

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.018

# 宿州市农村地下水重金属含量与健康风险评价

林曼利<sup>1</sup>, 彭位华<sup>2</sup>

(1. 宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191)

**摘要:**对宿州市农村地下水重金属含量进行检测, 并采用美国环保署(United States Environment Protection Agency, USEPA)推荐的评价模型开展了重金属健康风险评价。检测结果表明部分地下水已不宜被直接饮用, 特别是近郊的农村地下水。健康风险评价结果表明, 化学致癌物的所致健康风险值远高于化学非致癌物, 后者经饮用水途径产生的健康风险均处于可忽略水平。化学致癌物Cr、Cd所致健康风险均值分别为 $1.24 \times 10^{-6}$ 、 $1.34 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , 占总健康风险值的比例分别为89.52%和10.45%, 说明宿州市农村地下水中Cr和Cd具有一定的致癌风险, 应作为优先污染物予以重视。

**关键词:**农村地下水; 重金属; 健康风险评价; 宿州市

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)06-0110-07

## Concentrations and health risk assessment of heavy metals in groundwater in rural areas of Suzhou City

LIN Manli<sup>1</sup>, PENG Weihua<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China;  
2. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The concentrations of heavy metals (HMs) in groundwater in rural areas of Suzhou City were examined, and the health risks of the HMs were assessed using the risk assessment model recommended by the United States Environment Protection Agency (USEPA). The results show that the groundwater was not suitable for drinking, especially in the rural areas in the suburbs. The results of the health risk assessment show that the health risk caused by chemical carcinogens was far higher than that caused by chemical non-carcinogens, and the health risk caused by the latter through diffusion of potable water could be neglected. The mean values of health risks of Cr and Cd were  $1.24 \times 10^{-6}$  and  $1.34 \times 10^{-5}$  per year, respectively, accounting for 89.52% and 10.45% of the total health risk, indicating that Cr and Cd in groundwater in the study area generate a high carcinogenic risk, and these two HMs, regarded as priority pollutants, should be paid much attention.

**Key words:** groundwater in rural areas; heavy metals; health risk assessment; Suzhou City

具有难降解性、生物累积性和食物链放大等生态环境效应的重金属, 经各种途径进入地表或地下水体后, 可通过饮水、食物链等途径进入人体, 从而对人体产生直接或间接的健康风险。从研究现状看, 对水体重金属风险评价的研究主要集中在城市饮用水源地, 如高继军等<sup>[1]</sup>和韩芹芹等<sup>[2]</sup>分别对北京市和乌鲁木齐市饮用水源(地表水和地下水)开

展了重金属健康风险评价研究; 李祥平等<sup>[3]</sup>、杜维等<sup>[4]</sup>、曾彩明等<sup>[5]</sup>和程柳等<sup>[6]</sup>分别对广州市主要饮用水源地、长江武汉段、南方某河流型水源地和小浪底水库开展了地表水体的重金属健康风险评价研究; 而李兰芳等<sup>[7]</sup>和杨阳等<sup>[8]</sup>则直接对广州市和保定市城区生活饮用水开展了重金属污染物的检测及健康风险评价。总体看, 目前针对地下水, 特别是农

基金项目: 宿州区域发展协同创新中心开放课题(2015SZXTZXF04, 2015SZXTXSKF08)

作者简介: 林曼利(1984—)女, 讲师, 硕士, 主要从事环境水文地球化学研究。E-mail: linmanli112@126.com

村地下水中重金属健康风险评价的研究相对较少<sup>[9-10]</sup>,而农村地下水与广大农民生活紧密关联,因此开展农村地区地下水重金属监测和健康风险评价分析,对保障广大农村供水安全有重要意义。

目前,对宿州市地下水已有少量关于水质评价及健康风险评价的研究,研究多关注水资源可持续利用、城区地下水和矿区深层地下水,如张生等<sup>[11]</sup>讨论了宿州市水资源可持续利用问题,并对地表水和地下水开展了水质评价;Sun等<sup>[12]</sup>和昌熙<sup>[13]</sup>则对宿州市城区地下水重金属和硬度开展了水质评价和空间分布研究;林曼利等<sup>[14-15]</sup>主要对宿州市矿区深层地下水开展了重金属水质污染和健康风险评价研究;Sun等<sup>[16]</sup>针对宿州市农村地下水中重金属进行了数理统计分析,但是目前针对宿州市农村地下水重金属健康风险评价的研究尚未见报道。笔者在对5种重金属(Cd、Cr、Cu、Pb和Ni)进行质量浓度特征分析的基础上,运用美国环保署(United States Environment Protection Agency, USEPA)推荐的健康风险评价模型对宿州市农村地下水开展了重金属健康风险评价研究,以期为研究区地下水污染与防治工作提供参考。

