

北京市饮用水中溴酸盐、卤代乙酸及高氯酸盐研究

刘勇建¹, 牟世芬^{1*}, 林爱武², 崔建华², 杜兵²

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学重点实验室, 北京 100085, Email: shifenm@mail.rcees.ac.cn; 2. 北京市自来水集团有限责任公司水质监测中心, 北京 100027)

摘要: 调查了北京市饮用水厂源水及出厂水中消毒副产物溴酸盐、卤代乙酸及典型污染物高氯酸盐的污染现状, 研究了其来源及环境影响因素。结果表明, 北京市饮用水中基本不含溴酸盐; 含有 5 种卤代乙酸和高氯酸盐。饮用水加氯消毒是产生卤代乙酸的主要原因。在所调查水厂出厂水中卤代乙酸的平均浓度为 $42.1 \sim 149.5 \mu\text{g/L}$; 其中含氯卤代乙酸占总量的 90% 以上。5 种卤代乙酸的含量顺序为三氯乙酸 > 二氯乙酸 > 氯溴乙酸 > 二溴乙酸 > 一溴二氯乙酸。饮用水中卤代乙酸受季节影响较大, 9 月份浓度最高, 4 月份浓度最低。高氯酸盐主要存在于以地下水为源水的水厂中, 受地下水污染影响较大。各水厂出厂水中高氯酸盐含量为 $0.1 \sim 6.8 \mu\text{g/L}$ 。饮用水中高氯酸盐在 11 月份含量最高, 7 月份含量最低。

关键词: 饮用水; 消毒副产物; 溴酸盐; 卤代乙酸; 高氯酸盐

中图分类号: R123.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)02-0051-05

Investigation of Bromate, Haloacetic Acids and Perchlorate in Beijing's Drinking Water

LIU Yong-jian¹, MOU Shi-fen¹, LIN Ai-wu², CUI Jian-hua², DU Bing²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China Email: shifenm@mail.rcees.ac.cn; 2. Water Quality Monitoring Center of Beijing Waterworks Group Limited Company, Beijing 100027, China)

Abstract: Disinfection by-products and perchlorate in the raw water and finished water of Beijing's a drinking water plants were investigated. The results indicated that there was little bromate in the drinking water. Five haloacetic acids (HAAs) were found in the water. The concentrations of the sum of the five HAAs were ranged from $42.1 \mu\text{g/L}$ to $149.5 \mu\text{g/L}$. In the HAAs, the chlorine-containing HAAs accounted for more than 90% of the total HAAs. In the five HAAs, the concentration order of the HAAs were trichloroacetic acid > dichloroacetic acid > bromochloroacetic acid > dibromoacetic acid > bromodichloroacetic acid. The HAAs in Beijing's drinking water were much influenced by the variation of season. They had the highest concentrations in September and lowest concentration in April, respectively. For perchlorate in Beijing's drinking water, it was greatly influenced by the groundwater. Its concentrations were between $0.1 \sim 6.8 \mu\text{g/L}$ in the finished drinking water. It had peak value in November and minimum value in July, respectively.

Key words: drinking water; disinfection by-products; bromate; haloacetic acids; perchlorate

消毒副产物(Disinfection by-products, DBPs)是指用消毒剂对饮用水消毒时,消毒剂与水中含有的天然有机物反应生成的化合物。由于消毒剂的不同,产生的 DBPs 种类较多,但总体来说可分为 5 类:三卤甲烷、卤代乙酸(Haloacetic acids, HAAs)、卤氧化物、卤代乙腈及直接致诱变化合物[如 3-氯-4-(二氯甲基)-5-羟基-2(5H)-呋喃等]。由于许多 DBPs 对人体具有致癌作用^[1~5],因此对饮用水中溴酸盐、卤代乙酸等的研究成为一个热门领域^[6~10]。

饮用水中高氯酸盐主要来自火箭、焰火等的固体推进剂中的氧化剂——高氯酸铵^[11]和一些硝酸钾农药^[12]。由于高氯酸盐可干扰人体甲状腺功能,因此对其在饮用水中的存在、来源及安全阈值的研究引起了环境科学家的重视^[13,14]。

