

浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 33–41

Journal of Zhejiang A & F University

doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2016.01.005

浦阳江流域疏浚前后底泥重金属污染及其潜在生态风险评价

张伟, 陈蜀蓉, 侯平

(浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为全面了解浙江省浦阳江流域浦江县城段疏浚前后底泥沉积物中重金属含量及其潜在生态危害程度, 在浦阳江干流及 5 条支流共采集 24 个底泥样品, 以及生态清淤站的 64 个样本, 测试了砷(As), 铬(Cr), 镍(Ni), 铜(Cu), 锌(Zn), 铅(Pb)等 6 种重金属元素, 并结合数据与地理信息系统(GIS)制图, 比较各河段的污染情况, 采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对浦阳江流域疏浚前后重金属污染进行分析和评价。结果表明: 浦阳江流域底泥在疏浚后, 重金属质量分数与疏浚前有了明显下降, 普遍下降了 1~2 倍, 但各样点重金属质量分数还是普遍高于当地的土壤重金属背景值; 各种重金属污染对浦阳江流域构成的潜在生态危害由强至弱依次为: 砷>铅>铜>镍>铬>锌, 其中砷的影响占绝对主导地位; 从综合污染程度分析, 浦阳江干流的污染程度最低, 支流中西溪的污染程度最高, 为中等生态危害; 砷的富集可能与浦江县水晶玻璃生产有关。图 2 表 5 参 17

关键词: 环境科学; 底泥; 重金属污染; 浦阳江流域; 疏浚; 生态风险

中图分类号: S151.9; X522 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2016)01-0033-09

Heavy metal contamination and potential ecological risk for sediments in the Puyang River Basin prior to and post dredging

ZHANG Wei, CHEN Shurong, HOU Ping

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Using 25 sediment specimen samples from five tributaries of the Puyang River as well as samples from 64 ecological dredging stations, heavy metal concentrations and their potential ecological risks to the sediments prior to and post dredging were determined. Elements As, Cr, Ni, Cu, Zn, and Pb were analyzed, and then data was plotted based on GIS to compare the pollution levels of different reaches. The index of geo-accumulation and the potential ecological risk index were employed to evaluate the pollution level of heavy metals in the sediments. Results showed that compared to before dredging, after dredging the heavy metal content had decreased one or two times. The potential ecological risk intensity caused by different metals was: As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn. Analysis for degree of comprehensive pollution showed that Xixi River had the most pollution among the tributaries; Puyang River had the lowest pollution and was rated a medium ecological hazard. After dredging, there is still the accumulation of heavy metals, the major pollutants is As. [Ch, 2 fig. 5 tab. 17 ref.]

Key words: environmental sciences; sediment; heavy metal contamination; Puyang River Basin; dredge; ecological risk

重金属一般是指比重大于或等于 5 的铅(Pb), 镉(Cd), 铬(Cr), 汞(Hg), 铜(Cu), 锌(Zn), 铁(Fe), 锰(Mn)和镍(Ni)等金属; 砷(As)虽然属于非金属元素, 但砷(As)与其他重金属具有较相似的化学性质, 所以通常也将其划归并于重金属的研究范围内。底泥是水体底部有毒有害污染物的储藏库^[1]。底泥往往是河流污染物的最终归宿, 通过各种途径进入水体的重金属污染物, 经吸附、络合、沉淀等作用

收稿日期: 2015-03-02; 修回日期: 2015-04-24

作者简介: 张伟, 从事生态环境监测研究。E-mail: zjzhangwei321@163.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事生态环境监测研究。E-mail: houpinggg@263.net

后,绝大部分迅速由水相转为固相,沉积到底泥中。底泥中的重金属污染物有再次释放出来对水生态系统形成潜在危险。当重金属在生物体内富集,成为持久性污染物,并通过各种方式在生态系统中迁移循环,最终可能进入人体,产生严重危害^[2]。底泥是水体污染的指示剂,底泥重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标,其环境质量反映着水体的污染状况^[3-5]。因此,底泥疏浚将有效改善水体水质,已成为污染河流、湖泊修复和综合整治的重要措施^[6]。疏浚后底泥重金属含量能否得到有效控制,是值得关注的问题。

1 研究区域与方法

浦江县位于浙江省金华市北部,为中国水晶玻璃工艺制品销售、加工的主要集散地。2011年全县共有在册水晶加工企业21 811家,占据了全国80%的市场。需要指出的是浦江县的水晶并非是天然水晶,其主要材料为K9和K5玻璃。K9和K5水晶材料属于光学玻璃,两者主要成分有氧化硅(SiO_2 , $691.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),三氧化二硼(B_2O_3 , $107.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),氧化钡(BaO , $30.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),氧化钠(Na_2O , $104.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),氧化钾(K_2O , $62.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),三氧化二砷(As_2O_3 , $3.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。水晶生产中由切割、滚磨、打孔、抛光等机械加工产生的冷却水带着金刚砂、抛光粉、玻璃粉等混合而成的机械加工废水及酸洗抛光工序、磨盘褪砂、固砂工序产生的大量强酸性废水、重金属废水废渣随意排放,导致下水道堵塞,土壤板结及重金属污染,农作物枯死,破坏水体生态^[7-9]。

