

# 辽宁省饮用水 9 种污染物暴露水平及健康风险分析

李继芳, 丛琳, 高津悦, 王俊龙, 于连政, 王舒

辽宁省疾病预防控制中心, 环境卫生所, 辽宁 沈阳 110172

**摘要:**目的 分析辽宁省城乡饮用水中 9 种污染物暴露水平及健康风险, 为保障饮用水安全提供参考。方法 2024 年对 28 家大规模供水单位进行监测, 分析双酚 A (BPA)、亚硝基二甲胺 (NDMA)、二(2-乙基己基)己二酸酯 (DEHA)、邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、邻苯二甲酸二丁酯 (DBP)、全氟辛酸 (PFOA)、全氟辛烷磺酸 (PFOS)、钒 (V) 和氯化石蜡 (CPs) 污染状况和健康风险。除 CPs 外, 检验结果按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022) 进行评价。两组间浓度差异比较采用 Mann-Whitney U 检验, 多组间比较采用 Kruskal-Wallis 秩和检验; 率的比较采用  $\chi^2$  检验。结合美国国家环境保护署健康风险评估方法和我国《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777-2021), 对饮用水经口摄入的健康风险进行评估。结果 共采集检测水样 112 份, 检出率由高到低为 PFOA (36.61%) > NDMA (25.89%) > PFOS (16.07%) > DBP (15.18%) > BPA (4.46%) > CPs (2.67%), DEHA、DEP 和 V 未检出。除 CPs 外, DBP 达标率为 99.96%, 其它指标均为 100%。丰水期 BPA 和 NDMA 浓度高于枯水期, 且丰水期 NDMA 检出率高于枯水期; 出厂水 NDMA 浓度高于末梢水, 以上差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。地表水水源饮用水中 NDMA 和 DBP 浓度高于地下水 ( $P < 0.05$ ); 地表水 DBP 和 PFOA 检出率高于地下水 ( $P < 0.05$ )。PFOA 的危害商 (HQ) > 1, 非致癌风险较高; 致癌风险中, NDMA、男性和女性 PFOA、PFOS 的致癌风险值 (CR) 均在  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ , 具有一定风险, 但在可接受范围内。结论 辽宁省饮用水中 BPA、NDMA、DBP、PFOA、PFOS 和 CPs 均有不同程度的检出。NDMA、PFOA 和 PFOS 的致癌风险在可接受范围内。PFOA 具有一定非致癌风险, 需加以关注。

**关键词:** 饮用水; 污染物; 暴露; 健康风险评估

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2025)18-3318-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202504268

## Exposure levels and health risks of nine pollutants in drinking water of Liaoning

LI Ji-fang, CONG Lin, GAO Jin-yue, WANG Jun-long, YU Lian-zheng, WANG Shu

Institute for Environmental Health, Liaoning Provincial Center for Disease Control and Prevention,

Shenyang, Liaoning 110172, China

**Abstract:** **Objective** To analyze the exposure levels and health risks of nine pollutants in urban and rural drinking water of Liaoning Province, and to provide a reference for ensuring drinking water safety. **Methods** Water samples from 28 large-scale water supply units were monitored in 2024. The indicators included bisphenol A (BPA), nitrosodimethylamine (NDMA), di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA), diethyl phthalate (DEP), dibutyl phthalate (DBP), perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctanesulfonic acid (PFOS), vanadium (V), and chlorinated paraffins (CPs). The results were evaluated according to the standards for drinking water quality (GB 5749-2022), except for CPs. The comparison of concentration differences between the two groups was performed using the Mann-Whitney U test, while the Kruskal-Wallis rank-sum test was employed for comparisons among multiple groups. The  $\chi^2$  test was used for the comparison of rates. Using the health risk assessment methods of the U.S. Environmental Protection Agency and the technical guide for environmental health risk assessment of chemical exposure (WS/T 777-2021), the health risks to people through oral of drinking water were assessed. **Results** A total of 112 water samples were collected and tested. The detection rates of the indicators, in descending order, were PFOA (36.61%) > NDMA (25.89%) > PFOS (16.07%) > DBP (15.18%) > BPA (4.46%) > CPs (2.67%). DEHA, DEP, and V were not detected. Except for CPs, the compliance rate for DBP was 99.96%, while all other indicators reached 100%. BPA and NDMA concentrations in wet season were higher than that in dry season, and the detection rate of NDMA was also higher in the wet season compared to the dry season; the NDMA concentration in the finished water was higher

基金项目: 辽宁省重点研发项目(2024JH2/102500087); 辽宁省重点实验室(2018225113)

