

# 珠江三角洲地区浅层地下水铍的分布及成因探讨

张玉玺 孙继朝 黄冠星 刘景涛  
荆继红 向小平 陈 玺 王金翠 崔海炜

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

**摘要:**通过对珠江三角洲地区 900 余组浅层地下水样中铍及铝、pH 值等元素的分析,研究了珠江三角洲浅层地下水中铍的分布特征,探讨了铍的主要影响因素及其成因。结果表明,珠江三角洲地区浅层地下水中铍的含量介于 0~40.3  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,普遍低于 0.5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值 0.66  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。超标点仅零散分布于广州、深圳、东莞、佛山和惠州地区,超标率 2.24%。地下水铍污染呈局部点状分布特征。pH 值和铝是影响该区地下水中铍分布的最主要因素。偏酸及高铝含量的地下水及土壤环境为铍的迁移提供了有利条件。岩石风化及天然土壤的形成是地下水中铍的来源之一,人类活动造成的污染对地下水铍超标有重要贡献。

**关键词:**铍;分布特征;成因;浅层地下水;珠江三角洲

**中图分类号:**P641.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)01-0197-07

铍是地壳中的稀有元素,丰度约为  $6\times 10^{-6}$ 。因具有质轻、坚硬、熔点高、大热容量和大比强度(强度/质量)的特点,铍在高新技术领域及改进众多产品性能和质量中起着重要作用。随着现代工业和科学技术的发展,铍、铍合金及铍化合物已被广泛应用于原子能、火箭、导弹、卫星、航空、宇航、电子、仪表、石化、陶瓷等行业的技术领域<sup>[1]</sup>。铍的应用正随着尖端科学技术的发展而日益广泛。然而,铍及其化合物有较高的毒性,尤其可溶性铍的毒性最大。铍对人体的危害主要表现在能引起急性中毒、慢性铍病、皮肤病以及致癌<sup>[2]</sup>。急性铍病有明显的鼻咽部干痛、剧咳、胸骨后不适等呼吸道刺激症状,严重者可出现肺水肿、呼吸衰竭;慢性铍病可出现呼吸功能不全,肝大、肝功能或转氨酶异常。接触铍及其化合物可引起接触性皮炎、铍皮肤溃疡和皮下结节性病变<sup>[3]</sup>。随着高科技工业对铍需求的增加,铍的环境污染问题日渐突出,其对人群健康造成的危害日益受到社会的关注<sup>[4]</sup>。

珠江三角洲地区是中国经济最发达的地区之一,

经济的腾飞也带来了严重的环境问题。对该区地下水质量的普查结果显示,部分地区地下水中已出现铍超标现象。对于地表水环境中的铍,自 20 世纪 70 年代就有学者进行了研究,而有关地下水中的铍污染研究却一直鲜有报道。本研究在对珠江三角洲地区浅层地下水系统采样和分析的基础上,阐述了地下水中铍的分布特征,探讨了铍的主要影响因素及成因。

## 1 研究区概况

珠江三角洲地区位于广东省中南部,濒临南海,毗邻港澳。外围东、北、西三面为由高到低呈阶梯状的山地丘陵和台地环绕,中心地段为冲洪积形成的平原区。陆地总面积 41698  $\text{km}^2$ ,总人口 4750 多万<sup>[5]</sup>。该区属亚热带季风湿润气候区,年平均气温为 21.9℃;受季风影响,具有降雨量大、暴雨多、雨日长、季节性强的特点,年均降雨量在 1800~2200 mm,集中在 4—9 月份,由北向南降雨量逐渐增多。

区内地层隶属华南地层大区中的东南地层区,

收稿日期:2010-03-05;改回日期:2010-05-20

基金项目:中国地质调查局珠江三角洲地下水污染调查评价专题研究(1212010534807)资助。

作者简介:张玉玺,男,1982 年生,研究实习员,主要从事水文地质方面的研究;E-mail:kobzhang@qq.com。

以泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、第四系为主。第四系主要由海陆交互堆积物构成,广泛分布于三角洲平原地区。区内地下水分为松散岩类孔隙水、碳酸盐类裂隙溶洞水和基岩裂隙水3类。其中松散岩类孔隙水主要分布于西江、北江、潭江、流溪河等河流冲积平原。含水层岩性以粗中砂及卵砾石为主,厚度一般为3~40 m,水量中等—丰富。碳酸盐岩类裂隙溶洞水主要分布于广花盆地、高明盆地、肇庆、从化等地,岩性以灰岩、白云岩、大理岩为主,水量贫乏—丰富。基岩裂隙水在全区广泛分布,主要位于山地、丘陵地区,岩性主要为花岗岩、混合岩、闪长岩。富水性以中等为主。

