

文章编号: 1674-5566(2018)05-0710-08

DOI:10.12024/jsou.20171102176

钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的生态风险及其生物累积

施沁璇^{1,2,3}, 盛鹏程^{1,2,3}, 房伟平⁴, 孙博悻^{1,2,3}, 周冬仁^{1,2,3}, 王 俊^{1,2,3},
徐 磊^{1,2,3}, 吴琦芳³

(1. 农业部淡水渔业健康养殖重点实验室, 浙江 湖州 313001; 2. 浙江省鱼类健康与营养重点实验室, 浙江 湖州 313001; 3. 浙江省淡水水产研究所, 浙江 湖州 313001; 4. 长兴县农业局, 浙江 湖州 313100)

摘 要: 通过对钱塘江杭州段表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 含量的调查, 分析了该水域表层沉积物中重金属含量水平、空间分布特征, 并对其潜在生态风险和来源进行了评价分析。结果显示, 水域表层沉积物中存在一定的重金属污染, 生态风险水平总体为极强, Cd、Hg 是生态风险主要的贡献因子, 生态风险强度分别为极强、强。重金属在水域不同区段存在一定的分布差异, 其中 S3 区段重金属的含量及生态风险均较高。各重金属污染来源相似, 主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)显示, 工农业污染、交通污染、生活废水污染等人类活动是水域表层沉积物中重金属的主要来源。进一步探求沉积物中重金属风险对水域中鱼类的影响表明, Hg 的生物表层沉积物累积因子(BSAF)为 0.861, 存在一定的生物累积作用; 但表层沉积物与鱼肉、水体之间相关性较弱($P > 0.05$)。水域中水体流动性大且多数鱼类来自增殖放流, 鱼龄较低可能是造成上述现象的主要原因。

关键词: 表层沉积物; 重金属; 主成分分析; 相关性; 钱塘江

中图分类号: X 174 **文献标志码:** A

钱塘江是浙江省的“母亲河”, 流域水系发达, 水生生物资源丰富^[1], 然而, 水域周边发达的工业化程度和较高的城市化进程使得重金属等持久性有机污染物可经沉积物-水体等多种途径对人体健康或生态系统的稳定产生直接或间接的危害和风险^[2-3]。沉积物作为重金属的蓄积库, 显著影响重金属的行为和生物效应^[4-5]; 同时相比水和悬浮物, 沉积物中重金属污染情况更为稳定, 可以较好地反映自然因素和人类活动对水域环境的长期影响。

现有研究表明, 钱塘江流域沉积物中重金属含量较高, 且来源主要为人为源^[6]; 但目前针对钱塘江杭州段, 系统分析水域重金属污染的生态风险、来源, 解析其对该水域影响的研究较少。本研究通过分析钱塘江水域杭州段表层沉积物中重金属的含量和生态风险, 利用多元统计法解析重金属的来源, 同时结合鱼肉中重金属的残留情况, 深入讨论表层沉积物中重金属对上述水域

的影响, 为水生生物资源的合理利用和渔业环境保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测定方法

2015 年对钱塘江流域杭州段中建德段(S1)、桐庐段(S2)、富阳段(S3)及萧山闻堰段(S4)等 4 个水域断面进行布点采样(图 1)。根据《渔业生态环境监测规范第三部分: 淡水》^[7], 用柱状采泥器, 在 4 个断面分别采集表层沉积物样品(0~10 cm), 每个断面采集两侧及中央共 3 个采样点, 每个采样点设置 3 个平行, 表层沉积物样品采集完成后置于塑料袋中运回实验室。

样品带回实验室后, 去除石子和动植物残体等异物, -80 °C 下冷冻干燥恒重后, 用玛瑙研钵研磨, 过 100 目尼龙筛, 混匀备用。取适量待测样品, 微波消解后重金属铜、锌、铅、镉含量用 Varian AA240/FS-GTA120(石墨炉/火焰)原子吸

收稿日期: 2017-11-22 修回日期: 2018-04-07

基金项目: 浙江省科技计划项目(2017C02026); 浙江省科技计划项目(2015F30020)

