·环境与职业卫生·

烟台市农村饮用水化学污染物现状及风险评估

陈富讯，王松松，张晓瑜，李芸，丛静，王欣，杨建
烟台市疾病预防控制中心，山东 烟台 264003

摘要：目的　调查烟台市农村饮用水中化学污染物现状，并评估其对人体健康的潜在风险，为饮用水安全管理提供科学依据。**方法**　采用美国国家环境保护署经典“四步法”健康风险评估模型，参考《中国人群暴露参数手册》及《化学物质环境健康风险评估技术指南》（WS/T 777—2021），对烟台市 11 个区市 191 份农村水样中 12 种化学污染物进行经口摄入途径的致癌和非致癌风险评估。**结果**　监测水样总体达标率为 95.81%(183/191)。化学污染物中，砷、铬（六价）、镉和三氯甲烷的致癌风险平均值分别为 1.20×10^{-5}、1.57×10^{-5}、1.63×10^{-6}、2.79×10^{-6}，介于 $10^{-4}\sim10^{-6}$ 之间，存在一定致癌风险；非致癌风险最大值为 0.705（硝酸盐），低于 1，非致癌风险均为可接受。砷和三氯甲烷在以地表水为主要水源的规模化供水工程致癌风险高于以地下水为主要水源的小型集中式供水工程（$P<0.01$），砷、汞、氟化物、三氯甲烷、硝酸盐和铝在以地表水为主要水源的规模化供水工程非致癌风险高于以地下水为主要水源的小型集中式供水工程（$P<0.01$）。**结论**　烟台市农村饮用水化学污染物健康风险总体处于可接受水平，但砷、铬(六价)和三氯甲烷的致癌风险需优先关注。

关键词：饮用水；化学污染物；健康风险评估；农村
中图分类号：R123.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8507（2026）17-3117-07
DOI：10.20043/j.cnki.MPM.202601184

Current status and health risk assessment of chemical pollutants in rural drinking water in Yantai City

CHEN Fu-xun, WANG Song-song, ZHANG Xiao-yu, LI Yun, CONG Jing, WANG Xin, YANG Jian
Yantai Center for Disease Control and Prevention, Yantai, Shandong 264003, China

Abstract: Objective To investigate the current status of chemical pollutants in rural drinking water in Yantai City, assess their potential risks to human health, and provide a scientific basis for drinking water safety management. **Methods** Using the classic “Four-Step Method” health risk assessment model of the United States Environmental Protection Agency (USEPA), with reference to the Handbook of Exposure Parameters for Chinese Population and the Technical Guidelines for Environmental Health Risk Assessment of Chemical Substances (WS/T 777—2021), a carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment via oral ingestion was conducted for 12 chemical pollutants in 191 rural water samples collected from 11 districts/cities of Yantai City. **Results** The overall compliance rate of the monitored water samples was 95.81% (183/191). Among the chemical pollutants, the average carcinogenic risks (*CR*) of arsenic, hexavalent chromium, cadmium, and chloroform were 1.20×10^{-5}, 1.57×10^{-5}, 1.63×10^{-6}, and 2.79×10^{-6}, respectively, ranging between 10^{-4} and 10^{-6}, indicating a certain degree of carcinogenic risk. The maximum non-carcinogenic risk (HQ) was 0.705 (nitrate), which was below 1, suggesting that all non-carcinogenic risks were acceptable. The carcinogenic risks of arsenic and chloroform in large-scale water supply projects with surface water as the main water source were significantly higher than those in small centralized water supply projects with groundwater as the main water source ($P<0.01$). Similarly, the non-carcinogenic risks of arsenic, mercury, fluoride, chloroform, nitrate, and aluminum in large-scale surface water supply projects were significantly higher than those in small groundwater-based centralized water supply projects ($P<0.01$). **Conclusion** The health risks of chemical pollutants in rural drinking water in Yantai City are generally at an acceptable level, but priority attention should be paid to the carcinogenic risks of arsenic, hexavalent chromium, and chloroform.

