

孙卓然, 蔡宇, 宋倩, 等. 致人体健康危害的饮用水氯化消毒副产物流行病学调查研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 26-34, 62.

SUN Z R, CAI Y, SONG Q, et al. Research progress of epidemiological investigation for human health hazards of chlorinated DBPs in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 26-34, 62.

致人体健康危害的饮用水氯化消毒副产物流行病学调查研究进展

孙卓然¹, 蔡宇², 宋倩¹, 王谱钧¹, 张海燕^{1,*}

(1. 呼和浩特市疾病预防控制中心<呼和浩特市卫生监督所>, 内蒙古呼和浩特 010070; 2. 武汉大学第二临床医学院, 湖北武汉 430071)

摘要 【目的】 饮用水在氯消毒过程中生成一系列的氯化消毒副产物(CI-DBPs), 带来了潜在的环境和健康风险, 本文综述了致人体健康危害的饮用水 CI-DBPs 流行病学调查研究进展, 并进行总结与展望, 从而为饮用水质量管理与公共卫生保障提供科学依据。【方法】 文章以 CI-DBPs 与人体膀胱癌、结直肠癌等恶性肿瘤的关联性为切入点, 结合生殖激素紊乱、不良妊娠结果及胎儿生长受限等健康影响, 总结分析了水质标准中重要的 CI-DBPs 对人体健康危害的研究进展, 结合我国饮用水新国标中相关限值的制定与修订背景, 探讨其健康效应的关联性与可能机制, 以期为促进饮用水质量管理与保障人民群众的身体健康提供参考。【结果】 长期暴露于饮用水中 CI-DBPs 与多种健康结果存在统计学关联。如对膀胱癌、结直肠癌、生殖健康方面、胎儿生长发育等方面存在着重大影响。在未来的研究中, 开展饮用水中 CI-DBPs 的全球系统性调查, 可揭示 CI-DBPs 的全球分布规律及其驱动因素, 从而科学识别高风险区域与易感人群, 提高饮用水质量。【结论】 CI-DBPs 对人体健康存在多系统潜在危害, 尤其在致癌与生殖发育方面值得高度关注。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 加强了对 CI-DBPs 的管控, 未来需进一步开展全球系统性调查、内暴露评估及多途径暴露研究, 以更准确评估其健康风险。

关键词 饮用水 氯化消毒副产物(CI-DBPs) 流行病学 致癌风险 健康危害

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)01-0026-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.004

Research Progress of Epidemiological Investigation for Human Health Hazards of Chlorinated DBPs in Drinking Water

SUN Zhuoran¹, CAI Yu², SONG Qian¹, WANG Pujun¹, ZHANG Haiyan^{1,*}

(1. Hohhot Center for Disease Control and Prevention <Hohhot Health Supervision Institute>, Hohhot 010070, China;

2. The Second Clinical Medical College of Wuhan University, Wuhan 430071, China)

Abstract [Objective] Chlorinated disinfection byproducts (CI-DBPs) generated during the chlorination of drinking water pose potential environmental and health risks. This paper reviews the progress of epidemiological studies on CI-DBPs in drinking water that are harmful to human health, provides a summary and outlook, thereby offering scientific basis for drinking water quality management and public health security. [Methods] This paper examines the association between CI-DBPs and human malignancies such as bladder cancer and colorectal cancer. It synthesizes research progress on the health hazards of key CI-DBPs in water quality standards, integrating their impacts on reproductive hormone disruption, adverse pregnancy outcomes, and fetal growth restriction. It examines the formulation and revision context of relevant limits in China's new national drinking water standards, explores the correlation between these health effects and potential mechanisms, and aims to provide references for advancing drinking water quality management and guaranteeing public health. [Results] Long-term exposure to CI-DBPs in drinking water is statistically associated with multiple health

[收稿日期] 2025-06-30

[基金项目] 呼和浩特市医疗卫生科技项目(呼卫健医疗-2023070)

[作者简介] 孙卓然(1981—), 男, 主管技师, 主要从事食品及饮用水检测等工作, E-mail: 115063055@qq.com。

[通信作者] 张海燕(1974—), 女, 主任技师, 主要从事食品、饮用水检测及评价等工作, E-mail: 1150356617@qq.com。

outcomes. These include significant impacts on bladder cancer, colorectal cancer, reproductive health, and fetal growth and development. Future studies should conduct a global systematic survey of Cl-DBPs in drinking water to reveal their worldwide distribution patterns and its driving factors. This would enable the scientific identification of high-risk areas and susceptible populations, thereby improving drinking water quality. [**Conclusion**] Cl-DBPs pose potential hazards to multiple human body systems, with particular concern about their carcinogenicity and impact on reproductive development. *Standard for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022) in China has strengthened controls on Cl-DBPs. Future efforts should focus on conducting global systematic surveys, internal exposure assessments, and multi-route exposure studies to more accurately evaluate the associated health risks.

Keywords drinking water chlorinated disinfection byproducts (Cl-DBPs) epidemiology carcinogenic risk health hazard

饮用水消毒是 20 世纪公共卫生领域的一项重要成就,其中氯消毒曾被誉为 20 世纪十大公共健康成就之一。其目的是杀灭水中病原体、防止介水传染性疾病的传播以保障饮用水的安全^[1]。氯化消毒是饮用水消毒的一种方法,其中我国常见氯制剂主要有液氯、氯胺、二氧化氯、次氯酸钠和次氯酸钙等。饮用水在氯消毒过程中生成一系列的氯化消毒副产物 (Cl-DBPs),其具有遗传毒性、致畸性、生殖发育毒性等^[2-5]。流行病学研究结果^[6]显示:饮用水消毒与癌症,如膀胱癌、结直肠癌等癌症存在关联性,从而引起了公众广泛关注。文章以我国在 2023 年新实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中的 Cl-DBPs 为目标,综合近年来饮用

