

辽宁省西部和沈阳地区河水及地下水中溴的分布与污染特征*

杨永亮^{1, 2*,} 刘 崑² 刘晓端^{1, 2} 李 冰^{1, 2}
王晓春^{1, 2} 徐 清^{1, 2} 罗松光²

(1 中国地质科学院生态地球化学重点开放实验室, 北京, 100037; 2 国家地质实验测试中心, 北京, 100037)

摘 要 利用 HPLC-ICP-MS 方法分析辽宁省西部河水及其沿岸地下水中溴化物、溴酸盐的含量, 调查了溴化物、溴酸盐的污染现状。结果表明, 大凌河和小凌河河水中总溴浓度范围 $20.5\text{--}364\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 和总氯浓度呈良好相关关系, 由回归方程得到的 Br/Cl 比值分别为 2.91 和 $0.83\ \mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。大凌河该比值在雨水的范围之内, 而小凌河该比值则可能受到岩盐溶解的部分影响。大凌河和小凌河河水中溴与氯浓度的相关性与自然界观察到的天然比值范围是相符合的, 表明河水未受到溴的污染。细河河水和地下水总溴浓度范围 $26.6\text{--}4070\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度 $1584\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Br/Cl 比值范围 $2.73\text{--}25.2\ \mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。细河河水和地下水中的溴浓度明显高于浑河、蒲河和沈抚灌渠, 平均 Br/Cl 比值高达 $12\ \mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$, 远非降水来源所能解释。细河浅层地下水中溴酸盐被检出的浓度存在两处超标情况, 分别为 31 和 $15\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。浅层地下水中高溴离子浓度和具有强烈毒理效应的溴酸盐的存在对该地区生态系统和人类健康具有潜在负面影响。

关键词 溴化物, 溴酸盐, 细河, 地表水, 地下水。

雨水和雪中的溴化物含量波动较大, 一般为 $5\text{--}150\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [1], 世界河水中的 Br^- 浓度平均值为 $20\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [2]。在自然环境下, 河水中溴浓度主要受降水和流域盆地的地质条件影响。地下水中高溴化物浓度一般是由于卤水、海水入侵或基岩介质中含有高溴矿物或海相沉积物。因此溴化物可以被用来作为地下水向河水排泄的指示物 [3]。国际癌症研究中心认为 KBrO_3 对实验动物有致癌作用, 但溴酸盐对人的致癌作用还不能肯定, 为此将溴酸盐列为 B2 级的潜在致癌物。我国现行的《生活饮用水卫生标准》亦规定溴酸盐限值为 $0.01\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与 WHO 标准一致。

细河是沈阳市主要排污河渠为沈阳市目前污染最严重的河流, 并严重污染了浑河水体 [4]。前人的研究表明, 细河水质在一定程度上受到多种重金属和难降解有毒有机污染物的污染 [4, 5]。

本文对沈阳地区主要河流和灌渠水, 细河沿岸地下水的无机溴污染现状进行了调查研究, 定量分析水中的溴离子和溴酸盐浓度, 并与辽宁省西部河水中总溴含量进行对比, 评价了细河及其沿岸水中溴污染状况。

1 实验部分

1.1 样品采集

2007 年 9 月和 2008 年 7 月下旬, 沿浑河、蒲河、沈抚灌渠、细河自上而下, 每间隔一定距离取河水样品共 30 个。作为与沈阳工业城市群的对照组, 在辽宁西部大凌河和小凌河也采集了地表水样。同时, 分别在中游彰驿段和上游土台段的细河沿岸, 布设 13 个地下水样点。地下水样品采自田间抽水井及农户水井。

水样品采样时, 缓慢将样品导入棕色样品瓶中, 样品瓶装满形成凸液面后盖上盖。每批样品需现场空白样一个, 所有空白均为去离子水。样品存放至 4°C 冷藏设备中, 14 d 内测定。

1.2 样品分析

BrO_3^- 及 Br^- 标准溶液: 以 KBrO_3 和 KBr 分别配制 $10\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液。使用时逐级稀释为

2008 年 12 月 28 日收稿。

* 科技部国际合作项目 (2006DF21280) 和国家自然科学基金项目 (40773010) 资助。

** 通讯作者, Tel + 86-10-68999582 E-mail ylyang2003@yahoo.com.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

0.05, 0.5, 5.0, 50.0 $\mu\text{mol} \cdot \Gamma^{-1}$ 的 BrO_3^- 及 Br^- 标准溶液. 所用试剂均为优级纯, 所有标准溶液和样品制备全部用经 Milli-Q 装置的纯化水 ($> 18 \text{M} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$) 配制.

