#### DOI: 10.5846/stxb201407091404

张大文,张莉,何俊海,罗林广,魏益华.鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局及风险评估.生态学报,2015,35(24): - . Zhang D W, Zhang L, He J H, Luo L G, Wei Y H.Spatial distributions and risk assessment of dissolved heavy metals in Poyang Lake. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

## 鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局及风险评估

### 张大文,张 莉,何俊海,罗林广\*,魏益华

江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所,南昌 330200

摘要:本文采用 ICP-MS 定量研究了鄱阳湖溶解态重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 空间分布特征,并对其引起的健康风险进行了 评价。结果表明,鄱阳湖溶解态 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的水平均符合国家 I、II 类饮用水质标准;鄱阳湖溶解态重金属的空间 分布格局为 As 和 Cr 在整体上呈现北部大于南部,Cu 为北部和南部高,中部低,Pb 和 Zn 均呈现南部大于北部,而 Cd 的空间分 布规律不明显。风险评估结果显示,鄱阳湖 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的风险水平小于国际辐射防护委员会(International Commission on Radiation Protection; ICRP)的推荐值(5×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>),但是 Cr 的风险水平(4.74×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>)接近了 ICRP 推荐值,且由 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 引起的健康总风险达到了 5.88×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,超过了 ICRP 推荐值。鄱阳湖由 Cr 和 As 引起的健康风险之和占总风险 比例达到 99.72%,是主要的健康污染物,需引起风险决策部门的重视。

关键词:鄱阳湖;溶解态重金属;空间分布格局;风险评估

# Spatial distributions and risk assessment of dissolved heavy metals in Poyang Lake

ZHANG Dawen, ZHANG Li, HE Junhai, LUO Linguang\*, WEI Yihua

Institute for Quality & Safety and Standards of Agricultural Products Research, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China

**Abstract**: Poyang Lake is the biggest freshwater lake in China as well as one of the most important international wetlands that provides ideal habitats for many overwintering birds. In recent years, heavy metal pollution in Poyang Lake has increased both in scope and intensity with the nearby growth of human population, industrialization, and intensive agricultural activities. There are many studies on heavy metals in the sediments of Poyang Lake, but there has been little focus on the spatial distributions of dissolved heavy metals in the water of Poyang Lake.

In this study, dissolved trace metal (As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) concentrations were measured in the water of Poyang Lake using inductively coupled plasma-mass spectroscopy (ICP-MS) in order to evaluate their spatial variations and health risks. The concentrations of dissolved trace metals in Poyang Lange ranged as follows: As: 0.84 µg/L—3.24 µg/L (average 1.43 µg/L); Cd: 0.027 µg/L—0.091 µg/L (average 0.052 µg/L); Cr: 1.76 µg/L—4.74 µg/L (average 2.21 µg/L); Cu: 1.15 µg/L—5.05 µg/L (average 2.67 µg/L); Pb: 0.20 µg/L—2.37 µg/L (average 0.81 µg/L); and Zn: 7.99 µg/L—77.99 µg/L (average 28.82 µg/L). These values met the national first-level or second-level criterion for drinking water quality of China. The concentrations of As and Cr were higher in the northern part than those in the southern part of the lake, and the Cu content in the northern and southern parts were higher than that in the middle part. The concentrations of Pb and Zn in the northern part were lower than those in the southern part. No obvious spatial distribution pattern of Cd was observed in Poyang Lake. Significant correlations were found between Cu and the other five metals (As,

收稿日期:2014-07-09; 网络出版日期:2015- -

基金项目:国家自然科学基金项目(31360133); 江西省农科院创新基金项目(2010CDS001)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Luolinguang@ 126.com

