

· 调查报告与分析 ·

2022 年内蒙古自治区饮用水中氟化物监测及健康风险评估

张文倩^{1,2}, 朱佳珂¹, 张雯宇¹, 贾芯芮¹, 岳宣志¹, 李欢¹, 武多多³, 秦钰涵², 范耀春^{1,2,4}

1. 内蒙古医科大学公共卫生学院, 呼和浩特 010059;
2. 内蒙古自治区疾病预防控制中心(内蒙古自治区预防医学科学院), 呼和浩特 010059;
3. 内蒙古科技大学包头医学院, 包头 014000;
4. 内蒙古自治区个体化用药工程技术研究中心, 通辽 028000

通信作者: 范耀春, E-mail: fy840815@163.com; 秦钰涵, E-mail: 309723543@qq.com

【摘要】目的 分析 2022 年内蒙古自治区生活饮用水中氟化物的监测结果并进行健康风险评估, 为进一步提升内蒙古自治区生活饮用水卫生管理水平提供依据。**方法** 2022 年在内蒙古 12 个盟市设立的饮用水监测点采集 7 488 份生活饮用水水样, 进行枯、丰水期监测, 采用美国国家环境保护局 (USEPA) 经典“四步法”健康风险评估模型进行经口摄入途径的健康风险评估。**结果** 2022 年内蒙古自治区不同水系流域、采样地区、水期类型、水源类型、水样类型共监测了 7 488 份饮用水水样, 氟化物含量范围在 ND ~ 8.830 mg/L, $M(P_{25}, P_{75})$ 为 0.500(0.300, 0.750) mg/L, 合格率 91.64%。非致癌风险成人的危害商(HQ)值为 0.31, 样本中 2.18%(163 份)HQ > 1, 儿童面临的非致癌风险随年龄的增长先增加后降低, 1 ~ < 2 岁的儿童非致癌风险最高, HQ 值 = 0.45, 各年龄段的儿童均有部分样本危害商 > 1。成年男性和成年女性面临的非致癌风险(HQ 均为 0.31), 9 月龄 ~ < 3 岁的儿童非致癌风险高于成人(HQ = 0.33 ~ 0.45)。不同流域的氟化物含量和健康风险水平差异均有统计学意义($H = 648.781, P < 0.001$), 其中辽河流域氟化物含量和健康风险水平最高(HQ = 0.40), 其次是内流区诸河和海河流域(HQ = 0.36、0.37), 第三是黄河流域(HQ = 0.26), 黑龙江流域最低(HQ = 0.24); 城市水的合格率高于农村水(95.96% vs. 89.58%, $\chi^2 = 87.077, P < 0.001$); 地表水氟化物含量及健康风险水平低于地下水(0.340 mg/L vs. 0.500 mg/L, 0.21 vs. 0.31, $Z = -11.761, P < 0.001$), 合格率高于地下水(99.72% vs. 91.23%, $\chi^2 = 32.146, P < 0.001$); 不同水样类型的氟化物含量及健康风险水平差异均有统计学意义($H = 55.551, P < 0.001$), 出厂水高于末梢水(0.530 mg/L vs. 0.490 mg/L, 0.33 vs. 0.30, $P < 0.001$)。结论 2022 年内蒙古自治区部分地区饮用水中氟化物的健康风险超出 USEPA 推荐的最大可接受风险, 健康风险水平较高, 应在饮用水风险管理中重点关注。

【关键词】 内蒙古自治区; 饮用水; 氟化物; 风险评估

Fluoride in drinking water and associated non-carcinogenic health risk in Inner Mongolia Autonomous Region, 2022: a monitoring data analysis

ZHANG Wenqian^{1,2}, ZHU Jiake¹, ZHANG Wenyu¹, JIA Xinrui¹, YUE Xuanzhi¹, LI Huan¹, WU Duoduo³, QIN Yuhan², FAN Yaochun^{1,2,4} (1. School of Public Health, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010059, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Center for Disease Control and Prevention (Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Preventive Medicine), Hohhot 010059, China; 3. Inner Mongolia University of Science and Technology Baotou Medical College, Baotou 014000, China; 4. Inner Mongolia Engineering and Technical Research Center for Personalized Medicine, Tongliao 028000, China)