## 1 材料与与方法

### 1.1 研究区概况

宿州市位于安徽省北部,坐标为东经116°09′~118°10′,北纬33°18′~34°38′。地处皖苏鲁豫4省交汇地带,现辖4县1区(砀山、萧县、灵璧、泗县、埇桥区),面积9787 km<sup>2</sup>,人口651.66万。宿州市属暖温带半湿润季风气候,年均气温14~14.5℃,年降雨量只有774~895 mm,主要集中在5~9月,生活、农业和工业几乎所有的水资源均来自于地下水<sup>[16]</sup>。宿州市水资源总量为34.8亿 m<sup>3</sup>,占全省水资源总量的26%,人均水资源量602 m<sup>3</sup>,属于严重缺水地区<sup>[11]</sup>,由于地表水资源匮乏及污染严重,地下水成为城镇和广大农村居民的主要供水水源,开采层位为浅层和深层孔隙水<sup>[11,17]</sup>。浅层水开采量为3.39万 m<sup>3</sup>/d,深层水开采量为10.83万 m<sup>3</sup>/d,受开采的影响,城区中深层地下水水位以0.6~1 mm/a的速度下降,市区浅层和深层水已形成了3个统一的降落漏斗,漏斗中心最大水位埋深分别为19.19 m和24 m,漏斗区面积达150 km<sup>2</sup>,地面累计沉降44 mm<sup>[11,17]</sup>。宿州市是一个缺水的城市,同时也是一个农业大市<sup>[11]</sup>,且煤炭资源丰富,化肥、农药和畜禽养殖等面源污染,以及煤炭开采等工业活动是区内地下水中重金属最可能的污染来源。

## 1.2 样品采集与指标检测

### 1.2.1 样品采集

本次共采集70个地下水样品,均直接采集于村民家中的自用水井,采样时间为2013年9~10月。每次采样时先用水样涮洗聚乙烯瓶(已用去离子水清洗),采样量为1 L,并于24 h内带回实验室进行预处理。70个样品中,有58个采样点深度范围在7~38 m之间,有1个采样点深度约100 m,11个采样点深度不详,具体采样点分布见图1。

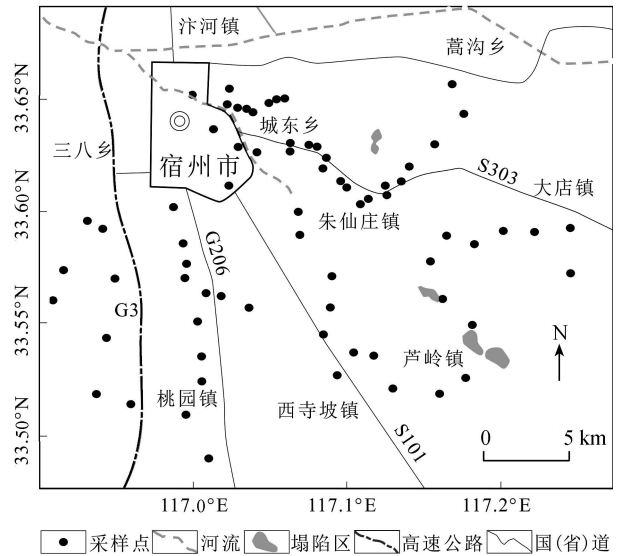


图1 采样点分布

### 1.2.2 指标检测

水温、pH值和总溶解性固体在采样现场测试,测试结果分别为10.5~19.0℃,7.3~8.0和211~1311 mg/L。水样带回实验室后,经0.45 μm微孔滤膜过滤,加入优级纯HNO<sub>3</sub>调pH≤2。用原子吸收分光光度计(TAS-990)石墨炉法分析Cd、Cr、Cu、Pb和Ni 5种重金属元素。定量方法均采用外标法,各校准曲线的相关系数均高于0.998。分析测试工作在安徽省煤矿勘探工程技术研究中心完成。

## 1.3 健康风险评价方法

### 1.3.1 评价模型

健康风险评价(health risk assessment, HRA),是一种把污染物和人体健康联系起来,定量描述污染物对人体健康产生风险的一种方法<sup>[18]</sup>。与传统的水质等级评价体系相比,其能更直观地表征水体中各污染物对人体健康的潜在危害<sup>[19]</sup>。本文采用应用较广泛的USEPA推荐的健康风险评价模型<sup>[20]</sup>,仅估算经饮水暴露途径下地下水中重金属污染物的健康风险,因为饮水途径是受体(人)摄取水中污染物的最直接、最重要的方式<sup>[4,21]</sup>。

