

上海市主城区生活饮用水中非挥发性有机物的潜在致突变性分析

张慧君^a, 陶功华^b, 洪新宇^b, 马武仁^c, 肖萍^a

上海市疾病预防控制中心 a. 实验室质量管理处 b. 化学品毒性检定所 c. 健康危害因素监测与控制所, 上海 200336

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20554

摘要:

[背景] 上海是一个国际化的特大城市, 大量人口对饮用水的需求与日俱增, 生活饮用水的安全性是备受关注的焦点。

[目的] 通过上海市主城区生活饮用水中有机物的致突变性分析, 了解上海市生活饮用水的安全性现状。

[方法] 于枯水期 (2015年12月—2016年2月)、平水期 (2016年3—5月)、丰水期 (2016年6—9月) 分别采集供应上海市主城区青草沙水库辐射范围内3个水厂的水源水和出厂水, 同时采集主城区中监测点的管网水和末梢水 (包括浦西7个区的10个监测点), 一年中按3个时期采样, 每个时期采样1次, 每次采集5L水样。采用XAD-2树脂对水中非挥发性有机物进行富集, 设0.25、0.50、1.00 L·皿⁻¹·3个剂量组, 通过细菌回复突变试验 (鼠伤寒沙门氏菌TA98菌株和TA100菌株) 检测其潜在致突变性, 运用TA98菌株检测移码型突变, TA100菌株检测碱基置换型突变, 通过加用活化代谢系统 (S9) 来确定水样中是否含有间接致突变物质。

[结果] 所采集的水样中有4组水样为细菌回复突变试验阳性, 均为TA98菌株阳性, 对TA100菌株没有作用, 仅在不加用活化代谢系统的组别 (-S9) 中出现阳性结果。不同水期中, 枯水期的样本中阳性率较高 (50%), 丰水期和平水期次之 (25%); 不同类型中, 水源水的阳性率较高 (100%), 出厂水次之 (33.3%), 管网水和末梢水均为阴性。同一份水样中TA98菌株的-S9和+S9回复突变率 (MR) 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。不同水期的TA98菌株MR值的差异具有统计学意义 ($P < 0.05$); 不同水期TA100菌株MR值的差异也有统计学意义 ($P < 0.05$)。不同类型水样的TA98菌株MR值的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。TA100菌株MR值未达到阳性标准, 但是变化趋势与TA98菌株一致。

[结论] 上海市生活饮用水中的非挥发性有机物是一类可致移码突变的直接致突变物质。不同水期的饮用水中, 枯水期的潜在致突变性较高, 平水期次之, 丰水期最弱。不同类型的饮用水中, 水源水具有较强的潜在致突变性, 出厂水次之, 管网水和末梢水的水样不具有致突变性。

关键词: 生活饮用水; 细菌回复突变试验; 致突变性; 上海市

Potential mutagenicity of nonvolatile organic compounds in drinking water in main urban area of Shanghai ZHANG Huijun^a, TAO Gonghua^b, HONG Xinyu^b, MA Wuren^c, XIAO Ping^a (a. Division of Laboratory Quality Management b. Division of Chemical Toxicity Testing and Assessment c. Division of Health Risk Factors Surveillance and Control, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] Shanghai is an international megacity, where the increasing demand for drinking water of its large population bring into focus the safety of drinking water.

[Objective] This study evaluates the safety of drinking water in the main urban area of Shanghai through the mutagenicity analysis of organic substances in drinking water.

