

技术总结

世博会直饮水水质推荐标准及配套工艺试验研究

李伟英¹, 郭金涛², 许京晶², 陆辉², 张东³

(1. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092 2 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092 3 上海市自来水市北有限公司, 上海 200086)

摘要: 结合国际权威性的饮用水水质标准和我国现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006), 提出了上海世博会直饮水水质推荐标准, 为确保 2010 年上海世博会的饮用水安全及进一步完善我国饮用水水质标准提供参考。同时针对世博会直饮水水质要求, 采用颗粒活性炭/超滤/紫外消毒组合工艺对模拟的世博园区自来水进行深度处理。结果表明, 该工艺出水的浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和细菌总数分别为 0.155 NTU、0.35 mg/L、0.009 cm^{-1} 和零, 出水水质达到了 GB 5749—2006 和《饮用净水水质标准》(CJ94—2005) 的要求, 同时也满足世博会直饮水水质推荐标准的要求。由此可知, 采用颗粒活性炭/超滤/紫外消毒深度处理工艺制备直饮水是可行的。

关键词: 上海世博会; 直饮水; 超滤; 颗粒活性炭; 紫外消毒

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)19-0045-05

Investigation on Recommended Standards and Support Process for Expo Direct Drinking Water Quality

LI Weiying, GUO Jintao, XU Jingjing, LU Hui, ZHANG Dong

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment <Ministry of Education>, Tongji University Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Waterworks Shabei Co. Ltd. Shanghai 200086, China)

Abstract: Based on both the worldwide authoritative drinking water quality standards and the Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2006), the recommended standard for direct drinking water quality of 2010 Shanghai World Expo was proposed to ensure the security of the Expo drinking water and provide a reference for the improvement of drinking water quality standard in China. According to the requirement of Expo direct drinking water quality, the combined process of granular activated carbon, ultrafiltration and UV disinfection was used to treat the simulated drinking water for Shanghai World Expo Park. The results show that the effluent turbidity, COD_{Mn} , UV_{254} and total bacterial count are 0.155 NTU, 0.35 mg/L, 0.009 cm^{-1} and 0 cfu/mL respectively, which meets GB 5749—2006, the Water Quality Standard for Fine Drinking Water (CJ94—2005) and the recommended standard for direct drinking water quality of 2010 Shanghai World Expo. It is concluded that it is feasible to use the combined process of granular activated carbon, ultrafiltration and UV disinfection to produce direct drinking water.

基金项目: 苏州市重点科技支撑项目 (ZS0801); 上海市科委世博科技专项 (07DZ05804); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07421-006)

Key words Shanghai World Expo direct drinking water ultrafiltration granular activated carbon UV disinfection

饮用水安全是影响人类身体健康和国计民生的重大问题。然而,目前水源水质逐渐恶化,水中污染物尤其是有机污染物种类日益增多,且含量很低,多数为 $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ g/L}$ 。其中抗生素和个人护理用品(PFCS)等新型污染物对环境和生物的不利影响已引起更多的关注。但是,现行的常规水处理工艺(混凝、沉淀、过滤、消毒)对水中溶解性有机物和痕量污染物的去除能力有限,而且普遍采用的加氯消毒工艺容易生成具有“三致”作用的消毒副产物^[2],同时还会降低水的生物稳定性^[3]。

上海世博会期间,为了满足高温季节大客流的饮水需求,世博园区内添置了直饮水设备为游客免费提供直饮水,而直饮水的安全问题对于实现“安全世博”尤为关键。并且,随着人们对生活便捷性要求的日益提高,直饮水也已逐步进入人们的日常生活。然而,目前各国现行的饮用水水质标准均未达到直饮水的水质要求。笔者结合国际权威性的饮用水水质标准和我国现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),同时根据技术可行性和直饮水的健康安全要求,提出了上海世博会直饮水水质推荐标准;同时采用颗粒活性炭(GAC)、超滤(UF)、紫外(UV)消毒组合工艺对自来水进行深度处理,考察了该组合工艺的处理效果,以期对直饮水生产工艺的选择提供参考。

