

# 临安市底泥重金属污染特征及潜在生态危害评价

杨冰雪, 方晨, 王宏, 许鑫红, 陈峰, 许振波, 孙海波, 王云, 汪琼华 (浙江省临安市环境监测站, 浙江临安 311300)

**摘要** [目的]了解浙江省临安地区底泥重金属的污染状况。[方法]对临安地区底泥重金属污染水平与特征进行调查与分析,利用内梅罗综合指数法及潜在生态危害指数法,对该区域底泥重金属的污染程度与潜在的生态危害进行评价。[结果]临安大部分地区底泥重金属污染等级属于尚清洁以上,个别地区受不同程度重金属污染;根据内梅罗综合指数法评价结果显示,临安地区底泥中重金属污染程度从大到小依次为 Cd、Zn、Cu、Ni、Cr、Pb,清凉峰镇同山塘点位 Cd 严重超标,其次 Zn 污染程度也相对严重;太湖源镇、青山湖街道及板桥镇个别点位 Ni、Cu、Zn 重金属污染等级为轻污染;潜在生态危害指数法评价结果表明,清凉峰镇同山塘点位 Cd 潜在生态危害程度为很强,其他区域的潜在生态危害程度均为轻微。[结论]该研究可为有效防治底泥重金属污染提供科学依据。

**关键词** 重金属;底泥;污染评价

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)29-0045-05

## Investigation of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment in Lin'an City

YANG bing-xue, FANG Chen, WANG Hong et al (Environmental Monitoring Station of Lin'an, Lin'an, Zhejiang 311300)

**Abstract** [Objective] To understand the extend of pollution by heavy metal for sediment in linan area of Zhejiang province. [Method] Investigations and analysis is conducted to figure out the characteristics and the extend of pollution in the river sediment by heavy metal. On the basis, nemerow index and potential ecological risk index are employed for analysis of degree of contamination and ecological risk of Linan area sediment. [Result] The monitoring results show that in most of the sediment of heavy metal belongs to the above is clean, individual regions with different degree of heavy metal pollution. According to results the nemerow index, the degree of heavy metal pollution in sediment size from big to small was Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, the sampling points of tongshantang in qingliangfeng Cd exceeds bid badly, next Zn pollution was relatively serious; Another neighbourhoods of Taihuayan, Qingshanhu, banqiao town individual points were less polluted. Potential ecological risk index results showed that sampling points of tongshantang in qingliangfeng Cd potential ecological damage was very strong, other areas the potential ecological damage were slight. [Conclusion] The study can provide scientific basis for effectively preventing and controlling heavy metal pollution in sediment.

**Key words** Heavy metals; Sediment; Pollution assessment

重金属在水中不能被分解,且能与水中的其他有害物质结合生成毒性更大的有机物<sup>[1]</sup>。河流底泥是水生态系统的重要组成部分,也是水体各种营养物质、污染物的主要蓄积场所。一般底泥中的重金属在没有被扰动的前提下,比较稳定,但是当底泥的化学、动力等外部条件发生改变时,底泥中的污染物会被重新释放出来再次进入水体,造成河流水体的二次污染,同时底泥中的重金属会在藻类中富集,进而通过水中鱼类及贝类进食,然后通过食物链的富集效应最终在人体内累积,当人体内重金属累积到一定程度,就会造成人体的慢性中毒,成为公害。

根据是否存在人为活动的影响,将河流底泥重金属来源划分为自然来源与人为来源。其中,自然来源主要是由一些自然地理因素,如底泥土壤本身、岩石风化、地质构造、水动力及侵蚀作用等;人为来源主要是由于农业、工业、交通等引起的,它是生态环境污染极其重要的来源<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。目前针对某一具体河流底泥重金属污染特性及潜在生态危害,国内外学者做过大量研究。许友泽等<sup>[4]</sup>利用改进的潜在生态风险指数法对湘江底泥重金属污染特征与生态风险进行了评价;张伟等<sup>[5]</sup>利用地累积指数法和潜在生态危害指数法对浦阳江流域疏浚前后底泥重金属污染及其潜在生态风险进行了评价;丘鸿荣等<sup>[6]</sup>利用地累积指数法和潜在生态危害指数