2013年浙江省政府对浦阳江流域综合整治作出明确指示,要求浙江水环境整治要从污染最严重的浦阳江率先突破,作为浙江省“五水共治”的标杆和样板。2013年12月浦江县开展对浦阳江流域城区段清淤整治工作,由浦江县生态清淤站对浦阳江流域浦江县城区段开展生态清淤,利用生态清淤船上的水泵吸取河底淤泥,通过漂浮在水面的管道运往生态清淤站进行处理。

1.1 样品采集与分析

于2014年4月至5月对浦江县生态清淤站内的底泥进行采样,清淤站内的底泥为浦江县对浦阳江流域浦江县城区段的河道底泥清淤时的底泥,在清淤站内共采集了64份底泥样本。

浦江县河流底泥清淤结束后,根据浦阳江流域遥感数据,于2014年6月到7月进行野外实地考察和采样,用手持全球定位系统(GPS)精确定位,对浦阳江、黄龙溪、五六岭溪、里坞溪、西溪、东溪等6条浦江县城区的主要河流进行采样,其中浦阳江为浦阳江流域的干流,东西流向,贯穿整个浦江县城区。黄龙溪为南北走向,流经工业园区和居住区。五六岭溪、里坞溪、西溪均为南北流向,流经农业用地和居住区。西溪为南北流向,流经水晶加工园区和居住区。根据不同河段,选取有代表性的样点,采样点选择在各条河流的转弯处、橡皮坝、大桥、河口等河道底泥淤积严重的区域,其中各个样点分别取每个河段的河道两侧和河道中间3个样地混合,设定了通济桥村(S1),扬田村(S2),翠湖(S3),和平桥(S4),橡皮坝(S5),浦阳江四桥(S6),平安桥(S7),西溪口(S8),西山公园(S9),万家水晶加工区(S10),炉来村(S11),东溪口(S12),浦江县人民政府(S13),东山公园(S14),后溪水库(S15),黄龙口(S16),人民医院(S17),特色工业园区(S18),黄龙溪五里社区(S19),里坞溪口(S20),横大路(S21),五六岭溪口(S22),枫苑小区(S23),和平南路(S24)等24个样地。

采用重力式柱状沉积物采样器在各个样点采集0~20 cm的底泥样品,将采集后的底泥样品剔除砾石、贝壳等异物,于阴凉通风处自然风干后,用四分法取部分样品过2 mm的尼龙筛,使用X射线荧光光谱仪X-MET7000测量铜、锌、铅、砷、镍和铬等元素质量分数。实验过程采用国家标准物质GSS-1和GSD-12进行质量控制。测量结果表明:GSS-1和GSD-12标准样品中重金属元素实测值与参考值的相对标准偏差(RSD)均小于10%。此外,随机选取5个样品做重复样,制成样品3个·重复⁻¹,平行测定3次,其相对标准偏差均不超过5%。

1.2 数据处理

目前,关于重金属污染评价方法有多种^[10],其中,地积累指数法能较好地考虑到地址背景所带来的影响,近年来被广泛应用于土壤重金属污染评价^[11];潜在生态危害评价法引入毒性系数,反映了环境污染状况,体现了相对贡献、生物有效性及地理空间差异等特点,是目前国际上底泥重金属研究中应用较为广泛的一种^[12]。因此,本研究采用这2种评价方法对底泥重金属污染进行评价。

1.2.1 地积累指数法^[13] 地质累积指数法是德国科学家 MULLER 提出的用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标, 被广泛用于评价现代沉积物重金属污染, 以沉积物中重金属质量分数的高低反映污染水平。其计算公式为: $I_{geo} = \log_2 [C_n / (kB_n)]$ 。其中: I_{geo} 为地积累指数, C_n 为元素 n 在沉积物中的实测值; B_n 为元素 n 在沉积物中的地球化学背景, 本研究采用金衢盆地土壤重金属背景值^[14]; k 为考虑成岩作用可能引起的背景值变动而设定的系数, 一般取 1.5。根据 I_{geo} 值的大小, 沉积物的重金属污染可分为 7 个等级, 见表 1。

表 1 地积累指数分级与污染程度

Table 1 Value of I_{geo} and the corresponding contamination degree of heavy metal

I_{geo}	级数	累积污染程度	I_{geo}	级数	累积污染程度
<0	0	无	3~4	4	偏重
0~1	1	轻度	4~5	5	重
1~2	2	偏中度	>5	6	严重
2~3	3	中度			

