

Heavy Metal Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Sediments in Yangzonghai Lake^{*}

Zhang Yuxi, Sun Jichao, Liu Jingtao, Huang Guanxing, Jing Jihong, Chen Xi,
Cui Haiwei, Wang Jincui, Zhang Yuanjing, Xiang Xiaoping

(The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences Zhengding 050803, China)
kobzhang@QQ.com

Abstract: The content and characteristics of ten heavy metals in surface sediments from Yangzonghai Lake in Yunnan, China were analyzed. Ecological risk index presented by Håkanson to assess the potential ecological risk of Yangzonghai Lake was utilized. The results showed that the average concentrations of Ti, Mn, Zn, V, Cr, Cu, Ni, Co, Pb and As in surface sediments of Yangzonghai Lake were up to 9413.1, 617.9, 149.2, 189.6, 145.8, 97.6, 55.1, 27.4, 40.3 and 31.4mg/kg, respectively, which are higher than their natural background values. Pearson's correlation analysis indicated that Zn, Cr, Pb and As were highly correlated and had similar distributions in sediment. Ti, Mn, V, Cu, Ni, and Co were also well correlated and similar in distribution. The evaluation of single-factor pollution index indicated that the 10 heavy metals were enriched to a certain degree, all reaching the level of medium pollution. Among them, As, Cu, and Cr were the most important factors of environmental pollution in Yangzonghai Lake. A comprehensive potential ecological risk index revealed that in Yangzonghai Lake as a whole, heavy metals reached the level of slight ecological risks, and in some parts, they even reached the medium level. Heavy metals in Yangzonghai Lake in the descending order of their ecological risks were As, Cu, Co, Ni, Pb, Cr, V, Zn, Mn and Ti. Among them, As was more prominent than other heavy metals in terms of the ecological risk and thus the most important factor of ecological risk in surface sediment of Yangzonghai Lake.

Keywords: Yangzonghai Lake; sediments; heavy metal contamination; ecological risk

阳宗海湖底沉积物重金属污染及其生态风险评价

张玉玺, 孙继朝, 刘景涛, 黄冠星, 荆继红,
陈玺, 崔海炜, 王金翠, 张媛静, 向小平
(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050803)
kobzhang@QQ.com

摘要: 采集了阳宗海表层沉积物 25 组, 分析了 10 种重金属的含量, 研究了重金属的污染特征, 并用 Håkanson 潜在生态危害指数法评价了沉积物中重金属的生态危害风险。结果表明, 阳宗海表层沉积物 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb 和 As 的含量平均值依次为 9413.1mg/kg、617.9mg/kg、149.2mg/kg、189.6mg/kg、145.8mg/kg、97.6mg/kg、55.1mg/kg、27.4mg/kg、40.3mg/kg、31.4mg/kg, 均超过了当地背景值。Pearson 相关分析表明 Zn、Cr、Pb、As 之间高度相关, 且在沉积物中有相似的分布特征。Ti、Mn、V、Cu、Ni、Co 之间也有很好的相关性, 在沉积物中的分布规律也相似。单因子污染指数评价反映了几种重金属均存在一定程度的富集, 均达到了中等污染程度。其中, As、Cu、Cr 是阳宗海最主要的环境污染因子。综合潜在生态危害指数评价表明, 阳宗海重金属总体上属轻微生态危害程度, 个别区域达到中等危害程度。重金属对阳宗海生态危害的影响程度由高到低依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti。其中, As 产生的生态危害程度较其他重金属明显突出, 是阳宗海表层沉积物中最主要的生态危害因子。

关键词: 阳宗海; 沉积物; 重金属污染; 生态风险

重金属是具有潜在危害性的一类保守性污染物。由于其难降解性、普遍的生物毒性、生物累

^{*}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专项经费资助(项目编号:SK200903)