作者简介: 李继芳(1979—), 女, 本科, 主任医师, 研究方向: 环境卫生与健康研究

通信作者: 王舒, E-mail: 85597893@qq.com

than that in the tap water, and all these differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). In surface water sources for drinking water, the concentrations of NDMA and DBP were higher than those in groundwater ( $P < 0.05$ ); the detection rates of DBP and PFOA in surface water were higher than those in groundwater ( $P < 0.05$ ). The hazard quotient (HQ) for PFOA is greater than 1, indicating a high non-carcinogenic risk; the carcinogenic risk values (CR) of NDMA, PFOA of male and female, and PFOS are all between  $1.0 \times 10^{-6}$  to  $1.0 \times 10^{-4}$ , indicating a certain risk. **Conclusion** In Liaoning Province, there is exposure to BPA, NDMA, DBP, PFOA, PFOS and CPs in drinking water samples. NDMA, PFOA and PFOS carry a certain level of potential carcinogenic risks, but all are within the acceptable range. PFOA presents a certain non-carcinogenic risk and requires attention.

**Keywords:** Drinking water; Pollutants; Exposure; Health risk assessment

饮用水是维持身体机能,关系居民身体健康的重要物质。我国新《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)中,已将双酚 A (BPA)、亚硝基二甲胺(NDMA)、二(2-乙基己基)己二酸酯(DEHA)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、钒(V)纳入参考指标,以上有机物在多个地区有检出情况<sup>[1-4]</sup>,但进行健康风险评估的较少。目前,氯化石蜡(CPs)尚未列入饮用水卫生标准,但短链氯化石蜡已被列入我国 2023 年版重点管控新污染清单,其为一种持久性有机物,在环境中广泛存在<sup>[5]</sup>。目前,按照饮用水卫生标准,可以评价指标是否超出限值,但长期低剂量摄入可能对人体造成健康风险<sup>[6]</sup>,采用污染物风险评估模型和达标情况相结合的方式,评价对人体健康的风险更为科学<sup>[7-8]</sup>。本研究对全省城乡饮用水 BPA 等 9 种污染物浓度及检出率进行分析,并进行健康风险评估,为进一步提升水质,保障饮用水安全提供参考。

## 1 对象与方法

**1.1 研究对象** 2024 年,在辽宁省范围内,结合水源类型和水处理工艺的代表性,每个市选择 1 家日供水规模最大的市政供水单位和 1 家日供水规模在 1 千吨及以上的农村集中式供水工程。每个供水单位设置 1 个出厂水和 1 个末梢水监测点,于枯水期(3—4 月)和丰水期(7—8 月)各监测 1 次。全省共选取 28 家大规模供水单位,采集检测水样 112 份。

**1.2 检测指标及方法** 本次检测指标包括双酚 A (BPA)、亚硝基二甲胺(NDMA)、二(2-乙基己基)己二酸酯(DEHA)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、钒(V)和氯化石蜡(CPs),共 9 项指标。CPs 采用固相微萃取气相色谱串联质谱法检测,其它指标按照《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2023)<sup>[9]</sup>进行检测。检验结果按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)<sup>[10]</sup>进行评价,目前 CPs 没有列入我国饮用水卫生标准,本次研究暂不做达标率评

价。

**1.3 健康风险评估** 结合美国国家环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)健康风险评估方法和《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777-2021)<sup>[11]</sup>,对饮用水经口摄入途径的人群健康风险进行评估。危害识别和剂量-反应关系评估通过查阅国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)网站<sup>[12]</sup>和美国国家环保署综合风险信息查询系统(Integrated Risk Information System, IRIS)<sup>[13]</sup>确定。目前,V 和 CPs 暂无相关数据,本次研究暂不做健康风险评估。见表 1。

表 1 污染物参考剂量和斜率因子

Table 1 Slope factors, reference doses of chemicals

指标	非致癌参考剂量 (RfD, mg/(kg·d))	致癌斜率因子 (SF, kg·d/mg)
BPA	$5 \times 10^{-2}$	-
NDMA	-	51.0
DEHA	$6 \times 10^{-1}$	-
DEP	$8 \times 10^{-1}$	-
DBP	$1 \times 10^{-1}$	-
PFOA	$3 \times 10^{-8}$	29.3
PFOS	$1 \times 10^{-7}$	39.5

注:“-”为无数值,下同。

**1.3.1 暴露评估** 通过饮水经口摄入的暴露量按公式(1)计算:

$$\text{ADD}_{\text{oral}} = C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED} / (\text{BW} \times \text{AT}) \quad (1)$$