水样测定前经 0.22 μm 滤膜过滤后直接上机测试. 电感耦合等离子体质谱仪: 美国 Agilent 公司 7500a 型. 高效液相色谱仪: 美国 Agilent 公司 1100 型. 手动进样器: 美国 Agilent 公司 7725 型.

色谱条件: ICS-A2G (保护柱) 与 ICS-A23 (分离柱) 进行 BrO_3^- 和 Br^- 的分离. 流动相为 0.03 $\text{mol} \cdot \Gamma^{-1}$ 的 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液. 使用前用超声波清洗器超声脱气. 流速为 $0.8 \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量 1 ml 射频功率 1370 W; 采样深度为 5.7 mm; Babington 型雾化器; 载气流量 $1.05 \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; 采样模式为时间分辨; 采集时间 900 s; 样品提升速率为 $0.8 \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$.

BrO_3^- 、 Br^- 的方法检出限 (以溴计) 分别为 $0.052 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$ 和 $0.048 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$. 线性范围达到 4 个数量级, 从 $50 \text{nmol} \cdot \Gamma^{-1}$ 到 $50 \mu\text{mol} \cdot \Gamma^{-1}$, 标准曲线线性相关系数 $r^2 = 1$. 对 Br 混合标准溶液 (其中 BrO_3^- 和 Br^- 浓度均为 $500 \text{nmol} \cdot \Gamma^{-1}$) 重复测定 7 次, 其 RSD 分别为 2.3% 和 2.4%. 样品加标回收率: 被测离子回收率为 91%—100%, 相对标准偏差均小于 5%.

2 辽宁西部河流水中无机溴污染状况

2007 年 9 月采集的大凌河和小凌河河水中总溴浓度测定结果见表 1. 大凌河河水中总溴浓度范围为 $63.7\text{--}364 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 中值为 $193.5 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 平均浓度为 $199 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$. 小凌河河水中总溴浓度范围为 $20.5\text{--}183 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 中值为 $36.3 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 平均浓度为 $72 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 不及大凌河的 1/2. 大凌河和小凌河河水中总溴浓度高于英国威尔士地区河水 ($13.8\text{--}18.6 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$), 后者雨水中溴化物平均为 $13.2 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 推断是海洋大气气溶胶的输入较高所致^[1].

表 1 2007 年 9 月采集的河水样品中总溴和总氯含量

Table 1 Concentrations of total bromine and total chlorine in water samples collected in Sep. 2007

样品编号	地点	$\text{Br}^- / \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$	$\text{Cl}^- / \text{mg} \cdot \Gamma^{-1}$	$(\text{Br}/\text{Cl}) / \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$
HH-1-W	抚顺葛布大桥	85.3	27.6	3.09
HH-2-W	抚顺高坎镇	105	106	0.99
HH-3-W	辽中茨榆坨黄腊坡	161	54	2.98
HH-4-W	辽中黄蜡坨	168	53.6	3.13
PH-1-W	沈阳道义	31.7	18.3	1.73
PH-2-W	沈阳道义	56.7	27.1	2.09
PH-3-W	沈阳道义	156	169	0.92
PH-4-W	沈阳新民	186	71.4	2.61
PH-5-W	辽中茨榆坨	195	60.8	3.21
PH-4-SDW	沈阳新民	220	77.8	2.83
PH-5-SDW	辽中茨榆坨	176	63.2	2.78
PH-6-SDW	沈阳平罗	534	104	5.13
SFGQ-1-W	抚顺三宝屯	277	46	6.02
SFGQ-2-W	抚顺深井子	226	118	1.92
SFGQ-3-W	沈阳苏家屯任家甸	153	68.4	2.24
SFGQ-4-W	沈阳苏家屯小张尔	199	128	1.55
SFGQ-3-SDW	沈阳苏家屯任家甸	138	52.3	2.64
XH-1-W	辽中茨榆坨镇	3823	152	25.2
XH-2-W	辽中四方台镇	2082	173	12.0
XH-3-W	彰驿镇	4070	170	23.9
XH-6-W	沈阳于洪区	2097	179	11.7
XH-7-W	沈阳铁西区	223	81.8	2.73
XH-8-W	沈阳铁西区	254	86	2.95
XH-2-JW	辽中四方台大兀拉	26.6	2.02	13.2
XH-3-JW	彰驿镇	2913	219	13.3