积性和生物放大作用，环境中的重金属污染一直倍受关注^[1-2]。近年来，地表水体的重金属污染事件频繁发生，威胁着当地居民的用水安全，也造成了巨大经济损失。沉积物是水体重金属的贮藏库^[3]。重金属进入水体后，绝大部分被水体中颗粒物吸附进而通过沉淀作用转移到沉积物中。世界各国已有研究表明，在受重金属污染的水体中，沉积物中重金属含量可达水中的数百倍至数十万倍^[4]。且当水体环境发生改变或在水生生物等的作用下，沉积物中的重金属很可能被重新释放到水体中，形成二次污染，产生潜在的生物毒性风险^[5-7]。因此，沉积物中重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标^[8-9]。

阳宗海 (E102° 59' -103° 02' , N24° 51' - 24° 58')是云南省九大高原湖泊之一，是当地居民赖以生存的淡水湖泊。湖面呈纺锤形，东西宽 2.5km，南北长 12.7km，湖岸线长 32.3km。湖面面积 31.9km²(水位 1770m 时)，流域面积 192 km²。平均水深 20m，最深 29.7m，蓄水量 6.04 亿 m³，换水周期 13 年^[10-11]。补给水源主要来自天然降雨、阳宗大河和七星河汇水、摆依河人工补水及地下水。汤池河渠是唯一的出水口，河水最终汇入南盘江。近 20 年来，沿湖兴建了许多工矿企业及旅游度假村。主要的企业有北岸的火电厂、煤矿、磷肥厂、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耐火厂和磷肥厂等。随着工、矿、旅游业的迅速发展，进入湖中的重金属也不断增加，并在沉积物中聚积。本文通过对阳宗海表层沉积物系统采集与分析，查明了重金属(Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb、As)的含量与分布，评价了其潜在生态危害风险，旨在为阳宗海重金属污染防治提供理论依据和决策支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

2009 年 4 月 2-4 日，利用抓斗式采泥器采集阳宗海表层 0-5cm 沉积物样品 25 组(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，研磨，过 200 目筛，然后置 105℃ 烘箱烘 8 小时，取出后放入干燥皿。称量 4.00g 土样，压片，利用 PW4400 型 X 射线荧光光谱仪测定各项指标。检测依据参考中国国家教委发布的《JY/T016-1996 波长色散型 X

射线荧光光谱方法通则》。

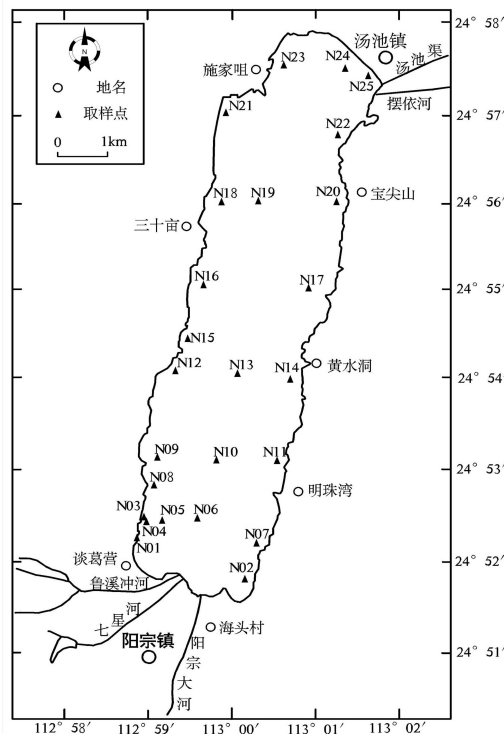


Fig.1 The sampling stations in Yangzonghai Lake
图 1 阳宗海沉积物采样点位置图

1.2 评价方法

关于沉积物重金属对环境的污染和生态危害程度，英国、日本、德国、瑞典等国家的研究者研究了许多评价方法。其中地积累指数法、污染负荷指数法、回归过量分析法、潜在生态危害指数法等代表了国际上有关沉积物中重金属研究的先进方法^[12-16]。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含量，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，在研究沉积物生态效应中具有较明显的优势^[17-18]。本文研究重点在于沉积物中重金属潜在生态危害风险状况，故采用潜在生态危害指数法进行评价。

潜在生态危害指数计算公式为：

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

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (2)$$

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

式中, RI 为多种重金属的潜在生态危害指数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害参数; C_f^i 为重金属 i 的污染指数 (又称富集系数); C_s^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为沉积物背景参考值, 本文