Corresponding authors: FAN Yaochun, E-mail: fy840815@163.com; QIN Yuhan E-mail: 309723543@qq.com

【Abstract】 Objective To investigate the fluoride content of drinking water and the non-carcinogenic health risk of oral fluoride exposure in the Inner Mongolia Autonomous Region (Inner Mongolia) in 2022 by analyzing monitoring data for the management of drinking water hygiene in the region. **Methods** A total of 7 488 surface/underground resource and treated/secondary supplied/tap water samples were collected in dry and wet seasons from domestic drinking water monitoring stations located in different river basins and urban/rural areas in 12 municipalities of Inner Mongolia in 2022; fluoride in the samples was detected and analyzed. The non-cancer health risk associated with oral exposure to fluoride in drinking water was evaluated using the United States Environmental Protection Agency's (USEPA) four-step approach. **Results** For all samples, the fluoride concentration (mg/L) ranged from not detected to 8.830, with a median of 0.500 and a 25th/75th percentile of 0.300/0.750; the fluoride content in 91.64% of the samples was within the limit (≤ 1.0 mg/L) of the National Sanitary Standards for Drinking Water (GB 5749 - 2006). For all water samples, the non-carcinogenic hazard quotient (HQ) associated with oral exposure to fluoride in drinking water was 0.31 for the adult population, and 2.18% (163) of the samples had HQ values greater than 1. For children and adolescents, the non-carcinogenic HQ increases and then decreases with age, with the highest HQ (0.45) for children aged 1 - < 2 years and some samples with HQ greater than 1 for children and adolescents of different ages. The non-cancer health risk of oral fluoride exposure was



similar for male and female adults ($HQ = 0.31$), and the non-cancer health risk was higher ($HQ = 0.33 - 0.45$) for children aged 9 months – < 3 years than for adults. There were significant differences in fluoride content and associated non-cancer health risk for samples collected from different river basins ($H = 648.781$, $P < 0.001$); the fluoride content and associated non-cancer health risk ($HQ = 0.40$) were the highest for samples from the Liaohe River basin, followed by those from the basins of some inner rivers (0.37), Haihe River basin (0.36), Yellow River basin (0.26), and Heilongjiang River basin (0.24), respectively. The qualification rate (fluoride content lower than the national standard of ≤ 1.0 mg/L) of water samples from urban areas was higher than that from rural areas (95.96% vs. 89.58%, $\chi^2 = 87.077$; $P < 0.001$), and the qualification rate of groundwater samples was higher than that of surface water samples (99.72% vs. 91.23%, $\chi^2 = 32.146$; $P < 0.001$); both the fluoride content and the associated non-cancer health risk of surface water samples were lower than those of groundwater (0.340 mg/L vs. 0.500 mg/L, 0.21 vs. 0.31, $Z = -11.761$; $P < 0.001$). There were significant differences in fluoride content and associated non-carcinogenic health risk among treated/secondary supplied/tap water samples ($H = 55.551$, $P < 0.001$), with higher fluoride content (0.530 mg/L vs. 0.490 mg/L) and associated non-carcinogenic HQ (0.33 vs. 0.30) of treated water than that of tap water samples ($P < 0.001$). **Conclusions** The non-carcinogenic health risk associated with exposure to fluoride in drinking water in the Inner Mongolia Autonomous Region in 2022 exceeds the maximum acceptable risk recommended by the USEPA, and the situation should be addressed in drinking water-related health risk management.

【Keywords】 Inner Mongolia Autonomous Region; drinking water; fluoride; risk assessment

水是人类赖以生存和发展的重要物质资源之一,水质的安全关系到人民群众的生命健康。因此,通过对生活饮用水开展监测了解水质情况非常重要。摄取过量的氟化物不但会导致氟斑牙、氟骨症,还会对心血管系统、神经系统、泌尿系统造成损伤^[1-3],因此,氟化物是水质监测的重点内容之一。内蒙古自治区地处中国北疆,属于典型的干旱-半干旱地区,而高氟地下水(氟含量 > 1.0 mg/L)是广泛分布于中国北方干旱-半干旱地区的一种典型的劣质水源,长期饮用高氟地下水是导致地方性氟中毒的主要原因^[4]。2021 年有报道内蒙古自治区饮用水中氟化物的检出率为 96.77%,超标率为 4.87%,尽管已开展数十年的改水工作,氟化物依然有超标的情况,存在一定的人群健康风险^[5]。因此,本研究于 2022 年对内蒙古全区范围内生活饮用水开展枯、丰水期监测,对 7 488 份饮用水水样中氟化物含量进行检测并进行健康风险评估,为生活饮用水健康环境风险管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集与检测