[Methods] In the dry season (from December 2015 to February 2016), level season (from March to May 2016), and wet season (from June to September 2016), samples of source water and finished water were collected from three water plants that draw water from Qingcaosha Reservoir, a water source that supply for the main urban area of Shanghai, and samples of

作者简介

张慧君 (1986—), 女, 硕士, 主管技师; E-mail: zhanghuijun@scdc.sh.cn

通信作者

肖萍, E-mail: xiaoping@scdc.sh.cn

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-11-26

录用日期 2021-03-21

文章编号 2095-9982(2021)06-0612-06

中图分类号 R114

文献标志码 A

引用

张慧君, 陶功华, 洪新宇, 等. 上海市主城区生活饮用水中非挥发性有机物的潜在致突变性分析 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38(6): 612-617.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20554

Correspondence to

XIAO Ping, E-mail: xiaoping@scdc.sh.cn

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2020-11-26

Accepted 2021-03-21

To cite

ZHANG Huijun, TAO Gonghua, HONG Xinyu, et al. Potential mutagenicity of nonvolatile organic compounds in drinking water in main urban area of Shanghai [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(6): 612-617.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20554

pipeline water and tap water were collected at the monitoring points in the main urban area (including 10 monitoring points in 7 districts located in west of the Huangpu River). Samples were collected in three periods, once in each period, and 5L each time. XAD-2 absorbable resin was used to enrich the nonvolatile organic matter in water samples, setting low, medium, and high (0.25, 0.50, 1.00 L-dish⁻¹) dose groups, and the potential mutagenicity of *Salmonella typhimurium* TA98 strain and TA100 strain was detected by bacterial reverse mutation assay. TA98 strain was used to detect frameshift mutation, while TA100 strain was used to detect base substitution mutation, and activated metabolic system (S9) was added to determine whether there were indirect mutagens in water samples.

[Results] Among the collected water samples, four samples were positive for TA98 strain in the bacterial reverse mutation assay, but were not mutagenic with TA100 strain, and the positive results only showed in the groups without activated metabolic system (-S9). In regard to water periods, the positive rate was higher in dry season (50%), followed by level season and wet season (25%). In regard to sample types, the positive rate of source water was higher (100%), followed by finished water (33.3%), and both pipeline water and tap water samples were negative. There was a significant difference in the reverse mutation ratio (MR) between -S9 and +S9 of TA98 strain in the same water sample ($P < 0.05$). The MR values of TA98 strain in different water periods ($P < 0.05$) showed significant differences; the MR values of TA100 strain in different water periods were significantly different ($P < 0.05$). There were significant differences in MR values of TA98 strain among different types of water samples ($P < 0.05$). The MR values of TA100 strain did not reach the positive standard, but the change trend was consistent with the values of TA98 strain.

[Conclusion] The nonvolatile organic compounds in tested drinking water of Shanghai are a kind of direct mutagenic substances which can cause frameshift mutation. The potential mutagenicity of drinking water is higher in dry season, followed by level season, and lower in wet season. In different types of drinking water, source water has strong potential mutagenicity, followed by finished water, and pipeline water and tap water have no mutagenicity.

Keywords: drinking water; *Salmonella typhimurium* reversion test; mutagenicity; Shanghai

上海是一个国际化的特大城市,人口数量巨大,生活饮用水的安全性成为备受关注的焦点。青草沙原水系统自2011年投入使用后为上海市主城区中816万浦西居民供应生活用水。有数据表明近年来上海市生活饮用水的状况有逐年好转的迹象,但是反映水质的指标依然有不合格的现象^[1],如水源水的耗氧量、消毒剂余量等指标存在超标的情况。水体中耗氧量指标正是反映水体受到有机物污染的重要指标,有机物经过氯化消毒后产生消毒副产物(drinking water disinfection byproducts, DBPs),消毒剂余量过高会造成水体中产生更多DBPs。多项研究表明DBPs具有致突变性^[2-3],长期摄入含有DBPs的饮用水与膀胱癌等疾病相关,因此生活饮用水中有机物含量是城市饮用水安全性至关重要的指标。

按照GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》对生活饮用水进行评价时,需对微生物指标、毒理指标、化学指标和感官性状等106项指标进行测定,其中53项为有机物的毒理学指标。对53项指标逐一测定的过程极为繁琐,运用细菌回复突变试验可直接筛查生活饮用水的致突变性,能简单快捷且较为全面地反映生活饮用水的污染程度^[4]。本次研究拟对不同水位、不同环节的上海市主城区生活饮用水进行致突变性测定,为生活饮用水的安全性管理保障提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 试验菌株