1.2.2 潜在生态危害指数法^[15] 潜在生态危害指数法是瑞典科学家 HAKANSON 根据重金属性质及其环境行为特点, 从沉积学角度提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。该方法不仅考虑土壤重金属质量分数, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价, 并定量地区分出潜在生态危害程度, 是应用比较广泛、比较先进的方法。计算公式如下:

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum T_r^i C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \frac{C_f^i}{C_n^i}$$

其中: C_f^i 为某污染物的污染系数; C^i 为表层沉积物中某污染物质量分数的实测值; C_n^i 为计算所需的参比值; T_r^i 为沉积物中某污染物的毒性响应系数, 6 种重金属砷、铬、镍、铜、锌、铅的毒性响应系数分别为 10, 2, 5, 5, 1, 5^[16]; E_r^i 为某单个污染物的潜在生态风险系数; I_R 为潜在生态风险指数, E_r^i 和 I_R 值对应的污染程度及潜在生态风险程度见表 2。

表 2 E_r^i 和 I_R 值相对应的污染程度及潜在生态风险程度Table 2 Corresponding pollution degree and potential ecological risk degree of E_r^i and I_R

指数类型	所处范围	污染程度	指数类型	所处范围	污染程度
	$E_r^i < 40$	轻微生态危害		$I_R < 150$	轻微生态危害
	$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害		$150 \leq I_R < 300$	中等生态危害
潜在生态风险因子(E_r^i)	$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害	潜在生态风险指数(I_R)	$300 \leq I_R < 600$	强生态危害
	$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害		$I_R \geq 600$	很强生态危害
	$E_r^i \geq 320$	极强生态危害			

2 结果分析

2.1 浦阳江流域底泥重金属质量分数特征与空间分布

从图 1 和表 3 中可以看出: 浦阳江流域通过生态清淤后, 各样点的重金属质量分数还是普遍高于当地的土壤重金属背景值。通过各样点重金属质量分数与生态清淤站的重金属质量分数对比可以看出, 清淤后除个别样点的个别重金属质量分数高于生态清淤站的样本均值外, 绝大部分样点的重金属质量分数均低于生态清淤站的重金属质量分数的均值。图 1 可以看出, 锌、铜、铬等 3 种重金属在中心地带具有明显的富集。

西溪所在的 4 个样点的砷的质量分数均超过了背景值, 其中炉来村砷的质量分数最高, 为当地背景值的 14.71 倍。从表 3 中可以看出: 西溪的各个样本中砷的平均值为 6 条河流中最高的, 变异系数也较小, 表明西溪整条河流的砷的质量分数量都较高。

各样点除西溪口和万家水晶加工园区外, 镍的质量分数均低于当地背景值, 其中镍最高点为西溪

口, 各河段的镍的平均质量分数均不高, 变异系数较小。

铜和锌的质量分数最高值均出现在浦江县人民政府测点, 其中铜超过了当地背景值5.32倍, 锌超过了当地背景值6.95倍。各河段铜平均质量分数最高的是五六岭溪, 最低的为黄龙溪, 变异系数最大的为西溪。6条河流中锌的平均质量分数都较高, 其中最高的是东溪。

铅质量分数最高值出现在万家水晶加工园区, 超过了当地背景值9.69倍。各河段铅平均质量分数最高的是西溪, 超过了当地背景值5.7倍, 最低的为浦阳江, 超过了当地背景值。各河段的变异系数都不高, 表明各样点铅的质量分数较平均, 且较高。