水 Cl-DBPs 致人体健康危害相关研究成果进行总结分析,为将来饮用水安全保障提供参考。

1 消毒副产物 (DBPs) 的来源及特点

饮用水氯化消毒过程中,含氯消毒剂水解后产生次氯酸和盐酸,其中次氯酸具有强氧化性,可以有效杀灭病菌,但也会不可避免地在水中溶解性有机质发生反应生成具有生物毒性的 DBPs^[7-8],如三卤甲烷 (THMs)、卤代乙酸 (HAAs) 和卤素含氧酸盐等,THMs 与 HAAs 是氯化水中检出率最高的两类 DBPs,分别占总 DBPs 的 66% 和 27%^[9]。1974 年,三氯甲烷被首次在液氯消毒水中被发现,截至目前,已检测出 700 多种 DBPs^[10-11],其发现历程如图 1 所示。

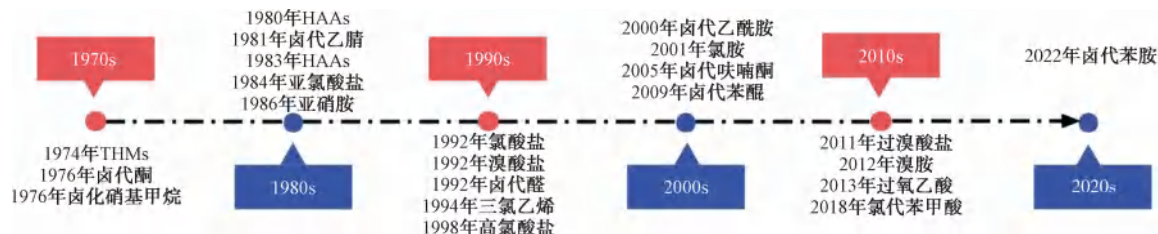


图 1 饮用水中 DBPs 发现历程

Fig. 1 Discovery Process of DBPs in Drinking Water

经研究^[12-13]调查,在日常室内活动(如淋浴、沐浴、烹饪)期间,人体可通过饮用、吸入和皮肤吸收等多种途径接触 DBPs,可对人类健康构成潜在的致癌风险。在《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中,将一氯二溴甲烷 (CDBM)、二氯一溴甲烷 (DCBM)、三溴甲烷 (TBM)、THMs、二氯乙酸 (DCAA) 和三氯乙酸 (TCAA) 6 项典型 Cl-DBPs 从原非常规指标调整为常规指标,并对部分新兴的 DBPs 进行提示并给出检测方法^[14],这一调整是为强化对饮用水中 Cl-DBPs 的控制,旨在进一步确保水质安全和 DBPs 的有效管理,更系统、更精准地保障饮用水安全。同时与美国、欧盟及国际卫生组织

标准相比,我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)涉及的 Cl-DBPs 种类更多,部分指标限值也更为严格,如表 1 所示。

2 流行病学研究进展

世界卫生组织 (WHO) 将 Cl-DBPs 作为衡量生活饮用水安全性的重要指标纳入管控标准,如表 2 所示。截至 2024 年 10 月底,Web of Science 核心数据库中关于 DBPs 的国内文献数量为 3 555 篇,全球已超过 10 000 篇。饮用水中的 THMs 是最早被发现和管控的指标,经过多年来的深入研究,其相暴露数据的统计更充分,因而在饮用水 DBPs 流行病学研究中,常被用作总 DBPs 暴露的替代指标进行分析。

表 1 饮用水 Cl-DBPs 国内外标准限值比较

Tab. 1 Comparison of Domestic and International Standard Limits for Cl-DBPs in Drinking Water

指标名称	GB 5749—2022	US EPA 2018	欧盟 2020	WHO 2012
三氯甲烷	0.06 mg/L	—	—	0.3 mg/L
CDBM	0.1 mg/L	—	—	0.1 mg/L
DCBM	0.06 mg/L	—	—	0.06 mg/L
TBM	0.1 mg/L	—	—	0.1 mg/L
THMs(总)	1(无量纲) ^a	0.08 ^b mg/L	0.1 ^b	1(无量纲) ^a
四氯化碳	0.002 mg/L	0.005 mg/L	—	0.004 mg/L
DCAA	0.05 mg/L	—	—	0.05 mg/L
TCAA	0.1 mg/L	—	—	0.2 mg/L
2,4,6-三氯酚	0.2 mg/L	—	—	0.2 mg/L
五氯酚	0.009 mg/L	—	—	0.009 mg/L
氯酸盐	0.7 mg/L	—	0.25(0.7) ^c mg/L	0.7 mg/L
亚氯酸盐	0.7 mg/L	1 mg/L	0.25(0.7) ^c mg/L	0.7 mg/L
溴酸盐	0.01 mg/L	0.01 mg/L	0.01 mg/L	0.01 mg/L
三氯乙醛	0.1 mg/L	—	—	—
氯化氰	0.07 mg/L	—	—	—
N-亚硝基二甲胺	0.000 1 mg/L	—	—	0.000 1 mg/L

注:^a 表示该类化合物中各种化合物的实测浓度与其各自限值的比值之和不超过 1;^b 表示 THMs 总量:三氯甲烷、TBM、CDBM、DCBM 之和;^c 表示当采用能产生亚氯酸盐和氯酸盐的消毒方式时,限值为 0.7 mg/L。

表 2 我国生活饮用水标准中主要 Cl-DBPs 及新兴 DBPs 毒性

Tab. 2 Toxicity of Major Cl-DBPs and Novel DBPs in Drinking Water Standards at Home

