

江苏省南京市饮用水中 *N*-亚硝基二甲胺健康风险评价

郑雨虹, 李登昆, 陈春静, 刘祥萍, 熊丽林

南京市疾病预防控制中心, 江苏 南京 210003



DOI 10.11836/JEOM21586

摘要:

[背景] *N*-亚硝基二甲胺(NDMA)作为新型饮用水消毒副产物,因其较高的检出率和浓度而引起广泛关注。

[目的] 了解我国长江流域下游南京段饮用水中 NDMA 浓度,并进行健康风险评价。

[方法] 于 2021 年枯水期(1—3 月)和丰水期(7—9 月),采集南京市 16 家集中供水单位的水源水、出厂水及末梢水,采用固相萃取-大体积程序升温进样气相色谱-三重四级杆质谱联用技术测定水样中 NDMA 的质量浓度(后简称为浓度)。分析不同水样类型、水期和消毒方式的水样中 NDMA 浓度,计算不同暴露途径和不同暴露人群饮用水中 NDMA 的日均暴露量和致癌风险值。采用 Crystal Ball 11 软件实现蒙特卡罗模拟,建立健康风险评价模型,同时进行敏感性分析。

[结果] 共采集南京市生活饮用水水样 61 份,所有水样均检出 NDMA,浓度范围为 1.36~25.65 ng·L⁻¹,平均浓度为(8.00±4.06) ng·L⁻¹。水源水、出厂水、末梢水三组水样中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义($F=2.875, P=0.064$),丰水期、枯水期水样中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义($t=-0.855, P=0.397$),液氯、次氯酸钠、二氧化氯三种不同消毒方式的出厂水中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义($F=0.977, P=0.385$)。健康风险评价结果显示,经口摄入饮用水 NDMA 致癌风险均值为 5.95×10^{-6} , P_{95} 为 1.12×10^{-5} ,而经皮肤接触的致癌风险均值和 P_{95} 均低于 1.00×10^{-6} 。儿童、青少年、成人饮用水 NDMA 暴露的致癌风险均值分别为 1.84×10^{-6} 、 8.27×10^{-7} 和 3.28×10^{-6} 。敏感性分析结果显示,日均饮水量和饮用水中 NDMA 浓度对健康风险的贡献率较大,体重对风险值的贡献为负。

[结论] 长江流域下游南京段饮用水中 NDMA 存在潜在的致癌风险,但在可接受范围内。

关键词: 饮用水; *N*-亚硝基二甲胺; 健康风险评价; 蒙特卡罗模拟

Health risk assessment of *N*-nitrosodimethylamine in drinking water in Nanjing, Jiangsu Province ZHENG Yuhong, LI Dengkun, CHEN Chunjing, LIU Xiangping, XIONG Lilin (Nanjing Center for Disease Prevention and Control, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract:

[Background] *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), a new disinfection by-product in drinking water, has attracted extensive attention due to its high detection rate and concentration.

[Objective] To investigate the concentration of NDMA in drinking water in Nanjing situated in the lower Yangtze River Basin of China, and to evaluate associated human health risk.

[Methods] In dry period (January–March) and wet period (July–September) of 2021, raw water, finished water, and tap water from 16 centralized water treatment plants in Nanjing were collected to detect the concentration of NDMA in water samples by solid phase extraction and gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry with programmable temperature vaporizer-based large volume injection. The concentrations of NDMA in water samples of different water types, water periods, and disinfection methods were analyzed, and the daily exposure levels and carcinogenic risk values of NDMA in drinking water of different exposure routes and different exposed populations were calculated. Monte Carlo simulation was implemented with Crystal Ball 11 software to establish a health risk assessment model and conduct sensitivity analysis.