于 2022 年 2—12 月在内蒙古自治区 12 个盟市设立的饮用水监测点采集 7 488 份水样,其中城市水 2 423 份,农村水 5 065 份。水样的采集、运输、保存和检验均按照 GB/T 5750—2006《生活饮用水标准检验方法》^[6]进行,检测结果按照 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》中对氟化物的限定标准(氟化物 ≤ 1.0 mg/L)进行达标评价^[7]。内蒙古自治区河流水系共分 5 大流域,分别为黑龙江流域(呼伦贝尔市、兴安盟大部 and 通辽市北部)、辽河流域(赤峰市和通辽市的大部)、海河流域(锡林郭勒盟的正蓝旗和多伦县、乌兰察布市的丰镇市、兴和县和凉城县)、黄河流域(阿拉善盟部分地区、乌海市、巴彦淖尔市狼山以南、鄂尔多斯市、大青山南麓的包头市和呼和浩特市)及内流区诸河(阿拉善盟部分地区、巴彦淖尔市狼山北部、阴山北麓的包头市和呼和浩特

市、乌兰察布市和锡林郭勒盟的大部分、兴安盟部分地区)^[8]。

1.2 健康风险评估

参照美国国家环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)推荐的健康风险评估模型,按“四步法”,即危害识别、剂量-反应评估、暴露评价和风险特征,对饮用水中氟化物进行健康风险评估。人体可以通过经口摄入和皮肤接触这 2 种主要途径暴露于水中的氟化物,经口摄入引起的健康风险通常比皮肤接触引起的健康风险高一个数量级^[9],因此本研究只评估氟化物通过经口摄入途径暴露的健康风险。

1.2.1 危害识别

根据国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)发布的致癌物分类清单,氟化物属于 3 类致癌物,即对人类致癌性可疑,尚无充分的人体或动物数据^[10],因此采用非致癌物风险评估模型评估氟化物的健康风险。

1.2.2 剂量-反应评估

参考 USEPA 的综合风险信息系统(Integrated Risk and Information System, IRIS),氟化物经口摄入的参考剂量(reference dose, RfD)取值为 0.06 mg/(kg·d)^[11]。

1.2.3 暴露评价

水中化学物质经口摄入的暴露量公式为:

$$ADD = (C \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT)$$

式中:ADD—经口摄入日均暴露量, mg/(kg·d); C—水中特定污染物的质量浓度,采用检出数据的浓度中位数, mg/L; IR—饮水摄入量, L/d; EF—暴露频率, d/a; ED—暴露时长, a; BW—暴露人群体重, kg; AT—平均接触时间, d。成人的暴露参数参考《中国人群暴露参数手册》(成人卷)^[12]中内蒙古自治区的推荐数据,儿童的暴露参数参考《中国人群暴露参数手册》(儿童卷)^[13]中内蒙古自治区儿童的推荐数据。根据《中国人群暴露参数手册》儿童卷^[13]将儿童分为 13 个年龄段。

1.2.4 风险特征

非致癌风险公式为:

$$HQ = ADD/RfD$$

式中: HQ – 危害商, 无量纲; RfD – 非致癌物经口摄入的参考剂量, mg/(kg·d)。

1.2.5 风险评估标准 根据化学物质环境健康风险评估技术指南^[14], 当 HQ > 1 时, 代表可能会对人體产生非致癌风险, HQ ≤ 1 则表示非致癌性风险处于可接受的水平。

1.3 统计分析 使用 WPS 表格和 SPSS 25.0 进行数据整理与分析, 低于最低检出限的指标, 以 ND 表示, 并以最低检出限浓度的 1/2 纳入统计分析。氟化物的监测结果为非正态分布, 使用中位数(四分位数间距)[M(P₂₅, P₇₅)]进行统计描述, 不同水样间的比较采用 Mann-Whitney U 检验和 Kruskal-Wallis 秩和检验, 率的比较采用 χ² 检验, 所有检验均采用双侧检验, 检验水准 α = 0.05。利