续表 1

XH-3-W 2	彰驿镇	2491	266	9.36
XH-3-ZLW	彰驿镇	76.6	3.53	21.7
XH-4-W 1	彰驿双树坨子	146	25.2	5.79
XH-4-W 2	彰驿双树坨子	2371	239	9.92
XH-4-ZLW	彰驿双树坨子	15.4	3.62	4.25
XLH-1-W	小凌河	47.9	32.7	1.46
XLH-2-W	小凌河	183	109	1.68
XLH-3-W	小凌河	153	97.5	1.57
XLH-4-W	小凌河	30.5	31.8	0.96
XLH-5-W	小凌河	20.5	30.9	0.66
XLH-6-W	小凌河	36.3	27.4	1.32
XLH-7-W	小凌河	35.7	26.2	1.36
DLH-1-W	大凌河	63.7	21.7	2.94
DLH-2-W	大凌河	160	107	1.50
DLH-3-W	大凌河	64.2	35	1.83
DLH-4-W	大凌河	86.2	45.1	1.91
DLH-5-W	大凌河	337	111	3.04
DLH-6-W	大凌河	287	102	2.81
DLH-7-W	大凌河	364	108	3.37
DLH-8-W	大凌河	227	85.5	2.65

注: XH: 细河; HH: 蒲河; HH: 浑河; SFGQ: 沈抚灌渠; XLH: 小凌河; DLH: 大凌河; W: 表层水; JW: 地下水; SDW: 水稻田水; ZLW: 自来水

Br/C1比值是判别不同水环境中溴来源及地下水地质环境的重要因子. 溴化物在雨水中的浓度一般为 $1-128 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 并与氯化物浓度呈高度正相关关系, 回归方程斜率为 $2.78-3.37 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1[1]}$. 海水中 Br/C1为 $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1[1]}$, $\text{Br/C1} < 3.4 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 则可能来自岩盐溶解, $\text{Br/C1} > 3.4 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 则可能有来自油层或卤水的贡献. 相关分析表明大凌河和小凌河河水中总溴浓度和总氯浓度有线性相关性, 线性方程分别为 $y = 2.9116x - 25.298 (r^2 = 0.7675)$ 和 $y = 0.8297x + 13.085 (r^2 = 0.8297)$, 由此得到的 Br/C1比值分别为 2.91和 $0.83 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. 可见大凌河的 Br/C1落在雨水的范围内, 而小凌河的 Br/C1则受到岩盐溶解的部分影响. 因此推断, 大凌河和小凌河河水中溴与氯浓度的相关性与自然界观察到的天然比值相符, 表明河水未受到溴的污染.

3 沈阳地区地表水和地下水中无机溴污染状况

2007年9月采集的浑河、蒲河、沈抚灌渠以及细河河水和地下水样品中总溴浓度见表1. 其中浑河、蒲河、沈抚灌渠地表水总溴浓度为 $31.7-534 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 平均为 $180 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 中值 $168 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$. Br/C1比值为 $0.92-6.02 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$, 平均 $2.70 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. 浑河、蒲河、沈抚灌渠除个别站点 Br浓度偏高以外, 大部分水样中 Br/C1比值落在雨水范围之内, 未见明显的溴污染.

细河河水和地下水总溴浓度 $26.6-4070 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 平均 $1584 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 中值 $2082 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$. Br/C1比值为 $2.73-25.2 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. 细河河水和地下水中的溴浓度明显高于浑河、蒲河和沈抚灌渠, 平均 Br/C1比值高达 $12 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$, 远非降水来源所能解释. 沈阳彰驿镇政府所在地的自来水(井深不详)和所属双树坨子村的自来水(井深120m)总溴浓度分别为 76.6 和 $15.4 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 平均浓度为 $46 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$; 氯化物浓度分别为 3.53 和 $3.62 \text{mg} \cdot \Gamma^{-1}$. 美国24个州32个地点的饮用地下水中, 溴化物浓度为 $3.2-58 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, 中值 $16 \mu\text{g} \cdot \Gamma^{-1}$, Br/C1比值为 $3.51-23.3 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1[6]}$. 与美国相比, 本调查地区的自来水总溴浓度稍偏高.