作者简介: 施沁璇(1989—), 女, 工程师, 研究方向为渔业水域生态环境保护及水产品质量安全。E-mail: shizhuhuan@163.com

收分光光度仪测定,汞、砷含量用吉天 AFS-9130 原子荧光分光光度仪测定。所测样品均测定 3 个平行值,扣除试剂空白,并采用国家标准物质进行质量控制。

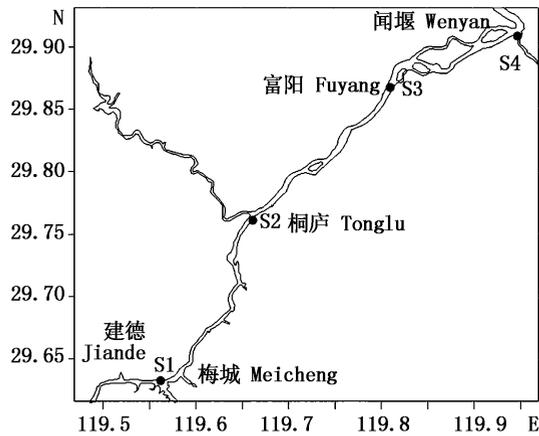


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Sampling location

1.2 评价方法

1980 年瑞典学者 HAKANSON^[8] 提出潜在生态风险指数法评价沉积物中重金属的生态风险。该方法同时考虑了重金属的含量、种类、毒性水平等因素,因此近年来被广泛应用于沉积物中重金属的风险评价工作。其计算方法如下:

$$I_R = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times (C_s^i / C_n^i)$$

式中: C_f^i 为重金属 i 相对于背景值的污染系数 ($C_f^i = C_s^i / C_n^i$); C_s^i 为重金属 i 的环境实测值, C_n^i 为重金属 i 的背景值; T_r^i 为重金属 i 的生态毒性响应系数,参考 1980 年 HAKANSON 根据重金属的主要危害途径而提出的系数值: $Hg = 40$, $Cd = 30$, $Pb = Cu = 5$, $Zn = 1$, $As = 10$, $Cr = 2$; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害系数; I_R 为潜在生态危害指数。毒性响应系数参照潜在生态危害系数与潜在生态危害指数的强度分级标准见表 1。

表 1 表层沉积物中重金属元素的生态风险强度划分标准

Tab. 1 Criteria for the classification of degrees of the ecological risk of heavy metals in surface sediment

潜在风险系数或指数 Potential ecological risk factors or potential ecological risk index	生态风险强度 Ecological risk intensity
$E_r^i < 40$ 或 $I_R < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$ 或 $150 \leq I_R < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$ 或 $300 \leq I_R < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$ 或 $I_R \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强

背景值的选择是评价沉积物中重金属风险的关键,不同的背景值选取可能会对结果造成差异。考虑到钱塘江流域杭州段沉积物主要来源

于浙江省流域内的侵蚀土壤,且该水域受到浙江省城市发展的影响较大,因此本研究选取浙江省土壤背景值(表 2)作为环境背景值参与评价。

表 2 浙江省土壤标准值

Tab. 2 Soil background value in Zhejiang Province

标准值 Background value	Hg	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn
浙江省土壤背景值(表土)/(mg/kg) Soil background value in Zhejiang Province	0.065	7.5	22.4	0.058	49.7	15	62.1

1.3 数据处理

原始数据经 Excel 2010 初步整理后,采用 SPSS 13.0 进行统计分析,显著水平(P)为 0.05。作图由 Origin 8.0 完成。

2 结果与分析

2.1 钱塘江水域表层沉积物中重金属的含量特征及生态风险评价

钱塘江水域不同区段表层沉积物中各重金

属含量见表 3。从中可以看出,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 的平均含量分别为 63.2 mg/kg、197.1 mg/kg、48.6 mg/kg、0.958 mg/kg、0.143 mg/kg 和 11.5 mg/kg,略高于太湖流域典型湖泊沉积物中重金属平均含量,但相比长江水系表层沉积物中重金属的平均含量则略低^[9-10]。相比浙江省土壤背景值,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 的含量分别为背景值的 4.2 倍、