鼠伤寒沙门氏菌TA98和TA100菌株购自美国Molecular Toxicology公司,产品质量保证证书批号分别为4599D和4600D,经生物学特性鉴定合格后,日常保存于液氮罐中。生物学特性鉴定包括:组氨酸缺陷型、脂多糖屏障缺损、氨苄青霉素抗性和切除修复缺损。菌株扩增:取冻存菌株复融后使用接种环划线培养制成主平板,从主平板上选取分离性好的单独菌落接种于灭菌肉汤培养基,置于37°C,震荡培养12h,测定菌液浓度约为 $(1.1\sim 1.6) \times 10^9$ 个·mL⁻¹。

1.2 试验试剂

底层平板和顶层培养基购自上海申启生物科技有限公司,氯化钾和氯化镁购自国药集团化学试剂有限公司,活化代谢系统所使用的S9混合液购自美国Molecular Toxicology公司,二甲基亚砜、丙酮、辅酶II、6-磷酸葡萄糖、组氨酸、葡萄糖、生物素、氨苄青霉素、4-硝基喹啉-N-氧化物、甲基甲烷磺酸酯和2-氨基苄等试剂购自美国Sigma公司。

1.3 水样采集和非挥发性有机物的收集

参考全国饮用水水质卫生监测信息系统对饮用水进行分类采集,按照水位高低分为3个水期,于枯水期(2015年12月—2016年2月)、平水期(2016年3—5月)、丰水期(2016年6—9月)采集水样,水源水

为青草沙水库的原水, 出厂水由上海市青草沙水库辐射范围内3个水厂的出厂水组成, 管网水和末梢水分别由浦西7个区的10个监测点采集的水样组成。每个水期采样1次, 采集4种类型水样, 每次采集5L水样。

采用XAD-2树脂对水样进行富集, 水样缓慢通过装有XAD-2树脂的层析柱后, 用丙酮进行树脂柱洗脱, 洗脱液于60°C水浴条件下, 用减压旋转蒸发器浓缩至丙酮完全挥发, 用二甲基亚砷进行定容。

1.4 试验分组

每个水期每种类型(每份)水样均设置3个剂量组, 分别用二甲基亚砷定容, 使每0.1 mL溶液中含有原水样的体积为0.25、0.50、1.00 L。本研究按照所使用菌株的不同, 分为TA98菌株体系和TA100菌株体系, 同时按照使用活化代谢系统的情况进行分组, 分别为不加用活化代谢系统的组别(-S9组)和加用活化代谢系统的组别(+S9组)。每个剂量组设3个平行样, 同时设阴性对照、阳性对照和溶剂对照。

1.5 细菌回复突变试验

参照GB 15193.4—2014《食品安全国家标准 细菌回复突变实验》, 检测水样的致突变性。

细菌回复突变试验利用组氨酸缺陷型/色氨酸缺陷型菌株无法在缺少组氨酸/色氨酸的培养基上生长的特性, 通过观察平皿上菌落形成的数量来判断该水样中是否存在能使缺陷型菌株回复成非缺陷型菌株的物质, 以此来判定水样是否具有潜在的致突变性。通过对致突变物质的研究发现某些物质需要在活化代谢后, 方可使缺陷型菌株回复成非缺陷型菌株, 因此在检测时需加用和不加用活化代谢系统(S9)的条件下进行。在已知检测方法中基于组氨酸缺陷型鼠伤寒沙门氏菌的检测体系中可分为两种类别, 其中TA97、TA98、TA102菌株可用于检测移码型突变, TA100和TA1535菌株可用于检测碱基对置换型突变。根据CJ 3023—1993《活性炭净水器》要求选用TA98和TA100菌株进行检测, 根据GB 15193.4—2014《食品安全国家标准 细菌回复突变实验》, TA98菌株用于检测移码型突变, TA100菌株用于检测碱基对置换型突变, 活化代谢系统(S9)用于确认是否为直接致突变物质。