Keywords: Drinking water; Chemical pollutants; Health risk assessment; Rural areas

饮用水安全是保障公众健康与生命安全的重要基础。随着工业化进程加速，农业水源污染和工业废水排放问题日益突出，饮用水源面临砷、镉、铬（六价）等化学污染物的持续性威胁[1-3]。这些污染物可通过饮水途径长期低剂量暴露于人体，不仅可导致皮肤、

基金项目：2025 年度山东省疾病预防控制科研业务融合创新项目（第一批）
作者简介：陈富讯（1989—），男，硕士，主管医师，研究方向：环境卫生监测与评价
通信作者：杨建，E-mail:1096542860@qq.com

呼吸、消化等多系统慢性损害，部分还具有明确的致癌性，成为全球公共卫生领域持续关注的重点问题[4-6]。

传统的水质评价多依据《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2022）进行达标率判定，该方法虽能反映即时水质状况，却难以全面评估污染物长期累积所带来的慢性健康风险，可能导致对实际健康威胁的低估[7]。健康风险评估通过系统量化污染物暴露与潜在健康效应之间的关系，为识别关键风险因子和制定精准防控策略提供了科学工具。美国国家环境保护署（U.S Environmental Protection Agency,USEPA）提出的“四步法”健康风险评估模型已在国内外多地的饮用水评价中成功应用[8-10]，相关研究普遍指出铬（六价）、砷、三氯甲烷等是饮用水中需优先管控的致癌风险物质[9-12]。

然而，目前针对烟台市农村饮用水系统，尚未开展基于健康风险模型的系统性化学污染物综合评估。因此，本研究依托烟台市水质监测数据，探索开展农村饮用水中 12 种化学污染物的健康风险评估，旨在探明本地区主要风险污染物及其分布特征，识别高风险水源类型与供水模式，以期为当地制定针对性的饮用水安全干预措施、优化供水工艺与加强水源保护提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　水样的来源　本研究依托 2025 年烟台市农村饮用水水质监测项目。以烟台市 11 个涉农区市（福山区、牟平区、蓬莱区、海阳市、莱阳市、栖霞市、龙口市、招远市、莱州市、黄渤海新区和长岛综试区）作为一级分层单元，覆盖全部 87 个涉农乡镇。本研究采用分层随机抽样结合典型代表性筛选的抽样方法，具体流程为：以乡镇为基础单元完成全域随机初选，每个乡镇设置 2 个监测点。为保证样本代表性与覆盖均衡性，在初选点位基础上优化筛选，重点选取服务人口多、供水稳定性高的集中式供水工程，同步覆盖地表水、地下水两种水源类型及规模化、小型集中式两种供水规模，并对大型重点供水工程增补采样。最终采集水样 191 份，按水源类型分：地表水 100 份、地下水 91 份；按供水规模分：规模化供水工程 76 份、小型集中式供水工程 115 份。水样类型均为末梢水。

1.2　水样的检测指标与评价方法　结合前期烟台市农村饮用水《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2022）常规指标各指标的检出情况，以及文献报道的高风险污染物[9-11]，本研究选取了 12 项在我市农村饮用水中可能存在风险的检测指标，包括砷、镉、铬(六价)、铅、汞、氰化物、氟化物、硝酸盐、三氯甲烷、铝、铁和锰。实验室采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对重金属进行检测，当检出数据低于检出限时，以 1/2 检出限参与统计计算，水样的评价按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)执行。

本研究检测全程严格执行内部质控规范，按《生活饮用水标准检验方法第 2 部分：水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2023)要求设置空白样、平行样与现场加标样；重金属加标回收率控制在 85.2%～112.6%，平行样相对偏差小于 10%，同时采用国家标准物质进行准确度校核，全部检测项目均通过资质认定。