3.2 倍、2.2 倍、16.5 倍、2.2 倍和 1.5 倍,提示该水域表层沉积物中存在一定的重金属污染风险。相比郑洁^[6]对整个钱塘江流域的研究结果发现,

本研究对水域杭州段各重金属含量总体低于整个钱塘江流域,这可能是由于钱塘江流域干、支流沉积物中重金属污染程度较高所致。

表 3 钱塘江表层沉积物中重金属含量

Tab. 3 Concentrations of the heavy metals in the surface sediments of Qiantang River

重金属元素/(mg/kg) Heavy metal	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
S1	45.3 ± 6.43	160 ± 36.0	38.3 ± 3.70	0.617 ± 0.115	0.157 ± 0.015	12.3 ± 1.23
S2	79.5 ± 9.19	256 ± 24.7	58.4 ± 2.12	1.02 ± 0.106	0.250 ± 0.071	14.8 ± 1.63
S3	93.2 ± 17.3	258 ± 21.8	70.0 ± 10.5	1.53 ± 0.260	0.138 ± 0.041	13.2 ± 2.98
S4	30.3 ± 6.35	115 ± 17.6	24.3 ± 2.89	0.493 ± 0.110	0.065 ± 0.006	6.43 ± 0.907
平均含量	63.2 ± 29.4	197.1 ± 68.2	48.6 ± 20.1	0.958 ± 0.484	0.143 ± 0.069	11.5 ± 3.64

为深入了解钱塘江杭州段水域表层沉积物中各重金属的潜在生态风险,采用 HAKANSON 潜在生态风险评价法评价水域表层沉积物中各重金属的生态风险(表 4)。从潜在生态危害指数 I_R 看,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的生态风险强度为极强生态风险,该水域表层沉积物中重金属污染引起的生态风险较大。从不同重金属元素看,水域表层沉积物中重金属 Cd 的生态风险系数最大,为 495.7,达到极强生态风险强度,其生态风险系数对潜在生态风险指数的贡献率为 78.2%;其次为 Hg,生态风险系数为 88.0,

达到强生态风险强度,其生态风险系数对潜在生态风险指数的贡献率为 13.9%;其余重金属的生态风险强度均为轻微,生态风险系数之和对潜在生态风险指数的贡献率仅占 7.9%。因此,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的潜在生态风险主要来自重金属 Cd 和 Hg。这与钱塘江入海口杭州湾水域以及巢湖湖区表层沉积物的研究结果相类似^[11-12],提示沉积物中重金属 Cd 和 Hg 引起的潜在生态风险可能普遍存在于钱塘江及其周边临近水域,需要予以重视。

表 4 表层沉积物中重金属的生态风险系数和潜在生态风险指数

Tab. 4 Potential ecological risk factor and potential ecological risk index in surface sediments

	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	I_R
S1	15.1	2.58	8.55	318	96.4	16.4	458
S2	26.5	4.11	13.0	530	153	19.7	747
S3	31.1	4.14	15.5	791	84.6	17.6	944
S4	10.1	1.85	5.42	255	40.2	8.58	321
均值	21.1	3.17	10.8	495.7	88.0	15.4	634

从钱塘江杭州段不同区段水域表层沉积物中各重金属的累积水平及生态风险可以看出,S3 水域区段重金属的含量较高且潜在生态危害指数 I_R 最高,为 944;而 S4 水域区段重金属的含量和潜在生态危害指数 I_R 均为最低,为 321。究其原因,这可能与不同水域周边城市发展、工农业企业分布以及水动力作用有关。S3 为钱塘江水域的中下游区域,且该水域周边分布了大量冶金、造纸等企业,工业三废的排放可能推高了该区域重金属的污染水平及生态风险;S4 虽为钱塘江下游且工业化程度较高,但该处天文大潮引起

