

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.004

阳宗海表层沉积物中的重金属生态风险评估

张玉玺,孙继朝,向小平,黄冠星,刘景涛,陈 玺,王金翠

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 正定 050803)

摘要:对从阳宗海湖底表层采集的 25 组沉积物样品中的 10 种重金属质量比进行分析,结果表明,Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb 和 As 的质量比平均值均超过了当地土壤背景值。而重金属系统聚类分析表明,Zn、Cr、Pb、As 高度相关,其污染主要由于人类活动造成;Ti、Mn、V、Cu、Ni、Co 的分布特征相似,其污染原因以岩石风化等自然因素为主。单因子富集系数评价表明,阳宗海 10 种重金属均达到了中度富集程度,其中 As、Cu、Cr 富集程度较为突出。用 Hakanson 潜在生态风险指数法评价阳宗海表层沉积物中重金属的生态风险,结果表明,阳宗海表层沉积物中重金属的生态风险总体属轻微程度,阳宗海南岸局部区域达到中等生态风险程度。几种重金属对阳宗海生态风险的贡献由大到小依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti,其中,As 是阳宗海最突出的生态风险因子。

关键词:沉积物;重金属;生态风险评估;阳宗海

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2012)05-0019-06

Evaluation of ecological risk of heavy metals in surface sediments from Yangzonghai Lake

ZHANG Yu-xi, SUN Ji-chao, XIANG Xiao-ping, HUANG Guan-xing,
LIU Jing-tao, CHEN Xi, WANG Jin-cui

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences,
Zhengding 050803, China)

Abstract: The concentrations of ten heavy metals in 25 groups of surface sediment samples from Yangzonghai Lake were analyzed. The results show that the mean concentrations of Ti, Mn, Zn, V, Cr, Cu, Ni, Co, Pb, and As were higher than their natural background values. Cluster analysis indicated that Zn, Cr, Pb, and As were highly correlated whith one another and mainly came from human activities, and Ti, Mn, V, Cu, Ni, and Co were also well correlated and mainly came from the natural lenvironment. The evaluation of the single-factor pollution index indicated that the ten heavy metals were enriched to a certain degree, all reaching the level of medium pollution. The enrichment of As, Cu, and Cr was more prominent than that of the other heavy metals. The Hakanson potential ecological index was used to evaluate the ecological risk of heavy metals in surface sediments of Yangzonghai Lake. The results indicate a slight ecological risk of heavy metals in surface sediments of the lake as a whole, and a medium-level ecological risk of heavy metals in some southern parts of the lake. The heavy metals in surface sediments of Yangzonghai Lake can be grouped in to the descending order according to their contribution to ecological risk: As, Cu, Co, Ni, Pb, Cr, V, Zn, Mn, and Ti. Of them, As was the most prominent factor of ecological risk in surface sediments of Yangzonghai Lake.

Key words: sediment; heavy metal; ecological risk evalution; Yangzonghai Lake

基金项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费资助项目(SK200903)
作者简介:张玉玺(1982—),男,助理研究员,主要从事地下水环境研究。E-mail:kobzhang@qq.com
通讯作者:孙继朝,研究员。E-mail:gwsun@263.net

近年来,受工农业快速发展的影响,地表水重金属污染事件频频发生,尤其湖泊水更新速率滞缓,湖泊污染状况日趋严重,直接危及湖泊生态及周边区域的饮水安全。湖泊污染已成为政府及民众普遍关注的大问题。在众多污染物中,重金属因其难降解性、普遍的生物毒性、生物累积性和生物放大作用而一直备受关注^[1]。进入湖中的重金属,大部分会被水中悬浮颗粒吸附并通过沉淀作用转移到沉积物中,因而湖底沉积物也被称为水体重金属的“贮藏库”^[2]。当水体环境发生改变,或在水生生物等的作用下,沉积物中的重金属会重新释放到水体中,形成二次污染,导致潜在的生态风险^[3]。因此,沉积物中重金属的质量比常被用作判别水环境质量的重要参考指标^[4]。