采用 1990 年统计的云南省土壤重金属背景值^[19] (表 1) 作为参比; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 反映了重金属在水相、沉积固相和生物相之间的响应关系, 分别设定为 Ti=Mn=Zn=1<V=Cr=2<Cu=Ni=Co=Pb=5<As=10^[20]。重金属污染指数、潜在生态危害参数、潜在生态危害指数与污染程度的关系如表 2。

Tab.1 Background values of heavy metals of Yunnan (mg/kg)

表 1 云南省土壤重金属的背景值 (mg/kg)

元素	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Ni	Co	Pb	As
背景值	7100	461	80.5	126.7	57.6	33.6	33.4	13.9	36	10.8

Tab.2 The relation between evaluation indexes and the contamination degree and potential ecological risk

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	单因子污染程度	E_r^i	单因子潜在生态危害程度	RI	潜在生态危害程度
<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		

2 结果与讨论

2.1 重金属空间分布特征

阳宗海沉积物各重金属含量统计见图 2。十种重金属的平均含量均超过了云南省土壤环境背景值。Ti 含量多数集中在 5000-10000mg/kg 范围内, 平均值为 9413.1mg/kg。最高值位于黄水洞附近的 N14 号点, 含量为 30798.6mg/kg, 最低值位于谈葛营附近的 N01 号点, 含量为 4460.3mg/kg。

Mn 含量主要介于 600-800mg/kg 之间, 平均值为 617.9mg/kg。最高值为 1077.4mg/kg, 位于 N14 号点, 最低值为 344.8mg/kg, 位于 N09 号点。

Zn 的平均含量为 149.2mg/kg, 多数集中在 100-200mg/kg 范围内。依据《全国土壤环境质量标准》(GB-15618-1995), Zn 含量达到土壤环境质量一级标准的有 5 个样品, 达到土壤环境质量二级标准的有 19 个样品。Zn 含量最高值为

511.9mg/kg, 位于 N01 号点, 超过了土壤环境质量三级标准。最低值为 83.8mg/kg, 位于 N09 号点。

V 含量主要集中在 150-250mg/kg 范围内, 平均为 189.6mg/kg。最高值为 341.5mg/kg, 位于 N14 号点, 最低值为 95.1mg/kg, 位于 N01 点。

Cr 含量多介于 100-150mg/kg 之间, 平均值 145.8mg/kg。N09 号点的 Cr 含量最低, 为 87.7mg/kg, 达到土壤环境质量一级标准, 其他样品均达到土壤环境质量二级标准。最高值为 253.1mg/kg, 位于谈葛营附近的 N03 号点。

Cu 含量平均值为 97.6mg/kg, 15 个样品达到土壤环境质量二级标准, 10 个样品达到土壤环境质量三级标准。最高值 270.3mg/kg, 位于 N14 号点, 最低值 48.3mg/kg, 位于 N09 号点。其余大部分样品含量都在 50-150mg/kg 之间。

