

活性炭的筛选及其吸附饮用水中低量溴化物的研究

容顺, 杨秀华, 郭伟鹏, 陈维, 魏琳婷

(华南应用微生物国家重点实验室, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广东省微生物分析检测中心, 广东省微生物研究所, 广东广州 510070)

摘要: 本文通过研究星光 K02 活性炭、星光 K04 活性炭和太西活性炭等六种活性炭对饮用水中低量溴化物的吸附效率, 筛选出了吸附效果最佳的太西活性炭。同时探讨了不同的活化方式、不同的吸附时间以及饮用水中不同的 pH 值对 TAC(太西活性炭)吸附饮用水中低量溴化物 ($7.50 \mu\text{g/L}$) 效率的影响。实验采用了蒸馏水浸泡和稀盐酸浸泡两种活化方式, 用 CO_2 酸化的方式将饮用水中 pH 值分别调至 6.00、7.00 和 7.68 三个水平, 在不同的时间点取样, 用离子色谱仪检测其溴化物含量。不同条件下, TAC 吸附溴化物效率不同。实验结果表明, 用稀盐酸浸泡作为活化方式, 同时将饮用水的 pH 值调至 6.00, 在实验开始后的两个小时内 TAC 吸附溴化物效果最佳, 能达到 85.35%, 此时溴化物含量为 $1.10 \mu\text{g/L}$, 即使在后续的臭氧灭菌阶段, 溴离子全部被氧化成溴酸盐, 溴酸盐的值会在 $5 \mu\text{g/L}$ 以内, 远小于 GB 5749-2006 和 GB 8537-2018 中溴酸盐的规定限值 ($10 \mu\text{g/L}$), 同时, TAC 对饮用水中的常量元素钾钠钙镁、微量元素锶及偏硅酸等影响不大 (小于 10%)。因此, 在实际生产中, 可先将饮用水中 pH 值调至 6.00, 然后采用盐酸溶液预处理后的 TAC 对饮用水中低量溴离子进行去除。

关键词: TAC(太西活性炭); 溴化物; 吸附; 饮用水

文章编号: 1673-9078(2019)03-201-206

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.3.030

Selection of Activated Carbon and Its Adsorption on Low Amount Bromide in Drinking Water

RONG Shun, YANG Xiu-hua, GUO Wei-peng, CHEN Wei, WEI Lin-ting

(State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application; Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangdong detection center of Microbiology, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China)

Abstract: In this paper, the adsorption efficiency of the low bromide in the drinking water based on six kinds of activated carbon, Xingguang K02 activated carbon, Xingguang K04 activated carbon and TAC (Taixi Activated Carbon) activated carbon was investigated, and TAC with the best adsorption effect was selected. The effects of different activation modes, different adsorption time and PH values in drinking water on the efficiency of low bromide ($7.50 \mu\text{g/L}$) in the drinking water adsorbed by TAC (Taixi Activated Carbon) were discussed. Two activation methods, soaked by distilled water and by diluted hydrochloric acid, were used in the experiment. The pH values of drinking water were adjusted to 6.00, 7.00 and 7.68 levels and bromide was detected at different times. The efficiencies of bromide adsorbed by TAC were different under different conditions. It was demonstrated that when the pH of drinking water was adjusted to 6.00, TAC soaking by dilute hydrochloric acid was used as the activation method, the best effect of TAC adsorption bromide was 85.35 % in two hours, and the content of bromide is $1.10 \mu\text{g/L}$. Even in the subsequent ozone sterilization phase, the bromide was all oxidized to bromate, and the final content of bromate was within $5 \mu\text{g/L}$, which is far less than the prescribed limit of bromate in GB 5749-2006 and GB 8537-2018($10 \mu\text{g/L}$). At the same time, TAC has little influence on the major elements of drinking water, such as potassium, sodium, calcium, magnesium, trace elements strontium and metasilicic acid (less than 10%). Therefore, in actual production, the pH value in drinking water can be first adjusted to 6.00, and the low bromine ion in drinking water could be removed by TAC pretreated with hydrochloric acid solution.

