

# 某水源水总 α 放射性水平调查与评价

马秀凤,黄微,胡翔,刘庆云,张晶,刘陆,许芝剑

北京市辐射安全技术中心,北京 100089

**摘要:** **目的** 对某区部分点位总 α 浓度较高的饮用水源水进行核素分析和内照射剂量估算,并提出合理解释和可能的解决方案。**方法** 总 α 浓度及核素分析参照现行国内相关标准进行测量,摄入的内照射剂量估算参照国际通行的公式。**结果** 基于总 α 的测量结果,长期饮用该水源地生水的居民,其内照射年有效剂量均值为 0.09 mSv/a,最大值有可能超过饮用水剂量指导水平(0.1 mSv/a);饮用水中总 α 放射性主要是由 U 和<sup>226</sup>Ra 贡献的,内照射剂量 U 占小部分,主要来源于<sup>226</sup>Ra,但未超过 WHO 关于饮用水所致辐射的健康效应有关放射性核素浓度的指导水平。**结论** 该地区地下水总 α 放射性偏高的原因可能与该地区的地质结构有关。地下水在其形成过程中,溶入了围岩中的天然放射性核素,最终导致结果偏高。

**关键词:** 总 α 放射性;地质结构;天然放射性核素

中图分类号:TL817+.2 文献标识码:A 文章编号:1004-714X(2019)03-0325-03

## Investigation and evaluation of the total α level in a groundwater source

MA Xiufeng, HUANG Wei, HU Xiang, LIU Qingyun, ZHANG Jing, LIU Lu, XU Zhijian  
Beijing Radiation Safety Technology Center, Beijing 100089 China

**Abstract:** **Objective** To analyze the radionuclides contents and estimate the internal dose for the raw water with a high level of total α activity in some sites of a region, and to provide the reasonable explanations and possible solutions. **Methods** The total α activity concentration and radionuclide analysis were determined according to the current domestic relevant standards. The international formula was used for the internal irradiation dose estimation. **Results** Based on the measured total α level, the average annual effective dose of internal irradiation for residents who have been drinking the raw water in this area for long time was averaged to be 0.09 mSv and the maximum dose might exceed the recommended drinking water dose level (0.1 mSv/a). The total α activity in the drinking water was mainly contributed by U and <sup>226</sup>Ra, and the internal radiation dose came mainly from <sup>226</sup>Ra. However, the <sup>226</sup>Ra content in the drinking water did not exceed the guidance level recommended by WHO. **Conclusion** The high radioactivity level of total α in the groundwater in this area may be related to the geological structure of the area. The natural radioactive nuclides in the aquifer rock may dissolve into and are concentrated during the formation of groundwater, which eventually result in the high total α level in the groundwater.

**Key words:** Total α; Geological Structure; Natural Radionuclide

《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)对供水水源水质的放射性指标(总 α、总 β)提供了标准限值(总 α≤0.1 Bq/L、总 β≤1 Bq/L)<sup>[1]</sup>,当水源水质不符合要求时,不宜作为供水水源。若限于条件需加以利用时,水源水质超标项应经自来水厂净化处理,以达到标准要求。我中心在对某地区水源进行监测时,发现其总 α 浓度偏高。为确保饮水安全,本文对该水源地部分井水总 α 放射性进行了摄入有效剂量的估算。

### 1 材料与方法

1.1 试剂及仪器 ①镅-241 标准粉末源,<sup>40</sup>KCl 标准

粉末源,模拟水固体源,模拟土壤源(中国原子能科学研究院提供);铀、钍标准溶液(美国 Spex CertiPrep 公司);钋-209 标准溶液(Eckert&Ziegler 公司);硝酸溶液(1+9),浓硫酸,无水乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。②LB770 低本底 α/β 检测仪(德国 Berthold 公司);GMX60-83-LB-C-C 低本底反康普顿高纯锗 γ 能谱仪(美国 ORTEC 公司);ELEMENT2E 高分辨电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher 公司);HR2000B 恒温电热板(北京莱伯泰科仪器股份有限公司);LX0211 箱式电阻炉(天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司);MS204TS/01 分析天平(Mettler-Toledo

