

陈秋玲, 高回香, 姜妍君, 等. 吹扫捕集-气相色谱-质谱法同时测定水体中 14 种挥发性消毒副产物[J]. 环境化学, 2023, 42(7): 2496-2500.
CHEN Qiuling, GAO Huixiang, JIANG Yanjun, et al. Study on determination of 14 kinds of volatile disinfection by-products in water by purge and trap /gas chromatography /mass spectrometry[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (7): 2496-2500.

吹扫捕集-气相色谱-质谱法同时测定水体中 14 种挥发性消毒副产物*

陈秋玲¹ 高回香² 姜妍君² 杨昕蕊¹ 吴艳¹ 张鸣珊¹ 何书海^{1**}

(1. 海南省生态环境监测中心, 海口, 571126; 2. 海南大学生态与环境学院, 海口, 570228)

摘要 基于吹扫捕集-气相色谱-质谱联用法 (P&T-GC-MS) 技术建立了同时测定水中 4 类 14 种挥发性消毒副产物 (V-DBPs) 的方法, 并对吹扫捕集条件及色谱条件进行了优化. 水中的挥发性消毒副产物经吹扫捕集、热脱附, Rtx-624 色谱柱分离, 选择离子扫描模式方式进行测定, 内标法定量. 结果显示, 校准曲线相关系数均大于 0.999, 方法检出限为 1.72—374 ng·L⁻¹, 不同浓度下实际样品加标回收率为 76.1%—114%, 相对标准偏差为 2.4%—13%. 利用本方法对自来水开展检测, 分别检出三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷、氯乙腈、1,1-二氯丙酮、二氯乙腈、1,1,1-三氯丙酮等 7 种消毒副产物, 检出浓度范围为 3.21—16.6 μg·L⁻¹, 检出率为 36%—100%, 其中二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷的结果均符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022) 规定的限值要求. 该方法具有前处理简单、重现性好、正确度高等特点, 适用于同时快速测定水中 14 种挥发性消毒副产物.

关键词 水体, 挥发性消毒副产物, 吹扫捕集, 气相色谱-质谱法 (GC/MS).

Study on determination of 14 kinds of volatile disinfection by-products in water by purge and trap /gas chromatography /mass spectrometry

CHEN Qiuling¹ GAO Huixiang² JIANG Yanjun² YANG Xinrui¹ WU Yan¹
ZHANG Mingshan¹ HE Shuhai^{1**}

(1. Hainan Ecological Environmental Monitoring Centre, Haikou, 571126, China; 2. Hainan University College of Ecology and Environment, Haikou, 570228, China)

Abstract A method for the simultaneous determination of 14 kinds of volatile disinfection by-products (V-DBPs) in water was developed based on purge and trap gas chromatography-mass spectrometry (P&T-GC-MS), and the purge and trap conditions were optimized. The volatile disinfection by-products in water are separated by Rtx-624 chromatographic column after purging and trapping, thermal desorption, and determined by selecting ion scanning mode, and quantified by internal standard method. The results showed that the correlation coefficient of the calibration curve was greater than 0.999, the detection limit of the method was 1.72—374 ng·L⁻¹. The recoveries of spiked samples at different concentrations were in the range of 76.1%—114%, and the relative standard deviation was 2.4%—13%. This method is used to detect disinfection by-products in tap water, Seven disinfection by-products including trichloromethane, 1,2-dichloroethane,

* 海口市内河(湖)水体中异味物质的高通量筛查技术研究项目(420RC755)资助.

Supported by the High Throughput Screening Technology Research Program for Odor Substances in Inland Rivers (Lakes) in Haikou City (420RC755).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: heshuhai1981@163.com

dichloromethane, chloroacetonitrile, 1,1-dichloroacetone, dichloroacetonitrile and 1,1,1-trichloroacetone were detected respectively, and the detection concentration range is $3.21 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ — $16.6 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, detection rate is 36%—100%, the results of dichloromethane, chloroform, 1,2-dichloroethane, dichloromonobromomethane, monochlorodibromodane, and tribromomethane all meet the limit requirements specified in the standards for drinking water quality (GB5749-2022). This method has characteristics of simple pretreatment, good reproducibility and high accuracy, and is suitable for the simultaneous rapid determination of 14 volatile disinfection by-products in water.

