

# 龙江河水体重金属污染状况及健康风险评价\* Assessment on the Status and Health Risks of Heavy Metal Pollutions of Longjiang River

卢秋<sup>1,3</sup>, 邓渠成<sup>2</sup>, 卢苇<sup>1</sup>, 黄勇<sup>3</sup>, 邓超冰<sup>1,3\*\*</sup>, 王晓飞<sup>3</sup>, 王云龙<sup>3</sup>  
LU Qiu<sup>1,3</sup>, DENG Qucheng<sup>2</sup>, LU Wei<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>, DENG Chaobing<sup>1,3</sup>,  
WANG Xiaofei<sup>3</sup>, WANG Yunlong<sup>3</sup>

(1. 广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004; 2. 澳大利亚昆士兰大学地理、规划与环境管理学院, 布里斯班 4072; 3. 广西壮族自治区环境监测中心站, 广西南宁 530028)

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. School of Geography, Planning and Environmental Management, The University of Queensland, Brisbane, QLD, 4072, Australia; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Prefecture Environmental Monitoring Centre, Nanning, Guangxi, 530028, China)

**摘要:**【目的】以广西龙江河水体为研究对象,对龙江河地表水体中 As、Cd、Zn、Pb、Cu 等重金属污染物含量进行分析测定,以阐明龙江河水体重金属污染物的分布特征和风险水平。【方法】运用内梅罗综合指数法、健康风险评估模型对龙江河水质等级和水中重金属引起的健康风险水平进行评价。【结果】各采样点的重金属含量均符合Ⅱ类水质标准,龙江河13个采样点水质均属重金属未污染状态,水质清洁。龙江河重金属 As 和 Zn 的健康风险值大于 Cd、Pb、Cu 的健康风险值,但均低于最大可接受风险水平  $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。【结论】龙江河水体重金属综合污染指数与健康风险值所反映的水质状况规律一致,均表现为中下游较上游的结果要稍高一些。As 是龙江河水环境产生健康风险的主要污染物质,应该作为龙江河水环境风险管理的重点对象。

**关键词:** 龙江河 重金属 内梅罗指数法 健康风险评估

**中图分类号:** X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2016)05-0478-07

**Abstract:**【Objective】The purpose of this research is to investigate the quality of the water body of the Longjiang River in Guangxi. Concentrations of heavy metals As, Cd, Zn, Pb and Cu in the water surface of Longjiang River were analyzed to figure out the distribution characteristics of heavy metal pollutants in this area.【Methods】The Nemerol comprehensive index method and the health risk assessment model were adopted to evaluate the grade of water quality of Longjiang River and the health risk level imposed by heavy metals in the water.【Results】The

concentrations of heavy metals in each sampling point conform to grade Ⅱ according to water quality standards. The water samples collected on 13 sampling points of the Longjiang River are clean and not polluted by heavy metals. The health risk values of heavy metals As and Zn are greater than that of Cd, Pb, and Cu in the Longjiang River, but still lower than the maximum acceptable risk level of  $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ .

收稿日期:2016-09-17

修回日期:2016-10-20

作者简介:卢秋(1985—),女,在职研究生,工程师,主要从事环境监测与保护。

\* 广西自然科学基金重大项目“西江流域水环境重金属污染机制与调控”(2013GXNSFEA053001)资助。

\*\* 通信作者:邓超冰(1962—),男,教授级高工,主要从事环境污染监测技术研究, E-mail: dcb715@sina.com。

**【Conclusion】**The disciplinarian of the heavy metals distribution in the Longjiang River reveals that the downstream of the river possessed slightly higher values than the upstream, which is consistent per the comprehensive pollution index and the health risk value. As is the major pollutant of the health risk of Longjiang River, and it should be regarded as the key object of environmental risk management of Longjiang River.

