

玉溪市红塔区飞井海水库饮用水源地 水环境健康风险评估*

鲁冬梅¹, 张翠萍², 王玉芬², 刘宪斌², 李淑英², 温继良³, 朱春蓉², 周元清^{2**}

(1. 云南省玉溪市红塔区环境监测站, 云南 玉溪 653100;

2. 玉溪师范学院, 污染控制与生态修复研究中心, 云南 玉溪 653100;

3. 玉溪师范学院 保卫后勤处, 云南 玉溪 653100)

摘要:【目的】研究玉溪红塔区饮用水源地水环境特征和人体健康风险, 为玉溪地区城市饮用水源地生态环境保护提供参考。【方法】结合 2014—2018 年飞井海水库水环境质量检测数据, 运用美国国家环保局 (US EPA) 推荐的水质健康风险评估模型对 9 项水质指标进行健康风险评估。【结果】2014—2018 年, 飞井海水库水质状况良好, 除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 外的其余监测指标均符合 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》I 类水标准。水环境总健康风险为 $4.1 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 高于或接近国际辐射防护委员会 (ICRP) 和 US EPA 推荐值, 但整体呈逐年下降趋势; 化学致癌物 (Cr^{6+} 、As 和 Cd) 的风险值远高于非化学致癌物 (F^- 、Cu、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 NO_3^- 、Mn 和 Fe), 主要致癌污染因子为 Cr^{6+} ; 各非致癌物健康危害风险的数量级均为 $10^{-9} \sim 10^{-13}$, 其风险值可忽略不计。Pearson 相关性分析表明: Cu 和 F^- 、Mn、Fe、Cd、 Cr^{6+} 之间、 Cr^{6+} 和 Cu、 F^- 、Fe、Mn、Cd 之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中 Cr^{6+} 和 Cd 的相关性极其显著 ($R^2 = 0.832$), 说明 Cr 和 Cd 含量之间影响较大。【结论】飞井海水库人体健康危害总风险以化学致癌物风险为主, 主要化学致癌物为 Cr^{6+} , 非化学致癌物中 F 最高, 应予以优先关注和重点管控。

关键词: 水环境; 饮用水源地; 污染物; 健康风险

中图分类号: X 820.4; X 824

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 02-0345-08

Health Risk Assessment for Drinking Water Source of the Feijinghai Reservoir in Hongta District of Yuxi City

LU Dongmei¹, ZHANG Cuiping², WANG Yufen², LIU Xianbin², LI Shuying²,

WEN Jiliang³, ZHU Chunrong², ZHOU Yuanqing²

(1. Environmental Monitoring Station of Hongta District, Yuxi 653100, China;

2. Research Center for Pollution Control and Ecological Restoration, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China;

3. Security and Logistics Department, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

Abstract: [Purposes] The clarify the water environment characteristics and human health risks of the drinking water sources in Hongta District of Yuxi, and to provided references for ecological environment protection of drinking water sources in Yuxi District. [Methods] Combined with the water

收稿日期: 2019-05-15

修回日期: 2020-02-16

网络首发时间: 2020-06-01 11:30:43

*基金项目: 云南省科技厅地方本科高校 (部分) 基础研究联合专项 (2017FH001-125, 2017FH001-043); 云南省农业环境污染控制与生态修复工程实验室开放基金; 云南省农田无公害生产创新团队 (2017HC015)。

作者简介: 鲁冬梅 (1971—), 女, 云南玉溪人, 学士, 高级工程师, 主要从事环境监测与污染防治研究。E-mail: 1203951009@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 周元清 (1974—), 女, 云南元江人, 博士, 教授, 主要从事污染控制与生态修复研究。E-mail: yqzhou@yxnu.edu.cn

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200529.1729.003.html>



environment quality test data of Feijinghai Reservoir from 2014 to 2018, the health risk assessments of 9 indicators were evaluated by the US Environmental Protection Agency (US EPA) recommended health risk assessment model for water quality index. [**Results**] The water quality of Feijinghai Reservoir was in good condition from 2014 to 2018. All the monitoring indicators except $\text{NH}_3\text{-N}$ were in conformity with the surface water environment quality standard I (GB 3838—2002). The average annual health risk of individuals caused by drinking route of various pollutants varied between 4.1×10^{-5} and $1.3 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, both higher than or close to the recommended values of the international commission on radiological protection (ICRP) and US EPA, but the overall trend was decreasing trend year by year. The total chemical carcinogens risk (Cr^{6+} , As, Cd) of drinking water was much higher than that of non-chemical carcinogens (F^- , Cu, $\text{NH}_3\text{-N}$, NO_3^- , Mn, Fe), and the main carcinogenic pollutant was Cr^{6+} . The health hazard risk of each non-carcinogen was 10^{-9} - 10^{-13} , and the risk value was negligible. Pearson correlation analysis showed that there was a very significant positive correlation between Cu and F^- , Mn, Fe, Cd, Cr^{6+} ($P < 0.01$). There was a very significant positive correlation between Cr^{6+} and Cu, F^- , Fe, Mn, Cd, and the correlation between Cr^{6+} and Cd was extremely significant ($P < 0.01$, $R^2 = 0.832$), indicating that Cr and Cd content had a great influence. [**Conclusions**] The total risk of human health hazards in Feijinghai Reservoir water was dominated by the risk of chemical carcinogens. The main chemical carcinogens were Cr^{6+} , and the fluoride in non-carcinogens was the highest, which should be given priority attention and key control.