阳宗海是云南省九大高原湖泊之一,位于昆明市的东南角。湖面呈纺锤形,东西宽 2.5 km,南北长 12.7 km,湖岸线长 32.3 km,湖面面积 31.9 km²(水位 1 770 m 时),流域面积 192 km²。阳宗海平均水深 20 m,最深 29.7 m,蓄水量 6.04 亿 m³,换水周期为 13 a,其补给水源主要来自天然降雨、阳宗大河和七星河水、摆依河人工补水及地下水。汤池河是阳宗海唯一的出水口,河水最终汇入南盘江。近 20 a 来,阳宗海沿湖兴建了许多工矿企业及旅游度假村,主要有北岸的火电厂、煤矿、温泉,三十亩南的铝厂,宝尖山南的高尔夫球场及南岸谈葛营附近的磷肥厂等。随着工、矿、旅游业的发展,进入阳宗海的重金属不断增加,并聚集在阳宗海的沉积物中。2008 年的阳宗海砷污染事件更是恶化了阳宗海湖泊环境,加剧了阳宗海沉积物的生态风险。通过对阳宗海表层沉积物样品的系统采集与分析,查明了重金属 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb、As 在阳宗海表层沉积物中的质量比与分布情况,评价这些重金属的潜在生态风险,可为阳宗海生态环境的恢复和治理提供决策依据。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

2009 年 4 月 2—4 日,借助 GPS 定位,利用抓斗式采泥器采集阳宗海表层 0~5 cm 沉积物样品 25 组(取样点位置见图 1)。混匀后置于聚乙烯塑料袋中,于实验室阴凉处自然风干,剔除动植物残体和石块,经粉碎机粉碎后,过 200 目筛,置 105℃ 烘箱烘 8 h,取出后放入干燥皿冷却。

1.2 样品分析

从干燥皿称取土样 4.0 g,放入模具内拨平,用低压聚乙烯镶边垫底,在 30 000 kg 压力下,压制成直径 32 mm,镶边外径 40 mm 的试样圆片,采用荷兰帕纳科公司 AXIOS PW4400 型 X 射线荧光光谱仪