DBPs 类别	DBPs	毒性效应	限值/(mg·L ⁻¹)	国际癌症研究机构(IARC)等级	参考文献
卤代甲烷	三氯甲烷		0.06	2B	[15-16]
	CDBM	致癌、细胞毒性、遗传毒性、生殖	0.1	3	
	DCBM	异常、出生缺陷、肾肝损伤、神	0.06	2B	
	TBM	经系统损伤	0.1	3	
	二氯甲烷		0.02	2B	
卤代乙酸	四氯化碳		0.002	2A	[15,17]
	DCAA	致癌、生殖异常、生长迟缓、遗传	0.05	2B	
	TCAA	毒性、细胞毒性、脾肝肾损害	0.1	3	
卤代酚	2,4,6-三氯酚	细胞毒性、发育异常、内分泌紊	0.2	2B	[15,18-19]
	五氯酚	乱和生长抑制	0.009	1	
卤素含氧酸盐	氯酸盐	血液毒性、肾毒性、潜在致癌性	0.7		[15,20-21]
	亚氯酸盐	致癌性、遗传毒性、肾损伤	0.7		
	溴酸盐		0.01	2B	
醛类	三氯乙醛	致突变、肾损害、细胞毒性	0.1		[15,22]
含氮 DBPs	氯化氰	中枢神经系统抑制、干扰碘代	0.07		[15,23]
		谢、肝肾损伤			

(续表2)

DBPs 类别	DBPs	毒性效应	限值/(mg·L ⁻¹)	国际癌症研究 机构(IARC)等级	参考文献
新兴 DBPs	卤代乙腈	细胞毒性、基因毒性、发育毒性		3	[15,24]
	N-亚硝基二甲胺	长期低剂量接触存在损伤甲状腺和神经系统可能	0.0001	2A	
	卤代硝基甲烷	致突变、细胞毒性、遗传毒性、肝癌、膀胱癌			
	卤代醌	氧化应激毒性、遗传毒性、致癌潜力、肝肾损害			

注:限值中空白处表示《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)未作出限值规定;IARC 等级中空白处表示国际癌症研究机构未进行等级评定。

2.1 膀胱癌

膀胱癌在男性恶性肿瘤中居第4位,严重威胁人类的健康^[25],且女性发病率低于男性。现有诸多流行病学研究结果显示:饮用水中 Cl-DBPs 和膀胱癌存在密切联系,可能是膀胱癌的重要诱因。美国、欧洲等国家都进行了病例对照研究^[26],得出了类似结论,支持了 DBPs 与膀胱癌发生风险相关这一观点。早在 20 世纪 80 年代,在美国科罗拉多州^[27]、加拿大安大略省、美国马里兰州^[28]、美国爱荷华州^[29]、纽约州西部进行的病例对照研究结果^[30]显示:膀胱癌患病风险随经氯化消毒的自来水摄入量的增加而增加^[31]。新英格兰一项基于人口数的病例对照研究^[2]从多角度阐述了膀胱癌与三氯甲烷的关联性,分别选取了 1 213 个膀胱癌患者和 1 418 名健康对照人群,探讨不同暴露途径下膀胱癌与 THMs 之间的关联,结果显示:与低水平组(对照组)相比,每日摄入高水平的 THMs、溴化三氯甲烷的人群,患膀胱癌的风险高;与累积溴化三氯甲烷量低的人群相比,累积量高的人群,患膀胱癌的风险更高。西班牙一项病例对照研究^[32]结果表明:长期使用含 THMs>49 μg/L 的氯化消毒水的居民患膀胱癌的危险性,相对使用含 THMs<8 μg/L 的氯化消毒水的居民明显增高。Villanueva 等^[33]对公开发表的饮用水 Cl-DBPs 和膀胱癌流行病学的统计分析结果显示,长期饮用氯消毒的饮用水与男性患膀胱癌概率联系紧密。Villanueva 等^[32]的后续研究中,以 THMs 为 Cl-DBPs 的代表,通过个人平均每天接触自来水的累积量,包括皮肤吸收接触水,例如游泳、洗澡等方式,得出结论:THMs 暴露与男性膀胱癌风险存在

相关性,女性未见关联。Wilkins 等^[34]在病例对照研究结果显示,与对照组相比,THMs 年平均暴露质量浓度大于 25 μg/L 的男性患膀胱癌的风险增加 35%;与低质量浓度(<5 μg/L)暴露水平的人群相比,暴露于高质量浓度(大于 50 μg/L)的人群患膀胱癌的风险增加 51%。Evlampidou 等^[26]从欧洲 28 个国家 2005 年—2018 年的城市饮用水中年均 THMs 暴露水平角度估算出,在欧盟人口中有 4.9% 的膀胱癌病例归因于饮用水中的 THMs 暴露。除此之外,一项队列研究^[34]结果显示:长期接触 Cl-DBPs 的人群膀胱癌发病率比接触未经氯化消毒的饮用水的历史队列高 2 倍。

2.2 结直肠癌

结直肠癌是常见的消化道恶性肿瘤之一,发病率在全球居于恶性肿瘤第 3 位,死亡率高居第 2 位,在我国发病率和死亡率中排第 5 位,饮食是结直肠癌患病主要因素^[35-37]。流行病学研究^[38]发现,长期饮用含有有机卤代烃的经氯消毒的饮用水,居民的消化道癌症死亡率明显高于饮用洁净水的居民。加拿大某市的病例-对照调查研究^[39]结果显示:男性居民患结肠癌的概率与饮用水中累计的 THMs 量相关。饮用含氯消毒饮用水大于 35 年的男性居民(优势比为 1.53,95% 置信区间在 1.13~2.09),患结肠癌的几率比暴露时间小于 10 年的男性居民明显增加。Tafesse 等^[40]在埃塞俄比亚的斯亚贝巴进行相关研究,214 例结直肠癌病例中,148 例(69.2%)使用了经氯消毒的饮用水,428 例对照组中有 161 例(37.6%)使用了经氯消毒的饮用水,在最终回归模型中显示:与患结直肠癌显著关联的因素有饮用氯化消毒地表水、游泳史、当地居住史和使

用热水淋浴。Rahman 等^[41]的研究结果显示:在男性中,结肠癌和饮用水中 TBM 的浓度呈正相关,溴代 THMs 与结直肠癌之间的风险值得关注。Villanueva 等^[42]估算了西班牙 198 例结直肠癌病例及对照组的 THMs 暴露水平,发现骨膜素与摄入的溴代 THMs 协同作用可能会增加患结直肠癌风险。在 Evlampidou 等^[26]的研究中发现:DBPs 增加了患结肠癌风险,并且不同的 THMs 有不同的相关性。在北欧芬兰,Knekt 等^[43]对 9 985 名芬兰成年男女的队列研究,在 24 年的随访期间,该队列中共确诊 189 例胃肠道癌症。研究结果显示:亚硝胺摄入量与结直肠癌发病存在显著正相关,与头颈部癌症(合并)或胃癌风险无显著关联。但是,也有研究^[44]显示:长期 THMs 暴露与结直肠癌呈正相关的证据有限,甚至有研究结果显示:结直肠癌与三氯甲烷浓度和摄取量呈负相关。