Key words: TAC(Taixi Activated Carbon); bromine; adsorption; drinking water

收稿日期: 2018-10-24

基金项目: 广东省科技计划项目 (2015B020230006; 2017A070702018); 科学院实施创新驱动发展能力建设专项资金项目 (2017GDASCX-0201)

作者简介: 容顺 (1992-), 男, 检测助理, 研究方向: 食品微生物安全

通讯作者: 郭伟鹏 (1974-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向: 食品微生物安全

水体中溴酸盐污染一直是国内外饮用水行业关注的焦点。溴酸盐属于“2B 级”潜在致癌物,我国早在 2009 年已将它列入饮用水检测项目,规定含量最高不得超过 0.01 mg/L。溴酸盐是由于用臭氧对饮用水进行消毒时,溴化物与臭氧进行反应而生成。调查结果显示,许多国家和地区饮用水均存在溴酸盐超标问题^[1-3],因此在对饮用水进行臭氧消毒时,一定要控制好溴酸盐的含量。溴酸盐的控制可从控制溴酸盐的形成和溴酸盐形成后去除两个方面进行^[4]。而在控制溴酸盐的形成这方面,主要控制方式有加氨、降低 pH、优化臭氧条件和活性炭去除等等。其中,通过活性炭吸附水体中的溴化物进而控制溴酸盐的产生是饮用水行业中有有效的处理工艺。

活性炭具有丰富的内部空隙结构和较大的比表面积,是一种优良的吸附材料,其由碳形成的六环物堆积而成,其化学成分是碳元素及少量的硫、氮、氧和灰分等。它的物理和化学性质稳定,耐酸耐碱,能承受高温高压条件,不溶于水和有机溶剂,且吸附失效后可再生,循环利用,被广泛应用于工业、农业、国防交通、医药卫生、饮用水行业 and 环境保护等各个领域^[5-12]。在饮用水行业中,活性炭由于其吸附性能好,价格适中,且吸附过程中不会给饮用水中带入其它杂质,被广泛应用于饮用水中去除溴化物和溴酸盐的处理工艺研究。本研究挑选了六种常被用于去除溴化物的活性炭进行实验,实验结果表明,TAC 去除饮用水中低含量溴化物的效率最佳,随后,实验探讨了不同条件下,TAC 去除饮用水中低含量溴化物的效率的影响,并选出了最优条件,为解决饮用水中通过控制溴化物进而控制溴酸盐产生难题提供了理论依据。为开发多种类型水源,生产健康饮用水起推动作用。

1 材料与方法

1.1 设备与材料

1.1.1 主要仪器设备

离子色谱分析仪: ICS-1600 (配 IonPac AS19/AG19, ASRS 300 4-mm 型抑制器, RFC-30 免试剂控制器, EGC II KOH 淋洗液罐, AS-DV 自动进样器) (B4388-4318)、二氧化碳气罐(纯度为 99.95%)、电感耦合等离子体质谱仪(1260-7700e): B4427-4387、连续光源火焰/石墨炉原子吸收光谱仪(ContrAA700): B4247-3945。

1.1.2 材料与试剂

实验用到的活性炭有星光 K02 活性炭、星光 K04 活性炭、宇新活性炭、韩亚活性炭、鹏星活性炭和

TAC。煤质 TAC 购买自山西新华煤质集团,为柱状颗粒活性炭,材质坚硬耐用,不含有可见的页岩、泥土或者碎片等杂质。物理参数:堆积密度 0.42~0.52 g/mL,漂浮率≤2% (按质量计),水分≤5%,灰分≤12%,强度≥95%,粒度 ($\Phi 1.5$ mm): >2.50 mm 粒径≤2%, 1.25 mm~2.50 mm 粒径≥83%, 1.00 mm~1.25 mm 粒径≤14%, <1.00 mm≤1%。滤料亚甲蓝吸附值≥180 mg/g,碘吸附值 989 mg/g,比表面积 1000 m²/g, TAC 表面官能团:碱性官能团: 0.4370 mmol/g,酸性官能团: 1.6686 mmol/g,酚羟基官能团: 0.0885 mmol/g。

盐酸(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;硝酸(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;五水硫代硫酸钠(分析纯)、碘(分析纯)、硝酸(分析纯),广州化学试剂厂。

1.1.3 试验用某饮用水主要指标

溶解性总固体 110 mg/L,总硬度(以 CaCO₃) 54.0 mg/L,总碱度 59.5 mg/L,总酸度 7.50 mg/L, pH 值 7.38,电导率 292 μ S/cm,氧化还原电位(ORP) 229 mV,偏硅酸 30.5 mg/L,溴化物 7.50 μ g/L,锑 0.24 mg/L,总有机碳 TOC (有机物与溴化物存在竞争吸附关系) 0.9 mg/L。

