

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.05

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

饶志¹, 储小东^{1,2}, 吴代赦², 颜春¹, 陈婷¹, 何景媛¹

(1. 江西省地质环境监测总站, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学资源环境与化工学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 鄱阳湖平原作为长江中下游平原的重要组成部分, 随着城镇化进程的快速推进, 由于工矿业污染物、农村生活污水和农业生产废水向地下水的过量排放, 农村地下水污染程度和范围不断扩大, 为了解鄱阳湖平原地下水重金属污染状况, 本研究在大量的水文地质调查和水化学样品测试基础上, 分析该区地下水中重金属 Cu、As、Cr、Hg、Pb、Cd 含量特征, 利用美国环境保护署 (USEPA) 的健康风险评估模型对鄱阳湖平原地下水重金属进行健康风险评估。研究区 171 个地下水样品中 Cd、Cu、Hg、As、Pb、Cr 等 6 种重金属元素含量变化幅度大, 其中 Hg、Cd 和 As 平均值超过《地下水环境质量标准》(GB/T 14848—2017) III 类标准, 结果表明鄱阳湖平原地下水水质受人为影响大, 局部地下水存在严重的污染。致癌物健康风险评估结果显示, Cr、As 和 Cd 的平均个人年健康风险值均大于可接受风险值, Cr 的健康风险值最大, 是主要的致癌因子, As 次之, Cd 最低; 非致癌物质健康风险评估结果显示, Hg、Pb 和 Cu 的健康风险水平表现为 $Hg > Pb > Cu$, 属于可忽略风险。区域饮水途径上的健康风险主要来自致癌物质, 总体上男性健康风险大于女性的健康风险。鄱阳湖平原地下水水质污染状况研究及治理监管工作提供理论依据, 为其他区域地下水重金属的监测和质量控制提供参考和借鉴。

关键词: 鄱阳湖平原; 地下水; 重金属; 健康风险评估

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0031-07

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

RAO Zhi¹, CHU Xiaodong^{1,2}, WU Daishe², YAN Chun¹, CHEN Ting¹, HE Jingyuan¹

(1. Jiangxi Geo-environmental Monitoring Station, Nanchang, Jiangxi 330031, China; 2. College of Resources, Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: Groundwater in the Panyang Lake Plain (a major part of the Middle and Lower Reaches Plain of the Yangtze River) was found to be polluted due to industrial pollutants, rural sewage and agricultural wastewater with the rapid development of urbanization. More and more areas of rural groundwater suffered from pollution. The pollution situations became increasingly worse. In order to acquire the information on groundwater heavy metal pollution in the Panyang Lake Plain, on the basis of abundant regional hydrogeologic surveys and detections of water samples, the contents of heavy metals (Cu, As, Cr, Hg, Pb and Cd) in the groundwater are analyzed to understand the pollution status of heavy metals in groundwater in the Poyang Lake Plain, and the health risk assessment model of the United States Environmental Protection Agency (USEPA) is used to evaluate the health risk level. The results show that the contents of Cd, Cu, Hg, As, Pb and Cr in 171 groundwater samples in the study area change greatly, and the average contents of Hg and Cd exceed the III standard value of groundwater environmental quality (GB/T 14848—2017). It is found that the groundwater quality of the Poyang Lake Plain is mainly affected by human being and the local groundwater is seriously

收稿日期: 2018-12-15; 修订日期: 2019-01-17

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (1212011220990)

第一作者: 饶志 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究与监测预警研究。E-mail: 380254967@qq.com

通讯作者: 储小东 (1984-), 男, 高级工程师, 主要从事地下水污染调查监测与防治研究。E-mail: 154021644@qq.com

polluted. The results of carcinogen health risk assessment show that the average annual health risk values of Cr, As and Cd are greater than acceptable risk values, and the health risk value of Cr is the largest, Cd is the lowest, indicating that Cr is the key factor for carcinogens risk. The non-carcinogenic health risk levels of Hg, Pb and Cu are $Hg > Pb > Cu$, and their risk can be ignored. The health risk of regional drinking water is mainly affected by carcinogens factor, and in generally, men's health risk is greater than that of women. This paper provides a theoretical basis for the research and management of groundwater quality pollution in the Poyang Lake plain area, and provides reference for the monitoring and quality control of heavy metals in other areas.