国际上对城市饮用水中 DBPs 和高氯酸盐均进

行过大规模的调查研究^[15~19],在充分研究了这些污染物对人体健康危害的基础上规定了饮用水中 HAAs、溴酸盐和高氯酸盐的最大容许浓度^[8,11]。而我国对饮用水中 HAAs、溴酸盐的研究较少,调查范围较窄,时限较短^[20,21];对饮用水中高氯酸盐的研究基本处于空白阶段^[22]。因此,出于对人体健康的考虑,本文采集并测定了北京市 9 个饮用水厂的源水和出厂水样品,调查了饮用水中 DBPs(溴酸盐、9 种 HAAs)和高氯酸盐的污染现状,研究了其环境影响因素及年变化趋势。

收稿日期: 2003-03-20; 修订日期: 2003-05-23

基金项目: 中国科学院生态环境研究中心知识创新课题(RCEES99009)

作者简介: 刘勇建(1975~),男,博士生,主要研究方向为环境分析化学。

* 联系人

1 实验部分

1.1 采样点基本情况

于 2001-09 ~ 2002-07 每 2 个月 1 次(9 月,11 月,1 月,3 月,5 月,7 月)采集了北京市 9 个饮用水厂源水及出厂水样品.每次采样均在月初进行.在 9 个饮用水厂中,A,B,C 等 3 个水厂的源水均为地表水,经加氯消毒等工艺处理后即为出厂水.D,E,F,G,H,I 等 6 个水厂的源水均来自地下水,取水深度约 30 ~ 40 m.由于地下水的采水量有一定限制,因此其出厂水均为水厂自身源水消毒处理后与来自 A 厂出厂水的直接混合.

1.2 样品的采集、前处理及分析

采集样品时均使用干净的聚四氟乙烯容器,样品采集后应立即进行分析.若不能及时测定,应置于冰箱内于 4℃保存,于 3 天内测定.样品采用离子色谱-电导检测法进行分析,其前处理及具体分析方法参见文献[22,23].所测溴酸盐、9 种卤代乙酸及高氯酸盐在饮用水中的检出限和线性范围见表 1.由表 1 可知,目前仅对部分 DBPs(如仅规定了 5 种 HAAs 浓度和的限值)在饮用水中的含量作出了规定,其它化合物对人体健康的影响正在研究中.

表 1 所测消毒副产物及高氯酸盐种类、容许浓度及检测限/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 The kinds, maximal contamination concentrations and detection limits of DBPs and perchlorate/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$			
名称	饮用水中最大容许浓度 ^[8,11]	检出限 ^[22,23]	线性范围 ^[22,23]
溴酸盐(Bromate)	$10^a/25^b/10^c$	0.10	0.3 ~ 50
高氯酸盐(Perchlorate)	18^d	0.20	0.2 ~ 100
一氯乙酸(MCAA)	60^e	0.37	0.5 ~ 100
二氯乙酸(DCAA)	$60^e/50^b$	0.78	1.5 ~ 200
三氯乙酸(TCAA)	$60^e/100^b$	1.85	2 ~ 200
一溴乙酸(MBAA)	60^e	0.58	1 ~ 100
二溴乙酸(DBAA)	60^e	1.75	2 ~ 200
三溴乙酸(TBAA)		9.32	10 ~ 500
氯溴乙酸(BCAA)		0.69	1 ~ 100
一溴二氯乙酸(BDCAA)		4.07	5 ~ 500
一氯二溴乙酸(DBCAA)		5.55	8 ~ 500

a:美国 EPA 标准 b:WHO 标准 c:欧盟标准 d:美国加州卫生部标准 e:美国 EPA 规定饮用水中 5 种 HAAs (MCAA, DCAA, TCAA, MBAA, DBAA) 浓度和的限值为 $60\mu\text{g/L}$.