法对西南涌流域底泥重金属污染特征及潜在生态危害进行了评价。然而,目前国内外针对某一区域境内众多河流水系整体底泥重金属污染特征及潜在生态危害评价鲜见报道。临安位处太湖流域和钱塘江流域的上游,境内支流众多,主要包括南苕溪、中苕溪、天目溪、昌化溪,水资源相对丰富,沿河流水系两侧重金属污染企业较多,重金属污染排放企业主要涉及线路板、电镀、五金工具加工等行业,且分布较分散。因此,研究临安境内河流底泥重金属,特别是涉重企业沿线河流底泥重金属的研究显得尤为必要。笔者通过监测浙江省临安辖区 18 个镇(街道)的湖库底泥,利用主成分分析法及相关系数法分析底泥重金属来源,并用内梅罗综合污染指数法及潜在生态危害指数法分析临安地区湖库底泥重金属污染现状,旨在为正确、合理地评价临安境内区域流域河流底泥的污染程度及潜在生态危害提供理论支持与技术依据。

## 1 材料与方法

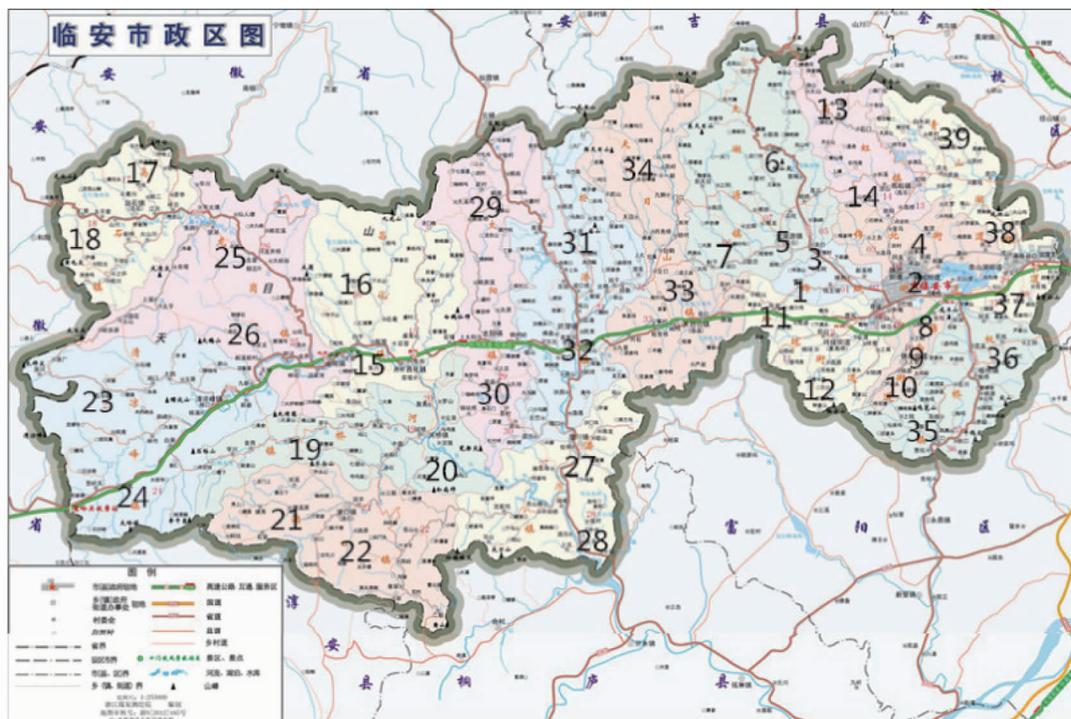
**1.1 样品采集与处理** 临安市位于浙江省西部,地理坐标为 118°51'~119°52' E, 29°56'~30°23' N, 总面积 3 126.8 km<sup>2</sup>。临安境内地貌形态多样复杂,境内矿产资源有 30 余种,金属矿有钨、铍、锑、铅、锌、钼、锰、铁、镍、铜、铋(钼)铁、独居石和金矿。临安市辖 5 个街道、13 个镇:锦城街道、锦北街道、玲珑街道、锦南街道、青山湖街道;於潜镇、天目山镇、太阳镇、昌化镇、龙岗镇、岛石镇、湍口镇、板桥镇、高虹镇、河桥镇、潜川镇、太湖源镇、清凉峰镇。