Keywords: water environment; drinking water source; pollutant; health risk

随着城市化进程的加快和经济的快速发展, 环境污染尤其是城市水污染日益加剧。据相关报道, 全球约有 17 亿人正面临着缺少饮用水的威胁, 中国流经城市的河流近 90% 受到不同程度的污染, 近 3 亿人的饮水安全已受到威胁^[1], 饮用受污水会急性或慢性中毒, 甚至诱发癌症等重大疾病^[2-5], 因此, 加强饮用水源地水环境健康风险评估研究迫在眉睫^[6]。

健康风险评估 (health risk assessment, HRA) 是把环境污染与人体健康联系在一起的 risk 度评价指标, 定量描述污染对人体产生的健康危害风险^[7]。饮用水源地水环境健康风险评估主要针对水环境中对人体有害的物质^[8], 确定不同污染物与人体健康间的关系, 评估水源地水环境的健康风险状况^[3], 可了解饮用水源地水环境健康状态, 确定对人体存在健康风险的污染物种类, 为饮用水源地管理和污染物治理提供依据^[2]。目前, 关于饮用水源方面的研究国内已有较多报道。黄奕龙等^[9]研究了深圳市主要水源的环境健康危害风险; 盛翼等^[10]对无锡市饮用水源地水环境进行了健康分析; 闫欣荣等^[11]对西安市黑河地表饮用水源的水环境进行了环境健康风险评估;

张光贵等^[12]评价了洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险。然而, 对云南省玉溪市饮用水源地健康风险评估的评价仍未见报道。

玉溪市红塔区位于云南省中部, 位于 $\text{N } 24^{\circ}08'30'' \sim 24^{\circ}32'18''$ 、 $\text{E } 102^{\circ}17'32'' \sim 102^{\circ}41'37''$, 飞井海水库是玉溪市红塔区中心城区的主要饮用水源地之一, 总库容 $1\,080 \text{ 万 m}^3$, 蓄水量为 809 万 m^3 , 每日供水量为 5 万 m^3 。本研究对 2014—2018 年云南省玉溪市红塔区主要饮用水源地飞井海水库水环境中污染物进行监测, 应用美国国家环境保护局推荐的健康风险评估模型进行健康风险评估, 为玉溪市主要饮用水源地水质安全保障、健康风险防控及管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和指标测定

以玉溪市红塔区中心城区主要饮用水源地飞井海水库为研究对象, 以国控点飞井海水库出水口作为采样点 (图 1), 按 HJ/T 91—2002 《地表水和污水监测技术规范》的要求, 于 2014—2018 年每月上旬采集表层水样, 采样点合计 60 个水样。依据国际癌症研究机构 (IARC) 和世界卫生

