

上海市养殖池塘沉积物中重金属分布及生态风险评价

刘金金, 张玉平, 张芬

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of aquaculture ponds in Shanghai

LIU Jinjin, ZHANG Yuping, ZHANG Fen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20191202877>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[上海地区池塘沉积物中氮、磷、有机碳及重金属风险评价](#)

Risk assessment of nitrogen, phosphorus, organic carbon, and heavy metals in Shanghai aquaculture ponds
中国水产科学. 2020, 27(12): 1448 <https://doi.org/10.3724/SP.J.11118.2020.20107>

[阿哈水库沉积物中重金属分布特征及潜在生态风险评价](#)

Distribution and Ecological Hazard Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediment of Aha Reservoir
水生态学杂志. 2018, 39(4): 24 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2018.04.004>

[上海东风西沙水库表层沉积物重金属含量及生态风险评价](#)

Content characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment of Dongfeng Xisha Reservoir, Shanghai, China
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 709 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403007>

[珠江口表层沉积物中重金属污染及生态风险评价](#)

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment from the Pearl River Estuary
水生态学杂志. 2017, 38(1): 46 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2017.01.008>

[贵州锁黄仓湿地沉积物重金属空间分布及生态风险评价](#)

Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Suohuangcang Wetland in Guizhou Province
水生态学杂志. 2021, 42(1): 49 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.201903150062>

[三沙湾表层沉积物中重金属赋存形态及环境风险评价](#)

Speciation and environmental risk assessment of heavy metals in the surface sediment of Sansha Bay
渔业研究. 2019, 41(2): 121 <https://doi.org/10.14012/j.cnki.fjsc.2019.02.005>

文章编号: 1674-5566(2021)03-00501-14

DOI:10.12024/jsou.20191202877

上海市养殖池塘沉积物中重金属分布及生态风险评价

刘金金, 张玉平, 张 芬

(上海市水产研究所 上海市渔业环境监测站, 上海 200433)

摘 要: 为了解养殖池塘沉积物中重金属分布概况评估其生态风险, 2018 年采集上海市范围内 17 个鱼虾蟹养殖池塘沉积物样品, 检测样品中重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、As) 含量并进行多元统计分析以探究其分布和来源特点, 利用 3 种不同评价方法评估其重金属生态风险。研究表明, 池塘表层沉积物中 Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd 和 Hg 年均含量分别为 (58.36 ± 23.41) mg/kg、(41.96 ± 11.92) mg/kg、(20.61 ± 7.76) mg/kg、(10.87 ± 5.83) mg/kg、(7.81 ± 2.12) mg/kg、(0.13 ± 0.05) mg/kg 和 (0.055 ± 0.03) mg/kg, Cu、Zn、Pb、Cr、As 的年均含量在不同养殖品种之间无显著差异 ($P > 0.05$), 虾塘和蟹塘沉积物中 Cd 和 Hg 年均含量均显著高于鱼塘。池塘沉积物中重金属地质累积指数 (I_{geo}) 由高至低分别为 Cd、As、Cu、Zn、Cr、Hg、Pb, 属清洁等级的样品占比均高于 95%。鱼、虾、蟹塘沉积物中重金属潜在生态危害指数 (RI) 平均值分别为 56.94、76.51 和 69.65, 均属低风险等级。一致性沉积物质量基准 (CBSQGs) 评价结果显示池塘沉积物样品中重金属的平均可能效应浓度商 (M_{PEC-Q}) 均低于 0.5, 即重金属整体上不会产生生物毒性效应。

关键词: 养殖池塘; 沉积物; 重金属; 生态评价

中图分类号: X 52 **文献标志码:** A

随着工业化进程不断发展, 水环境受重金属污染物的影响日趋严重, 水体沉积物作为水环境生态系统的重要组成部分, 其污染变化将不可避免地影响到水体质量以及生态系统中其他环境组成部分, 沉积物中重金属污染可直接影响到底栖生物群落^[1-2], 可持续向水体贡献污染负荷^[3-4], 可通过被生物体吸收随食物链逐级积累, 给人身体健康带来威胁^[5-6], 因此沉积物中重金属风险研究具重大意义。上海市作为中国人口密集型城市的代表, 其城市土壤多次被报道呈重金属污染状态^[7-8], 人类活动和轮胎磨损是地表重金属的主要来源^[9], 如上海市交通干道周边土壤重金属污染严重^[10-12]。目前, 上海市重要水域淀山湖^[13]、黄浦江^[14]以及长江口^[15]沉积物中重金属分布状况也已摸清, 而作为小水面的淡水养殖池塘其沉积物中重金属的相关研究尚未见报道, 同时重金属因其环境持久性和生物富集性等

特点会对养殖环境质量和水产品品质产生重大影响^[16], 因此本文旨在明晰上海市淡水养殖池塘沉积物中重金属的分布特点, 评估其生态风险, 为养殖环境治理、提高水产品品质提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2018 年在上海市青浦区、松江区、奉贤区、崇明区和浦东新区共布设 17 个淡水养殖池塘采样点, 其中, 5 个淡水鱼池塘 (F1 ~ F5), 养殖品种主要包括草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、翘嘴红鲌 (*Culter alburnus*) 等, 6 个凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 池塘 (S1 ~ S6) 和 6 个中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 池塘 (成蟹, C1 ~ C6), 采样点编号、池塘养殖信息以及采样时间详见表 1。鱼

收稿日期: 2019-12-12 修回日期: 2020-01-31

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字[2015]第 6-3-3 号); 上海市科技兴农推广项目(沪农科推字[2017]第 1-12 号)

作者简介: 刘金金(1989—), 女, 硕士, 研究方向为渔业环境评价与修复。E-mail: jinjin0611@126.com

通信作者: 张玉平, E-mail: 13918321369@163.com

塘和蟹塘沉积物每个季度采集1次,虾塘沉积物在其养殖周期(4—10月)内共采集3次。利用柱状采泥器(北京普雷德仪器设备有限公司)在池塘对角线上平均取3点采集3管表层20 cm的沉

积物样品,现场分0~10 cm和10~20 cm两层,同层样品混匀。所有沉积物样品带回实验室后去除石块、螺蛳等杂质,自然风干后研磨过100目(孔径0.150 mm)筛,存储待测。

表1 采样池塘养殖信息及采样时间汇总

Tab.1 Summary of aquaculture informations and sampling time

养殖品种 Aquaculture species	池塘编号 Pond No.	池塘面积 Area /hm ²	2018年产量 Yield in 2018/(kg/hm ²)	2018年采样时间 Sampling time
淡水鱼 Fresh water fish	F1	0.40	12 500.0	3,5,8,11月
	F2	1.40	50 000.0	
	F3	2.00	22 500.0	
	F4	0.51	9 750.0	
	F5	0.50	28 680.0	
凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	S1	0.40	4 875.0	5,7,9月
	S2	0.83	480.0	
	S3	0.33	1 425.0	
	S4	0.43	692.3	
	S5	0.33	3 750.0	
	S6	0.57	7 500.0	
中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>	C1	0.73	115.9	3,5,8,11月
	C2	0.67	135.0	
	C3	0.33	1 650.0	
	C4	0.67	1 275.0	
	C5	0.33	105.0	
	C6	2.93	975.0	

1.2 样品测定与数据处理

所有沉积物样品测定Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、As以及总氮(TN)、总磷(TP)、总有机氮(TOC)含量(均为干质量),Cu、Zn、Pb、Cr、Cd和As等元素的测定参照《土壤和沉积物12种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016);沉积物中Hg的测定参照《土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定微波消解-原子荧光法》(HJ 680—2013);沉积物中TN的测定:称取0.5 g样品和5 g CuSO₄-K₂SO₄混合催化剂于消解管中,添加8 mL浓硫酸,420 °C消解1 h,用全自动凯氏定氮仪(KJELTEC 8400 AUTO SYSTEM,上海沛欧分析仪器有限公司)测定消解液中氮含量;沉积物中TP的测定参照《土壤总磷的测定碱熔-钼锑抗分光光度法》(HJ 632—2011);采用燃烧氧化-非分散红外法分别测定土壤中总碳和无机碳含量,差减法得出TOC含量。为保证测定结果的准确性,对样品进行了重复性分析(重复率为5%)和标准样品分析,所有样品分析误差均小于10%,符合质量控制要求。