**Key words:** Longjiang River, heavy metals, Nemerom comprehensive index method, health risks

## 0 引言

**【研究意义】**龙江发源于贵州省月亮山西南侧,系柳江支流,属珠江水系,是西南岩溶区较典型的喀斯特水文盆地,是一个具有生态、经济价值的重要河流,也是河池、柳州以及下游地区主要的生产生活用水水源。近年来,随着工业化的发展,龙江河接纳大量的工业生产废水和城镇生活污水。进入水环境中的有毒有害物质,尤其是水体中的重金属,对水生生物产生很大危害,同时还会通过皮肤接触、饮用水、食物链传递等途径直接或间接地影响人类的健康。如砷有致癌作用;镉可引起泌尿系统的功能变化,也是痛痛病的致病因子;铅能导致贫血症、神经机能失调和肾损伤。因此,研究水体中重金属的污染情况及潜在风险,为环境监管部门提供技术支持,对人们的用水安全和健康具有重要意义。**【前人研究进展】**目前,国内外研究人员运用多种评价方法对河流水质进行评价。如者萌等<sup>[1]</sup>运用单因子污染评价和内梅罗污染指数法对西藏羊卓雍错流域水体水质进行评价。吕晓磊等<sup>[2]</sup>运用模糊物元模型对扎龙湿地水体中重金属污染进行评估,其评价结果客观地反映该地区重金属综合污染现状。申剑等<sup>[3]</sup>根据传统灰色关联分析原理,采用“中心化”的灰色关联无量纲化处理方法,对丹江口流域 2012 年河流中 11 个典型断面水体污染因子进行评价,结果表明评价水域的水质满足国家南水北调水源地水质标准要求。庞振凌等<sup>[4]</sup>运用层次分析法对南水北调中线水源区的水质进行综合评价,其所得结果与实际基本相符,并认为该方法值得推广应用。杨松芹等<sup>[5]</sup>运用 BP 神经网络法对郑州市主要生活饮用水源地富营养化进行预测和预警,其预测值与实测值拟合度较好。杨柳等<sup>[6]</sup>对北京市温榆河水质综合评价方法进行研究,结果表明主要污染物水质标识指数法更适合对水质较差的河流进行水质评价,能够定量体现河流水质差异性。胡英等<sup>[7]</sup>运用健康风险评价法对桂林毛村地下水水质进行风险评价,认为 Cd 是主要的风险污染物。**【本研究切入点】**目前,对龙江的研究报道主要集中在底栖硅藻群落、水资源潜力、镉污染研究、浮游植物群落及富营养化、

突发事件风险识别与预警、水质氮磷风险评价等方面<sup>[8-13]</sup>,对整个龙江河水环境的重金属污染研究较少,对重金属污染状况及健康风险评价更是鲜见。2012 年发生的龙江河镉污染事件,引发人们对水体中重金属污染情况的极大关注,因此本研究就龙江河水体中重金属的污染状况进行研究,并对健康风险进行预测。**【拟解决的关键问题】**对龙江河流表层水中 As、Cd、Zn、Pb、Cu 等重金属含量进行监测分析,运用内梅罗综合指数法、健康风险评价模型对龙江河水质等级和水中重金属引起的健康风险水平进行评价,以期为该河流水环境风险管理提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样点设置

根据人口分布情况、干支流分布、污染物排放口位置等因素,于 2014 年 7 月沿龙江河河流流向设置 13 个采样点作为调查断面(图 1),分别为拔贡(六甲上游, D1)、六甲坝中(六甲上游, D2)、六甲坝首(D3)、三江口(龙江与大环江汇合口下游, D4)、拉浪坝首(D5)、小环江汇入龙江下游 500 m(怀远, D6)、叶茂坝首(D7)、洛东坝首 1(D8)、洛东坝首 2(D9)、洛东坝中(D10)、杨民(D11)、糯米滩水电站坝(D12)、北浩(D13)。