的水动力作用强烈,水体交换量大,表层沉积物中的重金属通过悬浮作用在沉积物-孔隙水-悬浮颗粒-上覆水这些不同介质中重新分配^[13-14],从而可能稀释了各重金属在该水域的富集水平、降低了其生态风险。

2.2 表层沉积物中重金属的来源分析

Pearson 相关关系分析探求钱塘江杭州段表层沉积物中不同重金属的来源。结果显示(表 5),Cu、Zn、Pb、Cd 两两之间均显著相关($P < 0.05$),As 与 Zn 和 Hg 之间显著相关($P < 0.05$),Hg 仅与 Zn 显著相关($P < 0.05$),表明上述重金

属可能具有相似的污染来源。

表 5 表层沉积物中各重金属间的相关关系

Tab. 5 Correlation between heavy metal contents in surface sediments

	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
Cu	1	0.954 **	0.988 **	0.965 **	0.473	0.422
Zn		1	0.942 **	0.875 **	0.679 *	0.611 *
Pb			1	0.953 **	0.454	0.408
Cd				1	0.315	0.226
Hg					1	0.928 **
As						1

注: * 表示 0.05 水平(双尾)上显著相关; ** 表示 0.01 水平(双尾)上显著相关

Notes: * Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed); ** Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

为进一步了解钱塘江杭州段表层沉积物中各重金属的来源,本研究采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)进行深入解析。KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验和 Bartlett (Bartlett-test of Sphericity) 球度检验结果显示, KMO 值为 0.7, Bartlett 球度检验相伴概率为 0.000 ($P < 0.05$), 6 种重金属元素之间具有较强的相关性,可以进行因子分析。

采用主成分分析法对钱塘江杭州段表层沉积物中重金属进行源解析,分析结果见表 6、图 3。从中可以看出,第一、二主成分的特征值分别为 4.666 和 1.166,贡献率分别为 77.8% 和 19.4%,两者累计贡献率达到 97.2%,对第一、二主成分分析可以反映水域表层沉积物中重金属元素的大部分信息。因此,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属主要分为两个不同成分。

表 6 主成分分析主要计算结果

Tab. 6 The main calculated results of principal component analysis(PCA) in this study

项目	第一主成分	第二主成分
Item	PC1	PC2
特征值 Eigenvalue	4.666	1.166
贡献率/% Contribution rate	77.759	19.426
累积贡献率/% Cumulative	77.759	97.186
Cu	0.962	-0.258
Zn	0.988	-0.013
Pb	0.956	-0.259
Cd	0.889	-0.437
Hg	0.628	0.755
As	0.815	0.521

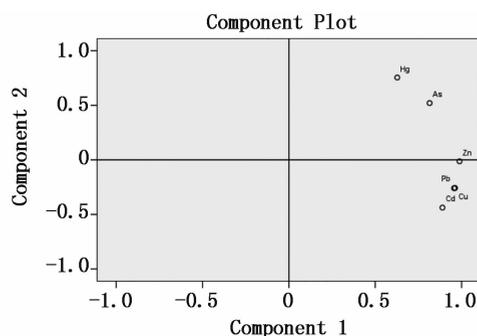


图 2 各重金属元素的二维因子载荷

Fig. 2 Loading plots of the heavy metals in the space defined by two components

从第一主成分看,变量因子 Cu、Zn、Pb、Cd、As 在浓度上具有较高的正载荷,分别为 0.962、0.988、0.956、0.889、0.815。Cu、Zn 主要代表农业来源^[15];Cd 是使用农药和化肥等农业活动的标识元素^[16-17],也来源于工业中的化学工业^[15],As 主要来源于工业污染、农药和化肥等人类活动^[15,18]。一方面,钱塘江流域杭州段周边电镀、化工、造纸、机械制造、塑料生产等工业企业密集,仅富春江至闻堰区段水域分布有工业企业约 800 余家^[6],工业生产所排放的含有重金属的污水、废气等进入流域环境后对生态环境造成影响;另一方面,流域周边农业发达,钱塘江杭州段穿过杭州市建德县、桐庐县、富阳县及萧山区等居民集中区域,农用化学肥料、养殖饲料中的重金属也会随着废水排放等过程对周边水域生态环境造成影响。因此,Cu、Zn、Cd、As 主要表征了农业面源污染和工业污染。此外,Pb 作为机动车污染的标识元素^[19],提示 Pb 的来源除了工业污染外,还可能来源于交通污染。因此,第一主成