Keywords water, volatile disinfection by-products, purge and trap, gas chromatography-mass spectrometer(GC/MS).

消毒副产物是在消毒工艺过程中由消毒剂与水中存在的天然有机物、人为污染物及卤素离子等前驱物反应生成的次生污染物(Disinfection by-products, DBPs)^[1], DBPs 主要包括卤甲烷、卤代酮、卤乙腈、卤化硝基甲烷、卤乙酸、卤代乙醛、卤代乙酰胺和卤代苯酚类化合物等^[2], 其中卤甲烷、卤代酮、卤乙腈等低沸点物质被称为挥发性消毒副产物(volatile disinfection by-products, V-DBPs). 大部分 V-DBPs 具有细胞毒性、遗传毒性以及致癌、致畸和致突变的特性^[3-6], 卤甲烷具有致癌、致突变效应^[7-10], 卤代酮具有致癌、致畸和致突变效应^[11], 卤乙腈具有极强的细胞毒性、遗传毒性及致畸、致突变性效应, 其细胞毒性和遗传毒性远大于三卤甲烷等常规 DBPs^[12-13], 卤代硝基甲烷具有细胞毒性、遗传毒性及致突变性效应^[15].

由于饮用水中 DBPs 的广泛存在和潜在健康风险, 全球许多国家、地区或组织均颁布了水质评价标准或指南对 DBPs 进行管控, 以减少 DBPs 带来的健康风险^[16]. 中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)、世界卫生组织《饮用水质量指南(第四版)》、欧盟理事会《1998 年 11 月 3 日理事会指令 98/83/EC 人类用水质量》、日本《饮用水水质标准》和美国环境保护局《国家饮用水基本规则: 第 2 阶段消毒剂及消毒副产物准则》等标准均对卤甲烷、卤乙酸等常见 DBPs 有相应的限值要求^[13,17], 中国上海市、江苏省、深圳市各自出台了生活饮用水地方标准, 对《生活饮用水卫生标准》中原有 DBPs 进行了更严格规定并将其他高毒性 DBPs 指标纳入管控, 例如亚硝胺类 DBPs 指标 NDMA(N-亚硝基二甲胺)、碘代 DBPs[IAA(碘乙酸)和 DCIM(二氯一碘甲烷)]等^[15,17-19]. 目前 DBPs 标准检测方法检出限大多为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别, 且仅能同时测定单一类别 DBPs, 不能满足同时快速测定多种 DBPs 需要. 因此建立准确灵敏、同步高效的多种消毒副产物分析方法对 DBPs 管控具有重要意义.

本研究基于吹扫捕集-气相色谱-质谱联用法(P & T-GC-MS)技术建立了同时测定水中 4 类 14 种挥发性消毒副产物(V-DBPs)的方法, 检测目标物的检出限低至 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级别, 具有良好的灵敏度、精密度和正确度评价, 满足准确快速测定水体中 14 种挥发性消毒副产物的要求.

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

ISQQD300 气相色谱-质谱联用仪(美国赛默飞公司); RTX-624 熔融石英毛细管柱($60 \text{ m}\times 0.32 \text{ mm}\times 0.18 \text{ }\mu\text{m}$); 吹扫捕集装置 OI4100(美国 OI 公司), 配备 5 mL 吹扫管.