利用Excel 2013进行数据汇总,SPSS 19.0

进行数据统计分析,数据显著性差异分析方法为单因素ANOVA分析,以 $P < 0.05$ 作为差异显著性水平。对所有重金属数据进行KMO和Bartlett球形度检验,结果显示KMO值为0.686,大于0.6,相伴概率为0.00,可进行因子分析(PCA)。利用Excel 2013和Qorigin 8.0绘图。

1.3 评价方法

1.3.1 地质累积指数法

地质累积指数(Geo-accumulation index, I_{geo})法^[17]主要用于对沉积物外源重金属的累积状况进行评价,计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_d^i}{K \times C_s^i} \quad (1)$$

式中: C_d^i 为沉积物中重金属*i*的实测值,mg/kg; K 为造岩运动可能引起的背景值波动而设定的常数,一般为1.5; C_s^i 为相应重金属元素的地球化学背景值,mg/kg。根据 I_{geo} 值对沉积物污染程度分级: $I_{geo} \leq 0$,清洁; $0 < I_{geo} \leq 1$,轻度污染; $1 < I_{geo} \leq 2$,偏中度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$,中度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$,偏重度污染; $4 < I_{geo} \leq 5$,重度污染; $I_{geo} > 5$,极重度污染。

1.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数 (potential ecological risk index, RI) 法^[18]考虑不同金属毒性对生物的生态风险,可定量评价沉积物中重金属潜在生态危害程度,计算公式如下:

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times \frac{C_d^i}{C_s^i}) \quad (2)$$

式中: I_R 为潜在生态危害指数; C_d^i 为重金属 i 在沉积物中的实测值,mg/kg; C_s^i 为重金属 i 的背景参考,mg/kg; C_f^i 为重金属 i 的污染系数; T_r^i 为重金属 i 的生态毒性响应系数,Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 的毒性系数分别取 5、1、5、30、2、40 和 10; E_r^i 为单因子重金属 i 的生态危害系数。RI 等级划分结果见表 2。

表 2 潜在生态危害指数法相关等级划分

Tab.2 Method of potential ecological risk index related grade classification

系数范围 Index range		风险等级 Risk grade
单因子生态危害系数 Er	潜在生态危害指数 RI	
Er ≤ 40	RI ≤ 150	低风险
40 < Er ≤ 80	150 < RI ≤ 300	中度风险
80 < Er ≤ 160	300 < RI ≤ 600	高度风险
160 < Er ≤ 320	RI > 600	严重风险
Er > 320	-	极严重风险

1.3.3 一致性沉积物质量基准法

沉积物质量基准 (sediment quality guidelines, SQGs) 是评价海洋、河口和淡水沉积物环境质量的有效工具^[19],目前世界各地利用不同方法构建了十多种数值型沉积物质量基准,根据其构建特点适用于不同的区域及评价目标^[20]。一致性沉积物质量基准 (consensus-based sediment quality guidelines, CBSQGs) 是一种着重于协调不同基准优劣的聚合沉积物基准,它通过筛选几种具有相似评价目标的单个 SQGs,取其几何平均值来获得相应污染物的效应浓度。CBSQGs 包括 2 个阈值,即阈值效应浓度 (threshold effect concentration, TEC) 和可能效应浓度 (probable effect concentration, PEC),当沉积物中污染物含量低于前者时,生物毒性效应发生的可能性很小,通常低于 25%,即认为不会发生生物毒性效应;当沉积物中污染物含量高于后者时,有害生物效应发生的可能性较大,通常大于 75%,即认为会发生生物毒性效应;当污染物含量介于 TEC 和 PEC 之间时,认为发生和不发生生物毒性效应的概率相当,无法确定。目前 MACDONALD 等^[21]提出的一致性基准在淡水沉积物领域应用较为广泛,本文根据其相关重金属的 TECs 和 PECs 值(表 3)评价上海市淡水养殖池塘沉积物中的重金属生物毒性风险。

表 3 一致性沉积物质量基准 (CBSQGs) 的 TECs 和 PECs 值

Tab.3 Values of TECs and PECs in method of CBSQGs mg/kg

重金属 Heavy metals	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
阈值效应浓度 TECs	31.60	121.00	35.80	0.99	43.40	0.19	9.79
可能效应浓度 PECs	149.00	459.00	128.00	4.98	111.00	1.06	33.00

2 结果与分析

2.1 重金属的分布

由图 1 和表 4 可知:0~20 cm 层沉积物中重金属平均含量分别为 Zn (58.36 ± 23.41) mg/kg、Cr (41.96 ± 11.92) mg/kg、Cu (20.61 ± 7.76) mg/kg、Pb (10.87 ± 5.83) mg/kg、As (7.81 ± 2.12) mg/kg、Cd (0.13 ± 0.05) mg/kg 和 Hg (0.055 ± 0.03) mg/kg,其中 Pb 的变异系数较大,空间异质性较高。池塘之间各重金属年均含量有所差异,大多差异不显著,个别池塘沉积物中重金属含量明显较低或较高,如 F1 池塘沉积物中各重金属含量均较低,F2 沉积物中 Pb 和 Cr 年均含量较高,F5 沉积物中 Cu 含量较高,S2 沉积物中 Cd 含量较高,S3 沉积物中 Zn 含量较高,C3 沉积物中 Pb、Cr、As 含量较高。0~20 cm 层沉积物中 Cu、

Zn、Pb、Cr 和 As 的年均含量在养殖品种(鱼、虾、蟹)之间均无显著差异($P > 0.05$), Cd、Hg 在虾塘和蟹塘沉积物中年均含量显著高于鱼塘($P < 0.05$)。统计分析表明,沉积物 0~10 cm 和 10~20 cm 层部分重金属含量差异显著($P < 0.05$),鱼塘 0~10 cm 层 Cu 含量显著高于 10~20 cm 层,虾塘 0~10 cm 层 Pb 含量、蟹塘沉积物 0~10 cm 层 Zn 和 Hg 含量均显著高于其 10~20 cm 层($P < 0.05$),可见池塘表层沉积物重金属累积量略高。

以《无公害食品淡水养殖产地环境条件》(NY 5361—2010)中对养殖产地底质中重金属质量要求为标准,个别样品存在重金属超标现象,5月池塘 S2 的 0~10 cm 层 Cd 超标,3月池塘 C3 和 5月池塘 F2 的 0~10 cm 层 Cr 超标,超标现象均发生在沉积物表层,且多集中于养殖周期的前期,表明池塘沉积物中重金属的表层富集可能与养殖前期的肥水操作有关。养殖前期池塘蓄水后,为稳定水质,提高水体肥度,会向(虾)池塘泼洒添加剂和藻种,添加剂中重金属超标的可能性较大^[22]。与周边水域沉积物中重金属含量相比(图 2):池塘沉积物中 Cu、Cd、Zn 含量略高于上海北部长江口^[15], Pb、As、Hg 含量与其相当; Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、As 含量均低于太湖流域河流,太湖流域水系流经城市建筑群以及高度集约化农业生产区,水系沉积物中重金属含量较高^[23]; Cu、Pb、Cd 和 Cr 含量低于淀山湖表层沉积物,淀山湖沉积物受工业和道路交通影响较大^[12];同浙江省北部淡水养殖池塘^[24-25]相比,上海地区淡水池塘沉积物中重金属含量明显较低。