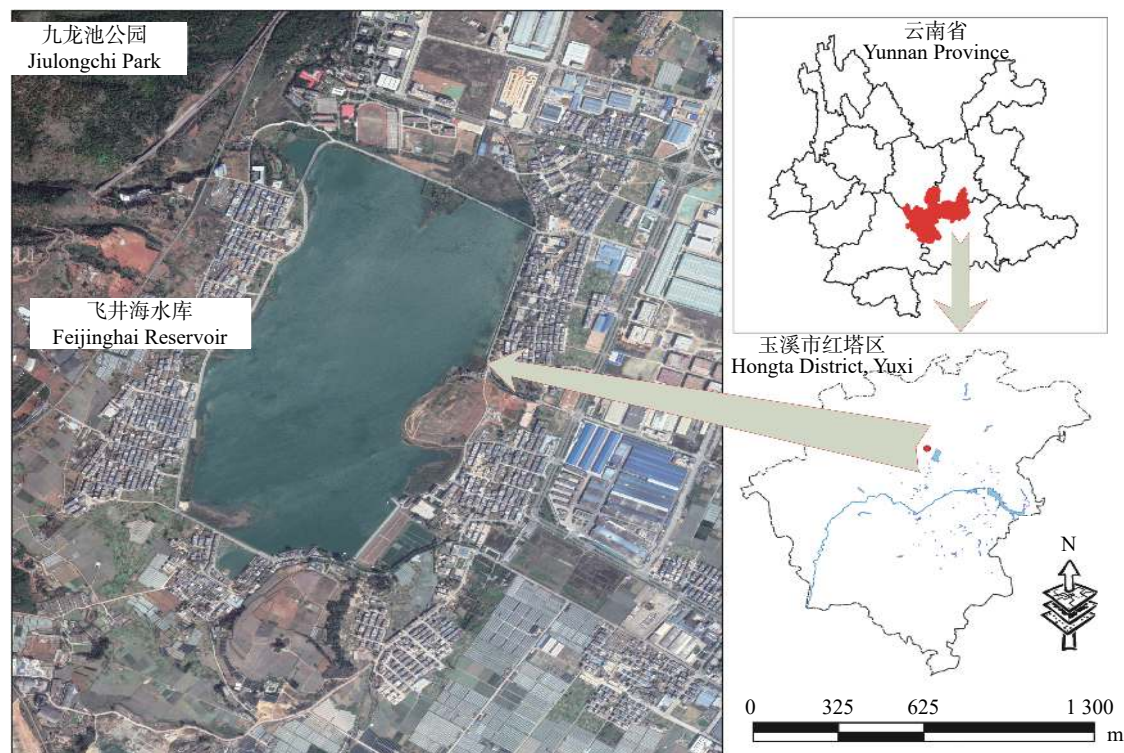


图1 玉溪市红塔区飞井海水库位置图

Fig. 1 The location map of Feijinghai Reservoir in Hongta District of Yuxi City

组织 (WHO) 规定的化学致癌物质, 选取 Cr^{6+} 、As 和 Cd 进行致癌健康风险评估, 选取 Cu 、 NO_3^- 、Fe、Mn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 F 共 6 种水质指标进行非致癌健康风险评估^[13]。

1.2 指标测定

水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 除去藻类和细菌, 提高水样的稳定性。按照 GB 3838—2002 《地表水环境质量标准》和《水和废水监测分析方法》^[14]中规定的方法进行检测, 严格执行空白样、平行样、加标样及密码样等质控措施。具体为: Fe、Mn 和 Cu 采用电感耦合等离子体发射光谱法 (Iris Advantage 等离子体发射光谱分析仪) 测定, NO_3^- 采用离子色谱法 (戴安 ICS-900) 测定, F^- 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 Cr^{6+} 采用 722S 可见分光光度计测定, As 采用原子荧光分光光度计 (北京海光仪器有限公司, AFS-3100) 测定; Cd 采用原子吸收分光光度法 (ICE3500 火焰/石墨炉原子吸收) 测定。

1.3 评价方法

1.3.1 健康风险评价模型

采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型中致癌物和非致癌物健康风险评价方法^[15], 该方法已被广泛用于饮用水中有毒有害物质等的健康风险

评价。计算公式分别为:

$$R_i^c = \frac{1 - \exp(-D_i q_i)}{70} \quad (1)$$

$$R_i^n = \frac{-D_i \times 10^{-6}}{D_{\text{IRf}} \times 70} \quad (2)$$

$$D_i = \frac{2.2 \times C_i}{70} \quad (3)$$

式 (1) 中, R_i^c 为致癌物质 i 经饮水途径对平均个人健康风险, a^{-1} ; D_i 为物质 i 通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; q_i 为致癌物质通过饮水途径致癌系数, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 70 为人类平均寿命。式 (2)、(3) 中, R_i^n 为非致癌物质 i 经饮水途径对平均个人健康风险, a^{-1} ; D_{IRf} 为非致癌物质经饮水途径的参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 2.2 为成人的平均日饮水量, L; C_i 为物质 i 的实测质量浓度, mg/L 。

目前, 在饮用水之中各有毒污染物所引起的整体健康风险, 假设各有毒污染物对人类健康造成的毒性作用为相加而非拮抗或协同关系, 则对饮用水中污染物对人类的整体水环境总健康风险 $R_{\text{总}}$ 为^[15]:

$$R_{\text{总}} = \sum R_i^c + \sum R_i^a \quad (4)$$

评价参数包括化学致癌物通过饮水途径的致癌强度系数、非致癌物通过饮水途径的参考剂量和饮水暴露途径参数。参考文献[13], Cr^{6+} 、As 和 Cd 的致癌物强度系数分别为 41、15 和 6.1 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 非致癌物 Cu、 NO_3^- 、Fe、Mn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 F 的 D_{RF} 分别为 0.005、1.6、0.3、0.14、0.97 和 0.06 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