式中:ADD<sub>oral</sub> 为经口摄入日均暴露量,mg/(kg·d);C 为饮水中物质浓度,mg/L;IR 为日摄入量,L/d;EF 为暴露频率,d/a;ED 为暴露周期,a;BW 为暴露人群体重,kg;AT 为平均接触时间,d。

**1.3.2 风险表征** 非致癌风险 HQ 和致癌风险 CR 分别通过公式(2)和(3)计算:

$$\text{HQ} = \text{ADD}_{\text{oral}} / \text{RfD} \quad (2)$$

$$\text{CR} = \text{ADD}_{\text{oral}} \times \text{SF} \quad (3)$$

式中:HQ 为危害商,无量纲;ADD<sub>oral</sub> 为经口摄入日均暴露量,mg/(kg·d);RfD 为非致癌物参考剂量,mg/(kg·d);CR 为致癌风险,无量纲;SF 为致癌

斜率因子,  $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$ 。

**1.3.3 健康风险评估参数及标准** 暴露评估参数中经口摄入日摄入量、暴露周期、体重数据来自《中国人

群暴露参数手册》(成人卷)中推荐值<sup>[14]</sup>。评估结合美国环保总署评价方法和《化学物质环境健康风险评估技术指南》进行判定。评估参数见表 2。

**表 2 健康风险评估参数**  
**Table 2 Health risk assessment parameters**

人群	日摄入量 (IR, L/d)	暴露频率 (EF, d/a)	暴露周期(ED, a)		体重 (BW, kg)	平均接触时间(AT, d)	
			非致癌效应	致癌效应		非致癌效应	致癌效应
男性	2.475	365	74.12	70	66.1	27 053.8	25 550
女性	2.124	365	78.86	70	57.8	28 783.9	25 550

**1.4 统计分析** 采用 R 4.3.3 软件进行数据分析。低于方法最低检出限的结果,以最低检出浓度的 1/2 表示。各指标检测结果不符合正态分布,使用中位数(范围)进行统计描述。两组间浓度比较采用 Mann-Whitney *U* 检验,多组间比较采用 Kruskal-Wallis 秩和检验;率的比较采用  $\chi^2$  检验,检验水准  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

**2.1 供水单位基本情况** 本研究共调查供水单位 28 个。水源类型中市政供水 92.86% (13/14) 为地表水,农村供水单位 71.43% (10/14) 为地下水。进行常规处理(含混凝、沉淀、过滤、消毒)的有 64.29% (18/28),消毒方式主要为次氯酸钠和液氯。见表 3。

**表 3 辽宁省调查供水单位基本情况(个)**

**Table 3 Basic information of water supply units of Liaoning Province(n)**

组别		城市	农村	合计
水源类型	地表水	13	4	17
	地下水	1	10	11
水处理方式	常规处理	14	4	18
	仅消毒	-	4	4
	未处理	-	6	6
消毒方式	次氯酸钠	4	4	8
	液氯	9	-	9
	复合二氧化氯	1	2	3
	高纯二氧化氯	-	2	2

**2.2 饮用水中污染物暴露水平** 本次调查共采集检

测水样 112 份。检出率由高到低顺序为 PFOA (36.61%) > NDMA (25.89%) > PFOS (16.07%) > DBP (15.18%) > BPA (4.46%) > CPs (2.67%)。DEHA、DEP 和 V 未检出。除 CPs 外, DBP 达标率为 99.96%, 其它指标均为 100%。见表 4。

**2.3 不同水期、区域和水样类型污染物暴露水平** 按照水期、城乡区域、水样类型分层分析结果显示,丰水期 BPA 和 NDMA 浓度高于枯水期,出厂水 NDMA 浓度高于末梢水,以上差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。除 CPs 外,其它指标丰水期检出率均高于枯水期;NDMA 检出率差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。见表 5。

**表 4 辽宁省饮用水中污染物检测结果**

**Table 4 Detection results of pollutants in drinking water of Liaoning Province**

指标	样本数	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	检出率 (%)
BPA	112	ND ~ $7.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	4.46
NDMA	112	ND ~ $5.3 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-6}$	25.89
DEHA	112	ND	ND	0.00
DEP	112	ND	ND	0.00
DBP	112	ND ~ $3.9 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4}$	15.18
PFOA	112	ND ~ $1.4 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-6}$	36.61
PFOS	112	ND ~ $1.5 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-6}$	16.07
V	112	ND	ND	0.00
CPs	112	ND ~ $8.4 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	2.67