二氯甲烷、三卤甲烷混标、1,2-二氯乙烷、氯丙酮、氯乙腈、二氯乙腈、溴乙腈、1,1,1-三氯丙酮、溴氯乙腈标准溶液(天津 Alta 公司), 质量浓度均为 $1000 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; 三氯硝基甲烷(天津 Alta 公司), 质量浓度为 $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; 1,1-二氯丙酮(美国 Accustandard 公司), 质量浓度为 $5000 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; 内标 1,2-二溴丙烷(北京曼哈格生物科技有限公司), 质量浓度为 $5000 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$. 甲醇(美国霍尼韦尔公司); 丙酮(美国霍尼韦尔公司).

1.2 分析方法

吹扫捕集条件以高纯氮气(99.999%)为吹扫气, 吹扫流速为 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 吹扫温度: $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 吹扫时间: 13 min; 解析温度: $180 \text{ }^\circ\text{C}$, 解析时间: 3 min; 烘烤温度 $210 \text{ }^\circ\text{C}$, 烘烤时间 15 min.

色谱条件 色谱柱为 RTX-624 柱, 高纯氮气(99.999%)为载气, 流量 $1.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 恒流模式; 进样口温度 $200 \text{ }^\circ\text{C}$; 分流进样, 分流比 5 : 1. 程序升温: 起始温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 2 min, 以 $8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 2 min.

质谱条件 离子源: 电子轰击源(EI); 选择离子扫描模式, 内标法定量; 离子源温度 $230 \text{ }^\circ\text{C}$, 四极杆温度 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 传输线温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$. 目标化合物测定参数见表 1.

1.3 样品采集与保存

样品按照 GB/T 5750.2 的相关要求进行采集和保存. 样品装入 40 mL 棕色玻璃瓶中, 水样充满至溢流, 于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下避光、冷藏, 24 h 内测定.

1.4 标准溶液配制

分别准确吸取标准溶液于 5 mL 容量瓶中, 用丙酮定容, 配置浓度为 $50.0 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 中间液, 再稀释配制浓度为 $2.0 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 混合标准使用液. 取 40 mL 棕色样品瓶, 加入 40 mL 纯水, 分别移取适量混合标准使用液及定量内标使用液, 配置成 7 个氯丙酮、溴乙腈、溴氯乙腈的质量浓度均分别为 1.0、2.0、5.0、8.0、10、20、 $50 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液, 其余 11 种化合物的质量浓度均分别为 0.10、0.50、1.0、2.0、5.0、10、 $20 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 内标 1,2-二溴丙烷质量浓度为 $5.0 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 14 种挥发性消毒副产物方法性能指标
Table 1 Performance index of 14 disinfection by-product methods