试验采用平板掺入法, 取用无菌试管, 加入2 mL顶层琼脂置于45°C水浴中, 加入0.1 mL富集水样和0.1 mL增菌液, 按照是否需要活化代谢, 选择加入0.5 mL S9混合液(S9体积分数为10%)或二甲基亚砷, 混匀后平铺在底层培养基上, 固化后倒覆37°C培养

48 h后观察结果进行菌落计数。肉眼观察各平皿的表面是否平整无污染, 菌落生长分布是否均匀, 同时显微镜下观察背景菌苔的形态是否致密且大小均匀, 记录观察值即为该平皿的菌落回变数。

1.6 统计学分析

运用Excel 2007建立数据库, 记录每个平皿的回变菌落数后计算回复突变率(mutation ratio, MR), 即试验组回变菌落数/自发回变菌落数, 其中阴性对照组的菌落回变数为自发回变菌落数, MR值可以反映该水样致突变的强度。定量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 描述。运用SPSS 20软件对各组别水样的回变菌落数进行分析, 同一份水样的回变菌落数采用配对 t 检验, 不同类型和不同水期水样的回变菌落数分别进行单因素方差分析, 进一步两两比较采用两独立样本 t 检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。采用二倍法则^[5]对试验结果进行判定, 当任一剂量组的 $MR \geq 2$ 并呈现剂量-反应关系或具有可重复性, 可判定为细菌回复突变试验结果阳性。

2 结果

2.1 不同水期不同水样对TA98菌株的致突变性比较

各组别TA98菌株的实验结果见表1。不同水期水样处理的TA98菌株的MR值差异具有统计学意义($F=6.235, P=0.002$); 将不同水期的水样两两比较, 枯水期和平水期之间MR值的差异具有统计学意义($t=2.861, P=0.005$), 枯水期和丰水期之间MR值的差异具有统计学意义($t=2.646, P=0.009$), 平水期和丰水期之间MR值的差异没有统计学意义($t=-0.441, P=0.660$)。

不同类型水样处理的TA98菌株MR值的差异具有统计学意义($F=9.479, P=0.000$); 将不同类型的水样进行两两比较, 水源水与出厂水之间MR值的差异具有统计学意义($t=2.893, P=0.005$), 水源水与管网水之间MR值的差异具有统计学意义($t=3.612, P<0.001$), 水源水与末梢水之间MR值的差异具有统计学意义($t=3.674, P<0.001$), 其余组别间没有统计学意义。同一份水样TA98菌株的-S9组和+S9组的MR值之间差异具有统计学意义($t=6.380, P<0.001$)。

2.2 不同水期不同水样对TA100菌株的致突变性比较

各组别TA100菌株的实验结果见表2。不同水期TA100菌株MR值的差异具有统计学意义($F=43.593, P<0.001$)。将不同水期的TA100菌株MR值两两比较, 枯水期和平水期之间MR值的差异具有统计学意义

($t=2.842, P=0.005$), 其余组别间差异没有统计学意义。不同类型水样 TA100 菌株的 MR 值没有统计学意义 ($F=1.533, P=0.207$)。同一份水样 TA100 菌株的 -S9 组和 +S9 组的 MR 值之间差异不具有统计学意义。

表 1 各组别 TA98 菌株的 MR 值 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 1 The mutation ratio of TA98 strains in different groups ($\bar{x} \pm s, n=3$)