注:“ND”为未检出,下同。

**表 5 辽宁省饮用水中污染物时间和空间暴露水平**

**Table 5 Temporal and spatial exposure levels of pollutants in drinking water of Liaoning Province**

组别	样本数	BPA		NDMA		DBP	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
水期							
枯水期	56	ND	0.000	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND ~ $4.3 \times 10^{-5}$ )	16.070	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND ~ $3.9 \times 10^{-2}$ )	10.710
丰水期	56	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND ~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	8.930	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND ~ $5.3 \times 10^{-5}$ )	35.710	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND ~ $2.8 \times 10^{-2}$ )	19.640
统计量		1 428.000	3.350	1 244.500	4.650	1 443.500	1.110
<i>P</i>		0.023	0.067	0.010	0.031	0.248	0.292

(续表)

组别	样本数	BPA		NDMA		DBP	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
区域							
城区	56	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $6.0 \times 10^{-6}$ )	3.570	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $4.0 \times 10^{-5}$ )	30.360	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $3.9 \times 10^{-2}$ )	17.860
农村	56	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	5.360	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $5.3 \times 10^{-5}$ )	21.430	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $1.7 \times 10^{-2}$ )	12.500
统计量		1 538.500	0.000	1 715	2.980	1 659.000	0.000
<i>P</i>		0.637	1.000	0.270	0.084	0.399	1.000
水样类型							
出厂水	56	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	5.350	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $5.3 \times 10^{-5}$ )	33.930	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $3.9 \times 10^{-2}$ )	16.070
末梢水	56	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	3.570	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $4.3 \times 10^{-5}$ )	17.860	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $1.4 \times 10^{-3}$ )	14.290
统计量		1 594.500	0.000	1 840	0.740	1 613.000	0.280
<i>P</i>		0.672	1.000	0.040	0.388	0.678	0.598
组别	样本数	PFOA		PFOS		CPs	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
水期							
枯水期	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.4 \times 10^{-5}$ )	37.500	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.5 \times 10^{-5}$ )	14.290	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $8.4 \times 10^{-3}$ )	1.780
丰水期	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.0 \times 10^{-5}$ )	35.710	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.0 \times 10^{-5}$ )	17.860	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $4.6 \times 10^{-3}$ )	0.890
统计量		1 610.500	0.000	1 546.000	0.070	1 596.000	0.000
<i>P</i>		0.777	1.000	0.845	0.797	0.567	1.000
区域							
城区	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.4 \times 10^{-5}$ )	41.070	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.3 \times 10^{-5}$ )	17.860	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $3.0 \times 10^{-3}$ )	0.890
农村	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.3 \times 10^{-5}$ )	32.140	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.5 \times 10^{-5}$ )	14.290	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $8.4 \times 10^{-3}$ )	1.780
统计量		1 747.000	2.460	1 626.500	0.070	1 539.000	0.000
<i>P</i>		0.229	0.117	0.598	0.797	0.553	1.000
水样类型							
出厂水	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.4 \times 10^{-5}$ )	44.640	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.2 \times 10^{-5}$ )	17.860	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $3.0 \times 10^{-3}$ )	0.890
末梢水	56	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.3 \times 10^{-5}$ )	28.570	$1.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $1.5 \times 10^{-5}$ )	14.290	$1.0 \times 10^{-3}$ (ND~ $8.4 \times 10^{-3}$ )	1.780
统计量		1 758.500	0.620	1 604.000	0.070	1 539.000	0.000
<i>P</i>		0.200	0.433	0.747	0.797	0.553	1.000

**2.4 不同水源和水处理措施暴露水平** 在不同水源类型分析结果中,地表水水源饮用水中 NDMA 和 DBP 浓度均高于地下水,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。地表水水源饮用水中 DBP 和 PFOA 检出率高

于地下水,且差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。不同水处理方式结果中,各指标浓度和检出率分布差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。见表 6。

**表 6** 不同水源和水处理措施饮用水中污染物暴露水平

**Table 6** Exposure levels of pollutants in drinking water from different water sources and treatment measures

组别	样本数	BPA		NDMA		DBP	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
水源类型							
地表水	68	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	4.410	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $5.3 \times 10^{-5}$ )	32.350	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $3.9 \times 10^{-2}$ )	22.060
地下水	44	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	4.540	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $2.2 \times 10^{-5}$ )	15.910	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $9.6 \times 10^{-4}$ )	4.550
统计量		1 494.000	0.000	1 758.000	2.960	1 765.000	5.080
<i>P</i>		0.980	1.000	0.043	0.086	0.010	0.024
水处理方式							
常规处理	72	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $7.0 \times 10^{-6}$ )	4.170	$2.5 \times 10^{-6}$ (ND~ $5.3 \times 10^{-5}$ )	30.560	$2.0 \times 10^{-4}$ (ND~ $3.9 \times 10^{-2}$ )	16.670

