

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.006

# 饮用水中三卤甲烷健康风险和净水器净化能力评价

顾 昕, 翟洪艳, 柏 慧

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘 要:** 对天津市两个供水区域内家用净水器和公共直饮水净水器的使用情况和进出水水质[总大肠菌群、总有机碳(TOC)以及游离余氯、总氯和三卤甲烷(THMs)]进行调查研究,发现净水器进出水内均无总大肠菌群检出,而且家用净水器对游离余氯、总氯、TOC和THMs的净化能力明显优于公共直饮水净水器。30%家用净水器对TOC的去除率达到80%以上,90%家用净水器对游离余氯的去除率达到100%,80%家用净水器对THMs的去除率达到75%以上;80%公共直饮水净水器对TOC的去除率均低于30%,50%公共直饮水净水器对游离余氯的去除率达到100%,40%公共直饮水净水器对THMs的去除率达到50%以上。反渗透净水器对TOC、游离余氯、总氯和THMs的去除效果较超滤净水器更佳。THMs的致癌风险和非致癌风险评价结果表明,饮用水中4种THMs的致癌风险和非致癌风险排序均为二氯一溴甲烷>三氯甲烷>一氯二溴甲烷>三溴甲烷。家用净水器对THMs致癌风险和非致癌风险的控制效果均优于公共直饮水净水器。

**关键词:** 饮用水; 家用净水器; 公共直饮水; 三卤甲烷; 健康风险

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0031-07

## Health Risk Assessment of Trihalomethanes in Drinking Water and Purification Efficiency of Water Purifiers

GU Xin, ZHAI Hong-yan, BAI Hui

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The usage and influent and effluent water quality [total coliforms, total organic carbon (TOC), free residual chlorine, total chlorine and trihalomethanes (THMs)] of household water purifiers and public drinking water purifiers in two water supply areas in Tianjin were investigated. No coliform was detected in influent and effluent of the purifiers. Compared to public drinking water purifiers, household water purifiers showed better removal efficiencies of free residual chlorine, total chlorine, TOC, and THMs. For household water purifiers, the removal efficiency of TOC from 30% of the purifiers reached above 80%, the removal efficiency of free residual chlorine from 80% of the purifiers reached 100%, and the removal efficiency of THMs from 80% of the purifiers reached above 75%. For public drinking water purifiers, the removal efficiency of TOC from 80% of the purifiers was lower than 30%, the removal efficiency of free residual chlorine from 50% of the purifiers reached 100%, and the removal efficiency of THMs from 40% of the purifiers reached above 50%. Moreover, water purifiers with reverse

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401107)

通信作者: 翟洪艳 E-mail: zhaihy@tju.edu.cn

osmosis membrane exhibited higher removal efficiencies of TOC, free residual chlorine, total chlorine and THMs than those of purifiers with ultrafiltration membrane. According to analysis results of the health risk model of THMs, the order of carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of four THMs was BDCM (bromodichloromethane) > TCM (trichloromethane) > DBCM (dibromochloromethane) > TBM (tribromomethane). The control effect of carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of household water purifiers was better than those of public drinking water purifiers.

**Key words:** drinking water; household water purifier; public drinking water; trihalomethanes; health risk

由于人们对饮用水的安全问题日益重视,近20年来净水器在我国迅速普及<sup>[1]</sup>。净水器的主要净化技术包括以活性炭为主的吸附法处理技术,以微滤、超滤、反渗透为主的膜法处理技术以及以物化消毒为主的除菌处理技术等<sup>[2]</sup>,市场上常见的净水器类型主要分为超滤和反渗透净水器,理论上这些净水器可以有效去除自来水中的固体悬浮物、有机污染物、余氯、重金属、细菌、病毒、藻类等,并且可以改善口感<sup>[3]</sup>。已有研究发现,净水器运行初期,出水总有机质(TOC)含量较进水明显降低<sup>[4]</sup>;反渗透膜对卤代乙酸的去除率为16%~44%<sup>[5]</sup>,超滤膜对卤代甲烷的去除率为17%~33%<sup>[6]</sup>;对Na、K和Cl的去除率分别为30.6%、34.9%和53%<sup>[7]</sup>。然而在实际应用中,由于水源差异、净水器净化技术或品牌差异、用户使用不规范等问题,净水器实际净化效果还有待进一步调查,也有研究表明净水器运行12个月后处理效率降低<sup>[7]</sup>。