### 1.3.2 健康风险计算

污染物通过饮水途径进入人体后所引起的健康

风险的评价模型包括致癌物所致健康危害的风险模型和非致癌物所致健康危害的风险模型,二者经饮水途径产生的个人健康风险按公式(1)~(2)计算<sup>[1,5,8,9,14,22-25]</sup>:

$$R_{ci} = \frac{1 - \exp(-D_i q_i)}{L} \quad (1)$$

$$R_{nj} = \frac{D_j \times 10^{-6}}{R_{Dj} L} \quad (2)$$

式中: $R_{ci}$ 和 $R_{nj}$ 分别为化学致癌物*i*和化学非致癌物*j*经饮水途径产生的年平均致癌风险值, $a^{-1}$ ;  $D_i$ 和 $D_j$ 分别为污染物*i*和化学非致癌物*j*经饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$ ;  $q_i$ 为化学致癌物*i*经饮水途径的致癌强度系数, $mg/(kg \cdot d)$ ;  $R_{Dj}$ 为化学非致癌物*j*经饮水途径的参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$ ;  $L$ 为人类平均寿命,取值为70 a。 $D_i$ 或 $D_j$ 按公式(3)计算:

$$D_{i/j} = \frac{w \rho_{i/j}}{A} \quad (3)$$

式中: $w$ 为日均饮水量,成人一般取值2.2 L/d;  $\rho_{i/j}$ 为污染物*i*或*j*饮水途径的质量浓度, $mg/L$ ;  $A$ 为人体质量,成人取70 kg。

假定各污染物对人体健康危害的毒性作用不存在拮抗或协同的关系,则地下水中重金属通过饮水途径产生的总的健康危害风险值( $R_{\text{总}}$ )即为经饮水途径化学致癌物所致的总致癌风险值( $R_c$ )与非致癌物所致的总致癌风险值( $R_n$ )之和,公式为

$$R_{\text{总}} = R_c + R_n \quad (4)$$

$$R_c = \sum_{i=1}^m R_{ci} \quad (5)$$

$$R_n = \sum_{j=1}^k R_{nj} \quad (6)$$

### 1.3.3 模型参数

根据国际癌症研究协会(International Agency for Research on Cancer, IARC)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)通过全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,Cd和Cr为化学致癌物,Cu、Pb和Ni为非化学致癌物,其 $R_c$ 和 $R_n$ 计算过程中的相关参数列于表1~2<sup>[26-28]</sup>。

表1 饮水暴露途径下模型参数 $q_i$ 值

化学致癌物	$q_i/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$
Cd	6.1
Cr	41.0

表2 饮水暴露途径下模型参数 $R_{Dj}$ 值

化学非致癌物	$R_{Dj}/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$
Cu	$5.0 \times 10^{-3}$
Pb	$1.4 \times 10^{-3}$
Ni	$2.0 \times 10^{-2}$

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属质量浓度特征

研究区70个地下水样品中5种重金属元素测试结果及与GB5479—2006《生活饮用水卫生标准》<sup>[29]</sup>、GB/T14848—93《地下水环境质量标准》<sup>[30]</sup>的3类标准对比情况见表3。

表3 重金属质量浓度特征值及与标准对比情况

特征值及标准	$\mu g/L$				
	$\rho(Cd)$	$\rho(Cr)$	$\rho(Cu)$	$\rho(Pb)$	$\rho(Ni)$
极小值	0.009	0.022	0.29	2.02	0.034
极大值	2.350	3.520	100.80	10.34	45.470
均值	0.390	0.620	3.90	4.37	7.19
标准差	0.390	0.580	12.53	1.75	9.30
GB5749—2006 <sup>a</sup>	5	50	1000	10	20
GB/T14848—93(Ⅲ) <sup>b</sup>	10	50	1000	50	50

注:<sup>a</sup>和<sup>b</sup>分别为《生活饮用水卫生标准》和《地下水环境质量标准》的3类标准。

由表3可知,按均值大小依次为: $Ni > Pb > Cu > Cr > Cd$ ,均值大小次序与前期对研究区城区地下水5种重金属测试结果相一致<sup>[12]</sup>,除Cd和Cr外,其他3种金属的均值大小次序也与皖北深层地下水重金属测试结果一致<sup>[14]</sup>。前期研究表明,皖北深层地下水Cd、Cr、Cu、Pb和Ni均值分别为4.9、4.0、12.0、16.4和68.2  $\mu g/L$ <sup>[14-15]</sup>,与之相比,本次针对农村浅层地下水中5种重金属的质量浓度测试结果均较低,特别是Cd和Cr相差了1个数量级,而与研究区城区地下水中5种重金属的测试结果相比(Cd、Cr、Cu、Pb和Ni均值分别为0.4、0.6、3.9、4.4和7.2  $\mu g/L$ )则十分相近<sup>[12]</sup>。本次所采集的70个农村地下水样品,Cd、Cr、Cu、Pb和Ni的检测结果均符合《地下水环境质量标准》中的3类标准<sup>[16]</sup>,说明研究区地下水适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水,但与《生活饮用水卫生标准》相比,分别有1个采样点中的Pb和5个采样点中Ni超过相应标准限值,超标率分别为1.43%和7.14%,其中Ni的最大超标倍数约2.3倍,说明宿州市部分农村地区的地下水已不宜被农民直接饮用。同时,Cd、Cr、Cu、Pb和Ni质量浓度的变异系数为100%、93%、321%、40%、129%,除Pb外,其他5种重金属的标准差和变异系数均较大。