充沛的降雨为地下水提供了充足的来源。山地丘陵地区,地下水最主要的补给形式为降雨入渗。由于地形切割较深,地下水以垂直迁移为主,具有埋藏浅,径流途径短的特点。多以泉或泄流形式向邻近沟谷排泄。地下水从丘陵山区流入平原后,由淋滤型转为径流型状态,一部分侧向补给第四系孔隙水,另一部分成为地下潜流。平原区地下水主要受河流入渗补给与基岩裂隙水的侧向补给,以水平径流为主,径流途径长,水流滞缓。全区地下水总体自北向南东,自北东向南西汇流,大多经珠江口和伶仃洋排泄入海<sup>[7]</sup>。

## 2 样品采集

自2005年至2008年,调查共获珠江三角洲地区地下水铍的检测样品937组。样品取自民用井和人工开挖的取样坑,井深一般在10 m以内,属浅层地下水。取民井水样前,先尽量抽干井水,隔天等水位恢复后于水下50 cm处定深取样。仪器采用中国地质科学院水文地质环境地质研究所研发的“地表水、地下水定深原位采样器”。对于无井地区,人工开挖取样坑,等水位稳定、坑水澄清后取样。检测铍、铝等组分的水样装入1 L硬质塑料瓶,加5 mL硝酸溶液(1+1),密封保存。样品送往国土资源部广州矿产资源监督检测中心测试,执行标准参照《GB/T8538-1995 饮用天然矿泉水检验方法》。pH值采用电位法在取样现场测定,仪器使用德国WTW Multi 340i手提式测试仪。

## 3 铍的分布特征

珠江三角洲浅层地下水中铍含量普遍较低,大部分样品的铍含量在 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下(图1)。全区

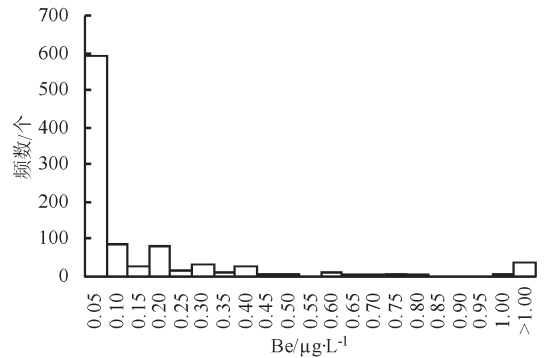


图1 珠江三角洲地下水Be含量统计直方图

Fig.1 Statistical histogram of beryllium in groundwater of the Zhujiang Delta

937个测试水样中,444组样品有铍检出,检出率为47.4%。检出的最大值为 $40.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值 $0.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,21组样品铍含量超过中国生活饮用水卫生标准规定的 $2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的限值,超标率为2.24%。

虽然地下水铍的检出点在珠江三角洲九大城市中均有分布,但超标点仅零散分布在广州中部一带,佛山北部和东部,东莞西部与北部,深圳西北部及惠州中部地区(图2)。肇庆、江门、中山、珠海四市地下水铍含量相对较低,检出点的平均值介于 $0.15\sim 0.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,未发现超标点(表1)。广州、佛山、东莞、深圳、惠州地下水均存在不同程度的铍污染。广州市地下水铍的超标点共6个,超标率2.32%。其中增城市2个点,从化市、萝岗区、白云区和花都区各1个点。珠江三角洲全区地下水铍含量的最高检出值为 $40.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $38.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,样品分别取自增城市和白云区。其余4个样品的铍含量均在 $5.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。检出点的平均值 $1.08 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,为全区最高。佛山市5个样品超标,超标率2.30%。2个位于三水区,3个位于南海区。三水区东部的样品铍含量最高,为 $7.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其他样品均在 $3.89 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。检出点的平均值 $0.41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,为五市中最低。东莞市超标样品7个,超标率为全区最高的4.27%。其中厚街镇和沙田镇各2组样,洪梅镇、寮步镇和石排镇各1组样。检出最大值 $10.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,取自洪梅镇。深圳市只有1个超标样,超标率为五市中最低的1.28%。该样品取自宝安区,铍含量 $12.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。惠州市超标样2个,分别取自龙溪镇和惠阳区,超标率2.13%。各市按检出样品的平均值排序,依次为广州>深圳>东