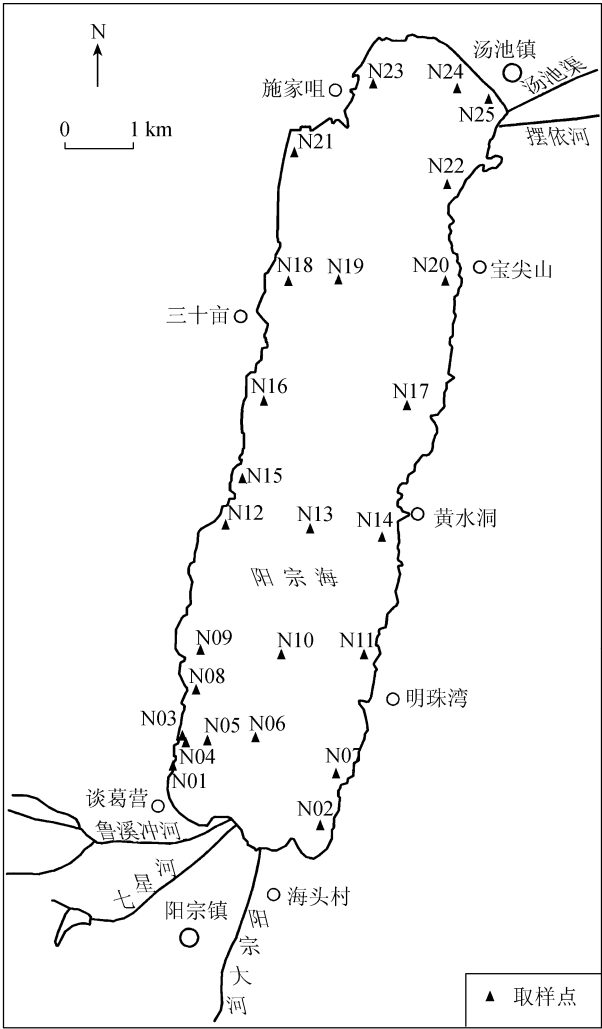


图 1 阳宗海沉积物取样点位置

测定各项指标。

1.3 数据处理与图形制作

数据处理及分析用 SPSS 18.0 软件完成,样点分布图及等值线图借助 MAPGIS 6.7 软件绘制,等值线采用克立格(Kriging)网格化法内插。

2 结果与讨论

2.1 重金属质量比

阳宗海表层沉积物中 10 种重金属质量比的统计结果和分布情况见表 1 和图 2。从表 1 可看出,各重金属平均质量比均高于云南省土壤环境背景值^[5],阳宗海存在不同程度的重金属富集,其中,As 的质量比平均值达到背景值的 2.9 倍,最高值更是达 10 倍以上。依据 GB 15618—1995《全国土壤环境质量标准》,Zn 和 As 分别有 1 个和 6 个样品的质量比超过 3 级标准,表明局部有较为严重的 Zn 和 As 污染,且 As 的污染程度最重。重金属的变异系数表明,Mn、V、Cr、Ni、Co 和 Pb 在沉积物中的区域分布较均匀,Ti、Zn、Cu 在不同区域的分布存在轻微的差异,As 的变异系数最高,呈显著的区域分布差

表 1 阳宗海表层沉积物中重金属质量比统计结果

重金属	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	背景值/ (mg · kg ⁻¹)	变异 系数/%	达到一级 标准 ^① 的 样品/个	达到二级 标准的 样品/个	达到三级 标准的 样品/个	超过三级 标准的 样品/个	最大值 取样点	最小值 取样点
Ti	4460.3	30798.6	9413.1	7100	52.7	—	—	—	—	N14	N01
Mn	344.8	1077.4	617.9	461.0	28.2	—	—	—	—	N14	N09
Zn	83.8	511.9	149.2	80.5	59.1	5	19	0	1	N01	N09
V	95.1	341.5	189.6	126.7	24.3	—	—	—	—	N14	N01
Cr	87.7	253.1	145.8	57.6	26.3	1	24	0	0	N03	N09
Cu	48.3	270.3	97.6	33.6	49.9	0	15	10	0	N14	N09
Ni	35.9	78.4	55.1	33.4	19.1	3	2	20	0	N14	N01
Co	18.0	57.2	27.4	13.9	26.4	—	—	—	—	N14	N09
Pb	21.2	69.1	40.3	36.0	26.4	8	17	0	0	N01	N14
As	11.8	113.2	31.4	10.8	76.8	2	10	7	6	N03	N14