Pb和Ni的质量浓度空间分布见图2。Pb(图2(a))和Ni(图2(b))质量浓度空间分布较相似,高值区呈点状分布,二者都有4个高值区,其对应位置基本一致,且均分布在离市区较近位置,其中高值区1和2分别对应城东乡和桃园镇北部附近。前期对

宿州市城区地下水重金属分析结果也表明,Pb 和 Ni 质量浓度高值区空间分布比较相似,而且均靠近老城区<sup>[12]</sup>。

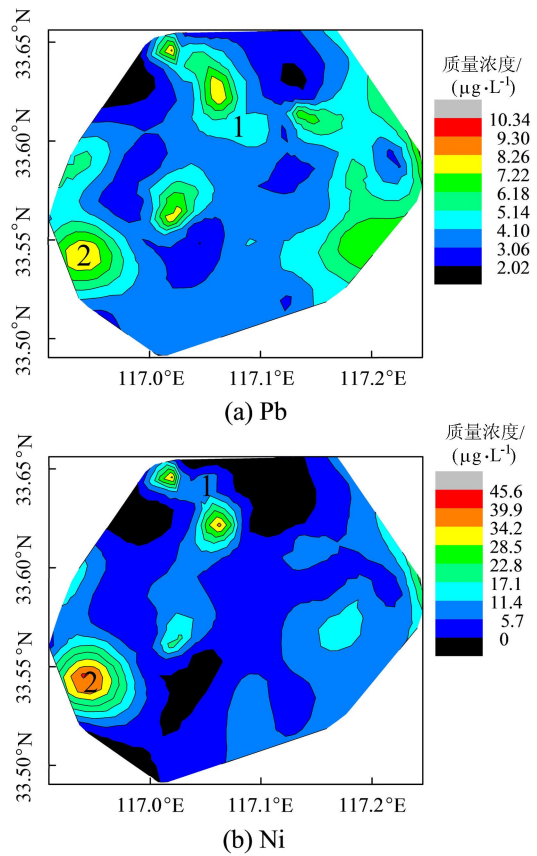


图2 宿州市农村地下水 Pb 和 Ni 质量浓度空间分布

## 2.2 健康风险评价

根据所选定的健康风险评价模型及相关参数,计算出化学致癌物和化学非致癌物的饮水途径健康危害的平均个人年风险值和总风险值( $R_{总}$ ) (表4)。

由表4可知,宿州市农村地下水化学致癌物 Cd 和 Cr 经饮水途径的健康危害风险值为  $2.57 \times 10^{-8} \sim 6.45 \times 10^{-6} a^{-1}$  和  $4.05 \times 10^{-7} \sim 6.47 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 均值分别为  $1.07 \times 10^{-6}$  和  $1.15 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 风险等级为  $Cr > Cd$ 。Cd 和 Cr 的均值均未超过 ICRP 推荐的最大可接受风险 ( $5 \times 10^{-5} a^{-1}$ )<sup>[31]</sup> 和 USEPA 推荐的最大可接受风险 ( $1 \times 10^{-4} a^{-1}$ )<sup>[32]</sup>, 但均值都高于瑞典环境保护局、荷兰建设环保局及英国皇家协会推荐的最大可接受风险 ( $1 \times 10^{-6} a^{-1}$ )<sup>[33]</sup>。具体来说,在 70 个采样点中 Cr 和 Cd 的健康危害风险值分别有 69 个 (约 99%) 和 25 个 (约 36%) 超过  $1 \times 10^{-6} a^{-1}$ 。化学

