



徐承香,王倩,张思强,等. 贵州某矿区乡镇饮用水源重金属分布特征及健康风险评价[J]. 黑龙江农业科学, 2021(5):102-109.

贵州某矿区乡镇饮用水源重金属分布特征及健康风险评价

徐承香,王倩,张思强,杜维锋,冉月,吴永英,姜雪梅

(贵州师范大学 生命科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为了解贵州某乡镇饮用水源的重金属浓度及健康风险水平,对该乡镇 12 个村的饮用水中的 8 种重金属浓度进行了检测分析,并运用 US EPA 推荐的健康风险评价模型,估算了经饮水途径下重金属污染物所致的健康危害风险。结果表明:1[#] 村 Ni 的浓度($63.027 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)超过了国家《生活饮用水卫生标准》限值。Pearson 相关性分析表明, Ni、Cd、As、Pb、Cu 之间存在较强的相关性,相关系数均在 0.6 以上,表明这些元素之间具有一定的同源性或地球化学特性相近。健康风险评价表明,1[#] 村、2[#] 村、3[#] 村、4[#] 村、6[#] 村、10[#] 村、12[#] 村饮用水中 Cr 所致的成人和儿童的个人平均年健康风险均超过了英国皇家协会等国际机构推荐的最大可接受风险($1.0\times 10^{-6} \text{a}^{-1}$),说明长期饮用这 7 个村的不加处理的地下水或井水会产生一定的致癌风险。儿童健康总风险高于成人,需加强对儿童饮用水安全的控制和管理。Cr、As 对成人和儿童健康总风险的平均贡献率均为 98.57%,应作为优先控制管理的污染物。

关键词:饮用水;重金属;健康风险评价;矿区;贵州省

农村生活饮用水安全关系着居民的基本生存权利,是衡量居民生活质量和经济发展水平的重要标准之一。近年来,我国农村饮水安全工程建设取得重大成就,至 2018 年底,全国农村自来水普及率已达到 80% 以上,解决了绝大多数农村居民的安全饮水问题^[1]。但是,由于农村饮用水水源点多面广,单个水源规模较小,居民对水资源及环境保护的意识淡薄,环境管理薄弱等^[2],甚至还有少部分农村地区,生活饮用水直接或间接取自于天然未经处理的地下水源,故农村生活饮水安全仍面临一定的挑战。

影响农村饮水安全的污染物主要包括有机污染物(农药等)、生物类污染物(有害细菌等)、抗生素类污染物和重金属为代表的无机污染物等^[3]。其中,重金属具有毒性、持久性和生物累积性等特点^[4],它们可通过食物链浓缩和放大,在人体内积累,可能会严重损害人类的肝脏、肾脏、心血管、胃肠道和神经系统等^[5-7]。一些重金属如 Pb、Cr、As 等甚至会引起肺癌、前列腺癌、皮肤癌等癌症^[7-8],据统计,90% 的癌症是由化学致癌物所导

致的,饮水是重要的途径之一^[9]。因此,对农村饮用水中重金属的分布特征及污染现状进行研究,具有十分重要的现实意义。水环境重金属污染评价的方法很多,有人工神经网络法^[10]、内梅罗指数法^[11]、单因子污染指数评价法及综合污染评价法^[12]等。健康风险评价模型已被国内外广泛用于评估饮用水源重金属污染,如对巴基斯坦北部科希斯坦地区饮用水^[13]、新疆拜城县农牧区饮用水^[14]、柳江流域饮用水源^[9]、河南洛阳陆浑水库饮用水源^[15]、铜仁矿区农村地下饮用水^[16]、南京市饮用水^[17]等水体进行健康风险评估。

水环境中的重金属污染受自然(基岩和矿床的风化、侵蚀)和人为(采矿、冶炼、工业、农业和废水灌溉)活动的影响,这些过程会降低水质^[4]。本次研究区域是位于贵州省中部偏西的某乡镇,是主要的煤矿区。据调查,该乡镇的大部分居民直接或间接以天然的地下水或井水为生活饮用水源。因此本研究对该乡镇饮用水中的 8 种重金属(Cr、Cd、As、Pb、Cu、Hg、Zn、Ni)的含量进行测定分析,并运用 US EPA 推荐的健康风险模型对成人和儿童进行了健康风险评估,旨在为当地居民的生活饮用水安全和人体健康提供科学保障,为农村地下水资源的合理利用提供数据参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省中部偏西的某乡镇,属亚

收稿日期:2021-02-01

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1416);国家自然科学基金项目(31660152);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726 号)。

第一作者:徐承香(1984—),女,博士,副教授,从事生态学和环境污染研究。E-mail:xcxiang119@163.com。

热带气候,冬无严寒,夏无酷暑,气候湿润,全年平均气温 15℃,降雨量 854~1 444 mm。该乡镇所辖 17 个村,1 个社区。境内煤、铁、重晶石、高岭土等矿产资源丰富。其中煤矿资源开采潜力巨大,年生产约 18 万 t,外销约 13 万 t,内销约 5 万 t,是贵州省主要的产煤区之一。

2 研究方法

2.1 样品采集

本研究于 2017 年 12 月对该乡镇 12 个村的地下饮用水进行采样,每个村采样量为 1 L。其中有 2 处采样点为地下井,其余样点均是直接采集于村民家中的水管用水(水源均为天然地下水)。采样时,容器聚乙烯塑料瓶(先用蒸馏水清洗干净)用水样润洗 3 次,井水样品在水面下 15 cm 深处进行取样,村民家中的自来水样品,取样前打开水龙头流 10 min,待水温和电导稳定后进行取样。水样经 0.45 μm 孔径的滤膜进行过滤后装入用蒸馏水洗干净的聚乙烯瓶中,加入高纯 HNO₃ 酸化,使其 pH<2,放入冷藏箱内运回实验室,4℃下密封保存待测。