Cd, Cr, Pb, and Zn), indicating that Cu has similar sources or/and identical geochemical behaviors with other metals. This can be attributed to the diversified sources of Cu in the lake. There was a significant association between heavy metals Cr, Cu, and Cd, and there were significant relationships between Pb and Cu, Cd, and Zn. The values of personal annual risk caused by the heavy metals had the following ranges: As:  $0.66 \times 10^{-5} a^{-1} - 2.54 \times 10^{-5} a^{-1}$  (average  $1.12 \times 10^{-5} a^{-1}$ ); Cd:  $0.86 \times 10^{-7} a^{-1} - 2.91 \times 10^{-7} a^{-1}$  (average  $1.66 \times 10^{-7} a^{-1}$ ); Cu:  $1.41 \times 10^{-10} a^{-1} - 6.17 \times 10^{-10} a^{-1}$  (average  $3.26 \times 10^{-10} a^{-1}$ ); Pb:  $0.87 \times 10^{-10} a^{-1} - 10.35 \times 10^{-10} a^{-1}$  (average  $3.54 \times 10^{-10} a^{-1}$ ); Zn:  $1.63 \times 10^{-11} a^{-1} - 15.85 \times 10^{-11} a^{-1}$  (average  $5.87 \times 10^{-11}$  a<sup>-1</sup>); and Cr:  $3.77 \times 10^{-5} a^{-1} - 10.14 \times 10^{-5} a^{-1}$  (average  $4.74 \times 10^{-5} a^{-1}$ ). The values of personal annual risk caused by As, Cd, Cu, Pb, and Zn were lower than the maximum acceptable value ( $5 \times 10^{-5} a^{-1}$ ) for drinking water recommended by the International Commission on Radiation Protection (ICRP), but the personal annual risk caused by Cr ( $4.74 \times 10^{-5} a^{-1}$ ) was close to the acceptable level, and the total health risks ( $5.88 \times 10^{-5} a^{-1}$ ) caused by these six metals were beyond the acceptable level. The sum of the personal annual risk caused by Cr and As was 99.72% of the total risk, suggesting that As and Cr were the major health risk pollutants, and Risk Decision-making Departments should focus on these two metals.

Key Words: Poyang Lake; dissolved metals; spatial distributions; risk assessment

都阳湖是我国第一大淡水湖,位于长江之南,江西省北部,上承赣、抚、信、饶、修五江之水,下接我国第一 大河-长江。鄱阳湖流域内矿产资源丰富,乐安江中下游有亚洲最大的露天铜矿-德兴铜矿以及铅山铅锌矿, 信江中游的永平铜矿,抚河上游的铀矿和赣南有色金属采矿区等。随着江西省工农业生产的快速发展和城镇 化进展的加快,鄱阳湖水环境受到了不同程度的重金属污染<sup>[1-5]</sup>。

然而,目前鄱阳湖重金属的研究主要集中在沉积物<sup>[1,2,5-7]</sup>,溶解态重金属污染的研究比较缺乏<sup>[3-5,7]</sup>。而 已有的研究论文主要关注于鄱阳湖的各个支流和鄱阳湖局部区域(航道)<sup>[3-5,7]</sup>,对整个湖体溶解态重金属的 空间分布格局缺乏研究,而研究鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局将为探析鄱阳湖重金属来源和迁移规律寻 求有力的科学依据,为鄱阳湖水环境的保护与治理提供理论支撑。因此,本文于 2012 年 7 月对鄱阳湖水中的 溶解态重金属污染水平进行了分析,研究了鄱阳湖重金属的空间分布特征,并对鄱阳湖的水体溶解态重金属 的健康风险进行评价。

#### 1 研究区域

都阳湖(28°24′′—29°46′N, 115°49′—116°46′E)是国际性的重要湿地,在长江流域中发挥着巨大的调蓄 洪水和保护生物多样性等特殊生态功能,对维系区域和国家生态安全具有重要作用。其集雨面积为 16.22 万 km<sup>2</sup>,其中 96.8%在江西省境内。鄱阳湖是一个季节性湖泊,一年水位变化较大。洪水位 21.69 m 时,湖泊面 积 2933 km<sup>2</sup>,最大水深 29.19 m,平均水深 5.1 m;而在多年平均最低水位 10.20 m 时,面积仅 146.0 km<sup>2</sup>,呈现 "高水为湖、低水似河"和"洪水一片,枯水一线"的景观。本文的研究区域为丰水期的鄱阳湖。