1.3　健康风险评估　采用 US EPA 经典“四步法”健康风险评估模型[8]，参考《中国人群暴露参数手册》[13]及《化学物质环境健康风险评估技术指南》（WS/T 777—2021）[14]，对 191 份农村水样中 12 种化学污染物计算终生日均暴露剂量（lifetime average daily dose，LADD）及日均暴露剂量（average daily dose，ADD），分别进行致癌与非致癌风险评估。

1.3.1　致癌风险评估

LADD 及致癌风险计算公式：

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

$$CR=LADD\times SF$$

式中：CR 为致癌风险；C 为化学物质浓度(mg/L)；IR 为成人经口摄入率，取 1.956 L/d；EF 为暴露频率，取 365 d/a；ED 为暴露周期，取 30 年；BW 为成人体重，取 66.2 kg；AT 为平均时间，致癌效应取 70 年(25 550 d)；参数取值依据：IR、BW 参考《中国人群暴露参数手册(成人卷)》；EF、ED、AT 参考《化学物质环境健康风险评估技术指南》（WS/T 777—2021），其中 AT 致癌效应取 70 年对应我国人均期望寿命；SF 为致癌斜率因子[(kg·d)/mg]。见表 1。

表 1　12 种化学污染物健康风险评估相关参数

Table 1　Related parameters for health risk assessment of 12 chemical pollutants

监测指标	风险类型	SF[(kg·d)/mg]	RfD[mg/(kg·d)]
砷	致癌	1.500	0.000 3
镉	致癌	0.500	0.001
铬(六价)	致癌	0.500	0.005
铅	致癌	0.008 5	0.001 4
汞	非致癌	—	0.000 63
氰化物	非致癌	—	0.000 37
氟化物	非致癌	—	0.04
三氯甲烷	致癌	0.031	0.010
硝酸盐	非致癌	—	1.6
铝	非致癌	—	1.0
铁	非致癌	—	0.3
锰	非致癌	—	0.14

注：SF 为致癌斜率因子；RfD 为非致癌参考剂量；“—”表示无相关参数。

1.3.2　非致癌风险评估

ADD 及危害商计算公式：

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

$HQ=ADD/RfD$

式中：HQ 为危害商；AT 取 30 年(10950 d)，参考《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777—2021)，其中 AT 非致癌效应取 30 年与暴露周期一致；RfD 为参考剂量[mg/(kg·d)]。取值见表 1。

1.3.3　风险判定标准　致癌风险判定：CR＜10^{-6} 为风险较低，10^{-6}～10^{-4} 为有一定风险，＞10^{-4} 为风险较高。非致癌风险判定：HQ＜1 为可接受，HQ≥1 为风险较高。

1.4　统计分析　本研究采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析。污染物浓度以中位数(M)及四分位数(P_{25}，P_{75})进行描述；不同水源类型、供水规模间风险差异采用 Mann-Whitney U 检验，检验水准 α=0.05。

2　结　果

2.1　水质监测结果　191 份水样中，除氰化物外，其余砷、镉、铬(六价)等 11 项化学指标均有检出，检出率为 1.05%～97.91%。硝酸盐检出率最高，为 97.91%，其次三氯甲烷为 68.57%、氟化物为 56.02%。水样总体达标率为 95.81%(183/191)。不达标指标主要为硝酸盐、铬（六价）和汞，其达标率分别为 96.34%、99.48%和 99.48%。见表 2。

表 2　烟台市农村饮用水化学污染物监测结果(mg/L)

Table 2　Monitoring results of chemical pollutants in rural drinking water in Yantai City (mg/L)