2016 年 3—4 月对临安市 18 个镇(街道)各选取有代表性的“一河一塘”底泥进行监测。具体采样断面见表 1,各采样点的分布见图 1。样品主要采用直接挖掘法,取样深度为

0~20 cm 表层底泥。样品采集后,装入聚乙烯塑料袋中带回实验室,经过自然风干后,去除石头、树枝等杂质,用玛瑙研钵研磨后,分别过 60 目和 100 目的尼龙筛,作为试样备用。

表 1 临安市 18 个镇(街道)湖库底泥具体采样点位  
Table 1 Specific sampling points of lake and reservoir sediments in Lin'an 18 towns

代码 No.	采样点位 Sampling point	镇(街道)名称 Town street name	代码 No.	采样点位 Sampling point	镇(街道)名称 Town street name
1	潘溪	锦城街道	21	昌南溪迎丰积底泥	湍口镇
2	茗溪		22	花公塘淤泥	
3	大柴山湾水库	锦北街道	23	同山塘	清凉峰镇
4	马溪		24	寨下塘	
5	泥沟溪	太湖源镇	25	张家山塘	龙岗镇
6	太湖源南溪南溪		26	许家山塘	
7	太湖源山塘山塘		27	杨家大塘	潜川镇
8	杨岱溪与锦溪交界口	锦南街道	28	里伍水	
9	杨岱溪万马路口		29	上庄村牛兰岭山塘	太阳镇
10	横溪		30	浪山溪	
11	桥岭	玲珑街道	31	敖干荷花池	於潜镇
12	锦溪东山		32	东关溪涌村桥头	
13	高桥池塘淤泥	高虹镇	33	藻溪肇村梅林桥	天目山镇
14	活山池塘淤泥		34	宝鸡坞山塘	
15	营坞山塘淤泥	昌化镇	35	青塘头	板桥镇
16	沃溪底泥		36	三口秋口溪	
17	丰裕中塘	岛石镇	37	朱村大塘	青山湖街道
18	仁里溪		38	研里官塘	
19	后山山塘淤泥	河桥镇	39	岳山溪	
20	昌化溪河桥积底泥				



注:1~39 表示湖库底泥采样点位  
Note:1-39 represents the sampling sites of sediment in lake and reservoir

图 1 临安区区域流域底泥采样分布

Fig.1 Smapling sites of sediments in Lin'an Area

1.2 分析及质量控制 实验室内底泥样品消解处理采用 DEENA 石墨全自动消解器,用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 全消解法消解。底泥重金属 Cu、Ni、Cr、Zn 含量采用安捷伦

公司火焰原子吸收光谱仪(AA240FS)测定,Pb、Cd 含量使用安捷伦公司石墨炉原子吸收光谱仪(AA240Z)测定。为保证精确度并减少随机误差,试验分析过程采用超纯水,所用容

器均用 10% 稀硝酸浸泡 24 h,用自来水洗净后,用超纯水冲洗 2 遍,烘干备用,所用酸均为优级纯。标准样品采用国家标准土壤样品(GSS-7、GSS-5),测试样品采用 10% 平行样测定,采用超纯水作为空白,经过与测试样品的制备同步处理,并与样品相同条件进行测定,每批样品至少制备 2 个以上的空白溶液。