2 结果与讨论

2.1 饮用水中溴酸盐、卤代乙酸和高氯酸盐的污染现状

北京市饮用水主要采用氯消毒,因此大部分饮

用水厂中均没有溴酸盐检出.在检出溴酸盐的水厂中,其出厂水中溴酸盐浓度较低,平均为 $0.5 \sim 2.2\mu\text{g/L}$.在所测 9 种 HAAs 中,有 5 种 HAAs (DCAA、TCAA、BCAA、DBAA 和 BDCAA) 可被检出,其出厂水中平均浓度分别为 $8.0 \sim 61.0\mu\text{g/L}$, $10.1 \sim 78.1\mu\text{g/L}$, $0.4 \sim 38.0\mu\text{g/L}$, $2.3 \sim 22.0\mu\text{g/L}$ 和 $7.0 \sim 46.0\mu\text{g/L}$.按表 1 中美国 EPA 规定的 5 种 HAAs 总浓度限值,在采样期间,所调查水厂出厂水中仅含有 DCAA、TCAA、DBAA 和 3 种 HAAs,其浓度和的范围为 $33.3 \sim 120.6\mu\text{g/L}$,其中 53.7% 的水厂出厂水中上述 3 种 HAAs 浓度总和超过 $60\mu\text{g/L}$.从表 2 可看出,所测水厂中大部分的出厂水中都含有高氯酸盐,其平均浓度在 $0.2 \sim 6.8\mu\text{g/L}$ 之间.

2.2 饮用水中溴酸盐、卤代乙酸和高氯酸盐的来源分析

从表 2 可知,在 A、B、C 3 个水厂中,源水中溴酸盐浓度均高于出厂水中溴酸盐的浓度.由于这 3 个水厂源水中基本不含溴离子(检出率 10%左右),而溴酸盐是含溴饮用水用臭氧消毒的副产物,因此可判定在消毒过程中并没有溴酸盐生成,这 3 个水厂中溴酸盐主要来自地表水的污染.对于 D 和 F 2 个水厂,其出厂水中含有少量的溴酸盐,而源水中没有溴酸盐.D 和 F 是以地下水为源水的水厂,其出厂水有一大部分是来自 A 厂的出厂水,其中溴酸盐含量受 A 厂水的影响较大,因此可判定 D 和 F 水厂中溴酸盐主要来自受溴酸盐污染的 A 厂出厂水.

从表 2 可见,所测水厂出厂水中 HAAs 浓度均高于相应的源水中 HAAs 的浓度.由此可说明消毒过程中产生了大量的 HAAs.对各饮用水厂水处理过程 HAAs 浓度变化情况研究表明,对源水加氯消毒使得水中 HAAs 浓度从 $18.6\mu\text{g/L}$ 增至 $168.1\mu\text{g/L}$,增加了 8 倍左右.虽然经活性炭过滤可去除水中 2/3 的 HAAs,但为了保证消毒效果而采取的二次加氯措施使得出厂水中 HAAs 浓度再次升高.由此可说明加氯消毒是产生 HAAs 的主要原因.

高氯酸盐主要存在于以地下水为源水的水厂中,以地面水为源水的水厂中没有高氯酸盐检出(表 2).由此可说明高氯酸盐主要来自地下水源.由于饮用水中高氯酸盐污染源的的特殊性,而采样点位于城区,附近没有农药的使用.因此根据国外的研究结果可推测饮用水中高氯酸盐主要来自焰火、炸药等固体推进剂中的氧化剂——高氯酸铵.由于高氯酸铵可在水中溶解,迁移并渗透至地下水层,造成地下水中高氯酸盐的污染.