1.3.2 风险评价标准

目前, 中国对饮用水污染物最大可接受风险值还未有相关规定。国际上各大环境保护机构推荐的最大可接受风险水平为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 可忽略风险水平为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ [16]; 国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受和可忽视风险水平为 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 不存在可忽视风险。通常情况下, 风险值达 $1 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$, 危险性较高, 相当于人自然死亡的概率, 必须进行处理; 风险值为 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 存在一定危险, 需进行一定的处理; 风险值为 $1 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 危险性低, 可一定程度对其忽略。具体风险分级为: 低 ($< 1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$), 较低 ($1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 中等 ($1.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 较高 ($5.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$), 高 ($> 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2013 对试验数据进行统计, 运用 SPSS 16.0 软件进行 Pearson 相关性分析, 不同处理结果用“平均数 $\pm$ 标准误 (mean $\pm$ SE)”表示, 低于检出限数据以 1/2 最低检出限进行统计处理[17], 采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 污染物含量特征

2014—2018 年飞井海水库饮用水源地水体 pH 值为 6.0~8.8, 总体水质偏碱性。由图 2 可知: 饮用水源总体水质良好, 所有指标均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 标准限值。参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》, 除部分月份 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度为 II 类水标准外, 其余指标监测均值均能满足 I 类水标准要求。水体中致癌物 Cr^{6+} 、As 和 Cd 的质量浓度分别为 2.0~6.1、0.15~9.01 和 0.05~0.4 $\mu\text{g}/\text{L}$, 非致癌物质 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 F^- 、 NO_3^- 、Fe、Mn 和 Cu 的质量浓度分别为 12.5~359、125~226、6.75~880、0.4~

91.1、0.1~20.3 和 0.5~7 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。水体中 Fe、Mn 和 F^- 质量浓度总体呈逐年下降趋势, $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈先上升再逐渐下降的趋势, Cu、 Cr^{6+} 、As 和 Cd 的质量浓度较低且变化较小。

2.2 污染物相关性分析

由表 1 可知: $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 Cd 之间、Cu 和 F^- 、Mn、Fe、Cd、 Cr^{6+} 之间、 Cr^{6+} 和 Cu、 F^- 、Fe、Mn、Cd 之间、Cd 和 $\text{NH}_3\text{-H}$ 、Cu、Fe 之间、Fe 和 Cu、Mn、Cd、 Cr^{6+} 之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中 Cr^{6+} 和 Cd 的相关系数高达 0.832, 说明 Cr^{6+} 和 Cd 间关系密切, 污染同源性较高。 NO_3^- 与 Cu、Fe、Cd、 Cr^{6+} 之间均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明 NO_3^- 含量对部分金属污染物含量影响较大。

2.3 健康风险评价

水环境健康危害的总风险为致癌物质和非致癌物质所产生的健康风险之和。根据 US EPA 推荐的健康风险评价模型计算, 研究区饮用水源水质存在一定的健康风险。2014—2018 年飞井海水库水环境总健康风险为 $4.1 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 各非致癌物健康危害风险在 $10^{-9} \sim 10^{-13}$ 数量级, 风险最大的是 F^- ; 3 种化学致癌物 (Cr^{6+} 、Cd 和 As) 的总风险值占个人年总健康风险值的 99.9%, 主要致癌污染因子为 Cr^{6+} , 是风险管控的重点对象 (表 2)。

2.3.1 致癌物风险分析评价

由表 2 可知: 2014—2018 年, 飞井海水库水体中 3 种化学致癌物的个人年总健康风险值为 $6.3 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 总体呈逐年下降趋势。化学致癌物质通过饮水途径所致个人平均健康风险大小顺序为 Cr^{6+} ($7.3 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) $>$ As ($1.6 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) $>$ Cd ($2.0 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$)。As 和 Cd 的风险值低于 ICRP 建议限值, Cr^{6+} 的风险值高于 ICRP ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 更高于瑞典环境保护署、荷兰建设和环境署以及英国皇家协会推荐的最大可接受值 ($1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$), 但仍低于 US EPA ($1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) 推荐值。结果表明: Cr^{6+} 对该水源地水体的总致癌风险贡献最大, 高达 81.5%。 Cr^{6+} 是人体必需的微量元素, 但摄入过量又会引起肾脏和肝脏受损。根据 US EPA 综合风险信息系统 (IRIS) 的分类信息, Cr^{6+} 属于 A 类致癌污染物。因此, Cr^{6+} 应为相关部门及居民重点关注的化学致癌物质, 也是目前该地区必须重点控制的污染指标。

