	0.65	0.73	16.00	32.04	54.56
26	3.71	3.50	0.74	0.98	16.00	35.23	60.16
27	4.25	4.09	0.83	0.91	22.40	42.59	75.08
28	6.42	4.25	0.81	1.04	27.20	107.73	147.44
29	0.67	1.44	0.30	0.47	4.80	7.41	15.09
30	7.53	5.71	1.04	1.37	27.20	28.03	70.89
31	7.37	4.11	0.87	1.10	44.80	51.45	109.70
32	5.60	3.41	0.73	0.91	75.20	34.91	120.77
33	6.65	3.64	0.72	1.03	22.40	22.39	56.82
34	7.60	4.96	0.94	1.33	40.00	41.04	95.89
35	7.25	6.28	1.29	1.62	4.80	64.83	86.07
36	2.21	3.56	0.66	0.91	11.20	39.65	58.19
37	1.95	3.34	0.58	0.93	33.60	15.38	55.77
38	8.87	4.75	0.80	1.07	16.00	36.95	68.43
39	6.21	3.66	0.85	0.98	22.40	54.72	88.81
40	5.35	3.35	0.70	0.84	16.00	35.74	61.98
41	5.47	3.38	0.67	0.96	16.00	57.54	84.02
42	4.53	3.55	0.38	0.83	22.40	40.61	72.30
43	7.72	4.55	0.85	1.18	22.40	77.73	114.43
范围	0.67~12.58	1.44~7.47	0.30~1.54	0.47~1.69	4.80~118.40	7.40~159.92	15.09~204.77
平均值	5.78	4.06	0.85	1.04	30.21	48.84	90.78
超标率/%	58.1	16.3	20.9	0	18.6	81.4	/

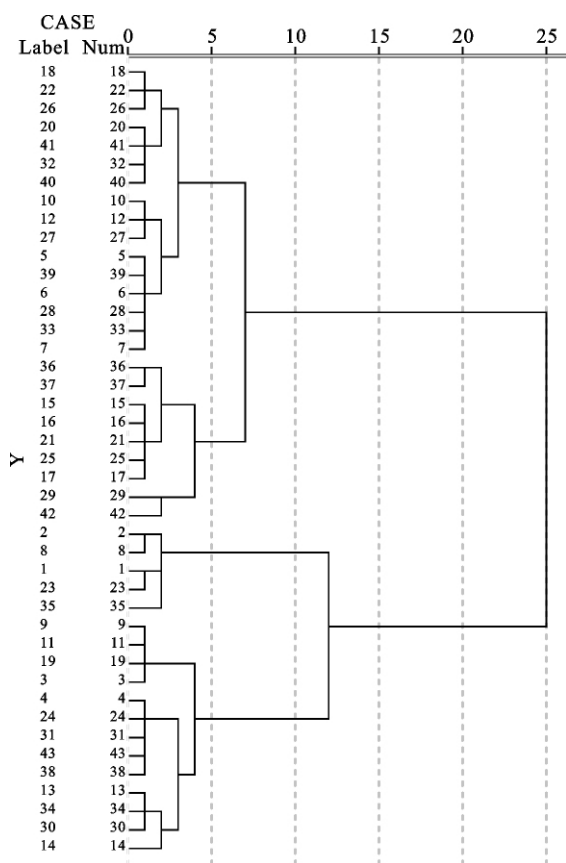


图4 长江口及其邻近海域底质质量系统聚类树谱图

Fig. 4 Dendrogram for sediment quality assessment

3 结论

(1) 重金属 Cu、Mn、Pb、Zn、Cr、Fe 含量呈现由近岸向远岸递减的趋势,在 29 站位附近形成低值区,之后向济州岛方向有一定的增加趋势,研究区域的南部沿岸海域重金属含量普遍比北部沿岸海域重金属含量高,整体上在象山县附近形成高值区,Hg 和 Cd 在分布上存在明显的地区差别。

(2) 由富集系数计算可知,长江口及其邻近海域表层沉积物中均有不同程度的富集,其中以 Cd 和 Cu 的富集最为显著,其平均富集系数分别为 1.80 和 1.22。Cd 的来源可能易受溶解态和颗粒态之间的转换机制所控制;其他重金属元素来源明显与陆源碎屑颗粒的供给有关。