Keywords: Poyang Lake Plain; groundwater; heavy metals; health risk assessment

长期城乡二元发展模式使我国农村供水与排水设施建设投入不足,导致农村水资源质量急剧下降,严重威胁农村居民饮用水安全。地下水作为淡水的重要组成部分,是保障我国农村生产和生活必不可少的水资源。但近年来,由于工矿业污染物、农村生活污水和农业生产废水向地下水的过量排放,农村地下水污染程度和范围不断扩大。农村地下水污染物的种类繁多,其中重金属污染尤为突出。重金属一般来源于工矿业生产,经由淋滤或渗透作用进入地下水体。地下水中的重金属通过饮水和食物链在人体内富集,对人体产生直接或间接的健康风险^[1]。汞(Hg)、铅(Pb)、砷(As)、镉(Cd)、铜(Cu)和铬(Cr(VI))是危害最大的六种重金属。当这几种重金属进入人体后,容易与体内其他毒素结合生成毒性更大的物质,并在身体的某些器官累积,造成慢性中毒^[2-7]。农村地区饮用水安全专业知识欠缺,对地下水污染的危害显然缺乏足够的重视。因此,有必要厘清农村地下水中重金属,尤其高危害重金属的含量,并评估这些重金属对人体可能产生健康风险,以规避农村地下水饮用水的安全隐患。

健康风险评价理论与方法,是评价地下水水质的有效手段,已被国外学者广泛应用于地下水重金属的风险评价研究中^[8-10],我国早期地下水健康风险评价通过引入“早四步法”^[11],介绍国外水环境健康风险评价模型^[12],建立我国居民的参数模型进行评价^[13-15]。我国地下水健康风险评价研究逐渐发展到对城市饮用水源地^[16-17,25]以及北方地区地下水的评估^[18-19];但到目前为止对我国南方平原区域地下水健康风险的评价报道仍然很少。据此,中国地质调查局于2012年立项开展鄱阳湖平原地下水污染调查与评价。本文以该项目为依托,以区域地下水重金属为研究对象,利用美国环境保护署(USEPA)水环境健康风险评价模型评价区内地下水的水质状况以及对人体健康产生的危害,以期对鄱阳湖地区水质污染状况研究及治理工作提供理论依据,为其他南方区域地下水重

金属的监测和健康风险控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖是中国第一大淡水湖。鄱阳湖平原作为长江中下游平原的重要组成部分,是长江和鄱阳湖水系冲积而成的滨湖平原,位于长江中下游南岸,区内地貌形态多样,低山、丘陵、岗地、平原、湖泊相间。鄱阳湖平原地处东亚季风区,属亚热带湿润季风性气候,气候温暖、降水丰沛,日照充足,无霜期长,四季分明。多年平均降水量为1500 mm,多年平均蒸发量为1150 mm。平原地下水是农村地区饮用水的主要来源,对社会经济发展起着重要作用,其类型包括松散岩类孔隙水、红层碎屑岩类裂隙孔隙水、碳酸盐岩裂隙溶洞水和基岩裂隙水,具有空间分布不均、季节变动大的特征^[20]。本文研究范围为南昌、九江、景德镇、新余、抚州5个区,总面积约 $2.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1)。