非致癌物 Cu、Pb 和 Ni 的通过饮水途径引起的健康危害风险数量级在  $10^{-13} \sim 10^{-9} a^{-1}$ , 平均值分别为  $3.5 \times 10^{-10}$ 、 $1.4 \times 10^{-9}$  和  $1.61 \times 10^{-10} a^{-1}$ , 风险等级由高到低依次为  $Pb > Cu > Ni$ 。化学非致癌物所致健康风险均低于荷兰建设环保局 ( $1 \times 10^{-8} a^{-1}$ )、英国皇家协会 ( $1 \times 10^{-7} a^{-1}$ ) 和国际原子能机构 ( $5 \times 10^{-7} a^{-1}$ ) 所推荐的可忽略水平<sup>[33]</sup>。总体看,宿州市农村地区地下水中 5 种重金属的总健康风险为  $7.94 \times 10^{-7} \sim 6.58 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 均值为  $1.25 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 都低于 USEPA 推荐的最大可接受风险, 但有 2 个采样点 (约占 3%) 高于 ICRP 推荐的标准, 有 69 个采样点 (约 99%) 高于瑞典环境保护局、荷兰建设环保局及英国皇家协会推荐的最大可接受风险。5 种重金属中, Cr 对总健康风险贡献最大, 贡献率为 41.43% ~ 99.35%, 平均为 89.52%, 为研究区首要污染物, 其次是 Cd, 其贡献率为 0.65% ~ 58.51%, 平均为 10.45%, 因此 Cr 和 Cd 应作为研究区主要的环境健康管理控制指标。从空间分布看, Cr 的质量浓度 2 个健康风险高值区主要位于桃园镇北部附近 (图 3(a)), 而 Cd 的质量浓度高值区主要位于城东乡附近 (图 3(b)), 这些高值区均离市区较近。

前期对研究区深层地下水开展的重金属健康风险评价结果表明,化学非致癌物 Cu、Pb 和 Ni 经饮水途径所致健康危害风险值也较小,数量级在  $10^{-11} \sim 10^{-8} a^{-1}$ , 且大多处于可忽略水平; 而化学致癌物 Cd 和 Cr 所致健康危害风险值数量级在  $10^{-6} \sim 10^{-4} a^{-1}$ , 经饮水途径所致健康危害风险值较大<sup>[14]</sup>, 同时, 研究结果还表明, Cr 的健康风险值最大, 应作为优先污染物进行监测与控制, 与本次研究结果一致。温海威等<sup>[22]</sup>, 郭杏妹等<sup>[23]</sup> 和郭占景等<sup>[24-25]</sup> 利用 USEPA 推荐的健康风险评价模型分别对沈阳, 佛山和石家庄农村地下水进行重金属健康风险评价, 都得出化学致癌物引起的个人年致癌风险均远高于化学非致癌物, 且化学致癌物中 Cr 的健康风险均大于 Cd, 其中 Cr 经饮水途径所致健康风险值分别为  $9.08 \times 10^{-6} \sim 24.3 \times 10^{-5} a^{-1}$ ,  $7.34 \times 10^{-5} a^{-1}$  和  $3.69 \times 10^{-5} \sim 42.8 \times 10^{-5} a^{-1}$  (均值  $7.38 \times 10^{-5} a^{-1}$ ), 占总风险的比例分别为 52.64% ~ 100%, 99.32% 和 84.53%, 研究结果均表明 Cr 是农村饮用水中产生健康危害风险的首要污染物, 应优先控制。这些研

表4 各重金属  $R_c$ 、 $R_n$  和  $R_{总}$  特征值  $a^{-1}$

特征值	$R_c$		$R_n$			$R_{总}$
	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	
最小值	$2.57 \times 10^{-8}$	$4.05 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-11}$	$6.49 \times 10^{-10}$	$7.63 \times 10^{-13}$	$7.94 \times 10^{-7}$
最大值	$6.45 \times 10^{-6}$	$6.47 \times 10^{-5}$	$9.05 \times 10^{-9}$	$3.32 \times 10^{-9}$	$1.02 \times 10^{-9}$	$6.58 \times 10^{-5}$
平均值	$1.07 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.61 \times 10^{-10}$	$1.25 \times 10^{-5}$