用 Crystal Ball 11.1.30 进行 10 000 次置信度为 95% 的蒙特卡洛仿真模拟。

2 结果

2.1 监测结果(表 1) 2022 年内蒙古自治区 12 盟市共监测了 7 488 份饮用水水样, 氟化物含量范围在 ND~8.830 mg/L 之间, M(P₂₅, P₇₅)为 0.500(0.300, 0.750) mg/L, 总体合格率 91.64%。氟化物含量超标的水样中有 66.5% 分布在 1.0~1.5 mg/L、18.8% 分布在 1.5~2.0 mg/L、14.7% > 2.0 mg/L。将水样监测结果分为不同水系流域、采样地区、水期类型(枯水期 2—5 月, 丰水期 6—12 月)、水源类型、水样类型等 5 个方面进行描述。

表 1 内蒙古自治区 2022 年饮用水氟化物监测结果

Table 1 Fluoride concentration in drinking water in the Inner Mongolia Autonomous Region in 2022 – total number of samples, qualified samples, range, median, 25th percentile, 75th percentile, and qualification rate – for samples from different river basins, urban/rural area, wet/dry season, surface/underground resource sources and treated/secondary supplied/tap water (ND: not detected)

项目	类别	总样本数	合格样本数	范围(mg/L)	M	P ₂₅	P ₇₅	合格率(%)	χ ² 值	P 值
水系流域	海河流域	192	186	ND~2.350	0.600	0.415	0.800	96.90	111.127	< 0.05
	黑龙江流域	1 605	1 475	ND~8.830	0.380	0.200	0.555	91.90		
	黄河流域	2 198	2 112	ND~2.280	0.420	0.300	0.620	96.10		
	辽河流域	1 515	1 334	ND~2.170	0.640	0.470	0.850	88.10		
	内流区诸河	1 978	1 755	ND~7.800	0.580	0.308	0.830	88.70		
采样地区	城市水	2 423	2 325	ND~8.830	0.490	0.350	0.680	95.96	87.077	< 0.001
	农村水	5 065	4 537	ND~7.800	0.500	0.278	0.790	89.58		
水期类型	丰水期	3 723	3 423	ND~6.800	0.500	0.310	0.740	91.94	0.882	0.348
	枯水期	3 765	3 439	ND~8.830	0.490	0.300	0.760	91.34		
水源类型	地表水	359	358	ND~1.090	0.340	0.200	0.432	99.72	32.146	< 0.001
	地下水	7 129	6 504	ND~8.830	0.500	0.301	0.770	91.23		
水样类型	出厂水	2 243	1 956	ND~7.800	0.530	0.317	0.833	87.20	90.042	< 0.001
	二次供水	195	193	ND~1.570	0.450	0.370	0.700	98.97		
	末梢水	5 050	4 713	ND~8.830	0.490	0.300	0.710	93.33		
合计		7 488	6 862	ND~8.830	0.500	0.300	0.750	91.64		

注: ND未检出。

2.2 健康风险评估(表 2) 2022 年内蒙古自治区饮用水氟化物对成人产生的非致癌风险的 HQ 值为 0.31, 样本中 2.18%(163 份)危害商 HQ > 1, 对成年男性和成年女性产生的非致癌风险 HQ 值均为 0.31。饮用水中的氟化物对每个年龄段儿童产生的非致癌风险不同, 各年龄段均有部分样本危害商 HQ > 1。1~< 2 岁的儿童面临的非致癌风险最高, HQ 值为 0.45, 样本中 5.93%(444 份)危害商 HQ > 1, 对 15~< 18 岁的青少年产生的非致癌风险最低, HQ 值为 0.14, 样本中 0.29%(22 份)危害商 HQ > 1。9 月龄~< 3 岁的儿童面临的非致癌风险高于成人, 其他年龄段儿童面临的非致癌风险低于成人。随着年龄的增长, 饮用水中氟化物对儿童产生的非致癌风险先增加后降低, 1~< 2 岁儿童面临的非致癌风险最高, ≥ 2 岁的儿童面临的非致癌风险不断下降, 6~< 9 岁儿童面临的非致癌风险升高。