笔者调研了天津市两个供水区域内的家用和公共场所净水器的使用情况,定量检测进出水中总大肠菌群、游离余氯、TOC,以及典型的有致癌风险的有机污染物,即消毒副产物三卤甲烷(THMs),包括三氯甲烷(TCM)、二氯一溴甲烷(BDCM)、一氯二溴甲烷(DBCM)和三溴甲烷(TBM)。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 水样采集

采样地点为天津市的两个供水区域,南开区(N区)和津南区(J区),调研对象20个(10个家庭用户和10个公共场所),其中N区用户楼龄为5~30年,J区用户楼龄为3~5年。样品编号和净水器基本信息等见表1。采样前,先对取水口的水龙头进行消毒处理,再将水龙头放水2~3 min,现场进行pH值、游离余氯及总氯的测定,然后用无菌瓶收集水样,最后将水样立即带回实验室加入硫代硫酸钠

以淬灭消毒剂,并进行其他分析。

表1 家用净水器和公共直饮水净水器基本信息

Tab. 1 Information of water quality of household and public water purifiers

项 目	出水 pH 值	水温 /℃	项 目	出水 pH 值	水温 /℃
JH-1 <sub>a</sub>	7.84	18.6	JP-1 <sub>b</sub>	7.63	21.3
JH-2 <sub>b</sub>	6.47	21.2	JP-2 <sub>b</sub>	7.36	18.9
JH-3 <sub>b</sub>	7.49	18.6	JP-3 <sub>b</sub>	7.46	24.0
NH-4 <sub>b</sub>	7.31	20.3	JP-4 <sub>b</sub>	6.70	24.6
NH-5 <sub>a</sub>	7.59	19.0	JP-5 <sub>a</sub>	7.69	20.0
NH-6 <sub>a</sub>	7.07	18.6	NP-6 <sub>b</sub>	7.52	19.4
NH-7 <sub>b</sub>	7.62	24.6	NP-7 <sub>b</sub>	7.71	20.3
NH-8 <sub>b</sub>	6.91	24.2	JP-8 <sub>a</sub>	7.42	20.0
NH-9 <sub>b</sub>	7.49	24.9	JP-9 <sub>a</sub>	7.69	19.6
NH-10 <sub>b</sub>	6.95	25.3	JP-10 <sub>a</sub>	7.58	20.2

注: J为J区,N为N区,H为家用净水器,P为公共直饮水净水器,a为反渗透净水器,b为超滤净水器;总大肠菌群为阴性且未检出。

### 1.2 分析项目及方法

pH值采用便携式pH计(HACH 6010M)现场测定;游离余氯、总氯均采用DPD分光光度法现场测定(HACH DR900);总大肠菌群采用多管发酵法检测;TOC采用TOC测量仪(岛津TOC-V)检测。依据EPA551.1检测三卤甲烷,液液萃取后进行带电子捕获器的气相色谱(GC-ECD,安捷伦7890B)测定,GC-ECD分析条件:进样体积为1 μL;模式分流,分流比为10:1;流量为1 mL/min;进样口温度为200℃;柱温为350℃。THMs检测条件:程序升温60℃(4 min,10℃/min)→160℃(10 min,10℃/min)→200℃(6 min)。

### 1.3 健康风险评估方法

根据EPA推荐的健康风险评估模型,结合《中国人群暴露参数手册》(成人卷、儿童卷)<sup>[8-9]</sup>,分别评价经口摄取途径时水中化学致癌物质的健康风险