### 1.3 评价方法

**1.3.1 内梅罗综合污染指数法。**内梅罗综合污染指数法可用于分析评价整个区域被多种重金属污染程度。其计算公式:

$$P_i = C_i/S_i$$

$$PI = \sqrt{(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)}/2$$

式中, $P_i$  为土壤中污染物的单项污染指数; $C_i$  为土壤中污染物的实测浓度(mg/kg);PI 为内梅罗综合污染指数; $P_{imax}$  为单因子指数最高值; $P_{iave}$  为单因子污染指数的算术平均值。具体污染等级划分标准<sup>[7]</sup>见表 2。

表 2 污染指数分级标准

Table 2 The standard classification of using the method of pollution index

等级划分 Gradation	指标范围 Index range	污染等级 Class of pollution	污染水平 Pollution level
I	PI < 0.7	安全	清洁
II	0.7 ≤ PI < 1.0	警戒线	尚清洁
IV	1.0 ≤ PI < 2.0	轻污染	底泥、水生生物开始受到污染
IV	2.0 ≤ PI < 3.0	中污染	底泥、水生生物已受中度污染
V	PI ≤ 3.0	重污染	底泥、水生生物已受重度污染

**1.3.2 潜在生态危害指数法。**潜在生态危害指数法最早由瑞典学者 Hakanson<sup>[8]</sup>提出,是从各种重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度来评价重金属的污染程度。计算公式:

$$E_r^i = T_r^i \times (C_{i\text{实测}}^i / C_n^i)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, $T_r^i$  为单一重金属毒性相应系数( $Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Ni = Pb = 5 < Cd = 30$ )<sup>[9]</sup>, $C_{i\text{实测}}^i$  为某元素的测量值(mg/kg); $C_n^i$  为参比值(mg/kg),此次评价以国家二级标准作为参比; $E_r^i$  为单个元素潜在生态危害指数;RI 为采样点某区域多种重金属潜在生态危害指数。土壤重金属生态危害程度的划分标准见表 3。