表 2 2022 年内蒙古自治区经口途径摄入饮用水氟化物非致癌风险结果

Table 2 Population-specific (males, females, and children/adolescents of different ages) non-carcinogenic hazard quotient (HQ) associated with oral exposure to fluoride in drinking water and percentage of collected drinking water samples with the HQ greater than 1 in Inner Mongolia Autonomous Region, 2022

项目	分组	HQ 值	危害商 HQ > 1(%)
成人		0.31	2.18
	男性	0.31	2.20
	女性	0.31	2.13
儿童	0~< 3月龄	0.15	0.32
	3~< 6月龄	0.16	0.36
	6~< 9月龄	0.29	1.72
	9月龄~< 1岁	0.33	2.66
	1~< 2岁	0.45	5.93
	2~< 3岁	0.33	2.71
	3~< 4岁	0.29	1.87
	4~< 5岁	0.25	1.18
	5~< 6岁	0.22	0.84
	6~< 9岁	0.27	1.51
	9~< 12岁	0.17	0.41
	12~< 15岁	0.15	0.32
	15~< 18岁	0.14	0.29

2.3 分层分析(表 3) 将水样监测及健康风险分析结果分为不同水系流域、采样地区、水期类

型、水源类型、水样类型等 5 个方面进行分析,如表 3 所示。

表 3 2022 年内蒙古自治区经口途径摄入饮用水氟化物非致癌风险分层分析(以 HQ 值表示)

Table 3 Non-carcinogenic hazard quotient associated with oral exposure to fluoride in drinking water for adults and children/adolescents of different ages in Inner Mongolia Autonomous Region, 2022 based on detection of samples from different river basins, urban/rural area, wet/dry season, surface/underground resource sources and treated/secondary supplied/tap water

项目	类别	成人	0~<3月龄	3~<6月龄	6~<9月龄	9月龄~<1岁	1~<2岁	2~<3岁	3~<4岁	4~<5岁	5~<6岁	6~<9岁	9~<12岁	12~<15岁	15~<18岁
水系流域	海河流域	0.37	0.18	0.20	0.35	0.39	0.54	0.39	0.35	0.30	0.27	0.33	0.20	0.18	0.17
	黑龙江流域	0.24	0.11	0.13	0.22	0.25	0.34	0.25	0.22	0.19	0.17	0.21	0.13	0.11	0.11
	黄河流域	0.26	0.13	0.14	0.24	0.27	0.38	0.28	0.25	0.21	0.19	0.23	0.14	0.12	0.12
	辽河流域	0.40	0.19	0.21	0.37	0.42	0.57	0.42	0.37	0.32	0.29	0.35	0.22	0.19	0.18
	内流区诸河	0.36	0.18	0.19	0.34	0.38	0.52	0.38	0.34	0.29	0.26	0.32	0.20	0.17	0.16
	H 值	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
采样地区	城市水	0.30	0.15	0.16	0.28	0.32	0.44	0.32	0.29	0.24	0.22	0.27	0.17	0.14	0.14
	农村水	0.31	0.15	0.16	0.29	0.33	0.45	0.33	0.29	0.25	0.22	0.27	0.17	0.15	0.14
	Z 值	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048	-1.048
	P 值	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295	0.295
	H 值	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781
水期类型	丰水期	0.31	0.15	0.16	0.29	0.33	0.45	0.33	0.29	0.25	0.22	0.27	0.17	0.15	0.14
	枯水期	0.30	0.15	0.16	0.28	0.32	0.44	0.32	0.29	0.24	0.22	0.27	0.17	0.14	0.14
	Z 值	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062	-1.062
	P 值	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288
	H 值	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781
水源类型	地表水	0.21	0.10	0.11	0.20	0.22	0.30	0.22	0.20	0.17	0.15	0.19	0.12	0.10	0.09
	地下水	0.31	0.15	0.16	0.29	0.33	0.45	0.33	0.29	0.25	0.22	0.27	0.17	0.15	0.14
	Z 值	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761	-11.761
	P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	H 值	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781	648.781
水样类型	出厂水	0.33	0.16	0.17	0.31	0.35	0.47	0.35	0.31	0.26	0.24	0.29	0.18	0.16	0.15
	二次供水	0.28	0.14	0.15	0.26	0.29	0.40	0.30	0.26	0.22	0.20	0.25	0.15	0.13	0.12
	末梢水	0.30	0.15	0.16	0.28	0.32	0.44	0.32	0.29	0.24	0.22	0.27	0.17	0.14	0.14
	H 值	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551	55.551
	P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.3.1 不同水系 对不同流域的氟化物含量和健康风险水平进行分析,结果显示,不同流域的氟化物含量和健康风险水平差异均有统计学意义($H = 648.781, P < 0.001$)。采用 Kruskal-Wallis 秩和检验进行多组间的比较,结果显示,氟化物的含量和健康风险水平均为辽河流域最高,内流区诸河和海河流域次之,第三是黄河流域,黑龙江流域最低。对不同流域氟化物含量的合格率进行分析,结果显示,不同流域氟化物含量合格率差异有统计学意义($\chi^2 = 111.127, P < 0.05$),多组间的比较结果显示,海河流域与黄河流域间的差异无统计学意义,合格率最高,黑龙江流域的合格率次之,辽河与内流区诸河间的差异无统计学意义,合格率最低。