监测指标	样本量	检出限(mg/L)	极小值	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值	检出率(%)	达标率(%)
砷	191	0.001	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.004	11.52	100.00
镉	191	0.000 5	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.001	1.05	100.00
铬(六价)	191	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002	0.057	5.76	99.48
铅	191	0.005	0.002 5	0.002 5	0.002 5	0.002 5	0.007	1.57	100.00
汞	191	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.003	13.09	99.48
氰化物	191	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.00	100.00
氟化物	191	0.1	0.05	0.05	0.17	0.46	0.77	56.02	100.00
硝酸盐(以 N 计)	191	0.2	0.10	1.24	3.60	5.31	38.2	97.91	96.34
三氯甲烷	105[a]	0.000 2	0.000 1	0.000 1	0.003 5	0.012 3	0.027 1	68.57	100.00
铝	191	0.08	0.04	0.04	0.04	0.055	0.17	26.18	100.00
铁	191	0.05	0.025	0.025	0.025	0.025	0.27	16.75	100.00
锰	191	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	9.42	100.00

注：[a] 三氯甲烷检测样本量低于其余指标，系依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)要求，仅对氯化消毒供水水样进行三氯甲烷检测所致。

2.2　致癌风险评估　五种致癌化合物的 CR 平均值排序为：铬(六价)(1.57×10^{-5})＞砷(1.20×10^{-5})＞三氯甲烷(2.79×10^{-6})＞镉(1.63×10^{-6})＞铅(2.80×10^{-7})，均低于 USEPA 推荐的最大可接受风险(10^{-4})，其中砷、铬（六价）、镉和三氯甲烷的 CR 平均值处于 10^{-6}～10^{-5} 量级，仅个别点位铬(六价)接近 10^{-4}，存在一定致癌风险；铅 CR 值低于 10^{-6}，致癌风险较低。见表 3。

表 3　烟台市农村饮用水部分污染物致癌风险(CR 值，$\times10^{-6}$)

Table 3　Carcinogenic risk (CR values, $\times10^{-6}$) of partial pollutants in rural drinking water of Yantai City

监测指标	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值	平均值
砷	9.50	9.50	9.50	76.00	12.00
镉	1.58	1.58	1.58	6.33	1.63
铬(六价)	12.70	12.70	12.70	361.00	15.70
铅	0.27	0.26	0.27	0.75	0.28
三氯甲烷	0.04	1.37	4.81	10.60	2.79

2.3　非致癌风险评估　前五位化合物 HQ 平均值排序为：氟化物(0.188)＞氰化物(0.080)＞硝酸盐(0.077)＞砷(0.062)＞铅(0.054)。最大 HQ 值分别为 0.705(硝酸盐)和 0.569(氟化物)，均低于 1，非致癌风险均为可接受。见表 4。

表 4　烟台市农村饮用水部分污染物非致癌风险(HQ 值)

Table 4　Non-carcinogenic risk (HQ values) of partial pollutants in rural drinking water of Yantai City

监测指标	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值	平均值
砷	0.049	0.049	0.049	0.394	0.062
镉	0.007	0.007	0.007	0.030	0.008
铬(六价)	0.012	0.012	0.012	0.337	0.015
铅	0.053	0.053	0.053	0.148	0.054
汞	0.002	0.002	0.002	0.141	0.004
氰化物	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
氟化物	0.037	0.126	0.340	0.569	0.188
硝酸盐(以 N 计)	0.023	0.066	0.098	0.705	0.077
三氯甲烷	0.000 3	0.010	0.036	0.080	0.021
铝	0.001	0.001	0.001	0.005	0.002
铁	0.002	0.002	0.002	0.027	0.004
锰	0.002	0.002	0.002	0.017	0.002

2.4　分层分析　五种致癌化学物在不同水源类型间,砷、铬(六价)和三氯甲烷的致癌风险差异具有统计学意义($P<0.01$),其中砷和三氯甲烷地表水的致癌风险高于地下水,铬(六价)地下水致癌风险高于地表水。在不同供水方式间,砷和三氯甲烷的致癌风险差异具有统计学意义($P<0.01$),其中砷和三氯甲烷规模化供水的致癌风险高于小型集中式供水。见表 5。

表 5　烟台市农村饮用水监测指标致癌风险的分层分析结果(Mann-Whitney U 检验)