分所支配的流域沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的来源主要为钱塘江流域杭州段的工农业污染和交通污染。

从第二主成分看,变量因子 Hg、As 在浓度上具有较高的正载荷,分别为 0.755、0.521。研究显示^[20-21],有机质是 Hg 在沉积物中的主要结合物,其含量和成分的变化是决定 Hg 分布的主要控制因子,同时其与沉积物中 As 显著正相关^[22],而有机质主要来自人为污染生活废水。同时, Hg、As 是煤矿开采、化学工业等人类工业活动中重要的污染元素,其高挥发的特性导致它们可以通过长距离的大气运输构成全球性污染。结合 Hg、As 在 PC1 中的较高的正载荷(0.628 和 0.815),推测第二主成分所支配的流域沉积物中 Hg、As 的来源主要为生活废水排放和工业污染。

综合分析,钱塘江杭州段沉积物中重金属的污染主要来源于工农业污染、交通污染、生活废水污染等人类活动。这与沈敏等^[23]对长江下游表层沉积物中重金属的来源研究结果相一致,同时也进一步印证说明了表层沉积物中重金属的来源已逐渐由自然来源向人为污染转化^[24]。

3 讨论

钱塘江杭州段所在区域人口活动密集、城市化进程较快^[25],工农业废水和生活污水等不断进入江河水体,水域环境尤其是沉积物中的重金属含量持续累积,造成重金属的潜在生态风险,其中沉积物中 Cd、Hg 分别处于极强生态风险水平和强生态风险强度,与周边临近水域沉积物中重金属的风险水平相类似,水域环境沉积物中重金属污染已是不争的事实。鱼类等水产动物是水生生态系统中较高级的消费者,通过上行-下效效应与其水域环境存在着密切的相互作用关系^[26-27]。存在于水体、沉积物和水产动物中的重金属不仅能相互影响,同时也可以迁移转化^[28]。为更好的了解钱塘江水域表层沉积物中重金属较高的生态风险可能对鱼肉中重金属富集带来的影响,结合课题组前期研究结果^[29],采用生物表层沉积物累积因子(BSAF)进行计算,其中 $BSAF = C_o/C_s$; C_o 表示鱼类肌肉中重金属浓度, C_s 表示表层沉积物中重金属浓度,均以干重进行计算。分析结果显示(图3),不同重金属的 BSAF 值存在差异,平均值从大到小依次为 $Hg > Zn >$

$Cu > Cd > As > Pb$,其中 Hg 的累积因子达到 0.861,接近 1,显著高于其余重金属,提示其可能存在一定的生物累积作用。然而总体而言,重金属元素 BSAF 值与其在表层沉积物中的含量趋势并不一致,如 Cd 虽然在水域表层沉积物中含量较高且具有极强的生态风险,但其在鱼类肌肉中未见显著富集作用,可见鱼类肌肉中重金属的富集程度并非完全取决于其水域表层沉积物中的重金属含量,这与赵旭对海洋双壳生物的研究结果相一致^[30],但不同于赵鹏等对北部湾钦州港近江牡蛎的研究结果^[31],这可能与不同类别水产动物对重金属不同的富集机制有关。因此,本研究进一步通过相关性分析探讨水域环境中重金属含量对鱼类肌肉中重金属的富集的影响。