水期	剂量 / (L·皿 ⁻¹)	水源水		出厂水		管网水		末梢水	
		-S9	+S9	-S9	+S9	-S9	+S9	-S9	+S9
枯水期	0.25	1.11±0.11	0.99±0.19	1.02±0.15	0.99±0.06	1.16±0.20	1.12±0.05	1.03±0.25	0.96±0.11
	0.50	2.26±0.08*	0.95±0.15	1.11±0.04	1.05±0.09	0.96±0.20	0.99±0.08	1.13±0.24	1.10±0.14
	1.00	2.67±0.25*	1.01±0.15	2.08±0.36*	1.02±0.05	1.14±0.20	1.14±0.09	1.30±0.18	1.07±0.11
平水期	0.25	1.11±0.14	0.97±0.09	1.05±0.10	0.90±0.20	1.08±0.13	0.96±0.07	1.01±0.08	0.97±0.15
	0.50	1.11±0.16	0.96±0.05	1.02±0.15	0.94±0.11	0.95±0.13	0.97±0.05	1.00±0.18	0.92±0.18
	1.00	2.17±0.08*	0.92±0.05	1.12±0.07	0.97±0.12	1.13±0.14	0.98±0.19	0.92±0.08	0.96±0.10
丰水期	0.25	1.21±0.17	1.00±0.14	1.00±0.10	1.04±0.08	1.04±0.07	0.92±0.05	1.11±0.10	0.91±0.05
	0.50	1.09±0.17	1.15±0.11	0.93±0.08	0.99±0.16	0.98±0.12	1.05±0.06	0.96±0.10	1.01±0.06
	1.00	2.01±0.21*	0.96±0.15	0.93±0.05	1.08±0.11	1.03±0.17	0.99±0.13	1.09±0.10	1.04±0.12

[注] *: 细菌回复突变试验结果阳性。

表 2 各组别 TA100 菌株的 MR 值 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 2 The mutation ratio of TA100 strains in different groups ($\bar{x} \pm s, n=3$)

水期	剂量 / (L·皿 ⁻¹)	水源水		出厂水		管网水		末梢水	
		-S9	+S9	-S9	+S9	-S9	+S9	-S9	+S9
枯水期	0.25	1.05±0.08	1.02±0.04	1.05±0.05	0.99±0.07	1.02±0.04	1.04±0.02	1.06±0.04	0.97±0.05
	0.50	1.02±0.02	0.99±0.05	1.02±0.02	0.99±0.03	1.02±0.04	1.03±0.02	1.05±0.01	1.03±0.08
	1.00	1.04±0.05	1.02±0.06	1.04±0.05	1.03±0.06	1.05±0.03	0.99±0.02	1.04±0.08	1.03±0.06
平水期	0.25	0.98±0.04	0.99±0.06	1.07±0.09	0.96±0.05	1.00±0.03	1.02±0.02	1.01±0.04	0.97±0.05
	0.50	0.97±0.04	1.00±0.05	0.97±0.04	0.94±0.07	1.02±0.06	0.98±0.05	1.05±0.06	1.01±0.09
	1.00	1.03±0.01	1.01±0.06	1.03±0.01	0.97±0.04	1.02±0.08	0.99±0.03	1.04±0.05	1.01±0.03
丰水期	0.25	1.01±0.02	1.04±0.05	1.01±0.02	1.03±0.03	1.00±0.03	0.98±0.03	0.99±0.06	1.06±0.04
	0.50	1.01±0.05	1.03±0.07	1.01±0.05	1.02±0.03	0.96±0.04	0.96±0.04	0.96±0.05	1.02±0.06
	1.00	1.04±0.04	1.04±0.02	1.04±0.06	1.01±0.06	1.00±0.07	1.01±0.03	1.04±0.07	0.99±0.08

2.3 水样的致突变性和类型

运用二倍法对各组别的实验结果进行判定, 在 4 份水样中有五个组别的 MR ≥ 2, 根据判定要求, 对 MR ≥ 2 的组别进行重复试验, 结果与先前一致, 可判定为细菌回复突变实验阳性。此 4 份阳性结果均为 TA98 菌株阳性结果, TA100 菌株没有阳性结果; 且均为不加活化代谢系统 (-S9) 的阳性结果。结果表明水样中的非挥发性有机物是一组可导致移码突变的直接致突变物质。