(续表)

组别	样本数	BPA		NDMA		DBP	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
仅消毒	16	2.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 7.0 × 10 <sup>-6</sup> )	12.500	2.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 2.2 × 10 <sup>-5</sup> )	31.250	2.0 × 10 <sup>-4</sup> (ND ~ 9.6 × 10 <sup>-4</sup> )	6.250
未处理	24	ND	0.000	2.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.8 × 10 <sup>-5</sup> )	8.330	2.0 × 10 <sup>-4</sup> (ND ~ 1.7 × 10 <sup>-2</sup> )	16.670
统计量		3.525	3.560	4.911	4.910	1.198	1.160
<i>P</i>		0.172	0.169	0.086	0.086	0.549	0.561

  

组别	样本数	PFOA		PFOS		CPs	
		中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)	中位数(范围) (mg/L)	检出率 (%)
水源类型							
地表水	68	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.4 × 10 <sup>-5</sup> )	47.060	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.3 × 10 <sup>-5</sup> )	17.650	1.0 × 10 <sup>-3</sup> (ND ~ 8.4 × 10 <sup>-3</sup> )	2.670
地下水	44	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 6.2 × 10 <sup>-6</sup> )	20.450	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.5 × 10 <sup>-5</sup> )	13.640	ND	0.000
统计量		1 925.000	7.040	1 554.000	0.090	1 562.000	0.660
<i>P</i>		0.003	0.008	0.592	0.763	0.163	0.416
水处理方式							
常规处理	72	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.4 × 10 <sup>-5</sup> )	43.060	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.3 × 10 <sup>-5</sup> )	16.670	1.0 × 10 <sup>-3</sup> (ND ~ 8.4 × 10 <sup>-3</sup> )	2.670
仅消毒	16	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 6.2 × 10 <sup>-6</sup> )	25.000	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.5 × 10 <sup>-5</sup> )	18.750	ND	0.000
未处理	24	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 1.3 × 10 <sup>-5</sup> )	25.000	1.5 × 10 <sup>-6</sup> (ND ~ 4.6 × 10 <sup>-6</sup> )	12.500	ND	0.000
统计量		2.791	3.610	0.542	0.330	1.697	1.710
<i>P</i>		0.248	0.164	0.763	0.847	0.428	0.425

**2.5 健康风险评估** 检出指标致癌风险中,NDMA、PFOA 和 PFOS 的 CR 值均低于 1.0 × 10<sup>-6</sup>或在 1.0 × 10<sup>-6</sup> ~ 1.0 × 10<sup>-4</sup>,表明风险较低或具有一定致癌风险,在可接受范围内。非致癌风险中,BPA、DBP 和 PFOS 的危害商 HQ < 1,风险较低,PFOA 的 HQ > 1,有一定风险,宜引起关注。按性别分层分析,男性 HQ 和 CR 值均大于女性。见表 7。

表 7 辽宁省成人饮用水经口摄入健康风险评估

Table 7 Health risk assessment of oral intake of drinking water for adults in Liaoning Province

指标	HQ 值		CR 值	
	男性	女性	男性	女性
BPA	1.80 × 10 <sup>-6</sup>	1.80 × 10 <sup>-6</sup>	-	-
NDMA	-	-	4.77 × 10 <sup>-6</sup>	4.69 × 10 <sup>-6</sup>
DBP	7.49 × 10 <sup>-5</sup>	7.35 × 10 <sup>-5</sup>	-	-
PFOA	1.87	1.84	1.65 × 10 <sup>-6</sup>	1.62 × 10 <sup>-6</sup>
PFOS	5.62 × 10 <sup>-1</sup>	5.51 × 10 <sup>-1</sup>	2.22 × 10 <sup>-6</sup>	2.18 × 10 <sup>-6</sup>

### 3 讨论

本次调查共检测了辽宁省饮用水中 9 种污染物,其中包括 PFOA 和 PFOS 两种全氟化合物,结果显示均有检出,表明该地区饮用水存在全氟化合物的污染;且浓度均低于我国重点流域地区水平<sup>[15]</sup>,污染特征呈现出区域性差异。值得注意的是,PFOA 的污染程度显著高于 PFOS,这一趋势与苏州市<sup>[16]</sup>和武汉