(3) 以单项潜在生态风险系数评价,长江口及其邻近海域表层沉积物中各重金属元素的潜在生态风险,由强到弱的次序为 $Cd > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$,其中 Cd 的潜在生态风险处于中等强度。除了 Cd 的潜在生态风险和富集程度都较高外,其他元素的生态风险和富集程度有明显的不一致性,表明只有把重金属在沉积环境中的富集程度与其对海洋生

态系统的潜在生态危害程度相结合,才能比较全面地反映沉积物中重金属的污染状况。

(4) 综合潜在生态风险指数评价显示,长江口及其邻近海域整体上处于低生态风险等级,但仍有 6 个站点达到中等水平,与 Q 型系统聚类分析结合表明,象山县和长江口外以及济州岛西南近海海域的底质环境较差,应予以足够的重视。

参考文献 (References)

- [1] Chapman P M, Wang P Y, et al. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(22):3937-3941.
- [2] Emmerson R H C, O'reilly-Wiese S B, Macleod C L, et al. A multivariate assessment of metal distribution in intertidal sediments of the Blackwater estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(11):960-968.
- [3] Schubel R J. The estuary as a filter for fine grained suspended sediments in the estuarine environment[J]. Technical Report Reld, 1983(14):310-313.
- [4] 孟紫强. 环境毒理学基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 183-246. [MENG Ziqiang. Basis of Environmental Toxicology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003:183-246.]
- [5] Lawrence A L, Mason R P. Factors controlling the bioaccumulation of mercury and methylmercury by the estuarine amphipod *Leptocheirus plumulosus*[J]. Environmental Pollution, 2001, 111:217-231.
- [6] 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. [ZHANG Lijie, WANG Gui, YAO De, et al. Environment significance and research of heavy metals in offshore sediments[J]. Marine Geology Letters, 2003, 19(3):6-9.]
- [7] 李玉, 冯志华, 李谷祺, 等. 连云港近岸海域沉积物中重金属污染源及生态评价[J]. 海洋与湖泊, 2010, 41(6):829-833. [LI Yu, FENG Zhihua, LI Guqi. The estimation of source of heavy metal contamination and assessment in marine sediments in Lianyungang area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(6):829-833.]
- [8] Tretey J H. History of heavy metal input to Mississippi Delta sediments[J]. Estuaries, 1985, 12(2):231-239.
- [9] 国家海洋局. 2003 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京:国家海洋局, 2004. [National Bureau of Oceanography. Report on the State of the Marine Environment in China, P. R. C in 2003 [R]. Beijing: National Bureau of Oceanography, 2004.]
- [10] 国家海洋局. 2004 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京:国家海洋局, 2005. [National Bureau of Oceanography. Report on the State of the Marine Environment in China, P. R. C in 2004[R]. Beijing: National Bureau of Oceanography, 2005.]
- [11] 国家海洋局. 2005 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京:国家海洋局, 2006. [National Bureau of Oceanography. Report on the State of the Marine Environment in China, P R C in 2005