2.2 重金属来源

沉积物中重金属等指标的相关关系(表 5)表明:重金属之间普遍存在显著相关性,但 Cu、Zn、Cr 均与 Cd 和 Hg 无显著相关性($P > 0.05$), As 与 Cd 无显著相关性($P > 0.05$),表明重金属来源既有其共性又有所不同。Cu、Cd 均与 TN、TP 和 TOC 呈显著相关性($P < 0.05$),说明沉积物中 Cu、Cd 的来源与氮、磷等营养元素的来源有关,进水和饲料是池塘中氮、磷的主要来源^[26],因此 Cu、Cd 的主要来源之一可能是进水和饲料。因

子分析(PCA)结果的载荷图(图 3)显示,Cr、As、Pb、Zn 和 Cu 为第一主成分主要构成,累积方差贡献率为 44.5%, Cd 和 Hg 为第二主成分主要构成,共累积方差贡献率为 62.5%,该结果与相关性分析结果类似, Cd 和 Hg 存在不同于其他重金属的来源。据上述多元统计分析,可将池塘沉积物中重金属元素来源分为几类:第一类为 Cr、As、Pb,主要受土壤基底影响,上海市的潮滩性底质受工业和生活排污的影响, Cr、Pb 等累积量较大^[27];第二类为 Zn 和 Cu, Zn 和 Cu 是养殖生物生存和生产的必需元素,渔用饲料中普遍添加^[28],另外养殖过程中硫酸铜等鱼药的使用会导致养殖环境中 Cu 含量的不断增加^[29];第三类为 Cd 和 Hg, Cd 的主要来源为添加饲料,鱼粉作为渔用饲料的优质蛋白源,对水产动物提供的营养成分及诱食效果使其在水产饲料中无法被完全取代,但鱼粉中 Cd 含量超标比例较为严重^[30]。池塘沉积物样品中 Hg 与氮、磷等营养元素以及 Cu、Zn、Cr 等重金属相关性差,表明 Hg 存在与其他重金属不同的来源。基于池塘沉积物中重金属来源分析便可解释与周边水域沉积物中重金属含量差异的原因:同属上海地区的上海北部长江口沉积物与池塘土壤基底相似,重金属含量相当,但池塘更易受投入品的影响,因此池塘沉积物中 Cu、Zn 和 Cd 含量略高;同为淡水养殖池塘的浙江北部池塘沉积物中重金属含量明显高于上海地区,一方面原因为前者样品采集自沉积物表层 0~5 cm,重金属在沉积物表层的累积量较高,另一方面可能归因于饲料添加量,上海地区淡水池塘养殖(尤其是淡水鱼)与休闲农业相结合的比例逐年上升,养殖过程中相对较低的饲料投喂量降低了沉积物中重金属的主要来源——粪便和残饵量,浙江北部湖州、嘉兴两地淡水产品产量大,位列全国三大淡水养殖区^[31],高产量要求较高的单位面积饲料投入量,粪便和残饵的大量累积导致池塘沉积物中重金属含量较高。对比表 1 和图 1 中池塘产量及沉积物重金属年均含量可见重金属含量较低的池塘 F1 产量较低,重金属含量较高的池塘 F2 和 C3 产量均较同品种其他池塘高。

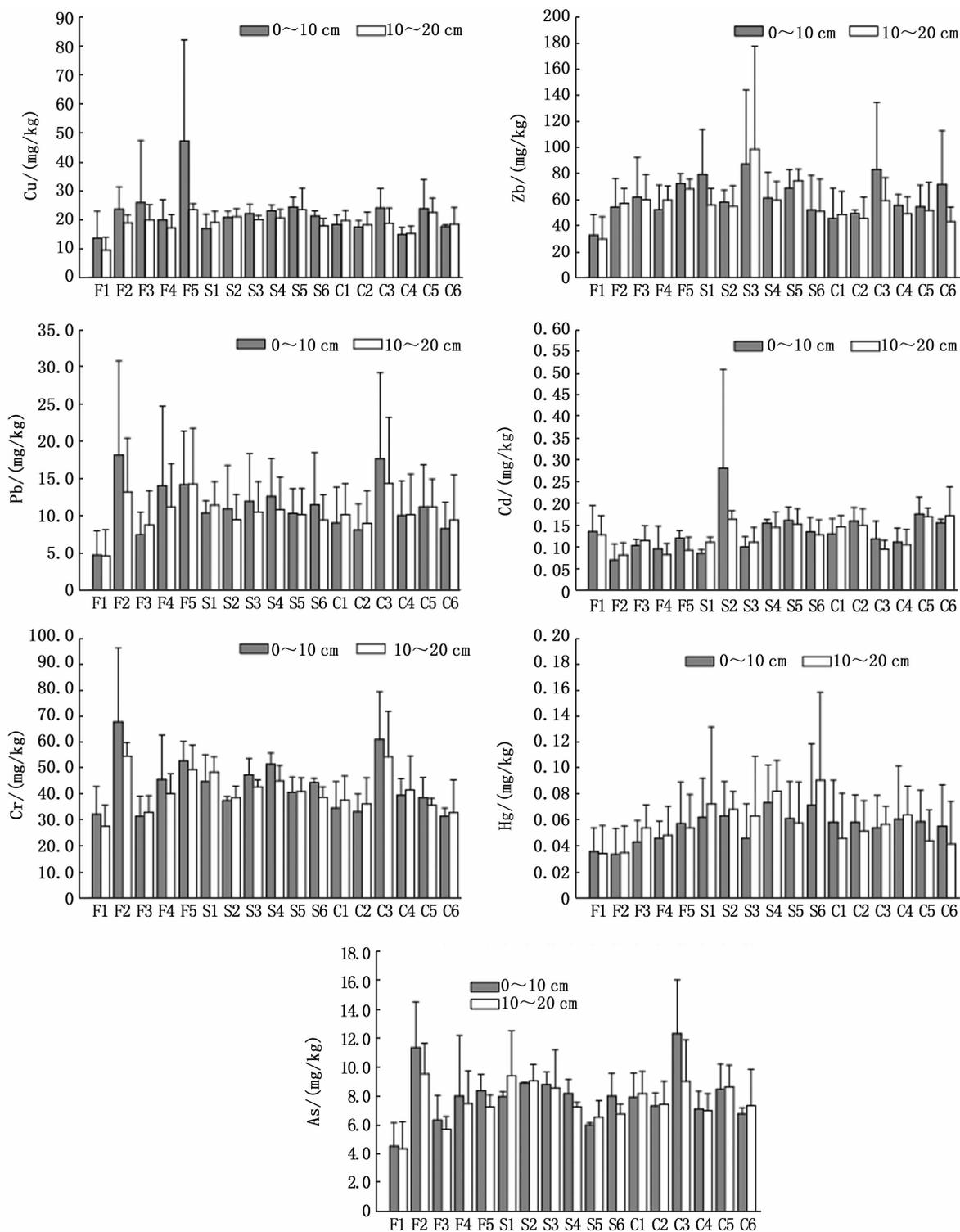


图1 池塘0~10 cm层和10~20 cm层沉积物中重金属年均含量分布

Fig.1 Annual distribution of heavy metals in 0 – 10 cm deep and 10 – 20 cm deep sediment of aquaculture ponds

表4 池塘0~20 cm层沉积物中重金属、TN、TP和TOC年均含量汇总

Tab.4 Average concentrations of heavy metal, TN, TP, and TOC in 0-20 cm deep sediment of aquaculture ponds

池塘 Ponds	mg/kg									
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	TN	TP	TOC
淡水鱼 Freshwater fish	22.00 ± 12.29	54.92 ± 19.68	11.09 ± 7.48	0.102 ± 0.034 ^A	43.41 ± 15.29	0.044 ± 0.02 ^A	7.29 ± 2.74	838.91 ± 437.84	829.15 ± 339.34	6.87 ± 4.04
凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	20.96 ± 3.26	66.82 ± 29.83	10.80 ± 3.71	0.144 ± 0.061 ^B	43.36 ± 4.84	0.068 ± 0.032 ^B	7.95 ± 1.36	1001.04 ± 258.99	778.12 ± 180.68	7.89 ± 3.48
中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>	19.19 ± 4.90	54.89 ± 28.68	10.73 ± 3.92	0.140 ± 0.06 ^B	39.7 ± 11.19	0.054 ± 5.402 ^B	8.12 ± 3.40	797.51 ± 305.85	776.74 ± 213.88	6.04 ± 3.35
均值 Average	20.61 ± 7.76	58.36 ± 23.41	10.87 ± 5.83	0.129 ± 0.05	41.96 ± 11.92	0.055 ± 0.028	7.81 ± 2.12	869.95 ± 375.80	795.58 ± 275.65	6.84 ± 4.56
变异系数 CV/%	37.64	40.11	53.62	37.63	28.41	49.41	27.13	43.2	34.65	66.58

注:列内含相同上标字母的两数据间无显著差异(P>0.05)。

Notes: No significant difference between data which's marked the same letter in one column (P>0.05).