Table 5　Results of stratified analysis on carcinogenic risk of rural drinking water monitoring indicators in Yantai (Mann-Whitney U test)

监测指标	分层类型(样本量)		致癌风险秩均值	U 值	Z 值	P 值
砷	水源类型	地表水(100)	103.96	3 754	-3.765	<0.001
		地下水(91)	87.25			
	供水方式	小型集中式供水(115)	87.57	3 400	-4.679	<0.001
		规模化供水(76)	108.76			
镉	水源类型	地表水(100)	96.91	4 459	-1.353	0.716
		地下水(91)	95.00			
	供水方式	小型集中式供水(115)	95.00	4 255	-1.744	0.081
		规模化供水(76)	97.51			
铬(六价)	水源类型	地表水(100)	91.51	4 100	-2.918	0.004
		地下水(91)	100.94			
	供水方式	小型集中式供水(115)	98.76	4 052	-2.103	0.035
		规模化供水(76)	91.82			
铅	水源类型	地表水(100)	97.37	4 413	-1.661	0.097
		地下水(91)	94.50			
	供水方式	小型集中式供水(115)	94.50	4 197	-2.142	0.032
		规模化供水(76)	98.27			
三氯甲烷	水源类型	地表水(80)	61.54	317	-2.223	<0.001
		地下水(25)	25.68			
	供水方式	小型集中式供水(48)	35.27	517	-5.564	<0.001
		规模化供水(57)	67.93			

注:小型集中式供水是指设计日供水量在 1 000 m^3 以下或供水人口在 1 万人以下的集中式供水。

12 种化学物质在不同水源类型间，砷、铬（六价）、汞、氟化物、三氯甲烷、硝酸盐和铝的非致癌风险差异具有统计学意义($P<0.01$),其中砷、汞、氟化物、三氯甲烷、硝酸盐和铝地表水的非致癌风险高于地下水,铬(六价)地下水非致癌风险高于地表水。在不同供水方式间,砷、汞、氟化物、三氯甲烷、硝酸盐和铝的非致癌风险差异具有统计学意义($P<0.01$),均为规模化供水的非致癌风险高于小型集中式供水。见表6。

表 6　烟台市农村饮用水监测指标非致癌风险的分层分析结果（Mann–Whitney *U* 检验）

Table 6　Results of stratified analysis on non–carcinogenic risks of drinking water monitoring indicators in rural areas of Yantai City (Mann–Whitney *U* test)

监测指标		分层类型（样本量）	非致癌风险秩均值	*U* 值	*Z* 值	*P* 值
砷	水源类型	地表水（100）	103.96	3 754	–3.765	<0.001
		地下水（91）	87.25			
	供水方式	小型集中式供水（115）	87.57	3 400	–4.679	<0.001
		规模化供水（76）	108.76			
镉	水源类型	地表水（100）	96.91	4 459	–1.353	0.176
		地下水（91）	95.00			
	供水方式	小型集中式供水（115）	95.00	4 255	–1.744	0.081
		规模化供水（76）	97.51			
铬（六价）	水源类型	地表水（100）	91.51	4 100	–2.918	0.004
		地下水（91）	100.94			
	供水方式	小型集中式供水（115）	98.76	4 052	–2.103	0.035
		规模化供水（76）	91.82			
铅	水源类型	地表水（100）	97.37	4 413	–1.661	0.097
		地下水（91）	94.50			
	供水方式	小型集中式供水（115）	94.50	4 197	–2.142	0.032
		规模化供水（76）	98.27			
汞	水源类型	地表水（100）	103.78	3 772	–3.477	0.001
		地下水（91）	87.46			
	供水方式	小型集中式供水（115）	90.97	3 792	–2.638	0.008
		规模化供水（76）	103.61			
氰化物	水源类型	地表水（100）	96.00	4 550	0.000	1
		地下水（91）	96.00			
	供水方式	小型集中式供水（115）	96.00	4 370	0.000	1
		规模化供水（76）	96.00			
氟化物	水源类型	地表水（100）	126.24	1 526	–8.284	<0.001
		地下水（91）	62.77			
	供水方式	小型集中式供水（115）	70.27	1 410	–8.274	<0.001
		规模化供水（76）	134.94			
三氯甲烷	水源类型	地表水（80）	61.54	317	–5.223	<0.001
		地下水（25）	25.68			
	供水方式	小型集中式供水（48）	35.27	517	–5.564	<0.001
		规模化供水（57）	67.93			
硝酸盐（以 N 计）	水源类型	地表水（100）	107.42	3 408	–2.993	0.003
		地下水（91）	83.45			
	供水方式	小型集中式供水（115）	83.64	2 948	–3.802	<0.001
		规模化供水（76）	114.70			
铝	水源类型	地表水（100）	117.97	2 353	–7.446	<0.001
		地下水（91）	71.86			
	供水方式	小型集中式供水（115）	74.87	1 940	–8.405	<0.001
		规模化供水（76）	127.97			
铁	水源类型	地表水（100）	97.38	4 412	–0.597	0.550
		地下水（91）	94.48			
	供水方式	小型集中式供水（115）	98.06	4 133	–1.046	0.295
		规模化供水（76）	92.88			
锰	水源类型	地表水（100）	98.51	4 299	–1.564	0.118
		地下水（91）	93.24			
	供水方式	小型集中式供水（115）	93.38	4 068	–1.917	0.055
		规模化供水（76）	99.97			