[Results] A total of 61 drinking water samples were collected in Nanjing, and NDMA was positive in all the water samples, with concentrations ranging from 1.36 to 25.65 ng·L⁻¹ and an overall

基金项目

南京市卫生科技发展专项资金项目 (YKK19124, YKK19126)

作者简介

郑雨虹(1993—),女,硕士,医师;
E-mail: 2512057378@qq.com

通信作者

李登昆, E-mail: 350386058@qq.com

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-12-12

录用日期 2022-07-08

文章编号 2095-9982(2022)08-0890-06

中图分类号 R123

文献标志码 A

引用

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价[J].环境与职业医学,2022,39(8):890-894,901.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21586

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LI Dengkun, E-mail: 350386058@qq.com

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2021-12-12

Accepted 2022-07-08

To cite

ZHENG Yuhong, LI Dengkun, CHEN Chunjing, 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, 901.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21586

average concentration of $(8.00 \pm 4.06) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. There were no statistically significant differences in the average concentrations of NDMA among raw water, finished water, and tap water samples ($F=2.875$, $P=0.064$), between wet season and dry season ($t=-0.855$, $P=0.397$), or among different disinfection methods by liquid chlorine, sodium hypochlorite, and chlorine dioxide ($F=0.977$, $P=0.385$). The results of health risk assessment showed that the average carcinogenic risk of NDMA and its P_{95} were 5.95×10^{-6} and 1.12×10^{-5} respectively for oral intake of drinking water, and the values for dermal contact were both lower than 1.00×10^{-6} . The mean carcinogenic risks of exposure to drinking water NDMA in children, adolescents, and adults were 1.84×10^{-6} , 8.27×10^{-7} , and 3.28×10^{-6} , respectively. The results of sensitivity analysis showed that the contributions of daily drinking water volume and NDMA concentration in drinking water to the calculated health risk were high, and the contribution of body weight was negative.

[Conclusion] There is a potential carcinogenic risk of NDMA in the drinking water of Nanjing section of the lower Yangtze River Basin, but it is within the acceptable range.

Keywords: drinking water; *N*-Nitrosodimethylamine; health risk assessment; Monte Carlo simulation

亚硝胺作为一类新型饮用水消毒副产物,因其毒性较高,近年来引起了广泛关注。其中,*N*-亚硝基二甲胺(*N*-nitrosodimethylamine, NDMA)检出率和浓度最高^[1-2]。据美国环境保护署估计,饮用水中NDMA质量浓度(后简称为浓度)为 $0.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,终身致癌风险为 10^{-6} ^[3]。然而,目前只有部分国家和地区或组织对饮用水中NDMA限值进行了规定^[4-8]。据调查,中国出厂水和末梢水中NDMA污染比美国更为严重,NDMA在我国的检出率为37%,是美国的3.6倍,平均浓度高达 $32 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9]。

由于我国对饮用水中亚硝胺类消毒副产物调研起步较晚,对NDMA的暴露情况分析和健康风险评估不够充分,现行的GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》未将NDMA纳入监管控制之中。本研究采集南京市集中供水单位的水源水、出厂水及末梢水,检测饮用水中NDMA浓度,了解我国长江流域下游南京段饮用水中NDMA的污染现状分析可能的影响因素,评估其健康风险,为加强我国饮用水NDMA的卫生监测及管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 水样的采集与测定

按照GB/T 5750—2006《生活饮用水标准 检验方法》对南京市16家生活饮用水集中供水单位进行采样,消毒方式主要有液氯、次氯酸钠及二氧化氯消毒。本研究采集的水样类型包括水源水、出厂水及末梢水,采样时间为2021年的枯水期(1—3月)和丰水期(7—9月)。采样时,水样中加入硫代硫酸钠作为保存剂,冷藏避光,于当日送至实验室,置于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存,14 d内分析。

采用固相萃取-大体积程序升温进样气相色谱-三重四级杆质谱联用技术测定水样中NDMA的水平。NDMA在 $1 \sim 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内线性关系良好,相关系数

(r^2)大于0.999,回收率为94.8%~103%,相对标准偏差为5.98%~6.92%,定量限为 $0.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。该法灵敏、准确、简单、可靠,适用于饮用水中NDMA的痕量检测^[10]。