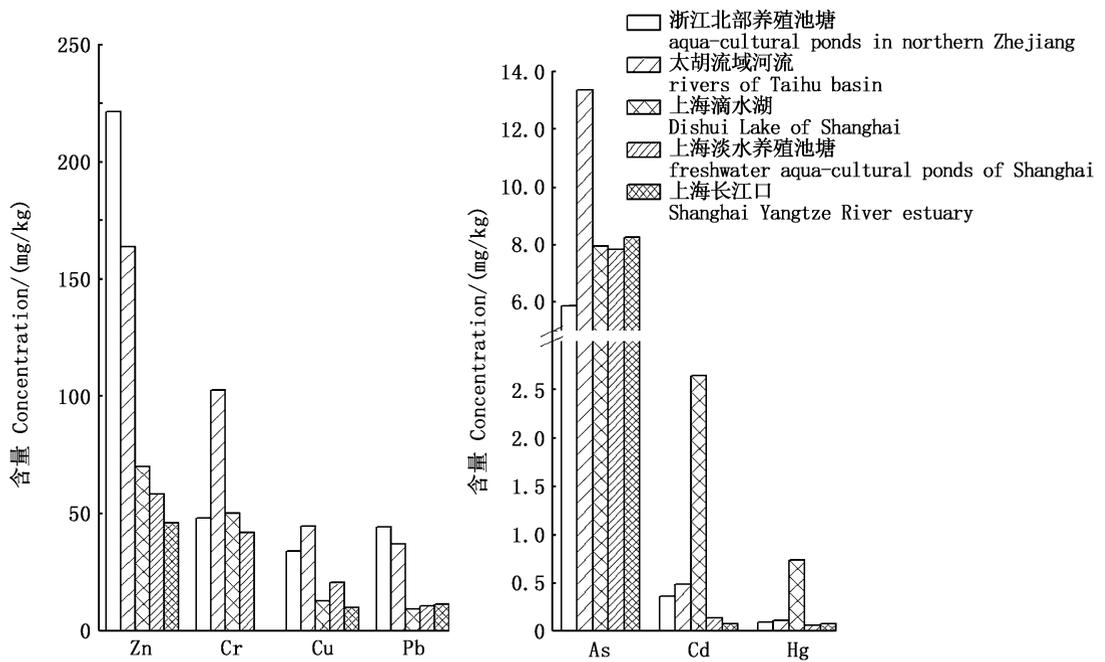


图2 上海市周边水域沉积物中重金属含量分布

Fig.2 Distribution of heavy metals in sediments of the waters around Shanghai

表5 淡水养殖池塘沉积物中氮、磷、碳以及重金属等各指标间相关关系

Tab.5 Correlations of nitrogen, phosphorus and heavy metals in pond sediments

n = 124

指标 Indicators	TN	TP	TOC	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
TN	1									
TP	0.505 **	1								
TOC	0.692 **	0.468 **	1							
Cu	0.563 **	0.502 **	0.449 **	1						
Zn	0.156	-0.037	0.114	0.313 **	1					
Pb	0.049	-0.216 *	-0.044	0.248 **	0.345 **	1				
Cd	0.204 *	0.230 *	0.265 **	0.150	0.083	0.253 **	1			
Cr	0.098	-0.236 **	0.035	0.390 **	0.411 **	0.789 **	0.036	1		
Hg	0.130	-0.036	-0.053	-0.066	0.128	0.500 **	0.290 **	0.175	1	
As	-0.036	-0.239 **	-0.128	0.303 **	0.377 **	0.740 **	0.151	0.724 **	0.182 *	1

注: ** 表示在0.01水平(双侧)上显著相关; * 表示在0.05水平(双侧)上显著相关(双尾检测)。

Notes: ** Correlation is significant at P<0.01 level; * Correlation is significant at P<0.05 level(two-tailed).

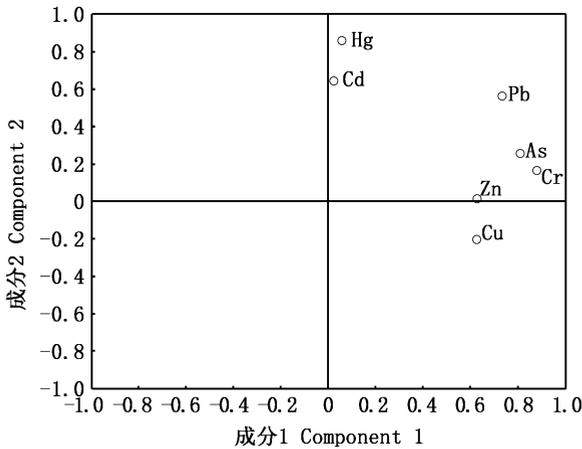


图3 重金属二维因子载荷图
Fig.3 Component plot of heavy metals in rotated space

2.3 重金属风险评价

重金属风险评价的关键在于评价方法和背景值或阈值的选取,选用不同的评价方法或重金属背景值可能会出现完全不同的评价结果。中国地域辽阔,水域分布较广,水域沉积物所处地理位置、受人为干涉程度等差异大,不同水域沉积物中重金属背景值差异较大(表6),鉴于土壤中重金属背景值具有强区域性特点,本文地质累积指数及潜在生态风险评价中背景值选用中国环境监测总站1990年发布的《中国土壤元素背景值》中上海市表层0~20 cm土壤中重金属背景值,使评价结果能更好地说明本地土壤中重金属的累积状况。

表6 土壤中重金属含量背景值及沉积物质量基准值汇总

Tab.6 Heavy metal backgrounds in soils of different areas

分类 Category	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	来源 Source
上海市土壤背景值 Soil backgrounds of Shanghai	27.200	81.300	25.000	0.138	70.200	0.095	9.100	中国环境监测总站 ^[32]
全国土壤背景值 Soil backgrounds of China	22.600	74.200	26.000	0.097	61.000	0.065	11.200	中国环境监测总站 ^[32]
江苏省土壤背景值 Soil backgrounds of Jiangsu	22.300	-	26.200	0.050	77.800	0.289	10.000	孙敏华等 ^[33]
广东省土壤背景值 Soil backgrounds of Guangdong	8.000	21.000	23.400	0.034	36.140	-	5.400	许炼烽等 ^[34]
太湖流域河流沉积物 River sediment backgrounds of Taihu basin	18.870	59.070	15.680	0.271	79.430	0.110	9.400	张杰等 ^[23]
内地及沿海水系沉积物 Sediment backgrounds of waters inland and coastal	22.000	-	27.200	0.140	60.000	0.054	9.000	伦知颖等 ^[35]

2.3.1 地质累积指数评价

2018年上海市淡水养殖池塘沉积物中重金属平均含量(表4)低于上海市土壤背景值(表6),直观可见上海市池塘沉积物整体上无明显重金属污染,地质累积指数评价结果表明:池塘沉积物样品中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg和As处清洁等级的样品占比分别为97.58%、95.97%、100%、95.16%、99.19%、99.19%和95.97%。极少批次样品属轻度污染(0.81%~4.03%)或偏中度污染(0.81%),表明池塘沉积物中重金属外源累积较少,整体呈清洁状态。各重金属平均地质累积指数 I_{geo} (表7)由高至低分别为Cd>As>Cu>Zn>Cr>Hg>Pb,鱼塘沉积物中Cd地质累积指数显著低于虾塘和蟹塘($P < 0.05$),虾塘沉积物中Hg地质累积指数显著高于鱼塘($P < 0.05$),虾、蟹塘之间无显著差异($P > 0.05$)。