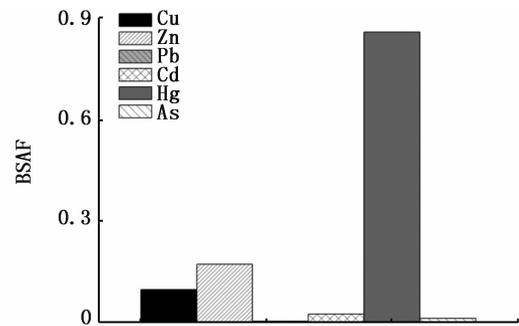


图3 钱塘江水域鱼类对重金属表层沉积物累积因子

Tab 3 Biota-surface sediment accumulation factors of fish in Qiantang River

以6种重金属含量为依托,对表层沉积物、鱼类肌肉和水域水体之间进行相关性分析,结果表明(表7)表层沉积物中重金属含量与鱼肉和水体中重金属的含量之间相关性较弱($P > 0.05$),这与祝云龙等对东洞庭湖和大通湖的研究结果^[32]相一致,但不同于刘芳芳对养殖罗非鱼及其环境的研究结果^[33]。一方面,钱塘江水域相比养殖池塘水体流动性大,沉积物和水体中重金属迁移和转化的途径较多^[34],水域环境中重金属的浓度并不能直接决定鱼肉中重金属的富集程度。另一方面,钱塘江水域是我省重要的增殖放流水域,现场捕捞鱼类的鱼龄为 $0^+ \sim 1^+$,鱼类在钱塘江水域中生长时间较短,因此受水域环境的影响并不显著。

表 7 以重金属含量为依托的表层沉积物与鱼类肌肉、水域水体之间的相关性分析

Tab.7 Correlation among surface sediment, muscular tissue of fish and water on the basis of heavy metals

	鱼体肌肉 Muscular tissue of fish	水体 Water	表层沉积物 Surface sediment
鱼体肌肉 Muscular tissue of fish	1	-0.178	0.281
水体 Water		1	-0.106
表层沉积物 Surface sediment			1

4 结论

本研究通过调查分析发现,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 的平均含量较高,分别为浙江省土壤背景值的 4.2 倍、3.2 倍、2.2 倍、16.5 倍、2.2 倍和 1.5 倍,该水域表层沉积物中存在一定的重金属污染风险。潜在生态风险评价结果表明,钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的生态风险强度总体为极强生态风险,其中 Cd、Hg 是表层沉积物生态风险主要的贡献因子,生态风险强度分别为极强、强;然而,重金属在水域不同区段间存在一定的分布差异,其中 S3 区段重金属的含量及生态风险均较高。

通过主成分分析结果(PCA)分析钱塘江杭州段沉积物中各重金属的来源显示,第一主成分所支配的流域沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的来源主要为钱塘江流域杭州段的工农业污染和交通污染。第二主成分所支配的流域沉积物中 Hg、As 的来源主要为生活废水排放和工业污染。因此,人类活动是钱塘江流域杭州段表层沉积物重金属的主要来源。

此外,生物累积分析结果表明,Hg 的生物表层沉积物累积因子显著高于其余重金属,可能存在一定的生物累积作用。但重金属污染物在表层沉积物与鱼肉、水体之间相关性较弱($P > 0.05$)。水域中水体流动性大且多数鱼类来自增殖放流,鱼龄较低可能是造成上述现象的主要原因。

参考文献:

- [1] 葛亚非. 钱塘江中下游鱼类资源及其增殖途径[J]. 海洋渔业, 2005, 27(2): 164-168.
GE Y F. The fish resources and their propagational approaches in the middle and lower reaches of the Qiantangjiang River[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(2): 164-168.
- [2] AMASON J G, FLETCHEER B A. A 40 + year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon

Reservoir, Albany County, NY, USA [J]. Environmental Pollution, 2003, 123(3): 383-391.