1.2 暴露评定

由于生理和行为的差异,本研究将人群分为三个年龄组:儿童(0~10岁)、青少年(11~20岁)和成人(21~72岁)^[11]。人体暴露于饮用水NDMA的途径主要有经口摄入和经皮肤接触,这两种途径的平均日暴露量计算公式分别如式(1)和式(2):

$$m_{\text{LADD}_{\text{oral}}} = \frac{\rho m_{\text{IR}} f_{\text{EF}} t_{\text{ED}} \times 10^{-6}}{m_{\text{BW}} t_{\text{AT}}} \quad (1)$$

$$m_{\text{LADD}_{\text{dermal}}} = \frac{\rho S K_{\text{p}} f t_{\text{ET}} f_{\text{EF}} t_{\text{ED}} \times 10^{-9}}{m_{\text{BW}} t_{\text{AT}}} \quad (2)$$

其中: $m_{\text{LADD}_{\text{oral}}}$ 和 $m_{\text{LADD}_{\text{dermal}}}$ 分别是经口摄入和经皮肤接触的每日饮用水NDMA暴露量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); ρ 为末梢水中NDMA浓度($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$); m_{IR} 为日均饮水量($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$); f_{EF} 为暴露频率($\text{d} \cdot \text{年}^{-1}$); t_{ED} 为暴露持续时间(年); s 为皮肤表面积(cm^2); K_{p} 皮肤渗透性常数($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); f 为皮肤与水接触的比例; t_{ET} 为淋浴时间($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$); m_{BW} 是体重(kg); t_{AT} 是平均时间(d)。

1.3 健康风险评估

对每日饮用水中NDMA癌症风险的评估,计算公式(3)、(4)、(5)如下:

$$R_{\text{CR}_{\text{oral}}} = m_{\text{LADD}_{\text{oral}}} f_{\text{CSF}_{\text{oral}}} \quad (3)$$

$$R_{\text{CR}_{\text{dermal}}} = m_{\text{LADD}_{\text{dermal}}} f_{\text{CSF}_{\text{dermal}}} \quad (4)$$

$$R_{\text{CR}} = R_{\text{CR}_{\text{oral}}} + R_{\text{CR}_{\text{dermal}}} \quad (5)$$

其中: $m_{\text{LADD}_{\text{oral}}}$ 和 $m_{\text{LADD}_{\text{dermal}}}$ 分别是经口摄入和经皮肤接触的每日饮用水NDMA暴露量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); $R_{\text{CR}_{\text{oral}}}$ 和 $R_{\text{CR}_{\text{dermal}}}$ 分别是经口摄入和经皮肤接触的每日饮用水NDMA致癌风险; $f_{\text{CSF}_{\text{oral}}}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)为经口摄入致癌斜率因子,NDMA的 $f_{\text{CSF}_{\text{oral}}}$ 为 $51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $f_{\text{CSF}_{\text{dermal}}}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)为经皮肤接触致癌斜率因子,NDMA的 $f_{\text{CSF}_{\text{dermal}}}$ 为 $51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

根据美国环境保护署, 致癌效应低于 1.00×10^{-6} , 认为风险不明显, 可以忽略; 在 $1.00 \times 10^{-6} \sim 1.00 \times 10^{-4}$ 范围, 表明存在潜在的致癌风险, 但尚可接受; 高于 1.00×10^{-4} , 表明存在较大风险, 不可接受。第 95 百分位值是合理的最大暴露 (reasonable maximum exposure, RME), 决策者经常将第 95 百分位数的 R_{CR} 作为风险管理的参考, 若 RME 超出可接受风险, 表明污染严重。

1.4 蒙特卡罗模拟

人体健康风险评估中环境暴露参数和人群暴露参数存在不确定性, 为降低点估计的不确定性对评估的影响, 本研究采用蒙特卡罗模拟进行概率风险评估。蒙特卡罗模拟方法是一种基于统计抽样技术的计算机方法, 用于估计数学模型解的概率近似。本研究采用 Crystal Ball 11 软件进行 10000 次迭代的蒙特卡罗模拟分析, 获得饮用水中 NDMA 暴露的健康风险概率分布。