市<sup>[17]</sup>的调查结果一致。这种差异与国家管控政策相关,持久性有机物 PFOA 类和 PFOS 类已被国家列入 2023 年版重点管控新污染物清单,文件提出禁止生产 PFOS 类,而 PFOA 类管控较之宽松,污染相对较重。虽然当前 PFOA 和 PFOS 检出浓度低于我国《生活饮用水卫生标准》限值,但由于全氟化合物的持久性和生物累积性<sup>[18]</sup>,仍需警惕长期低剂量暴露风险,尤其是 PFOA,建议加强对相关行业监管,并建立长期监测机制。

本研究在饮用水样品中检出 NDMA,污染程度低于我国 2010—2020 年城市和东北地区出厂水水平<sup>[19]</sup>。同时,其污染特征呈现出城区污染高于农村的差异。这种差异主要源于城乡供水单位消毒状况的不同。NDMA 主要来源于饮用水的消毒处理<sup>[20]</sup>,也有研究显示液氯消毒的 NDMA 浓度较高<sup>[19-20]</sup>。本次调查的城区供水单位均有消毒措施,且以液氯为主;而农村地区部分未进行消毒,并以次氯酸钠为主,这些原因均能导致城乡污染程度的不同。另外,本研究还发现出厂水浓度高于末梢水,与罗曼研究结果相契合<sup>[21]</sup>。NDMA 的生成与原水中消毒剂和反应条件有关<sup>[21]</sup>。大型水厂通常供水管网较长,在输送过程中,消毒剂含量会出现削减,生成 NDMA 的强度会随之减弱,进而末梢水中浓度相应降低。另外,在辽宁省饮用水中 DBP、BPA 以及 CPs 也均有检出,表明饮用水存在不同程度的污染状况。DBP 和 BPA 广泛应用

于塑料制品的生产<sup>[22-23]</sup>,加之塑料制品使用普遍,在自然环境中,这些污染物会随着雨水冲刷或地表径流的作用,从污染源进入水体<sup>[24]</sup>,会对水体产生一定影响。特别值得关注的是,部分水样中的 DBP 含量已经超过国家卫生标准限值,这一现象亟需引起相关部门的重视,并采取切实有效的措施加以管控。对于 CPs,尽管目前尚未被纳入我国饮用水卫生标准,但已列入 2023 年版重点管控新污染物清单,且在本省区域内的饮用水样本中也有检出。鉴于其潜在的健康危害,应当严格控制 CPs 的生产排放,加强管理,从而有效减少污染,保障公众健康。

在对水期分层分析时发现,丰水期 NDMA 和 BPA 的污染水平高于枯水期。其成因可能与两方面相关。首先,北方地区丰水期降雨量显著高于枯水期。大量降雨增加了地表径流,促进雨水渗透,污染物更易被携带进入水体,从而导致污染加剧。其次,由于丰水期水源受污染风险增加,为确保饮用水安全,供水单位往往采取加大消毒剂用量的措施,在这个过程中消毒副产物的生成会加强,包括 NDMA,从而进一步造成丰水期与枯水期污染的差异。综上所述,这种差异是自然因素导致污染物迁移以及消毒强度改变共同作用的结果。

此次研究还进一步从水源选择和水处理工艺两方面对影响因素进行探索,结果表明,以地表水为水源的饮用水中 NDMA、DBP 和 PFOA 污染水平高于以地下水为水源的饮用水,说明地表水水源具有更高的污染风险。地表水由于其开放性,更易受到污染源的影响,进而导致污染物浓度升高<sup>[25]</sup>。与之比较,地下水相对封闭,地表径流携带的污染物在渗透过程中也会有部分被土壤截留,从而在一定程度上降低进入地下水的污染物浓度。由此可见,保护水源、减少周边污染源排放,是保障饮用水安全有效且可行的措施。

通过健康风险评估显示,致癌风险中,NDMA、PFOA 和 PFOS 具有一定风险,均在可接受范围内。非致癌风险中,BPA、DBP 和 PFOS 风险较低;PFOA 的 HQ 值大于 1,具有一定风险,应引起关注。2020 年,我国生态环境部、工业和信息化部、卫生健康委联合印发《优先控制化学品名录(第二批)》,PFOA 被列入其中,并提出了相应的环境风险管控措施,降低对人群健康的风险。在对不同性别的健康风险分析中发现,由于体重、日摄入量、期望寿命等方面的生理差异,男性非致癌和致癌风险均高于女性,应为重点关注人群。本研究通过健康风险评估,揭示了一定的风险,但也存在局限性,一是仅评价了通过饮用水摄入途径的风险,没有纳入经皮肤、食物等其它途径摄入,在一定程度上低估了健康风险;二是评价没有体现生