在 4 份出现阳性结果的水样中, 3 份为水源水和 1 份出厂水, 其中枯水期水源水的水样在 0.50 L·皿⁻¹ 和 1.00 L·皿⁻¹ 剂量组均为阳性结果 (-S9 的 TA98 菌株的 MR 为 2.26±0.08 和 2.67±0.25), 其余 3 份阳性的水样分别为 1.00 L·皿⁻¹ 剂量组的平水期水源水水样 (-S9 的 TA98 菌株的 MR 为 2.17±0.08), 1.00 L·皿⁻¹ 剂量组的丰水期水源水水样 (-S9 的 TA98 菌株的 MR 为 2.01±0.21), 1.00 L·皿⁻¹ 剂量组的枯水期出厂水水样 (-S9 的 TA98 菌株的 MR 为 2.08±0.36)。二倍法结果表

明, 3 个水期的水样中枯水期水样的阳性率较高, 4 种类型的水样中水源水的阳性率较高。将每份水样中 TA98 菌株 -S9 MR 值的均值进行分析, 可观察致突变性强度 MR 的变化, 见图 1。

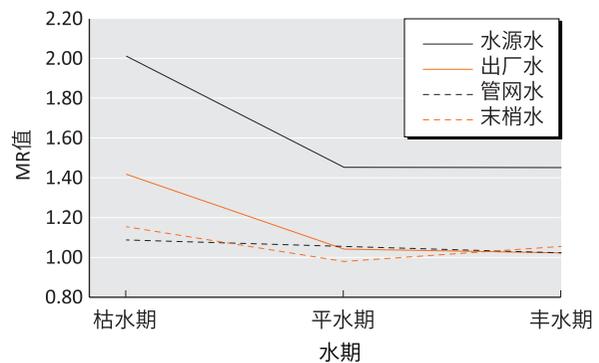


图 1 不同水期、类型饮用水的致突变强度
Figure 1 The mutagenic intensity of different drinking water types in different water periods

3 讨论

运用二倍法则^[5]对实验结果进行判定, 本次研究

中有4份水样5个组别为阳性结果,均为-S9的TA98菌株阳性,TA100菌株的组别全部为阴性结果,表明水样中的非挥发性有机物是一类可致移码突变的直接致突变物质。其中枯水期的水源水能在较低剂量出现阳性结果,平水期和丰水期的水源水只在高剂量出现阳性结果,平水期的出厂水也在高剂量组出现阳性结果,其余组别均为阴性结果。

在3个不同水期分别采集水样,每个时期采集4种类型水样,其中以枯水期的水样的阳性结果为多,4组枯水期的水样中有2种类型具有致突变性(阳性率为50%),平水期和丰水期的水样中各有1种类型具有致突变性(阳性率为25%),所有阳性结果均为TA98菌株阳性,枯水期的致突变性最强,平水期和丰水期较弱。不同水期的水样在TA100菌株的结果均为阴性,经统计学分析发现TA100菌株虽未达到阳性判定的要求,但是MR值变化的趋势与TA98菌株一致。董双谊^[6]和许宁等^[7]对上海市生活饮用水的调查发现丰水期水质情况好于枯水期,与本次研究结果一致。刘弢等^[8]和Xiao等^[9]对长江水系上游城市的生活饮用水的致突变性进行研究,发现平水期的致突变性最高,枯水期次之,丰水期最低,此结果与本次研究不同。上海具有地势低平、水网密布的特点,丰水期有大量河流水资源补给,使水中的有机物浓度有所稀释,在枯水期地表水资源枯竭令水中有机物富集,生活饮用水致突变性与河流补给形成正相关。

