

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2014.02.013

滇池及其河口沉积物中重金属污染评价*

赵世民^{1,2} 王道玮¹ 李晓铭² 王江涛² 李世刚^{1,2} 黄 斌¹ 潘学军^{1**}

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明, 650500; 2. 昆明市环境监测中心, 昆明, 650228)

摘 要 本文对滇池及其入湖河口表层沉积物中 As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 和 Hg 等重金属含量进行了分析,并采用地质累积指数法和潜在生态风险指数法评价了其污染程度和生态危害.结果表明,滇池草海北部重金属含量最高,草海及其河口重金属污染强度明显高于外海及其河口;以“全国土壤环境质量标准”为依据,As 和 Cd 是沉积物中主要的超标污染物.地质累积指数法评价结果表明,草海及其河口沉积物中 Cd 达到了“严重”污染程度,是主要重金属污染物,其他金属总体处于“中度”以下污染程度;外海及其河口所有重金属基本处于“清洁”到“偏中度”污染程度.潜在生态风险评价结果表明,草海及其河口沉积物总体上达到了“很强”的潜在生态危害程度,而外海及其河口大部分区域总体属于“低度”危害程度. Cd 是最主要的潜在生态危害重金属污染物,其次是 Hg、As、Pb 和 Cu,而 Zn 和 Cr 对潜在生态危害指数的贡献率很小,在整个研究区域产生的潜在生态风险均为“轻微”.相关性和主成分分析结果表明,滇池表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 可能有相似的污染来源,而 Cr 主要受地球化学成分影响.

关键词 重金属, 滇池, 沉积物, 风险评价.

Assessment on heavy metals pollution in surface sediments of Dianchi Lake and its estuaries

ZHAO Shimin^{1,2} WANG Daowei¹ LI Xiaoming² WANG Jiangtao² LI Shigang^{1,2}
HUANG Bin¹ PAN Xuejun^{1**}

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China; 2. Kunming Environmental Monitoring Center, Kunming, 650228, China)

Abstract: In this paper, heavy metals such as As, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn and Hg in surface sediments from Dianchi Lake and its estuaries were analyzed. Index of geo-accumulation and potential ecological risk index were utilized to assess the pollution level and potential ecological risk of heavy metals. The results showed that the highest contents of heavy metals in surface sediments were found in the north of Caohai section of Dianchi Lake. The overall intensity of heavy metals pollution in Caohai section and its estuaries was higher than that in Waihai section and its estuaries. According to Environmental quality standard for soils, As and Cd were the main pollutants in sediments. The results of index of geo-accumulation assessment showed that Cd was the main pollutant with a pollution level of severe, while other heavy metals were less than the moderate pollution level in surface sediments of Caohai section and its estuaries. However, all heavy metals were from uncontaminated to partial moderate pollution levels in Waihai section and its estuaries. The results of potential ecological risk assessment showed that the overall very high potential ecological risk was found in Caohai section and its estuaries while low risk level in Waihai section and its estuaries. The primary heavy metal pollutant with the largest contribution for the ecological

2013 年 6 月 3 日收稿.

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07102-006);国家自然科学基金(No. 21267012)资助.

** 通讯联系人, Tel: 0871-65920510, E-mail: xjpan@kmust.edu.cn

risk indices (RI) was Cd, followed by Hg, As, Pb and Cu. While slight potential ecological risks were caused by Zn and Cr which had a low contribution for RI. The analysis of correlations and principal components showed that Cu, Pb, Zn, Cd, Hg and As in Dianchi Lake could have similar pollution sources, while the distribution of Cr in the lake may be mainly controlled by local geological chemical components.

Keywords: heavy metals, Dianchi Lake, sediment, risk assessment.

滇池是我国典型的浅水型高原湖泊,平均水深 5.3 m,水域面积 310 km². 作为昆明市备用饮用水源地,兼有工农业用水、防洪、水产养殖等综合功能,在滇中社会经济发展中具有重要作用. 上世纪 80 年代以来,滇池水生态环境逐渐遭到破坏,水体富营养化严重,已被国家列为重点治理的湖泊之一. 近十年来,通过雨污分流、环湖截污、河道整治以及污水处理厂的建成运行等措施,滇池外源污染治理已取得很大成效,但监测结果显示滇池水环境质量并无根本性改善,其原因主要是内源污染治理力度不够. 长期以来,滇池接纳周边大量污染物,这些污染物大部分以沉积物的形式存在于湖底,污染物在沉积相与水相之间保持一种吸附-溶出动态平衡,造成水体二次污染^[1-2]. 底泥疏浚、生态引水和水生植物修复是 3 种典型的内源污染治理措施,王莹等^[3]通过对这 3 种措施的分析研究,认为底泥疏浚能从根本上除去污染物,比较适合富营养化程度较高的老龄化湖泊的治理. 这种治理措施的效果在滇池^[4]、巢湖^[5]、太湖^[6]、洞庭湖^[7]等湖泊的污染治理中得到了验证.