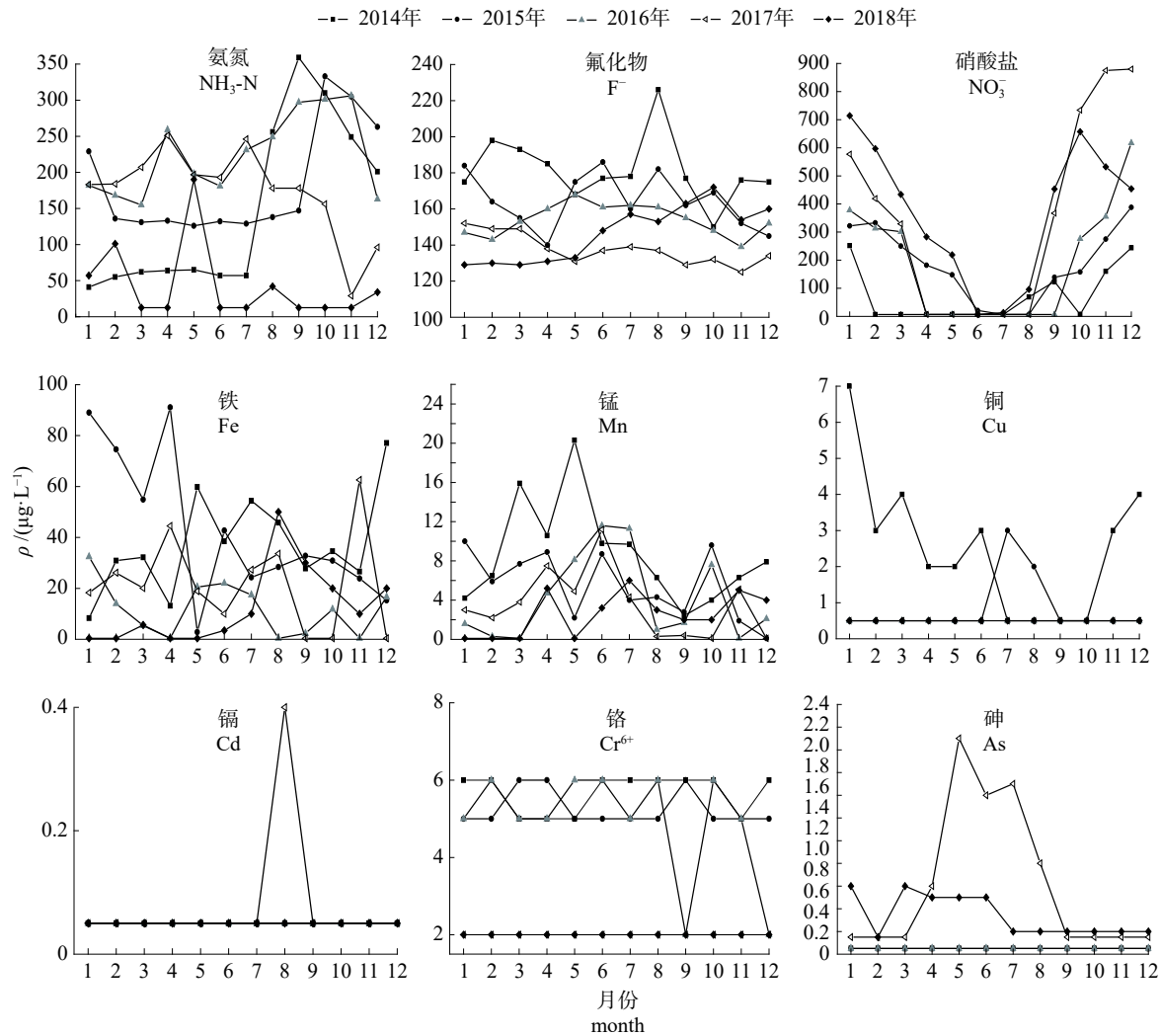


图 2 2014—2018 年飞井海水库水体污染物含量特征

Fig. 2 The pollutant content characteristics of Feijinghai Reservoir water in 2014-2018

表 1 污染物的相关性

Tab. 1 Correlation of the pollutants

污染物 pollutants	NH ₃ -N	Cu	F ⁻	NO ₃ ⁻	Fe	Mn	As	Cd	Cr ⁶⁺
NH ₃ -N	1	0.009	-0.221	-0.246	-0.079	-0.004	0.032	0.372**	0.318*
Cu		1	0.426**	-0.434**	0.471**	0.338**	-0.129	0.533**	0.596**
F ⁻			1	-0.206	0.306*	0.112	-0.051	0.248	0.349**
NO ₃ ⁻				1	-0.486**	-0.149	-0.122	-0.504**	-0.447**
Fe					1	0.503**	-0.142	0.371**	0.381**
Mn						1	0.048	0.255*	0.351**
As							1	-0.126	-0.145
Cd								1	0.832**
Cr ⁶⁺									1

注: “***”和“**”分别表示在 0.01 和 0.05 水平上极显著和显著相关。
Note: “***” and “**” mean extremely significant and significant correlation at the 0.01 and 0.05 levels, respectively.