- [R]. Beijing: National Bureau of Oceanography, 2006.]
- [12] 陈敏, 陈邦林, 夏福兴, 等. 长江口最大浑浊带悬移质、底质微量金属形态分布[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1996(1): 38-44. [CHEN Min, CHEN Banglin, XIA Fuxing, et al. Speciation of Trace Metals in Suspended Particles and Surface Benthic Sediment in the Maximum Turbidity Zones of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 1996(1): 38-44.]
- [13] 孟翊, 刘苍字, 程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 37-43. [MENG Yi, LIU Cangzi, CHENG Jiang. Geochemical characteristics of heavy metal elements in the surface sediments in the Yangtze River Estuarine area and evaluations of the bed materials[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(3): 37-43.]
- [14] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 289-297. [LI Lianfang, ZEN Xibai, LI Guoxue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 27(2): 289-297.]
- [15] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 101-104. [LIU Zhemin. Heavy metals pollution in vegetable fields and its prevention[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2): 101-104.]
- [16] Forstner U. Lecture Notes in Earth Sciences (Contaminated Sediments)[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989: 107-109.
- [17] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军, 等. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31-36. [DING Xigui, YE Siyuan, GAO Zongjun, et al. Methods of heavy metal pollution evaluation for offshore sediments[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(8): 31-36.]
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment toxicological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 赵一阳, 鄢明才, 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. 科学通报, 1992, 13: 1202-1204. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. The comparison of abundance of chemical elements in sediment of The Yellow River, the Yangtze River and China shallow sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 13: 1202-1204.]
- [20] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115. [XUE Zhengqi, NI Junshi, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115.]
- [21] 孙元敏, 陈彬, 黄海萍, 等. 中国南亚热带海岛海域沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 123-130. [SUN Yuanmin, CHEN Lin, HUANG Haiping, et al. Heavy metals contamination and potential ecological risk in the sediment of the sea areas around south subtropical islands, China[J]. China Environmental Science, 2011, 31(1): 123-130.]
- [22] 董爱国, 翟世奎, Zabel Matthias, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物中重金属元素含量分布及其影响因素[J]. 海洋学报, 2009, 31(6): 54-68. [DONG Aiguo, ZHAI Shikui, Zabel Matthias, et al. The distribution of heavy metal contents in surface sediments of the Changjiang Estuary in China and surrounding coastal areas[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 54-68.]
- [23] 张怀静, 翟世奎, 范德江, 等. 三峡工程一期蓄水后长江口及其邻近海域悬浮物浓度分布特征[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1655-1661. [ZHANG Huaijing, ZHAI Shikui, FAN Dejiang, et al. Distribution of suspended matter concentration in the Changjiang estuary and adjacent area after the first-stage storage of the Three Gorges project[J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1655-1661.]
- [24] 孙毅, 母清林, 余运勇, 等. 长江口及邻近海域沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 107-111. [SUN Yi, MU Qingliu, SHE Yunnyong, et al. Distribution Patterns of Heavy Metals in Sediments of the Yangtze Estuary and its Adjacent Areas and Ecological Risk Assessment[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2011, 30(2): 107-111.]
- [25] 董爱国, 翟世奎, 于增慧, 等. 长江口海域表层沉积物重金属元素的潜在生态风险评价[J]. 海洋科学, 2010, 34(3): 69-75. [DONG Aiguo, ZHAI Shikui, YU Zenghui, et al. Evaluation on potential ecological risk of the heavy metals in the surface sediments of the Changjiang(Yangtze) estuary and its adjacent coastal area[J]. Marine Sciences, 2010, 34(3): 69-75.]
- [26] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口洋山海域表层沉积物重金属的富积及其潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 351-356. [ZHANG Lixu, JIANG Xiaoshan, ZHAO Min, et al. Accumulation of heavy metals in surface sediments from the sea region of Yangshan in the Yangtze Estuary with assessment of their potential ecological risk[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(3): 351-356.]

DISTRIBUTION PATTERN OF HEAVY METALS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE YANGTZE ESTUARY AND ADJACENT AREAS AND ITS ECOLOGICAL RISK

TENG Deqiang, LV Songhui, GUO Fuxing, JIANG Tao

(Research Center for Harmful Algae and Aquatic Environment, Jinan University, Guangzhou, Guangdong, 510632)

Abstract: The concentration and distribution pattern of heavy metals of Cu, Mn, Pb, Zn, Cr, Fe, Hg, Cd in the surface sediments of the Yangtze estuary and its adjacent areas were studied. Hakanson index method was used to evaluate the pollution level of the heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr, Hg, Cd and their ecological vulnerability. It is found that the elements of Cu, Mn, Pb, Zn, Cr, Fe are distributed in a declined pattern from the coast to the offshore within the estuary and its adjacent areas. The contents of these heavy metals are, in general, higher in the Xiangshan County and Zhoushan Islands rather than in the northern part. Hg is higher in the southern estuary and declines from the west to the east, while Cd is high in the south but lower in the middle estuary. Ecological assessment proves that the major part of the surface sediment in the Yangtze estuary and its adjacent areas is slightly vulnerable except some sites which are in the rank of moderate ecological risk. The risk index of these heavy metals are in an order of $Cd > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$. The heavy metals which might bring ecological danger to the environment within the estuary and its adjacent areas are firstly Cd and then Hg. According to the results of cluster analysis, we conclude that Xiangshan County and the offshore area out of the Yangtze Estuary up to the southwest of the Cheju Island are more vulnerable, and, therefore, more attention is required.

Key words: sediments; heavy metal; potential ecological risk; Yangtze estuary