重金属在环境中难降解、易富集、容易形成毒性更大的有机金属化合物,对环境健康危害较大,已成为环境中重点关注的污染物之一^[8-9]. 重金属在水相中的含量很低,但容易在沉积物中富集,沉积物中的含量往往比水相中高几个数量级^[10]. 沉积物被认为是水环境中重金属污染程度的“指示剂”,能较客观地反应水体重金属的污染状况^[11-14]. 近年来,李梁^[15]、焦伟^[16]、张海珍^[17]、卢少勇等^[18]对滇池沉积物重金属的污染特征和生态风险进行了比较系统的研究,但研究仅局限于滇池外海、湖滨或某些局部区域,没有阐明整个滇池的污染状况,没有将入湖河流与湖体的污染特征进行关联研究,很难说清滇池重金属的污染来源,对滇池重金属的污染防治指导性不强.

本文运用地质积累指数法 (Index of Geoaccumulation, Igeo)^[19] 和潜在生态风险指数法 (Potential Ecological Risk Index)^[20],对滇池及其主要河口表层沉积物中 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 等 7 种关注度较高的金属元素的污染特征进行研究和评价,旨在确定主要污染物和重点污染控制区,为滇池重金属的内源污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

滇池水域分为草海和外海两部分,其中,草海面积 11 km²,是昆明城区主要纳污水体;外海 290 km²,为滇池主体部分,两部分水体互不交流,各有一出口. 通过网格布点法在滇池湖体布设 23 个采样点(草海:S1—S3,外海:S4—S23),在滇池主要出入河流河口布设 18 个采样点(草海:R1—R5,外海:R6—R18). 于 2012 年 11 月,通过 GPS 定位,用抓斗式采样器采集表层沉积物样品,采样点位如图 1 所示. 样品采集后密封于双层聚乙烯塑料袋中带回实验室,室温风干至恒重,待测.

1.2 样品制备与分析

沉积样品除去石头、贝壳、植物等杂质后,研磨过 100 目尼龙筛,按四分法准确称取 0.4 g(精确到 0.0001 g),依次加入一定量的盐酸、硝酸、氢氟酸和高氯酸在电热板上进行消解,待消解完全后加超纯水定容,Hg 和 As 采用 AFS-830 双道原子荧光光度计进行检测,Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 采用 SOLAR969Z 石墨炉原子吸收光谱仪进行分析^[21-22].

1.3 数据处理

所有的样品分析均重复 3 次,另外按样品量 10% 的平行和加标进行分析,满足实验室分析质量控制的要求,检测结果取 3 次分析的平均值. 用 Excel 2010、Originpro 8.1 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.

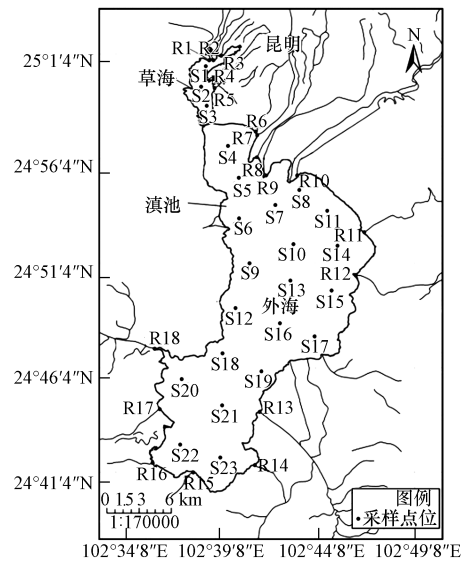


图 1 滇池表层沉积物采样示意图

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in Dianchi Lake

1.4 地质累积指数评价法

应用 Miiltten 提出的地质累积指数法^[19]对沉积物重金属的污染状况进行评价. 地质累积指数法计算公式: $I_{geo} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)]$, 式中: C_n 为沉积物中重金属 n 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K 为造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数(一般取 1.5); B_n 为普通页岩中重金属元素的地球化学背景值, 本文选取云南省土壤背景值作为重金属的 B_n (见表 1). 根据 I_{geo} 值划分 7 个污染等级: 当 $I_{geo} < 0, 0 \leq I_{geo} < 1, 1 \leq I_{geo} < 2, 2 \leq I_{geo} < 3, 3 \leq I_{geo} < 4, 4 \leq I_{geo} < 5, I_{geo} \geq 5$ 时, 污染等级分别为清洁、轻度、偏中度、中度、偏重度、重度、严重.

1.5 潜在生态危害指数法

采用 Hankanson 提出的潜在生态危害指数法^[20]对沉积物重金属潜在生态危害进行评价. 潜在生态危害指数计算公式为: $RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_s^i / C_n^i$, 式中: C_s^i 为第 i 种重金属浓度实测值; C_n^i 为第 i 种重金属的参比值, 本文引用全球工业化以前沉积物中重金属的最高背景值(见表 1); T_r^i 为第 i 种金属的毒性响应系数(见表 1); E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数, 当 $E_r^i < 40, 40 \leq E_r^i < 80, 80 \leq E_r^i < 160, 160 \leq E_r^i < 320, E_r^i \geq 320$ 时, 潜在生态风险分别为轻微、中等、强、很强、极强; RI 为多种重金属潜在生态危害指数, 当 $RI < 150, 150 \leq RI < 300, 300 \leq RI < 600, RI \geq 600$ 时, 潜在生态危害程度分别为低度、中等、强、严重.

表 1 金属背景值及毒性响应系数

Table 1	Metals background values and toxic response factors						
	As	Hg	Cr	Pb	Cd	Cu	Zn
云南省土壤背景值 ^[23] /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10.9	0.076	58.6	26.2	0.28	35.1	88.4
工业化前最高背景值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	15.0	0.2	60.0	25.0	0.5	30.0	80.0
毒性响应系数 T_r^i	10	40	2	5	30	5	1

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属的含量

滇池及其河口表层沉积物中各金属元素的平均含量如图 2 所示.