2.3 对成人生殖健康影响

目前全球生育水平呈整体下降趋势,我国 2020 年总和生育率降至 1.3,低于国际公认的警戒线 1.5。从而使 DBPs 中含量最高的两大类 Cl-DBPs (THMs 和 HAAs)暴露对成人生殖功能影响引起了人们的高度关注^[45]。

Fenster 等^[46]采用供水管网水中 THMs 含量并充分考量经口摄入 THMs 含量作为外暴露标志物,发现健康人群暴露管网水中 THMs 质量浓度 < 145 $\mu\text{g/L}$ 时不会降低精液质量,但 THMs 在经口暴露高质量浓度 [$>160 \mu\text{g}/(\text{L}\cdot\text{d})$] 时,导致正常精子形态百分率降低和精子头部畸形百分率升高,同时发现 DCBM 暴露能显著降低精子直线性运动。将文献^[47-48]中采用监测的管网水中 THMs 浓度并结合不同途径接触水量计算摄入量作为外暴露标志物,并对血液中 THMs 含量进行检测,结果显示:经口摄入和血液中 TCM 和 THMs 暴露均与精子总数下降产生关联性,并且具有剂量-反应关系;Zhang 等^[49]选取了 299 名男性尿液进行 TCAA 和 3 种氧化应激标志物分析,结果显示:尿液 TCAA 浓度升高与氧化应激标志物水平升高存在剂量-反应关系,并且会影响到精子浓度、精子活力。但是 Iszatt 等^[50]的研究结果显示:管网水中 TCM (3.2~51.6 $\mu\text{g/L}$)、溴代三卤甲烷 (5.8~19.9 $\mu\text{g/L}$) 和 THMs (12.2~61.0 $\mu\text{g/L}$) 暴露浓度与低精子活力浓度之间并未呈现明显相关。

目前,有关 Cl-DBPs 暴露对女性生殖健康影响的流行病学研究极少,还需要加大相关研究,从而明确 DBPs 暴露对女性生殖功能的影响。Deng 等^[51]对 956 例女性患者尿液中的 DCAA 和 TCAA 含量水平进行检测 (DCAA 平均质量浓度为 4.72 $\mu\text{g/L}$, TCAA 平均质量浓度为 5.70 $\mu\text{g/L}$)。结果显示:DCAA 和 TCAA 浓度会影响总窦卵泡数降低,TCAA 水平升高会导致 AMH 降低,提示饮用水中的 Cl-DBPs 暴露可能与卵巢储备功能的下降具有关联性。Windham 等^[52]研究表明:育龄期女性 THMs 暴露水平与平均月经周期和卵泡周期缩短有关,总 THMs 浓度增加会导致月经周期和卵泡周期变短,提示 THMs 暴露和卵巢功能的变化具有关联性。Maclehose 等^[53]发现,当 Cl-DBPs 暴露强度较高时与妊娠时间减少有关联性。Liu 等^[54]以 725 例女性尿液中 DCAA 和 TCAA 作为 DBPs 暴露的生物标志物,并对其浓度进行检测,结果显示:DCAA 中位数质量浓度在 4.3 $\mu\text{g/L}$ 时与月经血清孕酮和催乳素水平的改变有关,而 TCAA 未显示有相关性。

2.4 对胎儿生长发育的影响

目前有流行病学研究显示:饮用水中 Cl-DBPs 暴露与不良妊娠结局存在一定联系,从而与新生儿患病率和死亡率产生关系,而我国关于饮用水 Cl-DBPs 暴露对胎儿生长发育的流行病学研究的相关报道较少。

在对 Cl-DBPs 的早期研究中,相关学者^[55-56]的研究显示:高浓度的 THMs 暴露与自然流产之间存在相关性,其中 BDCM 对自然流产的影响最大。英格兰的一项研究中,Iszatt 等^[57]比较了自来水中 DBPs 浓度改变与低出生体重发生率改变之间的关联性。结果显示:居民家庭末梢水中的三氯甲烷浓度下降的同时,供水区域内低出生体重与极低出生体重的发生率明显下降,TCM 下降与极低出生体重发生率下降之间存在明显的关联性;意大利开展的一项对照研究^[58]显示:在用二氧化氯、次氯酸钠消毒的饮用水和未采用饮用水相比较,结果发现采用氯化消毒地区的新生儿身长 ($\leq 49.5 \text{ cm}$) 和头围 ($\leq 35.0 \text{ cm}$) 降低的风险性均增加。在加拿大魁北克开展的对照研究^[59]发现:家庭末梢水中总 THMs 质量浓度大于 29.4 $\mu\text{g/L}$ 时的孕妇携带 CYP2 E1 rs3813867 CT/CC 基因型的新生儿生长受限的风险是携带 CYP2 E1 rs3813867 TT 基因型的 13.2 倍。

来自中国台湾省的一项人群病例对照研究^[60]显示,在 THMs 为低(对照组)、中、高 3 个水平时,THMs 中等水平暴露的产妇发生死胎的概率大大增加,经荟萃(meta)分析后,发现 THMs 高水平暴露可增加死胎发生的风险。