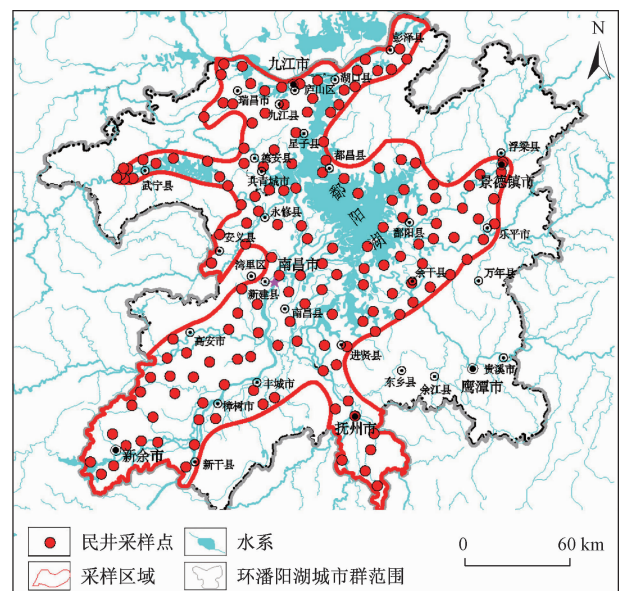


图1 研究区位以及采样点分布图

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 样品采集与测定

本研究探讨以饮用为目的的鄱阳湖平原浅层地下水,样点选取过程中充分考虑区域水文地质条件和污染源分布状况,选择具有代表性的水点(井、泉等)作为采样点,在平水期进行地下水样品采样。所采集的171个样点基本覆盖了研究区的范围(图1),主要集中于工业园区、矿山、固废垃圾场、污水处理厂以及居民区,其中包括泉水采样点29个,泉水流量为2~47 L/min,井水采样点142个,所采集井水深度4~12 m。露天井采集水样时,先用水泵充分抽汲后再用水样采集器进行采样;手压泵井和抽水井采集水样时,先汲出停滞在管路中的水,充分冲洗后再采样。地下水样采集后加1%浓硝酸用聚乙烯瓶保存。样品在24 h内送回实验室,用0.45 μm的微孔滤膜过滤在聚乙烯瓶中,于4℃环境下保存,待测。地下水采样按照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164—2008)进行,采样时间为2012年1月—2015年12月。本文主要测定地下水中六种重金属元素,其中的Cu、Pb、Cd、Cr、As用ICP-MS(ThermoElectron, XII)直接进行测定;Hg过滤水样经硫酸、溴酸钾-溴化钾消解后使用原子荧光光度计(北京吉天公司, AFS-8230)测定。样品的测定在江西省地矿测试中心完成。

2 评价模型

运用SPSS 19.0软件对地下水重金属含量进行统计分析(最大值、最小值、均值、标准差等)。采用美国USEPA的风险评估模型,对研究区地下水中的目标污染物Cu、Pb、Cd、Cr、As、Hg等六种重金属元素进行健康风险评价,确定基因毒物质、躯体毒物质和整体健康风险。

2.1 水环境健康风险评价模型

地下水中的污染物主要通过饮水途径、皮肤接触、呼吸途径进入人体。鉴于区内地下水通常作为饮用水,故选用以饮水途径的健康风险评价方法。水环境健康风险评价模型主要包括基因毒物质(致癌物质)评价模型和躯体毒(非致癌)物质评价模型^[21-22]。基因毒物质评价风险值计算公式:

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i q_i)] / S \quad (1)$$

式中: R_i^c ——基因毒物质*i*通过食入途径对个人的平均致癌年风险/ a^{-1} ;

D_i ——基因毒物质*i*通过食入途径的单位体质量日均暴露剂量/ $(mg \cdot (kg \cdot d)^{-1})$;

q_i ——基因毒物质通过食入途径致癌系数/ $(mg$

$\cdot (kg \cdot d)^{-1})$;

S ——人类平均寿命/ a 。

躯体毒物质评价风险值的计算公式:

$$R_i^n = (D_i / RfD_i) \times 10^{-6} / S \quad (2)$$

式中: R_i^n ——躯体毒物质*i*通过食入途径对个人产生的平均健康危害年风险/ a^{-1} ;

D_i ——躯体毒物质*i*通过食入途径的单位体质量日均暴露剂量/ $(mg \cdot (kg \cdot d)^{-1})$;

RfD_i ——躯体毒物质*i*通过食入途径参考剂量/ $(mg \cdot (kg \cdot d)^{-1})$;

S ——人类平均寿命/ a 。

饮水途径的单位质量日均暴露剂量(D_i):

$$D_i = V_i \times C_i / W \quad (3)$$

式中: C_i ——饮用水中各重金属的实测浓度/ $(\mu g \cdot L^{-1})$;

V_i ——成人每日平均饮水量/ $(L \cdot d^{-1})$;

W ——该地区的人体质量/ kg 。

饮用水中重金属整体健康风险评价模型,即健康危害总风险为:

$$R_{\text{总}} = R^c + R^n \quad (4)$$

2.2 评价模型污染因子和参数的确定

针对重金属污染物的毒性,依据国际癌症研究署(IARC)及美国环境保护署综合风险信息数据库(IRIS)数据,将污染物分为致癌污染物和非致癌污染物,本研究中致癌污染物包括3种分别为六价铬、砷、镉,非致癌污染物分别为汞、铜、铅。本研究考虑到男女性别的生理性差异,水环境健康风险评价模型中分男女两种性别进行评估,参数值的确定依据是人均寿命年龄:男性73岁,女性77岁。根据调查情况,成人每日平均饮水量为男性2.464 L,女性2.170 L;男性体重62.7 kg,女性体重54.4 kg^[13]。