As 含量: 草海北部 S1 的含量最高, 达到 $262.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于其他区域; 草海和外海的平均含

量分别为 $146.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $48.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 草海河口和外海河口分别为 $57.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $21.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 很明显, 草海及其河口的含量总体上高于外海及其河口; 草海及其河口各点位 As 含量均超过土壤环境质量国家三级标准, 而外海 75% 的点位超过三级标准, 外海河口 R11(洛龙河)和 R18(海口河)超过三级标准, 其他点位达到二类标准; 除 R10 外, 其他点位均超过云南省土壤环境背景值。

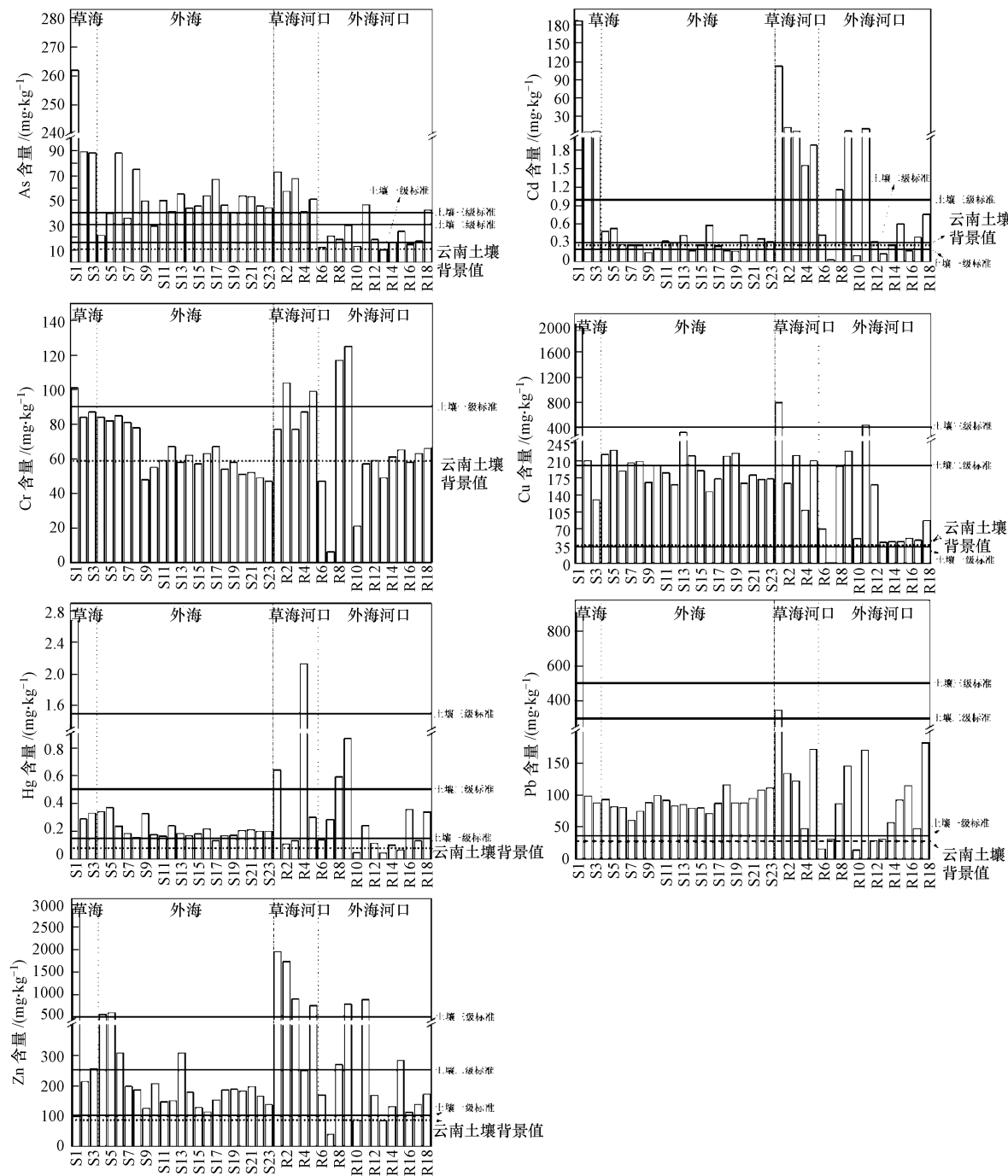


图2 滇池沉积物中各重金属元素含量分布图

Fig. 2 Distributions of metals in surface sediments from Dianchi Lake

Hg 含量: 草海和外海的平均含量分别为 $1.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 草海河口和外海河口分别为 $0.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S1 和 R4 的含量远高于其他区域, 分别达到 $2.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过三级标准; R1、R8、R9 达到三级标准; S2—S16、S18—S23、R5、R7、R11、R16 和 R18 达到二级标准; 其他点位达到一级标准; R10、R13 和 R15 低于云南省土壤环境背景值。

Cr 含量: 草海和外海的平均含量分别为 $91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 草海河口和外海河口分别为