2.2 样品检测

量取 300 mL 水样,加 20 mL 浓 HNO₃ 电热板上消解至 1 mL,用 0.5% HNO₃ 定容至 10 mL。AA800 原子吸收光谱仪测定 Cr、Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni,AF-640 原子荧光光谱仪测定 Hg 和 As,测定 Hg 和 As 含量需加入 10% 硫脲和抗坏血酸混合溶液。每个水样设置 2 个空白样和 3 个平行样。

2.3 健康风险评价模型

重金属通过饮用途径对人体所造成的健康危害影响,包括化学致癌物和非化学致癌物 2 类,评价模型^[18-19]如下:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_i^c = \sum_{i=1}^k \frac{1 - \exp(-D_i Q_i)}{Y} \tag{1}$$

$$R^n = \sum_{i=1}^m R_i^n = \sum_{i=1}^m \frac{D_i \times 10^{-6}}{Y \times RfD_i} \tag{2}$$

$$D_i = \frac{IR \times C_i}{BW} \tag{3}$$

式中, R_i^c 为致癌物 i (共 k 种)经饮水途径所致个人平均年健康致癌风险(a^{-1}); Q_i 为致癌物 i 的饮水途径致癌强度系数($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); R_i^n 为非致癌物 i (共 m 种)经饮水途径所致个人平均年健

康风险(a^{-1}); RfD_i 为非致癌物 i 的饮水途径参考剂量($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); Y 为平均寿命(a),按毕节市 2010 年人均预期寿命 70.02 a 计算^[20]; D_i 为重金属 i 经饮水途径的单位体重日均暴露剂量($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); IR 为日平均饮水量($L \cdot d^{-1}$),成人和儿童分别取 1.5 和 1.0 $L \cdot d^{-1}$ ^[9,21]; C_i 为重金属 i 的实际质量浓度($mg \cdot L^{-1}$); BW 为人体体重,成人和儿童(7 岁)分别取 60.4 和 22.4 kg ^[22]。重金属毒理学特性参数^[19,23]详见表 1。

假设各重金属对人体健康水平的危害程度呈累积相加关系,而不是协同或拮抗关系,则水环境总的健康风险危害为:

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

表 1 重金属毒理学特性参数(饮水途径)

| 化学致癌物 | $Q_i/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$ | 非化学致癌物 | $RfD_i/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$ |
|-------|---------------------------------------|--------|---|
| Cr | 41.0 | Pb | 1.4×10^{-3} |
| Cd | 6.1 | Cu | 5.0×10^{-3} |
| As | 15.0 | Hg | 3.0×10^{-4} |
| | | Zn | 3.0×10^{-1} |
| | | Ni | 2.0×10^{-2} |

3 结果与分析

3.1 研究区饮用水重金属浓度特征

由表 2 可知,研究区饮用水中 8 种重金属浓度范围为:Cr 0.013~2.204 $\mu g \cdot L^{-1}$,Cd 0.001~0.169 $\mu g \cdot L^{-1}$,As 0.013~0.137 $\mu g \cdot L^{-1}$,Pb 0.003~0.091 $\mu g \cdot L^{-1}$,Cu 0.078~5.498 $\mu g \cdot L^{-1}$,Hg 0.001~0.006 $\mu g \cdot L^{-1}$,Zn 4.978~423.652 $\mu g \cdot L^{-1}$,Ni 0.058~63.027 $\mu g \cdot L^{-1}$ 。重金属在 12 个村的平均值排序为 Zn(60.983 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Ni(5.888 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Cu(0.653 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Cr(0.589 $\mu g \cdot L^{-1}$)>As(0.062 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Pb(0.020 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Cd(0.019 $\mu g \cdot L^{-1}$)>Hg(0.003 $\mu g \cdot L^{-1}$)。由图 1 可以看出,各村饮用水中的重金属质量浓度堆积的变化范围为 5.422 $\mu g \cdot L^{-1}$ (9# 村)~424.434 $\mu g \cdot L^{-1}$ (6# 村)。Zn(86.40%)、Ni(6.69%)、Cr(4.51%)的平均贡献率较大,这 3 种重金属贡献率最大的样点分别在 6# 村(99.82%)、1# 村(45.19%)和 2# 村(21.94%)。12 个村的 8 种重金属的总含量排序为:6# 村(424.434 $\mu g \cdot L^{-1}$)>1# 村(139.482 $\mu g \cdot L^{-1}$)>5# 村(106.87 $\mu g \cdot L^{-1}$)>11# 村(44.395 $\mu g \cdot L^{-1}$)>10#

村($34.485\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>7[#]村($15.886\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>12[#]村($11.986\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>3[#]村($11.889\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>2[#]村($10.045\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>8[#]村($7.214\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>4[#]村($6.515\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)>9[#]村($5.422\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

根据《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006),除了1[#]村Ni的浓度($63.027\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)超过标准限值外,是标准限值的3.15倍,其余11个村的所有重金属浓度均低于标准限值,说明1[#]村的

饮用水源需要引起重视,其余11个村的饮用水源符合国家生活饮用水水质要求。

研究区的饮用水中重金属元素的含量变异系数大小顺序为Ni(306.25%)>Cd(250.39%)>Cu(234.03%)>Zn(194.20%)>Pb(131.90%)>Cr(127.95%)>As(61.02%)>Hg(47.75%),尤其是Ni、Cd、Cu、Zn变异差异较大,说明重金属在该研究区的饮用水源中分布不均匀。