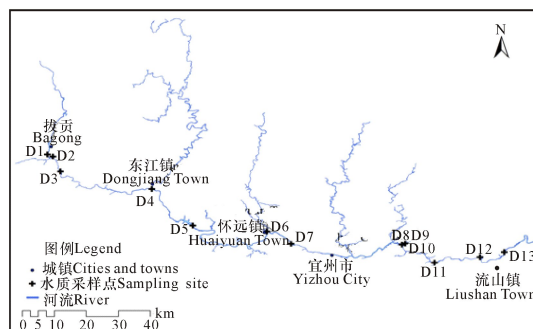


图 1 龙江河采样点位

Fig. 1 Sampling site of Longjiang River

### 1.2 样品采集与分析

水样采集:首先将有机玻璃深水采样器用采样点的水样润洗 3 次,然后垂直放入河流水面下 0.5 m 处,待采样器充满后提出水面;将采样器中的水样分装于清洗干净的聚四氟乙烯塑料瓶中,并立即加入数

滴浓硝酸将水样的 pH 值调至 2 以下,按照《水与废水监测分析方法》(第四版)的要求密封保存,妥善带回实验室后置于 4℃ 冰箱中保存。

样品分析:配制 As、Cd、Zn、Pb、Cu 等标准物质混合溶液,取浓度梯度为 1 μg/L、5 μg/L、10 μg/L、20 μg/L、50 μg/L、100 μg/L 的标准物质混合溶液,采用电感耦合等离子质谱仪 Agilent7700E ICP-MS 进行分析测定,并绘制标准曲线。每个水样分别经过 0.45 μm 滤膜过滤后上机分析,根据标准曲线强度和浓度间的关系计算出各元素的质量浓度。

在测定过程中,采用国家标准物质研究中心提供的标准物质进行质量控制,回收率为 97%~101%。为保证分析数据的准确性和可靠性,在测定样品过程中,每测定 10 个样品,插入测试 1 个标准样品。

### 1.3 水环境质量评价模型

#### 1.3.1 单因子评价法

通过单因子评价<sup>[14]</sup>,可以确定主要的重金属污染物及其危害程度。一般以污染指数来表示,即重金属含量实测值和对应的评价标准值的比值:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为  $i$  重金属元素的污染指数;  $C_i$  为  $i$  重金属元素含量实测值;  $S_i$  为  $i$  重金属元素在地表水环境质量标准中的三级标准值。

#### 1.3.2 内梅罗综合指数评价法

内梅罗综合指数评价法具备数学过程简洁明了的优点<sup>[15]</sup>,是以单因子评价法为基础,兼顾极值并突出考虑污染程度最大的因子,对水体中的各种指标参数进行综合评价的方法<sup>[16]</sup>。其计算公式为

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\bar{p}_i)^2 + (P_{\text{imax}})^2}{2}}, \quad (2)$$

$$\bar{p}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \quad (4)$$

式(2)中,  $P_{\text{综}}$  是内梅罗综合指数;  $P_{\text{imax}}$  为重金属元素

表 1 内梅罗综合指数评价表

Table 1 Nemer index level

	水质等级和类别 Water quality classification and grades				
	清洁(I) Clean	轻污染(II) Slight pollution	污染(III) Pollution	中污染(IV) Moderately pollution	重污染(V) Serious pollution
内梅罗综合指数 $P_{\text{综}}$ Nemer index level	$P_{\text{综}} < 0.74$	$0.74 \leq P_{\text{综}} < 0.92$	$0.92 \leq P_{\text{综}} < 1$	$1 \leq P_{\text{综}} < 1.73$	$\geq 1.73$

污染指数中的最大值;  $\bar{p}_i$  为所有重金属元素的污染指数平均值; 式(3)中,  $P_i$  为  $i$  重金属元素的污染指数; 式(4)中各符号的含义同式(1)。

选取 As、Cd、Cu、Zn、Pb 等 5 种重金属元素作为龙江河水水质污染程度的评价因子,以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中这 5 种元素的 III 类水质标准值作为标准,计算各类水标准值对应的内梅罗指数(表 1)。将内梅罗综合指数与各类水的污染类型相比较,可确定水质污染等级。

### 1.4 水环境健康风险评价模型

目前国内外常用美国环保局推荐的健康风险评价模型来评价水环境健康风险<sup>[17]</sup>。水环境健康风险评价<sup>[18]</sup>主要是针对水环境中对人体有害的物质,包括化学致癌污染物和非致癌污染物<sup>[19]</sup>。