和非致癌物质的健康风险<sup>[10]</sup>。

经口暴露日均摄入量 CDI、单项致癌风险  $R_i$ 、总致癌风险 TR、非致癌风险  $HQ_i$ 、总非致癌风险 THQ 的计算分别见式(1)~(5)。

$$CDI = \frac{C_w \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$R_i = SF \times CDI \quad (2)$$

$$TR = \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

$$HQ_i = \frac{CDI}{RfD} \quad (4)$$

$$THQ = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (5)$$

式中: $C_w$  为目标污染物的质量浓度, mg/L; IR 为饮用水摄入量, 成人取 1.85 L/d、儿童取 1.00 L/d; EF 为暴露频率, 取值为 365 d/年; ED 为暴露持续时间, 成人取 70 年、儿童取 12 年; BW 为暴露人群体重质量, 成人取 60.9 kg、儿童取 26.8 kg; AT 为平均接触时间, 成人取 25 550 d、儿童取 4 380 d; SF 是由动物推导出的人的致癌强度系数, TCM、BDCM、DBCM 和 TBM 的 SF 值分别为 0.01、0.062、0.008 4 和 0.007 9 mg/(kg·d); RfD 为非致癌化合物的日均暴露参考剂量, TCM、BDCM、DBCM 和 TBM 的 RfD 值分别为 0.01、0.02、0.02、0.02 mg/(kg·d)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 净水器的使用情况

家庭用户的净水器中超滤净水器占 70%、反渗透净水器占 30%, 均安装在厨房水池下方的橱柜中。调研用户中 90% 以上经常使用净水器, 净水器出水均煮沸后饮用, 67% 的用户将其作为做饭用水, 42% 的用户还将其用来洗漱。净水器出水无色无味, 大多数用户认为其水质较好。66.67% 的用户更换过净水器的滤芯, 其中仅有 25% 的用户做到 3 个月更换 1 次滤芯, 有 8% 左右的用户会对净水器进行消毒。

公共直饮水净水器中超滤净水器占 60%、反渗透净水器占 40%, 仅 20% 的公共净水器更换过滤芯, 其中仅 10% 的净水器 3 个月更换 1 次滤芯、10% 的净水器 6 个月更换 1 次滤芯。

### 2.2 净水器进出水水质

#### ① TOC

进出水中 TOC 值及 TOC 的去除率如图 1 所示。全部水样的 TOC 值均小于 5 mg/L, 符合《生活饮用

水卫生标准》(GB 5749—2006)。已有研究发现, 天津市自来水厂出厂水 TOC 值约为 4.2 mg/L<sup>[11]</sup>。本研究发现 N 区自来水 TOC 值则偏高, 在 3~5 mg/L 之间, J 区的 TOC 值偏低。经过净水器净化后, 水中 TOC 浓度均有所降低, 家用净水器出水的 TOC 值在 1.5 mg/L 左右, 公共直饮水净水器出水的 TOC 值较高, 为 2.5~3.5 mg/L。在家用净水器中, 30% 净水器对 TOC 的去除率在 80% 以上, 40% 净水器对 TOC 的去除率在 30%~40% 之间, 30% 净水器对 TOC 的去除率在 30% 以下。JH-2<sub>b</sub> 和 JH-3<sub>b</sub> 的 TOC 去除率仅有 9%, 这可能是由于这两户进水的 TOC 浓度比较低(约为 2 mg/L), 其超滤净水器很难进一步降低 TOC 水平。公共直饮水净水器对 TOC 的去除率普遍较低, 只有 20% 净水器对 TOC 的去除率在 30%~45% 之间, 其余 80% 净水器的去除率均低于 30%。反渗透净水器对 TOC 的平均去除率约为 49%, 比超滤净水器约高 20%, 其中 28% 反渗透净水器对 TOC 的去除率低于 20%, 61% 超滤净水器对 TOC 的去除率低于 20%, 由此可见反渗透净水器对 TOC 的净化效果优于超滤净水器。