1.5 敏感性分析

用不同国家暴露参数获得的癌症风险存在较大差异, 有研究表明, 使用中国暴露参数计算的 5 种亚硝胺的总摄入致癌风险是使用美国暴露参数计算的 2.5 倍^[12]。因此, 为了减少分布因素造成的评估不确定性, 本研究主要是基于中国暴露参数^[11](见表 1) 进行风险评估。同时, 使用 Crystal ball 11 软件对体重、日均饮水量、饮用水中 NDMA 的浓度等参数进行敏感性分析, 评估不同参数对健康风险值的影响, 确定各参数在健康风险评估中的贡献率。

表 1 健康风险评估模型的输入参数

参数	单位	分布类型(数值)
NDMA 浓度, ρ	ng·L ⁻¹	Beta 分布(1.94, 12.65, 1.56, 1.76)
日均饮水量, m_{IR}	L·d ⁻¹	儿童: 正态分布(1.25, 0.57) 青少年: 正态分布(1.58, 0.69) 成人: 正态分布(1.95, 0.64)
暴露频率, f_{EF}	d·年 ⁻¹	三角分布(180, 345, 365)
暴露持续时间, t_{ED}	年	儿童: 点分布(6) 青少年: 点分布(6) 成人: 点分布(24)
平均时间, t_{AT}	d	点分布(26280)
体重, m_{BW}	kg	儿童: 对数正态分布(16.68, 1.48) 青少年: 对数正态分布(46.25, 1.18) 成人: 对数正态分布(57.03, 1.10)
皮肤表面积, S	cm ²	儿童: 对数正态分布(7422, 1.25) 青少年: 对数正态分布(14321, 1.18) 成人: 对数正态分布(18182, 1.10)
皮肤渗透性常数, $K_p^{[13]}$	cm·h ⁻¹	点分布(2.5×10^{-4})
皮肤与水接触的比例, f	—	均一分布(0.4, 0.9)
淋浴时间, t_{ET_s}	h·d ⁻¹	对数正态分布(0.13, 0.0085)

1.6 统计学分析

采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析。对数据进行正态分布检验和方差齐性检验, NDMA 的浓度使用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 两组间比较采用 t 检验, 多组间比较采用方差分析。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 NDMA 的检出情况

采集水样共 61 份, 包括水源水 19 份、出厂水 24 份、末梢水 18 份。不同消毒方式的水样共 42 份, 其中液氯消毒 26 份、次氯酸钠消毒 11 份、二氧化氯消毒 5 份。采集的水样中均检出 NDMA, 浓度范围为 $1.36 \sim 25.65$ ng·L⁻¹, 平均浓度为 (8.00 ± 4.06) ng·L⁻¹。水源水、出厂水、末梢水三组水样中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义 ($F=2.875, P=0.064$), 丰水期、枯水期水样中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义 ($t=-0.855, P=0.397$), 液氯、次氯酸钠、二氧化氯三种不同消毒方式的出厂水中 NDMA 平均浓度差异无统计学意义 ($F=0.977, P=0.385$)。见表 2。

表 2 不同水样类型、水期、消毒方式的水样中 NDMA 浓度
Table 2 NDMA concentrations in water samples categorized by water sample types, water periods, and disinfection methods

分组	n	NDMA 浓度/(ng·L ⁻¹)		F/t	P
		$\bar{x} \pm s$	最小值 最大值		
水样类型				2.875	0.064
水源水	19	9.80±4.61*	2.87 25.65		
出厂水	24	7.35±4.03	1.36 15.75		
末梢水	18	6.97±2.57*	2.97 11.65		
水期				-0.855	0.397
丰水期	34	8.38±4.93	1.36 25.65		
枯水期	27	7.53±2.48	2.71 11.93		
消毒方式				0.977	0.385
液氯	26	7.23±3.95	1.99 15.75		
次氯酸钠	11	7.89±4.17	1.36 13.47		
二氧化氯	5	6.84±3.93	2.55 12.52		

2.2 NDMA 的暴露水平和健康风险评估

不同暴露途径下饮用水 NDMA 致癌风险值如表 3 所示。经口摄入饮用水 NDMA 的暴露量超过经皮肤接触饮用水 NDMA 的暴露量, 说明经口摄入是 NDMA 暴露的主要途径。经口摄入饮用水 NDMA 致癌风险均值为 5.95×10^{-6} , P_{95} 为 1.12×10^{-5} , 表明存在潜在致癌风险, 但在可接受范围之内; 而通过皮肤接触的致癌风险均值和 P_{95} 均低于 1.00×10^{-6} , 表明致癌风险不明显。