健康风险评价模型各污染物的 q_i 和 RfD_i 定量参考值来源于国际癌症研究机构以及世界卫生组织等机构,As、Cd和Cr(VI)为基因毒物质致癌物,强度系数 q_i 分别为1.5 $mg/(kg \cdot d)$ 、6.1 $mg/(kg \cdot d)$ 和41 $mg/(kg \cdot d)$,Hg、Pb和Cu为躯体有毒物质,强度系数 RfD_i 分别为 $3 \times 10^{-4} mg/(kg \cdot d)$ 、 $1.4 \times 10^{-3} mg/(kg \cdot d)$ 和 $5 \times 10^{-3} mg/(kg \cdot d)$ ^[14]。国外推荐社会公众最大可接受风险水平及可忽略风险水平见表1,最大可接受风险值为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$,最大可忽略风险值为 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$,本文选择 1×10^{-6} 作为最大可接受风险水平, 1×10^{-8} 作为可忽略风险水平。

表1 最大可接受风险水平和可忽略风险水平

Table 1 The maximum accepted risk level and the negligible risk level

机构	最大可接受风险	可忽略风险	备注
瑞典环境保护局	1×10^{-6}	—	化学污染物
荷兰建设和环境部	1×10^{-6}	1×10^{-8}	化学污染物
英国皇家协会	1×10^{-6}	1×10^{-7}	—
美国环境保护署	1×10^{-4}	—	辐射
国际辐射防护委员会	5×10^{-5}	—	—

3 结果与讨论

3.1 重金属的含量特征

研究区 171 个地下水样品中 6 种重金属元素测试结果及与我国《地下水环境质量标准》(GB/T 14848—

2017)的Ⅲ类标准对比情况见表2。研究区内地下水重金属元素含量变化幅度较大,其中 Hg 与 Cd 两种重金属元素均值含量超过《地下水环境质量标准》(GB/T 14848—2017)Ⅲ类标准,分别是背景值的 20.26 倍和 1.23 倍,其他元素平均值含量低于Ⅲ类标准限制。该区重金属 Hg、Cd 和 As 的最大值均超过Ⅲ类标准,表明局部区域地下水存在污染。不同重金属元素含量变异差异性较大,其变异系数由大到小依次为: Cd (349%) > Cu (145%) > Hg (143%) > As (99%) > Pb (46%) > Cr (37%),说明重金属在该研究区域地下水中分布不均匀,Cd、Cu、Hg、As 四种金属受人为影响较大。重金属元素 Cd、Hg 具有较高的正偏度和峰度,表明研究区地下水中 Cd 和 Hg 受人为影响比较严重。

表2 研究区重金属浓度特征表

Table 2 Heavy metal concentrations in the study area

重金属	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	Ⅲ类标准
Cu	12.30	0.20	2.10	3.04	5.40	38.06	1.45	1000
As	24.640	0.960	3.347	3.32	2.82	10.77	0.99	10
Hg	313.50	0.21	20.26	28.99	6.92	63.94	1.43	1
Cd	220.0	0.10	6.18	21.59	7.36	63.87	3.49	5
Cr	3.48	0.98	2.01	0.75	0.43	-1.15	0.37	50
Pb	8.90	2.01	3.23	1.47	2.45	5.45	0.46	10