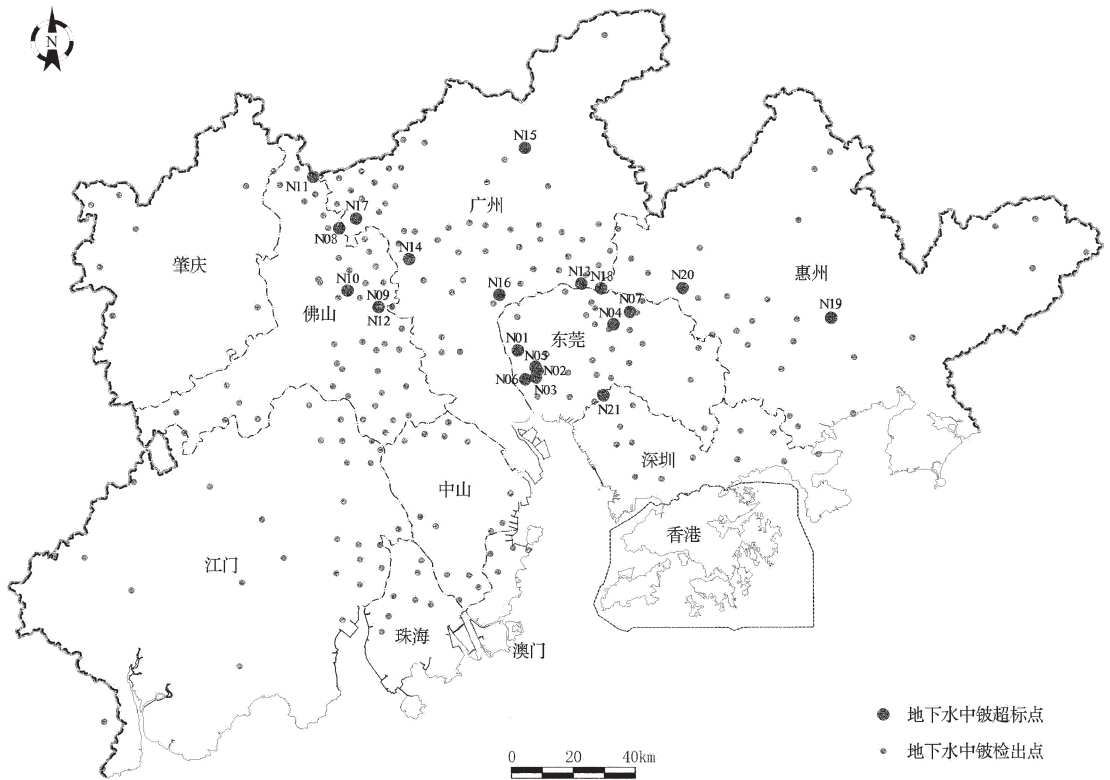


图 2 珠江三角洲浅层地下水铍的分布状况图

Fig.2 Location of the beryllium monitoring points in groundwater of the Zhujiang Delta

表 1 珠江三角洲各市地下水铍的含量

Table 1 Beryllium content of groundwater in each city of the Zhujiang Delta

地区	点数/个	检出点/个	超标点 <sup>①</sup> /个	检出率/%	超标率/%	最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	最小值	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
广州市	259	111	6	42.86%	2.32%	40.30	n.d.	1.08
佛山市	217	83	5	38.25%	2.30%	7.70	n.d.	0.41
东莞市	164	109	7	66.46%	4.27%	10.40	n.d.	0.62
深圳市	78	36	1	46.15%	1.28%	12.10	n.d.	0.69
惠州市	94	45	2	47.87%	2.13%	3.50	n.d.	0.53
肇庆市	28	8	0	28.57%	0.00%	0.40	n.d.	0.23
江门市	64	27	0	42.19%	0.00%	1.50	n.d.	0.34
中山市	19	14	0	73.68%	0.00%	0.56	n.d.	0.15
珠海市	14	11	0	78.57%	0.00%	0.40	n.d.	0.19
珠三角全区	937	444	21	47.39%	2.24%	40.30	n.d.	0.66

注:①参照 GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》的限值,高于  $2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  为超标; n.d.表示未检出;平均值仅针对检出点进行统计。