表 2 研究区饮用水中的重金属浓度 (μg·L⁻¹)

| 村编号 | Cr | Cd | As | Pb | Cu | Hg | Zn | Ni |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|
| 1 [#] | 0.516 | 0.169 | 0.137 | 0.091 | 5.498 | 0.005 | 70.039 | 63.027 |
| 2 [#] | 2.204 | 0.004 | 0.083 | 0.022 | 0.374 | 0.003 | 7.195 | 0.160 |
| 3 [#] | 0.506 | 0.008 | 0.090 | 0.003 | 0.128 | 0.006 | 11.019 | 0.129 |
| 4 [#] | 0.597 | 0.003 | 0.063 | 0.005 | 0.100 | 0.005 | 5.037 | 0.705 |
| 5 [#] | 0.013 | 0.001 | 0.034 | 0.009 | 0.173 | 0.003 | 106.427 | 0.210 |
| 6 [#] | 0.117 | 0.007 | 0.103 | 0.053 | 0.302 | 0.005 | 423.652 | 0.195 |
| 7 [#] | 0.016 | 0.001 | 0.051 | 0.008 | 0.282 | 0.004 | 15.466 | 0.058 |
| 8 [#] | 0.020 | 0.003 | 0.037 | 0.006 | 0.372 | 0.002 | 6.707 | 0.067 |
| 9 [#] | 0.016 | 0.002 | 0.015 | 0.008 | 0.214 | 0.003 | 4.978 | 0.186 |
| 10 [#] | 1.428 | 0.013 | 0.076 | 0.020 | 0.127 | 0.001 | 31.546 | 1.274 |
| 11 [#] | 0.018 | 0.013 | 0.013 | 0.006 | 0.192 | 0.001 | 39.917 | 4.235 |
| 12 [#] | 1.622 | 0.005 | 0.038 | 0.009 | 0.078 | 0.003 | 9.818 | 0.413 |
| 平均值 | 0.589 | 0.019 | 0.062 | 0.020 | 0.653 | 0.003 | 60.983 | 5.888 |
| 标准差 | 0.754 | 0.047 | 0.038 | 0.026 | 1.529 | 0.002 | 118.428 | 18.032 |
| 变异系数 | 127.95 | 250.39 | 61.02 | 131.90 | 234.03 | 47.75 | 194.20 | 306.25 |
| 标准限值* | 50 | 5 | 10 | 10 | 1000 | 1 | 1000 | 20 |

注：* 为《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)标准限值。

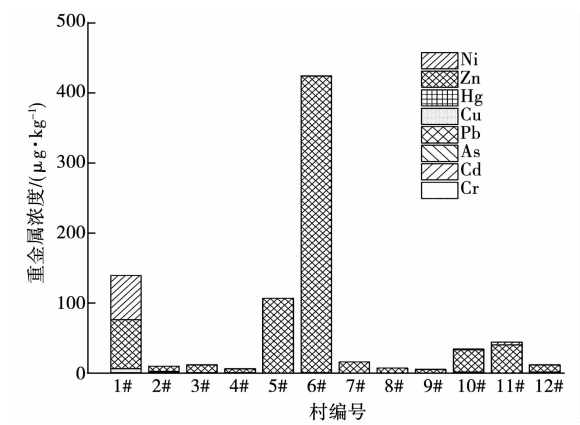


图 1 研究区饮用水中的重金属质量浓度堆积

3.2 研究区饮用水中重金属间相关性分析

对研究区饮用水中的重金属浓度进行 Pear-

son 相关性分析,如果水环境中的重金属元素之间存在显著或极显著的相关性,则表明这些元素可能是复合污染关系或同源关系^[24]。

从表 3 可看出,Ni、Cd、As、Pb 和 Cu 之间存在较强的相关性,相关系数均在 0.6 以上。尤其是 Cd-Pb、Cd-Cu、Cd-Ni、As-Pb、Pb-Cu、Pb-Ni、Cu-Ni 几组元素之间存在极显著相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.857、0.992、0.998、0.787、0.863、0.845 和 0.995,表明这些元素之间具有一定的同源性或地球化学特性相近,其中 Ni 和 Cd 之间关系最为密切。此外,As-Cd、As-Cu、As-Ni、As-Hg 之间存在显著相关($P<0.05$),相关系数分别为 0.644、0.639、0.613、0.626,表明

As的一部分来源或地球化学特性与Cd、Cu、Ni、Hg相同或相近。Zn和Cr与其他元素之间无显著性相关关系,相关系数均在0.5以下,表明Zn和Cr与其他元素的地球化学特性不同或无相同来源。

表3 研究区饮用水中的重金属元素之间的相关性

| 项目 | Cr | Cd | As | Pb | Cu | Hg | Zn | Ni |
|----|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|----|
| Cr | 1 | | | | | | | |
| Cd | -0.013 | 1 | | | | | | |
| As | 0.279 | 0.644* | 1 | | | | | |
| Pb | 0.041 | 0.857** | 0.787** | 1 | | | | |
| Cu | -0.037 | 0.992** | 0.639* | 0.863** | 1 | | | |
| Hg | -0.082 | 0.244 | 0.626* | 0.317 | 0.266 | 1 | | |
| Zn | -0.262 | 0.032 | 0.368 | 0.482 | 0.039 | 0.263 | 1 | |
| Ni | -0.038 | 0.998** | 0.613* | 0.845** | 0.995** | 0.241 | 0.018 | 1 |

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.3 研究区饮用水健康风险评价

根据研究区各饮用水源的重金属浓度数据,运用健康风险模型和参数分别计算了化学致癌物和非化学致癌物对成人和儿童(7岁)经饮水途径所致的个人平均年健康风险和总的健康风险,结果详见表4。