2.3.2 不同采样地区 对内蒙古自治区不同采样地区的氟化物含量和健康风险水平进行分析,结果显示,城市水与农村水之间的差异无统计学意

义。但两者氟化物含量的合格率差异有统计学意义($\chi^2 = 87.077, P < 0.001$),城市水高于农村水,城市水合格率为 95.96%,农村水合格率为 89.58%。

2.3.3 不同水期类型 对内蒙古自治区不同水期的氟化物含量和健康风险水平进行分析,结果显示,枯水期氟化物含量、合格率、健康风险水平与丰水期间的差异无统计学意义。

2.3.4 不同水源类型 内蒙古自治区饮用水以地下水为主,占 95.21%,地下水氟化物含量及健康风险水平高于地表水,差异有统计学意义($Z = -11.761, P < 0.001$),地下水氟化物含量的合格率低于地表水,差异有统计学意义($\chi^2 = 32.146, P < 0.001$)。

2.3.5 不同水样类型 对不同水样的氟化物含量和健康风险水平进行分析,结果显示,不同水样类型的氟化物含量和健康风险水平差异均有统计学意义($H = 55.551, P < 0.001$),采用 Kruskal-Wallis 秩和检验进行多组间的比较,结果显示,末梢水与

出厂水间的差异有统计学意义($P < 0.05$), 出厂水高于末梢水。对不同水样类型氟化物含量的合格率进行分析, 结果显示, 不同水样类型合格率二次供水 > 末梢水 > 出厂水($\chi^2 = 90.042, P < 0.001$)。

2.4 蒙特卡洛模拟

2.4.1 基于蒙特卡洛的饮用水氟化物健康风险评估 将氟化物含量、体重、饮水摄入量、暴露频率作为假设变量, 使用 Crystal Ball 11.1.30 在 95% 置信水平上重复抽样 10 000 次, 成人氟化物非致癌健康风险 HQ 值中位数为 0.27, 小于确定性方法计算的危害商中位数为 0.31。HQ > 1 的概率为 3.50%。

2.4.2 敏感性分析 敏感性高的假设变量对于健康风险的评估结果影响较大, 敏感度低的假设变量对评估结果贡献率较小, 贡献率的正或负值表示对评估结果的正或负影响。氟化物含量贡献率最高为 74.48%; 其次是饮水摄入量贡献率为 20.10%; 体重贡献率为 -2.86%; 暴露频率贡献率为 2.57%。