1.1.4 活性炭吸附柱

柱体材料为有机玻璃,装置截面积为 12.5664 cm²,炭层高 57 cm,吸附柱体积为 716.3 cm³,使水与炭的接触时间为 9.04 min,装置的流速为 $u=716.3 \text{ cm}^3/9.04 \text{ min}=79.2 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。(注:通过阀门流量计调节流速)。

1.1.5 试验流程

源水桶→TAC 柱吸附→调节出水流速→按设定时间点取出水→经过 0.22 μ m 滤膜→上机测定溴化物含量

1.2 实验方法

1.2.1 活性炭种类的筛选

1.2.1.1 各类活性炭溴化物本底值的测定

活性炭含有溴化物,可能的来源于两个方面,一是其制作原料中原本含有溴化物,二是活性炭制作工艺中带入的溴化物。溴化物本底值试验方法为浸泡法:称取各类活性炭 100 g 分别用 2 L 纯水冲洗两次,再用 2 L 纯水浸泡过夜(15 h),取滤液用离子色谱仪测定本底溴化物含量。

1.2.1.2 各类活性炭碘吸附值的测定

各类活性炭碘吸附值的测定方法参照 GB/T 12496.8-2015。测定过程如下:取经粉碎后干燥活性炭适量,放入干燥的 100 mL 碘量瓶中,准确加入(分析纯)盐酸 10.0 mL 使试样湿润,放在电炉上加热至

沸, 微沸 (30 s), 冷却至室温后, 加入 50.0 mL 的 0.1 mol/L 左右的碘标准溶液。立刻塞好瓶塞, 在振荡机上振荡 15 min, 迅速过滤到干燥的烧杯中, 用移液管吸取 10.0 mL 滤液, 放入 250 mL 碘量瓶中, 加入 100 mL 水中, 用 0.1 mol/L 左右的硫代硫酸钠标准溶液进行滴定, 在溶液呈淡黄色时, 加 2 mL 淀粉指示剂, 继续滴定使溶液变成无色, 记录下使用的硫代硫酸钠标准溶液体积, 再经公式换算得出碘吸附值。

1.2.1.3 各类活性炭对饮用水中溴化物的动态吸附

分别称取 500 g 星光 K02 活性炭、星光 K04 活性炭、宇新活性炭、韩亚活性炭、鹏星活性炭和 TAC, 用蒸馏水清洗 5 遍 (主要清洗表面灰尘), 第二天早上装入活性炭吸附柱, 用实验饮用水冲柱, 流速为 79.2 mL/min。然后收集不同时间点的过柱后水样并检测其溴化物含量, 检测标准参照 GB 8538-2016, 检验方法为离子色谱法。

1.2.2 预处理方式及吸附时间对 TAC 去除溴离子的影响

分别称取 500 g TAC 两份, 用蒸馏水清洗 5 遍 (主要清洗表面灰尘), 分别用等量的蒸馏水和 5% 的盐酸 (分析纯) 溶液浸泡过夜。第二天早上分别装入 A-TAC 柱和 B-TAC 柱, 用实验饮用水冲柱, 流速为 79.2 mL/min。然后用离子色谱仪检测不同的时间点取的过柱后水样。

1.2.3 饮用水中 pH 值对 TAC 去除溴离子的影响

向三桶实验用饮用水中通入 CO_2 降低饮用水的 pH 值, 并通过控制通 CO_2 的时间调节加入水中 CO_2 的量, 进而调节水中 pH 值。如表 1。

表 1 通入 CO_2 的时间与饮用水中的 pH 值

Table 1 Time of introduction to CO_2 and the pH in drinking water

	通入 CO_2 的时间	CO_2 流量/(L/min)	pH 值
1 号桶	0.2min	5.0	7.86
2 号桶	0.5min	5.0	7.00
3 号桶	1.0min	5.0	6.00

表 2 各类活性炭的本底值

Table 2 Background values for various types of activated carbon

活性炭种类	星光 K02 活性炭	星光 K04 活性炭	宇新活性炭	韩亚活性炭	鹏星活性炭	TAC
Br 含量/($\mu\text{g/L}$)	9.50	37.25	7.00	27.00	12.20	7.30