本研究所涉及区域位于辽中油田所在区域, 因此不排除地下水和河水受油田地下水卤水的影响. 但是在细河与浑河交会之处辽中县黄蜡坨村(站位 HH-3W 和 HH-4W), 虽然有油田开采, 其河水中

的溴浓度却正常, 分别为 161 和 $168 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, Br/Cl 分别为 2.98 和 $3.13 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. 因此仅以油田开采本身无法解释细河河水及附近地下水的高溴浓度. 调查表明, 细河上游部分如沈阳市铁西区, 河水中溴浓度都属正常. 只有沈阳市于洪区, 细河河水中溴浓度增至 $2097 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, 到了铁西新区彰驿段, 无论是河水还是地下水, 都出现溴异常, 高达 $4070 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. 从沈阳市于洪区到彰驿镇, 沿河有包括冶金、机电、材料、农药化工方面的众多工厂, 因此不排除细河溴异常有工业或农业污染的因素.

4 细河河水及沿岸地下水中溴的形态分析

为了进一步查明细河河水及沿岸地下水中溴污染对该地区生态系统和人类健康造成的影响, 2008年7月采集了溴污染较为严重的细河河水及沿岸的地下水, 并进行了溴的形态分析, 其结果见表2. 河水中总溴浓度范围为 $82.7\text{--}2705 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, 平均为 $1549 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. 河水中最低浓度在沈阳市细河上游卫工明渠, 最高值在铁西新区翟家镇. 地下水中总溴浓度为 $\text{nd}\text{--}2768 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, 平均 $764 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. 溴在井深 110m 的地下水中未检出, 此处为饮用水; 最高浓度在井深 $25\text{--}28\text{m}$ 的地下水, 当地居民用于灌溉农田. 可见, 溴污染在细河中游翟家镇就开始出现. 溴在中、下游河段中的浓度要高于上游河段中的浓度, 其原因可能是细河沿途村镇不断有污染废水排入河流, 使中下游水体中溴浓度增加.

表2 2008年7月采集的水样品中溴的形态分析

Table 2 Speciation analysis for bromine in water samples collected in Jul 2008

样品编号	地点	井深 /m	$\text{BrO}_3^- / \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	$\text{Br}^- / \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	总溴 / $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	
河水	SYXH 08-3	双树坨子	nd	1831	1831	
	SYXH 08-4	黄蜡坨	nd	1530	1530	
	SYXH 08-5	翟家镇	nd	2705	2705	
	SYXH 08-6	大于	nd	1936	1936	
	SYXH 08-7	铁西宁官屯	nd	1209	1209	
	SYXH 08-8	北四中路桥	卫工明渠	nd	82.7	82.7
	地下水	SHY 0807-1	双树坨子	nd	73.5	73.5
		SHY 0807-2	双树坨子	nd	2288	2288
SHY 0807-3		双树坨子	nd	nd	nd	
SHY 0807-4		双树坨子	7-8	nd	384	384
SHY 0807-5		双树坨子	6-7	nd	467	467
SHY 0807-6		双树坨子	42	nd	856	856
SHY 0807-7		双树坨子	25-28	nd	2768	2768
SHY 0807-8		双树坨子	8-9	nd	211	211
XH _{ST} -01		前庙	10	31	768	799
XH _{ST} -02		前庙	30	nd	180	180
XH _{ST} -03		石灰窑子	6-10	nd	258	258
XH _{ST} -04		彰驿镇	9	nd	632	632
XH _{ST} -05		黄蜡坨	12	15	1004	1019

注: nd表示未检出.

本研究表明, 溴污染严重的样点具有与细河河道的垂直距离近或者地下水位浅的特点. 地下水的污染与地下水的开采利用有关. 井深 $< 50\text{m}$ 的浅层地下水有不同程度的溴异常, 取决于距细河的距离. 井深为 110m 的地下水已属安全, 被当地居民用于自来水和饮用水. 现沿岸农田、菜地等都采用地下水灌溉, 大量开采地下水造成河水对地下水的补给, 使河水中的污染物迁移到浅层地下水中.