3 讨论

水质与国家生态环境的可持续发展和人类生存密切相关。本研究分析了 2022 年内蒙自治区饮用水中氟化物含量的监测结果并进行了健康风险评估。本次研究发现, 2022 年内蒙自治区部分地区饮用水氟化物存在不同程度的超标。监测结果显示: 66.5% 的超标水样氟化物含量介于 1.0~1.5 mg/L, 18.8% 介于 1.5~2.0 mg/L, 14.7% > 2.0 mg/L, 该结果提示大部分地区饮用水中氟化物为轻度超标。健康风险评估结果显示, 非致癌风险成人的 HQ 值为 0.31, 样本中 2.18% 危害商 HQ > 1, 各年龄段的儿童均有部分危害商 HQ > 1, 提示部分地区存在非致癌风险。因此应加强饮用水中氟化物监测与管理, 保障居民的饮用水安全。

本研究分析了饮用水中氟化物对不同年龄段儿童产生的非致癌风险, 儿童面临的非致癌风险随年龄的增长先增加后降低, 1~<2 岁的儿童非致癌风险最高。<1 岁的儿童饮水量的增长速度 > 体重的增长速度, 随着饮水量的增加, 非致癌风险不断增加, >2 岁的儿童, 体重的增长速度更快, 非致癌风险随之下降。9 月龄~<3 岁的儿童非致癌风险高于成人, 其他年龄段儿童的非致癌风险低于成人, 9 月龄~<3 岁的儿童与其他年龄段的儿童及成人相比, 饮水量与体重的比值较高, 即饮水量较高而体重较轻, 此年龄段的儿童正处于减少母乳, 饮水量增加而体重较轻的阶段。6~<9 岁的儿童处于发育前期的阶段, 与 5~<6 岁的儿童相比活动量增加, 饮水摄入量明显增多, 体格发育平稳, 而 9~<12 岁的儿童处于青春期早期, 体格发育进入快速增长阶段, 体重明显

增加, 因此 6~<9 岁的儿童体重较轻, 饮水摄入量较大, 饮用水中氟化物对 6~<9 岁的儿童产生的非致癌风险明显升高。

分层分析结果显示, 不同流域的氟化物含量和健康风险水平差异均有统计学意义($P < 0.001$), 其中辽河流域的健康风险水平最高, 这与该流域如赤峰、通辽地区为历史高氟地区情况相符^[15-17]。城市水的氟化物含量合格率高于农村水, 主要原因是城市水的水处理工艺更加完善, 农村多为小型集中供水, 水处理工艺较简单, 除氟设施使用率不高, 个别地区甚至不加以处理, 且农村饮水工程建管分离, 工程建设前水源选择和选址等不进行卫生学评价, 这些都是影响农村水合格率的因素^[18]。枯水期和丰水期水中氟化物含量与合格率及健康风险水平无明显差异, 与张雯宇等^[5]的研究结果相同, 说明季节性、降雨量等因素对水中氟化物影响较小, 这可能与内蒙古自治区饮用水多为地下水有关。地表水氟化物含量及健康风险水平低于地下水, 合格率高于地下水, 与刘凤莲等^[19]的研究结果相似, 地质水文条件和水处理工艺不完善是影响地下水合格率的重要因素, 采集的水样中 95.21% 为地下水, 地表水仅有 359 份, 地表水水样较少也可能是影响结果的因素之一。对不同水样类型进行分析, 结果显示出厂水的氟化物含量及健康风险水平高于末梢水, 通常情况下, 经过管网运输末梢水的合格率一般低于出厂水, 但在实际监测过程中, 往往末梢水的合格率更高, 有研究现出出厂水、末梢水采样比例的不确定可能会造成两者合格率的颠倒^[20]。

在风险评估过程中存在着不确定性, 本研究使用蒙特卡洛模拟进行不确定性分析。根据敏感性分析结果, 4 个参数对危害商的影响大小的顺序依次是氟化物含量、饮水摄入量、体重、暴露频率, 这与孟加拉国一项研究相似^[21], 饮用水中氟化物含量是影响健康风险水平的主要因素, 因此降低氟化物对人体的影响最重要的仍是控制氟化物含量。饮水摄入量也是影响健康风险水平的重要因素, 包括直接饮水摄入量和间接饮水摄入量, 受到人群个体差异和区域空间变异的影响, 包括年龄、性别、种族、活动强度、经济水平、环境地理气候学因素等诸多因素的影响^[22]。虽然前期已有关于内蒙古自治区饮用水中氟化物的监测报告, 但本研究首次从河流流域的角度分析全自治区饮用水中氟化物的情况, 并分析了饮用水中氟化物对不同年龄段的儿童产生的非致癌风险。