表 3 各类活性炭的碘吸附值

Table 3 Iodine adsorption values of various activated carbons

活性炭种类	星光 K02 活性炭	星光 K04 活性炭	宇新活性炭	韩亚活性炭	鹏星活性炭	TAC
碘吸附值/(mg/g)	973	975	833	931	937	989

然后用 1.2.2 得到的最佳预处理方式, 在最佳时间点取样检测。

1.2.4 TAC 对饮用水中常量元素钾钠钙镁、微量元素锶及偏硅酸的影响

从实验 1.2.2 及实验 1.2.3 分别得到最佳预处理方式、最佳吸附时间及饮用水中最佳 pH 值, 在此条件下进行实验, 并取过柱前和过柱后水样, 测其钾钠钙镁锶及偏硅酸的检测标准参照 GB 8538-2016, 钾钠钙镁的检验方法为火焰原子吸收光谱法, 锶的检测方法为电感耦合等离子体质谱法, 偏硅酸的检验方法为硅钼黄分光光度法。

1.2.5 数据统计分析

每组实验均重复三次以上, 采用 Microsoft Office Excel 2016 进行绘图并分析数据, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差, 采用 SPSS 20.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 各类活性炭的本底值

试验采用浸泡法比较各类活性炭的本底值。由表 2 可以看出, 星光 K02 活性炭、星光 K04 活性炭、韩亚活性炭和鹏星活性炭的本底值较高, 用这几类活性炭吸附低量溴化物时, 要先将其本底溴化物冲洗降低到较低水平。TAC 和宇新活性炭的溴化物本底值较小, 适合用来吸附饮用水中的低量溴化物。

2.2 各类活性炭碘吸附值

碘吸附值表示活性炭的大于 1.0 nm 微孔的发达程度, 它是活性炭对小分子杂质吸附能力的表现, 是衡量活性炭质量优劣的一个重要指标, 碘吸附值越高, 说明活性炭质量越好。从表 3 可得, TAC 活性炭的碘吸附值达 989 mg/g, 与其它几种活性炭相比, 它的碘吸附值最大, 对于小分子杂质吸附能力更强, 更适合于吸附饮用水中的低量溴化物。

表 4 活性炭种类的筛选

Table 4 Screening of activated carbon types

过柱总时间/h	平均出水 Br 含量/(μg/L)					
	星光 K02 活性炭	星光 K04 活性炭	宇新活性炭	韩亚活性炭	鹏星活性炭	TAC
1	9.50±0.10	37.25±1.72	7.00±0.08	27.00±0.07	12.20±0.07	5.30±0.14
2	9.50±0.20	13.85±0.32	6.55±0.16	25.95±0.21	9.30±0.07	5.05±0.07
3	7.50±0.25	8.65±0.07	6.50±0.25	22.85±0.07	8.65±0.21	5.10±0.06
4	7.50±0.14	6.40±0.14	6.85±0.21	15.95±0.06	8.10±0.14	5.00±0.14
5	7.30±0.28	6.90±0.16	6.90±0.07	16.45±0.07	8.20±0.14	5.10±0.14
6	6.65±0.30	7.00±0.22	7.30±0.28	14.95±0.21	7.85±0.21	5.05±0.05
7	6.10±0.20	6.75±0.14	6.10±0.07	12.70±0.14	8.00±0.10	6.20±0.14
8	6.60±0.20	6.90±0.18	6.85±0.21	10.55±0.07	7.60±0.14	5.60±0.14
9	6.90±0.08	7.20±0.14	6.30±0.15	10.00±0.14	8.05±0.07	5.30±0.10
10	6.90±0.14	7.00±0.29	7.00±0.07	10.45±0.21	7.70±0.28	5.50±0.07
11	6.90±0.16	7.00±0.30	7.50±0.31	9.75±0.21	7.55±0.07	5.70±0.21
12	6.60±0.27	7.00±0.07	7.70±0.17	9.15±0.21	7.45±0.07	6.00±0.28