不同暴露人群中饮用水 NDMA 致癌风险值如表 4

所示。儿童、成人饮用水 NDMA 暴露致癌风险值均在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$, 表明存在潜在致癌风险, 但在可接受范围之内; 青少年饮用水 NDMA 暴露致癌风险值

为 8.27×10^{-7} , 表明致癌风险不明显。儿童、青少年、成人以及全生命周期暴露于饮用水 NDMA 的致癌风险的 P_{95} 均在可接受范围之内 ($1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$)。

表 3 不同暴露途径下 NDMA 的暴露水平和致癌风险

Table 3 Exposure levels and carcinogenic risks of NDMA via selected exposure routes

暴露途径	每日饮用水NDMA暴露量/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)			每日饮用水NDMA致癌风险		
	平均值	中位数	P_{95}	平均值	中位数	P_{95}
经口	1.17×10^{-7}	1.09×10^{-7}	2.20×10^{-7}	5.95×10^{-6}	5.56×10^{-6}	1.12×10^{-5}
经皮肤	2.04×10^{-11}	1.88×10^{-11}	3.85×10^{-11}	1.04×10^{-9}	9.60×10^{-10}	1.96×10^{-9}
合计	1.19×10^{-7}	1.11×10^{-7}	2.24×10^{-7}	5.95×10^{-6}	5.56×10^{-6}	1.12×10^{-5}

表 4 不同人群中 NDMA 的暴露水平和致癌风险

Table 4 Exposure levels and carcinogenic risks of NDMA in different populations

人群	每日饮用水NDMA暴露量/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)			每日饮用水NDMA致癌风险		
	平均值	中位数	P_{95}	平均值	中位数	P_{95}
儿童	3.61×10^{-8}	3.17×10^{-8}	7.86×10^{-8}	1.84×10^{-6}	1.62×10^{-6}	4.01×10^{-6}
青少年	1.62×10^{-8}	1.43×10^{-8}	3.53×10^{-8}	8.27×10^{-7}	7.30×10^{-7}	1.80×10^{-6}
成人	6.44×10^{-8}	5.88×10^{-8}	1.29×10^{-7}	3.28×10^{-6}	3.00×10^{-6}	6.57×10^{-6}
全生命周期	1.17×10^{-7}	1.05×10^{-7}	2.43×10^{-7}	5.95×10^{-6}	5.35×10^{-6}	1.24×10^{-5}

2.3 敏感性分析

通过敏感性分析, 研究体重、暴露频率、NDMA 等参数变化对健康效应的影响程度, 结果如图 1 所示。对于经口摄入, 日均饮水量对儿童和青少年健康风险的贡献率最大, 相关系数均在 0.5 以上, 其次是饮用水中 NDMA 浓度, 相关系数在 0.3 以上; 而在成人中, 饮

用水中 NDMA 浓度是对风险评估结果影响最大的变量(0.88)。对于经皮肤接触, 暴露频率是三个年龄组人群中风险评估结果影响最大的变量(0.65~0.80)。另外, 发现体重对风险值的贡献为负, 且在儿童中相关性最高, 表明体重较轻的人群面临的健康风险比体重较重的人群更高。