注：① 标准指 GB15618—1995《全国土壤环境质量标准》；“—”表示土壤环境质量标准中无此项。

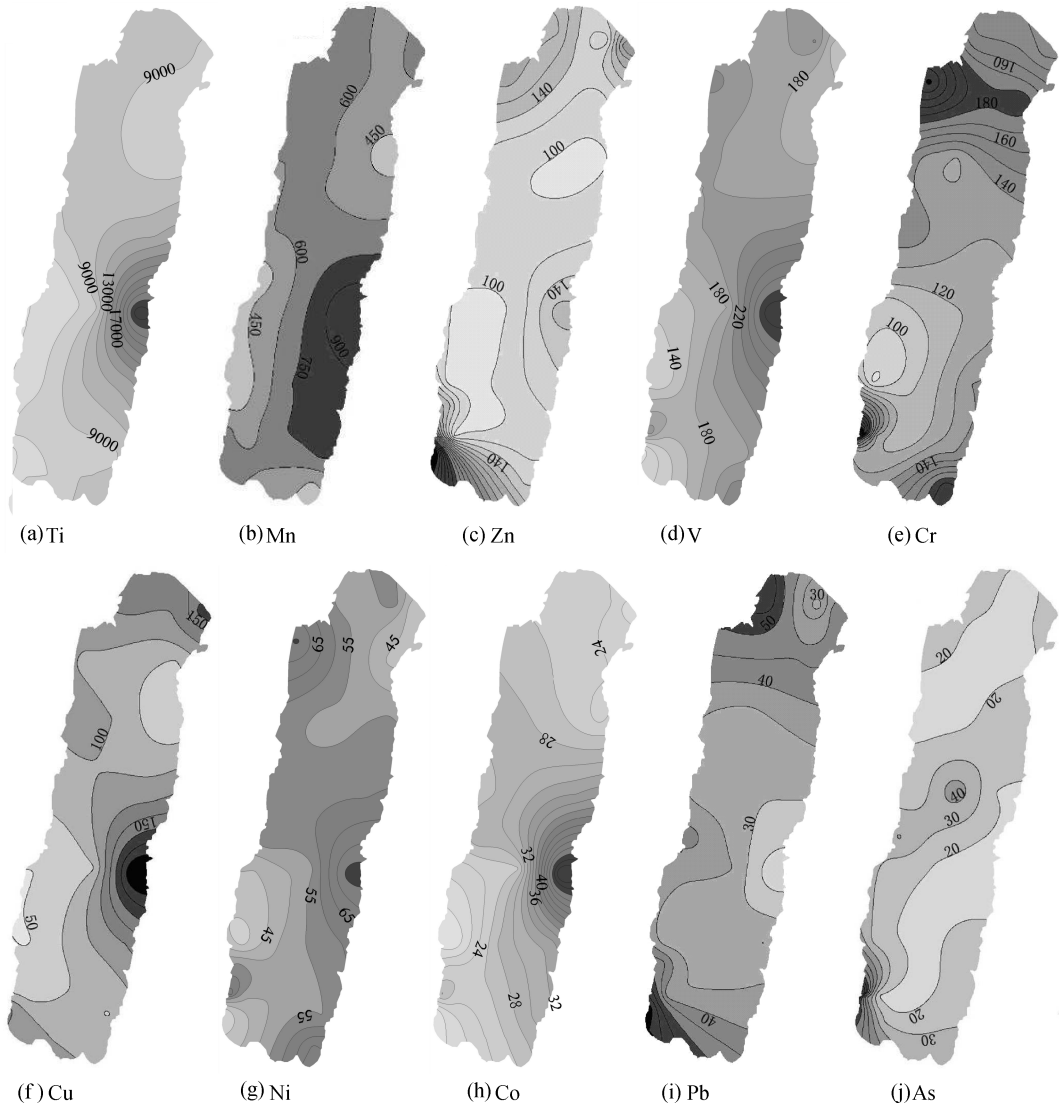


图 2 阳宗海表层沉积物中重金属质量比分布(单位:mg · kg⁻¹)