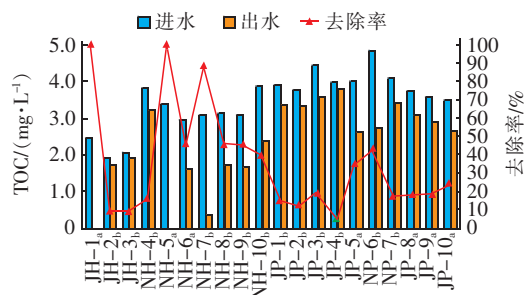


图1 净水器进出水中 TOC 浓度及其去除率

Fig. 1 TOC concentration and its removal rate of household and public water purifiers

#### ② 游离余氯浓度和微生物指标

调研的供水分区的自来水采用氯胺消毒, 根据我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006), 出厂水中总氯应不低于 0.5 mg/L、不高于 3 mg/L, 同时管网末梢水中游离余氯应不低于 0.05 mg/L。试验结果表明, 全部家庭自来水的总氯浓度均达标, 仅 4 户游离余氯浓度达标(见图 2)。经过净水器的净化处理, 90% 的净水器对原水中游离余氯达到了 100% 的去除率, 仅 1 户净水器对游离余氯的去除率为 40%, 净水器对总氯的去除率均在 70% 以上。调研的公共场所的自来水中 50% 游离余氯浓度不达

标,50%总氯浓度不达标。公用场所仅50%净水器对游离余氯的去除率达到100%,90%净水器对总氯的去除率达到了80%以上。J区自来水游离余氯浓度为0.02~0.16 mg/L、总氯为0.03~0.64 mg/L;N区自来水中余氯浓度比J区略低,但总氯的平均浓度比J区略高。超滤和反渗透两种工艺的净水器对游离余氯、总氯的去除情况差别不大,去除率均达到了80%。个别反渗透净水器(JP-5<sub>a</sub>)对游离余氯、总氯的净化效果比较差,去除率仅为33%和5.56%,根据问卷调查结果分析,可能是由于滤芯未按时更换导致净化效果降低。

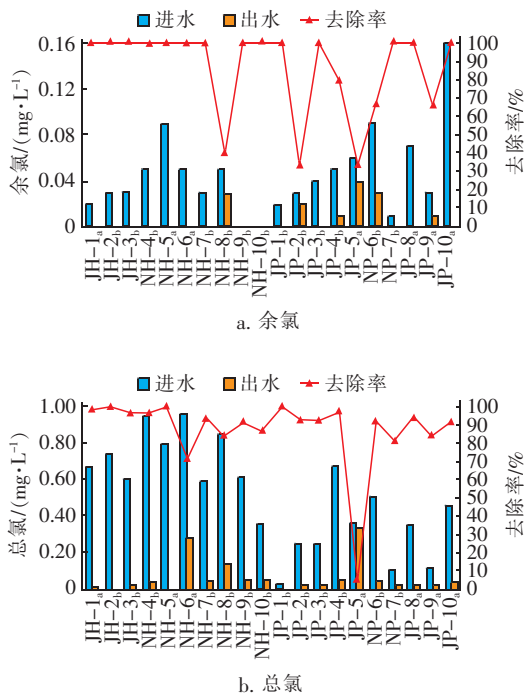


图2 净水器进水中余氯、总氯浓度及其去除率

Fig.2 Residual and total chlorine concentration and their removal rates of household and public water purifiers

由表1可知,所有水样中总大肠菌群均未检出,符合我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

### ③ THMs

自来水厂常采用氯消毒,可有效杀灭水中的病原微生物,但同时会产生氯消毒副产物。流行病学研究证明了氯化水暴露出巨大的健康风险<sup>[12]</sup>,人类长期饮用会增加膀胱癌和大肠癌的风险<sup>[13]</sup>,也会引起生殖发育能力下降,如流产、早产、胎儿发育缓慢及肥胖症等<sup>[14-18]</sup>。不同地区自来水中的THMs含量差异较大(见图3),按《生活饮用水卫生标准》