Ni 含量主要集中在 50-60mg/kg 之间, 平均

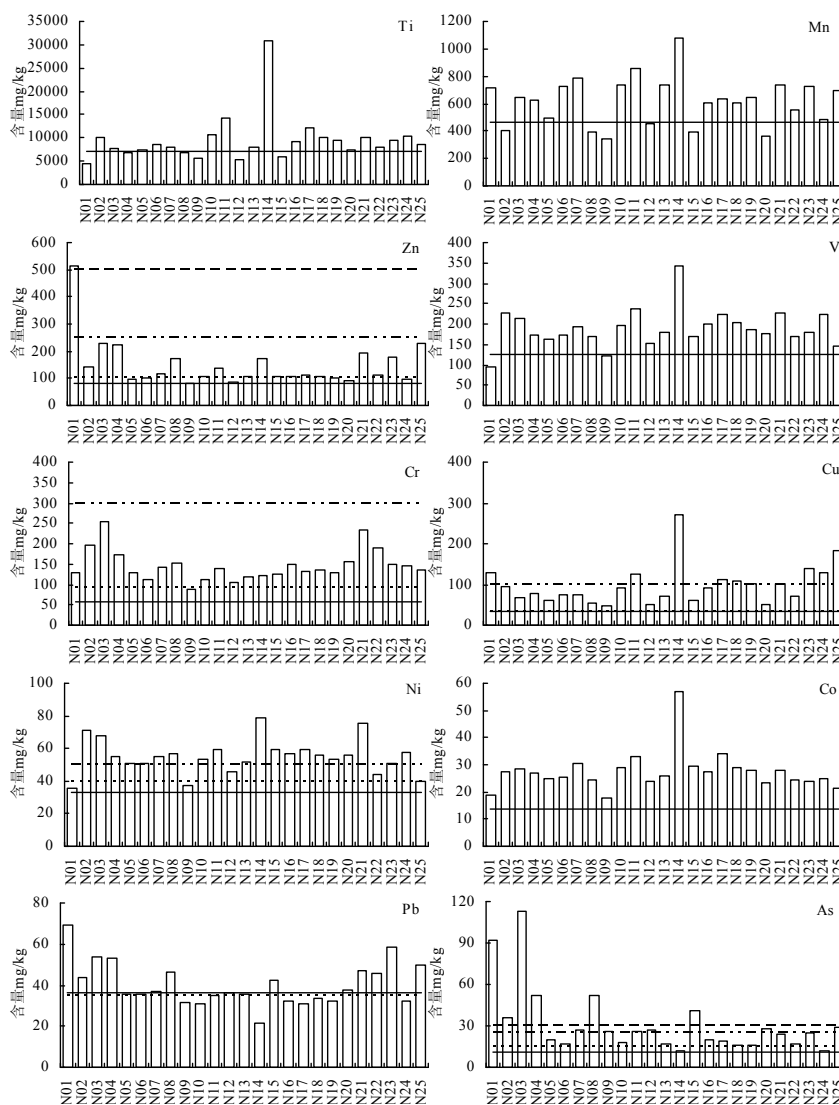
值为 55.1mg/kg。达到土壤环境质量一级标准的有 3 个样品，达到土壤环境质量二级标准的有 2 个样品，其余 20 个样品土壤环境质量均达到土壤环境质量三级标准。最高值位于 N14 号点，含量为 78.4mg/kg，最低值位于 N01 号点，含量为 35.9mg/kg。

Co 含量主要介于 20-30mg/kg 之间，平均值为 27.4mg/kg。最高值为 57.2mg/kg，位于 N14 号点，最低值为 18.0mg/kg，位于 N09 号点。

Pb 含量多介于 30-40mg/kg 范围内，平均值为 40.3mg/kg。其中 8 个样品达到土壤环境质量

一级标准，17 个样品达到土壤环境质量二级标准。N01 号点的含量最高，达 69.1mg/kg，N14 含量最低，为 21.2mg/kg。

As 含量主要介于 15-30mg/kg 之间，平均值为 31.4mg/kg，超过了土壤环境质量三级标准的限值。其中 2 个样品达到土壤环境质量一级标准，10 个样品达到土壤环境质量二级标准，7 个样品达到土壤环境质量三级标准，还有 6 个样品超过了土壤环境质量三级标准。与其他九个重金属相比，As 的污染相对较重。最高值为 113.2mg/kg，位于 N03 号点，最低值为 11.8mg/kg，位于 N14 号点。



重金屬 云南省背景值 土壤一级标准 土壤二级标准 土壤三级标准

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in surface sediments from Yangzonghai Lake

图 2 阳宗海各取样点表层沉积物中重金属含量

图 3 反映阳宗海表层沉积物重金属的水平分布特征大致分为两种类型。Zn、Cr、Pb、As 的分布情况相似，南北两岸相对较高，且最高值都位于南岸的谈葛营附近，其次都位于北岸施家咀附近，而湖中间地区的含量较低。Pearson 相关性分析结果表明(表 3)，Zn、Cr、Pb、As 之间有很高的相关性，尤其是 Zn、Pb、As 之间均为极显著性相关，说明它们可能受相同因素的影响。沿人类活动密集区的南北两岸向湖中心扩散延伸分布