2.3.2 非致癌物风险评价

由表 2 还可知: 飞井海水库水体中 6 种非致

癌物健康危害风险的数量级均为 10^{-9} ~ 10^{-13} , 其风险值及总风险值均远低于 ICRP 推荐值, 基本可

表 2 飞井海水库健康风险评价

Tab. 2 Health risk assessment of Feijinghai Reservoir

a⁻¹

指标 indicators		风险值 risk value									
		2014		2015		2016		2017		2018	
		最大值 max	最小值 min	最大值 max	最小值 min	最大值 max	最小值 min	最大值 max	最小值 min	最大值 max	最小值 min
非致癌物 non-carcinogens	Cu	6.3×10 ⁻¹⁰	4.5×10 ⁻¹¹	2.7×10 ⁻¹⁰	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹	4.5×10 ⁻¹¹
	Fe	1.2×10 ⁻¹⁰	1.2×10 ⁻¹¹	1.4×10 ⁻¹⁰	4.2×10 ⁻¹²	4.8×10 ⁻¹¹	6.0×10 ⁻¹³	9.4×10 ⁻¹¹	6.0×10 ⁻¹³	7.5×10 ⁻¹¹	6.0×10 ⁻¹³
	Mn	6.5×10 ⁻¹¹	7.7×10 ⁻¹²	3.2×10 ⁻¹¹	3.2×10 ⁻¹³	3.7×10 ⁻¹¹	3.2×10 ⁻¹³	3.6×10 ⁻¹¹	3.2×10 ⁻¹³	1.9×10 ⁻¹¹	3.2×10 ⁻¹³
	F ⁻	1.7×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻⁹	1.4×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻⁹	1.3×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻⁹	9.4×10 ⁻¹⁰	1.3×10 ⁻⁹	9.7×10 ⁻¹⁰
	NO ₃ ⁻	7.1×10 ⁻¹¹	1.9×10 ⁻¹²	1.1×10 ⁻¹⁰	1.9×10 ⁻¹²	1.7×10 ⁻¹⁰	1.9×10 ⁻¹²	2.5×10 ⁻¹⁰	1.9×10 ⁻¹²	2.0×10 ⁻¹⁰	1.9×10 ⁻¹²
	NH ₃ -N	1.7×10 ⁻¹⁰	1.9×10 ⁻¹¹	1.5×10 ⁻¹⁰	5.8×10 ⁻¹¹	1.4×10 ⁻¹⁰	7.2×10 ⁻¹¹	1.2×10 ⁻¹⁰	1.3×10 ⁻¹¹	8.8×10 ⁻¹¹	5.8×10 ⁻¹²
致癌物 carcinogens	Cr ⁶⁺	1.1×10 ⁻⁴	9.2×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁴	9.2×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁴	3.7×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻⁵
	As	2.4×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	6.0×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁶
	Cd	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.0×10 ⁻⁶	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁷
非致癌物 $\sum R_i^c$ non-carcinogens $\sum R_i^c$		1.8×10 ⁻⁹		1.5×10 ⁻⁹		1.4×10 ⁻⁹		1.3×10 ⁻⁹		1.3×10 ⁻⁹	
致癌物 $\sum R_i^n$ carcinogens $\sum R_i^n$		1.3×10 ⁻⁴		1.2×10 ⁻⁴		1.1×10 ⁻⁴		4.1×10 ⁻⁵		6.3×10 ⁻⁵	
总风险 total risk		1.3×10 ⁻⁴		1.2×10 ⁻⁴		1.1×10 ⁻⁴		4.1×10 ⁻⁵		6.3×10 ⁻⁵	

以忽略不计。表明水中该类污染物含量对人体不会产生非致癌慢性毒害效应，处于比较安全的范围。各非致癌污染物经饮水途径所致个人平均健康风险大小顺序为 F⁻ (1.2×10⁻⁹ a⁻¹)>Cu (8.1×10⁻¹¹ a⁻¹)>NH₃-N (7.2×10⁻¹¹ a⁻¹)>NO₃⁻ (6.6×10⁻¹¹ a⁻¹)>Fe (4.0×10⁻¹¹ a⁻¹)>Mn (1.6×10⁻¹¹ a⁻¹)。氟化物占非致癌物质总健康风险水平的 80.8%，为非致癌物质健康风险的主要来源。

3 讨论

饮用水环境健康风险评价是将水环境污染与人体健康相联系，定量描述水环境中污染物对人体健康的危害效应，在已暴露条件下估计危害健康效应发生的概率及在空气、水和食品中某种有毒物质可接受浓度的建议值^[18]。本研究中飞井海水库水体中污染物健康风险为 Cr⁶⁺>As>Cd>F⁻>Cu>NH₃-N>NO₃⁻>Fe>Mn，表明致癌重金属元素 Cr⁶⁺、As 和 Cd 通过饮水途径对人群健康所产生的危害十分严重，尤其是 Cr⁶⁺对飞井海水库饮用水源地总致癌风险占 81.5%。有研究表明：重金属是饮用水源地健康风险的主要来源^[19-20]，主要通过工农业生产活动或生活污水排放、受污染河流底泥的释放以及大气的干湿沉降等方式进入水体，具有高稳定性、难降解、累积性和毒性等特性^[21]，并能通过皮肤接触、饮水和食物链等途径直接或间接地威胁人体健康^[22-25]。飞井海水