(GB 5749—2006)规定:TCM < 60 μg/L、BDCM < 60 μg/L、DBCM < 100 μg/L,全部水样均符合要求。

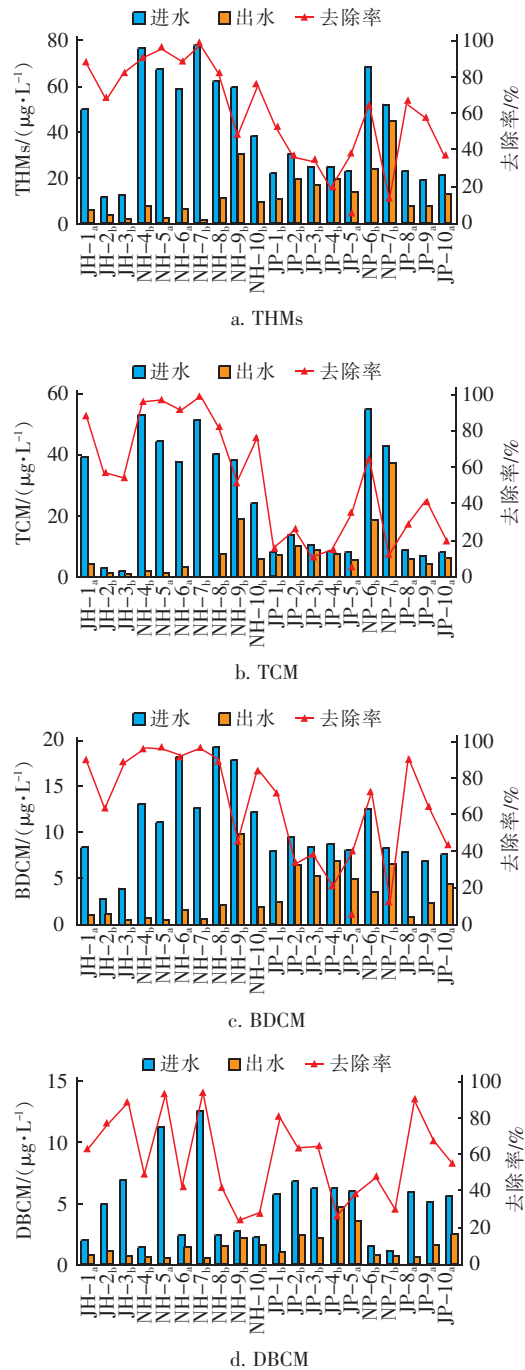


图3 净水器进水中不同THMs浓度及其去除率

Fig.3 Concentration and removal rates of THMs of household and public water purifiers

N区自来水中的THMs总浓度为38.63~78.40 μg/L,其中TCM是主要成分,占65%以上,其次是BDCM,占16%~30%。TBM在全部水样中的检出



率仅为15%,且均在N区水样中检出,浓度范围为0.77~9.34  $\mu\text{g/L}$ ,占THMs的比例均低于10%。J区自来水中THMs含量相对较低,总浓度为11.27~50.26  $\mu\text{g/L}$ ,其中以TCM和BDCM为主,分别占到THMs总量的70%以上和25%以上,但JH-2<sub>b</sub>和JH-3<sub>b</sub>的DBCM在THMs中的比例却达到了50%左右。TCM和BDCM是天津市自来水中主要消毒副产物,其浓度和所占比例均高于上海、深圳、佛山等城市<sup>[19-21]</sup>。邓瑛等研究发现,天津市夏季自来水中THMs总浓度为8.14~60.70  $\mu\text{g/L}$ ,其中TCM和BDCM为主要的THMs类型,浓度分别为4.54~23.03、2.62~22.66  $\mu\text{g/L}$ <sup>[22]</sup>。