2.5 其他影响人体健康的流行病研究

除上述外,关于其他癌症(如肝癌、肺癌、白血病、胰腺癌等)的流行病研究结果尚不充分,仍需进一步验证。Infante-Rivard 等^[61]进行的病例对照研究显示:THMs 或三氯甲烷的平均暴露水平与白血病发病率无显著相关性。然而,Kasim 等^[62]发现,患慢性髓系白血病的风险可能与 Cl-DBPs 暴露时间呈正相关,但其他类型的白血病(如急性淋巴细胞白血病、急性髓系白血病)未观察到类似趋势。胰腺癌的发病机制复杂,涉及环境、遗传和代谢等多因素,Cl-DBPs 可能仅作为潜在风险因素之一,需结合更精确的内暴露生物标志物(如尿液或血液中的 Cl-DBPs 代谢物)进行深入分析^[63-64]。在肺癌研究中,少数研究^[65]关注 Cl-DBPs 经吸入暴露(如淋浴时挥发性 THMs)的影响,但尚未发现明确关联。Cl-DBPs 与乳腺癌的相关性,目前研究较少,且结果多为阴性,可能与激素依赖性癌症的病因复杂性有关。也有毒理学研究^[66]结果显示:Cl-DBPs 主要导致肝癌和肾癌,而流行病学结果并未支持这种观点,还需深入研究后,做出准确分析。

自 Cl-DBPs 被发现以来,全球已开展了大量关于饮用水 Cl-DBPs 对人体健康危害的流行病研究,但研究结论存在明显不一致。部分研究^[66]显示:Cl-DBPs 与健康危害之间存在相关性,也有研究未发现显著关联,甚至出现负相关结果。这种不一致可能与流行病研究方法本身的局限性有关。例如,病例样本量、研究对象的个体差异、检测技术、暴露评估模型以及地域和时间因素等,均可能影响最终结论。Cl-DBPs 种类复杂,人体可通过饮水、皮肤接触和呼吸等多种途径暴露,而不同研究对暴露途径的考量不尽一致。部分研究仅关注经口摄入,忽略了皮肤吸收和其他吸入途径,可能导致暴露水平估算偏差。此外,Cl-DBPs 在环境中稳定性较差,其浓度随时间、地点和水处理条件波动,使得长期真实暴露量难以准确测定。不同地区原水成分差异显著,氯化消毒后 Cl-DBPs 的生成量也存在较大变异,即便同一地区,其浓度也会随季节和水厂工艺调整

而变化,这进一步增加了暴露评估的复杂性。另一方面,样本量大小直接影响结果的准确性和外推有效性。小样本研究容易出现偏差,结论稳定性不足,限制其推广至更大人群的适用性。

因此,未来的暴露评估研究需综合考虑多种暴露途径,合理选择研究对象并充分考虑个体差异,采用更科学的分析方法和检测技术,以期获得更可靠、一致的研究结果,从而明确 Cl-DBPs 对人体健康的影响,为饮用水安全标准与相关防控措施的制定提供科学依据。

3 结论与展望

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的修订体现了我国对饮用水安全问题的持续关注与科学应对。新标准更加强调消毒与毒理指标,并增强了对新兴污染物及 DBPs 的管控,显示出对 DBPs 健康风险,尤其是对长期低剂量暴露可能带来的致癌、致畸等潜在危害的高度重视。新国标的实施有助于系统性地监测与控制 DBPs,从而降低人群健康风险。

开展饮用水中 Cl-DBPs 的全球系统性调查,是应对环境变化和保障公共健康的核心举措。这类调查不仅可揭示 Cl-DBPs 的全球分布规律及其驱动因素,还有助于建立标准化的暴露-效应评估体系,从而科学识别高风险区域与易感人群。然而,现有研究多局限于单一国家或地区,缺乏全球范围内的系统调查,导致结果难以推广,无法全面反映不同环境、水质和消毒方式下 Cl-DBPs 的暴露特征与健康风险。此外,当前风险评估模型仍存在关键参数缺失的问题,例如未充分考虑不同生命阶段(如婴幼儿、孕妇及老年人)的暴露敏感性差异,以及水温或化学物质经皮肤渗透的延迟时间等动态因素。这些不足可能降低评估结果的准确性,影响相关公共卫生决策的科学性。

在饮用水 Cl-DBPs 健康风险研究中,内暴露评估通过直接检测人体生物标志物(如血液、尿液)中的 Cl-DBPs 或其代谢产物,能够更准确、全面地反映个体实际吸收并进入体循环的暴露剂量,提供更具生物学意义的评估结果。该类方法是揭示 DBPs 与某些健康效应——如生殖障碍、癌症等具有潜伏期和复杂病因的疾病之间关联的关键。目前,研究多依赖外暴露数据(如水中 DBPs 浓度),内暴露研究仍相对不足。外暴露数据虽可反映环境中的污染水

平,却无法直接体现人体的实际吸收与代谢状况。因此,仅凭外暴露可能造成对健康风险的高估或低估。通过结合环境监测(外暴露)与生物样本检测(内暴露),例如测定尿液中 Cl-DBPs 代谢产物或血液中的 DNA 加合物,能够更直接地评估个体或群体的真实暴露水平。

氯化消毒仍是当前饮用水处理的核心工艺。尽管氯消毒可能促进 Cl-DBPs 的生成并带来潜在的致癌风险,其在预防介水传染病(如霍乱、痢疾等)方面具有不可替代的作用。历史上,氯化消毒的广泛应用显著降低了水传疾病的发病率,大幅改善了公共健康水平。对于发展中国家而言,氯消毒仍是目前最经济、高效的水处理方式。因此,在当前阶段,饮用水氯化消毒控制微生物污染仍是保障饮用水安全的首要任务,而对 Cl-DBPs 的管控应在确保消毒效果的前提下逐步完善。