表 3 土壤重金属生态危害程度的划分标准<sup>[9]</sup>

Table 3 Criteria for degrees of the ecological risk of heavy metals in soil

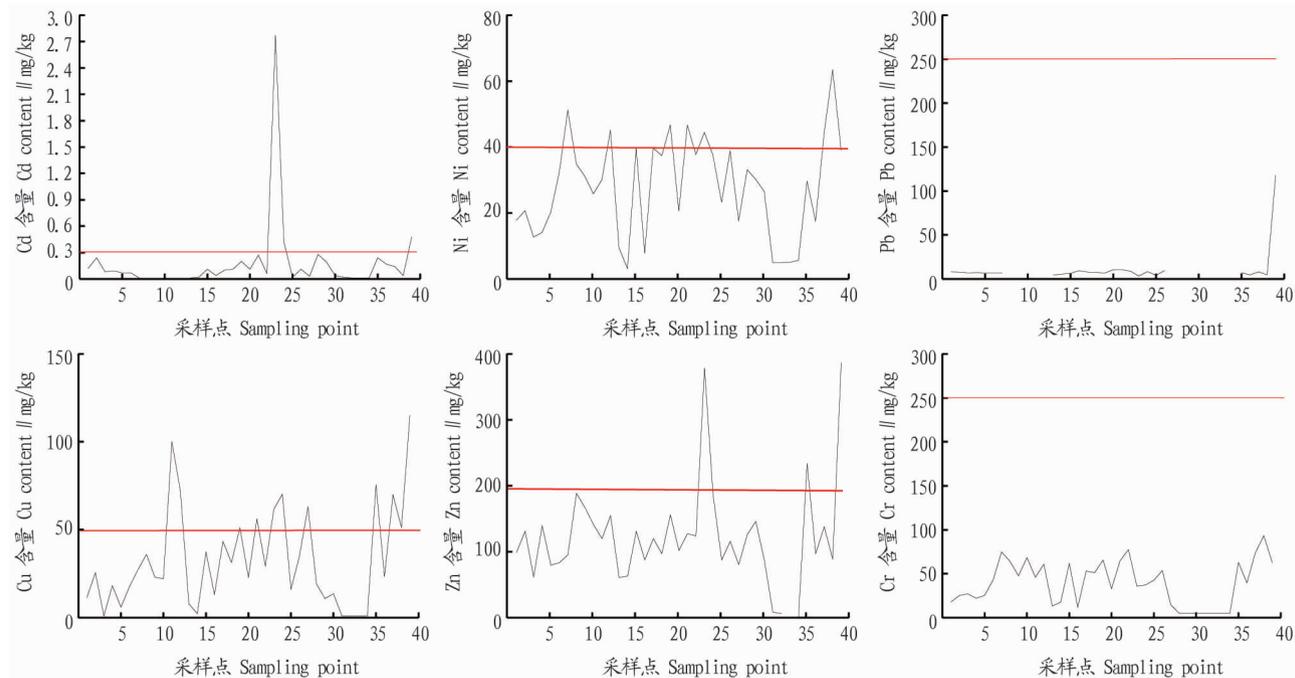
序号 Order	$E_r^i$	RI	潜在生态危害程度 Potential ecological harm degree
1	$E_r^i < 40$	RI < 150	轻微
2	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等
3	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强
4	$160 \leq E_r^i < 320$	RI > 600	很强
5	$E_r^i \geq 320$		极强

## 2 结果与分析

**2.1 底泥重金属含量状况** 临安市 18 个镇(街道)底泥重金属含量见图 2。以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级标准为评价标准判定底泥污染水平,结合图 2 及表 4 分析以内梅罗综合污染评价可得锦城街道、锦南街道、锦北街道、高虹镇、於潜片区底泥重金属污染水平为清洁;玲珑街道、昌化地区(除清凉峰镇外)污染水平属于尚清洁;太湖源镇、板桥镇、青山湖街道污染水平属于轻污染,超标因子主要是 Ni、Cu、Zn,其中超标倍数最高分别为 Ni 超标 1.28 倍、Cu 超标 1.51 倍、Zn 超标 1.29 倍;昌化地区的污染水平除清凉峰镇属重污染之外,其余均属于尚清洁,清凉峰镇的超标因子主要是 Cd、Zn,Cd 超标倍数高达 9.23 倍,Zn 超标 1.52 倍。临安 18 个镇(街道)重金属污染程度从强到弱依次为 Cd、Zn、Cu、Ni、Pb、Cr;以潜在生态危害指数法评价可知,临安地区 RI 为 0.92 ~ 285.56,昌化地区清凉峰镇同山塘潜在生态危害最大,天目山镇藻溪村潜在生态危害最小。临安地区除清凉峰镇同山塘点位:Cd 潜在生态危害程度为很强,多种金属潜在生态危害程度为中等,这主要是 Cd 的贡献,其他区域底泥重金属的潜在生态危害程度均为轻微。经过查阅相关资料可知,由于 Cd 主要与锌矿、铅锌矿、铜铅锌矿等共生。在焙烧上述矿石及湿法取矿时,Cd 被释放到废水废渣中。如开矿过程及尾矿应用管理不当,Cd 就会主要通过水源进入土壤和农田,已有研究表明,Cd 主要在肝、肾部积累,经过数年甚至数 10 年慢性积累后,人体将会出现显著的 Cd 中毒症状<sup>[10]</sup>。