从图3可见,80%家用净水器对THMs的去除率达到75%以上,其中NH-9<sub>b</sub>的去除率最低(为48.2%)。75%家用净水器对TCM的去除率达到75%以上,80%净水器对BDCM的去除率达到80%以上,仅40%净水器对DBCM的去除率达到75%以上。仅3户进水水样(NH-4<sub>b</sub>、NH-5<sub>a</sub>和NH-7<sub>b</sub>)检测出TBM,净水器对其去除率分别为56%、87%和100%。公共直饮水净水器中仅10%对THMs的去除率达到75%、60%净水器对THMs的去除率低于50%、70%净水器对TCM的去除率不超过30%、40%净水器对BDCM的去除率达到70%以上、20%净水器对DBCM的去除率达到75%以上。与家用净水器相比,公共直饮水净水器对THMs的去除效果较差,部分原因可能是公共场所人流量大、滤芯的过水量也远远超过家用净水器过水量,公共直饮水净水器的滤芯得不到及时更换。反渗透净水器对THMs的去除率均值约为68%,比超滤净水器高8%左右,反渗透净水器对TCM、BDCM和DBCM的去除率均值比超滤净水器高8%~11%。由此可见,反渗透净水器对THMs的净化效果优于超滤净水器。甘铁群<sup>[5]</sup>研究发现,超滤膜对THMs的去除率仅为17%~33%,本研究中超滤净水器对THMs的去除率约为59%,这是由于超滤净水器中装有PP棉、颗粒活性炭和压缩活性炭等滤芯,这些滤芯对THMs有一定的去除作用<sup>[23]</sup>,当滤芯和超滤膜联用时会提高超滤膜的净化效果。

### 2.3 饮用水中三卤甲烷的健康风险评价

#### ① 致癌风险

计算结果表明,家用净水器和公共直饮水净水器进、出水中4种消毒副产物的单项致癌风险和总

致癌风险均在美国EPA规定的范围( $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ )内或者低于 $1 \times 10^{-6}$ ,说明风险可接受或者可忽略不计。4种消毒副产物的致癌风险排序均为BDCM>TCM>DBCM>TBM。家用净水器进水、出水的致癌风险因素以BDCM为主,其次是TCM。经家用净水器净化后,TCM、BDCM和DBCM的致癌风险显著降低。公共直饮水净水器出水致癌风险主要因素是BDCM,其成人和儿童的R值分别为 $8.23 \times 10^{-6}$ 和 $1.02 \times 10^{-5}$ ,均高于家用净水器出水。如图4所示,家用净水器进水中成人和儿童的THMs总致癌风险分别为 $3.43 \times 10^{-5}$ 和 $4.24 \times 10^{-5}$ ,明显高于公共直饮水净水器进水的THMs总致癌风险;家用净水器出水中成人和儿童的总致癌风险分别为 $5.47 \times 10^{-6}$ 和 $6.63 \times 10^{-6}$ ,显著低于公共直饮水净水器出水的总致癌风险,表明家用净水器对致癌风险的控制效果明显优于公共直饮水净水器。

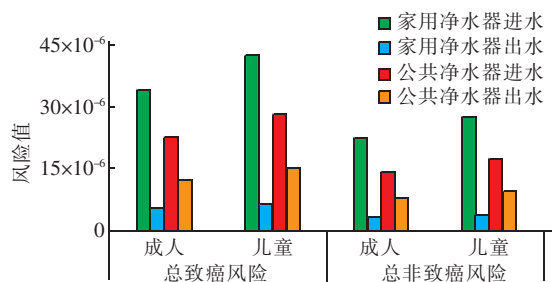


图4 家庭饮用水和公共净水器THMs总致癌风险和总非致癌风险

Fig. 4 Carcinogenic and non-carcinogenic risks of THMs in influents and effluents of household and public water purifiers