#### 2 材料与方法

#### 2.1 主要试剂和仪器

试剂:硝酸(69.0% HNO<sub>3</sub>)为超纯级;盐酸为优级纯;实验用水为 Milli-Q 超纯水系统处理后的超纯水;实验所用玻璃器皿均用 1:3 硝酸浸泡 24 h,并用 Milli-Q 超纯水反复清洗干净。0.45 μm 的醋酸纤维滤膜,采用 1:1的盐酸浸泡 12 h,并用 Milli-Q 超纯水反复清洗至中性,干燥后密封备用。

仪器:重金属含量采用美国 PE 公司的等离子体质谱仪(型号为 SCIEX Elan 9000)进行定量分析。

- 2.2 研究方法
- 2.2.1 样品采集及理化指标的现场测定

依据研究的目标结合鄱阳湖的地理位置和水文特征,采用 GPS 在鄱阳湖区设置了 58 个采样点,如图 1

所示。2012年7月6日至2012年7月21日在设置的采样点,采用有机玻璃采水器采集混合水样(离表层0.5m),每个样点采集3份水样。

#### 2.2.2 样品处理及测定

采集的水样经处理后的 0.45 µm 的醋酸纤维滤膜 过滤,滤液装入 50 mL 的塑料方瓶中,加入浓硝酸酸化 固定至 pH 值小于 2.0,密封后避光保存,带回实验室后 放入 4℃的冰箱中保存待测。

水样中的 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的含量采用美国 PE 公司的等离子体质谱仪(型号为 SCIEX Elan 9000) 进行定量分析,检测限分别为 0.05 µg/L,0.002 µg/L,0. 2 µg/L,0.2 µg/L,0.2 µg/L,0.3 µg/L。所有元素 3 次 平行测样的相对标准偏差(Relative Standard Deviation; RSD)均少于 10%。

2.2.3 风险评估

本文采用美国环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency; USEPA)推荐且在国内应用广泛的2个模型,包括化学致癌物所致的健康风险模型和化学非致癌所致的健康风险模型<sup>[8-9]</sup>对鄱阳湖重金属进行风险评估。

$$R_i^c = \frac{1 - exp(-D_i q_i)}{70}$$
(1)



风险, $a^{-1}$ ; $D_i$ 为化学致癌物 i 通过食入途径的单位体重日均暴露剂量,mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>; $q_i$ 为化学致癌物 i 通过食入 途径的单位日均参考剂量,mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;70 为人均寿命, $a^{-1}$ 。

$$R_{j}^{n} = \frac{D_{j} \times 10^{-6}}{R_{f} D_{j} \times 60}$$
(2)

式中: $R_j^n$ 为化学非致癌物 j 通过食入途径产生的平均个人致癌风险, $a^{-1}$ ; $D_j^i$ 为非致癌物 j 通过食入途径的单位体重日均暴露剂量,mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>; $R_f D_j^i$ 为非致癌物 j 通过食入途径的日均参考剂量,mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;60 为人均寿命, $a^{-1}$ 。饮水途径的单位日均暴露剂量( $D_i$ ,  $D_j^i$ )按下式计算。

$$D_i = \frac{2.2 \times C_i}{60} \tag{3}$$

式中:2.2 为成人每日平均饮水量,L;Ci 为化学致癌物 i(或非致癌物)的质量浓度,mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;60 为人均体 重,kg。

对于多种那个污染物的整体健康风险评价,一般认为各种污染物所引起的风险呈加和关系,而不是协同 或拮抗关系。总的健康风险(*R*<sup>*i*</sup><sub>*i*</sub>)为:

$$R_{\breve{\&}} = R^c + R^n \tag{4}$$

$$R_c = \sum_{i=1}^m R_i^c \tag{5}$$

$$R^n = \sum_{f=1}^k R_f^n \tag{6}$$

根据国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer; IARC)和世界卫生组织<sup>[10]</sup>通过全面评价