1 饮用水水质标准的分析与探讨

目前,世界上具有国际代表性的水质标准有世界卫生组织(WHO)的《饮用水水质准则》、欧盟(EC)的《饮用水水质指令》、美国环保局(USEPA)的《国家饮用水水质标准》和日本的《生活饮用水水质标准》等。我国现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)已于2007年7月1日起开始实施,指标由原标准的35项增至106项,同时修订了8项指标^[4]。笔者结合国际权威性的饮用水水质标准和我国现行的GB 5749—2006标准,提出了上海世博会直饮水水质推荐标准,其中的水质指标限值均为权威性标准限值的最低值,与正在执行的国内外饮用水水质标准相比,该推荐标准对水质的要求更加严格。

表 1 对各种饮用水水质标准的部分指标进行了

对比。
表 1 主要饮用水水质标准与直饮水水质推荐标准的比较
Tab 1 Comparison of main drinking water quality standards with direct drinking quality recommended standards

项 目	WHO (第 3 版)	EC (98/83 /EC)	USEPA (2001 版)	中国 (2006 版)	日本 (1993 版)	直饮水 推荐 标准
微生物指标	总大肠菌群 / (MPN·100 mL ⁻¹ 或 CFU ·100 mL ⁻¹)	不得 检出	—	不得 检出	不得 检出	不得 检出
	耐热大肠菌 群 / (MPN· 100 mL ⁻¹ 或 CFU·100 mL ⁻¹)	不得 检出	—	不得 检出	—	不得 检出
	贾第鞭毛虫 / (个·10 L ⁻¹)	—	—	<1	—	0
	肠道球菌 / (CFU· 100 mL ⁻¹)	—	0	0	—	0
毒理指标	砷 / (mg·L ⁻¹)	0.3	0.001	—	0.5	0.2 0.001
	镉 / (mg·L ⁻¹)	0.003	0.005	0.005	0.005	0.01 0.003
	铊 / (mg·L ⁻¹)	—	—	0.0005	0.0001	— 0.0001
	双酚 A / (mg·L ⁻¹)	—	—	—	0.01	— 0.01
	硝酸盐 (以 N计) / (mg ·L ⁻¹)	50	50	10	10 (地 下水源 限制时 为 20)	— 10
	苯并 (a) 芘 / (mg·L ⁻¹)	0.0007	0.00001	0	0.00001	— 0
	氟化物 / (mg·L ⁻¹)	0.07	0.05	0.2	0.05	0.001 0.001
感官性状和化学性指标	锑 / (mg·L ⁻¹)	0.005	0.005	0.006	0.005	0.002 0.002
	浊度 /NTU	5	用户可 接受且 无异常	—	1 (水源 与技术 受限时 为 3)	2 0.5
	氯化物 / (mg·L ⁻¹)	250	250	—	250	200 100
	色度 /倍	15	用户可 接受且 无异味	—	15	2 2
	耗氧量 (COD _{Mn} 法, 以 O ₂ 计) / (mg·L ⁻¹)	—	—	—	3 (水源 限制时 为 5)	10 2
感官性状和化学性指标	总硬度 (以 CaCO ₃ 计) / (mg·L ⁻¹)	—	—	—	450	300 300

1.1 微生物指标

目前饮用水的主要安全风险还是微生物指标(细菌、病毒、原生动物或其他微生物),对此各国的饮用水标准均有明确规定。① WHO出版的《饮用水水质准则》(第3版)中包括水源性疾病病原体27项(细菌12项,病毒6项,原虫7项,寄生虫2项)^[5],修订了确保微生物安全性的方法。② 2006年版的美国饮用水一级规程中规定的微生物学指标共有8项,同时把浊度列入微生物学指标中^[6],主要是从控制微生物风险方面来考虑,而不仅仅考虑水的感官性状。③ 欧盟(EC)的《饮用水水质指令》(1998版)中,微生物指标有2项,指标较少,但指标数据较严格。④ 我国的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中增加了耐热大肠菌群和大肠埃希菌两项微生物指标,将蓝氏贾第鞭毛虫和隐孢子虫列入检测项目,同时修订了总大肠菌群指标^[7]。⑤ 笔者推荐的直饮水标准中的检测指标是综合权威指标,从中选用最低的限值;对于权威指标没有规定的检测项,推荐指标中均提供了检测限值,并且要求均高于权威指标。如:贾第鞭毛虫指标的限值为零,肠道球菌的限值为零,产气荚膜梭状芽孢杆菌的限值为零,铜绿假单胞菌的限值为零,这些限值均是在推荐指标中特别提供的参考限值。