参考文献

- [1] WU H, LONG K L, SHA Y J, et al. Occurrence and toxicity of halobenzoquinones as drinking water disinfection byproducts[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145277. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145277.
- [2] FREEMAN L E B, CANTOR K P, BARIS D, et al. Bladder cancer and water disinfection by-product exposures through multiple routes: A population-based case-control study (New England, USA) [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(6): 067010. DOI: 10.1289/EHP89.
- [3] SRIVASTAV A L, PATEL N, CHAUDHARY V K. Disinfection by products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115474. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115474.
- [4] COSTET N, VILLANUEVA C M, JAAKKOLA J J, et al. Water disinfection by-products and bladder cancer: Is there a European specificity? A pooled and meta-analysis of European case—Control studies[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2011, 68(5): 379–385.
- [5] WEI X, WANG S, ZHENG W W, et al. Drinking water disinfection byproduct iodoacetic acid induces tumorigenic transformation of NIH3T3 cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 5913–5920.
- [6] 曾凡刚, 吴燕红, 巴哈提古丽, 等. 水氯化消毒处理对人体健康的影响[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2001(1): 66–75.
- ZENG F G, WU Y H, BHT G L, et al. The Impact on body health about chloridizing disinfection of drinking water [J]. *Journal of Minzu University of China(Natural Sciences Edition)*, 2001(1): 66–75.
- [7] QU J H, WANG H C, WANG K J, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 88–95.
- [8] HU H Y, DU Y, WU Q Y, et al. Differences in dissolved organic matter between reclaimed water source and drinking water source [J]. *Science of the Total Environment*, 2016(551/552): 133–142. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.12.1.1.
- [9] SUN Y, WANG Y X, LIU C, et al. Trimester-specific blood trihalomethane and urinary haloacetic acid concentrations and adverse birth outcomes: Identifying windows of vulnerability during pregnancy [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128(10): 107001. DOI: 10.1289/EHP7195.
- [10] RUBIROLA A, BOLEDA M R, GALCERAN M T, et al. Formation of new disinfection by-products of priority substances (directive 2013/39/UE and watch list) in drinking water treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(27): 28270–28283.
- [11] LI Z G, SONG G F, BI Y H, et al. Occurrence and distribution of disinfection byproducts in domestic wastewater effluent, tap water, and surface water during the SARS-CoV-2 pandemic in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(7): 4103–4114.
- [12] LI R A, MCDONALD J A, SATHASIVAN A, et al. A multivariate Bayesian network analysis of water quality factors influencing trihalomethanes formation in drinking water distribution systems[J]. *Water Research*, 2021, 190: 116712. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116712.
- [13] CHAVES R S, GUERREIRO C S, CARDOSO V V, et al. Toxicological assessment of seven unregulated drinking water disinfection by-products using the zebrafish embryo bioassay[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140522. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140522.
- [14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749–2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [15] KALI S, KHAN M, GHAFAR M S, et al. Occurrence, influencing factors, toxicity, regulations, and abatement approaches for disinfection by-products in chlorinated drinking water: A comprehensive review [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 281: 116950. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116950.
- [16] EWAID S H, RABEE A M, AL-NASERI S K. Carcinogenic risk assessment of trihalomethanes in major drinking water sources of Baghdad City[J]. *Water Resources*, 2018, 45(5): 803–812.

- [17] MOMPRIEMER R, MARILES Ó, BRAVO J E, et al. Study of the variation of haloacetic acids in a simulated water distribution network [J]. Water Supply, 2019, 19(1): 88–96.
- [18] ZHANG Z X, ZHU Q Y, HUANG C, et al. Comparative cytotoxicity of halogenated aromatic DBPs and implications of the corresponding developed QSAR model to toxicity mechanisms of those DBPs: Binding interactions between aromatic DBPs and catalase play an important role[J]. Water Research, 2020, 170: 115283. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115283.
- [19] LIU J Q, ZHANG X R, LI Y, et al. Phototransformation of halophenolic disinfection byproducts in receiving seawater: Kinetics, products, and toxicity [J]. Water Research, 2019, 150: 68–76. DOI: 10.1016/j.watres.2018.11.059.
- [20] 曹荣玉, 牛璐瑶, 符策竿, 等. 不同工艺对饮用水消毒副产物的影响[J]. 净水技术, 2018, 37(8): 34–38.
CAO X Y, NIU L Y, FU C G, et al. Effect of different treatment process on disinfection by-products in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 34–38.
- [21] 秦惠, 吴清平, 邓金花, 等. 消毒副产物亚氯酸盐残留量检测方法的进展[J]. 中国消毒学杂志, 2014, 31(9): 977–981.
QIN H, WU Q P, DENG J H, et al. Research progress on detection methods for chlorite residues as disinfection byproducts [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2018, 31(9): 977–981.
- [22] LI Y, JIANG J Y, LI W X, et al. Volatile DBPs contributed marginally to the developmental toxicity of drinking water DBP mixtures against *Platyneris dumerilii* [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126611. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126611.
- [23] 王汉斌, 刘晓玲. 急性氰化物中毒的诊断与救治[J]. 中国医刊, 2009, 44(2): 73–74.
WANG H B, LIU X L. Diagnosis and treatment of acute cyanide poisoning[J]. Chinese Journal of Medicine, 2009, 44(2): 73–74.
- [24] ZHANG Y M, CHU W H, YAO D C, et al. Control of aliphatic halogenated DBP precursors with multiple drinking water treatment processes: Formation potential and integrated toxicity [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2017, 58: 322–330. DOI: 10.1016/j.jes.2017.03.028.
- [25] SIEGEL R L, MILLER K D, FUCHS H E, et al. Cancer statistics, 2022 [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2022, 72(1): 7–33.
- [26] EVLAMPIDOU I, FONT-RIBERA L, ROJAS-RUEDA D, et al. Trihalomethanes in drinking water and bladder cancer burden in the European Union [J]. Environmental Health Perspectives, 2020, 128(1): 017001. DOI: 10.1289/ehp4495.
- [27] MCGEEHIN M A, REIF J S, BECHER J C, et al. Case-control study of bladder cancer and water disinfection methods in Colorado [J]. American Journal of Epidemiology, 1993, 138(7): 492–501.
- [28] FREEDMAN D M, CANTOR K P, LEE N L, et al. Bladder cancer and drinking water: A population-based case-control study in Washington County, Maryland (United States) [J]. Cancer Causes Control, 1997, 8(5): 738–744.
- [29] CANTOR K P, LYNCH C F, HILDESHEIM M E, et al. Drinking water source and chlorination byproducts. I. Risk of bladder cancer [J]. Epidemiology, 1998, 9(1): 21–28.
- [30] VENA J E, GRAHAM S, FREUDENHEIM J, et al. Drinking water, fluid intake, and bladder cancer in western New York [J]. Archives of Environmental Health, 1993, 48(3): 191–198.
- [31] CANTOR K P, HOOVER R, HARTGE P, et al. Bladder cancer, drinking water source, and tap water consumption: A case-control study [J]. Journal of the National Cancer Institute, 1987, 79(6): 1269–1279.
- [32] VILLANUEVA C M, CANTOR K P, GRIMALT J O, et al. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools [J]. American Journal of Epidemiology, 2007, 165(2): 148–156.
- [33] VILLANUEVA C M, FERNANDEZ F, MALATS N, et al. Meta-analysis of studies on individual consumption of chlorinated drinking water and bladder cancer [J]. Journal of Epidemiology & Community Health, 2003, 57(3): 166–173.
- [34] WILKINS J R, COMSTOCK G W. Source of drinking water at home and site-specific cancer incidence in Washington County, Maryland [J]. American Journal of Epidemiology, 1981, 114(2): 178–190.
- [35] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022; GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2024, 74: 229–263. DOI: 10.3322/caac.21834.
- [36] 国家消化系统疾病临床医学研究中心(上海), 国家消化道早癌防治中心联盟, 中华医学会消化内镜学分会, 等. 中国早期结直肠癌筛查流程专家共识意见(2019, 上海) [J]. 中华医学杂志, 2019, 36(10): 709–719.
National Clinical Research Center for Digestive Diseases (Shanghai), Global Gastrointestinal Cancer Alliance, Chinese Society of Digestive Endoscopy, et al. Expert consensus on early colorectal cancer screening process in China (2019, Shanghai) [J]. National Medical Journal of China, 2019, 36(10): 709–719.
- [37] CHEN W Q, ZHENG R S, BAADE P D, et al. Cancer statistics in China, 2015 [J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2016, 66(2): 115–132.
- [38] 黄江平, 钟格梅. 饮用水中氯化消毒副产物对人体健康影响研究进展 [J]. 应用预防医学, 2021, 47(5): 476–479.
HUANG J P, ZHONG G M. Research progress on the health