异,指示可能受到人类活动的影响。另外,本研究还对沉积物中 Cd 的质量比进行了测试,结果均小于方法检出限(0.5 mg/kg),因此未对 Cd 进行评价。

根据焦伟等^[6]的研究成果,与相邻的滇池相比,除 As、Cr 高于滇池,Ni 与滇池相当外,阳宗海表层沉积物中其他重金属质量比均明显低于滇池。但

与同是云南九大高原湖泊之一的异龙湖相比,阳宗海表层沉积物中除了 Pb 的质量比略低外^[7],其他 As、Cu、Cr、Ni、Zn 等重金属的质量比均高于异龙湖。

2.2 重金属分布与来源

阳宗海表层沉积物中重金属的水平分布特征大致分为两种类型。Zn、Cr、Pb、As 的分布特征相似,

在阳宗海南北两岸的质量比相对较高,而在阳宗海中间地带的质量比较低,质量比最高值位于阳宗海南岸的谈葛营附近,次高值位于阳宗海北岸的施家咀附近。Ti、Mn、V、Cu、Ni 和 Co 的分布特征相似,其质量比高值点都位于阳宗海东岸黄水洞附近,而阳宗海南北两岸的重金属质量比相对较低(图 2)。上述沉积物中的重金属分布特征指示可能存在两种不同的主要污染来源。对各重金属进行聚类分析,聚类方法采用组间联结,度量标准选取 Pearson 相关性法。计算结果的树状图(图 3)表明,根据分布特征,可将重金属分为两大类,Zn、Cr、Pb、As 为一类,其中 Zn 和 Pb 具有非常好的相似性,它们均为典型的污染组分,主要受工、矿及旅游业排污等人类活动影响所致。Zn 主要来自含砷矿石的工业,如阳宗海南岸磷肥厂的主要原料为硫锌矿,附近沉积物中 Zn 的质量比普遍较高。Cr 主要来自含铬矿石的加工、金属表面处理等排放的污水。Pb 主要来自两岸企业的燃煤,如阳宗海北岸火电厂附近沉积物中 Pb 的质量比相对较高。As 主要来自含 As 矿石的利用。阳宗海地区的温泉水、褐煤、硫锌矿中都含有较高的砷,因此阳宗海北岸的温泉、火电厂、煤矿及南岸磷肥厂附近的沉积物中 As 的质量比相对较高。另外,这 4 种重金属的质量比高值点附近均表现出环绕湖岸线分布的态势,这是由于当含有较高质量比重金属的废水排入湖中后,被湖水冲淡而形成不同密度的水团,从而产生了沿岸流。这也间接指示了排污现象的存在。Ti、Mn、V、Cu、Ni 和 Co 可归为另一大类,其中 Ti、V、Co 具有非常好的相似性,且在较小的测度范围与 Ni 的相似性较好,在较大的测度上与 Mn、Cu 也有相似性。由于阳宗海地区没有涉及这 6 种重金属的企业,这 6 种重金属的分布特征与人类活动密集区没有关系,且质量比高值区均位于阳宗海未受开发的东岸黄水洞附近,指示这 6 种重金属主要来自岩石风化等自然因素,受人类活动影响甚微。

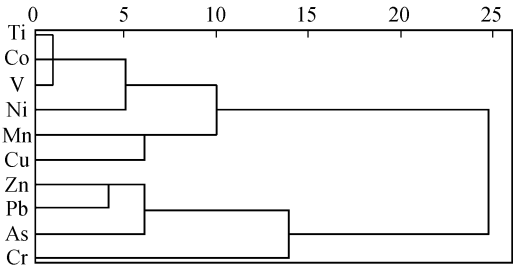


图 3 重金属系统聚类分析树状图

2.3 重金属生态风险评估

利用 Hakanson^[8]提出的潜在生态风险指数法对阳宗海表层沉积物的重金属生态风险进行评价。该方法是根据重金属性质及其环境行为特点,从沉

积学角度对沉积物中重金属污染进行评价。该方法将重金属质量比、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重金属污染评价,并对地区污染程度进行定量分析,分析其潜在生态风险程度,这种方法在研究沉积物生态效应中具有较明显的优势^[8-10]。重金属潜在生态风险指数计算公式为

$$R_i = \sum E_r^i \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i C_f^i \tag{2}$$

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \tag{3}$$

式中: R_i 为多种重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属*i*的潜在生态风险系数; C_f^i 为重金属*i*的富集系数; C_s^i 为重金属*i*的实测质量比; C_n^i 为沉积物背景参考值,本研究选取云南省土壤重金属背景值作为参考; T_r^i 为重金属*i*的毒性响应系数,反映重金属在水相、沉积固相和生物相之间的响应关系。本研究根据 Hakanson^[8]和徐争启等^[11]的研究成果,设定 10 种重金属的毒性响应系数分别为 $T_r^{Ti} = T_r^{Mn} = T_r^{Zn} = 1, T_r^V = T_r^{Cr} = 2, T_r^{Cu} = T_r^{Ni} = T_r^{Co} = T_r^{Pb} = 5, T_r^{As} = 10$ 。 C_f^i, E_r^i, R_i 与污染程度的分级标准见表 2。