通过饮用水途径摄入的化学致癌污染物健康危害模型:

$$R_c = [1 - \exp(-D_m \cdot q_c)] / ED, \quad (5)$$

式(5)中,  $R_c$  为化学致癌物质  $c$  经饮用水途径摄入的人均年致癌风险,  $a^{-1}$ ;  $D_m$  为化学致癌物质  $c$  经饮用水途径摄入的单位体重日均暴露剂量,  $mg/(kg \cdot d)$ ;  $q_c$  为化学致癌物质  $c$  经饮用水途径摄入的致癌强度系数,  $kg \cdot d/mg$ ; ED 为人均寿命(2010 年公布的广西人均寿命为 70),  $a$ 。

通过饮用水途径摄入的非致癌污染物健康危害模型:

$$R_n = (D_m / RFD_n) \cdot 10^{-6} / ED, \quad (6)$$

式(6)中,  $R_n$  为非致癌物质  $n$  经饮用水途径摄入的人均年致癌风险,  $a^{-1}$ ;  $RFD_n$  为非致癌物质  $n$  经饮用水途径摄入的单位体重日均暴露剂量,  $mg/(kg \cdot d)$ 。

饮用水途径摄入的单位体重日均暴露剂量  $D_m$  按下式计算:

$$D_m = Q \cdot C_m / W, \quad (7)$$

式(7)中,  $Q$  为成年人日均饮水量(建议值为 2.2),  $L$ ;  $C_m$  为化学致癌物或非致癌物实际浓度,  $mg/L$ ;  $W$  为人均体重(建议值为 70)<sup>[18]</sup>,  $kg$ 。

根据国家癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)编制的分类系统,As、Cd 属于化学致癌物,致癌强度系数分别为 15 和 6.1;Zn、Pb 和 Cu 属于非致癌物,致癌强度系数分别为  $3 \times 10^{-1}$ ,  $1.4 \times 10^{-3}$  和  $5 \times 10^{-3}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同采样点的重金属含量分布

从表 2 中可以看出,龙江河表层水中各采样点 Cd、As、Pb、Cu、Zn 等 5 种元素的浓度均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准要求。

表 2 龙江河表层水中各采样点重金属的浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )

Table 2 The concentrations of heavy metals in the surface water of the Longjiang River ( $\mu\text{g/L}$ )

采样点 Sampling site	Cd	As	Pb	Cu	Zn
D1	ND	0.70	ND	ND	ND
D2	ND	0.83	ND	ND	ND
D3	ND	0.91	ND	0.66	4.1
D4	0.12	1.66	0.82	ND	11.2
D5	ND	1.75	ND	ND	ND
D6	ND	0.81	ND	ND	ND
D7	0.12	1.59	ND	ND	75.6
D8	ND	1.47	ND	ND	ND
D9	ND	1.56	ND	ND	ND
D10	ND	1.59	ND	ND	ND
D11	ND	1.57	ND	ND	ND
D12	ND	1.52	ND	ND	3.2
D13	ND	2.8	0.8	0.4	8.56
平均值 Mean values	ND	1.44	0.12	ND	7.90
标准限值(II类) Standard limited values(grade II)	5	50	10	1 000	1 000

注:ND 表示未检出;各重金属检出限,Cd 0.06  $\mu\text{g/L}$ 、As 0.09  $\mu\text{g/L}$ 、Pb 0.07  $\mu\text{g/L}$ 、Cu 0.09  $\mu\text{g/L}$ 、Zn 0.8  $\mu\text{g/L}$

Note:ND indicates that not detected; Detection limit of each heavy metal,Cd 0.06  $\mu\text{g/L}$ 、As 0.09  $\mu\text{g/L}$ 、Pb 0.07  $\mu\text{g/L}$ 、Cu 0.09  $\mu\text{g/L}$ 、Zn 0.8  $\mu\text{g/L}$

