

文章编号:1000-0615(2000)06-0533-06

近岸海域底质重金属生态风险评价初步研究

甘居利, 贾晓平, 林 钦, 李纯厚, 王增焕

周国君, 王小平, 蔡文贵, 吕晓瑜

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要:根据金属元素在地壳、海水、近海沉积物和海洋生物体内的丰度,吸收金属毒性实验研究成果,也考虑了沉积物内金属赋存形态对生物体吸收金属的影响,以及海洋生态系统对金属毒性的敏感程度,初步建立了近岸渔业海域沉积物重金属的生态风险评价指标体系。应用该体系对南海东北部红海湾沉积物重金属的生态风险性作试评价,所得结论同其它研究结果互为补充和借鉴,并能为南海区半封闭型海湾规模化养殖的环境容量研究提供有益的参考。

关键词:重金属;潜在生态风险;海洋生态系统;近岸沉积物

中图分类号:X820.4 **文献标识码:**A

A primary study on ecological risk caused by the heavy metals in coastal sediments

GAN Ju-li, JIA Xiao-ping, LIN Qin, LI Chun-hou, WANG Zeng-huan,

ZHOU Guo-jun, WANG Xiao-ping, CAI Wen-gui, LU Xiao-yu

(South China Sea Fishery Institute, CAFS, Guangzhou 510300, China)

Abstract: A system for assessment of the potential ecological risk caused by the heavy metals in coastal sediments was established based on the metal element abundance in various environmental media and the marine organisms. The results of metal toxicity investigations, the effects of metal existing form in marine sediments on the metal absorption by marine organisms and the sensitivity of marine ecosystem to the metal toxicity were also considered. The ecological risk of Honghai Bay was evaluated as an example. The results from this evaluation could be used as a reference of maximum capacity for large scale aquaculture in the semi-closed bays of South China Sea.

Key words: heavy metal; potential ecological risk; marine ecosystem; coastal sediment

Power 和 Chapman^[1]曾指出:污染沉积物对水生生物除产生显在的“三致”效应(致死、致畸、致突变)之外,还构成了“定时炸弹”似的潜在威胁。全球首届沉积物质量评价会议强调了沉积物风险性评价的重要性,并把重金属列为主要评价因子之一^[2]。在有关的国际会议中,污染沉积物的生物或生态敏感性也成为重要议题^[3]。人们一致认为,沉积物生态风险性评价是建立沉积物质量控制基准、环境管理信息系统和专家鉴定系统的关键要素,也可为环境的规划、预测、管理和污染防治等提供参考依据。

收稿日期:1999-05-31

资助项目:国家“九五”攻关项目资助(96-008-03-04)

作者简介:甘居利(1959-),男,四川富顺人,副研究员,主要从事渔业生态环境监控与保护方面的研究。Tel:020-84195173, E-mail: scsfems@sti.gd.cn

近岸海域营养物质充足,渔业资源丰富,是水产经济动物苗种繁育、索饵洄游、海水养殖和捕捞作业的重要场所。因此,近岸海域沉积物的环境质量如何,生态风险性怎么样,将直接关系到海洋渔业的健康、稳定和可持续发展。南海东北部红海湾是我国南海半封闭型海湾规模化养殖示范区,正在进行大规模、多模式、多品种的海水养殖研究和开发。本文根据“南海区半封闭型海湾规模化养殖的环境容量和环境效应研究”课题的需要,以红海湾为例,就近岸渔业水域沉积物的生态风险性评价进行初步探讨。

1 生态风险评价指标的建立

1.1 建立生态风险评价指标的必要条件

Hakanson^[4]指出,建立沉积物重金属生态风险评价指标必须满足以下四项条件:①生态危害系数(ecology harm coefficient, EHC)随沉积物重金属污染程度的加重而增加,即含量条件。②毒性较强的重金属其 EHC 值应高于毒性较弱者,即金属毒性条件。③受多种重金属污染的沉积物其生态风险指数(ecology risk index, ERI)应高于只受少数几种重金属污染的沉积物,这是种类数条件。④对重金属污染较敏感的水域应有较高的 ERI 值,即敏感性条件。

1.2 生态风险评价指标的计算方法

(1) 金属污染程度(metal pollution level, MPL)等于沉积物样品中重金属的实测含量(determined content, DC)与其评价参考值(evaluation reference value, ERV)之比。

(2) 单个重金属的生态危害系数等于其污染程度与毒性响应系数(toxic response coefficient, TRC)之积, $EHC = MPL \times TRC$ (TRC 的确定见本文第 3 节)。