表 2 2001-09 ~ 2002-07 所测饮用水厂源水及出厂水中溴酸盐、卤代乙酸及高氯酸盐平均浓度及范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 The average concentrations and ranges of bromate, HAAs and perchlorate in raw water and finished water of the investigated drinking water plants from Sept. 2001 to July 2002/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

样品	溴酸盐	DCAA	BCAA	DBAA	TCAA	BDCAA	高氯酸盐	溴离子
A出	1.0	36.2	0.7	3.7	38.9			
浓度范围	0.5 ~ 1.0	21.0 ~ 55.0	0.7 ~ 0.7	2.3 ~ 5.0	28.0 ~ 49.0			
A源	2.2	14.7			11.3			10.1
浓度范围	0.7 ~ 2.2	8.0 ~ 23.0			7.0 ~ 16.0			9.2 ~ 11.6
B出	0.6	37.7		4.6	33.2			
浓度范围	0.6 ~ 0.6	27.0 ~ 52.0		3.2 ~ 9.2	26.0 ~ 46.0			
B源	1.2	15.3			11			20.1
浓度范围	0.5 ~ 1.2	9.0 ~ 20.0			8.0 ~ 15.0			18.5 ~ 23.2
C出	0.3	36.5		4.3	46.2			
浓度范围	0.3 ~ 0.3	19.0 ~ 61.0		2.6 ~ 6.0	38.0 ~ 57.0			
C源	0.6	14.7			12.7			30.2
浓度范围	0.5 ~ 0.6	11.0 ~ 23.0			10.0 ~ 16.0			25.4 ~ 32.6
D出	2.0	14.3	11.2	10.8	17.2	17.0	2.4	81.2
浓度范围	0.8 ~ 2.0	8.0 ~ 21.0	6.0 ~ 16.0	9.0 ~ 14.0	10.1 ~ 25.0	9.0 ~ 24.0	0.5 ~ 6.8	42.5 ~ 116.5
D源					9.4		13.6	270.3
浓度范围					6.5 ~ 13.0		5.1 ~ 30.7	152.4 ~ 341.2
E出		13.7	16.3	11.3	38.6	30.9	1.3	82.5
浓度范围		9.0 ~ 21.0	12.0 ~ 23.0	10.0 ~ 12.2	32.1 ~ 45.0	11.0 ~ 46.0	0.5 ~ 2.3	41.6 ~ 161.8
E源					11.4		3.7	240.3
浓度范围					7.3 ~ 23.0		0.9 ~ 7.6	120.9 ~ 390.6
F出	1.2	14.0	10.8	10.2	22.8	21.7	1.2	110.2
浓度范围	0.9 ~ 1.2	8.0 ~ 28.0	7.0 ~ 14.0	8.0 ~ 15.0	13.0 ~ 32.9	17.0 ~ 27.0	0.4 ~ 2.8	70.8 ~ 130.8
F源					7.6		2.4	160.3
浓度范围					6.0 ~ 10.0		0.3 ~ 4.3	110.8 ~ 210.7
G出		20.7	13.5	13.4	23.8	11.5	0.6	91.6
浓度范围		11.0 ~ 33.5	9.0 ~ 18.0	8.0 ~ 21.0	15.0 ~ 33.0	11.0 ~ 12.0	0.2 ~ 0.9	30.9 ~ 160.2
G源					5.4		1.0	230.5
浓度范围					3.2 ~ 7.4		0.5 ~ 1.4	152.6 ~ 320.9
H出		14.5	26.8	13.6	50.4	22.3	0.7	60.1
浓度范围		13.0 ~ 21.0	20.0 ~ 38.0	9.0 ~ 22.0	36.0 ~ 78.1	9.0 ~ 36.0	0.6 ~ 0.8	40.8 ~ 80.7
H源					11.8		0.8	130.4
浓度范围					9.0 ~ 17.0		0.7 ~ 1.0	100.2 ~ 190.4
I出		12.0	10.8	13.4	23.8	9.5	0.5	10.1
浓度范围		9.0 ~ 17.0	8.0 ~ 14.0	10.0 ~ 16.5	14.0 ~ 36.0	7.0 ~ 12.0	0.2 ~ 1.0	9.8 ~ 12.6
I源		10.0			9.6		0.8	90.1
浓度范围		9.0 ~ 11.0			6.0 ~ 14.0		0.2 ~ 1.2	80.4 ~ 110.8

2.3 饮用水中溴酸盐、卤代乙酸和高氯酸盐的影响因素及变化趋势

北京市各水厂出厂水中溴酸盐的平均浓度为 $1.44\mu\text{g}/\text{L}$, 远低于美国 EPA 提出的 $10\mu\text{g}/\text{L}$ 的容许浓度. 在此次调查中, 溴酸盐仅在部分水厂检出, 检出率不高(在 6 次采样中仅有 2 次检出溴酸盐, 检出率 30 %左右) 且不规律. 由于其主要来自外界污染, 影响因素多且难以判断. 而北京市饮用水主要采取加氯消毒, 因此不存在饮用水中溴酸盐的安全问题.