2.3 各类活性炭对饮用水中溴化物的动态吸附

实际过柱时间为 36 h，但由实验数据得出，在过柱 12 h 后，各类活性炭均接近饱和，出水溴化物含量趋于稳定（其中韩亚活性炭在 18 h 后出水溴化物稳定在 7.50 μg/L 左右），因此本文选择了过柱前 12 h 的数据进行分析。每个时间点取 4 个平行样进行检测，由表 4 得知，所有测量值的相对标准偏差均小于 5%，经 SPSS20.0 分析，不同的活性炭对饮用水中溴化物的吸附效率差异有统计学意义 ($p<0.05$)。星光 K04 活性炭和韩亚活性炭由于其溴化物本底值较大（详见表 2），过柱 1 h 后饮用水中溴化物含量分别升高至 37.25 μg/L 和 27.00 μg/L，说明这两种活性炭不仅没有吸附饮用水中的溴化物，反而将其本身带有的大量溴化物释放到了饮用水中，虽然经过长时间的冲洗，其溴化物本底值能被降下来，但是对饮用水中溴化物的吸附没有明显的效果。星光 K02 活性炭、宇新活性炭和鹏星活性炭虽然溴化物本底值不高，但是在吸附试验进行的 12 h 内，饮用水中溴化物均没有被降到 6.00 μg/L 以下，效果不理想。TAC 对饮用水中低量溴离子的去除效率最佳，且吸附性能稳定，适合用于饮用水中低量溴离子的去除。

2.4 预处理方式对 TAC 去除溴离子的影响

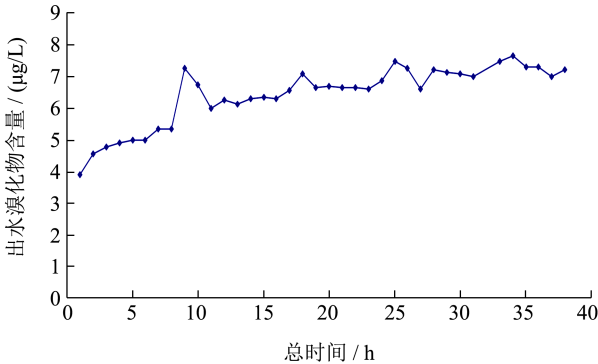


图 1 蒸馏水浸泡预处理对 TAC 去除溴离子的影响

Fig.1 Effect of distilled water immersion pretreatment on the removal of bromine ions from TAC

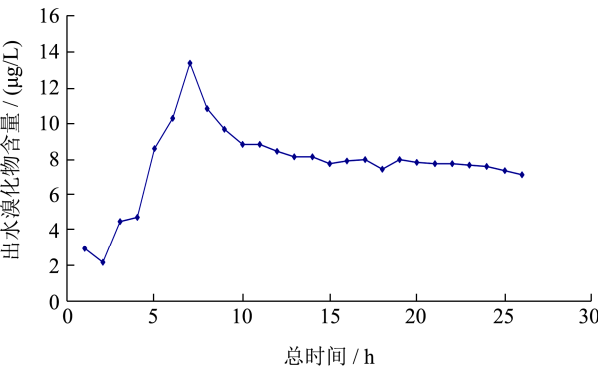


图 2 稀盐酸溶液浸泡预处理对 TAC 去除溴离子的影响

Fig.2 Effect of immersion pretreatment of dilute hydrochloric acid solution on the removal of bromine ions from TAC

由图 1 和图 2 得知，过柱总时间不同，用预处理后的 TAC 吸附溴化物的效率也有差异，且经 SPSS

20.0 处理,其差异有统计学意义 ($p<0.05$)。在 4 h 内,用盐酸溶液预处理后的 TAC 比用纯水预处理后的 TAC 对低量溴离子的去除效率更佳。其中,稀盐酸溶液预处理后,吸附时间两小时以内,TAC 对饮用水中低量溴离子的去除效率最佳,达到 70.67%。随后,出水溴化物值升高后趋于稳定,活性炭达到饱和状态,对该饮用水中的溴化物吸附没有效果。稳定后的值接近饮用水溴化物本底值 ($7.50\text{ }\mu\text{g/L}$),后续的臭氧灭菌阶段,溴离子全部被氧化成溴酸盐,溴酸盐的值将会超过 GB 5749-2006 和 GB 8537-2018 中溴酸盐的规定限值 ($10\text{ }\mu\text{g/L}$),因此,在生产工艺上,要将吸附总时间控制在 4 h 以内。