$89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;除 S1、R2、R5、R8 和 R9 达到二级标准外,其他点位均达到一级标准;外海及其河口部分点位低于云南省土壤背景值。

Pb 含量:草海和外海的平均含量分别为 $363.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $88.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草海河口和外海河口分别为 $164.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $78.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;湖区 S1 的含量最高,达到 $904 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过三级标准;库区其他区域差别较小,在 $60.3\text{—}116.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均达到了二级标准;河口除 R6、R7、R10、R12 和 R13 达到一级标准外,其他河口均达到二级标准;金家河(R6)和宝象河(R10)河口 Pb 的含量低于云南省土壤背景值。

Cd 含量:全湖差异性较大,草海和外海的平均含量分别为 $64.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草海河口和外海河口分别为 $26.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;湖区 S1 的含量最高,达到 $186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是三级标准的 186 倍;草海及其河口所有点位的含量均超过三级标准;外海所有点位均未超过三级标准,外海流经城区的大清河(R8)、海河(R9)和洛龙河(R11)河口的含量较高,超过三级标准,其他河口达到了一级或二级标准。

Cu 含量:草海和外海的平均含量分别为 $796 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $197 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草海河口和外海河口分别为 $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $112 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;湖体中 S1 的含量最高,达到 $2050 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过三级标准,湖区其他区域差别较小,介于 $129\text{—}324 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,达到二级或三级标准;河口中 R1 和 R11 的含量较高,分别为 800 和 $437 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过三级标准,其他河口达到二级或三级标准。

Zn 含量:草海和外海的平均含量分别为 $1123 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $219 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草海河口和外海河口分别为 $1112 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $255 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;湖体中 S1 的含量最高,为 $2900 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是三级标准的 5.8 倍,其次是 S4 和 S5,分别为 $585 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $548 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过三级标准,库区其他点位达到二级或三级标准;入湖河口, R1 的含量最高($1950 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),是三级标准的 3.9 倍,其次是 R2、R3、R5、R9 和 R11,均超过三级标准,其他河口点位均低于三级标准限值,河口 R7、R10 和 R13 的含量低于云南省土壤背景值。

综上分析,草海北部 S1 重金属的含量最高,污染程度最高,草海及其河口的污染程度较为严重,而外海及其河口则相对较轻;与“全国土壤环境质量标准”比较,As 和 Cd 的污染程度最高,是主要的超标污染物,其次是 Hg、Pb、Cu 和 Zn,而 Cr 的污染程度最轻,大部分区域达到国家一级标准。

2.2 地质累积指数评价

滇池及其出入河口沉积物中重金属地质累积指数评价结果见表 2。

滇池草海沉积物中 As、Hg、Cr、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的 I_{geo} 值范围分别为 2.43—4.00、1.34—4.56、-0.07—0.20、1.16—4.52、3.34—9.15、1.29—5.28 和 0.68—4.45,7 种重金属 I_{geo} 平均值在 0.04—5.47 之间。Cr 的污染程度最轻,处于“清洁”污染等级,Cd 达到了“严重”污染程度,其他金属处于“中度”污染程度,总体污染程度顺序为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$ 。从点位看,S1 的污染最为严重,除 Cr 属于“轻度”污染外,其他金属均属于“重度”以上污染程度。这与 S1 所在草海北部区域邻近昆明主城区和昆明原来的马街工业区有关,2000 年以前其周边分布大量重污染工业企业,包括云南冶炼厂、昆明冶炼厂、团山钢铁厂、兵工厂、化工机械厂等,并且其汇入河流均途经昆明市主城区和工业区,大量未经处理的工业废水和生活污水流入该水域。近 10 年来随着该区域大批重污染企业的搬迁以及污水处理设施的不断完善,进入该区域的水质有所改善,并且草海底泥第一期疏浚工程也在很大程度上降低了该区域底泥中重金属的污染程度,但从评价结果来看,滇池北部局部区域沉积物中某些重金属的污染程度仍然较为严重。位于草海中部和南部的 S2 和 S3 的污染相对较轻,基本处于“轻度”到“偏重度”之间。

滇池外海沉积物中 As、Hg、Cr、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的 I_{geo} 值范围分别为 0.37—2.43、0.21—1.69、-0.90—-0.05、0.62—1.56、-1.09—0.83、1.47—2.62 和 -0.22—2.14,7 种重金属的 I_{geo} 平均值在 -0.51—1.88 之间。Cr 和 Cd 的 I_{geo} 均值均小于 0,处于“清洁”污染水平,其他金属则处于“轻度”到“偏中度”污染程度,金属的污染程度顺序为 $\text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cr}$ 。外海所有沉积物样品中,As 的污染程度处于“轻度”到“中度”之间,Hg 为“轻度”到“偏中度”,Cr 为“清洁”水平,Pb 为“轻度”到“偏中度”,Cd 为“清洁”到“轻度”,Cu 为“偏中度”到“中度”,Zn 为“清洁”到“中度”。对比分析可以看出,草海的污染程度远高于外海。

入草海河口沉积物中 As、Hg、Cr、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的 I_{geo} 值范围分别为 1.31—2.15、-0.08—4.22、