从表 3 结果可以看出,龙江河水体中的重金属含量之间存在一定的相关性。其中 Zn 和 Cd 在 0.01 水平上具有显著的相关性,Pb 和 As 在 0.05 水平上具有显著相关性。由此推断 Zn 和 Cd、Pb 和 As 分别具有相似的污染来源。

从图 2 各个采样点重金属浓度分布情况来看,D3、D4、D5、D7、D13 这 5 个点位的重金属浓度均呈现不同程度的升高趋势。这些采样断面上游分布着

矿山开采、冶炼厂、化工厂等企业,可能是由于生产废水的汇入影响水体中重金属的含量,这与相关性分析中 Zn 和 Cd、Pb 和 As 的同源性分析一致。虽然目前龙江河的水质状况符合 II 类水质标准要求,但应加强监管这些点位上游企业外排废水的情况。

表 3 水中重金属的相关性分析

Table 3 The correlation analysis of heavy metals in water

	Cd	As	Pb	Cu	Zn
Cd	1				
As	0.146	1			
Pb	0.417	0.625 *	1		
Cu	-0.175	0.122	0.235	1	
Zn	0.760 **	0.166	0.038	-0.050	1

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note:\*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level (bilateral),\* indicates a significant correlation at the 0.05 level (bilateral)

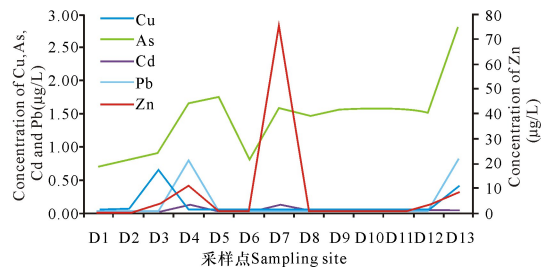


图 2 龙江河水体中重金属浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of heavy metals in the water of Longjiang River

### 2.2 不同采样点重金属污染评价

从表 4 可以看出,无论单个重金属元素的污染指数  $P_i$  还是多元素综合污染指数  $P_{综}$ ,均小于 0.74,龙江河 13 个采样点水质均属重金属未污染状态,水质清洁。

### 2.3 不同采样点重金属健康风险评价

根据健康风险评价模型、致癌强度系数和龙江河水体中重金属的测定浓度,可计算出龙江河水体中各个采样点重金属通过饮水途径所引起的健康风险,测定浓度低于方法检出限时,按检出限的一半进行计算。从表 5 可看出,所测重金属的健康风险排序为  $As > Zn > Cd > Cu > Pb$ 。

由致癌物通过饮水途径所引起的健康风险值以 As 最大,为  $4.71 \times 10^{-6} \sim 1.88 \times 10^{-5} a^{-1}$ ;Cd 次之,为  $8.22 \times 10^{-8} \sim 3.29 \times 10^{-7} a^{-1}$ 。所有采样点的健康风险值均低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险水平  $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ ,但 As 在 D4、D5、D7、D9、D10、D11、D12、D13 等采样点处所引起的健康风险值超过荷兰建设和环境部、瑞典环保局推荐的最大可接受水平  $1.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。由此可见,As 是龙



表 4 龙江河水体重金属污染指数及水质等级

Table 4 Heavy metal pollution index and the level of water quality

采样点 Sampling site	单因子污染指数 $P_i$ Single factor pollution index					综合指数 $P_{综}$ Composite index	水质等级 The level of water quality
	Cd	As	Pb	Cu	Zn		
D1	0.012	0.014	0.0014	0.00009	0.0008	0.011	清洁 Clean
D2	0.012	0.017	0.0014	0.00009	0.0008	0.013	清洁 Clean
D3	0.012	0.018	0.0014	0.00066	0.0041	0.014	清洁 Clean
D4	0.024	0.033	0.0164	0.00009	0.0112	0.026	清洁 Clean
D5	0.012	0.035	0.0014	0.00009	0.0008	0.026	清洁 Clean
D6	0.012	0.016	0.0014	0.00009	0.0008	0.012	清洁 Clean
D7	0.024	0.032	0.0014	0.00009	0.0756	0.029	清洁 Clean
D8	0.012	0.029	0.0014	0.00009	0.0008	0.021	清洁 Clean
D9	0.012	0.031	0.0014	0.00009	0.0008	0.023	清洁 Clean
D10	0.012	0.032	0.0014	0.00009	0.0008	0.024	清洁 Clean
D11	0.012	0.031	0.0014	0.00009	0.0008	0.023	清洁 Clean
D12	0.012	0.030	0.0014	0.00009	0.0032	0.022	清洁 Clean
D13	0.012	0.056	0.0160	0.00040	0.0086	0.042	清洁 Clean