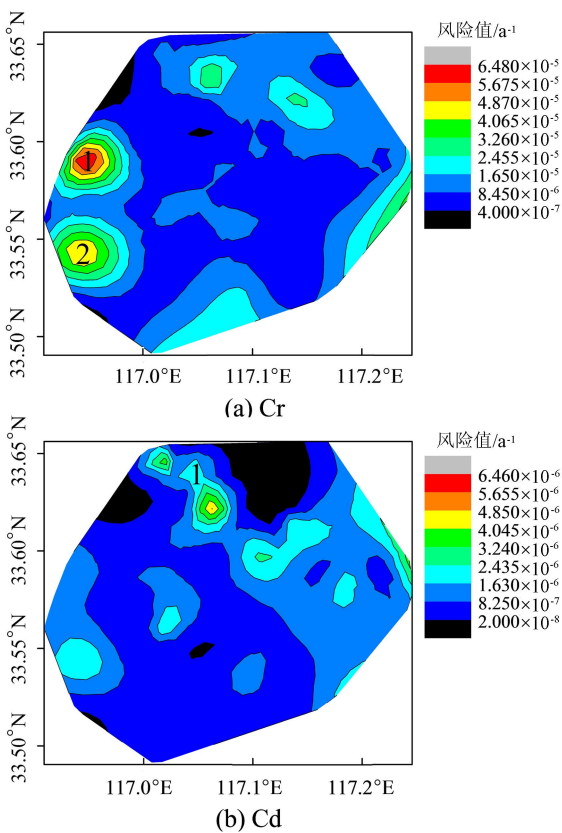


图3 宿州市农村地下水 Cr 和 Cd 健康风险空间分布

研究所得到的 Cr 健康风险值和主要结论都与本次研究结论一致。张时珍等<sup>[10]</sup>, 黄艳红等<sup>[34]</sup> 和何健飞等<sup>[35]</sup> 对华东某农村, 武汉市农村和清远市某工业区农村也开展了经饮水途径的重金属健康风险评价研究, 在未测定 Cr 的情况下, 均得出 As 在区域地下水中也具有一定的致癌风险。而胡春华等<sup>[9]</sup> 对环鄱阳湖区农村饮用水也开展了重金属健康风险评价研究, 在未测定 Cr 和 As 情况下, 则得出 Cd 是产生风险的主要污染物。可见, Cr、As 和 Cd 3 种重金属是农村地下水中最为常见的优先污染物。

### 3 结论

a. 宿州市农村地下水 5 种重金属按质量浓度均值排列依次为: Ni>Pb>Cu>Cr>Cd, 各采样点 5 种重金属检测结果均符合《地下水环境质量标准》三类标准, 但部分采样点中 Pb 和 Ni 超过《生活饮用水卫生标准》标准限值, 超标率分别为 1.43% 和 7.14%, 且二者高值区在空间分布上均围绕在城市周边, 说明部分农村地下水已不宜被农民直接饮用, 特别是近郊的农村地区。

b. 健康风险评价结果表明, 尽管 Cr 和 Cd 质量浓度较低, 但具有较高的健康危害风险, 二者均值分别为  $1.24 \times 10^{-6}$  和  $1.34 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , 虽然均未超过 ICRP 和 USEPA 推荐的最大可接受风险, 但均超过

瑞典环境保护局、荷兰建设环保局及英国皇家协会推荐的最大可接受风险, 说明 Cr 和 Cd 均具有一定的致癌风险; 而化学非致癌物质 Cu、Pb 和 Ni 通过饮用水途径产生的健康风险均处于可忽略水平。Cr 和 Cd 占总健康风险值的比例平均分别为 89.52% 和 10.45%, 应作为优先污染物而予以重视和加强管理。

本研究只考虑了通过饮水途径摄入, 未考察其他暴露途径, 如皮肤接触和吸入等, 因此, 所得风险值实际上是低估了重金属的暴露风险。再者, 通过饮水暴露途径的健康风险还与人们的生活方式、生活习惯以及职业类型密切相关<sup>[1]</sup>。本次研究中, 重金属总的健康风险值的测度仅为致癌与非致癌风险的简单相加, 并没有考虑各重金属间的拮抗或协同等相互作用<sup>[36]</sup>。此外, 本次健康风险评价所选用的参数是借鉴已有成果, 而并没有通过调查研究获得针对研究区范围内的基本参数, 如体重、寿命, 也没有针对不同暴露人群(成人、儿童、男人和女人)开展具体评价, 因此所得结论较为宽泛。

### 参考文献:

- [1] 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, 25(2): 47-50. (GAO Jijun, ZHANG Liping, HUANG Shengbiao, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 25(2): 47-50. (in Chinese))
- [2] 韩芹芹, 王涛, 杨永红. 乌鲁木齐市主要饮用水源地水质健康风险评价[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1): 57-63. (HAN Qinqin, WANG Tao, YANG Yonghong. Environmental health risk of the main drinking water sources of Urumqi [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(1): 57-63. (in Chinese))
- [3] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 547-553. (LI Xiangping, QI Jianying, CHEN Yongheng. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 547-553. (in Chinese))
- [4] 杜维, 李爱民, 鲁敏, 等. 长江武汉段水质重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 535-539. (DU Wei, LI Aimin, LU Min, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the Yangtze river of Wuhan area [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 535-539. (in Chinese))
- [5] 曾彩明, 黄免彦, 谭晓辉, 等. 南方某河流型饮用水源地