库属平原型水库，淹没面积大，淹没区土壤有机质积存，库区周边无污染工厂，分布多个村庄、单位、餐饮和养殖点，重金属 Cr⁶⁺、As 和 Cd 致癌风险主要来自于人类的各种活动以及地球化学过程。黄冠星等^[26]研究表明：元素间存在显著或极显著的相关性，说明这些元素可能是复合污染关系或者同源关系。本研究中，Cu 与 F⁻、Mn、Fe、Cd 和 Cr⁶⁺之间，Cr⁶⁺与 Cu、F⁻、Fe、Mn 和 Cd 之间存在极显著正相关 (P<0.01)，说明这些指标之间具有相似的地球化学性质或具有一定同源性。

2014—2018 年飞井海水库水环境总健康风险为 4.1×10⁻⁵~1.3×10⁻⁴ a⁻¹，不同年份间的变化较小，水质总体良好，水中常规污染物慢性暴露对人体健康的风险极低。本研究水体中致癌物的健康风险水平在 10⁻⁵~10⁻⁴ a⁻¹ 之间，即 5 年中每年饮水者都有十万分之四到五以上可能会因饮水导致疾病或死亡^[27]，根据 US EPA 规定，此风险水平为小型人群可接受的风险水平而不符合社会人群可接受的风险水平^[28]，非致癌物质个人年健康风险在 1.3×10⁻⁹~1.8×10⁻⁹ a⁻¹ 之间，健康风险较低，说明飞井海水库水体中化学致癌物的风险值远高于非化学致癌物，这与余葱葱等^[13]的研究相一致。

飞井海水库水体中重金属 Fe 含量远高于 Cr⁶⁺，但 Fe 个人健康风险为 4.0×10⁻¹¹ a⁻¹，远低于 ICRP

推荐的最大可接受风险水平 ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 达到荷兰建设和环境保护局推荐的可忽略风险水平 ($1 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$); 而 Cr^{6+} 个人健康风险达 $7.3 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 超过 ICRP 推荐的最大可接受风险水平, 成为健康风险的主要来源, 说明含量高的金属引起的健康风险水平不一定高, 这主要与不同元素的毒性有关^[29]。水环境健康风险评估包括有毒污染物通过直接接触、摄入水体中食物和饮水 3 种暴露途径对人体健康造成的危害, 本研究评价仅考虑水源地部分污染物质通过饮水途径导致的健康风险, 没有考虑其他污染物和与皮肤接触、辐射等途径引起的健康风险, 低估了实际饮用水水源地对人体的健康风险^[30-31]。此外, 水环境健康风险评估模型中涉及多个参数, 其中污染物浓度、人体单位体质量、日均饮水量以及暴露时间等不确定性因素将会影响健康风险水平的高低。这些问题将在进一步的研究中进行探索和改进。

4 结论

(1) 飞井海水库水源地水质较好, 污染物浓度低, 水体中除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 符合 II 类水标准外, Cr^{6+} 、As、Cd、 F^- 、 NO_3^- 、Cu、Mn 和 Fe 含量均符合 I 类水标准, 可作为城市生活饮用水源。

(2) $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 Cd 之间, Cu 与 F^- 、Mn、Fe、Cd 和 Cr^{6+} 之间, Cr^{6+} 与 Cu、 F^- 、Fe、Mn 和 Cd 之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中 Cr^{6+} 和 Cd 的相关系数高达 0.832, 说明 Cr^{6+} 和 Cd 之间污染同源性较高; NO_3^- 与 Cu、Fe、Cd 和 Cr^{6+} 之间则呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。

(3) 2014—2018 年, 飞井海水库水体个人年总健康风险值为 $4.1 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 整体呈现逐年下降趋势, 化学致癌物的风险值远高于非化学致癌物, 3 种化学致癌物中 Cr^{6+} 的年风险值最大, As 次之, Cd 最小, 表明 Cr^{6+} 为研究区需首要控制的污染物。非化学致癌物的风险值远低于建议限值, 不是主要风险物。

[参考文献]