2.3.2 潜在生态危害指数评价

潜在生态危害指数(RI)统计结果(图4)表明:淡水鱼、凡纳滨对虾和中华绒螯蟹池塘沉积物中重金属RI均值分别为56.94、76.51和69.65,鱼塘RI均值显著低于虾塘和蟹塘($P < 0.05$),重金属潜在生态危害风险低。各养殖品种池塘沉积物中重金属单因子潜在生态危害系数(E_r)均值低于40,均属低潜在生态危害风险,各重金属 E_r 均值由高至低分别为Cd>Hg>As>Cu>Pb>Cr>Zn,其中Cd和Hg对沉积物重金属综合潜在生态危害指数(RI)的贡献率最大,平均达74.4%。这与湖州市淡水养殖池塘沉积物中重金属的潜在生态危害评价结果顺序一致^[28],重金属Cd的单因子潜在生态危害系数最高,但上海地区养殖池塘沉积物中Cd的潜在生态危害系数($E_r^{Cd} = 28.12$)明显低于湖州市养殖池塘表层沉积物($E_r^{Cd} = 102.03$)。

表 7 不同养殖品种池塘沉积物中重金属地质累积指数 I_{geo} 描述性统计

Tab.7 Descriptive statistics of I_{geo} of heavy metals in sediment of different species aquaculture ponds

重金属 Heavy metal	品种 Species	均值 Average	标准差 Stdev	极小值 Min.	极大值 Max.	污染程度等级 Pollution class
Cu	鱼	-1.124	0.808	-3.441	1.264	清洁
	虾	-0.984	0.271	-1.872	-0.492	清洁
	蟹	-1.139	0.389	-2.062	-0.281	清洁
Zn	鱼	-1.297	0.782	-4.631	-0.191	清洁
	虾	-0.989	0.589	-2.485	0.637	清洁
	蟹	-1.266	0.590	-3.262	0.384	清洁
Pb	鱼	-2.084	1.000	-4.242	-0.235	清洁
	虾	-1.875	0.472	-2.488	-0.937	清洁
	蟹	-1.985	0.712	-3.481	-0.275	清洁
Cd	鱼	-1.122 ^B	0.561	-2.661	0.117	清洁
	虾	-0.638 ^A	0.519	-1.452	1.390	清洁
	蟹	-0.627 ^A	0.439	-1.535	0.238	清洁
Cr	鱼	-1.369	0.513	-2.172	0.008	清洁
	虾	-1.294	0.202	-1.637	-0.938	清洁
	蟹	-1.471	0.423	-2.623	-0.345	清洁
Hg	鱼	-1.899 ^B	0.869	-4.504	-0.582	清洁
	虾	-1.275 ^A	0.810	-3.087	0.155	清洁
	蟹	-1.586 ^{AB}	0.798	-3.536	-0.247	清洁
As	鱼	-1.012	0.575	-2.235	0.071	清洁
	虾	-0.805	0.274	-1.289	-0.087	清洁
	蟹	-0.797	0.370	-1.722	0.195	清洁

注:均值列中标有相同上标字母的两均值表明在其所在行的重金属均值差异不显著 ($P > 0.05$)。

Notes: No significant difference between two mean values marked the same letter in average column ($P > 0.05$).

Cd 和 Hg 的潜在生态危害系数在不同养殖品种的池塘沉积物之间存在显著差异,虾塘和蟹塘沉积物中的 E_r^{Cd} 显著高于鱼塘 ($P < 0.05$),虾塘沉积物中 E_r^{Hg} 显著高于鱼塘和蟹塘 ($P < 0.05$)。尽管各重金属 E_r 均值均属低风险范围,但个别池塘沉积物样品中 Cd(8.9%) 和 Hg(3.2%) 的潜

在生态危害系数仍属中度风险甚至高度风险,如养殖初期 S2 池塘 0~10 cm 层 $E_r^{Cd} = 117.95$,属高度潜在生态危害风险,这与长三角地区养殖池塘底泥和水产品中重金属污染状况的研究结果一致,池塘沉积物和养殖水产品中 Cd 的污染最重,且底栖类养殖水产品的安全风险高于鱼类^[36]。

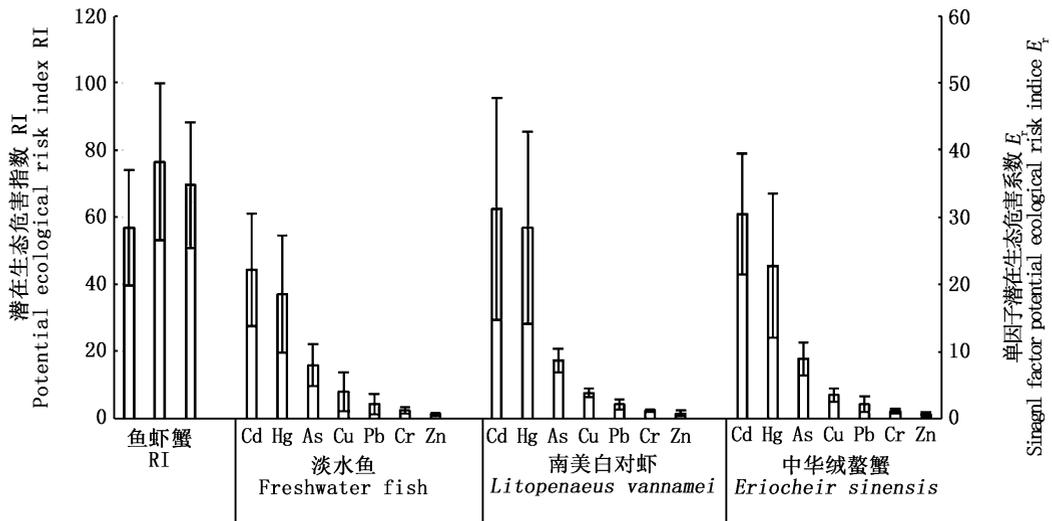


图 4 淡水养殖池塘沉积物中重金属潜在生态危害系数柱状分布图

Fig.4 Histogram of potential ecological risk index of heavy metals in sediment of aquaculture ponds

2.3.3 一致性沉积物质量基准法评价

对比淡水沉积物一致性沉积物质量基准(CBSQGs)阈值(表3):所有池塘样品中重金属含量均低于其可能效应浓度,见图5,且所有池塘沉积物中Pb、Cd、Hg的质量浓度均低于其阈值效应浓度,表明沉积物中Pb、Cd和Hg不会引发生物毒性效应,沉积物中Cr、As、Cu和Zn质量浓度介于TECs和PECs之间的样品量所占比例分别为38.7%、17.7%、4.8%和3.2%,这些沉积物存在引发生物毒性的可能,其中Cr相关的比例较高,按养殖品种分类统计表明虾塘和鱼塘沉积物样品中该比例较高,分别为47.2%和45.0%。

LONG等^[37]引用平均可能效应浓度商(mean probable effect concentration quotient, M_{PEC-Q})来评价多种重金属致污物的综合生物毒性效应,其计算公式:

$$M_{PEC-Q} = (\sum_{i=1}^n C_d^i / P_{ECi}) / n \quad (3)$$

式中: C_d^i 为第*i*种重金属的实测值,mg/kg; P_{ECi} 为第*i*种重金属的可能效应浓度,mg/kg; n 为重金属种类个数。当沉积物中重金属 $M_{PEC-Q} > 0.5$ 时发生生物毒性概率随 M_{PEC-Q} 呈指数上升趋势, $M_{PEC-Q} = 0.5$ 时沉积物发生生物毒性概率为25%,即认为当 $M_{PEC-Q} < 0.5$ 时沉积物中重金属不会引发生物毒性反应,统计表明池塘沉积物中重金属 M_{PEC-Q} 均值为0.133,各批次样品均未出现 $M_{PEC-Q} > 0.5$ 的情况,表明池塘沉积物中重金属整体上处于生物毒性安全范围,不会引发生物不良效应。