**2.2 底泥重金属来源分析** 元素之间有显著正相关性说明它们可能有相同来源。利用 SPSS 13.0 软件对临安 18 个镇(街道)39 个点位底泥沉积物中 6 种重金属元素(Cu、Ni、Cr、Zn、Pb、Cd)用 Pearson 相关性分析,结果见表 5。由表 5 可知,Cd 与 Zn 呈极显著正相关,Ni 与 Cu、Cr 呈极显著正相关,与 Zn 呈显著正相关;Pb 与 Cu、Zn 呈极显著正相关,与 Zn 呈显著正相关;Cu 与 Cr、Ni 呈极显著正相关。说明 Pb、Zn、Cd 可能有相同来源,Cr 与 Cu、Ni 具有相同的来源。

为进一步了解各地区重金属元素的分布原因,采用主成分分析判别各地区重金属来源情况。由表 6 可知,临安市 18 个镇(街道)底泥重金属的所有信息由 3 个主因子反映出,共占总方差 95.51%。第一主成分的贡献率最高,贡献值为 53.75%,Ni、Cu、Zn、Cr 在第一因子上有较高的正载荷,结合表 5 分析,Cr、Ni 及 Cu 可能具有相同来源。结合临安各镇(街道)的实际工农业分布情况分析,太湖源镇、锦南街道、玲珑街道、板桥镇、青山湖街道的 Cr、Ni、Cu 高于背景值较明显,造成主要原因可能是人为因素;两昌地区及於潜片区的各重金属元素除 Pb 之外普遍偏高,除清凉峰镇同山塘点位 Cd 重污染外,其他区域污染等级尚均在警戒线内。经过实地调查结合历史用地情况分析,可能与该区域自然地质条件有关。但经调查取得知,清凉峰镇同山塘点位区域附近在 20 世纪 70 年代曾开采过煤矿,因此考虑同山塘 Cd 超标主要与当时煤矿开采过程中相关环保措施采取不到位有关,但具体原因有待进一步调查。