卤代乙酸是消毒剂与源水中有机物反应生成的产物, 源水中有机物的含量、消毒剂的用量及反应温

度等都可影响 HAAs 的产生(图 1). 从图 2 可看出, 7 月和 9 月, 随着水温升高, 水中微生物活动加剧, 分泌的有机物增加, 因此水中总有机碳含量也增加. 如 A 厂源水 7 月份的总有机碳浓度约为 $5.2\text{mg}/\text{L}$, 而 1 月份仅为 $2.5\text{mg}/\text{L}$. 随着生物活动的加剧, 为了保证消毒效果, 消毒剂的用量也增加. A 厂源水 7 月份的加氯量约为 $2.0\text{mg}/\text{L}$, 高于 1 月份 $1.3\text{mg}/\text{L}$ 的加入量. 同时环境温度的升高(7 月份水温约为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 月份水温约为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 也有利于 HAAs 的生成, 因此消毒产生的 HAAs 浓度较高. 1 月和 3 月, 由于温度的降低, 水中微生物活动减少, 生成的有机物也减少, 消毒剂的用量也相应减小; 同时, 低温也不利

于 HAAs 的生成,因此水中 HAAs 浓度较低。

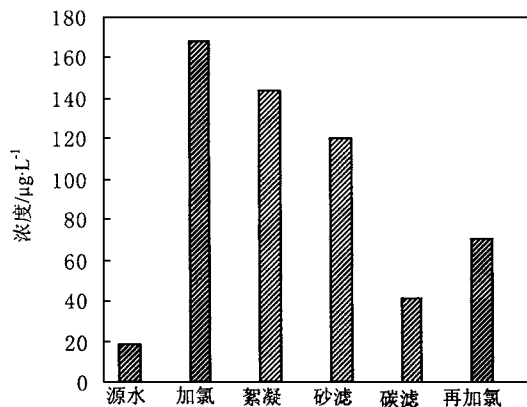


图 1 饮用水消毒过程中 HAAs 浓度变化

Fig.1 The variation of HAAs during the disinfection

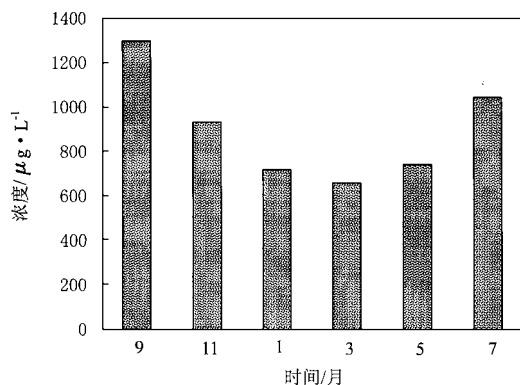


图 2 饮用水中 HAAs 季节性变化

Fig.2 The seasonal variation of HAAs in drinking water

北京市饮用水采用加氯消毒,因此 HAAs 中含氯卤代乙酸浓度较高。从图 3 可看出,三氯乙酸占总 HAAs 量的 43.99%,含氯卤代乙酸占总 HAAs 量的 90.87%。所测得 5 种 HAAs 的浓度顺序为 TCAA > DCAA > BCAA > DBAA > BDCAA。