(3) 多种重金属的生态风险指数 ERI 等于单一重金属的生态危害系数 EHC 之和。

2 生态风险评价因子及其参比值的选择

2.1 重金属种类的选择

用于评价潜在生态危害的重金属包括 Hg、Cd、Pb 等生物体非必需的、毒性强的痕量元素,还包括生物体必需的、但过量则有害的 Zn、Cu、Ni、Cr 等微量元素,有的学者把 As 也列入其中^[4,5]。根据粤东沿海地区污染物排放情况,在红海湾生态环境研究中我们选择沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 和总 Cr 作为评价因子。

2.2 评价参考值的选择

关于评价参考值,国内外尚未统一。何孟常等^[5]用污染河段上游背景样点沉积物重金属含量作参比, Hakanson^[4]和陈静生和周家义^[6]选取现代工业化以前沉积物的最高背景值作参比。本文用红海湾沉积物中重金属含量的背景上限值(见本文第 4 节)作参比。

3 毒性响应系数的探讨

Hakanson^[4]推算毒性响应系数是从金属元素的丰度入手,本文认为对渔业水域还应考虑金属的毒性和生物体吸收金属的难易。下面分别加以讨论。

Hakanson^[4]指出,重金属的潜在毒性与其在生态环境中的丰度成反比,他根据火成岩、土壤、陆生动植物和淡水中重金属的浓度推算 TCR。参照这一思路,结合海洋生态环境特点,表 1 列出了部分未被污染或污染较轻的近岸沉积物、海藻和海洋经济动物(鱼类和虾类)的重金属含量,以及全球海水、地壳中重金属的平均丰度^[7-10],将表 1 每行中最低值去除各浓度值得到不同介质中重金属元素的相对丰度(见表 2)。再把表 2 每行中最高值除以各丰度值得到不同介质中重金属元素的相对毒性(见表 3 前 5

行)。然后将每列中相对毒性的最高值去掉再求和(表3第6行),以表3第6行中最低值为1,使相对毒性值归一化(见表3第7行)。

本文对文献[4]的推算方法提出以下两点补充:第一,吸收利用毒性试验研究成果。美国国家环保局(EPA)根据对生物体的大量毒性试验和“三致”效应研究成果,于1977年和1980年先后提出了600多种化学物质的毒性危害系数^[11]。这些数据作为环境评价的科学依据随后被许多国家或地区广泛应用,从中摘取部分重金属的毒性危害系数入表4,并以锌的毒性危害系数作基准使其归一化。第二,应考虑重金属的赋存形态对生物体吸收重金属的可能影响。因为水生生物对重金属的吸收与沉积物中重金属的赋存形态有关,其中溶解态和阳离子交换态是易吸收的,有机结合态、铁锰水合氧化物结合态和碳酸盐结合态较易被吸收,而残渣态(结晶态)则难以被生物体吸收。在不同的海湾内重金属的赋存形态不尽相同(见表5),本文取可吸收态重金属的平均百分比,并以总铬作基准使其归一化(见表5第8行)。

表1 不同环境介质中的重金属浓度

Tab.1 The concentration of some heavy metals in various environmental media

环境介质(浓度)	金 属 元 素						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
地壳(mg·kg ⁻¹ ,干重) ^[7]	55	12.5	70	0.2	75	100	0.08
近海沉积物(干重) ^[8]	15	30	100	0.35	30	90	0.15
海水(μg·L ⁻¹) ^[9]	0.90	0.03	5.0	0.11	6.6	0.2	0.15
海藻(mg·kg ⁻¹ ,湿重) ^[10]	2.1	2.1	5.1	1.0	5.9	7.4	0.22
海洋鱼虾(湿重) ^[10]	2.0	2.9	8.2	0.4	15.3	2.7	0.13

表2 不同介质中重金属元素的相对浓度

Tab.2 The relative abundance of some heavy metals in various media

环境介质	金 属 元 素						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
地壳	688	156	875	2.5	938	1250	1
近海沉积物	100	200	667	2.33	200	600	1
海水	30	1	167	3.67	220	6.7	5
海藻	9.5	9.5	23.2	4.5	26.8	33.6	1
海洋鱼虾	15.4	22.3	63.1	3.08	118	20.8	1