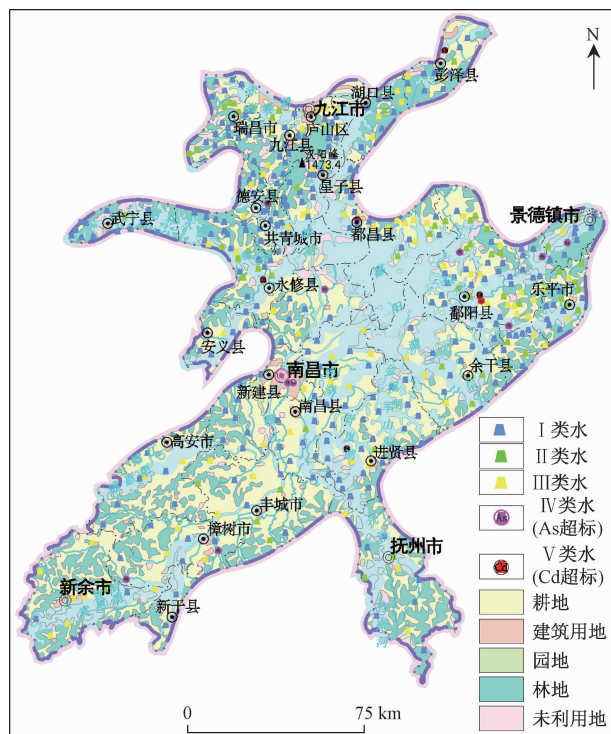


图2 研究区重金属水质状况分布图

Fig. 2 Distribution map of water quality of heavy metals in the study area

鄱阳湖平原地下水重金属受人为影响较大(图2),浅层地下水Ⅰ类水主要在永修梅棠镇西北部、星子县蓼花镇、进贤文港—李渡镇一带、赣江中游新干段沿河岸边等地分布,其他地区零星分布;Ⅱ类水主要分布在工作区北部,具体在彭泽—湖口条带状分布、星子沿湖岸边、都昌北部沿湖岸边、德安林泉、永修柘林—梅棠一带、九江县岷山乡北部、九江市城区—庐山姑塘镇一带、高安城区—灰埠镇一带及新余南部等地,在其他地区零星分布;Ⅲ类水主要在进贤三里—前坊镇一带、南昌县广福镇、安义石鼻—万埠镇一带、都昌县南峰—芡溪乡一带及乐平后港—镇桥镇一带分布,其他地区零星分布;Ⅳ类水主要分布在工作区东部、赣江、抚河、修水、潦河下游地区及各大湖泊沿湖岸边。水体中 Cd 和 Hg 含量较高,导致区域地下水水质存在一定的污染。其原因可能是:

(1)原生环境污染地下水。在某些沉积物中存在着原生性物质,经溶解、溶滤或运移作用进入含水层,使含水层地下水水质受到污染,主要为南部地区岩石土质中伴生 Hg,本底值较高以及矿山开采造成周边地下水原位污染。

(2)降水淋滤作用渗入地下水。以大气降水形式通过地表包气带含重金属污染的土壤层垂直下渗进入

地下水,从而污染地下水。主要集中在垃圾填埋场周边以及农田土壤区域。鄢新华等^[23]对江西南昌一樟树地区土壤中汞元素污染现状评价结果表明南昌等城市土壤中 Hg 元素污染与人类活动有着密切的联系。

(3)经地表水体间接污染地下水。工业园区的工业废水未经处理直接就近排入河、湖等水体,造成地表水重金属污染严重。在丰水期,河流携带污染物以侧向水平渗透方式扩散补给地下水。

(4)农村污水间接污染地下水。在采样过程中,经调查发现鄱阳湖平原农村饮用水 90% 以上建于房屋内或庭院内,10% 左右建于路边,其中 12.7% 水井分布于排污水沟,厕所、猪圈或化粪池周边,卫生环境极差;农村地区 3.5% 水井周边有生活污水和垃圾就地排放或堆积,导致了农村饮用水源的严重污染。

3.2 健康风险评价

运用地下水健康风险评价模型对鄱阳湖平原地下水水质进行了健康风险值的计算,结果见图 3。研究区地下水中,As、Cd、Cr 通过饮用水引起的男性平均个人年健康风险值分别为 $7.77 \times 10^{-6}/a \sim 1.98 \times 10^{-4}/a$ 、 $3.28 \times 10^{-7}/a \sim 7.04 \times 10^{-4}/a$ 、 $2.16 \times 10^{-5}/a \sim 7.66 \times 10^{-5}/a$,其平均值分别为 $2.70 \times 10^{-5}/a$ 、 $2.03 \times 10^{-5}/a$ 、 $4.43 \times 10^{-5}/a$;女性致癌风险值分别在 $7.48 \times 10^{-6}/a \sim 1.90 \times 10^{-4}/a$ 、 $3.16 \times 10^{-7}/a \sim 6.77 \times 10^{-4}/a$ 、 $2.08 \times 10^{-5}/a \sim 7.37 \times 10^{-5}/a$ 之间,平均值为 $2.60 \times 10^{-5}/a$ 、 $1.95 \times 10^{-5}/a$ 、 $4.27 \times 10^{-5}/a$ 。研究区不论男女平均个人年健康风险值均大于可接受风险值,Cr 的健康风险值最大,是主要的致癌因子,As 次之,Cd 最低。男女健康风险值分别进行研究,发现男性的健康风险值均高于女性。孙超^[16]等对上海市黄浦江上游地区和陈行水库水中重金属进行评价,结果表明,陈行水库的风险大小表现为 $As > Cr > Cd$;黄浦江上游中,Cr 的风险值最大,As 次之,与本研究一致。高继军^[19]等对北京市饮用自来水管和水井中的水质进行评价,表明 As 的风险值大于 Cd,且两者致癌风险水平集中在 $10^{-6}/a$,低于本研究的结果。孙树青等^[24]通过对湘江干流的健康风险评价,显示 As 的致癌风险值大于 Cd。地下水饮用途径致癌物质总的健康危害风险分别为男性总风险 $2.97 \times 10^{-5} \sim 9.78 \times 10^{-4}$ 、女性总风险 $2.86 \times 10^{-5} \sim 9.41 \times 10^{-4}$ 。