表 5 致癌物和非致癌物健康风险值

Table 5 The health risk values of carcinogens and non carcinogens

采样点 Sampling site	Cd	As	Pb	Cu	Zn	总计 Summation
D1	$8.22 \times 10^{-8}$	$4.71 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$4.85 \times 10^{-6}$
D2	$8.22 \times 10^{-8}$	$5.59 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$5.73 \times 10^{-6}$
D3	$8.22 \times 10^{-8}$	$6.13 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.48 \times 10^{-9}$	$5.52 \times 10^{-7}$	$6.77 \times 10^{-6}$
D4	$3.29 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.15 \times 10^{-10}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.51 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-5}$
D5	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.18 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$1.19 \times 10^{-5}$
D6	$8.22 \times 10^{-8}$	$5.45 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$5.59 \times 10^{-6}$
D7	$3.29 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.12 \times 10^{-5}$
D8	$8.22 \times 10^{-8}$	$9.90 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^{-5}$
D9	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.05 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$1.06 \times 10^{-5}$
D10	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^{-5}$
D11	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.06 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$5.39 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-5}$
D12	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-11}$	$1.01 \times 10^{-10}$	$4.31 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-5}$
D13	$8.22 \times 10^{-8}$	$1.88 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-10}$	$8.98 \times 10^{-10}$	$1.15 \times 10^{-6}$	$2.00 \times 10^{-5}$
平均值 Mean value	$1.20 \times 10^{-7}$	$9.71 \times 10^{-6}$	$9.69 \times 10^{-11}$	$2.69 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-5}$

河水环境产生健康风险的主要污染物质,应该作为龙江河水环境风险管理的重点对象。

从表 5 中还可以看出,由非致癌物 Pb、Cu、Zn 通过饮水途径所引起的健康风险以 Zn 最大,Cu 次之,Pb 最小。其中 Cu、Pb 对人体健康的个人年风险主要集中在  $10^{-10} \sim 10^{-11} a^{-1}$ ,Cu、Pb 所引起的健康风险不大,不会对人体健康构成明显危害。而 Zn 在 D7 采样点处所引起的健康风险值超过荷兰建设和环境部、瑞典环保局推荐的最大可接受水平  $1.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ ,需对 D7 点位附近的矿山开采、冶炼等企业进行重点监管,防止企业的污染废水进入龙江河中,产生更大的健康风险。

从多种重金属元素的整体健康风险值(图 3)可看出,除 D1、D2、D3、D6 采样点外,其余点位的整体

健康风险均高于  $1.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ ,说明龙江河中下游较上游的总健康风险要高。

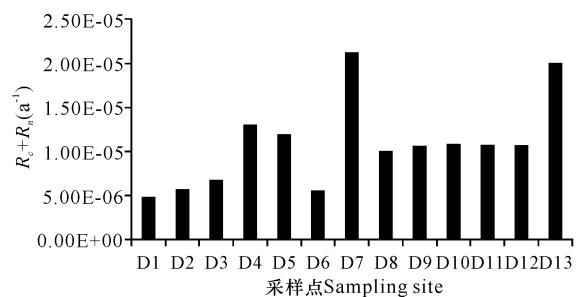


图 3 龙江河多种重金属元素整体健康风险值  
Fig. 3 Overall health risk value of heavy metal elements in Longjiang River

### 3 结论

(1)龙江河各采样点 As、Cd、Zn、Pb、Cu 5 种元素的浓度均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准要求。龙江河 13 个采样点水质重金属均属未污染状态,水质清洁。