- [3] GHREFAT H, YUSUF N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan[J]. Chemosphere, 2006, 65(11): 2114-2121.
- [4] CHEN C W, KAO C M, CHEN C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Chemosphere, 2007, 66(8): 1431-1440.
- [5] MCCREADY S, BIRCH G F, LONG E R. Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity—a chemical dataset for evaluating sediment quality guidelines[J]. Environment International, 2006, 32(4): 455-465.
- [6] 郑洁. 钱塘江流域沉积物中重金属总量空间分布及其成因探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
ZHENG J. The research of heavy metals spatial distribution and formation discussion in the drainage basin sediment of Qiantang River [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [7] 中华人民共和国农业部. SC/T 9102.3-2007 渔业生态环境监测规范 第3部分: 淡水[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9102.3-2007 The specification for ecological environment monitoring of fisheries-Part 3: freshwater[S]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2007.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [9] 陈守莉, 王平祖, 秦明周, 等. 太湖流域典型湖泊沉积物中重金属污染分布特征[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(2): 124-130.
CHEN S L, WANG P Z, QIN M Z, et al. Distribution characterization of heavy metal pollution in typical sediment from Lake Taihu Region[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2007, 23(2): 124-130.
- [10] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599-2606.
WANG L, WANG Y P, XU C X, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2012, 33(8): 2599-2606.

- [11] 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3906-3916.
CHAI X P, HU B L, WEI N, et al. Distribution, sources and assessment of heavy metals in surface sediments of the Hangzhou Bay and its adjacent areas [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 3906-3916.
- [12] 刘新, 蒋豫, 高俊峰, 等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评估[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 502-512.
LIU X, JIANG Y, GAO J F, et al. Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 502-512.
- [13] 沈军. 物理扰动再悬浮作用下长江口近岸水体中汞的迁移与转化[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
SHEN J. Transferring and transforming of mercury during resuspension under dynamic disturbing at Tidalfat of Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [14] 赵健, 毕春娟, 陈振楼, 等. 动力和盐度影响下长江口近岸沉积物中汞的再悬浮行为[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(1): 105-116.
ZHAO J, BI C J, CHEN Z L, et al. Effect of dynamic and salinity conditions on activities of Hg during sediment resuspension event in the Yangtze Estuary [J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, 41(1): 105-116.
- [15] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.
ZHU Q Q, WANG Z L. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main River Systems in China [J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 305-313.
- [16] GARCIA R, MAIZ I, MILLAN E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. Environmental Technology, 1996, 17(7): 763-770.
- [17] GRAY C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, 54(3): 267-277.
- [18] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. 国外医学(医学地理分册), 2003, 24(4): 173-175.
WEI D C. The source of arsenic in the environment [J]. Foreign Medical Sciences (Section of Medgeography), 2003, 24(4): 173-175.
- [19] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [20] RASMUSSEN P E, VILLARD D J, GARDNER H D, et al. Mercury in lake sediments of the Precambrian Shield near Huntsville, Ontario, Canada [J]. Environmental Geology, 1998, 33(2/3): 170-182.
- [21] ROULET M, LUCOTTE M, CANUEL R, et al. Spatio-temporal geochemistry of mercury in waters of the Tapajós and Amazon rivers, Brazil [J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(5): 1141-1157.
- [22] 车霏霏, 甄卓, 王大鹏, 等. 太湖不同营养水平湖区表层沉积物的砷分布特征及其生态风险[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1623-1631.
CHE F F, ZHEN Z, WANG D P, et al. Spatial distributions and ecological risks of arsenic in the surface sediment from different eutrophic regions of Lake Taihu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(5): 1623-1631.
- [23] 沈敏, 于红霞, 邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(5): 15-18.
SHEN M, YU H X, DENG X H. Heavy metals in surface sediments from lower reach of the Yangtze River [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2006, 18(5): 15-18.
- [24] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 113-119.
LIU E F, SHEN J, ZHU Y X, et al. Source analysis of heavy metals in surface sediments of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(2): 113-119.
- [25] 浙江省水文志编纂委员会. 浙江省水文志[M]. 北京: 中华书局, 2000.
Zhejiang Hydrological Records Compilation Committee. Hydrological records of Zhejiang Province [M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2000.
- [26] 刘恩生. 鱼类与水环境间相互关系的研究回顾和设想[J]. 水产学报, 2007, 31(3): 391-399.
LIU E S. Review on the interrelationship between fishes and water environment [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(3): 391-399.
- [27] KOMINKOVA D, NABELKOVA J. Effect of urban drainage on bioavailability of heavy metals in recipient [J]. Water Science and Technology, 2007, 56(9): 43-50.
- [28] 丘耀文, 颜文, 王肇鼎, 等. 大亚湾海水、沉积物和生物体中重金属分布及其生态危害[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(5): 69-76.
QIU Y W, YAN W, WANG Z D, et al. Distributions of Heavy Metals in seawater, sediments and organisms at Daya Bay and their ecological harm [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(5): 69-76.
- [29] 施沁璇, 孙博悳, 王俊, 等. 钱塘江流域鱼肉中重金属含量特征及食用安全性评价[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(4): 536-545.
SHI Q X, SUN B Y, WANG J, et al. Study on heavy metal concentration and their food safety assessment in the muscle of fishes in Qiantang River [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(4): 536-545.