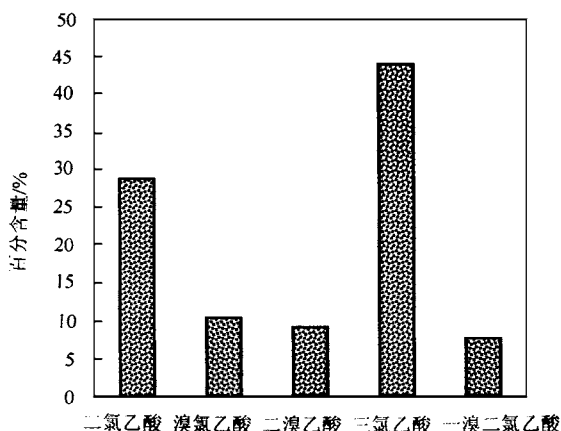


图 3 各 HAAs 占总量的百分比

Fig.3 The percentage of each HAA in the sum of HAAs

溴代乙酸是含溴源水加氯消毒产生的,从表 2 可知,以地下水为源水的 D、E、F、G、H、I 水厂中均含有一定量的溴离子,因此其最终出厂水中也含有一定量的溴代乙酸,其中一溴二氯乙酸的最高浓度达 30.9 μg/L。含溴卤代乙酸占 HAAs 总量的 27.16%。

由表 2 可知,D 厂源水和出厂水中高氯酸盐含量最高,因此选取 D 厂为代表研究其季节变化趋势。结果表明,11 月份源水和出厂水中高氯酸盐含量最高,7 月份水中高氯酸盐含量最低(图 4)。这主要是由于 7 月份北京市地表水处于丰水期,水量充足,渗入地下水的水量增加,使水中高氯酸盐的含量得到稀释。而 11 月份处于枯水期,因而水中高氯酸盐含量较高。

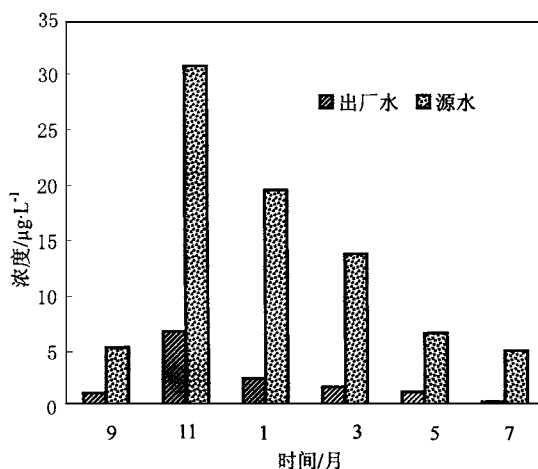


图 4 D 厂源水和出厂水中高氯酸盐季节性变化

Fig.4 The seasonal variation of perchlorate in the raw water and finished water of water plant D

3 结论

对北京市各饮用水厂源水和出厂水的调查研究表明,北京市饮用水中含有 5 种卤代乙酸和高氯酸盐,基本不含溴酸盐。饮用水中卤代乙酸主要是在加氯消毒过程中产生的,受水中有机物含量、消毒剂量和水温的影响较大,呈现较强的季节性变化特征。所测卤代乙酸中以含氯卤代乙酸为主,TCAA 和 DCAA 的含量占卤代乙酸总量的 90% 以上。对饮用水中高氯酸盐的研究表明,北京市饮用水中含有一定量的高氯酸盐,且呈现较强的季节性变化特征,地下水污染是饮用水中高氯酸盐的主要来源。

参考文献:

- [1] U.S. NCI. Report on the carcinogenesis bioassay of chloroform (CAS No. 67-66-3) TR-000 NTIS Rpt No PB264018 Bethesda [R]. MD: National Cancer Institute, 1976.