-0.19—0.24、0.26—3.14、2.24—8.42、1.04—3.93 和 0.9—3.88,7 种重金属的 Igeo 平均值范围为 0—4.43. Cr 为“清洁”程度,Cd 的污染程度最高,达到“重度”程度,其他金属处于“偏中度”到“中度”污染程度,总体污染程度顺序为 Cd > Zn > Cu > As > Pb > Hg > Cr. 运粮河的污染程度最高,其河口 R1 除金属 Cr 为“清洁”程度外,Cd 的 Igeo 值为 8.42,达到“严重”污染程度,其他金属在 2—4 之间,基本处于“中度”到“偏中度”之间;新河河口 R2 金属 Cd 达到“严重”程度,Zn 处于“偏重度”水平;大观河河口 R3 除金属 Hg 和 Cr 污染处于“轻度”以下程度外,其他金属基本处于“偏中度”至“偏重度”之间;西坝河河口 R4 金属 Hg 的污染最重,达到“重度”污染程度;船房河河口 R5 除 Cr 属“轻度”污染外,其他金属基本处于“中度”以下污染水平.

表 2 滇池沉积物中重金属地质累积指数

Table 2 Geoaccumulation index of heavy metals in surface sediments from Dianchi Lake

点位		Igeo						
		As	Hg	Cr	Pb	Cd	Cu	Zn
草海	S1	4.00	4.56	0.20	4.52	9.15	5.28	4.45
	S2	2.45	1.34	-0.07	1.33	3.34	1.99	0.68
	S3	2.43	1.53	-0.01	1.16	3.92	1.29	0.95
外海	S4	0.37	1.57	-0.07	1.24	0.54	2.08	2.05
	S5	1.26	1.69	-0.10	1.05	0.71	2.13	2.14
	S6	2.43	1.05	-0.05	1.04	-0.29	1.84	1.22
	S7	1.10	0.68	-0.12	0.62	-0.34	1.96	0.57
	S8	2.19	0.44	-0.17	0.93	-0.35	1.98	0.49
	S9	1.59	1.51	-0.87	1.16	-1.09	1.65	-0.07
	S10	0.82	0.63	-0.68	1.33	-0.63	1.92	0.64
	S11	1.60	0.52	-0.58	1.22	-0.02	1.81	0.15
	S12	1.31	1.07	-0.39	1.08	-0.19	1.60	0.18
	S13	1.75	0.70	-0.60	1.12	0.31	2.62	1.22
	S14	1.41	0.55	-0.50	1.01	-0.89	2.06	0.42
	S15	1.46	0.67	-0.62	1.02	-0.36	1.84	-0.05
	S16	1.71	0.92	-0.48	0.86	0.83	1.47	-0.22
	S17	2.03	0.21	-0.39	1.15	-0.41	1.71	0.21
	S18	1.49	0.56	-0.70	1.56	-0.89	2.05	0.49
	S19	1.28	0.58	-0.60	1.16	-0.93	2.09	0.50
	S20	1.71	0.84	-0.79	1.16	0.36	1.63	0.46
	S21	1.69	0.89	-0.76	1.27	-0.74	1.77	0.56
	S22	1.47	0.80	-0.84	1.46	0.13	1.70	0.32
	S23	1.41	0.82	-0.90	1.50	-0.08	1.71	0.06
草海河口	R1	2.15	2.48	-0.19	3.14	8.42	3.93	3.88
	R2	1.80	-0.08	0.24	1.77	5.06	1.63	3.71
	R3	2.04	0.23	-0.19	1.63	3.93	2.06	2.75
	R4	1.31	4.22	-0.01	0.26	2.24	1.04	0.90
	R5	1.63	1.39	0.16	2.13	2.52	1.99	2.49
外海河口	R6	-0.43	0.29	-0.91	-1.34	0.36	0.40	0.35
	R7	0.33	1.32	-3.80	-0.35	-3.27	-5.26	-1.71
	R8	0.14	2.37	0.41	1.14	1.83	1.90	1.03
	R9	0.85	2.92	0.51	1.89	3.99	2.12	2.55
	R10	-0.34	-1.25	-2.05	-1.54	-1.65	-0.08	-0.61
	R11	1.50	1.08	-0.63	2.12	4.77	3.05	2.72
	R12	0.12	-0.03	-0.58	-0.49	-0.08	1.60	0.34
	R13	-0.69	-1.41	-0.85	-0.35	-1.34	-0.31	-0.62
	R14	-0.09	-0.17	-0.54	0.52	-0.36	-0.25	-0.02
	R15	0.58	-0.79	-0.43	1.23	0.89	-0.26	1.10
	R16	-0.18	1.64	-0.59	1.55	-0.89	-0.06	-0.23
	R17	0.03	0.21	-0.49	0.27	0.24	-0.17	0.07
	R18	1.35	1.56	-0.40	2.21	1.21	0.72	0.38

外海主要河口沉积物中 As、Hg、Cr、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的 Igeo 值范围分别为 -0.69—1.50、-1.41—2.92、-3.80—0.51、-1.54—2.21、-3.27—4.77、-5.26—3.05 和 -1.71—2.72,7 种重金属的 Igeo

平均值范围为-0.8—0.6,所有金属处于“清洁”或“轻度”污染程度.外海出入河流中,污染程度相对较高的有洛龙河,其河口 R11 中 Cd 的 Igeo 值为 4.77,达到“重度”污染程度,Pb、Cu 和 Zn 的 Igeo 值均大于 2,处于“中度”以上污染程度,这可能与洛龙河穿过呈贡城区,长期接纳城区及其周边企业排入的重金属废水有关;其次是海河,其河口 R9 中 Cd 的污染水平接近“重度”;大清河 R8 Hg 的污染程度为“中度”水平;海口河 R18 的污染水平基本处于“中度”以下;其他河流的污染程度均较轻.