水中含有溴酸盐的原因主要由于富含溴离子的水体在杀菌、净化过程与强氧化剂如氯气、臭氧反应产生较高浓度的溴酸盐. 目前我国还没有对地下水和地表水中溴含量规定的标准. 我国对水中溴酸盐的规定只有《生活饮用水卫生标准》和《饮用天然矿泉水》两个国家标准, 它们对溴酸盐限值都是 $0.01 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$. 根据该标准, 细河浅层地下水 ($< 50\text{m}$ 井深) 中有两处溴酸盐的浓度存在超标情况, 分别为 31 和 $15 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ (表2). 溴酸盐在地下水的超标率为 15.4% . 因此浅层地下水中高溴离子浓度

和具有强烈毒理效应的溴酸盐的存在, 对该地区生态系统和人类健康具有潜在的负面影响.

综上所述, 除个别站点 Br 浓度偏高以外, 辽宁省西部河流大凌河、小凌河河水总溴浓度及 Br/Cl 比值, 浑河、蒲河河水以及沈抚灌渠水部分 Br/C 比值均落在雨水范围之内, 未见明显的溴污染. 细河河水和地下水总溴平均浓度明显高于浑河、蒲河和沈抚灌渠, 远非降水来源所能解释. 地下水中溴异常主要发生在浅层地下水中, 取决于距细河的距离. 细河浅层地下水中溴酸盐被检出. 河水中的溴污染物会向沿岸地下水发生迁移. 对该地区生态系统和人类健康具有潜在负面影响.

致谢: 对辽宁省地质矿产调查院杨晓波总工程师为本研究提供的大力协助表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Neal Colin, Neal Margaret, Hughes Steve et al., Bromine and Bromide in Rainfall, Cloud, Stream and Groundwater in the Plympton Area of Massachusetts [J]. *Hydrological Earth Syst. Sci.*, 2007, **11** (1) : 301—312
- [2] 陈立乔, 魏复盛, 中国土壤中溴、碘的背景含量 [J]. *干旱环境监测*, 1991, **5** (2) : 65—70
- [3] Bathurst E T J, Thomson L J, Wilkinson L F., Bromide in Canterbury Ground Water [J]. *New Zealand Journal of Marine & Freshwater Research*, 1980, **14** (4) : 409—411
- [4] 张革, 王玉平, 曲键, 浑河沈阳段地表水有机污染物对水环境影响的安全性评估 [J]. *中国环境监测*, 2006, **22** (2) : 66—68
- [5] 姜勇, 梁文举, 张玉革等, 污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2004, **12** (3) : 124—127
- [6] Davis S N, Fabryka-Martin JT, Wolfsberg L E., Variations of Bromide in Potable Ground Water in the United States [J]. *Ground Water*, 2004, **42** (6—7) : 902—907

DISTRIBUTION AND CONTAMINATION CHARACTERISTICS OF BROMINE IN SURFACE WATER AND GROUND WATER FROM THE WESTERN LIAONING AND SHENYANG AREA

YANG Yong-liang^{1, 2} LIU Wei² LIU Xiao-duan^{1, 2} LIBing^{1, 2} WANG Xiao-chun^{1, 2}
XU Qing^{1, 2} LUO Song-guang²

(1 Key Laboratory of Eco-geochemistry, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

ABSTRACT

Concentrations of bromide and bromate in water samples collected from western rivers and ground water of Liaoning province were analyzed by HPLC-ICP-MS. The total bromine from the Daling River and the Xiaoling River ranged from 20.5 to 364 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. There was good correlation between the total bromine and the total chlorine in water from the Daling River and the Xiaoling River, and the ratio of Br/Cl calculated from the linear regression was 2.91 and 0.83 $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$, respectively, which means that the ratio for the Daling River is within the range of rainwaters, and the ratio for the Xiaoling River may be partly influenced by rock salt dissolution. The correlation between Br and Cl concentration from the two rivers was in accordance with the range of observed natural ratios, demonstrating that the rivers have not been polluted by bromine. The total bromine from the Xi River ranged from 26.6 to 4070 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, averaging 1584 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The ratio of Br/Cl ranged from 2.73 to 25.2 $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. The bromine concentration of Xi River and ground water was significantly higher than that of Hun River, Pu River and ShenFu irrigation channel with averaging Br/Cl ratio of 12 $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$. Some concentrations of bromate were above the standard in shallow ground water of Xi River, such as 31 and 15 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The high concentration of bromide ion and strong toxicological effects of bromate in shallow ground water might pose a potential risk to ecosystem and human health in the region.

Keywords bromide, bromate, Xi River, surface water, ground water