- effects of chlorination byproducts in drinking water[J]. *Applied Preventive Medicine*, 2021, 47(5): 476–479.
- [39] KING W D, MARRETT L D. Case-control study of bladder cancer and chlorination by-products in treated water (Ontario, Canada)[J]. *Cancer Causes Control*, 1996, 7(6): 596–604.
- [40] TAFESSE N, PORCELLI M, GARI S R, et al. Drinking water source, chlorinated water, and colorectal cancer: A matched case-control study in Ethiopia[J]. *Environmental Health Insights*, 2022, 16: 4322. DOI: 10.1177/11786302211064432.
- [41] RAHMAN M B, COWIE C, DRISCOLL T, et al. Colon and rectal cancer incidence and water trihalomethane concentrations in New South Wales, Australia[J]. *BMC Cancer*, 2014, 14(1): 445. DOI: 10.1186/1471-2407-14-445.
- [42] VILLANUEVA C M, ESPINOSA A, GRACIA-LAVEDAN E, et al. Exposure to wide spread drinking water chemicals, blood inflammation markers, and colorectal cancer[J]. *Environment International*, 2021, 157: 106873. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106873.
- [43] KNEKT P, JÄRVINEN R, DICH J, et al. Risk of colorectal and other gastro-intestinal cancers after exposure to nitrate, nitrite and N-nitroso compounds: A follow-up study [J]. *International Journal of Cancer*, 1999, 80(6): 852–856.
- [44] VILLANUEVA C M, GRACIA-LAVEDAN E, BOSETTI C, et al. Colorectal cancer and long-term exposure to trihalomethanes in drinking water: A multicenter case-control study in Spain and Italy[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(1): 56–65.
- [45] 李娟, 邓陶然, 王怡, 等. 饮用水中消毒副产物对成人生殖功能影响的研究进展[J]. *中华生殖与避孕杂志*, 2024, 44(4): 436–440.
- LI J, DENG T R, WANG Y, et al. Research progress in the influence of disinfection by-products in drinking water on adult reproductive function [J]. *Chinese Journal of Reproduction and Contraception*, 2024, 44(4): 436–440.
- [46] FENSTER L, WALLER K, WINDHAM G, et al. Trihalomethane levels in home tap water and semen quality[J]. *Epidemiology*, 2003, 14(6): 650–658.
- [47] ZENG Q, CHEN Y Z, XU L, et al. Evaluation of exposure to trihalomethanes in tap water and semen quality: A prospective study in Wuhan, China[J]. *Reproductive Toxicology*, 2014, 46: 56–63. DOI: 10.1016/j.reprotox.2014.03.005.
- [48] ZENG Q, LI M, XIE S H, et al. Baseline blood trihalomethanes, semen parameters and serum total testosterone: A cross-sectional study in China[J]. *Environment International*, 2013, 54: 134–140. DOI: 10.1016/j.envint.2013.01.016.
- [49] ZHANG M, LIU C, CUI F P, et al. The role of oxidative stress in association between disinfection by-products exposure and semen quality: A mediation analysis among men from an infertility clinic[J]. *Chemosphere*, 2021, 268: 128856. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128856.
- [50] ISZATT N, NIEUWENHUIJSEN M J, BENNETT J, et al. Chlorination by-products in tap water and semen quality in England and Wales [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2013, 70(11): 754–760.
- [51] DENG Y L, LUO Q, LIU C, et al. Urinary biomarkers of exposure to drinking water disinfection byproducts and ovarian reserve: A cross-sectional study in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126683. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126683.
- [52] WINDHAM G C, WALLER K, ANDERSON M, et al. Chlorination by-products in drinking water and menstrual cycle function [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2003, 111(7): 935–941.
- [53] MACLEHOSE R F, SAVITZ D A, HERRING A H, et al. Drinking water disinfection by-products and time to pregnancy [J]. *Epidemiology*, 2008, 19(3): 451–458.
- [54] LIU C, DENG Y L, YUAN X Q, et al. Exposure to disinfection by-products and reproductive hormones among women: Results from the Tongji Reproductive and Environmental (TREE) Study [J]. *Environmental Research*, 2022, 209: 112863. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112863.
- [55] SAVITZ D A, ANDREWS K W, PASTORE L M. Drinking water and pregnancy outcome in central North Carolina: Source, amount, and trihalomethane levels [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1995, 103(6): 592–596.
- [56] WALLER K, SWAN S H, DELORENZE G, et al. Trihalomethanes in drinking water and spontaneous abortion[J]. *Epidemiology*, 1998, 9(2): 134–140.
- [57] ISZATT N, NIEUWENHUIJSEN M J, BENNETT J E, et al. Trihalomethanes in public drinking water and stillbirth and low birth weight rates: An intervention study [J]. *Environment International*, 2014, 73: 434–439. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.006.
- [58] KANITZ S, FRANCO Y, PATRONE V, et al. Association between drinking water disinfection and somatic parameters at birth[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1996, 104(5): 516–520.
- [59] INFANTE-RIVARD C. Drinking water contaminants, gene polymorphisms, and fetal growth [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, 112(11): 1213–1216.
- [60] HWANG B F, JAAKKOLA J J K. Risk of stillbirth in the relation to water disinfection by-products: A population-based case-control study in Taiwan [J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): 33949. DOI: 10.1371/journal.pone.0033949.
- [61] INFANTE-RIVARD C, OLSON E, JACQUES L, et al. Drinking water contaminants and childhood leukemia[J]. *Epidemiology*, 2001, 12(1): 13–19.