作者简介:马秀凤(1988 -),女,福建南平人,工程师,从事辐射环境监测工作。E-mail:imaxiufeng@sina.com

公司);1 000 mL 烧杯,50 mL 蒸发皿,量筒,不锈钢样品盘(φ60 mm)(国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 样品采集与处理 按照《辐射环境监测技术规范》(HJ/T 61—2001)、《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164—2004)及《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)<sup>[2]</sup>采样相关要求,结合该地水源井基本情况及分布特点进行采样及处理。

1.3 样品分析 水样总 α 浓度测量参照《生活饮用水标准检验方法 放射性指标》(GB/T 5750. 13—2006)<sup>[5]</sup>,水样采用蒸发浓缩法进行前处理,总 α 放射性不包括挥发性核素和氡的贡献;核素分析参照《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)<sup>[6]</sup>、《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》(GB/T 11713—2015)<sup>[7]</sup>、《水中钋-210 的分析方法》(HJ 813—2016)<sup>[8]</sup>。

1.4 剂量估算

1.4.1 放射性总 α 所致居民的有效剂量 摄入饮用水所致辐射暴露的年有效剂量(AED)可以用来评价公众健康风险,

$$AED = A \times V \times C \tag{1}$$

式中:A - 总 α 活度,Bq/L;V - 世界卫生组织(WHO)推荐成年人年摄入量,730 L/a,假设居民长期摄入该水源水;C - 成年人摄入总 α 剂量转换系数, $3.58 \times 10^{-4}$  mSv/Bq<sup>[9]</sup>。

1.4.2 水中放射性核素所致内照射的有效剂量 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2008 年报告书<sup>[10]</sup>中根据放射性核素公众摄入量估算内照射剂量的估算方法,核素 j 经食入途径所致公众内照射剂量为:

$$E_{ing} = \sum_j e_{j,ing} I_{j,ing} = \sum_j C_{j,w} e_{j,ing} V \tag{2}$$

式中: $E_{ing}$  - 食入放射性核素所致的年待积有效剂量(mSv/a); $e_{j,ing}$  - 食入放射性核素 j 的有效剂量转换系数(mSv/Bq); $I_{j,ing}$  - 放射性核素 j 的年摄入量(Bq/a); $C_{j,w}$  - 生活用水中放射性核素的浓度(Bq/L)。

2 结果

2.1 总 α 放射性检测及评价 查阅历史检测资料显示,该区水源总 α 浓度范围为 0.10 ~ 0.56 Bq/L,均值为 0.26 Bq/L,结果始终超过城市供水水源水质的标准限值。2016-2018 年,我中心抽取某供水厂若干眼水源井井水进行总 α 放射性检测,范围为 0.13 ~ 0.45 Bq/L,均值为 0.35 Bq/L。利用式(1)则可算出 AED 范围为 0.03 ~ 0.12 mSv/a,均值为 0.09 mSv/a,

最大值超过 WHO 推荐的饮用水剂量指导值(0.1 mSv/a)<sup>[11]</sup>。

但是不能仅据此就从放射性的角度判断该水质不合格。总放射性指标是为了筛选目的而推荐的参考水平,该测量作为一种筛选测量,不能对其要求过高,该测量不能给出有关放射性核素的资料,所以也就不能得出有剂量学意义的结论,不能直接用来确定是否为可接受的浓度<sup>[12]</sup>。对于超过建议值的这部分水样,为最终作出合理的判断,对其作进一步核素分析以科学评价其潜在的危害性。

2.2 水样核素分析及评价 根据分析方法对水样进行核素浓度调查,调查结果列于表 1。

表 1 水中各放射性核素浓度

放射性核素	U(μg/L)	Th(μg/L)	<sup>226</sup> Ra(mBq/L)	<sup>210</sup> Po(mBq/L)
范围	5.74 ~ 17.0	0.042 9 ~ 0.080 7	4.58 ~ 137	1.83 ~ 5.31
均值	10.4	0.065 6	35.4	3.69