Fig. 1 Location of sampling sites in Meiliang Bay, Taihu Lake

3

化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,As、Cd和Cr为化学致癌物,Cu、Pb、Zn为非化学致癌物。Pb的  $RfD_j^{'}$ 引自世界卫生组织<sup>[10]</sup>,Cu和Zn的 $RfD_j^{'}$ 引自USEPA<sup>[11]</sup>,Cu、Pb和Zn的 $RfD_j^{'}$ 值分别为5×10<sup>-3</sup>mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, 1.4×10<sup>-3</sup>mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>和0.3 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;化学致癌物As、Cd和Cr的 $q_i$ 分别为15 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>,6.1 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>和41 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。

2.3 数据统计

本文应用 SPSS 13.0 对数据进行处理分析。为了直观的反应鄱阳湖溶解性重金属的空间分布规律,本文 应用 Surfer 软件绘制各个重金属的分类张贴图。

3 结果与分析

3.1 鄱阳湖水体溶解性重金属含量

鄱阳湖水体中溶解性重金属含量见表 1。由表 1 可知, 鄱阳湖水体中溶解态 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的含量范围分别为 0.84—3.24 μg/L、0.027—0.091 μg/L、1.76—4.74 μg/L、1.15—5.05 μg/L、0.20—2.37 μg/L 和 7.99—77.99 μg/L,均值分别为 1.43 μg/L、0.052 μg/L、2.21 μg/L、2.67 μg/L、0.81 μg/L 和 28.82 μg/L。其中, As 和 Cd 的均值低于天然淡水水体背景值,但是 Cr、Cu、Pb 和 Zn 均值均高于天然淡水水体背景值<sup>[12]</sup>;按照国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002),研究区域的 As、Cd、Cr、Cu 和 Pb 均符合国家 I 类水质标准,大部分区域的 Zn 达到国家 I 类水质标准,仅 6、32、35、36、54、56 和 58 号点的 Zn 含量超过国家 I 类水质标准,但是符合 II 类水质标准。上述研究结果表明,鄱阳湖水体中 As 和 Cd 的污染较小,而 Cr、Cu、Pb 和 Zn 均存在不同程度的污染,但是均符合国家 I、II 类饮用水质标准,是理想的饮用水源。

Table 1 Concentrations of Dissolved heavy metals in Poyang Lake( $\mu g/L$ )							
指标 Indicators	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
平均值 Average	1.43	0.052	2.21	2.67	0.81	28.82	
最大值 Max	3.24	0.091	4.74	4.89	2.37	77.99	
最小值 Min	0.84	0.027	1.76	1.15	0.20	7.99	
I 类水质标准" First-grade water quality	50	1	10	10	10	50	
天然淡水背景值 <sup>[12]</sup> Standard background value (dissolved)	2	0.07	0.5	1.8	0.2	10.0	

表1 鄱阳湖水体溶解性重金属水平

<sup>a</sup>国家饮用水质标准(GB3838-2002)

本研究与鄱阳湖不同时期以及国内外其它淡水水体溶解性重金属的比较结果见表 2。与鄱阳湖不同时 期相比,本研究中溶解性重金属的含量高于 2011 年鄱阳湖枯水期的水平<sup>[7]</sup>,这可能是由于丰水期鄱阳湖周边 农田施用的大量化肥以及流域重金属矿区的活动导致大量的重金属流入湖区,致使丰水期重金属水平升高, 这与洞庭湖的研究结果—致<sup>[13]</sup>,但是低于胡春华等<sup>[3]</sup>于 2010 年在鄱阳湖丰水期的研究结果,这可能是由于 采样时间和区域不同所致,该研究的采样点主要分布于各个支流的入湖口及湖岸。