1.2 毒理指标

由于新的人工合成物质的增加、消毒副产物的带入、大量农药和杀虫剂的使用,同时随着微量分析和生物检测技术的进步,各国对水中毒理性物质致病风险的认识不断深化,因此在直饮水推荐标准中更加注重毒理指标的限值。① WHO出版的《饮用水水质准则》(第3版)中具有健康意义的化学指标共148项。在制定化学物质指导值时,既考虑到直接饮用部分,又考虑到沐浴时皮肤接触或易挥发物质通过呼吸摄入的部分^[8]。② EC的《饮用水水质指令》中感官和一般化学指标共15项,无机物指标共15项,有机物指标共7项,农药指标共2项,消毒剂及其副产物共2项;另外建立了综合性指标,如农药,使用了单一农药与农药总量两项指标,单一农药限值为 $0.1 \mu\text{g/L}$,农药总量限值为 $0.5 \mu\text{g/L}$ ^[9]。③ 美国率先开展了饮水消毒副产物方面的研究,确认了加氯消毒产生有机卤代物的健康风险,并建立了独立的细则;同时对其他的消毒剂及其副产物也提出了最大浓度限值或监控要求,并进行了有关的毒

理学试验;鉴于持久性有机污染物(POPs)和内分泌干扰物质(EDCs)具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性,NHWR对此也做出了相关规定^[8]。④ 日本在1998年增加了铀和亚硝酸盐氮两个监测项目,随后又增加了苯达松、卡巴呋喃等四种除草剂和二噁英监测项目。2004年发布的最新标准增加了由于使用洗涤剂和化妆品导致的1,4-二氧杂环乙烷和非离子活性剂、工业污染物导致的铝、蓝藻导致臭味的土臭素和2-甲基异冰片等指标^[9]。⑤ 我国的新标准对有毒有害物质更加重视,毒理指标中无机化合物由10项增至21项,有机化合物由5项增至53项;在消毒副产物方面,增加了复合二氧化氯的消毒副产物氯酸盐和氯消毒副产物氯化氰、三氯乙醛;同时增加了大量农药指标^[10]。

1.3 感官性状和一般化学指标

不同国家标准的各指标限值相差不大。日本标准中有17项是自来水的基本性状项目,还设了13项以水的可饮用性为目的的快适项目。对于色度指标,我国的GB 5749—2006中规定的限值较高,为15倍;日本的生活饮用水水质标准中规定的限值最低,为2倍。笔者推荐的直饮水水质标准规定色度的限值为2倍,浊度限值为0.5 NTU,耗氧量(COD_{Mn})限值为 2 mg/L 。

2 直饮水制备工艺

2.1 试验装置

试验装置见图1。

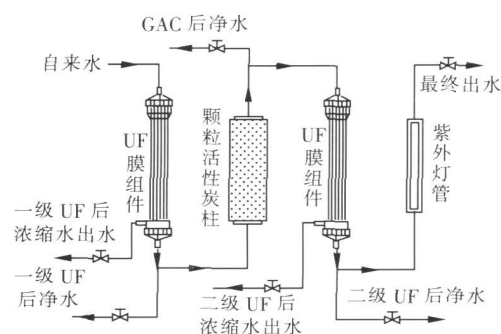


图1 试验装置

Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

世博园区内的自来水由南市水厂和临江水厂供应,这两个水厂均采用常规处理结合臭氧/活性炭深度处理的净水工艺;而笔者的模拟试验在同济大学实验楼进行,该处的自来水水质(由于是陈旧管道,可能存在二次污染)与世博园区(大部分是新铺

设管道)的自来水水质有较大差异。为模拟其真实的水力、水质情况,笔者在模拟试验中设置了两道超滤处理工艺,即原水以一定的压力进入一级中空纤维超滤膜进行分离(此处的出水可认为是世博园区内的自来水),然后经过活性炭柱的吸附、二级超滤膜再次分离,最终经过紫外消毒后出水。

2.2 试验原水

试验原水为同济大学实验楼的自来水,水质如下: COD_{Mn} 为 $2.4 \sim 4.0 \text{ mg/L}$, UV_{254} 为 $0.08 \sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$, TOC 为 $4.5 \sim 6.0 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 $0.25 \sim 0.45 \text{ mg/L}$,浊度为 $0.8 \sim 3.0 \text{ NTU}$, TDS 为 $270 \sim 280 \text{ mg/L}$, pH 值为 $6.8 \sim 7.2$,温度为 $10 \sim 13^\circ\text{C}$ 。