可以从数据看出,井水中天然放射性核素浓度波动范围较大,U 和<sup>226</sup>Ra 的平均浓度明显高于我国水源井水调查的平均水平(U:3.38 μg/L;<sup>226</sup>Ra:6.48 mBq/L)<sup>[13]</sup>,可能主要受水井所在地的地质结构影响。

由此可见,地下水中总 α 放射性的贡献主要来自 U 和<sup>226</sup>Ra。根据辐射安全手册<sup>[14]</sup>提供的天然铀的放射性比活度值(<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和<sup>234</sup>U 的放射性比活度分别为  $1.24 \times 10^{-8}$ 、 $8.00 \times 10^{-8}$  和  $2.30 \times 10^{-4}$  TBq/g)及天然铀中<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和<sup>234</sup>U 同位素相对丰度(<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U 和<sup>234</sup>U 丰度分别为 99.27%、0.72% 和 0.005 4%),进行单位换算,食入放射性核素 j 的有效剂量系数参照 UNSCEAR 2008 年报告书资料取值,利用式(2),计算结果列入下表:

表 2 计算参数及各放射性核素所致居民的年待积有效剂量

放射性核素	$e_{j,ing}$ (mSv/Bq)	$C_{j,w}$ (Bq/L)	$E_{ing}$ (mSv/a)	
			均值	范围
<sup>238</sup> U	$4.5 \times 10^{-5}$	0.070 6 ~ 0.209	0.004	0.002 ~ 0.007
<sup>235</sup> U	$4.7 \times 10^{-5}$	0.003 31 ~ 0.009 79	0.000 2	0.000 1 ~ 0.000 3
<sup>234</sup> U	$4.9 \times 10^{-5}$	0.071 3 ~ 0.211	0.005	0.003 ~ 0.008
<sup>226</sup> Ra	$2.8 \times 10^{-4}$	0.004 58 ~ 0.137	0.007	0.000 9 ~ 0.03

居民摄入该水源水,<sup>235</sup>U 所致的内照射剂量微乎其微,可以忽略不计,<sup>238</sup>U 和<sup>234</sup>U 对人体内照射贡献占小部分(最大约 10%),其结果高于 UNSCEAR 2000 年报告书<sup>[15]</sup>中调查报告(<sup>238</sup>U:0.000 25 mSv/a;<sup>234</sup>U:0.000 28 mSv/a,对成年人饮水量取 500 L/a)。内照射剂量产生主要来源于<sup>226</sup>Ra,有效剂量为(0.000 9 ~

0.03)mSv/a,均值为 0.007 mSv/a,略高于 UNSCEAR 2000 年报告书中调查报道(0.006 3 mSv/a),未超过饮用水剂量指导水平 0.1 mSv/a。

2.3 固体中核素分析及评价 为排除人为污染的可能性,对该水源地周围主要风险源进行了调查,对水源地固体样品(包括土壤、岩石和煤渣)进行了监测。风险源有研究院、医院、探伤企业,涉及 α 源主要为 <sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra、<sup>210</sup>Po 等放射源以及 <sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>239</sup>Pu、<sup>241</sup>Am 等非密封放射性物质。根据近年本市辐射环境质量报告书显示<sup>[16]</sup>,本世纪研究区无辐射事故发生。为作出科学判断,对该地离主要风险源最近水源井周围表层土壤进行核素分析,监测结果见表 3。

表 3 土壤核素分析结果

土壤 编号	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>234</sup> U <sup>1)</sup> (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	备注
1	58.2	58.2	39.2	27.7	
2	56.6	56.6	31.6	25.1	
3	30.8	30.8	36.7	24.4	
4	21.2	21.2	37.0	25.7	
5	23.5	23.5	35.9	23.9	
6	48.5	48.5	25.5	33.6	
7	30.3	30.3	49.8	31.9	本底参考物

注:1) <sup>234</sup>U 的放射性,根据 <sup>238</sup>U 和 <sup>234</sup>U 处于平衡得出。

从分析结果来看,作为环境本底参考物的山地土壤,其 <sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 含量与中国土壤 <sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 的平均含量 37.0 Bq/kg、37.3 Bq/kg、56.0 Bq/kg、29.3 Bq/kg<sup>[17]</sup> 相比较,可以认为该地区环境本底不高。所监测井周围表层土壤 <sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 含量也属正常范围。