2.5 饮用水中 pH 值对 TAC 去除溴离子的影响

表 5 饮用水中 pH 值对 TAC 去除溴离子的影响

Table 5 Effect of pH on removal of bromine ion by TAC in drinking water

pH 值	Br ⁻ 含量平均值/($\mu\text{g/L}$)		去除效率/%
	过柱前	过柱后	
7.86	7.50 $\pm$ 0.18	5.00 $\pm$ 0.19 ^a	33.33 ^c
7.00	7.55 $\pm$ 0.09	3.70 $\pm$ 0.12 ^b	50.99 ^b
6.00	7.51 $\pm$ 0.23	1.10 $\pm$ 0.01 ^c	85.35 ^a

注: 同列不同小写字母表示 $p<0.05$ 的显著性差异。

表 6 TAC 对饮用水中常量元素钾钠钙镁、微量元素锶及偏硅酸的影响

Table 6 Effect of pH on removal of bromine ion by TAC in drinking water

	平均值/(mg/L)					
	偏硅酸	钾	钠	钙	镁	锶
过柱前	27.51 $\pm$ 1.29	1.72 $\pm$ 0.04	2.49 $\pm$ 0.06	13.5 $\pm$ 0.28	3.02 $\pm$ 0.13	0.25 $\pm$ 0.00
过柱后	26.15 $\pm$ 1.05	1.57 $\pm$ 0.04	2.45 $\pm$ 0.01	12.5 $\pm$ 0.37	2.94 $\pm$ 0.07	0.23 $\pm$ 0.01
吸附率/%	4.94	8.72	1.61	7.41	2.65	8.00

3 结论

本实验先从星光 K02 活性炭、星光 K04 活性炭和 TAC 等六种活性炭中的溴化物本底值、碘吸附值及各类活性炭对饮用水中溴化物的动态吸附三个方面对活性炭进行筛选,得出在这六种活性炭中,TAC 的溴化物本底值最低、碘吸附值最大、对饮用水中低量溴离子的动态吸附效率最佳。随后,实验对 TAC 最佳的吸附条件进行探索,得出当用稀盐酸浸泡作为活化方式,同时将饮用水的 pH 值调至 6.00,在实验开始后的两个小时内 TAC 吸附溴化物效果最佳,能达到 85.35%。即使在后续的臭氧灭菌阶段,溴离子全部被氧化成溴酸盐,最后溴酸盐的值会在 $5\text{ }\mu\text{g/L}$ 以内,远小于 GB 5749-2006 和 GB 8537-2018 中溴酸盐的规定限值 ($10\text{ }\mu\text{g/L}$)。而且,实验结果表明,TAC 吸附饮用水中低

每个点取 4 个平行样进行检测,测量值的相对标准偏差均小于 5%。用 CO_2 降低饮用水的 pH 值后,TAC 对饮用水中的溴化物吸附效率将提升。当用稀盐酸浸泡作为活化方式,pH 值降至 6.00 时,吸附时间两个小时内,去除效率能达到 85.35%。

2.6 TAC 对饮用水中常量元素钾钠钙镁、微量元素锶及偏硅酸的影响

每个测试值平行 3 次,测量值的相对标准偏差均小于 5%。TAC 在去除饮用水中低量溴化物的同时,也会对饮用水中的常量元素钾钠钙镁、微量元素 S 锶及偏硅酸进行吸附。而钾钠钙镁锶硅等元素对人体骨骼和牙齿的组成、维持人体内正常的渗透压、维持神经肌肉应激性等起着非常关键的作用,是维持人体正常生理活动的重要元素,也是评价饮用水质量好坏的重要指标。因此用 TAC 去除饮用水中溴化物的同时,应该避免其对这些有益元素产生影响。实验结果表明,经过 TAC 的吸附后,饮用水中的偏硅酸、钾、钠、钙、镁和锶的下降率分别为 5.09%、8.72%、1.61%、7.41%、2.65%和 8.00%。TAC 对这些元素的去除率不高,均小于 10%,可见用 TAC 去除饮用水中低量溴化物,并不会对其中的有益元素产生较大的影响。

量溴化物的同时,并不会对水中的钾钠钙镁锶硅等有益元素产生较大影响(吸附率 $<10\%$),因此,在实际生产中,可采用盐酸溶液预处理后的 TAC 对饮用水中低量溴离子进行去除。

参考文献

[1] 孟凡亚.矿泉水及检验培养基国家标准制订的基础研究[D].广州:中国科学院南海海洋研究所,2007
MENG Fan-ya. Basic research on national standard of mineral water and testing culture medium [D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 2007