规律，指示了这四种重金属的分布可能是受人类活动的影响为主。Ti、Mn、V、Cu、Ni 和 Co 的分布特征相似，高值点都位于湖东岸黄水洞附近，该区并未受到人类开发活动的影响。而人类活动密集的湖东岸宝尖山与南岸谈葛营北部地区的含量相对较低。由于 Mn 主要来源于地球化学过程^[2]，而六种重金属之间也有很好的相关性。可以认为这六种重金属的分布主要受自然因素的作用。

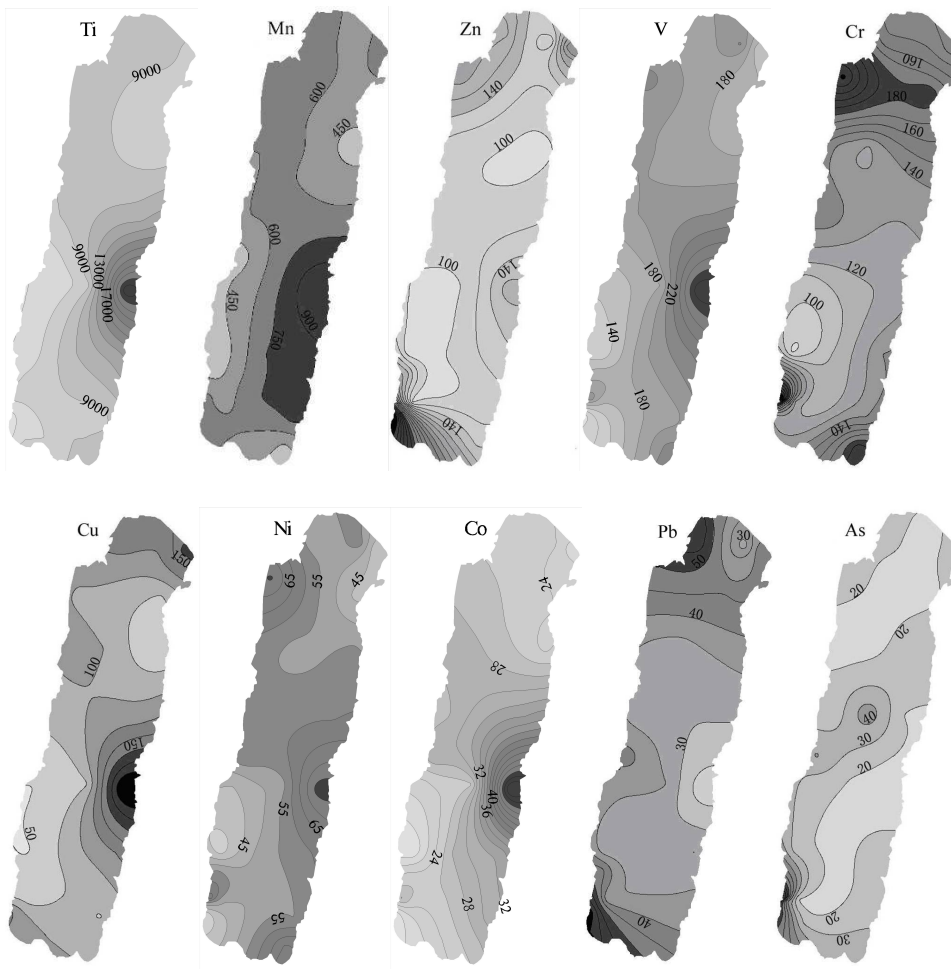


Fig.3 Isograms of heavy metals in surface sediments from Yangzonghai Lake (mg/kg)
图 3 阳宗海表层沉积物重金属含量分布图 (mg/kg)

Tab.3 Pearson correlation coefficients of the heavy metals in surface sediment from Yangzonghai Lake
表 3 阳宗海表层沉积物中各金属之间 Pearson 相关系数

元素	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Ni	Co	Pb
Mn	0.662**								
Zn	-0.096	0.277							

V	0.881**	0.522**	-0.269						
Cr	-0.049	-0.004	0.228	0.253					
Cu	0.806**	0.693**	0.306	0.576**	-0.078				
Ni	0.607**	0.283	-0.165	0.863**	0.533**	0.293			
Co	0.927**	0.627**	-0.140	0.894**	0.002	0.646**	0.708**		
Pb	-0.502*	-0.079	0.774**	-0.510**	0.457*	-0.107	-0.260	-0.505*	
As	-0.343	-0.085	0.708**	-0.286	0.468*	-0.176	-0.024	-0.234	0.720**