2.3 结果与讨论

2.3.1 对浊度的去除效果

原水的浊度较高,大部分在 1.0 NTU 以上(见图 2),这可能是由于自来水厂出水经输送管道后被二次污染所致。原水经过一级超滤后浊度即降至 0.2 NTU 以下,这不仅达到了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求(浊度 $\leq 1 \text{ NTU}$),而且满足《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)的要求(浊度 $\leq 0.5 \text{ NTU}$)。再经颗粒活性炭超滤/UV消毒组合工艺深度处理后,浊度稳定在 $0.1 \sim 0.2 \text{ NTU}$ 平均值为 0.155 NTU 。由此表明,世博园区的自来水经上述组合工艺深度处理后,出水浊度完全可以满足 GB 5749—2006 和 CJ 94—2005 的要求,并且也可达到世博会直饮水水质推荐标准的要求。

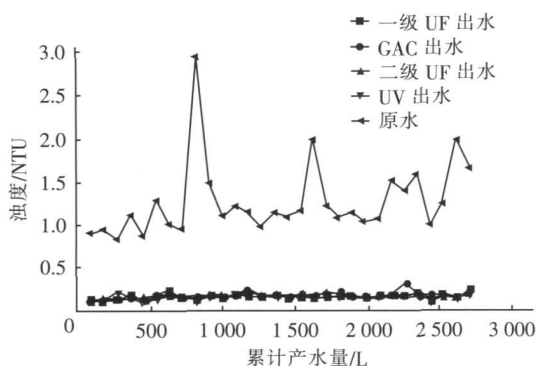


图 2 对浊度的去除效果

Fig 2 Removal of turbidity

2.3.2 对 COD_{Mn} 的去除效果

原水经一级超滤后,其 COD_{Mn} 浓度基本不变;再经 GAC 处理后, COD_{Mn} 浓度明显下降,低于 2 mg/L ,达到了《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)和世博

会直饮水水质推荐标准的要求;再经后续的二级超滤和紫外消毒后,出水 COD_{Mn} 可降至 0.35 mg/L 。

对原水进行凝胶色谱分析,发现色谱图中有 4 个停留时间较短的小峰,这些小峰代表原水中含有少量的大分子有机物;而经一级超滤后,色谱图上的 4 个小峰已不存在,说明超滤膜能够有效去除大分子有机物。另外,在试验中测得,原水中含有近 3.1%的大分子有机物 ($\text{MW} > 10 \text{ ku}$);经一级超滤后, $\text{MW} > 10 \text{ k}$ 的大分子有机物比例仅为 0.8%;再经活性炭吸附后,该比例降至 0.3%;再经二级超滤后,该比例降至 0.2%;再经紫外消毒处理后,该比例维持在 0.2%。 $\text{MW} < 3 \text{ ku}$ 的小分子有机物在原水总有机物中所占比例为 95%;经一级超滤后,该比例降为 91.2%;再经活性炭吸附后,该比例明显降低,为 35%;再经二级超滤后,该比例略有下降,为 30%;最后经紫外消毒后,该比例为 29%。

2.3.3 对 UV_{254} 的去除效果

在试验过程中,原水的 UV_{254} 均值为 0.089 cm^{-1} ,经过一级超滤后, UV_{254} 均值降至 0.081 cm^{-1} ,平均去除率为 8.99%;再经颗粒活性炭柱吸附后, UV_{254} 值急剧下降,为 0.014 cm^{-1} ,平均去除率达到 82.7%,可见颗粒活性炭对 UV_{254} 的去除效果明显优于超滤膜,再经后续的二级超滤和紫外消毒后,最终出水的 UV_{254} 值可降至 0.009 cm^{-1} 。

2.3.4 对细菌的去除效果

试验中测定了各工艺单元出水的细菌总数。结果显示,原水中的细菌总数最高可达 5 CFU/mL ,经一级超滤后,出水中的细菌总数减少,去除率基本达到 100%;再经颗粒活性炭处理后,细菌总数又升高,这可能与颗粒活性炭柱中吸附截留的有机物有关,因为有机物可为细菌滋生提供条件,导致出水中的细菌总数增加;再经过二级超滤处理后,细菌总数又降低至零;再经 UV 消毒后,出水中的细菌总数为零,达到了 GB 5749—2006 和 CJ 94—2005 的要求,亦满足世博会直饮水水质推荐标准的要求。