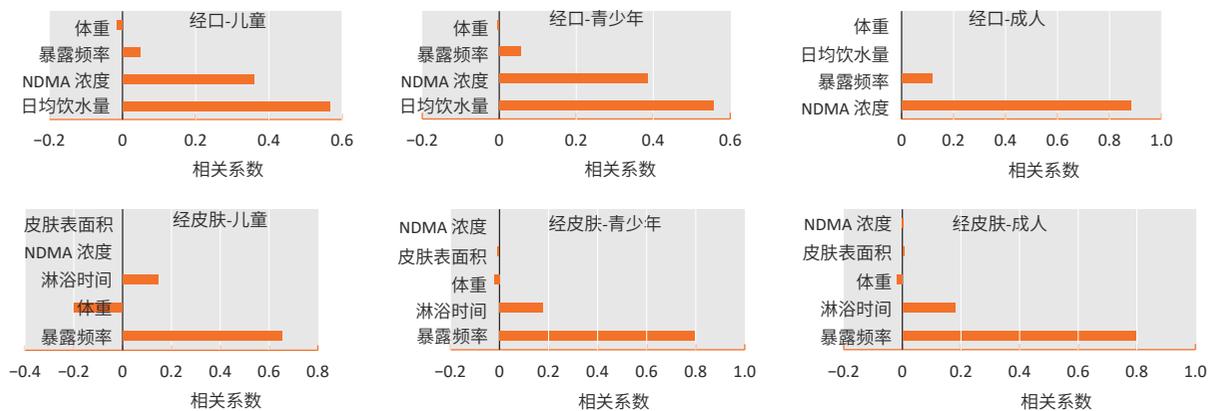


图 1 不同人群通过不同途径暴露于饮用水中 NDMA 致癌风险模型的敏感性分析

Figure 1 Sensitivity analysis of NDMA carcinogenic risk models in different populations exposed to drinking water via different exposure routes

3 讨论

自 1989 年, NDMA 作为饮用水消毒副产物在加拿大南安大略省的一座水厂被检出后^[14], 关于饮用水中的 NDMA 检测和研究相继在国内外开展起来。对加拿大

阿尔伯塔省 20 个城市输水管网的调查显示, NDMA 的浓度高达 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[15]。对美国 50 个州的原水和饮用水调查结果表明, NDMA 平均浓度为 $9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[16]。日本对原水和饮用水中 NDMA 的全国性调查表明, 出厂水

NDMA 浓度高达 $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17]。就国内而言,华东、华南、华北出厂水中 NDMA 平均浓度较高,分别为 9、7.1、 $5.4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,西北、东北和西南地区出厂水中 NDMA 浓度较低,分别为 3.6、4.2、 $2.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[18]。本研究中 NDMA 平均浓度为 $8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于美国加州卫生部制定的限值 $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,但高于加州提出的 $3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 公共卫生目标^[19]。

NDMA 在水体中的浓度与采样季节、水源类型、水源污染状况、水处理工艺、检测方法、地区经济水平和地理条件等因素有关^[20]。有研究表明,来自河流水源的 NDMA 平均浓度高于地下水源,可能是因为工业废水、生活污水、污水处理厂的废水和可溶性微生物等对河流水源的污染,导致水体中 NDMA 前体的含量较高^[21]。本研究水源水中 NDMA 浓度偏高,说明原水可能已经受到 NDMA 的污染。不同饮用水消毒方式也影响水体中 NDMA 浓度,在 NDMA 前体存在的情况下,氯胺化比氯化法和臭氧化产生更多 NDMA^[22]。一些先进的处理技术,如生物活性炭和紫外线处理可以降低 NDMA 前体的浓度^[23]。本研究不同消毒方式间差异无统计学意义,可能是因为南京市水厂主要采用氯化(ClO^-)和二氧化氯消毒方式,其产生的 NDMA 消毒副产物相对于氯胺消毒方式均较少。另外,水体中 NDMA 浓度与 pH 和水温有关,pH 为 8~9 时,温度与 NDMA 形成呈负相关,pH 为 7 时,温度与 NDMA 形成呈正相关^[24]。不同采样水期(丰、枯水期)差异无统计学意义,可能是缺乏长时间的连续监测,导致饮用水中 NDMA 时间特异性分析受限。

健康风险评价结果显示,南京市集中供水单位管网末梢水 NDMA 的平均致癌风险均值为 5.95×10^{-6} , P_{95} 为 1.12×10^{-5} ,提示存在潜在致癌风险,但在可接受范围内。其中,经口摄入饮用水 NDMA 的致癌风险明显高于经皮肤接触吸收的风险,这可能归因于 NDMA 具有较低的皮肤渗透系数。关于饮用水 NDMA 致癌效应,其他地区也进行了相应的研究,包括河南省嘉鲁河流域(1.36×10^{-5})^[25]、台湾地区(3.2×10^{-6})^[26]、松花江流域(1.6×10^{-5})^[21]和浙江省绍兴市(1.0×10^{-5})^[12]。尽管不同地区的 NDMA 健康效应值有所不同,但这些研究的结果都表明,中国应对饮用水中的 NDMA 进行管制。