注:图中的红实线为土壤环境质量二级标准

Note: The red solid line represents the two level of soil environmental quality

图2 临安18个镇(街道)底泥重金属含量监测结果

Fig. 2 The monitor dates of heavy metal content in sediments of Lin'an 18 towns

表4 底泥重金属的评价结果

Table 4 The evaluation results of heavy metals in sediments

采样点 Sampling point	$P_i$						PI	$E_r^i$						RI
	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn	Cr		Cd	Ni	Pb	Cu	Zn	Cr	
1	0.40	0.45	0.03	0.23	0.50	0.07	0.40	12.00	2.25	0.15	1.15	0.50	0.14	16.19
2	0.80	0.52	0.03	0.51	0.66	0.10	0.64	24.00	2.60	0.15	2.55	0.66	0.20	30.16
3	0.27	0.32	0.03	0.01	0.31	0.11	0.26	8.10	1.60	0.15	0.05	0.31	0.22	10.43
4	0.15	0.24	0.02	0.18	0.47	0.06	0.35	4.50	1.20	0.10	0.90	0.47	0.12	7.29
5	0.23	0.51	0.03	0.12	0.40	0.10	0.39	6.90	2.55	0.15	0.60	0.40	0.20	10.80
6	0.12	0.54	0.02	0.18	0.28	0.12	0.41	3.60	2.70	0.10	0.90	0.28	0.24	7.82
7	0.02	1.28	0.03	0.54	0.48	0.30	0.96	0.60	6.40	0.15	2.70	0.48	0.60	10.93
8	/	0.58	/	0.36	0.63	0.18	0.54	0	2.90	0	1.80	0.63	0.36	5.69
9	/	0.52	/	0.23	0.56	0.14	0.47	0	2.60	0	1.15	0.56	0.28	4.59
10	/	0.60	/	0.22	0.47	0.20	0.50	0	3.00	0	1.10	0.47	0.40	4.97
11	/	0.90	/	1.00	0.40	0.13	0.83	0	4.50	0	5.00	0.40	0.26	10.16
12	/	0.19	/	0.72	0.52	0.17	0.58	0	0.95	0	3.60	0.52	0.34	5.41
13	0.03	0.06	0.01	0.08	0.24	0.04	0.18	0.90	0.30	0.05	0.40	0.24	0.08	1.97
14	0.07	0.08	0.02	0.05	0.31	0.07	0.23	2.10	0.40	0.10	0.25	0.31	0.14	3.30
15	0.18	0.66	0.02	0.37	0.44	0.18	0.52	5.40	3.30	0.10	1.85	0.44	0.36	11.45
16	0.13	0.79	0.03	0.13	0.35	0.04	0.59	3.90	3.95	0.15	0.65	0.35	0.08	9.08
17	0.33	0.75	0.03	0.43	0.48	0.18	0.59	9.90	3.75	0.15	2.15	0.48	0.36	16.79
18	0.18	0.62	0.03	0.31	0.32	0.15	0.48	5.40	3.10	0.15	1.55	0.32	0.30	10.82
19	0.33	0.78	0.02	0.51	0.52	0.19	0.62	9.90	3.90	0.10	2.55	0.52	0.38	17.35
20	0.18	0.34	0.03	0.23	0.34	0.09	0.28	5.40	1.70	0.15	1.15	0.34	0.18	8.92
21	0.90	0.76	0.03	0.56	0.51	0.21	0.73	27.00	3.80	0.15	2.80	0.51	0.42	34.68
22	0.20	0.95	0.04	0.59	0.62	0.26	0.74	6.00	4.75	0.20	2.95	0.62	0.52	15.04
23	9.23	0.75	0.01	0.62	1.52	0.12	6.69	276.90	3.75	0.05	3.10	1.52	0.24	285.56
24	0.70	0.47	0.03	0.70	0.62	0.11	0.58	21.00	2.35	0.15	3.50	0.62	0.22	27.84
25	0.07	0.78	0.01	0.16	0.35	0.14	0.58	2.10	3.90	0.05	0.80	0.35	0.28	7.48
26	0.18	0.35	0.03	0.35	0.39	0.15	0.32	5.40	1.75	0.15	1.75	0.39	0.30	9.74

接下表

续表 4

采样点 Sampling point	$P_i$							PI	$E_r^i$						RI
	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd		Ni	Pb	Cu	Zn	Cr		
27	0.10	0.66	/	0.63	0.32	0.05	0.53	3.00	3.30	0	3.15	0.32	0.10	9.87	
28	0.47	0.60	/	0.19	0.42	0.01	0.49	14.10	3.00	0	0.95	0.42	0.02	18.49	
29	0.32	0.53	/	0.11	0.49	0.01	0.43	9.60	2.65	0	0.55	0.49	0.02	13.31	
30	0.13	0.05	/	0.14	0.35	0.01	0.26	3.90	0.25	0	0.70	0.35	0.02	5.22	
31	0.07	0.05	/	0.01	0.03	0.01	0.05	2.10	0.25	0	0.05	0.03	0.02	2.45	
32	0.01	0.10	/	0.01	0.02	0.01	0.07	0.30	0.50	0	0.05	0.02	0.02	0.89	
33	0.01	0.11	/	0.01	0	0.01	0.08	0.30	0.55	0	0.05	0	0.02	0.92	
34	0.03	0.59	/	0.01	0	0.02	0.43	0.90	2.95	0	0.05	0	0.04	3.94	
35	0.80	0.74	0.03	1.51	1.17	0.25	1.19	24.00	3.70	0.15	7.55	1.17	0.50	37.07	
36	0.28	0.29	0.02	0.23	0.32	0.11	0.27	8.40	1.45	0.10	1.15	0.32	0.22	11.64	
37	0.23	0.74	0.03	0.70	0.46	0.21	0.59	6.90	3.70	0.15	3.50	0.46	0.42	15.13	
38	0.13	0.78	0.02	0.51	0.36	0.31	0.61	3.90	3.90	0.10	2.55	0.36	0.62	11.43	
39	0.80	0.65	0.39	1.15	1.29	0.18	1.05	24.00	3.25	1.95	5.75	1.29	0.36	36.60	