3 讨论

地质累积指数和潜在生态风险评价结果显示2018年上海市养殖池塘沉积物中重金属整体上处于清洁和低风险等级,不同养殖品种之间,虾塘沉积物中Cd、Hg的 I_{geo} 和 E_r 较其他养殖品种高。上海郊区农田土壤中Cd含量为0.11~0.20 mg/kg^[38-39],与池塘沉积物中Cd含量相当,面源污染对池塘沉积物中Cd的影响较小,饲料是池塘沉积物中Cd的主要来源之一,饲料中过量的Cd主要来自一些动物性原料^[31]、矿物质添加剂等^[40]。涂杰峰等^[41]测定了17种水产饲料中重金属的含量,其研究结果显示不同养殖品种饲料成分差异较大,淡水鱼饲料中Cd、Hg含量分别为0.12和0.021 mg/kg,对虾饲料中则分别为

0.08~3.05和0.011~0.204 mg/kg,对虾饲料中Cd、Hg含量范围明显高于淡水鱼饲料,且一种对虾饲料中Cd含量高达3.05 mg/kg,比沉积物中Cd含量高22倍。可见饲料成分可能是导致不同养殖品种池塘沉积物重金属含量存在显著差异的主因之一。养殖过程中还会有其他投入品(如肥料、微生物制剂以及药品等)进入池塘生态系统,对沉积物中重金属的分布产生影响,而沉积物中的重金属也会通过生物富集在养殖生物体内累积,有研究^[36]显示长三角淡水养殖池塘沉积物样品中Cd的超标率达67%,水产品中Cd的污染情况最为严重,存在食用安全隐患,因此池塘投入品以及养殖生物体中重金属的分布及相互影响均有待进一步深入研究。

一致性沉积物质量基准法(CBSQGs)评价结果表明整体上池塘沉积物中重金属引发生物毒性效应的概率极低,单独重金属元素分析Cr可能引发生物毒性的概率相对较高,这一结果与潜在生态危害指数评价结果(Cd、Hg的潜在生态风险相对较高)有所不同,这可能与评价方法中的背景值和生态毒性响应系数的差异有关。潜在生态危害指数评价法中上海市土壤中Cd背景值较低,仅为CBSQGs基准中 TEC_{Cd} 的0.14倍,而CBSQGs基准中 TEC_{Cr} 值较低,为前者的0.62倍,其他指标背景值差异较小,同时潜在生态危害指数法中Cd的生态毒性响应系数是Cr的15倍,这均导致潜在生态危害指数法对Cd的评价较CBSQGs严格。吴斌等^[42]提出的CBSQGs基准可靠性评估显示Hg的无毒性预测概率较低(35%),因此本文利用CBSQGs法对沉积物中Hg的无毒性预测可能相对较保守。CBSQGs基准中TEC和PEC的值是根据美国境内典型淡水河流沉积物^[43-44]中SQGs获得的,与我国科研人员获得的国内水系沉积物SQGs有所差异。国内学者从20世纪90年代开始致力于研究国内重要水系沉积物质量基准,陈静生等^[45]在1992年对国内外水体沉积物质量基准获取方法做了相对较全面的归纳研究,王飞越^[46]、郑丙辉等^[47]利用相平衡分配法(EqP)分别建立了长江中下游水系和太湖沉积物重金属质量基准,张婷等^[48]利用国际广泛应用的生物效应数据库(biological effect database for sediments, BEDS)法获得了淡水沉积物中Cu、Zn、Pb、Cd、Ni的浓度基准,前4种重金

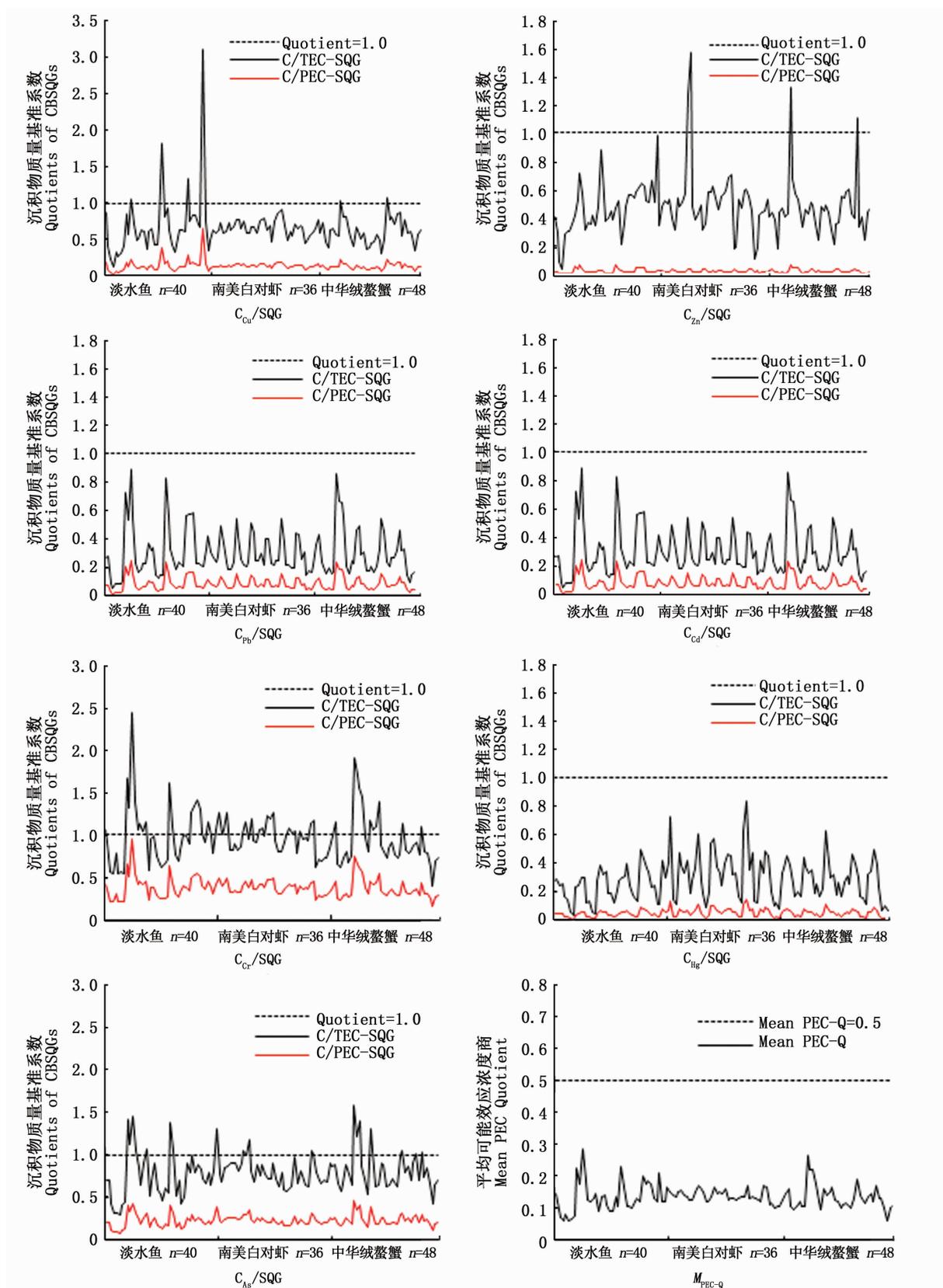


图5 淡水养殖池塘沉积物重金属沉积物质量基准系数折线图

Fig. 5 Line charts of quotients of CBSQGs in freshwater aquaculture pond sediments