#### ② 非致癌风险

结果表明,单项非致癌风险和总非致癌风险均在EPA评价标准的范围( $HQ < 1$ )内。在家用净水器和公共直饮水净水器进水中,非致癌风险因素均以BDCM和TCM为主。李晓迪等<sup>[24]</sup>发现自来水管网末梢水中致癌和非致癌风险均以BDCM为主,其次是TCM。公共直饮水净水器出水的非致癌风险明显高于家用净水器出水。如图4所示,无论总致癌风险还是总非致癌风险,儿童承受的风险值均比成人高。净水器出水的总致癌风险和总非致癌风险显著低于进水,表明自来水经净水器净化后,不同人群暴露于水中物质的总风险有所降低,因此,通过净水器净化可以在一定程度上降低人群经口暴露于污染物的风险。

### 3 结论

调研分析发现,调研范围内的自来水及其净水器出水均没有致病微生物风险。家用净水器的净化能力明显高于公共净水器。30%家用净水器对TOC的去除率在80%以上,40%家用净水器对TOC的去除率在30%~40%之间,80%公共净水器对TOC的去除率均低于30%;80%家用净水器对THMs的去除率在75%以上,公共直饮水仅有40%水样中去除率达到50%以上。超滤和反渗透净水器对余氯总氯、TOC、THMs均能起到去除作用。反渗透净水器对TOC和THMs的去除率分别为49%和68%,均高于超滤净水器。THMs的致癌风险和非致癌风险排序均为BDCM>TCM>DBCM>TBM。家用净水器对致癌风险和非致癌风险的控制效果均优于公共直饮水净水器。

### 参考文献:

- [1] 麦嘉杰. 家用净水器技术与其展望[J]. 科技创新与应用, 2018(2): 48-49.  
Mai Jiajie. Household water purifier technology and its prospect[J]. Technology Innovation and Application, 2018(2): 48-49 (in Chinese).
- [2] 蒋莉蓉. 家用净水器技术与其展望[J]. 中山大学研究生学刊: 自然科学、医学版, 2016, 37(1): 25-34.  
Jiang Lirong. Household water purifier technology and its prospect[J]. Sun Yat - Sen University: Natural Science, Medicine, 2016, 37(1): 25-34 (in Chinese).
- [3] 查湘义. 家用净水器的应用现状及展望[J]. 科技风, 2018(17): 5.  
Zha Xiangyi. Application and prospect of household water purifier[J]. Technology Wind, 2018(17): 5 (in Chinese).
- [4] 杨琳娜. 家用活性炭净水器对饮用水中有机物深度净化性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.  
Yang Linna. Research on the Depth Purification Performance of Activated-carbon Household Water Purifier for Organics in Drinking Water[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014 (in Chinese).
- [5] 甘轶群. 家庭常用设备对饮用水中卤代甲烷的去除研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Gan Yiqun. A Research of Household Methods for Halomethane Treatment in Drinking Water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [6] 王立伟. 家庭常用设备对水中卤代乙酸的去除研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Wang Liwei. An Evaluation of Household Methods for Haloacetic Acids Treatment in Water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [7] Alipour V, Baneshi M M, Rahdar S, et al. Are household water purification devices useful to improve the physical chemical and microbial quality of the feed water? Case study: Bandar Abbas south of Iran[J]. Journal of Global Pharma Technology, 2017, 2(9): 13-19.
- [8] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷): 概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.  
Zhao Xiuge, Duan Xiaoli. Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook (Adults) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014 (in Chinese).
- [9] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.  
Ministry of Environmental Protection. Exposure Factors Handbook of Chinese Population (Children: 6-17 Years) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016 (in Chinese).
- [10] Gratt L B. Air Toxic Risk Assessment and Management: Public Health Risk from Normal Operations[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [11] 宝露尔, 张海峰, 杨敏. 三卤甲烷和卤乙腈类消毒副产物在14个饮用水厂出水中的浓度水平及原水氯化/氯胺化中的生成势[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5843-5847.  
Bao Luer, Zhang Haifeng, Yang Min. Occurrence of trihalomethanes and haloacetonitriles in finished drinking water from 14 drinking water treatment plants and their formation potential during chlorination and chloramination[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5843-5847 (in Chinese).
- [12] Krasner S W, Cantor K P, Weyer P J, et al. Case study approach to modeling historical disinfection by-product exposure in Iowa drinking waters [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 58(8): 183-190.
- [13] Kromhout H. Dry cleaning, some chlorinated solvents and other industrial chemicals[J]. Cancer Causes & Control, 1995, 7(2): 289-291.
- [14] Richardson S D, Simmons J E, Rice G. Disinfection byproducts: the next generation [J]. Environ Sci Technol, 2002, 36(9): 198A-205A.
- [15] Waller K, Swan S H, Windham G C, et al. Influence of exposure assessment methods on risk estimates in an epidemiologic study of total trihalomethane exposure and