各样点中铬质量分数均较高。东溪口为铬质量分数最高的样地, 超过了当地背景值的4.87倍, 最

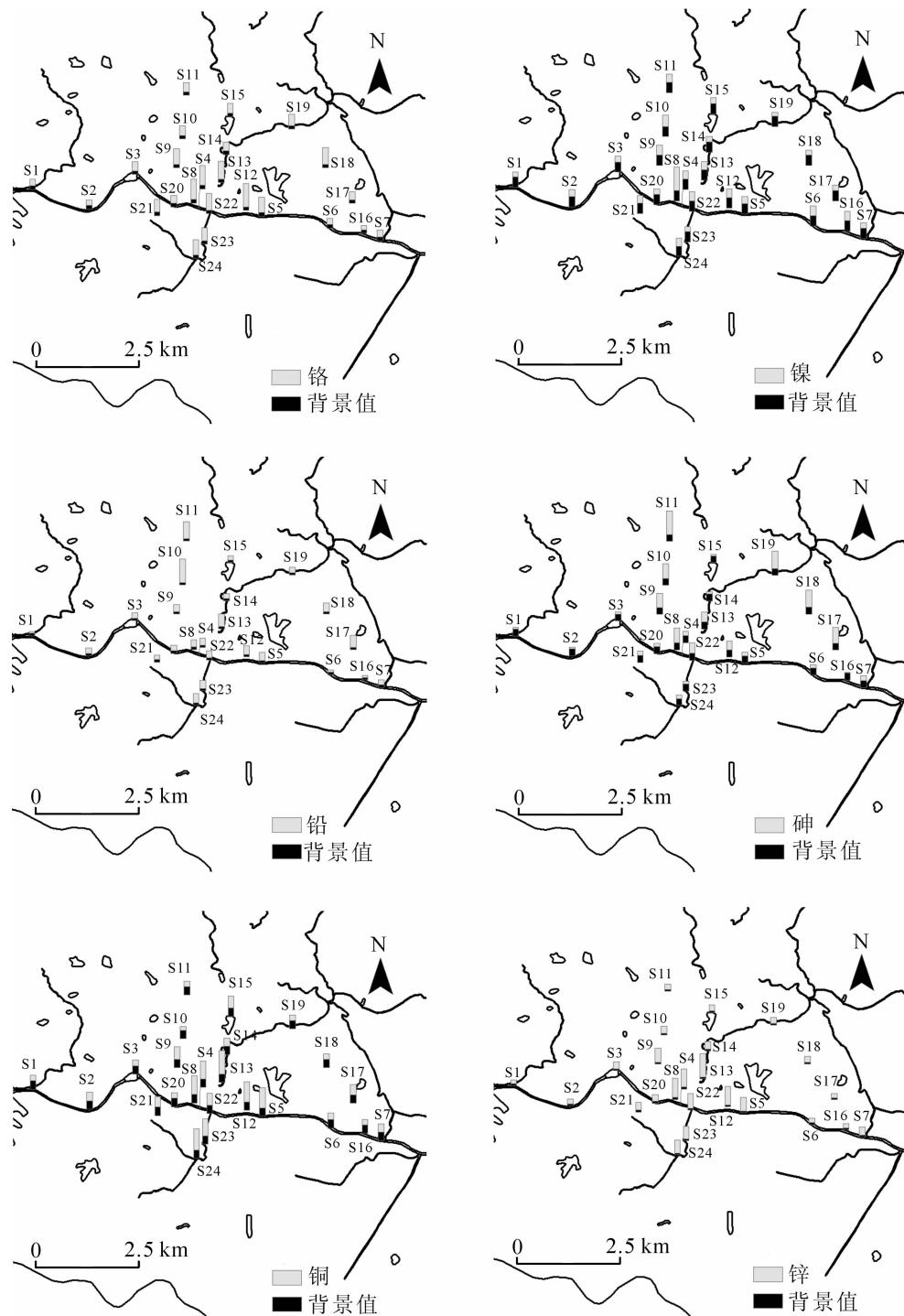


图1 浦阳江流域底泥重金属空间分布

Figure 1 Spatial variation map of heavy metals distributions in the sediment of the Puyang River