表 5 底泥重金属元素间的相关关系

Table 5 Pearson's correlations matrix for heavy metal concentrations in sediments

重金属 Heavy metal	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn
Ni	0.289				
Pb	0.062	0.115			
Cu	0.342	0.544**	0.612**		
Zn	0.717**	0.423*	0.609**	0.646**	
Cr	0.020	0.869**	0.160	0.460**	0.323

注: \*\* 表示极显著相关; \* 表示显著相关( $n=39$ )Note: \*\* indicates highly significant correlation; \* indicates significant correlation( $n=39$ )

表 6 底泥重金属的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of heavy metal concentrations in sediments

元素 Heavy metal	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
Cd	0.287 57	0.458 47	0.630 49
Ni	0.418 38	-0.463 41	0.252 48
Pb	0.327 77	0.254 22	-0.717 78
Cu	0.524 49	0.004 00	-0.146 45
Zn	0.474 48	0.405 53	0.043 99
Cr	0.366 89	-0.588 19	0.011 62
本征值 Eigenvalue	3.224 87	1.520 52	0.985 23
贡献率 Contribution rate//%	53.75	25.34	16.42
累积贡献率 Cumulative contribution rate//%	53.75	79.09	95.51

### 3 结论

(1) 通过调查取样及监测分析表明: 临安 18 个镇(街道)所采底泥中重金属元素的污染程度从大到小依次为 Cd、Zn、Cu、Ni、Cr、Pb, 且 Cd 与 Zn 呈极显著正相关, Ni 与 Cu、Cr 呈极显著正相关, 与 Zn 呈显著正相关; Pb 与 Cu 呈极显著正

相关, 与 Zn 呈显著正相关; Cu 与 Cr、Ni 呈显著正相关性。说明 Pb、Zn、Cd 可能有相同来源, Cr 与 Cu、Ni 可能具有相同的来源。

(2) 采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对临安市底泥重金属分析评价可知, 临安市个别地区出现不同程度的重金属污染, 以清凉峰镇同山塘的 Cd 污染最为严重, 该地区多种金属潜在生态危害程度为中等, 主要是由 Cd 含量过高引起。

(3) 利用相关性分析及主成分分析, 并结合历史用地情况分析太湖源镇、玲珑街道、板桥镇、青山湖街道均有相关涉及重金属污染的企业, 且企业涉重因子与该区域的重金属浓度偏高因子相一致, 初步分析该区域底泥重金属偏高主要与人为因素有关; 另外昌化地区、於潜片区底泥重金属明显偏高主要是自然地质条件占主要因素, 但清凉峰镇同山塘点位 Cd 重污染, 可能与该地区早期煤矿开发有关。

### 参考文献

- [1] 陈豪, 左其亭, 窦明, 等. 河流底泥重金属污染研究进展[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 71-75.
- [2] 孙花. 湘江长沙段土壤和底泥重金属污染及其生态风险评价[J]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- [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.
- [4] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 189-197.
- [5] 张伟, 陈蜀蓉, 侯平. 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[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 33-41.
- [6] 丘鸿荣, 罗建中, 郑国辉, 等. 西南涌流域底泥重金属污染特征及潜在生态危害评价[J]. 中国环境监测, 2012, 28(6): 32-36.
- [7] 唐文清, 曾荣英, 冯泳兰, 等. 湘江(衡阳段)底泥重金属污染特征及生态风险动态评价[J]. 衡阳师范学院学报, 2016, 36(3): 56-61.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1000.
- [9] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数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.
- [10] 倪英萍, 欧阳坤, 张之旭. 安捷伦 AA240Z 石墨炉原子吸收法测定大米中镉的应用[J]. 食品安全导刊, 2013(7): 27-28.