(2)龙江河所测重金属的健康风险排序为  $As > Zn > Cd > Cu > Pb$ 。所有采样点的健康风险值均低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险水平  $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。As 是龙江河水环境产生健康风险的主要污染物质,应该作为龙江河水环境风险管理的重点对象。

(3)龙江河水体重金属综合污染指数与健康风险值所反映的水质状况规律一致,均表现为中下游较上游的结果要稍高一些。虽然目前龙江河的水质状况良好,但应加强监管 D3、D4、D5、D7、D13 5 个点位上游企业外排废水情况。

#### 参考文献:

[1] 者萌,张雪芹,孙瑞,等. 西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子[J]. 湖泊科学,2016,28(2):287-294.  
ZHE M,ZHANG X Q,SUN R,et al. Assessment of water quality and the pollution factors of waters in YamzhogYumco Basin, Tibet [J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(2):287-294.

[2] 吕晓磊,马放,王立,等. 模糊物元模型在湿地水体污染评价中的应用[J]. 环境科学与技术,2012,35(7):181-185.  
LV X L,MA F,WANG L,et al. Application of AHP based on Fuzzy Matter Element in evaluation of water quality of Zhalong Wetland [J]. Environmental Science & Technology,2012,35(7):181-185.

[3] 申剑,史淑娟,周扬,等. 基于改进灰色关联分析法的丹江口流域地表水环境质量评价[J]. 中国环境监测,2014,30(5):41-46.  
SHEN J,SHI S J,ZHOU Y,et al. Surface water environmental quality assessment of Danjiangkou Valley based on improved grey correlation analysis [J]. Environmental Monitoring in China,2014,30(5):41-46.

[4] 庞振凌,常红军,李玉英,等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报,2008,28(4):1810-1819.  
PANG Z L,CHANG H J,LI Y Y,et al. Analytical hierarchy process(AHP)evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north,China [J]. China Acta Ecologica Sinica,2008,28(4):1810-1819.

[5] 杨松芹,张慧珍,巴月,等. 水体富营养化状况的人工神

神经网络预测模型的建立[J]. 卫生研究,2008,37(5):543-545.  
YANG S Q,ZHANG H Z,BA Y,et al. Establishment of the predictive model of source eutrophication using artificial neural network [J]. Journal of Hygiene Research, 2008,37(5):543-545.

[6] 杨柳,宋健飞,宋波,等. 主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用[J]. 环境科学与技术,2015,38(11):239-245.  
YANG L,SONG J F,SONG B,et al. Primary pollutant water quality identification index method and its application to comprehensive evaluation of river water quality [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(11):239-245.

[7] 胡英,祁士华,张俊鹏,等. 我国桂林毛村地下河重金属健康风险评价[J]. 环境化学,2010,29(3):392-396.  
HU Y,QI S H,ZHANG J P,et al. Health risk assessment of heavy metals in Maocun underground river of Guilin China [J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(3):392-396.

[8] 易燃,蔡德所,张永祥,等. 龙江底栖硅藻群落特征及与环境因子的关系[J]. 环境科学与技术,2015,38(4):40-46,78.  
YI R,CAI D S,ZHANG Y X,et al. Benthic diatom assemblages distribution in Longjiang River, in relation to environmental factors [J]. Environmental Science & Technology,2015,38(4):40-46,78.

[9] 钱小鄂,吴少斌. 广西龙江流域水环境状况及地下水资源潜力评价[J]. 广西地质,2001,14(4):37-40,45.  
QIAN X E,WU S B. Water environment and potential of water resources in Longjiang River watershed of Guangxi [J]. Guangxi Geology,2001,14(4):37-40,45.

[10] 袁小琴,彭斌. 龙江镉污染团迁移及柳州市供水风险控制分析[J]. 广西水利水电,2014(2):86-88.  
YUAN X Q,PENG B. Cadmium contamination mass migration in Longjiang River and the water supply risk control analysis for Liuzhou City [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2014(2):86-88.