低值出现在黄龙口。各河段铬的平均质量分数最高的是东溪，其次是五六岭溪、西溪，各河段的变异系数都较低，表明各样点的铬质量分数均较高。

表3中，浦江县生态清淤站64个样本的重金属含量的均值都超过了当地的背景值。

表3 浦阳江流域底泥重金属情况

Table 3 Concentrations of heavy metals in the sediments of Puyang River

河流	项目	重金属质量分数/(mg·kg ⁻¹)					
		砷	铬	镍	铜	锌	铅
浦阳江	平均值	15.43	94.57	22.14	42.29	162.00	70.57
	数值范围	8.00~24.00	56.00~186.00	16.00~32.00	23.00~81.00	78~254	26.00~109.00
	与清淤站比值	0.07~0.22	0.30~0.99	0.40~0.80	0.23~0.80	0.17~0.55	0.11~0.44
	与背景值比值	1.04~3.12	1.23~4.10	0.95~1.91	1.30~4.58	1.25~4.05	0.77~3.23
西溪	变异系数	0.44	0.54	0.26	0.56	0.62	0.43
	平均值	81.00	131.25	43.00	40.50	218.25	193.00
	数值范围	68.00~113.00	87.00~195.00	27.00~76.00	15.00~75.00	105.00~366.00	102.00~327.00
	与清淤站比值	0.62~1.03	0.46~1.04	0.68~1.9	0.15~0.74	0.23~0.79	0.42~1.33
东溪	与背景值比值	8.85~14.71	1.92~4.30	1.61~4.53	0.85~4.24	1.67~5.84	3.02~9.69
	变异系数	0.26	0.38	0.52	0.68	0.55	0.57
	平均值	27.75	142.75	23.50	64.25	254.75	106.50
	数值范围	7.00~49.00	87.00~221.00	17.00~29.00	33.00~94.00	107.00~435.00	60.00~176.00
黄龙溪	与清淤站比值	0.06~0.45	0.46~1.18	0.43~0.73	0.33~0.93	0.23~0.94	0.24~0.72
	与背景值比值	0.91~6.38	1.92~4.87	1.01~1.73	1.86~5.32	1.70~6.95	1.78~5.21
	变异系数	0.79	0.45	0.25	0.44	0.63	0.51
	平均值	61.50	97.00	19.75	26.75	98.00	97.00
里坞溪	数值范围	4.00~85.00	41.00~161.00	14.00~31.00	21.00~42.00	79.00~116.00	27.00~165.00
	与清淤站比值	0.04~0.77	0.22~0.86	0.35~0.78	0.21~0.42	0.17~0.25	0.01~0.67
	与背景值比值	0.52~11.07	0.90~3.55	0.84~1.85	1.19~2.38	1.26~1.85	0.80~4.89
	变异系数	0.63	0.52	0.39	0.38	0.20	0.60
五六岭溪	平均值	18.50	96.50	20.50	33.00	138.50	73.00
	数值范围	16.00~21.00	74.00~119.00	17.00~24.00	23.00~43.00	132.00~145.00	67.00~79.00
	与清淤站比值	0.15~0.19	0.39~0.63	0.43~0.6	0.22~0.43	0.28~0.31	0.27~0.32
	与背景值比值	2.08~2.73	1.63~2.62	1.01~1.43	1.30~2.43	2.11~2.32	1.99~2.34
浦江县生态清淤站	变异系数	0.19	0.33	0.24	0.43	0.07	0.12
	平均值	27.33	142.33	24.67	68.00	251.67	116.33
	数值范围	14.00~51.00	121.00~160.00	17.00~31.00	49.00~87.00	237.00~269.00	100.00~132.00
	与清淤站比值	0.13~0.46	0.64~0.85	0.42~0.78	0.48~0.86	0.51~0.58	0.45~0.54
金衢盆地土壤背景值	与背景值比值	1.82~6.64	2.66~3.52	1.00~1.85	2.77~4.92	3.78~4.30	2.96~3.91
	变异系数	0.75	0.14	0.29	0.28	0.06	0.14
	平均值	110.00	188.00	40.00	101.00	463.00	245.00
	金衢盆地土壤背景值	7.68	45.37	16.76	17.68	62.63	33.75

2.2 地积累指数法评价

以选取金衢盆地土壤背景值作为地球化学背景值，计算各重金属的地积累指数。对计算出的各采样点的地积累指数进行分级后，结果如表4所示。从表4中浦江县生态清淤站的地累积指数可以看出，浦阳江流域的主要污染物为砷，其次为锌、铅、铜、铬和镍。

生态清淤站内的淤泥砷的污染达到4级，属于偏重度污染；锌和铅的污染达到3级，属于中度污染；铬和铜的污染达到2级，为偏中度污染；镍的污染达到1级，为轻度污染。从各河段看，浦阳江各

表4 浦阳江流域底泥重金属地积累指数值

Table 4 Geo-accumulation index of the heavy metals in the sediment of Puyang River

河道名称	采样点位置	砷		铬		镍		铜		锌		铅	
		I_{geo}	级数										
浦阳江	通济桥村	-0.53	0	-0.13	0	-0.65	0	-0.21	0	-0.27	0	-0.96	0
	杨田村	-0.36	0	-0.28	0	-0.13	0	0.36	1	-0.11	0	0.59	1
	翠湖	-0.36	0	0.40	1	-0.48	0	-0.09	0	0.49	1	0.61	1
	和平桥	1.00	1	1.45	2	0.05	1	1.44	2	1.86	2	0.98	1
	橡皮坝	0.72	1	1.09	2	-0.13	0	1.61	2	1.43	2	1.11	2
	浦阳江四桥	0.47	1	-0.23	0	0.35	1	0.03	1	-0.13	0	-0.45	0
	平安桥	1.06	2	-0.07	0	-0.56	0	0.36	1	0.72	1	0.45	1
	均值	0.29		0.32		-0.22		0.50		0.57		0.33	
西溪	西溪口	2.62	3	1.52	2	1.60	2	1.50	2	1.96	2	1.07	2
	西山公园	2.56	3	1.12	2	0.35	1	0.91	1	1.51	2	1.01	2
	万家水晶加工区	2.64	3	0.48	1	0.56	1	-0.82	0	0.52	1	2.69	3
	炉来村	3.29	4	0.35	1	0.10	1	-0.27	0	0.16	1	2.23	3
	均值	2.78		0.87		0.65		0.33		1.04		1.75	
东溪	东溪口	1.93	2	1.70	2	0.21	1	1.63	2	1.87	2	1.28	2
	浦江县人民政府	2.09	3	1.31	2	0.16	1	1.83	2	2.21	3	1.80	2
	东山公园	-0.07	0	0.35	1	-0.56	0	0.32	1	0.51	1	0.40	1
	后溪水库	-0.72	0	0.47	1	-0.33	0	0.86	1	0.19	1	0.25	1
	均值	0.81		0.96		-0.13		1.16		1.19		0.93	
黄龙溪	黄龙口	-1.53	0	-0.73	0	0.30	1	-0.27	0	-0.25	0	-0.91	0
	人民医院	2.70	3	0.20	1	-0.48	0	0.66	1	-0.16	0	1.70	2
	特色工业园区	2.83	3	1.24	2	-0.65	0	-0.34	0	0.27	1	1.22	2
	黄龙溪五里社区	2.88	3	0.67	1	-0.84	0	-0.27	0	0.30	1	0.62	1
	均值	1.72		0.34		-0.42		-0.05		0.04		0.66	
里坞溪	里坞溪口	0.47	1	0.12	1	-0.56	0	-0.21	0	0.49	1	0.64	1
	横大路	0.87	1	0.81	1	-0.07	0	0.70	1	0.63	1	0.40	1
	均值	0.67		0.46		-0.32		0.25		0.56		0.52	
五六岭溪	五六岭溪口	2.15	3	1.23	2	0.30	1	0.89	1	1.52	2	0.98	1
	枫苑小区	0.28	1	0.83	1	-0.56	0	1.36	2	1.33	2	1.21	2
	和平南路	0.56	1	1.10	2	0.05	1	1.71	2	1.41	2	1.38	2
	均值	1.00		1.05		-0.07		1.32		1.42		1.19	
	浦江县生态清淤站	3.26	4	1.47	2	0.67	1	1.93	2	2.30	3	2.27	3