未来研究中有以下问题需要进一步探索: 一方面接触饮用水中污染物的途径有很多, 如直接

摄入和皮肤接触等,本研究只建立了经口摄入途径的健康风险评估模型,另外受检出限的影响,可能对全面反映饮用水中氟化物的健康风险存在不足。另一方面,在不确定性分析中涉及很多程序与参数,仅仅基于数学方法进行评估显然存在不足,且只针对成人进行了基于蒙特卡洛模拟的初步分析,未进行更深入的探索,不能完全准确反映饮用水氟化物超标的实际情况。

综上,2022 年内蒙古自治区部分地区饮用水中氟化物含量超标,可能会对人群产生非致癌性风险,需重点监测并分析超标来源,以保障居民健康与生态安全。

参考文献

- [1] Adeyeye O, Xiao C, Zhang Z, et al. Groundwater fluoride chemistry and health risk assessment of multi-aquifers in Jilin Qianan, Northeastern China[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021(211): 111926.
- [2] Skórka-Majewicz M, Goschorska M, Żwierello W, et al. Effect of fluoride on endocrine tissues and their secretory functions – review [J]. *Chemosphere*, 2020(260): 127565.
- [3] Wu L, Fan C, Zhang Z, et al. Association between fluoride exposure and kidney function in adults: a cross-sectional study based on endemic fluorosis area in China[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021(225): 112735.
- [4] Solanki Y, Agarwal M, Gupta A, et al. Fluoride occurrences, health problems, detection, and remediation methods for drinking water: a comprehensive review [J]. *The Science of the total environment*, 2022, 807(Pt 1): 150601.
- [5] 张雯宇,高昇,张晨光,等. 2021 年内蒙古自治区城市生活饮用水 8 种化学物健康风险评估[J]. *环境与职业医学*, 2023, 40(11): 1283 – 1289.
- [6] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB / T 5750 — 2006 生活饮用水标准检验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB 5749 — 2006 生活饮用水卫生标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [8] 翟俊峰. 内蒙古自治区河流湖泊分流域概述 [J]. *内蒙古水利*, 2017(3): 28 – 30.
- [9] Chen Z, Xingguang Z, Xin F, et al. Characterization of drinking groundwater quality in rural areas of Inner Mongolia and assessment of human health risks[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2022(234): 113360.
- [10] IARC. Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-133 [EB/OL].[2022-09-26].<http://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc>
- [11] USEPA. Integrated Risk Information System [EB/OL]. [2022-09-22]. <http://www.epa.gov/iris>
- [12] 中国环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [13] 段小丽. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. WS/T 777 — 2021 化学物质环境健康风险评估技术指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [15] 李小宏,吴恒宇,乌雪峰. 内蒙古河流分区及特性分析 [J]. *内蒙古水利*, 2013(4): 25 – 26.
- [16] 魏丽娜,马笑君. 西辽河水系内蒙古段氟化物浓度变化规律及分布特征探析 [C]. 2017.
- [17] 谢建华. 赤峰市地表水氟化物超标情况及超标原因浅析 [J]. *内蒙古水利*, 2023(3): 43 – 45.
- [18] 彭敏. 2015 — 2019 年淮北市生活饮用水水质监测结果 [J]. *职业与健康*, 2020, 36(11): 1534 – 1537.
- [19] 刘凤莲,闫芳,杨明. 2015 – 2020 年宁夏农村学校饮用水菌落总数和氟化物指标分析 [J]. *现代预防医学*, 2021, 48(12): 2286 – 2290.
- [20] 冯晓亮,王志强. 某省城市供水末梢水合格率高于出厂水原因分析 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017, 7(3): 209 – 212.
- [21] Rahman MM, Bodrud-Doza M, Siddiqua M T, et al. Spatio-temporal distribution of fluoride in drinking water and associated probabilistic human health risk appraisal in the coastal region, Bangladesh[J]. *The Science of the total environment*, 2020(724): 138316.
- [22] 黄建洪,张琴,王晋昆,等. 水环境污染健康风险评估中饮水量暴露参数的研究进展 [J]. *卫生研究*, 2021, 50(1): 146 – 153.