注：*显著性相关(P<0.05)；**极显著性相关(P<0.01)。

2.2 重金属污染程度分析

利用单因子污染指数 (C_f) 对各个重金属的污染程度进行评价, 结果见表 4。阳宗海各个重金属的污染指数均值都在 1-3 之间, 属中等污染水平。污染指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 个点上的污染指数均达

到 3 以上, 总体上污染程度相对较强。Co、Ni、Zn、V 的污染程度次之, 污染指数普遍在 1-3 之间。Mn、Ti、Pb 的污染指数普遍偏低, 且均有一些点上的污染指数小于 1, 污染程度相对最低。因此, As、Cu、Cr 是阳宗海最主要的环境污染因子。尤其 As 在在 N01、N03 号点, Cu 在 N14 号点的污染指数都大于 6, 污染程度很强。

Tab.4 The results of single factor evaluation on heavy metal pollution in sediments
表 4 沉积物中重金属污染单因子评价结果

点号	单因子污染指数 C_f									
	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Ni	Co	Pb	As
N01	0.63	1.56	6.36	0.75	2.23	3.81	1.07	1.35	1.92	8.52
N02	1.41	0.88	1.79	1.78	3.43	2.87	2.13	1.97	1.22	3.38
N03	1.07	1.41	2.82	1.69	4.39	1.99	2.03	2.04	1.50	10.48
N04	0.96	1.36	2.80	1.37	3.00	2.35	1.66	1.92	1.47	4.82
N05	1.05	1.08	1.21	1.28	2.24	1.83	1.52	1.78	0.98	1.86
N06	1.21	1.58	1.29	1.37	1.92	2.20	1.51	1.83	0.99	1.62
N07	1.15	1.72	1.45	1.52	2.46	2.19	1.65	2.18	1.03	2.50
N08	0.98	0.86	2.14	1.35	2.66	1.65	1.70	1.74	1.30	4.84
N09	0.78	0.75	1.04	0.96	1.52	1.44	1.12	1.29	0.88	2.42
N10	1.49	1.59	1.34	1.56	1.95	2.69	1.59	2.07	0.86	1.68
N11	1.99	1.85	1.67	1.87	2.43	3.74	1.78	2.36	0.98	2.45
N12	0.75	0.98	1.09	1.19	1.80	1.51	1.36	1.71	1.02	2.49
N13	1.13	1.59	1.30	1.42	2.05	2.12	1.56	1.86	0.99	1.62
N14	4.34	2.34	2.13	2.70	2.11	8.04	2.35	4.12	0.59	1.09
N15	0.83	0.84	1.35	1.33	2.16	1.84	1.78	2.13	1.17	3.80
N16	1.28	1.32	1.33	1.57	2.57	2.71	1.69	1.99	0.89	1.85
N17	1.73	1.37	1.38	1.76	2.27	3.36	1.78	2.45	0.85	1.76
N18	1.42	1.30	1.33	1.61	2.36	3.27	1.68	2.08	0.93	1.44
N19	1.32	1.39	1.29	1.47	2.23	3.02	1.60	2.00	0.90	1.50
N20	1.05	0.80	1.16	1.39	2.72	1.48	1.67	1.69	1.05	2.56
N21	1.44	1.60	2.37	1.78	4.05	3.00	2.27	2.01	1.31	2.27

N22	1.14	1.21	1.39	1.33	3.27	2.15	1.32	1.74	1.27	1.60
N23	1.32	1.58	2.24	1.43	2.61	4.10	1.53	1.73	1.62	2.33
N24	1.47	1.04	1.23	1.76	2.53	3.84	1.72	1.78	0.89	1.11
N25	1.20	1.50	2.82	1.14	2.32	5.45	1.20	1.54	1.38	2.69
平均	1.33	1.34	1.85	1.50	2.53	2.91	1.65	1.97	1.12	2.91