个采样点的重金属污染程度都较低，西溪各个样点砷的污染严重，均值已达到3级，为中度污染；锌和铅各样点的均值达到2级，为偏中度污染；铬、镍、铜为轻度污染。东溪的砷、铬、铅为轻度污染，铜和锌为中度污染。

黄龙溪的砷的污染达到偏中度污染，其余重金属污染程度较低，里坞溪重金属污染程度较低。五六岭溪除镍没有污染外，其余重金属都达到偏中度污染。从各采样点看，炉来村的砷污染程度最高，为偏重度污染；铅污染最严重的样地为万家水晶加工园区，为中度污染；锌污染最严重的样点为浦江县人民政府测点，为中度污染。总的来说，各个河段的重金属污染程度均显著低于生态清淤站的污染程度。

2.3 潜在生态风险指数

由表5可见：根据HAKANSON生态危害系数，浦阳江流域底泥中6种重金属的潜在生态危害由强至弱的顺序为：砷>铅>铜>镍>铬>锌，其中砷对潜在生态风险指数(I_R)值的贡献最突出，浦江县生态清淤站的砷的平均值达到了143.2，具有强生态危害，其余几种重金属为轻生态危害。综合潜在生态风

险指数(I_R)值来看为中等生态危害程度。

表5 浦阳江流域沉积物中各重金属的潜在生态危害系数和总的潜在生态风险指数值

Table 5 The ecological hazard coefficient and potential ecological risk index of the heavy metals in the sediment of Puyang River

河道名称	采样点位置	E_i						I_R
		砷	铬	镍	铜	锌	铅	
浦阳江	通济桥村	10.4	2.7	4.8	6.5	1.2	3.9	29.5
	杨田村	11.7	2.5	6.9	9.6	1.4	11.3	43.3
	翠湖	11.7	4.0	5.4	7.1	2.1	11.4	41.6
	和平桥	29.9	8.2	7.8	20.4	5.5	14.8	86.5
	橡皮坝	24.7	6.4	6.9	22.9	4.1	16.1	81.1
	浦阳江四桥	20.8	2.6	9.5	7.6	1.4	5.5	47.4
	平安桥	31.3	2.9	5.1	9.6	2.5	10.2	61.5
	均值	20.1	4.2	6.6	12.0	2.6	10.5	55.9
西溪	西溪口	92.4	8.6	22.7	21.2	5.8	15.7	166.5
	西山公园	88.5	6.5	9.5	14.1	4.3	15.1	138.1
	万家水晶加工区	93.8	4.2	11.0	4.2	2.2	48.4	163.8
	炉来村	147.1	3.8	8.1	6.2	1.7	35.1	202.0
	均值	105.5	5.8	12.8	11.5	3.5	28.6	167.6
东溪	东溪口	57.3	9.7	8.7	23.2	5.5	18.2	122.6
	浦江县人民政府	63.8	7.4	8.4	26.6	6.9	26.1	139.2
	东山公园	14.3	3.8	5.1	9.3	2.1	9.9	44.6
	后溪水库	9.1	4.1	6.0	13.6	1.7	8.9	43.4
	均值	36.1	6.3	7.0	18.2	4.1	15.8	87.5
黄龙溪	黄龙口	5.2	1.8	9.2	6.2	1.3	4.0	27.7
	人民医院	97.7	3.4	5.4	11.9	1.3	24.4	144.1
	特色工业园区	106.8	7.1	4.8	5.9	1.8	17.5	143.9
	黄龙溪五里社区	110.7	4.8	4.2	6.2	1.9	11.6	139.2
	均值	80.1	4.3	5.9	7.6	1.6	14.4	113.7
里坞溪	里坞溪口	20.8	3.3	5.1	6.5	2.1	11.7	49.5
	横大路	27.3	5.2	7.2	12.2	2.3	9.9	64.2
	均值	24.1	4.3	6.1	9.3	2.2	10.8	56.8
五六岭溪	五六岭溪口	66.4	7.1	9.2	13.9	4.3	14.8	115.7
	枫苑小区	18.2	5.3	5.1	19.2	3.8	17.3	69.0
	和平南路	22.1	6.4	7.8	24.6	4.0	19.6	84.5
	均值	35.6	6.3	7.4	19.2	4.0	17.2	89.7
	浦江县生态清淤站	143.2	8.3	11.9	28.6	7.4	36.3	235.7