表 2 评价指标与污染程度和潜在生态风险程度的关系

C_f^i	单因子富集程度	E_r^i	单因子潜在生态风险程度	R_i	潜在生态风险程度
<1	轻微	<40	轻微	<150	轻微
1~3	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	强	80~160	强	300~600	强
≥6	很强	160~320	很强	≥600	很强
		≥320	极强		

利用单因子富集系数(C_f^i)对各重金属的富集程度进行评价,结果见表 3。阳宗海表层沉积物中各重金属的富集系数均值都在 1~3 之间,属中等富集水平。各重金属富集系数均值由大到小依次为 As、Cu、Cr、Co、Zn、Ni、V、Mn、Ti、Pb,其中,As 在 4 个点、Cu 在 9 个点、Cr 在 5 个点上的富集系数均达到 3 以上,As、Cu、Cr 是阳宗海沉积物中富集程度最高

表 3 沉积物中重金属污染单因子评价结果统计

元素	C_f^i			样品数/个			
	最小值	最大值	平均值	$C_f^i \leq 1$	$1 < C_f^i \leq 3$	$3 < C_f^i \leq 6$	$C_f^i > 6$
Ti	0.63	4.34	1.33	6	18	1	0
Mn	0.75	2.34	1.34	6	19	0	0
Zn	1.04	6.36	1.85	0	24	0	1
V	0.75	2.70	1.50	2	23	0	0
Cr	1.52	4.39	2.53	0	20	5	0
Cu	1.44	8.04	2.91	0	15	9	1
Ni	1.07	2.35	1.65	0	25	0	0
Co	1.29	4.12	1.97	0	24	1	0
Pb	0.59	1.92	1.12	12	13	0	0
As	1.09	10.48	2.91	0	19	4	2

的 3 个元素。尤其 As 在 N03 取样点、Cu 在 N14 取样点的富集系数分别达到了 10.48 和 8.04,富集程度极强。Co、Ni、Zn、V 的富集程度次之,富集系数普遍在 1~3 之间。Mn、Ti、Pb 的富集系数普遍较低,部分点上的富集系数小于 1。

各重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(R_1)的计算结果见表 4 和图 4。As 产生的潜在生态风险程度较其他重金属明显偏高,在 N01、N03 取样点的潜在生态风险系数超过 80,达到强风险程度;在 N04、N08 取样点的潜在生态风险系数超过 40,属中等风险程度。Cu 在 N14 取样点产生的潜在生态风险系数也超过 40,属中等风险程度。除此之外,其他重金属在各取样点的潜在生态风险系数均小于 40,均值范围介于 1.33~29.08 之间,属轻微生态风险程度。Ti、Mn、Zn、V 这 4 种金属的潜在生态风险系数基本都在 5 个单位以下,危害程度甚微。重金属潜在生态风险系数平均值由大到小依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti,该顺序反映了各重金属对阳宗海潜在生态风险的贡献大小。