2.3 重金属潜在生态风险评价

阳宗海表层沉积物各重金属的潜在生态危害参数 (E_r^i) 和生态危害指数 (RI) 的计算结果见表 5、图 4。结果反映, As 产生的生态危害程度较其他重金属明显突出, 在 N01、N03 号点潜在生态危害参数超过 80, 达到强生态危害程度; 在 N04、N08 号点的潜在生态危害参数超过 40, 属中等危害程度。Cu 在 N14 号点产生的潜在生态危害参数也超过 40, 属中等危害程度。除此之外, 其他重

金属在各取样点的潜在生态危害参数均小于 40, 均值范围介于 1.33-29.08 之间, 属轻微生态危害程度。尤其是 Ti、Mn、Zn、V 四种金属的潜在生态危害参数基本都在 5 个单位以下, 危害程度甚微。潜在生态危害参数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生态危害影响程度的大小。

Tab.5 The potential ecological risk factors (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals in surface sediments in Yangzonghai Lake
表 5 阳宗海表层沉积物重金属潜在生态危害参数和潜在生态危害指数

点号	E_r^i										RI
	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	104.8	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

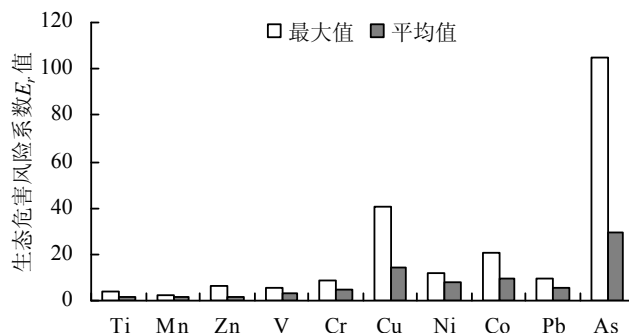


Fig.4 Comparison of potential ecological risk factors of heavy metals
图 4 重金属潜在生态危害参数比较图

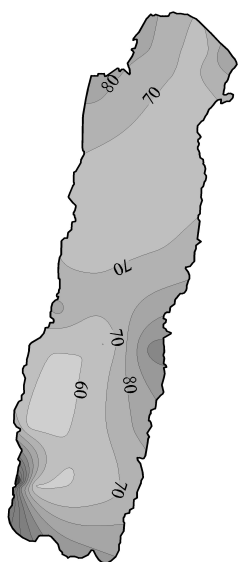


Fig.5 Isograms of RI of heavy metals in sediments from Yangzonghai Lake
图 5 阳宗海沉积物重金属潜在生态风险指数 RI 分布

图 5 反映了阳宗海重金属潜在生态危害指数的分布情况。全湖来看，重金属综合潜在生态危害指数一般在 150 之内，虽然北岸施加咀和东岸黄水洞附近也有 RI 指数相对较高的区域，但总体上还属轻微生态危害程度。只有位于谈葛营附近的 N03 号点的潜在生态危害指数较高，达到 160.06，属中等危害程度。结合各重金属含量与

分布特征来看，主要是 As 的潜在生态危害较大引起的。在 N03 号点， E_r^{As} 对 RI 指数的贡献量达 65%。而在 RI 指数较高的 N01 号点， 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主要的生态危害因子。虽然 Cu 和 Cr 也是阳宗海主要的环境污染因子，但因其生物毒性相对较低，不是主要的生态危害因子。

3 结论

阳宗海表层沉积物 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb、As 的含量平均值依次为 9413.1mg/kg、617.9mg/kg、149.2mg/kg、189.6mg/kg、145.8mg/kg、97.6mg/kg、55.1mg/kg、27.4mg/kg、40.3mg/kg、31.4mg/kg，均超过了云南省土壤环境背景值。其中 Zn、Cr、Pb、As 之间具有较高的相关性，且分布规律均显示出受人类活动影响为主的特征。Ti、Mn、V、Cu、Ni、Co 也有很好的相关性，分布规律指示了主要受自然因素作用的特征。

重金属的污染指数均值在 1-3 之间，都存在一定程度的富集，属中等污染水平。污染程度按污染指数均值大小依次为 As、Cu、Cr、Co、Zn、Ni、V、Mn、Ti、Pb。其中，As、Cu、Cr 是阳宗海最主要的环境污染因子。