3　讨　论

本研究首次系统评估烟台市农村饮用水化学污染物的健康风险，总体风险处于可接受水平。砷、铬(六价)与三氯甲烷存在一定致癌风险，该结论与肇庆市、青岛市及深圳市等的研究结果一致[9-11]。铬(六价)最大 CR 达 3.61×10^{-4}，提示局部点位存在“热点”隐患，主要源于冶金工业废水排放及含铬生活废物污染[15-16]，海水淡化水样中浓度高，推测与设备腐蚀相关[17]。砷的健康风险主要关联地层元素本底值及农业污染[18]，部分监测点砷浓度超标，提示需强化水源保护措施。而三氯甲烷的高 CR 推测与规模化水厂普遍采用的“预氯化 + 中途加氯”工艺密切相关，原水有机物偏高时副产物生成量显著增加。但需指出，该推论基于文献和工艺常识，本研究未开展出厂水与末梢水配对检测及处理前中后各阶段浓度变化的实测验证，属间接推论，尚需后续研究验证。非致癌风险方面，氟化物与硝酸盐的 HQ 峰值分别达到 0.569 与 0.705，占可接受风险容量的 50% ~ 70%，与青岛市平度市情况类似[19]。硝酸盐的非致癌风险在部分农村自建供水设施中较高，这与农业施肥及养殖污染密切相关[20]。

分层分析结果显示，风险是“水源属性 – 工艺选择 – 规模效应”三重耦合的结果。地表水规模化供水工程风险显著高于地下水小型集中式工程（$P<0.01$）。三氯甲烷差异最具代表性：地表水受降雨径流、上游排污及库区藻类等外源输入影响，致使水源中有机前体物浓度高[21]，叠加规模化水厂为保证长距离管网末梢余氯，普遍采用“预氯化 + 中途补氯”多段式消毒，导致每一级加氯点都成为副产物生成的“反应器”，三氯甲烷生成势被逐级放大。相反，小型集中式工程多抽取浅层地下水，有机前体物本底低，且多为“一次加氯”或仅紫外线消毒，副产物风险自然下降。六价铬则呈现反向梯度：地表水在入库前经历泥沙吸附、有机质还原及 pH 缓冲，部分六价铬被转化为三价铬沉淀于底泥，而地下水处于氧化环境，六价铬稳定性高、迁移性强，导致其在地下水路径中浓度反而升高[22]。由此可见，同一污染物在不同“水源 – 工艺”链条上呈现截然相反的风险放大或削减效应。