- spontaneous abortion[J]. *Journal of Exposure Analysis & Environmental Epidemiology*, 2001, 11(6): 522 – 531.
- [16] Dodds L, King W D. Relation between trihalomethane compounds and birth defects [J]. *J Occup Environ Med*, 2001, 58(7): 443 – 446.
- [17] Rivera-Núñez Z, Wright J M. Association of brominated trihalomethane and haloacetic acid exposure with fetal growth and preterm delivery in Massachusetts [J]. *J Occup Environ Med*, 2013, 55(10): 1125 – 1134.
- [18] Andra S S, Charisiadis P, Makris K C. Obesity-mediated association between exposure to brominated trihalomethanes and type II diabetes mellitus: An exploratory analysis [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 485/486: 340 – 347.
- [19] 尤汉虎, 肖兵, 张艳萍, 等. 佛山某区饮用水三卤甲烷健康风险评价[J]. *当代医学*, 2011, 17(23): 156 – 158.
- You Hanhu, Xiao Bing, Zhang Yanping, *et al.* Human health risk evaluation about trihalomethanes (THMs) in drinking water of a certain district in Foshan [J]. *Contemporary Medicine*, 2011, 17(23): 156 – 158 (in Chinese).
- [20] 陈鑫. 黄浦江为水源的水厂不同工艺点和管网水中 THMs、HAAs 消毒副产物生成模型和转归模型的建立[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- Chen Xin. The Model Establishment for THMs and THMs Disinfection By-products Formation and Distribution in Different Water Treatment Processes and Finished Water of Water Plant with the Huangpu River as Water Source [D]. Shanghai: Fudan University, 2010 (in Chinese).
- [21] 蔡广强, 张金凤, 刘丽君, 等. 南方某市饮用水中氯化消毒副产物超标风险评估[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(3): 37 – 41.
- Cai Guangqiang, Zhang Jinfeng, Liu Lijun, *et al.* Risk assessment of chlorinated disinfection by-products in drinking water in a southern city of China [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(3): 37 – 41 (in Chinese).
- [22] 邓瑛, 魏建荣, 鄂学礼, 等. 中国六城市饮用水中氯化消毒副产物分布的研究[J]. *卫生研究*, 2008, 37(2): 207 – 210.
- Deng Ying, Wei Jianrong, E Xueli, *et al.* Study for distribution level of disinfection byproducts in drinking water from six cities in China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2008, 37(2): 207 – 210 (in Chinese).
- [23] 陈新波, 董飞龙, 李训超, 等. 家用净水器滤芯的性能比较研究[J]. *科技通报*, 2017, 33(7): 179 – 183.
- Chen Xinbo, Dong Feilong, Li Xunchao, *et al.* Performance evaluation of different household water filter elements [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, 33(7): 179 – 183 (in Chinese).
- [24] 李晓迪, 刘华, 关玥, 等. 不同类型饮用水中重金属元素和消毒副产物健康风险评价[J]. *环境与职业医学*, 2018, 35(7): 642 – 647.
- Li Xiaodi, Liu Hua, Guan Yue, *et al.* Health risk assessment of heavy metal elements and disinfection by-products in different kinds of drinking water [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2018, 35(7): 642 – 647 (in Chinese).



作者简介: 顾昕(1994 – ), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为饮用水安全。

E-mail: gxmoony@163.com

收稿日期: 2019 – 09 – 12