与国内外其它水体相比(表2)<sup>[3,7,13-22]</sup>,鄱阳湖溶解性 As 的水平低于表中所列水体;Cd 的水平与太湖相当,Pb 与洞庭湖相当,但这两种重金属均高于匈牙利的 Balaton 湖,低于其它水体;Cr 的水平高于太湖、巢湖和洞庭湖,但是低于其它水体;Cu 的水平与太湖相当,高于巢湖、衡水湖和匈牙利的 Balaton 湖,低于其它水体; Zn 的水平高于汉江上游、太湖、巢湖、洞庭湖、丹江口水库和匈牙利的 Balaton 湖,但低于土耳其 Hazar 湖、美国 Texoma 湖和南非的 Zeekoevlei 湖。

3.2 鄱阳湖水体溶解性重金属间的相关关系

鄱阳湖水体中各溶解性重金属之间的相关性分析结果见表 3。如表 3 所示, Cu 与其它五种重金属(As、Cd、Cr、Pb、Zn)之间均存在显著的相关性(P<0.05), 但相关系数都比较低(0.27—0.56), 这表明 Cu 的来源或/

和地球化学行为与其它五种重金属之间存在一定的相似性,可能是由于其来源多样化所致。Cu 空间分布结 果显示(图2),鄱阳湖Cu的来源主要有长江、信江和饶河,此外船舶航运也是其中一个重要来源。因为已有 的研究表明,合金制造的船舶含有 Cu 和 Zn 两种重金属,他们之间的相关性常用来判断船舶对水质的影 响<sup>[23-24]</sup>。在本研究中,水体中 Cu 和 Zn 之间存在显著的相关性(P<0.05,r=0.27),这说明鄱阳湖 Cu 和 Zn 的 来源受到船舶的影响。As 与 Cr、Cu 和 Cd 之间都存在显著相关性(P<0.05), As 和 Cr 之间的相关系数达到了 0.8,这说明鄱阳湖 As 和 Cr 的来源相同,而且这两种元素的空间分布特征也证实了这一推论(图 2)。Pb 与 Cu、Cd和Zn之间均存在显著的相关性(P<0.05),这说明鄱阳湖Pb与Cu、Cd和Zn的来源和地球化学行为存 在一定的相似性。

表 2 鄱阳湖水体溶解性重金属浓度与国内外其它地区淡水中的比较

Table 2 Comparison of dissolved metals levels in Poyang Lake with other freshwater system (µg/L) 研究区域 Area  $\mathbf{Pb}$ Zn 参考文献 References As $\mathbf{Cd}$  $\mathbf{Cr}$ Cu 1.43 0.052 2.21 2.67 0.81 鄱阳湖 Poyang Lake 28.82 本研究 鄱阳湖 Poyang Lake \_ \_ 3.77 4.58 4.92 17.05 [3] 鄱阳湖 Poyang Lake 1.49 0.10 \_ 0.81 0.30 3.01 [7] 汉江上游 Upper Han River 6.56 0.64 12.68 12.46 10.97 [14] 太湖 Taihu Lake 0.047 1.29 2.88 8.77 [15] 巢湖 Chaohu Lake 0.89 0.73 1.55 7.56 [16] 洞庭湖 Dongting Lake 4.50 0.24 1.73 4.56 0.95 12.07 [13] 丹江口水库 Danjiangkou Reservoir 10.59 11.08 1.17 6.29 13.32 2.02 [17] 衡水湖 Hengshui Lake 2.88 BDL BDL 0.77 10.48 BDL [18] Hazar 湖,土耳其 Hazar Lake BDL 50.13 [19] Texoma 湖,美国 Texoma Lake USA <33 20 4 24 <15 59 [20] Balaton 湖,匈牙利 Balaton Lake, 0.002 0.48 0.09 0.85 [21] Zeekoevlei 湖,南非 Zeekoevlei Lake, 7 BDL 4 88.5 10.5 60.5 [22]