综上分析,滇池沉积物中重金属的污染水平与其流入河流重金属的污染程度息息相关,河流是滇池重金属的主要输入方式;同时,重金属的污染程度与周边的污染源有关,草海周边大量的工业企业是造成其底泥重金属浓度相对较高的主要原因.因此,要从根本上遏制重金属对环境的污染,搬迁或关闭污染较重的企业,切断相关的污染源是最可行的办法.

2.3 潜在生态风险评价

滇池及其河口沉积物重金属潜在生态风险评价结果如表 3 所示.

表 3 滇池沉积物重金属潜在生态风险评价
Table 3 Potential ecological risk evaluation on heavy metals in surface sediments from Dianchi Lake

点位		E_r^i							RI
		As	Hg	Cr	Pb	Cd	Cu	Zn	
草海	S1	174.7	428.8	3.4	180.8	11160.0	341.7	36.3	12325.6
	S2	59.4	46.1	2.8	19.7	199.2	34.8	2.7	364.7
	S3	58.7	52.8	2.9	17.6	297.6	21.5	3.2	454.3
外海	S4	14.1	54.2	2.8	18.6	28.6	37.0	6.9	162.2
	S5	26.1	59.0	2.7	16.2	32.0	38.3	7.3	181.8
	S6	58.7	37.8	2.8	16.1	16.0	31.3	3.9	166.6
	S7	23.4	29.3	2.7	12.1	15.5	34.2	2.5	119.6
	S8	49.9	24.8	2.6	14.9	15.4	34.7	2.3	144.6
	S9	32.7	52.0	1.6	17.6	9.2	27.5	1.6	142.3
	S10	19.3	28.2	1.8	19.8	12.7	33.2	2.6	117.5
	S11	33.1	26.2	2.0	18.4	19.3	30.7	1.8	131.5
	S12	27.0	38.2	2.2	16.6	17.2	26.7	1.9	129.9
	S13	36.6	29.6	1.9	17.1	24.3	54.0	3.9	167.3
	S14	28.9	26.7	2.1	15.8	10.6	36.5	2.2	122.9
	S15	30.1	29.0	1.9	16.0	15.3	31.5	1.6	125.3
	S16	35.6	34.4	2.1	14.2	34.8	24.3	1.4	146.9
	S17	44.5	21.1	2.2	17.4	14.8	28.7	1.9	130.6
	S18	30.6	26.9	1.8	23.2	10.6	36.3	2.3	131.8
	S19	26.5	27.2	1.9	17.6	10.3	37.3	2.4	123.3
	S20	35.6	32.6	1.7	17.5	25.1	27.2	2.3	142.0
	S21	35.2	33.8	1.7	19.0	11.8	30.0	2.5	133.9
	S22	30.1	31.8	1.6	21.6	21.5	28.5	2.1	137.3
	S23	29.0	32.2	1.6	22.2	18.6	28.7	1.7	133.9
草海河口	R1	48.5	102.1	2.6	69.4	6720.0	133.3	24.4	7100.2
	R2	38.1	17.3	3.5	26.8	654.0	27.2	21.6	788.4
	R3	44.8	21.4	2.6	24.4	298.8	36.7	11.1	439.8
	R4	27.0	340.8	2.9	9.4	93.0	18.0	3.1	494.2
	R5	33.7	47.8	3.3	34.4	112.2	34.8	9.3	275.5
外海河口	R6	8.1	22.2	1.6	3.1	25.2	11.6	2.1	73.9
	R7	13.7	45.4	0.2	6.2	2.0	0.2	0.5	68.3
	R8	12.0	94.6	3.9	17.3	69.6	32.8	3.4	233.5
	R9	19.7	138.2	4.2	29.2	312.6	38.2	9.7	551.7
	R10	8.6	7.7	0.7	2.7	6.2	8.3	1.1	35.3
	R11	30.8	38.6	1.9	34.2	534.6	72.8	11.0	723.8
	R12	11.9	17.9	2.0	5.6	18.6	26.7	2.1	84.7
	R13	6.7	6.9	1.6	6.2	7.7	7.1	1.1	37.3
	R14	10.3	16.2	2.0	11.3	15.3	7.4	1.6	64.0
	R15	16.3	10.6	2.2	18.4	36.2	7.4	3.6	94.6
	R16	9.6	57.0	1.9	23.0	10.6	8.4	1.4	111.9
	R17	11.1	21.1	2.1	9.5	23.1	7.8	1.7	76.5
	R18	27.9	53.9	2.2	36.4	45.5	14.4	2.2	182.5