活方式及习惯等个体差异,结果会有一定偏差;三是仅在枯水期和丰水期两个阶段采集样品,没有持续且长期进行监测,并形成时间序列,对全年风险评估不够精准,有高估或低估风险的可能性。

**利益冲突声明** 本研究不存在任何利益冲突

## 参考文献

- [1] 郑雨虹,李登昆,陈春静,等.江苏省南京市饮用水中 N-亚硝基二甲胺健康风险评估[J].环境与职业医学,2022,39(8):890-894.  
Zheng YH, Li DK, Chen CJ, et al. Health risk assessment of N-nitrosodimethylamine in drinking water in Nanjing, Jiangsu Province [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(8): 890-894. (In Chinese)
- [2] 杨永亮,路国慧,杨伟贤,等.沈阳地区水环境和生物样品中全氟化合物的污染分布特征[J].环境科学学报,2010,30(10):2097-2107.  
Yang YL, Lu GH, Yang WX, et al. Levels and distribution of perfluorinated compounds in water and biological samples from the Shenyang area, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2097-2107. (In Chinese)
- [3] 陈丽,周颖,吴毅凌,等.以黄浦江为水源的管网末梢水中微量有机物污染现状[J].卫生研究,2008,37(2):137-143.  
Chen L, Zhou Y, Wu YL, et al. Status of trace organic pollution in the network water came from Huangpu River [J]. Journal of Hygiene Research, 2008, 37(2): 137-143. (In Chinese)
- [4] Zhang HF, Zhang YP, Li JB, et al. Occurrence and exposure assessment of bisphenol analogues in source water and drinking water in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 607-613.
- [5] Wei GL, Liang XL, Li DQ, et al. Occurrence, fate and ecological risk of chlorinated paraffins in Asia: A review [J]. Environment International, 2016, 92: 373-387.
- [6] Geng M, Qi H, Liu X, 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 International, 2016, 23(9): 8462-8469.
- [7] 李滔滔.全面推进环境健康风险评估制度建设[J].环境与健康杂志,2019,36(12):1035-1036.  
Li TT. Comprehensively promote the construction of environmental health risk assessment system [J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(12): 1035-1036. (In Chinese)
- [8] 王冰,张永,盛欣.北京市市政供水中三氯甲烷和四氯化碳含量分析及健康风险评估[J].环境卫生学杂志,2022,12(1):51-55.  
Wang B, Zhang Y, Sheng X. Concentrations and health risk assessment of trichloromethane and Carbon tetrachloride in municipal water supply of Beijing [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(1): 51-55. (In Chinese)
- [9] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.GB/T 5750-2023 生活饮用水标准检验方法[S].北京:中国标准出版社,2023.  
Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 5750-2023 Standard for drinking water [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023. (In Chinese)