本研究局限性：仅评估了经口摄入途径，基于成人暴露参数进行计算，未对儿童、孕妇等敏感人群进行分层分析，可能低估敏感人群的风险。未进行模型优化，下一步拟构建“水源水 – 出厂水 – 末梢水”全链条监测体系，采用多途径、多人群的暴露模型，引入不确定性分析、贝叶斯方法和机器学习预测模型等提高风险评估精度。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] 吴正发. 基于扎根理论的农村饮水安全管护影响因素研究 ——以湖南省 T 县为例[D]. 桂林：桂林理工大学，2025.
Wu ZF. Research on influencing factors of rural drinking water safety management and maintenance based on grounded theory: A case study of T County, Hunan Province [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2025.(In Chinese)

[2] 周依，程博文，滕嵩，等. 农业面源污染对水环境质量的影响及防控对策研究[J]. 江西农业，2025,(18)：52–54.
Zhou Y, Cheng BW, Teng S, et al. Impact of agricultural non–point source pollution on water environment quality and prevention and control countermeasures[J]. Jiangxi Agriculture, 2025, (18): 52–54.(In Chinese)

[3] 王璐，昌盛，涂响，等. 黄河流域地下饮用水源地中重金属时空变化与概率健康风险[J]. 环境科学，2026，47(2)：1092–1104.
Wang L, Chang S, Tu X, et al. Spatial and temporal variations of heavy metals and probabilistic health risks in groundwater drinking water sources in the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2026, 47(2): 1092–1104.(In Chinese)

[4] 刘艳，方鑫，徐肖倩，等. 2018 年呼和浩特市饮用水中重金属污染物的健康风险评价 [J]. 现代预防医学，2020，47(11)：2065–2069.
Liu Y, Fang X, Xu XQ, et al. Health risk assessment of heavy metal pollutants in drinking water in Hohhot, 2018 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(11): 2065–2069.(In Chinese)

[5] 黄蕾，叶子雯，李湉湉. 环境健康风险感知研究进展[J]. 山东大学学报(医学版)，2021，59(12)：6–12.
Huang L, Ye ZW, Li TT. Research progress on environmental health risk perception[J]. Journal of Shandong University(Health Science), 2021, 59(12): 6–12.(In Chinese)

[6] Asefa EM, Damtew YT, Mengistu DA, et al. Heavy metals in Ethiopian drinking water and public health risks: Insights from nationwide and regional analysis [J]. Science of the Total Environment, 2024, 947: 174527.

[7] 胡苗苗，夏云婷，王丽，等. 2017–2022 年陕西省某市农村生活饮用水中 5 种金属及类金属健康风险 [J]. 环境卫生学杂志，2024，14(7)：597–602.
Hu MM, Xia YT, Wang L, et al. Health risks of five metals and metalloids in drinking water in rural areas of a city in Shaanxi Province, China,2017–2022 [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2024, 14(7): 597–602.(In Chinese)

[8] Shaffer RM, Lee AL, Nachman R, et al. A perspective from US environmental protection agency (EPA)scientists: how Your epidemiologic analyses can inform the human health risk assessment process [J]. Environmental Health Perspectives, 2025, 133 (3/4): 45001.

[9] 廖雅芬，叶坚，杨业洲. 肇庆市城市饮用水化学物质健康风险评估[J]. 预防医学，2021，33(9)：951–954.
Liao YF, Ye J, Yang YZ. Health risk assessment of chemical substances in urban drinking water of Zhaoqing City [J]. Journal of Preventive Medicine, 2021, 33(9): 951–954.(In Chinese)

[10] 潘璐，王炳玲，王寅，等. 2014 ~ 2019 年青岛市生活饮用水健康风险评估[J]. 山东大学学报(医学版)，2021，59(12)：42–49，57.
Pan L, Wang BL, Wang Y, et al. Health risk assessment of drinking

water in Qingdao from 2014 to 2019 [J]. Journal of Shandong University(Health Science), 2021, 59(12): 42-49, 57.(In Chinese)