[11] 夏新建,邓渠成,韦锋,等. 龙江河春季浮游植物群落特征及其富营养化评价[J]. 广西科学,2016,23(2):150-155.  
XIA X J,DENG Q C,WEI F,et al. Phytoplankton community structure and eutrophication of Longjiang River in Spring [J]. Guangxi Sciences,2016,23(2):150-155.

[12] 李丽和,周小宁,廖平德,等. 龙江河流域水环境突发事件智能监控预警系统构建研究[J]. 环境监测管理与技术,2015,27(3):32-36.

- LI L H, ZHOU X N, LIAO P D, et al. Study on the construction of intelligent monitoring and early warning system for water environmental emergencies in the Longjiang River Basin [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2015, 27(3): 32-36.
- [13] 赵学敏, 马千里, 姚玲爱, 等. 龙江河水体中氮磷水质风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 233-238.
- ZHAO X M, MA Q L, YAO L A, et al. Water quality risk assessment based on nitrogen and phosphorus in Longjiang River [J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1): 233-238.
- [14] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Environmental Quality Standards for Surface Water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 孟春芳. 用内梅罗指数法评价武陟县境内沁河水质[J]. 河南水利与南水北调, 2015(16): 3-4.
- MENG C F. Appraising the water quality of Qin River in Wuzhi County using Nemerow index method [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2015(16): 3-4.
- [16] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 38-40.
- XU B, LIN C Y, MAO X W. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake [J]. Water Resources protection, 2014, 30(2): 38-40.
- [17] 秦普丰, 李细红, 侯红, 等. 硫酸锰化工厂遗址周围水体重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 395-400.
- QIN P F, LI X H, HOU H, et al. Health risk of heavy metal pollution in water around an abandoned manganese sulfate chemical plant site [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(4): 395-400.
- [18] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1177-1184.
- LI Y L, LIU J L. Health risk assessment on heavy metal pollution in the water environment of Luan River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1177-1184.
- [19] 李涛, 石磊, 马中, 等. 海浪河水环境重金属污染健康风险评价[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5521-5526.
- LI T, SHI L, MA Z, et al. Health risk assessment on heavy metal pollution in water environment of Hailang River [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(12): 5521-5526.

(责任编辑: 米慧芝)

(上接第 473 页 Continue from page 473)

- [15] ARAFIN M A, SZPUNAR J A. A new understanding of intergranular stress corrosion cracking resistance of pipeline steel [J]. Corros Sci, 2009, 51(1): 119-128.
- [16] 高英俊, 罗志荣, 黄创高, 等. 晶体相场方法研究二维六角相向正方相结构转变[J]. 物理学报, 2013, 62: 50507.
- GAO Y J, LUO Z R, HUANG C G, et al. Phase-field-crystal modeling for two-dimensional transformation [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62: 50507.
- [17] 高英俊, 罗志荣, 黄礼琳, 等. 韧性材料的微裂纹扩展和连通的晶体相场模拟[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23: 1892.
- GAO Y J, LUO Z R, HUANG L L. Phase-field-crystal modeling for microcrack propagation and connecting of ductile materials [J]. Chin J Nonferrous Metals, 2013, 23: 1892.
- [18] 卢成健, 蒋丽婷, 王玉玲, 等. 晶体相场法模拟小角度晶界的位错结构及其演化[J]. 广西科学, 2013, 20(4): 316-320.
- LU C J, JIANG L T, WANG Y L, et al. Simulating structure of dislocation and its evolution in low angle grain boundary by phase-field-crystal method [J]. Guangxi Sciences, 2013, 20(4): 316-320.
- [19] HIROUCHI T, TAKAKI T, TOMITA Y. Effects of temperature and grain size on phase-field-crystal deformation simulation [J]. Int J Mech Sci, 2010, 52: 309.
- [20] COLOMBO D, MASSIN P. Fast and robust level set update for 3D non-planar X-FEM crack propagation modelling [J]. Comput Method Appl M, 2011, 200: 2160-2180.

(责任编辑: 陆雁)