阳宗海重金属综合潜在生态危害指数一般在 150 之内，总体上属轻微生态危害程度。只有位于南岸谈葛营附近区域受 As 的潜在生态危害影

响, 达到了中等危害程度。重金属对阳宗海生态危害影响程度由大到小依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti。其中, As 产生的生态危害程度较其他重金属明显突出, 是阳宗海表层沉积物中最主要的生态危害因子。

References (参考文献)

- [1] SU Chunli, WANG Yanxin. Pollutant characteristics and pollution control of heavy metal contaminants in sediments of moshui lake, wuhan, china[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(2): 111-116.
苏春利, 王焰新. 武汉市墨水湖沉积物重金属污染特征与防治对策[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2):111-116
- [2] TANG Zhenwu, CHENG Jiali, YUE Yong, et al. Accumulations and risks of heavy metals in the sediments from 8 typical lakes in Wuhan, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1): 61- 68.
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
- [3] LI Lianfang, ZENG Xibai, LI Guoxue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(2): 289-297.
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
- [4] JIAO Wei, LU Shaoyong, LI Guangde, et al. Heavy Metals Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Inner Lakeside Belt of Lake Dianchi[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(4): 740-745.
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.
- [5] SUN Zhaobin, BING Haijian, WU Yanhong, et al. Contamination and potential ecological risk of heavy metals in lacustrine sediment core from Lake Xijiu, Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4): 563-569.
孙照斌, 邴海健, 吴艳宏, 等. 太湖流域西沱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.
- [6] XIANG Yong, MIAO Qilong, FENG Jiangfan. Pollution of Heavy Metals in the Bottom Mud of Lake Taihu and Its Assessment of Potential Ecological Risk[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(5): 700-705.
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.
- [7] YANG Liyuan, SHEN Ji, ZHANG Zulu, et al. Distribution and Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in Superficial Sediments of Nansihu Lake[J]. Journal of Lake Science, 2003, 15(3): 252-256.
杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. 湖泊科学, 2003, 15(3):252-256.
- [8] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Bu-yak Menderes and Gediz river sediments[J]. Water Research, 2003, 37(4): 813-822
- [9] Marengo E, Gennaro M C, Robottie E, et al. Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida River sediments. Analytica Chimica Acta, 2006, 560: 172-183.
- [10] Li Zhenyu, SUN Ye. Brief Discussions on Controlling Measures and Water Body Characteristics of Yangzonghai Lake[J]. Yunnan Environmental Science, 2005, 24(S1): 108-111.
李振宇, 孙冶. 阳宗海水体特征分析及控制对策初探[J]. 云南环境科学, 2005, 24(S1):108-111.
- [11] WANG Hongmei. Present Situation and Trend Analysis of Water Quality in Yangzonghai Lake[J]. Yunnan Environmental Science, 2003, 22(S1): 170-171.
王红梅. 阳宗海水质现状及变化趋势分析[J]. 云南环境科学, 2003, 22(S1): 170-171
- [12] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 2: 108-118
- [13] Angulo E. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution[J]. Science of The Total Environment, 1996, 187(1): 19-56
- [14] Hilton J, Davison W, Chsenbein U O. A mathematical model for analysis of sediment core data: Implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. Chemical Geology, 48: 281-291
- [15] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 995-1001
- [16] JIA Zhenbang, LIANG Tao, LAM Kinche, et al. Study on Heavy Metal Contamination and Potential Ecological Risk in Hong Kong Rivers[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(4): 485-492.
贾振邦, 梁涛, 林健枝, 等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4):485-492
- [17] NING JianFeng, ZOU XianZhong, YANG ShaoHai, et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6059-6067.
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
- [18] Wang Shengqiang, Sun Jinsheng, Ding Hui. Evaluation on Potential Ecological Risk of Heavy Metal Pollution of Sediments in Haihe River[J]. Environmental Engineering, 2005,23(2): 62-64.
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
- [19] Environmental Monitoring of China. Soil element background values of China[M]. Beijing: China Envi-

- ronmental Science Press, 1990. (in Chinese)
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
- [20] Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 112-115.
- 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