潜在生态危害指数结果显示,所有点位中,S1、R1 和 R2 沉积物中重金属的 RI 值分别为 12325.6、7100.2 和 788.4,是生态危害“严重”标准的 20.5 倍、11.8 倍和 1.3 倍,达到了“严重”潜在生态危害程度;草海中部和南部的 S2 和 S3,以及入草海河流河口 R3 和 R4 的 RI 值介于 300—600 之间,达到“强度”潜在生态危害程度;外海除北部的 S4、S5、S6 和中部的 S13 为“中等”潜在生态危害程度外,大部分区域处于“低度”潜在生态危害程度;入滇池外海的河流中,洛龙河河口 R11 的潜在生态危害程度达到了“严重”程度,海河(R9)为“强度”潜在生态危害程度,大清河(R8)和海口河(R18)为“中等”潜在生态危害程度,其他河口均为“低度”潜在生态危害。草海及其河口沉积物基本处于“强度”以上潜在生态危害程度,危害程度远高于外海及其河口;外海除北部区域为“中等”潜在生态危害程度外,大部分区域的潜在危害程度属于“低度”;外海河口除洛龙河和海河外,其他河口均处于“低度”潜在生态危害程度。

潜在生态危害系数结果显示,As 在 S1 产生“很强”的潜在生态风险,在其他区域为“中等”或“轻微”;Cr 和 Zn 在所有区域的潜在生态风险均为“轻微”;Pb 在 S1 和 R1 上的潜在风险分别为“很强”和“中等”,在其他区域均为“轻微”;Cd 在 S1、R1、R2 和 R11 产生“极强”的潜在生态风险,在草海其他区域基本为“很强”,在外海及其主要河口为“轻微”或“中等”;Cu 在 S1 产生“极强”的潜在生态风险,而在其他大部分区域为“轻微”;Hg 在 S1 和 R4 上产生“极强”的潜在生态风险,而在其他大部分区域为“轻微”或“中等”。

图 3 列出了各金属元素对沉积物潜在生态危害的贡献率。在草海及草海河口区域,Cd 对潜在生态危害指数的贡献率超过 86%,是该区域沉积物中产生潜在生态危害最大的金属元素,而其他金属的贡献率则很小。在外海河口区域,Cd 和 Hg 的贡献率分别为 47.4% 和 22.7%,是主要的潜在生态危害金属元素;其次是 Cu、Pb 和 As,贡献率分别为 10.4%、8.7% 和 8.0%;Zn 和 Cr 的贡献率则很小,产生的潜在生态风险低。在外海区域,除 Zn 和 Cr 的贡献率很小外,其余 5 种金属产生的潜在生态风险比较接近,对潜在生态危害指数的贡献率均超过 12%。由此可见,Cd 是滇池及其河口沉积物中最主要的潜在生态危害重金属污染物,其次是 Hg,而 Zn 和 Cr 对潜在生态危害指数的贡献率很小,产生的潜在生态风险较小。

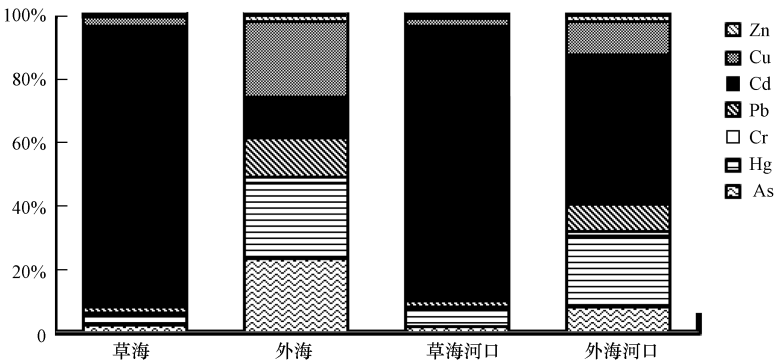


图 3 重金属元素对潜在生态危害指数的贡献率

Fig.3 Contribution rates of heavy metals to the potential ecological risk indices (RI)

2.4 重金属元素的相关性和主成分分析

据刘文新等^[24]报道,如果同一水域沉积物中元素之间存在良好的相关性,表明这些元素之间可能有相同的来源,若无相关性则来源不同. 7 种金属元素的相关性分析结果表明(表 4),Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 等 6 种金属元素之间在 $P < 0.01$ 水平下呈极显著正相关,表明滇池水系沉积物中这 6 种金属元素可能具有相似的污染来源. 而 Cr 与其他金属元素之间没有显著的相关性,前面的分析表明,Cr 的含量分布均匀且污染程度轻,说明滇池沉积物中 Cr 的含量受当地的土壤背景影响较大,外在污染来源相对较少。

为进一步揭示各重金属元素之间的相互关系及来源,对 7 种重金属元素进行了主成分分析. 图 4 分析结果表明,前两个主成分累计方差贡献率为 87.3%,其中第一个主成分(PC1)累计方差贡献率为 71.5%,第二个主成分(PC2)累计方差贡献率为 15.7%。Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 在 PC1 上具有较高的

载荷,其载荷因子分别为 0.978、0.976、0.887、0.955、0.785 和 0.906,表明第一主成分反映了 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的富集程度;Cr 在 PC2 上表现出较高的正载荷,表明 Cr 主要受第二主成分的影响.

表 4 滇池沉积物中重金属元素的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of heavy metals in surface sediments from Dianchi Lake

	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
Cu	1.000						
Pb	0.965 *	1.000					
Zn	0.840 *	0.855 *	1.000				
Cd	0.948 *	0.941 *	0.867 *	1.000			
Hg	0.716 *	0.718 *	0.594 *	0.698 *	1.000		
As	0.883 *	0.875 *	0.720 *	0.807 *	0.649 *	1.000	
Cr	0.203	0.155	0.094	0.031	0.117	0.309	1.000

* $P < 0.01$ 时显著相关.