- index on cancer occurrence in a hypertensive population: a retrospective cohort study[J]. Fudan University Journal of Medical Sciences, 2024, 51(1): 12-18. (In Chinese)
- [16] Ji ZC, De miguel - Díez J, Castro - Riera CR, et al. Differences in the outcome of patients with COPD according to body mass index [J]. Journal of Clinical Medicine, 2020, 9(3): 710.
- [17] Li ZH, Fan CH, Huang J, et al. Non - linear relationship between the body roundness index and metabolic syndrome: data from National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 1999 - 2018 [J]. British Journal of Nutrition, 2024, 131(11): 1852 - 1859.
- [18] Xu JJ, Zhang LQ, Wu Q, et al. Body roundness index is a superior indicator to associate with the cardio - metabolic risk: evidence from a cross - sectional study with 17,000 Eastern - China adults[J]. BMC Cardiovascular Disorders, 2021, 21(1): 97.
- [19] Liu YS, Liu XC, Guan HX, et al. Body roundness index is a superior obesity index in predicting diabetes risk among hypertensive patients: a prospective cohort study in China [J]. Frontiers in Cardiovascular Medicine, 2021, 8: 736073.
- [20] Emamat H, Jamshidi A, Farhadi A, et al. The association between the visceral to subcutaneous abdominal fat ratio and the risk of cardiovascular diseases: a systematic review [J]. BMC Public Health, 2024, 24(1): 1827.
- [21] Sakers A, De siqueira MK, Seale P, et al. Adipose - tissue plasticity in health and disease[J]. Cell, 2022, 185(3): 419 - 446.
- [22] Schweitzer K. Could the body roundness index one day replace the BMI? [J]. JAMA, 2024, 332(16): 1317 - 1318.
- 收稿日期:2025-01-08
- 
- (上接第 3323 页)
- [10] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB 5749 - 2022 生活饮用水卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.  
Ministry of Health of the PR China. GB 5749 - 2022 Standards for drinking water quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (In Chinese)
- [11] 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.  
National Health Commission of the People's Republic of China. WS/T 777 - 2021 Technical guide for environmental health risk assessment of chemical exposure[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (In Chinese)
- [12] IARC. Agents classified by the IARC Monographs, Volumes 1 - 133[EB/OL]. [2025 - 07 - 03]. <http://monographs.iarc.fr/agents-classifiedby-the-iarc>.
- [13] USEPA. Integrated risk information system[EB/OL]. [2025 - 07 - 03]. <http://www.epa.gov/iris>.
- [14] 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.  
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population - Adults [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013. (In Chinese)
- [15] 温馨. 我国重点流域和重点地区饮用水中全氟化合物污染水平调查研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2020.  
Wen X. Investigation on the pollution level of perfluorinated compounds in drinking water in key river basins and regions in China [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2020. (In Chinese)
- [16] 施静,夏瑜,许红睿,等. 苏州市饮用水中全氟辛酸与全氟辛烷磺酸浓度分析及健康风险评估[J]. 食品安全导刊,2024(20): 39 - 43.  
Shi J, Xia Y, Xu HR, et al. Concentration analysis and health risk assessment of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in drinking water in Suzhou [J]. China Food Safety Magazine, 2024(20): 39 - 43. (In Chinese)
- [17] 刘俊玲,肖永华,胡迅,等. 武汉市饮用水中全氟辛烷磺酸和全氟辛酸健康风险评估[J]. 卫生研究,2015,44(1):135 - 136.  
Liu JL, Xiao YH, Hu X, et al. Health risk assessment of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid in drinking water in Wuhan City [J]. Journal of Hygiene Research, 2015, 44(1): 135 - 136. (In Chinese)
- [18] 周秀娟,盛南,王建设,等. 全氟和多氟化合物替代品的研究进展[J]. 生态毒理学报,2017,12(3):3 - 12.  
Zhou XJ, Sheng N, Wang JS, et al. The current research status of several kinds of fluorinated alternatives [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(3): 3 - 12. (In Chinese)
- [19] 蔡宏铨,裴赛峰,张响,等. 我国城市饮用水中 N - 亚硝基二甲胺分布水平与健康风险评估[J]. 环境与职业医学,2021,38(11):1231 - 1236.  
Cai HQ, Pei SF, Zhang Y, et al. Distribution and health risk assessment of N - nitrosodimethylamine in urban drinking water in China [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(11): 1231 - 1236. (In Chinese)
- [20] 罗曼. 长江流域部分地区饮用水中二甲基亚硝胺现状及其健康风险评估[D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2020.  
Luo M. Occurrence and health risk assessment of dimethylnitrosamine in drinking water in parts of the Yangtze River Basin, China [D]. Beijing: Chinese center for disease control and prevention, 2020. (In Chinese)
- [21] World Health Organization. 2008. N - nitrosodimethylamine in drinking - water; background document for development of WHO Guidelines for Drinking - water Quality [R]. Geneva: WHO, 2008.
- [22] Wang L, Wang Z, Liu JN, et al. Deriving the freshwater quality criteria of BPA, BPF and BPAF for protecting aquatic Life [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 713 - 721.
- [23] 杨文韬,匡武,郑西强. 邻苯二甲酸酯类化合物在环境中的污染现状及生态风险研究进展[J]. 环境保护与循环经济,2020,40(2):34 - 40, 60.  
Yang WT, Kuang W, Zheng XQ. Research progress on pollution status and ecological risks of phthalates in the environment [J]. Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology, 2020, 40(2): 34 - 40, 60. (In Chinese)
- [24] Konno Y, Suzuki H, Kudo H, et al. Synthesis and properties of Fluorine containing poly(ether)s with pendant hydroxyl groups by the polyaddition of bis(oxetane)s and bisphenol AF [J]. Polymer Journal, 2004, 36(2): 114 - 122.
- [25] 王若男,史懿,胥倩,等. 四川省地市级饮用水源地全氟化合物污染状况调查研究[J]. 环境化学,2025,44(10):1 - 11.  
Wang RN, Shi Z, Xu Q, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances in drinking water sources at prefecture and municipal levels in Sichuan Province [J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(10): 1 - 11. (In Chinese)
- 收稿日期:2025-04-14