- 重金属健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 27-31. (ZENG Caiming, HUANG Huanyan, TAN Xiaohui, et al. Health risk assessment practice of heavy metals in a southern river drinking water source [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(4): 27-31. (in Chinese))
- [6] 程柳, 毛宇翔, 王梅, 等. 小浪底水库水体中重金属含量的测定和健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 319-324. (CHENG Liu, MAO Yuxiang, WANG Mei, et al. Identification of the health metal contents in the water of Xiaolangdi Reservoir and its health risk assessment [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 319-324. (in Chinese))
- [7] 李兰芳, 陈海珍, 洗丽雯, 等. 广州市主城区饮用水中重金属含量及健康风险评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2013, 23(6): 1557-1559. (LI Lanfang, CHEN Haizhen, XIAN Liwen, et al. Determination and health risk assessment of heavy metals on drinking water in main urban area of Guangzhou City [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2013, 23(6): 1557-1559. (in Chinese))
- [8] 杨阳, 许策, 程高峰, 等. 保定市市区生活饮用水中重金属污染物健康风险初步评价[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 292-297. (YANG Yang, XU Ce, CHENG Gaofeng, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Baoding City [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(2): 292-297. (in Chinese))
- [9] 胡春华, 周文斌, 黄宗兰, 等. 环鄱阳湖区农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 102-106. (HU Chunhua, ZHOU Wenbin, HUANG Zonglan, et al. Health risk assessment of heavy metals in rural drinking waters around the district of Poyang lake [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 34(1): 102-106. (in Chinese))
- [10] 张时珍, 李再兴. 农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2012, 29(3): 55-57. (ZHANG Shizhen, LI Zaixing. Health risk assessment of heavy metals in rural drinking water [J]. Journal of Fuyang Teachers College (Natural Science), 2012, 29(3): 55-57. (in Chinese))
- [11] 张生, 洪城. 宿州市水资源可持续利用研究[J]. 宿州学院学报, 2005, 20(1): 95-98. (ZHANG Sheng, HONG Cheng. Sustainable utilization research on water resources in Suzhou City [J]. Journal of Suzhou University, 2005, 20(1): 95-98. (in Chinese))
- [12] SUN L, PENG W. Heavy metals in shallow groundwater of the urban area in Suzhou, northern Anhui Province, China [J]. Water Practice & Technology, 2014, 9(2): 197-205.
- [13] 昌熙. 宿州市埇桥区地下水硬度的平面分布特征及其成因研究[J]. 宿州学院学报, 2010, 25(8): 26-29. (CHANG Xi. Horizontal distribution of shallow groundwater hardness in Yongqiao district, Suzhou City [J]. Journal of Suzhou University, 2010, 25(8): 26-29. (in Chinese))
- [14] 林曼利, 桂和荣, 彭位华, 等. 典型矿区深层地下水重金属含量特征及健康风险评价: 以皖北矿区为例[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 589-598. (LIN Manli, GUI Herong, PENG Weihua, et al. Health risk assessment of heavy metals in deep groundwater from different aquifers of a typical coal mining area: a case study of a coal mining area in northern Anhui Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(5): 589-598. (in Chinese))
- [15] 林曼利, 桂和荣, 彭位华. 安徽北部矿区深层地下水重金属含量特征及水质评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 266-271. (LIN Manli, GUI Herong, PENG Weihua. Study on content characteristics and water quality assessment of heavy metals in deep groundwater from northern Anhui mining areas [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6): 266-271. (in Chinese))
- [16] SUN L, PENG W. Groundwater in rural area of Suzhou, northern Anhui Province, China: heavy metal concentrations and statistical analysis [J]. Journal of Chemical & Pharmaceutical Research, 2014, 6(3): 1501-1505.
- [17] 郑贺祥, 马安丽. 淮北、宿州两市地下水资源开发利用存在问题与对策[J]. 地下水, 2006, 28(6): 86, 93. (ZHENG Hexiang, MA Anli. Problems and countermeasures of groundwater resources exploitation and utilization in Suzhou and Huaibei cities [J]. Ground Water, 2006, 28(6): 86, 93. (in Chinese))
- [18] 李珊珊, 田考聪. 饮用水源水中重金属的健康风险评价[J]. 重庆医科大学学报, 2008, 33(4): 450-452. (LI Shanshan, TIAN Kaocong. Health risk assessment of chemical pollutants in drinking water [J]. Journal of Chongqing Medical University, 2008, 33(4): 450-452. (in Chinese))
- [19] 邹滨, 曾永年, ZHAN B F, 等. 城市水环境健康风险评价[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2): 94-98. (ZOU Bin, ZENG Yongnian, ZHAN B F, et al. Spatial and temporal health risk assessment of water environment in urban area [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(2): 94-98. (in Chinese))
- [20] United States Environment Protection Agency (USEPA). Guidelines for carcinogen risk assessment [R]. Washington D C: USEPA, 2005.
- [21] MUHAMMAM S, SHAH M T, KHAN S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2011, 98(2): 334-343.
- [22] 温海威, 吕聪, 王天野, 等. 沈阳地区农村地下水饮用水中