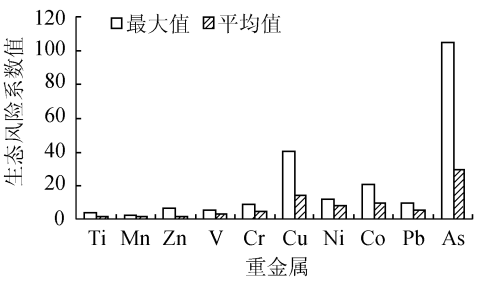


图 4 不同重金属潜在生态风险系数比较

图 5 反映了阳宗海重金属潜在生态风险指数的分布情况。全湖来看,重金属潜在生态风险指数一

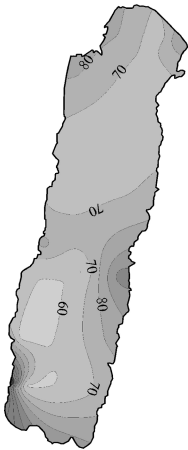


图 5 阳宗海表层沉积物中重金属潜在生态风险指数分布

表 4 阳宗海表层沉积物中重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数

取样点	E_r^i										R_1
	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Ni	Co	Pb	As	
N01	0.63	1.56	6.36	1.50	4.47	19.05	5.37	6.73	9.60	85.19	140.45
N02	1.41	0.88	1.79	3.56	6.86	14.33	10.67	9.86	6.08	33.80	89.24
N03	1.07	1.41	2.82	3.39	8.79	9.94	10.16	10.18	7.49	104.80	160.06
N04	0.96	1.36	2.80	2.75	6.01	11.73	8.28	9.60	7.35	48.24	99.07
N05	1.05	1.08	1.21	2.57	4.48	9.17	7.62	8.88	4.92	18.61	59.59
N06	1.21	1.58	1.29	2.74	3.83	10.98	7.56	9.17	4.93	16.20	59.50
N07	1.15	1.72	1.45	3.05	4.92	10.95	8.23	10.90	5.15	25.00	72.53
N08	0.98	0.86	2.14	2.70	5.33	8.24	8.49	8.71	6.49	48.43	92.35
N09	0.78	0.75	1.04	1.92	3.05	7.19	5.60	6.47	4.38	24.17	55.33
N10	1.49	1.59	1.34	3.12	3.91	13.44	7.96	10.36	4.31	16.76	64.27
N11	1.99	1.85	1.67	3.75	4.86	18.68	8.89	11.80	4.88	24.54	82.91
N12	0.75	0.98	1.09	2.39	3.60	7.56	6.81	8.53	5.08	24.91	61.70
N13	1.13	1.59	1.30	2.84	4.10	10.58	7.78	9.28	4.94	16.20	59.75
N14	4.34	2.34	2.13	5.39	4.23	40.22	11.74	20.58	2.94	10.93	104.83
N15	0.83	0.84	1.35	2.67	4.32	9.18	8.88	10.65	5.86	37.96	82.55
N16	1.28	1.32	1.33	3.14	5.14	13.53	8.44	9.93	4.44	18.52	67.08
N17	1.73	1.37	1.38	3.53	4.54	16.79	8.88	12.23	4.25	17.59	72.28
N18	1.42	1.30	1.33	3.21	4.71	16.35	8.41	10.40	4.65	14.44	66.23
N19	1.32	1.39	1.29	2.95	4.47	15.12	8.02	10.00	4.50	15.00	64.06
N20	1.05	0.80	1.16	2.78	5.44	7.41	8.34	8.45	5.25	25.65	66.33
N21	1.44	1.60	2.37	3.56	8.10	15.01	11.35	10.07	6.56	22.69	82.74
N22	1.14	1.21	1.39	2.66	6.54	10.73	6.59	8.71	6.35	16.02	61.33
N23	1.32	1.58	2.24	2.86	5.22	20.52	7.66	8.67	8.08	23.33	81.48
N24	1.47	1.04	1.23	3.52	5.06	19.18	8.58	8.92	4.46	11.11	64.57
N25	1.20	1.50	2.82	2.28	4.65	27.25	5.99	7.70	6.90	26.85	87.15
平均	1.33	1.34	1.85	2.99	5.07	14.53	8.25	9.87	5.59	29.08	79.90

一般在 150 之内,虽然阳宗海北岸施加咀和东岸黄水洞附近也有 R_i 相对较高的区域,但总体上还属轻微风险程度。只有位于谈葛营附近的 N03 取样点的潜在生态风险指数较高,达 160.06,属中等风险程度,低于滇池的潜在生态风险指数(R_i 介于 100 ~ 800)^[6],而较异龙湖的潜在生态风险指数略高^[7]。结合阳宗海表层沉积物中各重金属质量比与分布特征,分析其原因,认为主要是阳宗海 As 的潜在生态风险较大引起的。在 N03 取样点, E_r^{As} 对 R_i 指数的贡献量达 65%。而在 R_i 指数较高的 N01 取样点, E_r^{As} 的贡献量也达到 61%。因此 As 是阳宗海表层沉积物中最突出的生态风险因子。虽然 Cu 和 Cr 在阳宗海表层沉积物中的富集程度也较高,但因其生物毒性相对较低,因此不是主要的生态风险因子。