为最终作出科学的判断,在探明该区域水文地质条件,水源井钻孔综合地质情况<sup>[18]</sup> 的基础上,取水源地蓄水层围岩进行核素分析,监测结果见表 4。

表 4 水源井蓄水层围岩核素分析结果

样品描述	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>234</sup> U <sup>1)</sup> (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)
灰绿色玄武岩	< 12.4	< 12.4	29.6	11.7
灰黑色灰岩	12.8	12.8	3.8	8.8
泥质灰岩	29.0	29.0	4.5	13.6
粘砂含砾	134	134	97.1	74.1
黑色煤渣	12.1	12.1	4.0	14.4

注:1) <sup>234</sup>U 的放射性,根据 <sup>238</sup>U 和 <sup>234</sup>U 处于平衡得出。

由表 4 可见,围岩样品玄武岩、灰岩和煤渣中 <sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 含量与 <sup>238</sup>U、<sup>234</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 在地壳中的平均含量 16.1 Bq/kg、16.2 Bq/kg、22.7 Bq/kg、

34.8 Bq/kg 相比较,属正常范围。应当引起注意的是,在粘土、砂砾石中的 U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 含量相对较高,尤其 U 含量超过平均水平约 7 倍。

由此推测该地区地下水总 α 放射性偏高的原因可能是与该地区的地域地质结构有关。地下水在其形成过程中,溶入了围岩中的天然放射性核素,最终导致结果偏高。

3 讨论

本文在探明研究区水文地质条件、水源地开采现状、往年监测数据等信息的基础上,对该区水源水总 α 放射性水平进行调查和评价,及时查明原因,给公众一个交代。结果表明,长期饮用该区饮用水不会对居民造成健康危害,该区地下水总 α 放射性偏高的原因可能与该区的地质结构有关。地下水在其形成过程中,溶入了围岩中的天然放射性核素,最终导致结果偏高。

虽然水源水中天然放射性核素浓度符合标准,但从安全考虑,建议采用各种方法以降低水硬度,保证出厂水达标。

密切监视该区域地下水水质变化。除对水源井进行定期取样监测以外,即在水源地范围内,利用原有供水井建立系统的区域地下水水质监测点,应同时加强水源地上游地区水质监测力度,定期进行水质取样监测。

现行的《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)放射性指标是以《地下水质量标准》(GB/T 14848—1993)为依据制定的,而《地下水质量标准》(GB/T 14848—1993)是以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—1985)为依据制定的。根据世界环境变化及污染物质对人体健康的影响,2004 年 WHO 将《饮用水水质准则》更新到了第三版,其中将总 α 浓度筛查水平由原来的 0.1 Bq/L 提高到 0.5 Bq/L<sup>[19]</sup>,我国卫生部相应于 2006 年更新了《生活饮用水卫生标准》(现行标准号为 GB 5749—2006),质量监督检验检疫总局相应于 2017 年修订了《地下水质量标准》(现行标准号为 GB/T 14848—2017),其中对饮用水水源中总 α 浓度限值都修订为 0.5 Bq/L<sup>[20]</sup>。建议应尽快修改现行的《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)中的放射性指标,使之符合国际上辐射防护的基本原则和观点;符合我国的国情;与我国正在修订中的辐射防护基本标准相容。

(下转第 332 页)

为一种环境影响分析方法和工具,不仅可以识别对环境影响最大的过程和生命周期阶段,而且可以对能耗、物耗进行全面平衡,既可降低产品成本,又可帮助改进设计<sup>[1,17-18]</sup>。本文只是对 DUF<sub>6</sub> 转化设施进行了初步生命周期评价,今后还将利用 LCA 开展更详细、全面的评价,为不断提高核设施的环境效益和社会的可持续发展作出贡献。