- 重金属健康风险评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28 (23): 242-247. (WEN Haiwei, LYU Cong, WANG Tianye, 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))
- [23] 郭杏妹, 李宁, 康园, 等. 佛山市农村饮用水中重金属的健康风险评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(1): 21-25. (GUO Xingmei, LI Ning, KANG Yuan, et al. The health risk evaluation of heavy metals via rural surface water source in Foshan [J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(1): 21-25. (in Chinese))
- [24] 郭占景, 范尉尉, 陈风格, 等. 河北省某市农村地区集中式供水水质及健康风险分析[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(12): 953-956. (GUO Zhanjing, FAN Weiwei, CHEN Fengge, et al. Drinking water quality of centralized water supply and health risk assessment in rural areas of a city of Hebei Province [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2014, 31(12): 953-956. (in Chinese))
- [25] 郭占景, 范尉尉, 陈风格, 等. 石家庄市农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2014, 4(1): 17-21. (GUO Zhanjing, FAN Weiwei, CHEN Fengge, et al. Health risk assessment for heavy metals in rural drinking water in Shijiazhuang City [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2014, 4(1): 17-21. (in Chinese))
- [26] United States Environment Protection Agency (USEPA). Proposed guidelines for carcinogen risk assessment [R]. Washington D C: USEPA, 1996.
- [27] United States Environment Protection Agency (USEPA). Health effects assessment summary tables [R]. Washington D C: USEPA, 1999.
- [28] United States Environment Protection Agency (USEPA). Risk assessment issue papers [R]. Washington D C: USEPA, Superfund Technical Support Center, National Center for Environmental Assessment (NCEA), 2000.
- [29] 中华人民共和国卫生部和国家标准化委员会. 生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [30] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准: 地下水质量标准(GB/T 14848-93) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [31] United States Environment Protection Agency (USEPA). Exposure factors hand book [R]. Washington D C: USEPA, 1997.
- [32] 王铁军, 查学芳, 熊威娜, 等. 贵州遵义高坪水源地岩溶地下水重金属污染健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 46-50. (WANG Tiejun, ZHA Xuefang, XIONG Weina, et al. Primary study of health risk assessment of heavy metals in karst groundwater in Gaoping area in Zunyi City, Guizhou Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 46-50. (in Chinese))
- [33] 车飞. 辽宁省沈抚污灌区多介质重金属污染的人体健康风险评价[D]. 北京: 中国环境科学研究院. 2009.
- [34] 黄艳红, 常薇, 何振宇. 武汉市农村地区地下水健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(10): 892-894. (HUANG Yanhong, CHANG Wei, HE Zhenyu. Health risk assessment of rural groundwater in Wuhan, Hubei [J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(10): 892-894. (in Chinese))
- [35] 何健飞, 王国彬, 赖婧. 清远市某工业区农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(23): 3460-3462. (HE Jianfei, WANG Guobin, LAI Jing. Health risk assessment of heavy metal in rural drinking water in a certain industrial zone of Qingyuan City [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2014, 24(23): 3460-3462. (in Chinese))
- [36] 杨莉霞, 王琳, 姜朴, 等. 淮河流域某地区地下水污染健康风险评价[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1599-1603. (YANG Lixia, WANG Lin, JIANG Pu, et al. Health risk assessment of pollution in groundwater of Huaihe river basin [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9): 1599-1603. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-12-03 编辑: 王芳)
- .....
- (上接第 103 页)
- [17] 马巍, 浦承松, 罗佳翠, 等. 滇池水动力特性及其对北岸蓝藻堆积驱动影响[J]. 水利学报, 2013, 44(增刊1): 22-27. (MA Wei, PU Chengsong, LUO Jiacui, et al. Hydrodynamic characteristics of Dianchi Lake and its influence on accumulation of blue-green algae in Dianchi Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(sup1): 22-27. (in Chinese))
- [18] 逢勇, 濮培民. 太湖表面定振波的数值计算和最大熵谱分析[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(2): 157-162. (PANG Yong, PU Peimin. Numerical computation and maximum entropy analysis of the surface seiche in Taihu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(2): 157-162. (in Chinese))
- [19] 韩红娟, 胡维平, 晋义泉. 风速变化对竹湖流场结构影响的数值试验[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(6): 567-576. (HAN Hongjuan, HU Weiping, JIN Yiquan. Numerical experiments on influence of wind speed on current in lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(6): 567-576. (in Chinese))
- [20] 井爱芹, 马寨璞. 洪泽湖风生流三维数值模拟[C]//朱德祥. 第二十届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 678-686.
- (收稿日期: 2016-03-15 编辑: 熊水斌)