- [2] Morris R D, Audet A M, Angelillo I F, *et al.* Chlorination, chlorination by products, and cancer: a meta-analysis[J]. *Am. J. Public Health*, 1992, **138**: 492 ~ 501.
- [3] Kurokawa Y, Hayashi Y, Maekawa A, *et al.* Carcinogenicity of potassium bromate administered orally to F334 rats[J]. *J. Natl. Cancer Inst.*, 1983, **71**: 965 ~ 972.
- [4] Deangelo A B, McMillan L P. The carcinogenicity of the chlorinated acetic acids[R]. Cincinnati, Ohio: USEPA Health Effect Research Laboratory, 1988.
- [5] Komulainen H, Kosma V M, Vaitinen S L, *et al.* Carcinogenicity of the drinking water mutagen 3-chloro-4 (dichloromethyl)-5hydroxy-2(5H)-furanone in the rat[J]. *J. Natl. Cancer Inst.*, 1997, **89**(12): 848 ~ 856.
- [6] National Primary Drinking Water Regulation: Interim enhanced surface water treatment: Final Rule[J]. *Fed. Registr.*, 1996, **63** (241): 69477 ~ 69521.
- [7] Simpson K L, Hayes K D. Drinking water disinfection by-products: an Australian perspective[J]. *Wat. Res.*, 1998, **32**(5): 1522 ~ 1528.
- [8] Richardson S D, Thruston A M, Caughran T V, *et al.* DBPs in drinking water[J]. *Water. Qual. Technol Conf.*, 1998.
- [9] Arora H, Lechevallier M W, Dixon K L. DBP occurrence survey[J]. *J. Am. Water Works Assoc.*, 1997, **89**(6): 60 ~ 68.
- [10] Singer P C, Obolensky A, Greiner A. DBPs in North Carolina drinking water[J]. *J. Am. Water Works Assoc.*, 1995, **87** (10): 83 ~ 92.
- [11] Hantman D P, Munch D J. Determination of perchlorate in drinking water using ion chromatography[R]. Cincinnati, Ohio: USEPA Method 314.0, 1999.
- [12] Susarla S, Collette T W, Garrison A W, Wolfe N L, McCutcheon S C. Perchlorate identification in fertilizers[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, **33**(19): 3469 ~ 3472.
- [13] Application Note 121. Analysis of low concentration of perchlorate in drinking water and ground water by ion chromatography[J]. *J. Chromatogr. A*, 1999, **850**: 131 ~ 135.
- [14] Koester C J, Beller H R, Halden R U. Analysis of perchlorate in groundwater by electrospray ionization mass spectrometry/ mass spectrometry[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, **34** (9): 1862 ~ 1864.
- [15] Nissinen T K, Miettinen I T, Martikainen P J, Vartiainen T. Disinfection by-products in Finnish drinking waters[J]. *Chemosphere*, 2002, **48**: 9 ~ 20.
- [16] Lee K J, Kim B H, Hong J E, Pyo H S, Park S J, Lee D W. A study on the distribution of chlorination by-products (CBPs) in treated water in Korea[J]. *Wat. Res.*, 2001, **35**(12): 2861 ~ 2872.
- [17] Golfopoulou S K, Nikolaou A D. Disinfection by-products and volatile organic compounds in the water supply system in Athens, Greece[J]. *J. Environ. Sci. Health. A*, 2001, **36** (4): 483 ~ 499.
- [18] Williams D T, LeBel G L, Benoit F M. Disinfection by-products in Canadian drinking water[J]. *Chemosphere*, 1997, **34**(2): 299 ~ 316.
- [19] California Department of Health Services. Perchlorate in California drinking water[R]. Updated October, 2001.
- [20] 侯小平, 何成杰, 牟世芬. 饮用水中消毒副产物及常见阴离子的离子色谱分析[J]. *环境化学*, 1992, **11**(4): 67 ~ 72.
- [21] Li S, Zhang X J, Liu W J, Cao L L, Wang Z S. Formation and evolution of haloacetic acids in drinking water of Beijing city[J]. *J. Environ. Sci. Health. A*, 2001, **36**(4): 475 ~ 481.
- [22] Liu Y J, Mou S F, Heberling S. Determination of trace level bromate and perchlorate in drinking water by ion chromatography with an evaporative preconcentration technique[J]. *J. Chromatogr. A*, 2002, **956**: 85 ~ 91.
- [23] Liu Y J, Mou S F. Determination of trace level of haloacetic acids and perchlorate in drinking water by ion chromatography with direct injection[J]. *J. Chromatogr. A*, 2003, **997**: 225 ~ 235.