本次研究按照生活饮用水的类型分别采集4种类型的水样,每一种类型采集3个水期水样。二倍法判定的结果中3个水期水源水全部为阳性结果(阳性率为100%),3个水期出厂水中仅有1个为阳性结果(阳性率为33.3%),管网水和末梢水全部为阴性结果。上海市生活饮用水的水源水具有较强的潜在致突变性,经过水厂处理后的管网水和末梢水的水样不具有致突变性。有学者对南京、湖州、衢州^[10-12]等上游城市生活饮用水的致突变性进行研究,发现出厂水具有较高的致突变性,水源水次之,末梢水的致突变性较弱,此结果与本次研究不一致。现阶段我国用于饮用水消毒的方法主要是氯化消毒,水中有机物经氯化消毒后产生的DBPs具有致突变性^[13]。在传统水消毒模式中通过加入过量氯来保证末梢水中余氯浓度,会导致水中DBPs含量增多进而影响饮用水的安全性^[14]。上海自来水厂采用新型的消毒工艺^[15],在供水管网中进行二次加氯消毒,通过多点加氯消毒的方式减少水厂

中加氯的浓度从而控制出厂水中DBPs的含量^[16],保证经处理后生活用水的安全。

值得关注的是,本次研究发现高剂量组的枯水期出厂水的水样具有致突变性,平水期和丰水期则不具有致突变性。经过调查发现上海的自来水厂采用预氯化的工艺对饮用水进行加氯消毒,氯作为参与三卤甲烷生成反应的反应物之一,加氯量的浓度与三卤甲烷生成量具有相关性。氯与水中的消毒副产物前驱物质的反应是吸热反应,三卤甲烷的反应速率会随水温的升高而加快,故自来水厂在夏季和冬季采用不同的加氯浓度,冬季采用较高的加氯浓度^[17],由此导致在冬天的出厂水的水样中致突变物质增多具有较强的致突变性。待气温上升后采集的平水期和丰水期出厂水都不具有致突变性,验证了此工艺带来的区别。此项结果提示在生活饮用水消毒处理工艺的研究上还需进一步验证以确保饮用水的安全性。

综上所述,上海主城区生活饮用水的在枯水期具有较强的致突变性,平水期和丰水期次之;饮用水中的水源水具有较强的潜在致突变性,而居民使用的管网水和末梢水在各个水期所采集的样本都未检测出致突变性。同时值得关注的是采用XAD-2树脂吸附法,仅能将饮用水中不挥发性的有机污染物进行富集并检测其致突变性,对于饮用水中的挥发性有机污染物无法进行检测,这也是运用细菌回复突变试验反映生活饮用水致突变性的局限性所在。

参考文献

- [1] 钱海雷,许慧慧,郭常义,等.青草沙水库启用对上海市浦西七区饮用水水质的影响[J].环境与健康杂志,2018,35(3):242-245.
QIAN HL, XU HH, GUO CY, et al. Effects of Qingcaosha reservoir operation on drinking water quality in Puxi area, Shanghai [J]. J Environ Health, 2018, 35 (3) : 242-245.
- [2] KHALLEF M, CENKCI S, AKYIL D, et al. Ames and random amplified polymorphic DNA tests for the validation of the mutagenic and/or genotoxic potential of the drinking water disinfection by-products chloroform and bromoform [J]. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng, 2018, 53 (2) : 154-159.
- [3] COGNET L, COURTOIS Y, MALLEVIALLE J. Mutagenic activity of disinfection by-products [J]. Environ Health Perspect, 1986, 69 : 165-175.