- [30] 赵旭. 枸杞岛海域沉积物及贝类中重金属含量与生态风险评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
ZHAO X. Heavy metals content and ecological risk assessment of sediment and mussels in Gouqi Island [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [31] 赵鹏, 张荣灿, 覃仙玲, 等. 北部湾钦州港近江牡蛎重金属污染分析[J]. 水产学报, 2017, 41(5): 806-815.
ZHAO P, ZHANG R C, QIN X L, et al. Evaluation of heavy metals in oyster (*Crassostrea rivularis*) from Qinzhou Harbor, Beibu Gulf[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(5): 806-815.
- [32] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中 Cd Pb Hg As 的含量分布及相互关系[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1377-1384.
ZHU Y L, JIANG J H, HUANG Q, et al. Contents, distribution and correlation of Cd, Pb, Hg, As in water, sediment and Organsims from East Dongting Lake and Datong Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1377-1384.
- [33] 刘芳芳. 淡水鱼类中重金属污染及其与环境相关性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
LIU F F. Pollution of heavy metal in freshwater fish and the correlation analysis on the environment [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [34] 田林峰, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖鱼体器官及肌肉组织中重金属的分布特征及其与水体重金属污染水平的相关性[J]. 水产学报, 2012, 36(5): 714-722.
TIAN L F, HU J W, LUO G L, et al. Heavy metals in muscle tissues and organs of fish species from Lake Baihua [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(5): 714-722.

Ecological risk and bioaccumulation of heavy metals in the surface sediments in Qiantang River

SHI Qinxuan^{1,2,3}, SHENG Pengcheng^{1,2,3}, FANG Weiping⁴, SUN Boyi^{1,2,3}, ZHOU Dongren^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3}, XU Lei^{1,2,3}, WU Qifang³

(1. Agriculture Ministry Key Laboratory of Healthy Freshwater Aquaculture, Huzhou 313001, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Fish Health and Nutrition of Zhejiang Province, Huzhou 313001, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, Zhejiang, China; 4. Changxing Department of Agriculture, Huzhou 313100, Zhejiang, China)

Abstract: The concentrations and distributions of heavy metals Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, and As in surface sediments were investigated with the samples collected from the Qiantang River. Then we analyzed the potential ecological risk of heavy metal with the Hakanson ecological risk index and searched for its source based on Pearson correlation coefficient and principal component analysis (PCA). Results showed that the concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Hg and As in surface sediments of Qiantang River were rather high, the overall potential ecological risk level was extremely high. Cd and Hg were the prominent factors for ecological risks in surface sediments, showing the intensity of potential risk as extremely strong and strong, respectively. There was a certain distribution difference with different sections of the river, among which the concentrations and potential ecological risks in S3 section were both higher than others. It was likely that the sources of heavy metals in surface sediments were similar; industrial pollution, agricultural non-point source pollution, traffic pollution and domestic wastewater were the probable sources by the method of PCA. Besides, we determined the effects of heavy metal with surface sediment on fish in Qiantang River. Results showed that the biota-surface sediment accumulation factor (BSAF) of Hg was 0.861, which presented a bioaccumulation to fishes. However, the average levels of heavy metals in surface sediments presented low correlations with fish on overlying water samples. It may be caused by the fact that the water in Qiantang River flowed fast and the majority of fish investigated were from proliferation of releasing of young age.

Key words: surface sediment; heavy metal; PCA; correlation; Qiantang River