BDL:低于检测限:一未检测

表 3	鄱阳湖水体各溶解性重金属元素间的相关关系	

元素 Element	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
As	1					
Cd	$0.28^{\mathrm{b}}$	1				
Cr	0.80 <sup>a</sup>	0.25	1			
Cu	0.46 <sup>a</sup>	0.48 <sup>a</sup>	$0.48^{a}$	1		
Pb	0.11	0.37ª	0.06	0.56ª	1	
Zn	0.07	0.25	0.09	$0.27^{b}$	0 38 <sup>a</sup>	1

Table 3 Correlation coefficients of dissolved metals concentrations in water from Poyang Lake

加黑体的表示相关性显著; \*P<0.01, \*P<0.05

#### 3.3 鄱阳湖重金属空间分布格局

鄱阳湖溶解态重金属 As、Cd、Cu、Cr、Pb、Zn 空间分布规律如图 3 所示,不同种重金属之间的空间分布格 局存在差异。As 和 Cr 呈现相似的空间分布格局,其峰值均出现在1号号点(湖口,鄱阳湖与长江交汇处),在 整体上呈现北部大于南部的空间分布格局。这表明长江对鄱阳湖 As 和 Cr 的空间分布格局的影响较大,是鄱 阳湖水体 As 和 Cr 的一个重要来源。Cd 最大值出现在 43 号点(赣江西支河道入湖处),最小值出现在大湖 面,没有明显的空间分布规律,这可能是由于天然湖泊中 Cd 迁移性较强,其在沉积物中主要以弱酸提取态的 形式存在,较易从沉积物向上覆水中迁移<sup>[25-26]</sup>,而鄱阳湖水流较快,致使鄱阳湖中溶解性 Cd 随水流移动而呈 现一定程度的均匀分布。Cu的高值区出现在靠近长江、饶河和信江入湖口附近及都昌县附近区域,在整体上 呈现北部和南部高,中部低的格局。鄱阳湖溶解性 Cu 的这种空间分布格局是由于长江水中高水平的 Cu 浓



图 2 鄱阳湖溶解性 As、Fe、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的空间分布格局 Fig. 2 Spatial variations of dissolved As, Fe, Cd, Cu, Pb, and Zn in Poyang Lake

度,饶河上游(乐安江)的德兴铜矿以及位于信江的永平铜矿开采后的废水<sup>[1]</sup>,以及都昌县附近区域的人类活动(主要是船舶航运;因为该区域位于都昌县的一个码头附近,该码头停有大量的渔船、湖上加油站以及船只的维修基地)共同作用的结果。已有的研究表明,合金制造的船舶含有 Cu 和 Zn 两种重金属,他们之间的相

关性常用来判断船舶对水质的影响<sup>[23-24]</sup>。在本研究中,Cu和Zn之间的显著相关性,这表明船舶航运是鄱阳湖重金属Cu和Zn的一个重要来源。鄱阳湖溶解性Zn在整体上呈现南部大于北部,中间航道区域较高的空间分布格局,这说明船舶航运对鄱阳湖溶解性Zn的空间分布格局具有较大的影响。大部分区域(40%的样点)溶解性Pb的浓度处于0.2—0.5 μg/L之间,在整体上呈现南部大于北部的空间分布格局。