## 参考文献

- [1] Institution B S. BS EN ISO 14040:2006 Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework [M]. 2006.
- [2] Thmos D Foust. Environmental life cycle assessment. Cincinnati: The McGraw-Hill Companies. 1996;5 -15.
- [3] 刘伟. 典型蓄电池生命周期评价研究 [D]. 济南:山东大学, 2017.
- [4] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价 [D]. 北京:中国农业大学,2016.
- [5] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析 [D]. 北京:中国农业科学院,2016.
- [6] 项东. 煤制烯烃过程技术经济分析与生命周期评价 [D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [7] 谢小天,孙莹,张培栋,等. 城市生活垃圾处理方式生命周期评价的比较研究 [J]. 环境污染与防治,2015,37(4):106-110.
- [8] 黄希望,罗小勇,李轶,等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析 [J]. 水资源保护,2014,30(1):90-94.
- [9] 杨洁,王洪涛,周君. 铁路运输生命周期评价初探 [J]. 环境科学研究,2013,26(9):1029-1034.
- [10] 罗小勇,黄希望,王大伟,等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述 [J]. 环境工程,2013,31(4):118-122.
- [11] 钱宇,杨思宇,贾小平,等. 能源和化工系统的全生命周期评价和可持续性研究 [J]. 化工学报,2013,64(1):133-147.
- [12] 洪竞科,王要武,常远. 生命周期评价理论及在建筑领域中的应用综述 [J]. 工程管理学报,2012,26(1):17-22.
- [13] 环境保护部(国家核安全局),国家发展和改革委员会,财政部等. 核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 年远景目标 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2017.
- [14] U. S. Department of Energy. Final environmental impact statement for construction and operation of a depleted uranium hexafluoride conversion facility at the portsmouth, Ohio, site [R]. DOE/EIS-0360, 2004
- [15] 国家统计局. 环境统计数据 [OL]. <http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/2010/>
- [16] International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Energy and carbon emissions inventories database [OL]. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitiontoNewTechnologies/EnergyCarbonDatabase.en.html>.
- [17] 肖汉雄,杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用 [J]. 城市与环境研究,2018,5(1):88-105.
- [18] 韩润平,魏爱卿,陆雍森. 环境影响评价的工具——生命周期评价 [J]. 郑州大学学报(理学版),2003,35(2):83-88.

收稿日期:2018-12-16

(上接第 327 页)

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. CJ/T 206—2005 城市供水水质标准 [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [2] 国家环境保护总局. HJ/T 61—2001 辐射环境监测技术规范 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2001.
- [3] 国家环境保护总局. HJ/T 164—2004 地下水环境监测技术规范 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [4] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB 5750. 13—2006 生活饮用水标准检验方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. HJ 700—2014 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. GB/T 11713—2015 高纯锗  $\gamma$  能谱分析通用方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [8] 中华人民共和国环境保护部. HJ 813—2016 水中钋-210 的分析方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [9] 赵新春,马一龙,雷家杰,等. 某总  $\alpha$  超标井水所致居民年剂量及卫生学评价 [J]. 中国辐射卫生,2016,25(5):539-541.
- [10] United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation [R]. UNSCEAR 2008 Report. New York;2008.
- [11] World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed [M]. World Health Organization; Geneva, Switzerland, 2011.
- [12] 林莲卿,马永忠. 对我国《生活饮用水卫生标准》GB 5749—85 中放射性指标的几点看法 [J]. 辐射防护,1999,19(3):190.
- [13] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国水体中天然放射性核素浓度调查 [J]. 辐射防护,1992,12(2):158-159.
- [14] 潘自强. 辐射安全手册 [M]. 北京:科学出版社,2014.
- [15] United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation [R]. UNSCEAR 2000 Report. New York;2000.
- [16] 北京市环境保护局. 北京市辐射环境质量报告书 [R]. 北京:2001-2017.
- [17] 迟清华,酆明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京:地质出版社,2007.
- [18] 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志 (1991 年一版一印) [M]. 北京:地质出版社,1991.
- [19] World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality, 3rd ed [M]. World Health Organization; Geneva, Switzerland,2004.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14848—2017 地下水质量标准 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.

收稿日期:2019-02-01