- [4] 肖贤明, 林耀军, 潘海祥, 等. 饮用水 Ames 致突变性与主要有机污染指标的关系 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, 19 (2) : 125-128.
XIAO XM, LIN YJ, PAN HX, et al. An investigation of the relationship between Ames 'test mutagenic effects and main organic pollutants for drinking water [J]. J Grad Sch Chin Acad Sci, 2002, 19 (2) : 125-128.
- [5] 王晓萌, 张萍, 钟儒刚, 等. Ames 试验的剂量效应关系及统计学方法探讨 [J]. 中国卫生检验杂志, 2013, 23 (15) : 3151-3154.
WANG XM, ZHANG P, ZHONG RG, et al. Investigation on dose effect relationship and statistical method of Ames test [J]. Chin J Health Lab Technol, 2013, 23 (15) : 3151-3154.
- [6] 董双谊. 上海市徐汇区生活饮用水卫生学调查及对策分析 [D]. 上海: 复旦大学, 2013.
DONG SY. Hygiene investigation and countermeasure analysis on drinking water in Xuhui district of Shanghai [D]. Shanghai : Fudan University, 2013.
- [7] 许宁, 李朋昆. 2010 年上海市黄浦区生活饮用水水质监测分析 [J]. 河南预防医学杂志, 2011, 22 (5) : 381-382.
XU N, LI P K. Monitoring and analysis of drinking water quality in Huangpu district of Shanghai in 2010 [J]. Henan J Prev Med, 2011, 22 (5) : 381-382.
- [8] 刘弢, 唐非, 邵国健, 等. 湖州市饮用水中非挥发性有机物致突变性分析 [J]. 预防医学, 2019, 31 (10) : 1045-1047.
LIU T, TANG F, SHAO GJ, et al. Mutagenicity analysis of non volatile organic compounds in drinking water in Huzhou [J]. Prev Med, 2019, 31 (10) : 1045-1047.
- [9] XIAO SH, LV XM, ZENG YF, et al. Mutagenicity and estrogenicity of raw water and drinking water in an industrialized city in the Yangtze River Delta [J]. Chemosphere, 2017, 185 : 647-655.
- [10] 杜雪飞, 谢国祥, 贾力敏. 南京市饮用水 Ames 试验结果分析 [J]. 预防医学文献信息, 2000, 6 (1) : 42-43.
DU XF, XIE GX, JIA LM. Analysis of Ames test results of drinking water in Nanjing [J]. Lit Inf Prev Med, 2000, 6 (1) : 42-43.
- [11] 杨洛贤, 滕卫林, 王强, 等. 2014 年杭州市主城区饮用水中消毒副产物的分布及其健康风险 [J]. 环境与职业医学, 2016, 33 (3) : 237-242.
YANG LX, TENG WL, WANG Q, et al. Distribution and health risk of disinfection by-products in drinking water in Hangzhou main urban zone, 2014 [J]. J Environ Occup Med, 2016, 33 (3) : 237-242.
- [12] 周华, 张蕴, 金莞尔, 等. 衢州市生活饮用水挥发性有机物检测结果分析 [J]. 预防医学, 2016, 28 (9) : 944-946.
ZHOU H, ZHANG Y, JIN WE, et al. Analysis of volatile organic compounds in drinking water in Quzhou city [J]. Prev Med, 2016, 28 (9) : 944-946.
- [13] FREEMAN LEB, CANTOR KP, 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]. Environ Health Perspect, 2017, 125 (6) : 067010.
- [14] MANASFI T, DE MÉO M, DI GIORGIO C, et al. Assessing the genotoxicity of two commonly occurring byproducts of water disinfection : chloral hydrate and bromal hydrate [J]. Mutation Res, 2017, 813 : 37-44.
- [15] 毛洁, 周艳琴, 周晓鹞, 等. 水源水和水处理工艺对上海市生活饮用水水质的影响 [J]. 环境与职业医学, 2013, 30 (12) : 928-930.
MAO J, ZHOU YQ, ZHOU XL, et al. Impact of source water and water treatment process on drinking water quality in Shanghai [J]. J Environ Occup Med, 2013, 30 (12) : 928-930.
- [16] 马力辉, 刘遂庆, 信昆仑. 城市供水管网二次加氯研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2006, 28 (9) : 693-697.
MA LH, LIU SQ, XIN KL. A review of models for booster chlorination in water distribution systems [J]. Environ Pollut Control, 2006, 28 (9) : 693-697.
- [17] 王晋宇, 陈玲瑚, 赵辰, 等. 饮用水中三卤甲烷生成影响因素的初步研究 [J]. 净水技术, 2009, 28 (6) : 30-34.
WANG JY, CHEN LH, ZHAO C, et al. Primary investigation on influencing factors of trihalomethanes' generation in drinking water [J]. Water Purif Technol, 2009, 28 (6) : 30-34.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)