3.3.1 化学致癌物健康风险 对成人来说,化学致癌物Cr、Cd、As经饮水途径所致的个人平均年健康风险范围分别为 $1.89 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (5#村)~ $3.20 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$ (2#村)、 $2.16 \times 10^{-9} \cdot a^{-1}$ (5#村、7#村)~ $3.66 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (1#村)和 $6.92 \times 10^{-8} \cdot a^{-1}$ (11#村)~ $7.29 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (1#村)。对儿童来说,Cr、Cd、As所致的个人平均年健康风险范围分别为 $3.40 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (5#村)~ $5.75 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$ (2#村)、 $3.89 \times 10^{-9} \cdot a^{-1}$ (5#村)~ $6.57 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (1#村)和 $1.24 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$ (11#村)~ $1.31 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ (1#村)。无论是对成人还是儿童,化学致癌物所致的健康危害年风险的均值顺序都表现为Cr>As>Cd。

在研究的12个村中,化学致癌物Cr、Cd、As所致的成人和儿童的个人平均年健康风险虽然均未超过美国环境保护署推荐的最大可接受风险值($1.0 \times 10^{-4} \cdot a^{-1}$),但1#村、2#村、3#村、4#村、6#村、10#村、12#村的饮用水中的Cr所致的成人和儿童的个人平均年健康风险均超过了英国皇

家协会、瑞典环境保护局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受风险值($1.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$),尤其是2#村、10#村和12#村所致的健康风险比最大可接受风险值($1.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$)高了1个数量级,说明上述7个村的饮用水应予以关注。尽管该乡镇的饮用水中Cr的含量低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值,适用于集中式生活饮用水水源,但根据健康风险评价结果,这些村的居民如果长期饮用不加处理的地下水或井水会存在一定的致癌风险。因为致癌风险不仅与致癌重金属的质量浓度有关,还与致癌强度系数、体重、寿命、日平均饮水量、暴露频率、暴露持续时间、平均暴露时间等因素有关^[25]。

3.3.2 非化学致癌物健康风险 对成人来说,非化学致癌物Pb、Cu、Hg、Zn、Ni经饮水途径所致的个人平均年健康风险的平均值分别为 $5.07 \times 10^{-12} \cdot a^{-1}$ 、 $4.63 \times 10^{-11} \cdot a^{-1}$ 、 $3.55 \times 10^{-12} \cdot a^{-1}$ 、 $7.21 \times 10^{-11} \cdot a^{-1}$ 和 $1.04 \times 10^{-10} \cdot a^{-1}$ 。对儿童来说,Pb、Cu、Hg、Zn、Ni通过饮水途径所致的个人平均年健康风险的平均值分别为 $9.11 \times 10^{-12} \cdot a^{-1}$ 、 $8.33 \times 10^{-11} \cdot a^{-1}$ 、 $6.38 \times 10^{-12} \cdot a^{-1}$ 、 $1.30 \times 10^{-10} \cdot a^{-1}$ 和 $1.88 \times 10^{-10} \cdot a^{-1}$ 。成人和儿童风险均值大小均为Ni>Zn>Cu>Pb>Hg,Ni的风险均值最高,这与1#村Ni的含量($63.027 \mu g \cdot L^{-1}$)特别高有关。

非化学致癌物所致的健康风险数量级在 $10^{-13} \sim 10^{-9} \cdot a^{-1}$,远低于英国皇家协会($1.0 \times 10^{-7} \cdot a^{-1}$)、荷兰建设和环境部($1.0 \times 10^{-8} \cdot a^{-1}$)推荐的可忽略水平,表明通过饮水途径中非化学致癌物所引起的健康风险甚微,基本不会对暴露人群构成明显危害。

本研究中致癌重金属元素所产生的健康风险值约是非致癌重金属元素所产生的健康风险值的 10^6 倍,因此,该乡镇饮用水的重金属健康风险主要来自于致癌重金属元素。

3.3.3 健康总风险 健康总风险等于致癌重金属和非致癌重金属所致的健康风险相加。该研究乡镇的饮用水重金属所致的成人和儿童的健康总风险分别在 $3.17 \times 10^{-7} \sim 3.25 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$ 和 $5.70 \times 10^{-7} \sim 5.83 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$ (图2)。儿童健康总风险高于成人,约是成人的1.8倍,因此,应该加强对儿童饮用水安全的控制和管理。

表 4 研究区饮用水重金属经饮水途径所致的个人平均年健康风险和总健康风险 (·a⁻¹)