对鄱阳湖平原地下水水质中非致癌物质进行健康风险计算,得出由 Cu、Hg、Pb 导致的男性平均个人年健康风险值分别为 $2.15 \times 10^{-11}/a \sim 1.32 \times 10^{-9}/a$ 、 $3.77 \times 10^{-10}/a \sim 5.63 \times 10^{-7}/a$ 、 $1.97 \times 10^{-9}/a \sim 8.71$

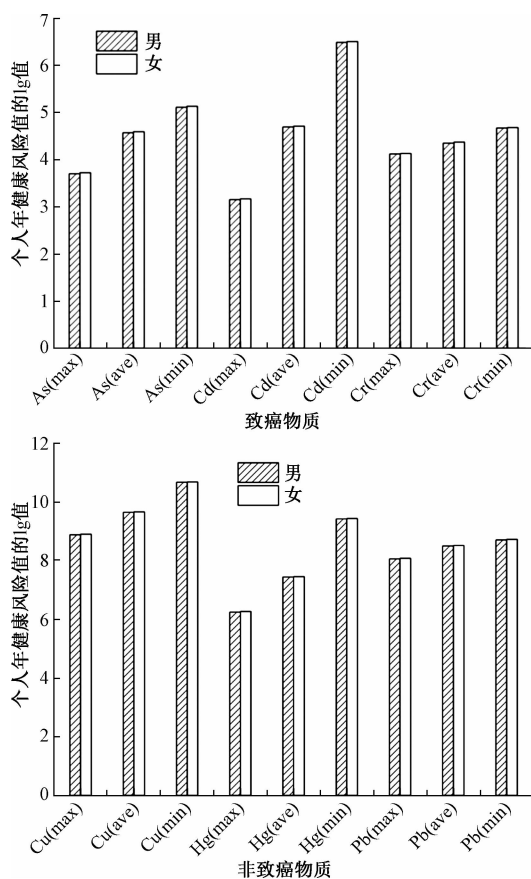


图3 鄱阳湖平原地下水水质重金属健康风险值
Fig.3 lg scale health risk of heavy metals
in the groundwater of the Poyang Lake

$\times 10^{-9}/a$,其平均值分别为 $2.26 \times 10^{-10}/a$ 、 $3.64 \times 10^{-8}/a$ 、 $3.16 \times 10^{-9}/a$;女性致癌风险值分别在 $2.07 \times 10^{-11}/a \sim 1.27 \times 10^{-9}/a$ 、 $3.63 \times 10^{-10}/a \sim 5.41 \times 10^{-7}/a$ 、 $1.86 \times 10^{-9}/a \sim 8.26 \times 10^{-9}/a$,平均值为 $2.17 \times 10^{-10}/a$ 、 $3.50 \times 10^{-8}/a$ 、 $3.00 \times 10^{-9}/a$ 。三种元素的健康风险水平表现为 $Hg > Pb > Cu$,属于可忽略风险值。对这三种物质的男女性健康风险值进行对比,发现男性的健康风险值均高于女性。上海市主要饮用水中 Hg、Cu、Pb 引起的健康风险平均值都集中在 $10^{-10}/a$ ^[16],Hg、Cu 的风险值小于本研究区域,Pb 的风险值与之相当。北京市饮用水中 Hg 和 Cu 的平均风险值集中在 $10^{-8}/a$ 和 $10^{-9}/a$ ^[19],其中,Cu 的风险值高于本研究结果。地下水饮用途径非致癌物质总的健康危害风险分别为男性总风险 $2.37 \times 10^{-9} \sim 5.73 \times 10^{-7}$ 、女性总风险 $2.24 \times 10^{-9} \sim 5.51 \times 10^{-7}$ 。