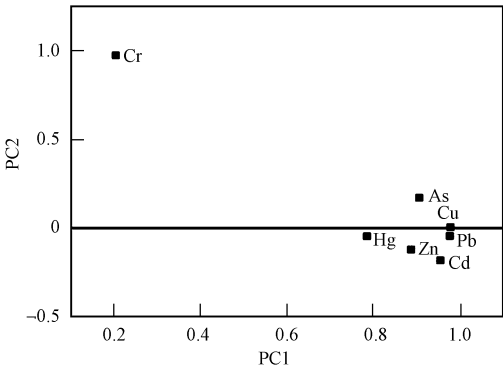


图 4 滇池沉积物中重金属主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis for heavy metals in surface sediments from Dianchi Lake

以上分析结果表明,滇池表层沉积物中的 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 可能有相同的污染来源,如冶炼、石化、化肥农药等;而 Cr 主要受地球化学成分影响. 这与相关性分析结果基本一致.

3 结论

滇池及其河口表层沉积物中重金属的污染分布具有较明显的区域特征,草海北部的含量最高,污染程度最严重;草海及其河口的污染程度高于外海及其河口.

地质累积指数评价结果表明:所有重金属元素中,Cd 的污染程度最高,达到“严重”程度,Cr 的污染程度最轻,为“清洁”污染水平,其他重金属总体处于“偏中度”到“中度”污染程度;外海及其河口沉积物基本处于“清洁”到“偏中度”污染程度;而草海北部及其河口总体处于“重度”以上污染程度.

潜在生态风险评价结果表明:草海及其河口沉积物总体处于“强度”以上潜在生态危害程度,外海除北部区域、洛龙河和海河河口为“中等”潜在生态危害程度外,其他大部分区域基本属于“低度”生态危害级别;Cd 是最主要的潜在生态危害重金属污染物,其次是 Hg、As、Pb 和 Cu,而 Zn 和 Cr 产生的潜在生态风险为“轻微”.

两种评价方法得出相似的评价结论:草海及其河口和外海北部区域沉积物中重金属污染程度相对较高,是滇池重点污染控制区;而 Cd 产生的生态危害最大,是最主要的重金属污染物. 因此,在滇池制定底泥疏浚治理决策时,应将草海及其河口和外海北部区域列为重点疏浚区;对疏挖出来的底泥要采取合理的运输、堆放和处置措施,防止其中生态危害严重的重金属污染物对环境产生二次污染.

参 考 文 献

[1] 黄延林. 水体沉积物中重金属释放动力学及试验研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(4): 440-446

[2] 郑志侠, 潘成荣, 丁凡, 等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 161-165

[3] 王莹, 王道玮, 李辉, 等. 内陆湖泊富营养化内源污染治理工程对比研究[J]. 地球与环境, 2013, 41(1): 20-28

[4] 云南省工程咨询公司, 中国环境科学研究院. 草海污染底泥疏浚一期工程后评估报告[R]. 昆明, 2000, 9

[5] 安徽省环境科学研究院, 巢湖污染底泥疏浚及处置二期环评报告书[R]. 巢湖, 2004, 11

[6] 张景钰, 方江华. 关于太湖污染底泥生态疏浚工程的探讨[J]. 西部探矿工程, 2005, 17 (2): 213-215

[7] 李正最, 宁迈进, 李广源, 等. 洞庭湖环保疏浚生态系统恢复效益研究[J]. 水资源研究, 2004, 25 (1): 28-32

[8] Armitage P D, Bowes M J, Vincent H M. Long-term changes in macro-invertebrate communities of a heavy metal polluted stream: The River Nent (Cumbria, UK) after 28 years[J]. River Research and Applications, 2007, 23(9): 997-1015

[9] 王永华, 李晓光, 金相灿. 沉积物重金属污染评价——以巢湖龟山区为例[J]. 中国环境监测, 2007, 23(6): 52-56

[10] 向勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 700-705

[11] Tylmann W. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake PustýStaw, Northern Poland)[J]. Journal of Paleolimnology, 2005, 33(3): 313-325

[12] 胡春华, 李鸣, 夏颖. 鄱阳湖表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2011, 35 (4): 427-430

[13] 邱敏娟, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州湾洛阳江河口潮滩表层沉积物中重金属赋存形态分析[J]. 环境化学, 2013, 32(2): 212-218

[14] 张霖琳, 梁宵, 魏复盛. 汀江某河段底泥中重金属含量的测定及生态风险评价[J]. 环境化学, 2012, 31(7): 945-951

[15] 李梁, 胡小贞, 刘娉婷, 等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30: 46-51

[16] 焦伟, 卢少勇, 李光德, 等. 滇池内湖滨带重金属污染及其生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 740-745

[17] 张海珍. 应用地积累指数评价滇池沉积物中重金属污染[J]. 安徽农业科学, 2012, 40 (11): 6735-6737, 6813

[18] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30 (4): 487-492

[19] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118

[20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001

[21] 阳鸿斌. 优化的原子荧光法测定砷汞含量[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2011, 2(3): 232-234

[22] 陈江, 姚玉鑫, 费勇, 等. 微波消解等离子体发射光谱和石墨炉原子吸收光谱法联合测定土壤中多元素[J]. 岩矿测试, 2009, 28 (1): 25-28

[23] 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-485

[24] 刘文新, 李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 305-309