| 人员 | 村编号 | Cr | Cd | As | Pb | Cu | Hg | Zn | Ni | 总风险 |
|----|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 成人 | 1# | 7.50×10 ⁻⁶ | 3.66×10 ⁻⁷ | 7.29×10 ⁻⁷ | 2.31×10 ⁻¹¹ | 3.90×10 ⁻¹⁰ | 5.91×10 ⁻¹² | 8.28×10 ⁻¹¹ | 1.12×10 ⁻⁹ | 8.60×10 ⁻⁶ |
| | 2# | 3.20×10 ⁻⁵ | 8.65×10 ⁻⁹ | 4.42×10 ⁻⁷ | 5.57×10 ⁻¹² | 2.65×10 ⁻¹¹ | 3.55×10 ⁻¹² | 8.51×10 ⁻¹² | 2.84×10 ⁻¹² | 3.25×10 ⁻⁵ |
| | 3# | 7.36×10 ⁻⁶ | 1.73×10 ⁻⁸ | 4.79×10 ⁻⁷ | 7.60×10 ⁻¹³ | 9.08×10 ⁻¹² | 7.09×10 ⁻¹² | 1.30×10 ⁻¹¹ | 2.29×10 ⁻¹² | 7.85×10 ⁻⁶ |
| | 4# | 8.68×10 ⁻⁶ | 6.49×10 ⁻⁹ | 3.35×10 ⁻⁷ | 1.27×10 ⁻¹² | 7.09×10 ⁻¹² | 5.91×10 ⁻¹² | 5.96×10 ⁻¹² | 1.25×10 ⁻¹¹ | 9.02×10 ⁻⁶ |
| | 5# | 1.89×10 ⁻⁷ | 2.16×10 ⁻⁹ | 1.81×10 ⁻⁷ | 2.28×10 ⁻¹² | 1.23×10 ⁻¹¹ | 3.55×10 ⁻¹² | 1.26×10 ⁻¹⁰ | 3.72×10 ⁻¹² | 3.72×10 ⁻⁷ |
| | 6# | 1.70×10 ⁻⁶ | 1.51×10 ⁻⁸ | 5.48×10 ⁻⁷ | 1.34×10 ⁻¹¹ | 2.14×10 ⁻¹¹ | 5.91×10 ⁻¹² | 5.01×10 ⁻¹⁰ | 3.46×10 ⁻¹² | 2.26×10 ⁻⁶ |
| | 7# | 2.33×10 ⁻⁷ | 2.16×10 ⁻⁹ | 2.71×10 ⁻⁷ | 2.03×10 ⁻¹² | 2.00×10 ⁻¹¹ | 4.73×10 ⁻¹² | 1.83×10 ⁻¹¹ | 1.03×10 ⁻¹² | 5.06×10 ⁻⁷ |
| | 8# | 2.91×10 ⁻⁷ | 6.49×10 ⁻⁹ | 1.97×10 ⁻⁷ | 1.52×10 ⁻¹² | 2.64×10 ⁻¹¹ | 2.36×10 ⁻¹² | 7.93×10 ⁻¹² | 1.19×10 ⁻¹² | 4.94×10 ⁻⁷ |
| | 9# | 2.33×10 ⁻⁷ | 4.33×10 ⁻⁹ | 7.98×10 ⁻⁸ | 2.03×10 ⁻¹² | 1.52×10 ⁻¹¹ | 3.55×10 ⁻¹² | 5.89×10 ⁻¹² | 3.30×10 ⁻¹² | 3.17×10 ⁻⁷ |
| | 10# | 2.08×10 ⁻⁵ | 2.81×10 ⁻⁸ | 4.04×10 ⁻⁷ | 5.07×10 ⁻¹² | 9.01×10 ⁻¹² | 1.18×10 ⁻¹² | 3.73×10 ⁻¹¹ | 2.26×10 ⁻¹¹ | 2.12×10 ⁻⁵ |
| | 11# | 2.62×10 ⁻⁷ | 2.81×10 ⁻⁸ | 6.92×10 ⁻⁸ | 1.52×10 ⁻¹² | 1.36×10 ⁻¹¹ | 1.18×10 ⁻¹² | 4.72×10 ⁻¹¹ | 7.51×10 ⁻¹¹ | 3.59×10 ⁻⁷ |
| | 12# | 2.36×10 ⁻⁵ | 1.08×10 ⁻⁸ | 2.02×10 ⁻⁷ | 2.28×10 ⁻¹² | 5.53×10 ⁻¹² | 3.55×10 ⁻¹² | 1.16×10 ⁻¹¹ | 7.32×10 ⁻¹² | 2.38×10 ⁻⁵ |
| | 平均值 | 8.56×10 ⁻⁶ | 4.11×10 ⁻⁸ | 3.30×10 ⁻⁷ | 5.07×10 ⁻¹² | 4.63×10 ⁻¹¹ | 3.55×10 ⁻¹² | 7.21×10 ⁻¹¹ | 1.04×10 ⁻¹⁰ | 8.93×10 ⁻⁶ |
| 儿童 | 1# | 1.35×10 ⁻⁵ | 6.57×10 ⁻⁷ | 1.31×10 ⁻⁶ | 4.14×10 ⁻¹¹ | 7.01×10 ⁻¹⁰ | 1.06×10 ⁻¹¹ | 1.49×10 ⁻¹⁰ | 2.01×10 ⁻⁹ | 1.55×10 ⁻⁵ |
| | 2# | 5.75×10 ⁻⁵ | 1.56×10 ⁻⁸ | 7.94×10 ⁻⁷ | 1.00×10 ⁻¹¹ | 4.77×10 ⁻¹¹ | 6.38×10 ⁻¹² | 1.53×10 ⁻¹¹ | 5.10×10 ⁻¹² | 5.83×10 ⁻⁵ |
| | 3# | 1.32×10 ⁻⁵ | 3.11×10 ⁻⁸ | 8.61×10 ⁻⁷ | 1.37×10 ⁻¹² | 1.63×10 ⁻¹¹ | 1.28×10 ⁻¹¹ | 2.34×10 ⁻¹¹ | 4.11×10 ⁻¹² | 1.41×10 ⁻⁵ |
| | 4# | 1.56×10 ⁻⁵ | 1.17×10 ⁻⁸ | 6.02×10 ⁻⁷ | 2.28×10 ⁻¹² | 1.28×10 ⁻¹¹ | 1.06×10 ⁻¹¹ | 1.07×10 ⁻¹¹ | 2.25×10 ⁻¹¹ | 1.62×10 ⁻⁵ |
| | 5# | 3.40×10 ⁻⁷ | 3.89×10 ⁻⁹ | 3.25×10 ⁻⁷ | 4.10×10 ⁻¹² | 2.21×10 ⁻¹¹ | 6.38×10 ⁻¹² | 2.26×10 ⁻¹⁰ | 6.69×10 ⁻¹² | 6.69×10 ⁻⁷ |
| | 6# | 3.06×10 ⁻⁶ | 2.72×10 ⁻⁸ | 9.85×10 ⁻⁷ | 2.41×10 ⁻¹¹ | 3.85×10 ⁻¹¹ | 1.06×10 ⁻¹¹ | 9.00×10 ⁻¹⁰ | 6.22×10 ⁻¹² | 4.07×10 ⁻⁶ |
| | 7# | 4.18×10 ⁻⁷ | 3.89×10 ⁻⁹ | 4.88×10 ⁻⁷ | 3.64×10 ⁻¹² | 3.60×10 ⁻¹¹ | 8.50×10 ⁻¹² | 3.29×10 ⁻¹¹ | 1.85×10 ⁻¹² | 9.10×10 ⁻⁷ |
| | 8# | 5.23×10 ⁻⁷ | 1.17×10 ⁻⁸ | 3.54×10 ⁻⁷ | 2.73×10 ⁻¹² | 4.74×10 ⁻¹¹ | 4.25×10 ⁻¹² | 1.43×10 ⁻¹¹ | 2.14×10 ⁻¹² | 8.88×10 ⁻⁷ |
| | 9# | 4.18×10 ⁻⁷ | 7.78×10 ⁻⁹ | 1.43×10 ⁻⁷ | 3.64×10 ⁻¹² | 2.73×10 ⁻¹¹ | 6.38×10 ⁻¹² | 1.06×10 ⁻¹¹ | 5.93×10 ⁻¹² | 5.70×10 ⁻⁷ |
| | 10# | 3.73×10 ⁻⁵ | 5.06×10 ⁻⁸ | 7.27×10 ⁻⁷ | 9.11×10 ⁻¹² | 1.62×10 ⁻¹¹ | 2.13×10 ⁻¹² | 6.70×10 ⁻¹¹ | 4.06×10 ⁻¹¹ | 3.81×10 ⁻⁵ |
| | 11# | 4.71×10 ⁻⁷ | 5.06×10 ⁻⁸ | 1.24×10 ⁻⁷ | 2.73×10 ⁻¹² | 2.45×10 ⁻¹¹ | 2.13×10 ⁻¹² | 8.48×10 ⁻¹¹ | 1.35×10 ⁻¹⁰ | 6.46×10 ⁻⁷ |
| | 12# | 4.23×10 ⁻⁵ | 1.94×10 ⁻⁸ | 3.63×10 ⁻⁷ | 4.10×10 ⁻¹² | 9.95×10 ⁻¹² | 6.38×10 ⁻¹² | 2.09×10 ⁻¹¹ | 1.32×10 ⁻¹¹ | 4.27×10 ⁻⁵ |
| | 平均值 | 1.54×10 ⁻⁵ | 7.39×10 ⁻⁸ | 5.93×10 ⁻⁷ | 9.11×10 ⁻¹² | 8.33×10 ⁻¹¹ | 6.38×10 ⁻¹² | 1.30×10 ⁻¹⁰ | 1.88×10 ⁻¹⁰ | 1.61×10 ⁻⁵ |