从各条河流的综合指数 I_R 值来看, 西溪为中等生态危害程度, 其余河流为轻微生态危害程度, 其中浦阳江的 I_R 值为最低, 危害程度最低, 其次为里坞溪、东溪、五六岭溪、黄龙溪、西溪。从各重金属对各条河流的危害程度来看, 浦阳江底泥中的重金属含量均处于轻微生态危害。西溪和黄龙溪底泥中的砷达到了强生态危害程度。总的来说, 清淤后, 各种重金属对浦阳江流域的生态危害减小。

2.4 重金属来源分析

元素聚类树状图可以形象地反映元素间的距离, 有效地揭示元素间的关系^[17]。为了保证聚类效果, 在对变量进行聚类之前, 先对数据标准化, 以保证所有的变量具有相同的权重。

因浦阳江流域底泥已被清淤过, 所以选取生态清淤站的底泥更能反映未清淤前的底泥现状, 有助于浦阳江流域底泥重金属污染源的判断。利用 SPSS 19.0 软件对底泥中 6 种元素进行聚类分析, 旨在通

通过对主元素与微量元素变量之间的关系来识别各因子间的关系，进而鉴别重金属的来源。

聚类分析结果见图2。根据聚类分析结果，在距离小于10时，可将元素分为以下3组：铬、锌、铅、铜；砷和镍各自聚为一类，因清淤站内的镍的质量分数与自然背景值较近，可以推断浦阳江流域底泥中的镍主要来自自然成因；而清淤站内的铬、锌、铅、铜的质量分数较高，可能来自当地工业的复合污染，清淤站内的砷为富集程度最高的元素，且聚为一类，可能来源于单一的污染源，因水晶玻璃中含有三氧化二砷，推断浦阳江流域底泥中的砷的富集可能与水晶玻璃生产有关。

3 评价结果比较与分析

根据地积累指数计算结果，浦阳江流域底泥的重金属污染程度依次为砷>锌>铅>铜，铬>镍。而根据HAKANSON生态危害系数，其次序则为砷>铅>铜>镍>铬>锌。可见，砷是污染情况最严重的，但两者评价结果也有差异，虽然锌的地积累指数值很高，但其生物毒性系数低($T_i=1$)，因此锌的污染造成的生态危害并不大。铅的地积累指数值虽然低于锌，但其生物毒性系数($T_i=5$)高于锌的生物毒性系数，所以其生态危害比锌大。造成这种结果有差异的原因是地积累指数法侧重于重金属质量分数与背景值的对比评价，主要反映外源重金属的富集程度。而HAKANSON生态风险指数法除了考虑重金属的质量分数之外，更考虑到了不同金属的生物毒性影响，相比较而言，后者的评价结果更准确。

4 结果与讨论

浦阳江流域通过底泥疏浚后，重金属质量分数与疏浚前有了明显下降。大部分样点的重金属质量分数远低于生态清淤站的重金属质量分数。浦阳江流域通过底泥疏浚后，虽然重金属质量分数有了明显下降，但是各样点的重金属质量分数普遍高于当地的土壤重金属背景值，可能底泥疏浚深度不够。根据地积累指数法，浦阳江流域的主要污染物为砷，其次为锌、铅、铜、铬、镍。各种重金属污染对浦阳江流域构成的潜在生态危害由强至弱依次为砷>铅>铜>镍>铬>锌，其中砷的影响占绝对主导地位。从综合污染程度分析，浦阳江干流的污染程度最低，疏浚效果最佳支流中西溪的污染程度最高，其次是黄龙溪，疏浚效果不佳。浦阳江生态清淤站的底泥砷污染严重，具有强生态危害，河道疏浚淤泥不宜农用。浦阳江流域底泥中砷的污染源可能来自浦江县的水晶玻璃生产。