属的临界效应浓度(TEL)分别为45.5、74.9、47.3和3.0 mg/kg,可能效应浓度(PEL)分别为181.1、403.6、204.1和19.0 mg/kg,Cu、Zn和Pb的浓度基准值与MACDONALD等的CBSQGs基准值相近,Cd相应基准值相差较大,MACDONALD等制定的TEC_{Cd}水平几乎是所有基准中最严格的^[49],文中所有池塘沉积物样品Cd质量浓度均明显低于TEC_{Cd},可见潜在生态危害系数法对池塘Cd的评价结果较严格。尽管国际应用广泛的CBSQGs基准值在我国池塘沉积物重金属评价的适用性还有待研究,但其评价结果仍具有重要指示意义。

4 结论

上海市淡水养殖池塘沉积物中重金属含量由高至低为Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd和Hg,含量分别为4.92~189.71、17.09~105.89、3.76~98.00、1.98~31.87、2.90~15.62、0.033~0.543和0.0063~0.159 mg/kg,凡纳滨对虾和中华绒螯蟹池塘沉积物中Cd和Hg年均含量显著高于淡水鱼池塘($P < 0.05$),其他重金属在不同养殖品种池塘沉积物中的年均分布无显著差异;除个别池塘沉积物表层样品中Cd或Cr含量超标外,其他99.52%池塘沉积物样品中重金属含量均符合《无公害农产品 淡水养殖产地环境条件》(NY5361-2016)中相关标准要求;池塘沉积物中重金属元素按其来源可分为3类,分别为Cr、As和Pb,Zn和Cu,Cd和Hg;地质累积指数、潜在生态危害指数和一致性沉积物质量基准评价结果表明上海市淡水养殖池塘沉积物中重金属整体上处于清洁等级、低潜在生态危害、不会引发生物毒性效应状态,但部分池塘沉积物中Cd、Hg和Cr的累积仍需引起重视。

参考文献:

- [1] CANFIELD T J, DWYER F J, FAIRCHILD J F, et al. Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, 22:565-583.
- [2] 沈洪艳,张红燕,刘丽,等. 淡水沉积物中重金属对底栖生物毒性及其生物有效性研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(1):272-280.
SHEN H Y, ZHANG H Y, LIU L, et al. Bio-toxicity and bioavailability of metal-spiked freshwater sediments to benthic invertebrates [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1):272-280.
- [3] 范成新,张路,杨龙元,等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4):370-378.
FAN C X, ZHANG L, YANG L Y, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):370-378.
- [4] 魏俊峰,吴大清,彭金莲,等. 污染沉积物中重金属的释放及其动力学[J]. *生态环境*, 2003, 12(2):127-130.
WEI J F, WU D Q, PENG J L, et al. Release and kinetics of heavy metals from the contaminated sediments [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):127-130.
- [5] EISLER R. Trace metal concentrations in marine organisms [M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- [6] 王文雄,潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. *生态学报*, 2004, 24(3):599-604.
WANG W Y, PAN J F. The transfer of metals in marine food chains A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3):599-604.
- [7] TENG Y G, WU J, LU S J, et al. Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review [J]. *Environment International*, 2014, 69:177-199.
- [8] DUAN Q N, LEE J C, LIU Y S, et al. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 97:303-309.
- [9] 李娟英,胡谦,陈美娜,等. 上海临港新城地表沉积物与径流重金属污染研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(6):882-889.
LI J Y, HU Q, CHEN M N, et al. Research on heavy metal of surface sediment and runoff of Lingang New City in Shanghai [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(6):882-889.
- [10] 王利,陈振楼,陈枫,等. 上海内环高架沿线灰尘重金属污染分析与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2015, 21(5):39-42.
WANG L, CHEN Z L, CHEN F, et al. Pollution analysis and evaluation of heavy metals in street dust along inner ring overhead highway in Shanghai [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, 21(5):39-42.
- [11] 王利,陈振楼,许世远,等. 上海市延安高架道路沿线绿地土壤中重金属的分布与评价[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1):203-205.
WANG L, CHEN Z L, XU S Y, et al. Distribution and assessment of heavy metals in the greenbelt soil along Yanan overhead road in Shanghai city [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1):203-205.
- [12] 岳军妹,刘群录,孙文,等. 上海市外环高速公路4个绿地土壤重金属含量及污染状况[J]. *上海交通大学学报(农科科学版)*, 2018, 35(5):7-13.
YUE J M, LIU Q L, SUN W, et al. Heavy metal

- concentration and contamination in four green lands along the outer ring road in Shanghai [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2018, 35(5):7-13.
- [13] 王小庆. 淀山湖沉积物中重金属元素分布特征及其季节变化[J]. *环境科学与技术*, 2005, 28(6):106-108.
WANG X Q. Heavy metals partitioning and seasonal variation in lake sediments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(6):106-108.
- [14] 程晨, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市黄浦江水源地重金属铅、镉多介质富集特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(10):948-953.
CHENG C, CHEN Z L, BI C J, et al. Accumulate characteristics of lead, cadmium in drinking water sources of Huangpu River, Shanghai [J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, 2009, 18(10):948-953.
- [15] 张芬, 孙振中, 张玉平. 长江口重要渔业水域重金属分布特征及风险评估[J]. *水产科技情报*, 2017, 44(4):177-180.
ZHANG F, SUN Z Z, ZHANG Y P. Heavy metal distribution characteristics and risk assessment in fishery water area of Yangtze estuary [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2017, 44(4):177-180.
- [16] KE X, GUI S F, HUANG H, et al. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 175:473-481.
- [17] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river [J]. *Geo Journal*, 1969, 2(3):108-118.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment ecological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(1):975-1000.
- [19] MACDONALD D D, CARR R S, CALDER F D, et al. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. *Ecotoxicology*, 1996, 5:253-278.
- [20] LONG E R, MACDONALD D D. Recommended uses of empirically derived sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems [J]. *Human Ecolog Risk Assess*, 1998, 4:1019-1039.
- [21] MACDONALD D D, INGERSOLL C G, BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1):20-31.
- [22] 张秀成, 熊芳园, 李长举, 等. 浅谈水产饲料中的重金属污染[J]. *当代水产*, 2015(10):94-95.
ZHANG X C, XIONG F Y, LI C J, et al. Discussion on heavy metal pollution in aquatic feed [J]. *Current Fisheries*, 2015(10):94-95.
- [23] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, 40(5):2201-2210.
ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):2201-2210.
- [24] 赵汉取, 韦肖杭, 王俊, 等. 浙北地区养殖池塘表层沉积物重金属潜在生态风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2):225-229.
ZHAO H Q, WEI X H, WANG J, et al. Ecological risk assessment of the sediments in the aqua-cultural ponds in terms of heavy metal pollution in the northern part of Zhejiang [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(2):225-229.
- [25] 施沁旋, 叶雪平, 孙博悻, 等. 沉水植物对养殖池塘底泥中重金属的生物有效性[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(5):651-661.
SHI Q X, YE X P, SUN B Y, et al. Bioavailability of heavy metals in aquaculture pond sediments with submerged plants [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(5):651-661.
- [26] 刘金金, 张玉平, 李晓蓓. 凡纳滨对虾池塘沉积物中氮、磷形态的赋存特征[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(6):39-47.
LIU J J, ZHANG Y P, LI X B. Nitrogen and phosphorus fractions occurrence characteristic in sediment of *Litopenaeus vannamei* ponds [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(6):39-47.
- [27] 陈振楼, 许世远, 柳林, 等. 上海海岸滩涂沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. *地理学报*, 2000, 55(6):641-651.
CHEN Z L, XU S Y, LIU L, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6):641-651.
- [28] 施沁旋, 赵汉取, 王俊, 等. 湖州市养殖池塘表层沉积物重金属风险评价及其来源分析[J]. *淡水渔业*, 2015, 45(6):80-84.
SHI Q X, ZHAO H Q, WANG J, et al. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from aquaculture ponds in Huzhou city [J]. *Freshwater Fisheries*, 2015, 45(6):80-84.
- [29] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. 沉水植物对淡水养殖池塘底泥重金属 Cu 污染的修复研究[J]. *淡水渔业*, 2019, 49(3):83-89.
LIU M, YUAN J L, NI M, et al. Study on the restoration of heavy metal copper pollution in the sediments of aquaculture ponds by three submerged plants [J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(3):83-89.
- [30] 林建云, 陈维芬, 陈涵贞, 等. 水产饲料中镉的存在形态及其在养殖动物体内累积状况的研究[J]. *台湾海峡*, 2008, 27(4):491-498.
LIN J Y, CHEN W F, CHEN H Z, et al. Studies on the chemical forms of Cd in aquatic feeds and its bioaccumulations [J]. *Journal of Applied Oceanography*,