3.4 鄱阳湖重金属健康风险评估

鄱阳湖水体中重金属通过饮用水途径所引起的个人年均风险见表4。由表4可以看出,由致癌物As、Cd、 Cr 通过饮用水途径所引起的健康风险值范围分别为0.66×10<sup>-5</sup>—2.54×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>、0.86×10<sup>-7</sup>—2.91×10<sup>-7</sup> a<sup>-1</sup>、3. 77×10<sup>-5</sup>—10.14×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,均值分别为1.12×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>、1.66×10<sup>-7</sup> a<sup>-1</sup>和4.74×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>。鄱阳湖所有站点的As和 Cd 均低于国际辐射防护委员会(ICRP)(5×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>)最大可接受风险,而Cr 的均值(4.74×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>)接近了 ICRP 的最大可接受风险。由非致癌物Cu、Pb和Zn引起的健康危害个人年均风险中,Pb与Cu相差不大,Zn 最小。Cu、Pb和Zn健康风险值范围分别为1.41×10<sup>-10</sup>—6.17×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>、0.87×10<sup>-10</sup>—10.35×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>、1.63×  $10^{-11}$ —15.85×10<sup>-11</sup> a<sup>-1</sup>,均值分别为3.26×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>、3.54×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>和5.87×10<sup>-11</sup> a<sup>-1</sup>,均远低于ICRP的最大可接 受风险(5×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>)。鄱阳湖由As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn引起的健康总风险均值为5.88×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,超过了ICRP 的 最大可接受风险,其中由Cr引起的健康风险占总风险值比例的80.61%,As的为19.11%,由Cr和As两种元 素引起的健康风险之和占总风险比例高达99.72%。上述的研究结果表明,鄱阳湖由化学致癌物引起的健康 风险占绝对主导地位;鄱阳湖健康风险最大的是Cr,其次是As,由Cr和As引起的健康风险值比其它重金属 元素高出2=6个数量级,这两种元素是鄱阳湖主要的健康污染物,需引起风险决策部门的重视。本研究的风 险评价结果与胡春华等<sup>[3]</sup>和李鸣等<sup>[5]</sup>在鄱阳湖的评价结果—致。

表 4 鄱阳湖致癌物质和非致癌物质通过饮用水途径所致健康危害的个人年风险 Table 4 Carcinogens and non-carcinogens healthy risk through drinking water in Poyang Lake

元素 Elements	As×10 <sup>-5</sup> a <sup>-1</sup>	$Cd \times 10^{-7} a^{-1}$	Cr×10 <sup>-5</sup> a <sup>-1</sup>	Cu×10 <sup>-10</sup> a <sup>-1</sup>	$Pb \times 10^{-10} a^{-1}$	Zn×10 <sup>-11</sup> a <sup>-1</sup>	总风险 Total risks×10 <sup>-5</sup> a <sup>-1</sup>
最小值 Min	0.66	0.86	3.77	1.41	0.87	1.63	-
最大值 Max	2.54	2.91	10.14	6.17	10.35	15.89	-
平均值 Average	1.12	1.66	4.74	3.26	3.54	5.87	5.88

#### 4 结论

(1)鄱阳湖溶解性 As、Cd、Cr、Cu 和 Pb 均符合国家 I 类水质标准,大部分区域的 Zn 达到国家 I 类水质标准,仅少数区域 Zn 处于国家 I-II 类水质标准的范围内。

(2)鄱阳湖溶解态重金属存在明显的空间变异性,As和Cr在整体上呈现北部大于南部的空间分布格局; Cu呈现北部和南部高,中部低的格局;Pb和Zn均呈现南部大于北部的空间分布格局,且Zn还呈现中间航道 区域较高的现象。

(3)风险评估结果显示,鄱阳湖 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 引起的健康年均风险值均低于 ICRP 推荐值,而 Cr 的个人年均风险值接近 ICRP 推荐值;鄱阳湖由 Cr 和 As 引起的健康风险之和占总风险比例达到 99.72%,是 主要的健康污染物,需引起风险决策部门的重视。

致谢:感谢中国科学院鄱阳湖湖泊湿地综合研究站在样品采集、处理和分析中给予的大力支持和帮助。

#### 参考文献(References):

[1] 李明俊, 耿军军, 叶皓, 罗旭彪. 鄱阳湖流域重金属污染研究现状分析. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 171-175.

[2] 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. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 427-430.