3 结 论

a. 阳宗海湖底表层沉积物中, Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb、As 的质量比平均值依次为 9413.1 mg/kg、617.9 mg/kg、149.2 mg/kg、189.6 mg/kg、145.8 mg/kg、97.6 mg/kg、55.1 mg/kg、27.4 mg/kg、40.3 mg/kg、31.4 mg/kg。Zn、Cr、Pb、As 的分布特征具有较高的相关性,它们主要来自人类活动造成的污染。Ti、Mn、V、Cu、Ni、Co 的分布特征相似,以岩石风化等自然因素来源为主。

b. 阳宗海表层沉积物中重金属的富集程度按富集系数均值大小依次为 As、Cu、Cr、Co、Zn、Ni、V、Mn、Ti、Pb,其中, As、Cu、Cr 的富集程度相对较高。阳宗海重金属潜在生态风险指数一般在 150 之内,总体上属轻微风险程度。只有位于阳宗海南岸谈葛营附近区域的沉积物受 As 的影响,潜在生态风险达到了中等程度。重金属对阳宗海生态风险贡献程度由大到小依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti,其中,As 产生的潜在生态风险较其他重金属明显偏高,是阳宗海最主要的生态风险因子。

为避免阳宗海湖泊环境继续恶化,应对阳宗海周边企业的排污加强监测管理,对阳宗海沉积物中的重金属进行治理,并通过宣传强化人们的环保意识。

参考文献:

[1] 唐阵武,程家丽,岳勇,等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学,2009,21 (1):61-68.

[2] 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.

[3] 孙照斌,邴海健,吴艳宏,等. 太湖流域西沭湖沉积岩芯

中重金属污染及潜在生态风险[J]. 湖泊科学,2009,21 (4):563-569.

[4] 蒋庆丰,游珍,倪黎明,等. 南通市河流底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 水资源保护,2010,26 (5): 11-15.

[5] 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.

[6] 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.

[7] JUNHONG B, BAOSHAN C, BIN C, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China[J]. Ecological Modelling,2011,222(2):301-306.

[8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research,1980,14(8):995-1001.

[9] 宁建凤,邹献中,杨少海,等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报,2009,29(11):6059-6067.

[10] 王胜强,孙津生,丁辉. 海河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境工程,2005,23(2):62-64.

[11] 徐争启,倪师军,虞先国,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.

(收稿日期:2011-07-07 编辑:彭桃英)

(上接第 12 页)

[9] 廖资生,林学钰. 松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2004,29 (1):96-102.

[10] 陈小兵,周宏飞,张学仁,等. 新疆喀什噶尔冲积平原区地下水水化学特征[J]. 干旱区地理,2004,27(1):75-79.

[11] 张翼龙,王丽娟,王文中,等. 呼和浩特市浅层地下水水化学特征演变规律[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(6):14-17.

[12] 北京市朝阳区水务局. 北京市朝阳区水资源调查和水利区划报告[R]. 北京:北京市朝阳区水务局,1982.

[13] 孙芳强,候光才,窦妍,等. 鄂尔多斯盆地白垩系地下水循环特征的水化学证据:以查布水源地为 例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(2):269-275.

[14] 谢振华,刘凯,李志萍,等. 基于沉积物物质来源的地下水水化学特征分析:以北京市平原区为例[J]. 地学前缘,2010,17(6):81-87.

[15] 王磊,章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化学联系研究[J]. 湿地科学,2007,5(2):166-173.

[16] 张永祥,彭庆斌,朱亚雷,等. 2007 年北京市朝阳区地下水水质评价报告[R]. 北京市:北京市朝阳区水务局,2007.

(收稿日期:2011-09-22 编辑:徐 娟)