由于国内外缺少对水晶玻璃加工制造业造成的重金属污染的研究，还无法确定当地砷等重金属污染是否为水晶玻璃加工制造中产生的废水废渣所造成，还需要进一步对水晶玻璃生产工艺、水晶玻璃原料以及水晶加工产生的废水废渣的研究。

5 参考文献

- [1] 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, ZENG Xibai, LI Guoxue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment [J]. *Acta Sci Circumstant*, 2007, 27(2): 289–297.
- [2] 李海燕，黄延，王崇臣. 北京西城区雨水管道沉积物中重金属污染风险评价[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(3): 28–33.
LI Haiyan, HUANG Yan, WANG Congchen. Assessment on the pollution risk of heavy metal in the storm sewer sediments in Xicheng District, Beijing [J]. *Environ Poll Control*, 2010, 32(3): 28–33.
- [3] 范成新，朱育新，吉志军，等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 235–241.
FAN Chengxin, ZHU Yuxin, JI Zhijun, et al. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin [J]. *J Lake Sci*, 2002, 14(3): 235–241.

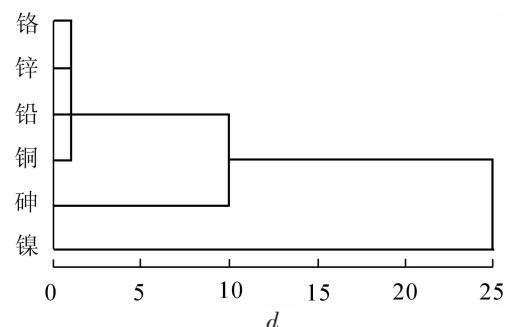


图2 底泥重金属聚类分析图

Figure 2 Cluster analysis of heavy metals of sediment

- [4] AKCAY H, OGUZ A, KARAPIRE C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. *Water Res*, 2003, **37**(4): 813 – 822.
- [5] MARENKO E, GENNARO M C, ROBOTTI E, et al. Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida river sediments [J]. *Anal Chimica Acta*, 2006, **560**(1/2): 172 – 183.
- [6] 吴芝瑛, 虞左明, 盛海燕, 等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 277 – 284.
WU Zhiying, YU Zuoming, SHENG Haiyan, et al. Ecological effects of the dredging in the West Lake, Hangzhou [J]. *J Lake Sci*, 2008, **20**(3): 277 – 284.
- [7] 赵文靖. 经济转型期的生态道德教育研究: 以浦江水晶产业为例[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
ZHAO Wenjing. *The Research on Ecological Moral Education During the Economic Transformation Case Study from Pujiang Crystal Industry* [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.
- [8] 王承遇, 陶瑛. 水晶玻璃的过去、现在与未来[J]. 玻璃, 2007, **34**(6): 7 – 13.
WANG Chenyu, TAO Ying. The past, present and future of crystal glass [J]. *Glass*, 2007, **34**(6): 7 – 13.
- [9] 陈奕睿, 屈海云, 王安宝. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定铅晶质玻璃中微量元素[J]. 理化检验: 化学分册, 2010, **46**(9): 1073 – 1074.
CHEN Yirui, QU Haiyun, WANG Anbao. Determination of trace of elements in lead crystal glass by Axial view ICP-AES [J]. *PTCA Part B Chem Anal*, 2010, **46**(9): 1073 – 1074.
- [10] 张鑫, 周涛发, 杨西飞, 等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, **28**(11): 1419 – 1423.
ZHANG Xin, ZHOU Taofa, YANG Xifei, et al. Study on assessment methods of heavy metal pollution in river sediments [J]. *J Hefei Univ Technol Sci*, 2005, **28**(11): 1419 – 1423.
- [11] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地积累指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2006, **16**(12): 135 – 139.
LI Juanjuan, MA Jintao, CHU Xiujuan, et al. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metal contamination in soil of copper refining [J]. *China Saf Sci J*, 2006, **16**(12): 135 – 139.
- [12] 何云峰, 朱广伟, 陈英旭, 等. 运河(杭州段)沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2002, **28**(6): 669 – 674.
HE Yunfeng, ZHU Guangwei, CHEN Yingxu, et al. Study on the ecological risk of sediment from the Hangzhou section of Grand Canal, China, with potential ecological risk index [J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2002, **28**(6): 669 – 674.
- [13] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geochem J*, 1969, **2**(3): 108 – 118.
- [14] 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征[J]. 物探与化探, 2009, **33**(2): 132 – 134.
FANG Yunhui, WANG Yanqing. Background characterist of soil elements in four plains of Zhejiang Province [J]. *Geophys Geochem Expl*, 2009, **33**(2): 132 – 134.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach [J]. *Water Res*, 1980, **14**(8): 975 – 1001.
- [16] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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.
XU Zhenqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **31**(2): 112 – 115.
- [17] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environ Poll*, 2001, **114**(3): 313 – 324.