序号	化合物	浓度范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	定量离子	辅助离子	相关系数	检出限/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	定量限/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	加标水平/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)				相对标准偏差RSD/%				回收率/%				
								低	中	高	自来水	低	中	高	自来水	低	中	高	自来水	
1	二氯甲烷	0.1—20	49	84, 51	0.9992	23.1	92.2	0.10	5.00	18.0	2.00	2.00	6.5	9.4	9.0	9.2	111	102	98.7	108
2	三氯甲烷	0.1—20	83	85, 47	0.9991	5.59	22.3	0.02	5.00	18.0	6.00	6.00	5.6	4.3	5.1	6.5	92.7	114	104	105
3	1,2-二氯乙烷	0.1—20	62	64, 49	0.9994	4.77	19.1	0.02	5.00	18.0	0.03	0.03	2.7	5.8	5.4	4.4	112	113	102	90.3
4	氯丙酮	1.0—50	43	49, 92	0.9993	374	1495	1.50	5.00	18.0	2.00	2.00	7.7	11	5.3	2.8	77.3	89.0	104	98.8
5	二氯一溴甲烷	0.1—20	83	85, 47	0.9995	2.57	10.3	0.01	5.00	18.0	4.00	4.00	4.5	6.0	4.5	3.1	85.6	103	102	95.0
6	氯乙腈	0.1—20	75	77, 48	0.9998	5.79	23.1	0.02	5.00	18.0	0.02	0.02	2.4	5.9	9.3	11	104	102	105	107
7	1,1-二氯丙酮	0.1—20	43	63, 83	0.9996	18.2	72.8	0.10	5.00	18.0	0.15	0.15	7.8	7.1	3.1	2.7	78.2	93.0	103	90.6
8	二氯乙腈	0.1—20	74	82, 84	0.9997	2.60	10.4	0.01	5.00	18.0	0.30	0.30	4.1	6.0	3.4	1.9	77.5	87.4	95.4	94.2
9	三氯硝基甲烷	0.1—20	117	119, 82	0.9990	4.39	17.5	0.02	5.00	18.0	2.00	2.00	5.8	8.3	6.1	10	83.3	96.9	105	92.2
10	一氯二溴甲烷	0.1—20	129	127, 131	0.9995	1.72	6.86	0.01	5.00	18.0	2.00	2.00	4.4	6.5	4.2	1.5	85.4	96.5	102	92.0
11	溴乙腈	1.0—50	119	121, 79	0.9994	198	794	1.00	5.00	18.0	2.00	2.00	12	7.3	5.2	13	76.1	79.9	95.9	97.7
12	1,1,1-三氯丙酮	0.1—20	43	125, 97	0.9996	20.8	83.0	0.10	5.00	18.0	0.50	0.50	9.0	5.0	6.2	11	78.3	83.3	96.7	83.6
13	1,2-二溴丙烷	5.0(内标)	121	123, 41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	溴氯乙腈	1.0—50	74	76, 151	0.9991	99.0	396	0.50	5.00	18.0	2.00	2.00	4.1	13	11	15	76.4	79.1	95.1	84.7
15	三溴甲烷	0.1—20	173	171, 91	0.9997	1.94	7.74	0.01	5.00	18.0	2.00	2.00	3.0	6.5	3.5	2.6	78.4	94.2	102	87.2

2 结果与讨论

2.1 吹扫方法条件优化

吹扫温度选择 选择吹扫温度分别为 30、40、50 ℃, 结果表明吹扫温度为 40 ℃ 时, 目标化合物均可以达到较好的回收率, 吹扫温度为 50 ℃ 时二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、三氯硝基甲烷和三卤甲烷类消毒副产物回收率降低, 同时考虑到吹扫温度越高, 进入捕集阱的水蒸汽越多, 影响目标物的吸附、解析, 故选择吹扫温度为 40 ℃。

吹扫时间选择 选择吹扫时间分别为 7、9、11、13、15 min, 结果表明吹扫时间为 13 min 时, 目标化合物回收率均能达到 90% 以上。吹扫时间为 15 min 时二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、三氯硝基甲烷和三卤甲烷类消毒副产物回收率反而降低, 故选择吹扫时间为 13 min。

解析温度选择 选择解析温度分别为 170、180、190、200 ℃ 进行比对, 结果表明解析温度为 180 ℃ 时, 目标化合物回收率最高。随着温度升高, 目标化合物回收率降低, 故选择解析温度为 180 ℃。

解析时间选择 选择解析时间分别为 1、3、5 min, 结果表明解析时间为 3 min 和 5 min 时, 目标化合物回收率均能达到 95% 以上, 3 min 时整体回收效率最佳。考虑到解析时间增加会造成捕集阱吸附剂分解, 降低使用寿命, 同时为提高检测效率, 故选择解析时间为 3 min。

2.2 挥发性消毒副产物分离情况

本方法对比了 Rtx-200 极性柱、Rtx-624 中等极性柱和 DB-5MS 非极性柱等 3 种柱子对 14 种消毒副产物的分离效果, 结果显示: Rtx-200 极性柱难以分离出二氯甲烷和三氯甲烷等极性强的化合物, DB-5MS 非极性柱中目标物响应均较小, 峰形较差, 还出现峰拖尾, Rtx-624 中等极性柱能在短时间内基本实现化合物分离。图 1 是 14 种消毒副产物标准混合样品在 Sim 模式下的总离子流图, 虽然氯丙酮和二氯一溴甲烷在 RTX-624 色谱柱上未能实现基线分离, 但定量离子不同, 不影响定量分析的准确性, 其他目标物均能实现较好的分离效果, 所以本方法选用了规格为 60 m×0.32 mm×0.18 μm 的 Rtx-624 作为 14 种挥发性消毒副产物的分离柱。