3 结论

① 结合国际权威性的饮用水水质标准和我国现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),提出了上海世博会直饮水水质推荐标准,其中的水质指标限值均为权威性标准限值的最低值,与正在执行的国内外饮用水水质标准相比,该推荐标准对

(下转第 53 页)

- (8): 1580—1585
- [3] 鲁金凤, 马军, 何如, 等. 负载型 FeOOH 催化臭氧氧化对THMFP的控制效果[J]. 中国给水排水, 2008, 24(15): 32—35
- [4] 马军, 张涛, 陈忠林, 等. 水中羟基氧化铁催化臭氧分解和氧化痕量硝基苯的机理探讨[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 78—84
- [5] von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation[J]. Water Res, 2003, 34(7): 1443—1467
- [6] Cowman G A, Singer P C. Effect of bromide ion on haloacetic acid speciation resulting from chlorination and chloramination of aquatic humic substances[J]. Environ Sci Technol, 1996, 30(1): 16—24
- [7] Chang E E, Chiang P C, Liu H T, et al. Effect of bromide and ammonia on the formation of ozonation and chlorination by-products[J]. Pract Period Hazard Toxic
- Rad Waste Manage, 2008, 12(2): 79—85
- [8] Pourmoghaddas H, Stevens A A, Kirman R N, et al. Effect of bromide ion on formation of HAA5 during chlorination[J]. JAWWA, 1993, 85(1): 82—87
- [9] Jolley R L. Water Chlorination: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects[M]. Chelsea, Mich: Lewis Publishers, 1990
- [10] Zhang Tao, Lu Jin-feng, Ma Jun, et al. Comparative study of ozonation and synthetic goethite catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water[J]. Water Res, 2008, 42(6—7): 1563—1570

电话: (022)23503730

E-mail: lujinfeng625@126.com

通讯作者: 张涛

收稿日期: 2010—04—04

(上接第48页)

水质的要求更加严格。

② 采用颗粒活性炭/超滤/紫外消毒组合工艺深度处理模拟的世博园区生活供水, 最终出水浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和细菌总数分别为 0.155 NTU 、 0.35 mg/L 、 0.009 cm^{-1} 和零, 达到了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)的要求, 同时也满足世博会直饮水水质推荐标准的要求。由此证明, 颗粒活性炭/超滤/紫外消毒组合工艺用于制备直饮水是可行的。

参考文献:

- [1] 杨叶梅, 朱凤鸣, 邹学贤. 饮用水中痕量有机污染物固相萃取气相色谱—质谱测定法[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(1): 69—71
- [2] Bove F, Shim Y, Zeitz P. Drinking water contaminants and adverse pregnancy outcomes: a review[J]. Environ Health Perspect, 2002, 110(Suppl 1): 61—74
- [3] 刘成, 高乃云, 蔡云龙. 不同消毒剂对饮用水生物稳定性的影响[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(2): 254—258
- [4] 但德忠, 陈维果. 我国饮用水卫生标准的变革及特点[J]. 中国给水排水, 2007, 23(16): 99—104
- [5] 甘日华. WHO和世界主要国家生活饮用水卫生标准介绍[J]. 中国卫生监督杂志, 2007, 14(5): 353—356
- [6] 张岚, 王丽, 鄂学礼. 国际饮用水水质标准现状及发展趋势[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(6): 451—453
- [7] 李玉清. GB 5749—2006与国内外常用饮用水标准的对比分析[J]. 石油工业技术监督, 2008, 24(5): 53—56
- [8] 刘强, 王晓昌, 李世俊, 等. 美国现行饮用水水质标准简介[J]. 给水排水, 2006, 32(11): 106—111
- [9] 李伟英, 李富生, 高乃云, 等. 日本最新饮用水水质标准及相关管理[J]. 中国给水排水, 2004, 20(5): 104—106
- [10] 陈林, 许龙, 樊华青. 新版《生活饮用水卫生标准》与《城市供水水质标准》的比较[J]. 江西化工, 2008, (3): 175—179

E-mail: wsd@163.com

收稿日期: 2010—03—29