鄱阳湖平原地下水中致癌金属通过饮用途径产生的健康风险远大于非致癌金属的健康风险,存在潜在的健康危害,应引起重视。同时,考虑到本次选择的健康风险仅从重金属的饮水途径进行计算,没有对其他

暴露途径(如皮肤接触、吸入和食入等)进行评估,因此实际环境中重金属总的暴露风险可能大于本研究的风险值。采样调查过程中发现部分农村饮用水井所处的位置与环境也存在着一定问题,给人体健康风险带来了巨大的隐患,通过规范使用农村饮用水源,合理保护地下水资源,可以减轻人体健康风险^[25]。

4 结论

(1)研究区 171 个地下水样品中 Cd、Cu、Hg、As、Pb、Cr 等 6 种重金属元素含量变化幅度较大,其中 Hg 与 Cd 平均值含量超过《地下水环境质量标准》的Ⅲ类标准。Hg、Cd 和 As 最大值分别达到Ⅲ类标准的 313.5 倍、44.0 倍和 2.46 倍,表明鄱阳湖平原局部地下水存在严重的污染,可能来源于原生环境、大气降水、土壤和人为污染。

(2)致癌物健康风险评估中,Cr、As 和 Cd 的平均个人年健康风险值均大于可接受风险值,Cr 的健康风险值最大,是主要的致癌因子,As 次之,Cd 最低。非致癌物质进行健康风险计算中;Hg、Pb 和 Cu 的健康风险水平表现为 Hg > Pb > Cu,属于可忽略风险。区域饮水途径健康风险主要来自致癌物质产生的健康风险,总体上男性整体健康风险大于女性的健康风险。

参考文献:

- [1] 周腾智,任伯帆,杨秀贞. 地下水重金属污染成因分析及治理研究[J]. 环境保护前沿, 2017, 7(2), 79-84. [ZHOU T Z, REN B Z, YANG X Z. Cause analysis and treatment of heavy metal pollution in groundwater [J]. Advances in Environmental Protection, 2017, 7(2): 79. (in Chinese)]
- [2] 任仁,黄俊. 哪些物质属于内分泌干扰物(EDCs)[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(3): 7-10. [REN R, HUANG J. An Introduction of endocrine disrupters (EDCs) [J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11(3): 7-10. (in Chinese)]
- [3] 李成剑. 汞污染危害分析与防范措施探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版:理工卷), 2010(2): 151-152. [LI C J. Hazard analysis and preventive measures of mercury pollution [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition: Sci & Eng), 2010(2): 151-152. (in Chinese)]
- [4] 刘岚. 铅对人类健康的危害及其防治[J]. 职业与健康, 2005, 21(5): 665-666. [LIU L. The harm of lead to human health and its prevention [J]. Occupation and Health, 2005, 21(5): 665-666.

(in Chinese)]

- [5] 刘毅. 镉的危害及其研究进展[J]. 中国城乡企业卫生, 2003(4): 12-13. [LIU Y. Harm of cadmium and its research progress [J]. Chinese Journal of Urban and Industrial Hygiene, 2003(4): 12-13. (in Chinese)]
- [6] SWAINE D J. Why trace elements are important[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65: 21-33.
- [7] 张汉池,张继军,刘峰. 铬的危害与防治[J]. 内蒙古石油化工, 2004, 30(1): 72-73. [ZHANG H C, ZHANG J J, LIU F. Harm and prevention of chromium [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry, 2004, 30(1): 72-73. (in Chinese)]
- [8] MAJOLAGBE A O, ADEYI A A, OSIBANJO O, et al. Pollution vulnerability and health risk assessment of groundwater around an engineering Landfill in Lagos, Nigeria[J]. Chemistry International, 2017, 3(1): 58-68.
- [9] KUMAR M, RAMANATHAN A L, TRIPATHI R, et al. A study of trace element contamination using multivariate statistical techniques and health risk assessment in groundwater of Chhaprola Industrial Area, Gautam Buddha Nagar, Uttar Pradesh, India [J]. Chemosphere, 2017, 166: 135-145.
- [10] CHABUKDHARA M, GUPTA S K, KOTECHEA Y, et al. Groundwater quality in Ghaziabad district, Uttar Pradesh, India: Multivariate and health risk assessment[J]. Chemosphere, 2017, 179: 167-178. (in Chinese)]
- [11] 田裘学. 健康风险评估的基本内容与方法[J]. 甘肃环境研究与监测, 1997, 10(4): 32-36. [TIAN Q X. Basic contents and methods of health risk assessment [J]. Gansu Environmental Study and Monitoriny, 1997, 10(4): 32-36. (in Chinese)]
- [12] 曾光明,卓利,钟正林,等. 水环境健康风险评估模型及其应用[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4): 28-33. [ZENG G M, ZHUO L, ZHONG Z L, et al. Assessment models for water environmental health risk analysis [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1997, 15(4): 28-33. (in Chinese)]
- [13] 王宗爽,武婷,段小丽,等. 环境健康风险评估中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1171-1175. [WANG Z S, WU T, DUAN X L, et al. Research on inhalation rate exposure factors of chinese residents in environmental health risk assessment[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(10): 1171-1175. (in