本研究存在一定的局限性:首先,仅检测了生水水中的 NDMA,未考虑蒸煮或烹饪对 NDMA 浓度的影响,有研究表明,煮沸后的水中 NDMA 浓度下降^[27],因此本研究结果可能低于实际情况;其次,由于空气中的 NDMA 浓度较难检测,本研究只考虑了经口摄入和经皮肤接触,未考虑呼吸途径;另外,风险评估过程中会

存在一定的不确定性,比如个人饮用习惯的不同(使用净水器、饮用开水或只饮用瓶装水等);最后,由于缺少对二、四季度以及距离水厂不同远近位置的采样,导致对 NDMA 时空变异性分析受限。

综上,本研究结果表明长江流域下游南京段饮用水中 NDMA 平均浓度接近全国平均水平,存在潜在的致癌风险,但在可接受范围内;应从源头上控制 NDMA 对原水的污染,同时不断优化水处理工艺以降低管网末梢水中 NDMA 的浓度。

参考文献

- [1] CHEN WH, WANG CY, HUANG TH. Formation and fates of nitrosamines and their formation potentials from a surface water source to drinking water treatment plants in Southern Taiwan[J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 546-554.
- [2] ZHAO YY, BOYD JM, WOODBECK M, et al. Formation of *N*-nitrosamines from eleven disinfection treatments of seven different surface waters[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(13): 4857-4862.
- [3] US EPA. *N*-Nitrosodimethylamine[EB/OL]. [2021-10-13] https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=45.
- [4] Government of Ontario. Ontario Drinking Water Quality Standards, O Reg 169/03[EB/OL]. [2021-10-13] <https://canlii.ca/t/54501>.
- [5] Massachusetts Department of Environmental Protection. Current regulatory limit: *n*-nitrosodimethylamine (NDMA)[EB/OL]. [2021-10-13] <https://semspub.epa.gov/work/01/485600.pdf>.
- [6] California Department of Public Health. NDMA and Other Nitrosamines—Drinking Water Issues, 2011[EB/OL]. [2021-10-13] <https://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Pages/NDMA.aspx>.
- [7] Health Canada. Guidelines for Canadian drinking water quality: guideline technical document: *N*-nitrosodimethylamine (NDMA)[R]. Catalogue No. H128-1/11-662E, Ottawa, Ontario: Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2011.
- [8] WHO. *N*-Nitrosodimethylamine in drinking-water. Background document for development of WHO *Guidelines for Drinking-water Quality*[R]. Geneva: WHO, 2008.
- [9] BEI E, SHU Y, LI S, et al. Occurrence of nitrosamines and their precursors in drinking water systems around mainland China[J]. *Water Res*, 2016, 98: 168-175.
- [10] 李登昆,张云,刘祥萍,等.固相萃取-大体程序升温进样气相色谱-三重四极杆串联质谱测定饮用水中3种挥发性 N -亚硝胺[J].*色谱*, 2019, 37(2): 216-221.
LI DK, ZHANG Y, LIU XP, et al. Determination of three volatile *N*-nitrosamine in drinking water by solid phase extraction and gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry with programmable temperature vaporizer-based large volume injection[J]. *Chin J Chromatogr*, 2019, 37(2): 216-221.
- [11] ZHANG L, HUANG D, YANG J, et al. Probabilistic risk assessment of Chinese residents' exposure to fluoride in improved drinking water in endemic fluorosis areas[J]. *Environ Pollut*, 2017, 222: 118-125.
- [12] YIN Y, LI T, KUANG D, et al. Probabilistic health risk assessment of nitrosamines in drinking water of Shaoxing, Zhejiang, China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2019, 26(6): 5485-5499.

(下转第 901 页)