表3 根据元素相对丰度确定的金属相对毒性

Tab.3 The relative toxicity based on the relative abundance of some heavy metals

环境介质	金 属 元 素						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
地壳	1.82	8.01	1.43	500*	1.33	1	1250*
近海沉积物	6.67	3.33	1	286	3.34*	1.11	667
海水	7.33	220*	1.32	59.9	1	32.8	44
海藻	3.54	3.54	1.45	7.47	1.25	1	33.6
海洋鱼虾	7.64*	5.28	1.86*	38.2	1	5.66	118
Σ	19.4	20.2	5.2	357.2	4.6	8.8	863
归一化	4.23	4.40	1.14	7.80	1	1.91	188

注:为不计入Σ

然后再参照文献[4]的方法,将表3~表5中各重金属相应的归一化数值相加,对其和开平方后取整数(见表6),最后将表6第3行数据乘以2,作为重金属毒性响应系数(见表6第4行)在近海沉积物生态风险评价中使用。

Hakanson^[4]还指出,水体对重金属的敏感程度与水体的生物生长量(biology production, BP)有密切联系,BP值较高的水体对金属毒性较不敏感,可用敏感度 $BP^{1/2}/BP^{1/2}$ (BP为BP的算术平均值)对毒性响应系数进行校正,他当时根据水中氮和有机物浓度计算BP值,同时又觉得改用海水叶绿素a或藻类浓度较好。在红海湾底质重金属生态风险分析中,我们用海水叶绿素a浓度估算生物生长量。

表4 美国国家环保局公布的重金属毒性危害系数

Tab.4 The relative toxicity of some heavy metals published by EPA(U.S.A)

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
毒性危害系数	20	22	12	30	26	30	30
归一化值	1.67	1.83	1	2.5	2.17	2.5	2.5

表5 近岸沉积物可吸收态重金属的百分比

Tab.5 The percentage in useable forms of heavy metals in coastal sediments

海域	金属元素						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
渤海湾	55	56	30	-	-	25	
黄河口	48	45	19.5	-	34	17.5	80
长江口	55.6	75.1	49.8	94.5	-	-	-
台湾海峡西区	39.1	73.9	32.5	86.4	26.3	-	96.7
珠江口	55	32.5	34	95	-	-	-
平均百分比	50.5	56.5	33.2	92	30.1	21.2	88
归一化值	2.4	2.66	1.56	4.3	1.11	1	4.15

注:含易利用态和较易利用态,此表据文献[6]整理。

表6 重金属毒性响应系数的推算

Tab.6 The improve management about the toxicity response coefficients of heavy metals

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg
A = Σ 归一化值	8.3	8.89	3.70	94.8	4.57	5.41	195
B = (A) ^{1/2}	2.88	2.98	1.92	9.7	2.14	2.32	14
取整并适当调整	3	3	2	10	3	3	14
毒性响应系数	6	6	4	20	6	6	28

3.5 生态风险性分级

重金属对渔业生物体的“三致”效应研究数据,目前还极为稀少。因而,利用“三致”效应在渔业生物体内的具体重金属浓度,划分近岸渔业海域沉积物重金属生态风险级别的条件还不成熟。Hakanson^[4]的划分思路虽然有一定局限,需要改进,但它仍然被许多学者引用或参考。

Hakanson^[4]根据淡水环境推算出的重金属毒性响应系数(锌、铬、铜、铅、砷、镉、汞分别为1、2、5、5、10、30、40)和以前的生态风险分级方法^[4-6]不太适合在海洋生态研究中应用。比如,锌的含量超过参比值几十倍,达到数千 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高含量,却可能被认为只有轻度危害。因此,参照文献[4]的分级方法,根据海洋渔业生态环境的特点和表6所示的重金属毒性响应系数,本文提出如表7所示的分级方法,并进行初步应用。

表7 近海渔业水域沉积物重金属生态风险分级

Tab.7 The ecological risk gradation of heavy metals in sediments of coastal fishery waters

危害性	极轻(极低)	轻(或低)	中等	重(或高)	极重(极高)
危害系数 EHC	$\text{EHC} < 30$	$30 \leq \text{EHC} < 50$	$50 \leq \text{EHC} < 100$	$100 \leq \text{EHC} < 150$	$\text{EHC} \geq 150$
风险指数 ERI	$\text{ERI} < 100$	$100 \leq \text{ERI} < 150$	$150 \leq \text{ERI} < 200$	$200 \leq \text{ERI} < 300$	$\text{ERI} \geq 300$

4 红海湾沉积物重金属生态风险分析

4.1 生态风险指标的确定

于1997年8月在图1所示站位采样,样品处理和重金属含量测定按文献[12]进行,重金属参比值用红海湾沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd、Ni和总Cr的背景上限值^[13],分别为20、55、90、0.65、30和70($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,干重)。水体对重金属毒性的敏感系数(见表8第2列)用同期测定的海水初级生产力水平^[14]计算。毒性响应系数、生态危害(或风险)分级见表6和表7。