- Chinese)]
- [14] 段小丽, 王宗爽, 王贝贝, 等. 我国北方某地区居民饮水暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(9): 1216 – 1220. [DUAN X L, WANG Z S, WANG B B, *et al.* Drinking water-related exposure factors in a typical area of northern China [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(9): 1216 – 1220. (in Chinese)]
- [15] 王贝贝, 段小丽, 蒋秋静, 等. 我国北方典型地区居民呼吸暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1421 – 1427. [WANG B B, DUAN X L, JIANG Q J, *et al.* Inhalation exposure factors of residents in a typical region in northern China [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(11): 1421 – 1427. (in Chinese)]
- [16] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 60 – 65. [SUN C, CHEN Z L, ZHANG C, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(1): 60 – 65. (in Chinese)]
- [17] 温海威, 吕聪, 王天野, 等. 沈阳地区农村地下饮用水中重金属健康风险评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(23): 242 – 247. [WEN H W, LYU C, WANG T Y, *et al.* Health risk assessment of heavy metal in rural drinking groundwater in Shenyang, China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(23): 242 – 247. (in Chinese)]
- [18] 王钢, 王灵, 郑春霞, 等. 乌鲁木齐乌拉泊水库水体中重金属健康风险评价[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(1): 22 – 26. [WANG G, WANG L, ZHEN C X, *et al.* Health risk assessment of water quality at Wulabo reservoir in Urumqi City [J]. Arid Environmental Monitoring, 2010, 24(1): 22 – 26. (in Chinese)]
- [19] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, 1(2): 47 – 50. [GAO J J, ZHANG L P, HUANG S B, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 1(2): 47 – 50. (in Chinese)]
- [20] 曾昭华, 丁汉文, 多超美, 等. 江西省鄱阳湖地区地下水环境背景形成的控制因素[J]. 水文地质工程地质, 1990, 17(3): 46 – 48. [ZENG Z H, DING H W, DUO C M, *et al.* Controlling factors on the formation of groundwater environment background in the area of Poyang Lake [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1990, 17(3): 46 – 48. (in Chinese)]
- [21] US Environmental Protection Agency. Superfund public health evaluation manual [R]. Washington DC: US EPA, 1986.
- [22] US Environmental Protection Agency. Available information on assessment exposure from pesticides in food [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000.
- [23] 鄢新华, 张铁林, 毛大发, 等. 江西南昌一樟树地区土壤汞污染现状评价[J]. 物探与化探, 2005, 29(5): 455 – 458. [YAN X H, ZHANG T L, MAO D F, *et al.* An evaluation of soil mercury pollution situation in Nanchang-Zhangshu area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(5): 455 – 458. (in Chinese)]
- [24] 孙树青, 胡国华, 王勇泽, 等. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 12 – 15. [SUN S Q, HU G H, WANG Y Z, *et al.* Water environmental health risk assessment of Xiangjiang River [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(2): 12 – 15. (in Chinese)]
- [25] 王旭升, 尹立河, 方坤, 等. 鄂尔多斯浩勒报吉水源井地开采地下水的环境影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 5 – 12. [WANG X S, YING L H, FANG K, *et al.* Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 5 – 12. (in Chinese)]

编辑: 张若琳