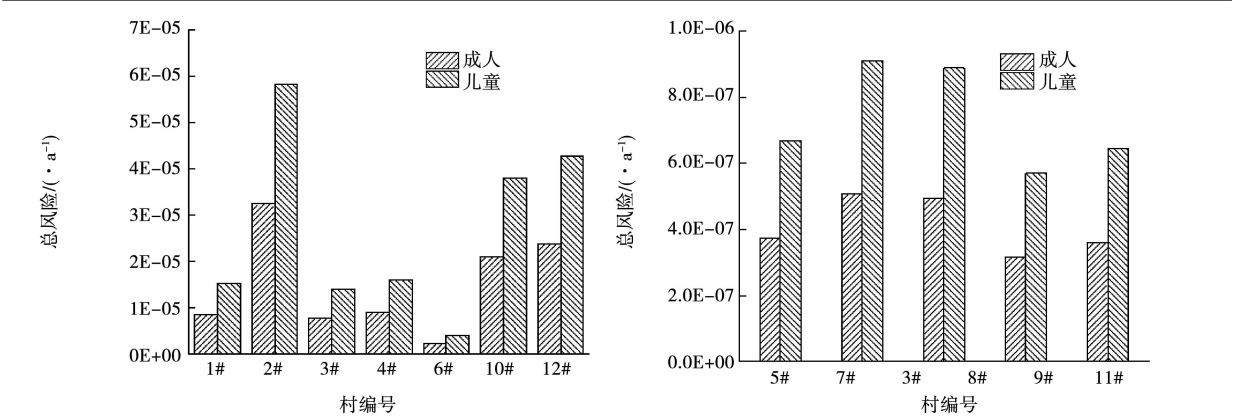


图 2 研究区饮用水重金属经饮水途径所致的健康总风险

各重金属对成人和儿童造成的风险对总风险的贡献率一致,其中,化学致癌重金属对总风险的贡献率详见表 5。Cr 对总风险的贡献率最大,贡献率为 45.96%~99.10%,平均贡献率为 79.15%;其次为 As,贡献率为 0.85%~53.60%,平均贡献率为 19.42%。Cr 和 As 对成人和儿童总健康风险的平均贡献率都为 98.57%,故重金属 Cr 和 As 应当作为该乡镇优先控制管理的重金属污染物。

表 5 研究区饮用水化学致癌重金属的风险贡献率(%)

| 村编号 | Cr | Cd | As |
|-----|-------|------|-------|
| 1# | 87.25 | 4.25 | 8.48 |
| 2# | 98.61 | 0.03 | 1.36 |
| 3# | 93.68 | 0.22 | 6.10 |
| 4# | 96.21 | 0.07 | 3.72 |
| 5# | 50.79 | 0.58 | 48.59 |
| 6# | 75.11 | 0.67 | 24.19 |
| 7# | 45.96 | 0.43 | 53.60 |
| 8# | 58.85 | 1.31 | 39.83 |
| 9# | 73.44 | 1.37 | 25.19 |
| 10# | 97.96 | 0.13 | 1.91 |
| 11# | 72.88 | 7.83 | 19.26 |
| 12# | 99.10 | 0.05 | 0.85 |
| 平均值 | 79.15 | 1.41 | 19.42 |