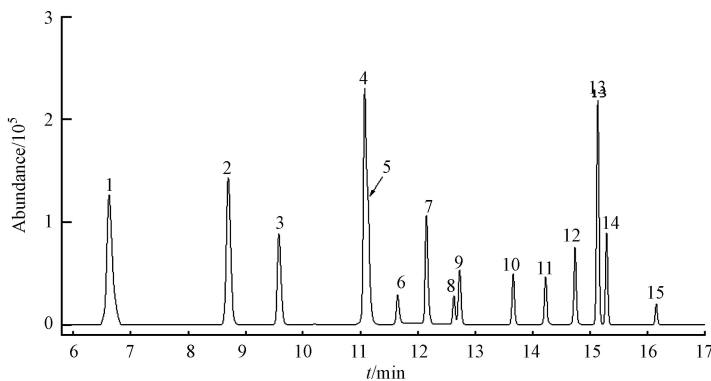


图 1 14 种消毒副产物混合标准样品总离子流图
(样品名称见表 1)

Fig.1 Total ion flow diagram of mixed standard samples of 14 disinfection by-products

2.3 方法标准曲线和检出限

采用选择离子扫描模式, 对 14 种挥发性消毒副产物标准样品按试验方法从低浓度到高浓度依次吹扫测定, 内标法进行定量分析。按《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168-2020) 规定, 进行方法检出限测定, 空白试验中未检出目标物, 采用空白加标方式进行检出限试验, 按照样品分析的全部步骤, 重复 7 次, 计算 7 次的标准偏差, 按公式 $MDL=t(n-1, 0.99) \times S$ 计算方法检出限(其中当 n 为 7 次, 置信度为 99%, $t(n-1, 0.99)=3.143$ 。以 4 倍的样品检出限作为测定下限, 即 $RQL=4 \times MDL$)。本方法相关系数及检出限计算结果见表 1。结果表明, 水质中氯丙酮、溴乙腈、溴氯乙腈在 $1.00 \sim 50.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 二氯甲烷等其他 11 种消毒副产物在 $0.1 \sim 20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 均具有良好的线性关系, 校准曲线相关系数均大于 0.999。方法检出限为 $1.72 \sim 374 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 测定下限为 $6.86 \sim 1.50 \times 10^3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 方法精密度和正确度

选择高中低 3 个浓度的地表水加标样品和自来水加标样品进行精密度验证, 重复 6 次试验, 计算 6 次平行测定的相对标准偏差和正确度, 结果见表 1。结果显示, 低浓度样品加标回收率为 76.1%—112%, 相对标准偏差在 2.4%—12% 之间; 中浓度样品加标回收率为 79.1%—114%, 相对标准偏差在 4.3%—13% 之间; 高浓度样品加标回收率为 95.1%—105%, 相对标准偏差在 3.1%—11% 之间; 自来水加标样品加标回收率为 83.6%—108%, 相对标准偏差在 3.1%—13% 之间。结果表明本方法具有较好的精密度和正确度。

2.5 实际样品分析

采用本方法对 33 份某市市政供水水样进行检测, 结果显示自来水样品中共检出三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷、氯乙腈、1,1-二氯丙酮、二氯乙腈、1,1,1-三氯丙酮 7 种消毒副产物, 浓度范围为 $3.21 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \sim 12.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 检出率为 36%—100%, 其中三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷的结果均符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022) 规定的限值。选取检出样品的最低浓度图谱进行分析后发现检出 14 种挥发性消毒副产物的 MS 通道均未出现