- [3] 胡春华,周鹏,黄萍,杜洁,周文斌.都阳湖流域溶解态重金属行为特征及健康风险评价.农业环境科学学报,2012,31(5):1009-1014.
- [4] 李鸣,刘琪璟,周文斌. 鄱阳湖流域水体重金属污染物健康风险评价. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18278-18280, 18332-18332.
- [5] 李鸣, 刘琪璟. 鄱阳湖水体和底泥重金属污染特征与评价. 南昌大学学报: 理科版, 2010, 34(5): 486-489, 494-494.
- [6] 李玉斌,冯流,刘征涛,周俊丽.中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究.环境科学与技术,2012,35(2):200-205.
- [7] Zhang D W, Wei Y H, Zhang L, Luo L G, Chen Y W, Tu T H. Distribution of heavy metals in water, suspended particulate matter and sediment of Poyang Lake, China. Fresenius Environmental Bulletin, 2012, 21(7a): 1910-1919.
- [8] USEPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food. Washington D C: Office of Pesticide Programs USEPA, 2000.
- [9] USEPA. Superfund public health evaluation manual. Washington D C: Office of Research and Development U. S. EPA, EPAP540P1286P060, 1986.
- [10] WHO. Guidelines for drinking-water quality: incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. Geneva: World Health Organization, 2006.
- [11] USEPA. Risk based concentration table moved. 2006. http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbc/rbc1006.pdf.
- [12] 李健,曾北危,姚岳云,张立成,丘昌强,钱杏珍.洞庭湖水系水体环境背景值调查研究.环境科学,1986,7(4):62-68.
- [13] 申锐莉,鲍征宇,周旻,谢淑云.洞庭湖湿地水相中重金属的地球化学评价.人民长江,2007,38(11):121-123.
- [14] 卜红梅,朱明勇,张全发.汉江上游水中溶解性重金属的空间分布及来源分析.中国给水排水,2010,26(9):58-61,64-64.
- [15] Yu T, Zhang Y, Meng W, Hu X N. Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(7): 4367-4382.
- [16] Li G L, Liu G J, Zhou C C, Chou C L, Zheng L G, Wang J Z. Spatial distribution and multiple sources of heavy metals in the water of Chaohu Lake, Anhui, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(5): 2763-2773.
- [17] Li S Y, Xu Z F, Cheng X L, Zhang Q F. Dissolved trace elements and heavy metals in the Danjiangkou Reservoir, China. Environmental Geology, 2008, 55(5): 977-983.
- [18] Zhang M Y, Cui L J, Sheng L X, Wang Y F. Distribution and enrichment of heavy metals among sediments, water body and plants in Hengshuihu Wetland of Northern China. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 563-569.
- [19] Özmen H, Külahcı F, Çukurovall A, Doğru M. Concentrations of heavy metal and radioactivity in surface water and sediment of Hazar Lake (Elazi ğ, Turkey). Chemosphere, 2004, 55(3): 401-408.
- [20] An Y J, Kampbell D H. Total, dissolved, and bioavailable metals at Lake Texoma marinas. Environmental Pollution, 2003, 122(2): 253-259.
- [21] Nguyen H L, Leermakers M, Osún J, Török S, Baeyens W. Heavy metals in Lake Balaton: Water column, suspended matter, sediment and biota. Science of the Total Environment, 2005, 340(1/3): 213-230.
- [22] Das S K, Routh J, Roychoudhury A N, Val Klump J. Major and trace element geochemistry in Zeekoevlei, South Africa: A lacustrine record of present and past processes. Applied Geochemistry, 2008, 23(8): 2496-2511.
- [23] 王小静, 张帅, 简慧敏, 姚庆祯, 于立霞. 大辽河口溶解态重金属的变化特征及影响因素研究. 中国海洋大学学报, 2011, 41(10): 79-86.
- [24] 周静,杨东,彭子成,宋少华,周卫建,贺剑峰,刘羿,刘桂健.西沙海域海水中溶解态重金属的含量及其影响因子.中国科学技术大学 学报,2007,37(8):1036-1042.
- [25] 张大文,罗林广,张莉,魏益华,唐利锋,陈云霞.都阳湖表层沉积物中砷及重金属赋存形态及其潜在生态风险.长江流域资源与环境, 2014,23(8):1132-1138.
- [26] 徐景阳. 北方某水库表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析. 环境监测管理与技术, 2012, 24(5): 28-33.