4 结论与讨论

本文测定得出研究区域饮用水重金属浓度范围分别为 Cr 0.013~2.204 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cd 0.001~0.169 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、As 0.013~0.137 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Pb 0.003~0.091 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Cu 0.078~5.498 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Hg 0.001~0.006 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Zn 4.978~423.652 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Ni 0.058~63.027 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各村饮用水重金属总含量的排序为 6# 村>1# 村>5# 村>11# 村>10# 村>7# 村>12# 村>3# 村>2# 村>8# 村>4# 村>9# 村。与《生活饮用水卫生标准》相比,1# 村 Ni 的浓度超标,是标准限值的 3.15 倍,其饮用水源需要引起重视。造成 1# 村 Ni 的浓度超过标准限值的原因可能是该村位于矿山附近,且为新矿井,而矿山在开采、冶炼、排水和尾矿库堆积等过程中产生的废气、废水和废渣会向环境中释放重金属元素,重金属通过大气

沉降、废水排放和地表径流等途径进入周边的土壤和水体中^[4,15],从而使该村饮用水源中的 Ni 含量偏高。此外,该村的饮用水源地的周边为农田和耕地,村民农业活动如化肥、有机肥、农药和农膜等农用物资的大量使用,增加了农田耕地土壤中重金属积累的几率和速率^[26],从而间接影响了周围水环境中的重金属含量。研究区的饮用水中重金属元素变异差异较大,其原因一方面是研究区的空间差异所决定,另一方面可能是在同一地区饮用同一水源的自来水时,不同居民使用的管道材质存在差异,导致水中的重金属含量有差异^[14]。

Pearson 相关性分析表明,饮用水中 Ni、Cd、As、Pb、Cu 之间存在较强的相关性,相关系数均在 0.6 以上,表明这些元素之间具有一定的同源性或地球化学特性相近。

健康风险评价表明,化学致癌物所致的成人和儿童的健康危害年风险的平均值均为 Cr>As>Cd,这与柳江流域饮用水源^[9]、新疆拜城县农牧区饮用水^[14]、河南洛阳陆浑水库饮用水源^[15]、铜仁矿区农村地下饮用水^[16]、江西鄱阳湖平原地下水^[27]等研究结果一致。其中,1# 村、2# 村、3# 村、4# 村、6# 村、10# 村、12# 村的饮用水中化学致癌物 Cr 所致的成人和儿童的个人平均年健康风险均超过了英国皇家协会等国际机构推荐的最大可接受风险($1.0\times 10^{-6}\cdot\text{a}^{-1}$),说明长期饮用这 7 个村的不加处理地下水或井水会产生一定的致癌风险。非化学致癌物所致的个人健康危害平均值为 Cu>Pb>Hg,这与赵宇中等^[28]对贵州贵阳阿哈水库水体的健康风险评价结果相同;张妍等^[29]对黄河下游地下水重金属健康风险评估的研究得出 Zn>Cu,与本研究结果一致;本研究结果中 Ni>Hg 与余葱葱等^[23]对广东东莞市电镀厂周边地表水的研究结果也一致。非化学致癌物所致的健康风险数量级在 $10^{-13}\sim 10^{-9}\cdot\text{a}^{-1}$,不会对居民构成明显危害。本研究中重金属健康风险主要来自于致癌重金属元素,这与张清华等^[9]、Xu 等^[19]、王若师等^[30]研究结果相一致,致癌风险的空间分布表明了该研究区的健康风险格局。从健康总风险来看,儿童高于成人,这与 Xu

等^[19]、周巾枚等^[25]、王若师等^[30]的研究结果一致。说明儿童对重金属的敏感度要高于成人,更容易受到重金属的危害,这可能与儿童年龄小、身体免疫力和耐受能力较低有关,故要加强对儿童饮用水安全的控制和管理。此外,Cr、As对成人和儿童健康总风险的平均贡献率都为98.57%,应作为优先控制管理的污染物。

饮用水的重金属管理和控制往往是根据常规水质指标与国家标准的对比而作参考,但这种方式存在一定的弊端,会弱化有毒有害物质对人群健康可能造成的危害^[9,31]。如本研究中的Cr元素在12个村的含量均低于《生活饮用水卫生标准》限值,但在运用健康风险模型评价之后,有7个村的致癌风险值超过了英国皇家协会等国际机构的最大可接受风险值,成为主要风险来源物质。故将研究区域的饮用水质量与国家环境质量标准限值相比较、饮用水的健康风险评价与水质评价相结合,更能准确地了解饮用水的安全和质量。本研究不足之处只考虑了饮水暴露途径所致健康风险危害,未涉及皮肤接触等其他暴露途径,实际上低估了重金属暴露的风险。再者,通过饮水途径暴露风险还与村民的生活方式、饮水习惯、职业类型、水体在家庭管网中的停留时间、个人体质、性别等相关^[31-32]。因此,对该乡镇的饮用水中重金属的健康风险评价的研究,会在今后的工作中进一步探讨和完善。

综合来看,该乡镇饮用水源目前适用于生活饮用水源,但如果长期饮用,会有潜在致癌风险。建议饮用时加以处理,如采用净化器过滤后再饮用,儿童尽量不要直接饮用未加处理地下水或井水。

参考文献:

- [1] 袁星,孔畅,王利,等.黄河流域农村饮水安全问题及对策[J].资源科学,2020,42(1):69-77.
- [2] 石鹏,席淑华.我国农村生活饮用水卫生现状研究进展[J].中国公共卫生,2019,35(10):1442-1445.
- [3] 陈竊君,胡学玉,王向前,等.湖北省农村小型水源地水体环境中重金属污染状况[J].环境科学与技术,2017,40(3):153-160.
- [4] SHAH M T,ARA J,MUHAMMADD S,et al. Health risk assessment via surface water and sub-surface water con-

sumption in the mafic and ultramafic terrain, Mohmand agency, northern Pakistan[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 118: 60-67.