- [1] 世界卫生组织, 联合国儿童基金会. 饮用水、环境卫生和个人卫生进展: 2017 年最新情况和可持续发展目标基准[S].
- [2] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 75. DOI: 10.13198/j.res.2010.01.76.nib.012.
- [3] 侯伟, 孙韶华, 李桂芳, 等. 黄河下游浅型山区和引黄水库水环境健康风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 31. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.04.06.
- [4] 李岩. 我国的水环境现状研究[J]. 科技风, 2016(18): 139. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.2016180123.
- [5] 唐嵩. 中国水环境现状及对人体健康的影响[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 4(38): 98. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2010.04.009.
- [6] 覃忠书, 黎明强. 某农村饮用水源水健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2008, 35(8): 1416. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8507.2008.08.009.
- [7] 周国宏, 彭朝, 余淑苑, 等. 深圳市饮用水源水中重金属污染物健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(1): 50. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2011.01.025.
- [8] 曾光明, 卓利, 钟政林, 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.
- [9] 黄奕龙, 王仰麟, 谭启宇, 等. 城市饮用水源地水环境健康风险评估及风险管理[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 162. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2013.06.012.
- [10] 盛翼, 张虎军, 王洁尘, 等. 无锡市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 干旱环境监测, 2019, 33(1): 1.
- [11] 闫欣荣, 周航, 邸涛. 城市饮用水源地水质健康风险评估[J]. 环境科学与管理, 2008(4): 164. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2008.04.044.
- [12] 张光贵, 张屹. 洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境化学, 2017, 36(8): 1812. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016122802.
- [13] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中重金属元素分布特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 89. DOI: 10.13227/j.hjx.201706022.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 陈生科, 万玉, 杨明姣, 等. 贵阳某农村饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(5): 403. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.05.003.
- [16] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法—景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.11.025.
- [17] 赵伟. 乌鲁木齐市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(5): 63. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2017.05.028.
- [18] 张智慧, 李宝, 梁仁君. 南四湖南阳湖区河口与湖心沉积物重金属形态对比研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1408. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0901.
- [19] 侯继萍. 监测水质样品采集探析[J]. 东北水利水电, 2017(5): 55. DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2017.05.023.
- [20] 马海涛, 杨晓灵, 任重, 等. 南宁市主要饮用水源地水环境健康风险分析[J]. 人民珠江, 2014(4): 41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2014.04.014.
- [21] 李利娟. 濮阳市饮用水源地水环境健康风险评估研究[J]. 科技创新与利用, 2016(35): 163.
- [22] 李莹莹, 张永江, 邓茂, 等. 武陵山区典型生态保护城市饮用水源地水质人体健康风险评估[J]. 环境科学研

- 究,2017,30(2):282. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.34](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.34).
- [23] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3083. DOI: [10.13227/j.hjks.2012.09.055](https://doi.org/10.13227/j.hjks.2012.09.055).
- [24] ZHANG C, DONG S H. A new water quality assessment model based on projection pursuit technique[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(S1): 154.
- [25] 吴佳, 纪雄辉, 朱坚, 等. 长株潭地区水环境重金属污染健康风险评价[J]. 河南农业科学, 2018(1): 64. DOI: [10.16498/j.cnki.hnnykx.2018.001.018](https://doi.org/10.16498/j.cnki.hnnykx.2018.001.018).
- [26] 黄冠星, 孙继朝, 张英, 等. 珠江三角洲污灌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. DOI: [10.13278/j.cnki.jjuese.2011.01.044](https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2011.01.044).
- [27] 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.
- [28] 白宁静, 陈丽, 蒋伊能, 等. 阳宗海砷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 147. DOI: [10.18307/2019.0114](https://doi.org/10.18307/2019.0114).
- [29] 张歆. 新建哈佳铁路项目使用林地对生态环境的影响分析[J]. 林业勘查设计, 2019(1): 24.
- [30] 廖蔚宇, 杨绍平, 纪丁愈, 等. 南充市饮用水源地水环境健康与安全风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 89. DOI: [10.14034/j.cnki.schj.2015.06.020](https://doi.org/10.14034/j.cnki.schj.2015.06.020).
- [31] 陆凤娟. 以嘉定区为例对上海市郊区饮用水源水重金属进行健康风险评价[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 5. DOI: [10.19316/j.issn.1002-6002.2013.02.002](https://doi.org/10.19316/j.issn.1002-6002.2013.02.002).

责任编辑: 何馨成

(上接第 337 页)

- [10] 刘晓林, 李文峰, 杨林楠, 等. 基于 ArcGIS 地统计分析模块的土壤养分空间变异分析——以云南省建水县为例[J]. 土壤通报, 2016, 43(6): 1432. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2012.06.027](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2012.06.027).
- [11] LI Z Q, WANG K, MA H, et al. An adjusted inverse distance weighted spatial interpolation method[P]. Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Communications, Information Management and Network Security (CIMNS 2018), 2018.
- [12] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.014).
- [13] 林万树, 黄功标, 曹榕彬, 等. 古田马铃薯氮磷钾肥料效应及其施肥指标体系的研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(5): 865. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2561.2015.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2015.05.007).
- [14] 今芝, 胡卫静, 梁宏, 等. 乌兰察布市马铃薯施肥现状研究[J]. 北方农业学报, 2019, 47(1): 61. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1197.2019.01.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1197.2019.01.10).
- [15] 李强. 西北地区马铃薯产量—气候变化关系分析及高产高效栽培技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.

责任编辑: 何馨成