- 2008, 27(4):491-498.
- [31] 浙江省统计局, 国家统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴 2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. Zhejiang Provincial Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Survey Office of the National Bureau of Statistics of Zhejiang. Zhejiang statistics yearbook 2012 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [32] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:330-382. China National Environmental Monitoring Centre. Background values of Chinese soil elements [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:330-382.
- [33] 孙敏华, 姜翠玲, 张鹏, 等. 太湖流域梁塘河沉积物重金属生态风险评价 [J]. 环境工程, 2015(8):118-122. SUN M H, JIANG C L, ZHANG P, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments in Liangtang River of Taihu basin [J]. Environmental Engineering, 2015(8):118-122.
- [34] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异 [J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4):58-62. XU L F, LIU T H. The zonal differentiation of soil environmental background values and critical contents in Guangdong [J]. Journal of South China Agricultural University, 1996, 17(4):58-62.
- [35] 伦知颖, 程志中, 严光生, 等. 中国不同景观区水系沉积物中 39 种元素的背景值 [J]. 地学前缘, 2015, 22(5):226-230. LUN Z Y, CHENG Z Z, YAN G S, et al. Concentrations of 39 elements in stream sediment in different landscape zones of China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(5):226-230.
- [36] 和庆. 长三角地区池塘养殖水产品重金属和多环芳烃污染评价及其生物有效性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018. HE Q. Pollution evaluation and bioavailability of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in pond aquaculture products in the Yangtze river delta [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [37] LONG E R, MACDONALD D D. Recommended uses of empirically derived sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems [J]. Human Ecological Risk Assessment, 1998, 4:1019-1039.
- [38] 赵一先. 环境影响评价中选取上海地区土壤重金属含量背景值的合理范围 [J]. 科技创新与应用, 2016(7):158. ZHAO Y X. Reasonable range of background values of heavy metal in soil of Shanghai selected in the environmental impact assessment [J]. Technology Innovation and Application, 2016(7):158.
- [39] 李双喜, 吕卫光, 雷艳芳, 等. 上海郊区典型农业土壤重金属累积和评价 [J]. 上海农业学报, 2018, 34(3):6-10. LI S X, LYU W G, LEI Y F, et al. Accumulation and evaluation of heavy metals in typical agricultural soil of Shanghai suburbs [J]. Acta Agriculture Shanghai, 2018, 34(3):6-10.
- [40] 林建斌, 李金秋, 宋国华. 水产饲料安全与水产品质量 [J]. 水利渔业, 2008, 28(2):112-114. LIN J B, LI J Q, SONG G H. Aquatic feed safety and aquatic product quality [J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(2):112-114.
- [41] 涂杰峰, 罗钦, 伍云卿, 等. 福建水产饲料重金属污染研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(29):76-79. TU J F, LUO Q, WU Y Q, et al. The study on the heavy metal pollution of aquatic feed in Fujian [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(29):76-79.
- [42] 吴斌, 宋金明, 李学刚, 等. 一致性沉积物质量基准 (CBSQGs) 及其在近海沉积物环境质量评价中的应用 [J]. 环境化学, 2011, 30(11):1949-1956. WU B, SONG J M, LI X G, et al. Consensus-based sediment quality guidelines (CBSQGs) and its application in coastal sediment quality assessment [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(11):1949-1956.
- [43] HOKE A, GIESY J P, ZABIK M, et al. Toxicity of sediments and sediment pore waters from the Grand Calumet River-Indiana Harbor, Indiana, area of concern [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1993, 26(1):86-112.
- [44] SCHLEKAT C, MCGEE B L, BOWARD D M, et al. Biological effects associated with sediment contamination in the Potomac and Anacostia Rivers in the Washington, D. C. area [J]. Estuaries, 1994, 17:334-344.
- [45] 陈静生, 王飞越. 关于水体沉积物质量基准问题 [J]. 环境化学, 1992, 11(3):60-70. CHEN J S, WANG F Y. Some problems on sediment quality criteria [J]. Environmental Chemistry, 1992, 11(3):60-70.
- [46] 王飞越. 中国东部河流颗粒物-重金属环境地球化学 [D]. 北京: 北京大学, 1994. WANG F Y. Environmental geochemistry of river particulates-heavy metals in eastern China [D]. Beijing: Peking University, 1994.
- [47] 郑丙辉, 秦延文, 张雷, 等. 重金属污染沉积物质量评价研究——以太湖为例 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(10):1860-1866. ZHENG B H, QIN Y W, ZHANG L, et al. Quality assessment technology of sediment polluted by heavy metals of the Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2012, 32(10):1860-1866.
- [48] 张婷, 钟文珏, 曾毅, 等. 应用生物效应数据库法建立淡水水体沉积物重金属质量基准 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(9):2587-2594. ZHANG T, ZHONG W J, ZENG Y, et al. Sediment heavy metals quality criteria for fresh waters based on biological effect database approach [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9):2587-2594.
- [49] 邓保乐, 祝凌燕, 刘慢, 等. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估 [J]. 环境科学研究, 2011, 24

(1):33-42.

DENG B L, ZHU L Y, LIU M, et al. Sediment quality criteria and ecological risk assessment for heavy metals in

Taihu Lake and Liaohe River [J]. Research of Environmental Sciences, 2011,24(1):33-42.

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of aquaculture ponds in Shanghai

LIU Jinjin, ZHANG Yuping, ZHANG Fen

(Shanghai Shanghai Fishery Environment Monitoring Station, Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai 200433, China)

Abstract: The concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg, and As) in the sediment which were collected from 17 ponds were determined to clarify their distribution characteristics and evaluate their ecological risk in aquaculture ponds in Shanghai. Their distribution and sources were analyzed using multivariate statistics, and the ecological risk of heavy metal was assessed by three different methods. The results showed that the average concentrations of heavy metals in the surface sediment were as follows, Zn (58.36 ± 23.41) mg/kg, Cr (41.96 ± 11.92) mg/kg, Cu (20.61 ± 7.76) mg/kg, Pb (10.87 ± 5.83) mg/kg, As (7.81 ± 2.12) mg/kg, Cd (0.13 ± 0.05) mg/kg, Hg (0.055 ± 0.03) mg/kg. There were no significant difference of the annual values of Cu, Zn, Pb, Cr, and As among the sediment from different aquaculture species ($P > 0.05$), while the values of Cd and Hg in the sediment of shrimp and crab ponds were higher than fish ponds obviously ($P < 0.05$). The order of geo-accumulation index (I_{geo}) of the heavy metals in the sediment were as follows, $Cd > As > Cu > Zn > Cr > Hg > Pb$, and more than 95% of the samples belong to unpolluted class. The potential ecological risk index (RI) of the heavy metals were 56.94, 76.51, and 69.65 in the sediment of fish, shrimp and crab ponds, respectively. They were all ranged to the low ecological risk grade. Evaluations of consensus-based sediment quality guidelines (CBSQGs) showed that the mean probable effect concentration quotients (M_{PEC-Q}) of samples were all lower than 0.5, which means that the combined effects of heavy metals in the sediment were not toxic.

Key words: aquaculture pond; sediment; heavy metal; ecological assessment