干扰峰,表明本方法所选离子对的特异性好、抗干扰能力强。

3 结论

本研究基于吹扫捕集-气相色谱-质谱联用法(P&T-GC-MS)技术建立了同时测定水中14种挥发性消毒副产物(V-DBPs)的方法,目标化合物检出限为1.72—374 ng·L⁻¹,不同浓度条件下的加标回收率在76.1%—114%之间,相对标准偏差为2.4%—13%。本方法前处操作简便、快速简便,具有良好的灵敏度、精密度和正确度,满足快速测定水中14种挥发性消毒副产物的要求。采用本方法对某市市政供水进行检测,分别检出三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷、氯乙腈、1,1-二氯丙酮、二氯乙腈、1,1,1-三氯丙酮等7种消毒副产物,检出浓度范围为3.21 ng·L⁻¹—16.6 μg·L⁻¹,检出率为36%—100%,二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷等6种有标准限值的消毒副产物均符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)限值要求。

参考文献 (References)

- [1] RICHARDSON S D, PLEWA M J, WAGNER E D, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, 636(1/2/3): 178-242.
- [2] 楚文海,肖融,丁顺克,等. 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 [J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5059-5074.
- [3] ZHANG B B, XIAN Q M, GONG T T, et al. DBPs formation and genotoxicity during chlorination of pyrimidines and purines bases [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 884-890.
- [4] CHAVES R S, GUERREIRO C S, CARDOSO V V, et al. Hazard and mode of action of disinfection by-products (DBPs) in water for human consumption: Evidences and research priorities [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology. Toxicology & Pharmacology:CBP*, 2019, 223: 53-61.
- [5] 赵玉丽,李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性 [J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 20-33.
- [6] TARDIFF R G, CARSON M L, GINEVAN M E. Updated weight of evidence for an association between adverse reproductive and developmental effects and exposure to disinfection by-products [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2006, 45(2): 185-205.
- [7] 杨飞飞. 二氯甲烷肝脏毒性的实验研究 [D]. 济南: 济南大学, 2016: 1-2.
- [8] CORTÉS C, MARCOS R. Genotoxicity of disinfection byproducts and disinfected waters: A review of recent literature [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2018, 831: 1-12.
- [9] WOLF D C, BUTTERWORTH B E. Risk assessment of inhaled chloroform based on its mode of action [J]. *Toxicologic Pathology*, 1997, 25(1): 49-52.
- [10] LIVIAC D, CREUS A, MARCOS R. Genotoxicity analysis of two halonitromethanes, a novel group of disinfection by-products (DBPs), in human cells treated *in vitro* [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(3): 232-238.
- [11] KRASNER S W, WEINBERG H S, RICHARDSON S D, et al. Occurrence of a new generation of disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23): 7175-7185.
- [12] ZHANG L, XU L, ZENG Q, et al. Comparison of DNA damage in human-derived hepatoma line (HepG2) exposed to the fifteen drinking water disinfection byproducts using the single cell gel electrophoresis assay [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2012, 741(1/2): 89-94.
- [13] 朱红霞,薛荔栋,刘进斌,等. 含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(7): 1640-1648.
- [14] LIVIAC D, CREUS A, MARCOS R. Genotoxicity analysis of two halonitromethanes, a novel group of disinfection by-products (DBPs), in human cells treated *in vitro* [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(3): 232-238.
- [15] 肖融,楚文海. 全球饮用水标准中消毒副产物管控指标对比与启示 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(6): 1328-1337.
- [16] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] 上海市质量技术监督局. 生活饮用水水质标准: DB31/T 1091—2018 [S]. 2019.
- [18] 江苏省市场监督管理局. 江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准: DB32/T 3701—2019 [S].
- [19] 深圳市市场监督管理局. 生活饮用水水质标准: DB4403/T 60—2020 [S].