[11] 张泽娜,蓝涛,刘宁,等. 2022 年深圳市生活饮用水中 13 种化学物质的卫生现状及其健康风险评估 [J]. 环境与健康杂志,2024,41(11):972-978.
Zhang ZN, Lan T, Liu N, et al. Sanitary monitoring results and health risk of 13 chemicals in drinking water in Shenzhen in 2022 [J]. Journal of Environment and Health, 2024, 41 (11): 972-978. (In Chinese)

[12] 高成花,夏远,徐肖倩,等. 内蒙古自治区饮用水中氟化物与金属元素的分布特征及健康风险评估 [J]. 现代预防医学,2022,49(19):3488-3492, 3584.
Gao CH, Xia Y, Xu XQ, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of fluoride and metal elements in drinking water, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(19): 3488-3492, 3584.(In Chinese)

[13] 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 of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population, Adults[M]. Beijing: China Environment Press, 2013.(In Chinese)

[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.
National Health Commission of the People's Republic of China. WS/T 777-2021 Technical guidelines for environmental health risk assessment of chemicals[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (In Chinese)

[15] 李培超. 六价铬诱导人支气管上皮细胞恶性转化的机制研究[D]. 济南:山东大学,2020.
Li PC. Study on the mechanism of malignant transformation of human bronchial epithelial cells induced by hexavalent chromium[D]. Jinan: Shandong University, 2020.(In Chinese)

[16] Prasad S, Yadav KK, Kumar S, et al. Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285: 112174.

[17] 孟春霞,郑西来,王成见. 平度市高氟地下水分布特征及形成机制研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(11):111-119.
Meng CX, Zheng XL, Wang CJ. Distribution characteristics and formation mechanism of high-fluoride groundwater in Pingdu City[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2019, 49(11): 111-119.(In Chinese)

[18] Rahman MA, Siddique MAB, Khan R, et al. Mechanism of Arsenic enrichment and mobilization in groundwater from southeastern Bangladesh: Water quality and preliminary health risks assessment [J]. Chemosphere, 2022, 294: 133556.

[19] 孟春霞,郑西来,马振宇,等. 青岛市农村供水中硝酸盐氮污染状况及健康风险评价[J]. 水利水电技术,2014,45(9):24-26, 38.
Meng CX, Zheng XL, Ma ZY, et al. Assessment on status of Nitrate pollution in rural water supply of Qingdao and its healthy risk [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(9): 24-26, 38.(In Chinese)

[20] 迟蓉,邹本春,王秀昀. 烟台单村、联村饮用水硝酸盐含量及污染成因分析[J]. 农村科学实验,2024,(14):181-183.
Chi R, Zou BC, Wang XY. Analysis of nitrate content and pollution causes in drinking water of single-village and united-village water supply in Yantai [J]. Rural Scientific Experiment, 2024, (14): 181-183.(In Chinese)

[21] 黄钟珩. 大王滩水库溶解性有机物的迁移转化及其对饮用水消毒副产物生成影响和风险评价 [D]. 南宁:广西民族大学,2025.
Huang ZH. Migration and transformation of dissolved organic matter in Dawangtan Reservoir and its impact on the formation and risk assessment of drinking water disinfection by-products [D], Nanning: Guangxi Minzu University, 2025.(In Chinese)

[22] 郭文宇. 咸阳地区地下水中六价铬的分布与迁移转化规律研究[D]. 西安:长安大学,2023.
Guo WY. Study on distribution, migration and transformation law of hexavalent chromium in groundwater of Xianyang area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.(In Chinese)

收稿日期:2026-01-14

读者·作者·编者

温馨提示

为了使杂志能准确投递，敬请作者在单位一栏写明详细科室及联系电话。通信作者必须写明 E-mail 地址。

《现代预防医学》编辑部