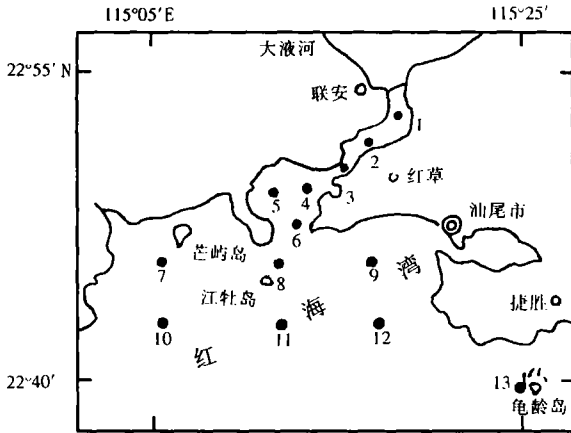


图1 红海湾采样站位示意图

Fig.1 Sampling stations of Honghai Bay

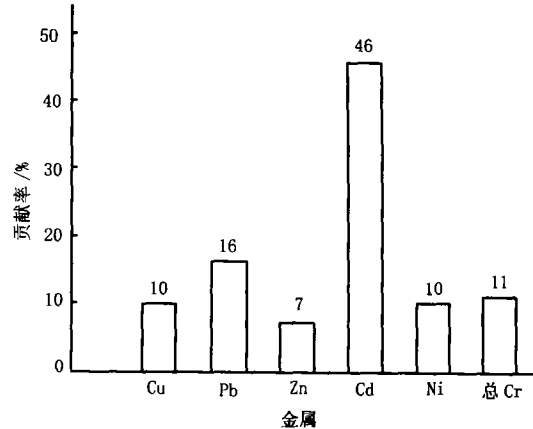


图2 不同金属对 ERI 的贡献率

Fig.2 Contribution of metals to ERI

4.2 分析结果及讨论

红海湾沉积物重金属生态危害(或风险)分析结果见表8。从表8可见,红海湾各测站沉积物多种重金属的 ERI 值均低于 100,生态风险极低。绝大多数测站单一重金属的 EHC 值均小于 30,生态危害属于极轻。但是在湾顶 1 号站,镉的 EHC 值为 48.5,已有轻度的生态危害。用某一重金属各站 EHC 的平均值除以各站 ERI 的平均值,可算出 EHC 对 ERI 总体贡献。从图 2 可见,镉的贡献率为 45.8%,几乎占 6 种重金属的一半。其次是铅(16%)、铬(11%)略高于铜和镍(均为 10%);贡献最小的是锌,仅占 7%。另外,湾顶 1 号、2 号站的 ERI 和 EHC 值一般都高于其它测站,镉、铅、铜、锌的 EHC 尤其如此。

表 8 红海湾沉积物重金属生态危害(或风险)分析结果

Tab.8 The analysis results of the ecological risk of heavy metals in Honghai Bay sediments

站号	$BP^{1/2}/BP^{1/2}$	生态危害系数 EHC(金属及其毒性响应系数 TRC)						生态风险系数 ERI	风险性
		Cu(6)	Pb(8)	Zn(4)	Cd(20)	Ni(6)	Cr(6)		
1	1.50	10.9	11.4	6.27	48.5	6.60	5.24	88.9	极低
2	1.02	9.46	9.45	4.27	25.7	4.00	4.20	57.1	极低
3	1.16	6.19	9.06	4.64	23.2	5.54	4.05	52.7	极低
4	1.06	1.73	3.51	1.75	14.0	3.14	4.59	28.7	极低
5	0.802	2.96	5.52	2.44	12.8	3.22	4.27	31.2	极低
6	1.03	3.18	5.85	2.77	16.5	3.93	5.48	37.7	极低
8	0.738	3.68	5.73	2.73	13.8	3.72	3.40	33.1	极低
9	1.43	3.35	6.82	3.08	22.9	4.52	5.97	46.6	极低
10	0.994	2.83	6.04	2.59	17.4	3.86	5.29	38.0	极低
11	0.598	1.85	3.56	1.67	10.5	2.92	2.76	23.3	极低
12	1.10	4.29	7.71	3.46	19.3	5.43	5.38	45.6	极低
13	1.32	3.34	5.51	1.57	13.8	2.66	5.12	32.0	极低