- [5] MORTADA W I, SOBH M A, EL-DEFRAWY M M, et al. Study of lead exposure from automobile exhaust as a risk for nephrotoxicity among traffic policemen[J]. American Journal of Nephrology, 2001, 21(4): 274-279.
- [6] JÄRUP L. Hazards of heavy metal contamination[J]. British Medical Bulletin, 2003, 68(1): 167-182.
- [7] KARRI V, SCHUHMACHER M, KUMAR V. Heavy metals (Pb, Cd, As and MeHg,) as risk factors for cognitive dysfunction: A general review of metal mixture mechanism in Brain[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2016, 48: 203-213.
- [8] STEENLAND K, BOFFETTA P. Lead and cancer in humans: Where are we now? [J]. American Journal of Industrial Medicine, 2000, 38(3): 295-299.
- [9] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1598-1607.
- [10] 高学民, 陈静生, 王立新. BP 网络应用于长江水质研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(1): 49-49.
- [11] 宋永刚, 吴金浩, 邵泽伟, 等. 辽东湾近岸表层海水重金属污染分析与评价[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(3): 14-19.
- [12] 孙钦帮, 高范, 王阳, 等. 广东红海湾海域表层水环境中重金属含量特征及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 685-690, 698.
- [13] MUHAMMAD S, SHAH M T, KHAN S. Arsenic health risk assessment in drinking water and source apportionment using multivariate statistical techniques in Kohistan region, northern Pakistan[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(10): 2855-2864.
- [14] MUYESSAR T, YANG L S. Trace elements contamination and human health risk assessment in drinking water from the agricultural and pastoral areas of Bay County, Xinjiang, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(10): 938-952.
- [15] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 89-98.
- [16] 张思强, 徐承香, 杨惠瑛, 等. 铜仁矿区农村地下饮用水重金属含量与健康风险评价[J]. 中国农村水利水电, 2019, 61(3): 41-49.
- [17] 陈春静, 张景山, 李峻, 等. 2019年南京市饮用水重金属健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(5): 51-54.
- [18] GENG M H, QI H J, LIU X L, et al. Occurrence and health risk assessment of selected metals in drinking water from two typical remote areas in China[J]. Environmental

- Science and Pollution Research, 2016, 23: 8462-8469.
- [19] XU C X, LI Z Z, LI D H. Heavy metal content and health risk assessment of karst cave water in Guizhou[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2020, 29(4): 2378-2389.
- [20] 贵州省统计局. 2010 贵州人口平均预期寿命分析报告[EB/OL]. 2012-12-05. http://stjj.guizhou.gov.cn/tjsj_35719/tjfx_35729/201609/t20160929_23028564.html, 2012-12-05.
- [21] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2016)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
- [22] 贵州省统计局. 2014 年贵州省国民体质监测公报[EB/OL]. 2017-02-15. <http://202.98.195.171/aResources/20200101/2017/02/15/201702151056174886hrzhi.docx>.
- [23] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 993-1001.
- [24] 黄冠星, 孙继朝, 张英, 等. 珠江三角洲灌溉区地下水重金属含量及其相互关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 228-234.
- [25] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2675-2685.
- [26] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96-104.
- [27] 饶志, 储小东, 吴代赦, 等. 鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 31-37.
- [28] 赵宇中, 郭云, 杨成, 等. 喀斯特地区阿哈水库水环境中毒性物质潜在健康风险评估[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(3): 115-122.
- [29] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 121-128.
- [30] 王若师, 许秋瑾, 张炯, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评估[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3083-3088.
- [31] 杨海君, 许云海, 刘亚宾, 等. 湘江流域衡阳水口山段水环境健康风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(9): 2060-2070.
- [32] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水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.

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Drinking Water Sources of Typical Mining Towns in Guizhou Province

XU Cheng-xiang, WANG Qian, ZHANG Si-qiang, DU Wei-feng, RAN Yue, WU Yong-ying, JIANG Xue-mei

(School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the concentration of heavy metals and the level of health risk in the drinking water of a township in Guizhou Province, this paper detected and analyzed the concentration of eight heavy metals in the drinking water of 12 villages in the township, and used the health risk assessment model recommended by the US EPA to estimate the health risk caused by heavy metals in the drinking water route. The results showed that the concentration of Ni ($63.027 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) in No. 1 village exceeded the limit of national hygienic standard for drinking water. Pearson correlation analysis showed that Ni, Cd, As, Pb and Cu were strongly correlated with the correlation coefficient above 0.6, indicating that these elements have certain homology or similar geochemical characteristics. The average personal annual health risk from Cr in drinking water in the village of 1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 6[#], 10[#] and 12[#] for both adults and children exceeds the maximum acceptable risk recommended by international bodies such as the Royal Society ($1.0 \times 10^{-6} \cdot \text{a}^{-1}$), the long-term drinking ground water or well water without treatment in this 7 villages will produce certain risk of cancer. The total health risk of children was higher than that of adults, so it is necessary to strengthen the control and management of children's drinking water safety. The average contribution rate of Cr and As to the total risk of adult and child health was 98.57%, which should be taken as the priority pollutants for control and management.

Keywords: drinking water; heavy metals; health risk assessment; mining area; Guizhou Province