[2] 岳银玲,李淑敏,应波,等.超市中瓶装矿泉水溴酸盐含量的调查[J].中国卫生检验杂志,2006,6:677-678
YUE Yin-ling, LI Shu-min, YING Bo, et al. Survey of

- bromate content of bottled mineral water in supermarkets [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2006, 6: 677-678
- [3] 张书芳,叶冰,张丁,等.瓶装饮用水溴酸盐含量调查[J].现代预防医学,2009,36(11):2149-2151
- ZHANG Shu-fang, YE Bing, ZHANG Ding, et al. Survey of bromate content in bottled water [J]. Modern Preventive Medicine, 2009, 36(11): 2149-2151
- [4] 吴清平,张永清,张菊梅,等.臭氧灭菌机理及消毒副产物溴酸盐控制技术研究进展[J].饮料工业,2009,12(4):6-12
- WU Qing-ping, ZHANG Yong-qing, ZHANG Ju-mei, et al. Research progress of ozone sterilization mechanism and control technology of bromate-a byproduct of disinfection [J]. The Beverage Industry, 2009, 12(4): 6-12
- [5] 罗洁,李言郡,李文强,等.饮用水处理用活性炭选炭方法的评述[J].饮料工业,2016,19(5):58-60
- LUO Jie, LI Yan-jun, LI Wen-qiang, et al. A review of activated carbon preparation for drinking water treatment [J]. The Beverage Industry, 2016, 19(5): 58-60
- [6] 罗兴仁.活性炭吸附法在工业废水处理中的应用[J].化工管理,2016,20:266-268
- LUO Xing-ren. Application of activated carbon adsorption in industrial wastewater treatment [J]. Chemical Enterprise Management, 2016, 20: 266-268
- [7] 孙龙梅,张丽平,薛建华,等.活性炭制备方法及应用的研究进展[J].化学与生物工程,2016,33(3):5-8
- SUN Long-mei, ZHANG Li-ping, XUE Jian-hua, et al. Progress in preparation and application of activated carbon [J]. Chemical and Biological Engineering, 2016, 33(3): 5-8
- [8] 段友丽,周婷,王晋.煤质活性炭在饮用水处理中的应用[J].中国给水排水,2012,28(8):31-34
- DUAN You-li, ZHOU Ting, WANG Jin. Application of coal activated carbon in drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 31-34
- [9] 张永清,吴清平,张菊梅,等.活性炭控制矿泉水中溴酸盐的选型及效果研究[J].食品工业科技,2011,32(4):65-68,71
- ZHANG Yong-qing, WU Qing-ping, ZHANG Ju-mei, et al. Study on the selection and effect of activated carbon for controlling bromate in mineral water [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(4): 65-68, 71
- [10] 刘彤冕,崔福义,赵志伟,等.溴酸盐和溴离子在活性炭上的竞争吸附研究[J].给水排水,2010,46(3):118-122
- LIU Tong-mian, CUI Fu-yi, ZHAO Zhi-wei, et al. Competitive adsorption of bromate and bromide ions on activated carbon [J]. China Water & Wastewater, 2010, 46(3): 118-122
- [11] 郭慧,郭兆学.活性炭处理工业废水的应用[J].科技信息(科学教研),2008,14:376,361
- GUO Hui, GUO Zhao-xue. Application of activated carbon in treatment of industrial wastewater [J]. Scientific and Technological Information (Scientific Teaching and Research), 2008, 14: 376, 361
- [12] 冒爱琴,王华,谈玲华,等.活性炭表面官能团表征进展[J].应用化工,2011,7:1267-1270
- MAO Ai-qin, WANG Hua, TAN Ling-hua, et al. Progress in characterization of functional groups on the surface of activated carbon [J]. Applied Chemical Industry, 2011, 7: 1267-1270

(上接第 86 页)

- [35] Chang C, Niu F, Su Y, et al. Characteristics and emulsifying properties of acid and acid-heat induced egg white protein [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 342-350
- [36] Mine Y. Recent advances in the understanding of egg white protein functionality [J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(7): 225-232
- [37] Shevkani K, Singh N, Kaur A, et al. Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 679-689
- [38] Xu L, Zhao Y, Xu M, et al. Changes in aggregation behavior of raw and cooked salted egg yolks during pickling [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 68-77
- [39] Ghribi A M, Gafsi I M, Sila A, et al. Effects of enzymatic hydrolysis on conformational and functional properties of chickpea protein isolate [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 322-330