(下转第 62 页)

- 净水技术, 2023, 42(7): 1-7.
- GU C. Innovation and Application of HACCP System in Shanghai water source management [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 1-7.
- [9] 刘明坤, 俞莉峰, 钱庆玲, 等. 基于 HACCP 原理的出厂水水质管理[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 49-55, 138.
- LIU M K, YU L F, QIAN Q L, et al. Water quality management of finished water based on the HACCP principle [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 49-55, 138.
- [10] 李柱. 水厂 HACCP 体系的关键控制点确定及在臭氧投加控制中的应用实践[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 72-76, 93.
- LI Z. Application practice of CCPs determination and ozone dosing control in HACCP system of WTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 72-76, 93.
- [11] 国家技术监督局, 中华人民共和国卫生部. 二次供水设施卫生规范: GB17051—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- State Bureau of Technical Supervision, Ministry of Health of the People's Republic of China. Hygienic specification for facilities of secondary water supply: GB 17051—1997 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [12] 张明德, 刘新立, 周雅珍. 城市供水系统风险评估: 理论与方法与案例 [M]. 北京: 经济科学出版社, 2012.
- ZHANG M D, LIU X L, ZHOU Y Z. Risk assessment of urban water supply system: Theory, method and case [M]. Beijing: Economic Science Press, 2012.
- [13] 王雪峰, 李辰晨, 张骏鹏. 基于水质提升的二次供水改造及效果评估[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 931-935, 941.
- WANG X F, LI C C, ZHANG J P. Effect evaluation of secondary water supply renovation aiming at water quality improvement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 931-935, 941.
- [14] 上海市市场监督管理局. 生活饮用水水质标准: DB 31/T 1091—2025 [S/OL]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed? id = 2E8D555B43ACD483E06397BE0A0AA892>.
- Shanghai Administration for Market Regulation. Standards for drinking water quality: DB 31/T 1091—2025 [S/OL]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed? id = 2E8D555B43ACD483E06397BE0A0AA892>.
- [15] 张骏鹏, 王一廉. 基于季节规律和二次供水模式的饮用水水质安全风险[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 69-74, 152.
- ZHANG J P, WANG Y L. Water quality safety risks of different secondary water supply systems in different seasons [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 69-74, 152.
- [16] 上海市水务局. 新建居民住宅饮用水高品质入户工程技术规程: 沪水务〔2022〕1034 号 [EB/OL]. (2022-12-02) [2025-07-06]. <https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/91308beffd944819a78b01d9c669195>.
- Shanghai Water Authority. Technical specification for high-quality engineering construction of residence drinking water system: Shanghai Water Affairs [2022] No. 1034 [EB/OL]. (2022-12-02) [2025-07-06]. <https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/91308beffd944819a78b01d9c669195>.
- [17] 尧桂龙. 老旧住宅小区高品质饮用水建设中生消合用问题及解决对策[J]. 建筑给水, 2023, 11(2): 108-115.
- YAO G L. Research on the problems and countermeasures of combined water for living and fire protection water supply in the construction of high-quality drinking water in old residential quarters [J]. Building Water Conservation, 2023, 11(2): 108-115.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 二次供水设施卫生规范: GB 17051—2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Hygienic specification for facilities of secondary water supply: GB 17051—2025 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

(上接第 34 页)

- [62] KASIM K, LEVALLOIS P, JOHNSON K C, et al. Chlorination disinfection by-products in drinking water and the risk of adult leukemia in Canada [J]. American Journal of Epidemiology, 2006, 163(2): 116-126.
- [63] KUKKULA M, LÖFROTH G. Chlorinated drinking water and pancreatic cancer: A population-based case-control study [J]. European Journal of Public Health, 1997, 7(3): 297-301.
- [64] DO M T, BIRKETT N J, JOHNSON K C, et al. Chlorination disinfection by-products and pancreatic cancer risk [J]. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(4): 418-424.
- [65] 李纪宾, 邹小农. 全球癌症流行现状及环境致癌因素解析 [J]. 环境卫生学杂志, 2023, 3(11): 795-803.
- LI J B, ZOU X N. Global cancer epidemic status and its environmental carcinogenic factors [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 3(11): 795-803.
- [66] 洪涵璐, 赵伟, 尹金宝. 饮用水消毒副产物基因毒性与致癌性研究进展 [J]. 环境监控与预警, 2020, 5(12): 36-48.
- HONG H L, ZHAO W, YI J B. A review on the genotoxicity and carcinogenicity of disinfection by-products in drinking water [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2020, 5(12): 36-48.