注:7号站缺叶绿素浓度数据,故未计算 $BP^{1/2}/BP^{1/2}$ 、重金属的 EHC 值和 ERI 值

分析表明,红海湾沉积环境质量总体上比较好,重金属的生态风险是很低的,但已受到河流排污的影响,在湾顶河口区沉积物中,镉、铅、铜、锌有污染的迹象,并初步显示出镉的潜在危害。这同其它研究所得结论^[13,15]基本一致,可互为补充和借鉴。所不同的是,通过生态危害分析,发现镉在海洋生态环境中的相对毒性明显较铅、铜、铬、镍、锌更高(见表6),初次揭示出镉对红海湾局部区域渔业生态的潜在威胁。

如何使生态风险评价体系中人为影响减到最低,同时又能应用于环境评价,本身就是比较复杂的课题。虽然我们在引进国外评价模式的基础上有所改进,但是仍存在许多不足。重金属的氧化态、沉积物的酸碱性和氧化还原电位,以及除加和作用之外的重金属联合毒性效应等,对海洋环境中重金属的生态危害(或风险)影响如何,尚待研究,海洋渔业环境重金属的生态危害评价指标体系还需在更多的理论研究和实际应用中加以提高,使之不断完善。

5 小结

(1) 近岸沉积物重金属对海洋生态的潜在威胁包括单一金属的危害性和多种金属的风险性,分别用生态危害系数 EHC 和生态风险指数 ERI 来描述,其危害的轻重或风险的高低按表7分为5级。

(2) 根据金属元素在地壳、海水、近岸沉积物和经济水产品中的浓度,吸收了重金属对水生生物的毒性试验研究成果,也考虑了近岸沉积物重金属的赋存形态对海洋生物获得重金属的影响,推算出底质重金属对海洋渔业生态的毒性响应系数(见表6)。

(3) 多金属的生态风险指数 ERI 等于单金属的生态危害系数 EHC 之和,单一金属的 EHC 等于 TRC 乘以水体对重金属的敏感度 $BP^{1/2}/BP^{1/2}$ 。

(4) 用上述方法就红海湾沉积物重金属对渔业生态的潜在威胁作了试评价,结果表明,红海湾沉积物多金属生态风险目前处于极低水平,单金属的生态危害绝大多数为极轻,但在湾顶河口区小范围内潜伏着镉的轻度危害。

本所吴进锋、张汉华、梁超愉、邱丽华、王江勇等同志以及广东省海洋与水产局、汕尾市海洋与水产局的同志对本研究给予大力支持和协助,特致谢忱。

参考文献

- [1] Power E A, Chapman P M. Assessing sediment quality[A]. Sediment toxicity assessment[C]. Boca Raton: Lewis Pub, 1992. 1-18.
- [2] Chapman P M. Sediment quality assessment: status and outlook [J]. J Aquatic Ecological Health, 1995, (4): 183-194.
- [3] Baudo R, Munawar M. 2nd international symposium on sediment quality assessment, tools, criteria and strategies in fresh, marine and brackish waters[J]. J. Aquatic Ecosystem Health, 1996, 5(3): 215.
- [4] Hakanson L. An ecological risk index for quality pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, (14): 975-1001.
- [5] 何孟常、王子键、汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 7-10.
- [6] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 171-387.
- [7] 卢焕章(译). 地球化学表[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 171-181.
- [8] Hanson P J, Evans D W, Colby D R. Assessment of elemental contamination in estuarine and coastal environments based on geochemical and statistical modeling of sediments[J]. Mar Environ Res, 1993, (36): 237-266.
- [9] Paul C. Ecology[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1986. 126.
- [10] 刘福纯, 赵永魁, 陈连山, 等. 大连湾、星湾海域贻贝、海带、裙带菜体内 25 种元素含量的分析探讨[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(4): 34-38.
- [11] 汪晶, 和德科, 汪尧衡(编译). 环境评价数据手册-有毒物质鉴定值[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988. 438-439.
- [12] 吴景阳, 李云飞, 张湘君. 海洋沉积物中铁、锰、锌、铜、铬、镍、钴、铅和镉的原子吸收测定[J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 43-49.
- [13] 甘居利, 林钦, 贾晓平, 等. 红海湾底质重金属分布与背景值研究[J]. 热带海洋, 1999, 19(2): 64-71.
- [14] 王增焕, 贾晓平, 林钦, 等. 红海湾水域叶绿素 a 分布特征和初级生产力估算[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 1998(增刊): 30-35.
- [15] 甘居利, 贾晓平, 林钦, 等. 用元素相关图法判断近海沉积物重金属污染[J]. 南海水产研究, 1999, (19): 32-36.