莞>惠州>佛山>江门>肇庆>珠海>中山。

大部分超标点位于人类活动密集、工业发达的平原地区。其中,2个位于滨海平原,5个位于河谷平原,7个位于三角洲中心平原,处在地下水流系统的

排泄区位置。其余7个超标点位于丘陵、台地区,人类活动较少,处于地下水流系统补给区位置。考虑取样点周围的环境因素,有10个样品取自明显的污染场地,其中5个点位于垃圾填埋场附近,另外5个

点在污灌农田中。其他 11 个超标点周围无明显的污染源,周围环境一般为住房或农田。

综上所述,珠江三角洲地下水中铍呈局部点状污染特征,其含量与分布规律应受自然条件和人为因素的共同影响。

## 4 主要影响因素

### 4.1 pH 值

pH 值是影响水体中铍活性的一个重要因素。同许多金属元素相似,酸性环境有利于铍的迁移。酸性越强,铍的活性越大。随着 pH 值增加,铍在水中的含量急剧下降,通常降为 ng 级到  $\mu\text{g}$  级<sup>[8]</sup>。这是由于在 pH 值增大的同时,①含水层中的胶体颗粒和粘土矿物表面的正电荷减少,负电荷增多,对铍的非专性吸附增强,降低了铍的迁移能力;②铍形成了微溶于水的  $\text{Be}(\text{OH})_2$  而沉淀。Vesely J. 等<sup>[9]</sup>研究表明,铍在碱性水中的浓度比在酸性水中低 1~2 个数量级。

pH 值低于 5.5 时,水中以  $\text{Be}^{2+}$  为主,在中性或碱性的水中,微量的铍主要以  $\text{BeOH}^+$  和  $\text{Be}(\text{OH})_2$  等形式存在<sup>[10,11]</sup>。

笔者研究的结果显示,在超标的 21 组样品中,除 7 组未测试 pH 值外,其余 14 组样品均处于酸性或偏酸性水环境中,其中 9 个样品的 pH 值小于 5.0,属强酸性地下水(表 2)。铍浓度最高( $40.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的样品 pH 值更是低至 3.47。不同酸性地下水中铍的含量(表 3)显示:pH 值小于 5.0 的强酸性水中铍含量最高。随着 pH 值增大,铍的检出率、超标率、最大值、最小值和平均值均迅速下降。但 pH 值为 6~7 时,受 N14 号点的影响,铍的平均浓度出现反常的升高;pH 值大于 7.0 的地下水中,铍含量极少,检出率较低,且无超标点。表明地下水铍浓度与 pH 值呈极显著的负相关关系(图 3),且随 pH 值的增大呈指数下降态势。

珠江三角洲地区浅层地下水普遍偏酸。pH 低

表 2 珠江三角洲地下水铍超标点汇总

Table 2 Summary of beryllium exceeding points of groundwater in the Zhujiang Delta

点号	Be/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	Al/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	点号	Be/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	Al/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
N01	10.4	--	19.39*	N12	2.74	--	11.72*
N02	6.10	3.57*	--	N13	40.3	3.47*	22.64*
N03	4.10	--	5.52*	N14	38.0	6.32*	--
N04	3.30	4.75*	0.52*	N15	5.20	4.67*	0.13
N05	2.50	4.71*	3.48*	N16	5.00	5.16*	0.06
N06	2.36	--	14.07*	N17	2.40	5.55*	0.16
N07	2.20	--	1.15*	N18	2.05	4.32*	0.23*
N08	7.70	5.58*	--	N19	3.50	5.54*	0.95*
N09	3.89	--	3.56*	N20	3.30	4.62*	0.30*
N10	3.50	3.73*	15.05*	N21	12.1	--	9.61*
N11	3.00	3.74*	--				

注:--表示未测;\*表示含量超过 GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》的限值。

表 3 不同 pH 值环境下地下水铍的检出超标情况

Table 3 Detection and standard-exceeding situation of beryllium in groundwater with different pH values

地下水 pH 值	样品数	检出数	检出率	超标数	超标率	最大值	最小值	平均值
3.0~5.0	62	52	83.87%	10	16.13%	40.300	0.043	1.855
5.0~6.0	250	164	65.60%	3	1.20%	7.700	0.013	0.385
6.0~7.0	447	140	31.32%	1	0.22%	38.000	0.005	0.462
7.0~9.0	143	40	27.97%	0	0.00%	0.990	0.007	0.155

注:最大值、最小值和平均值仅针对检出点进行统计,单位  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

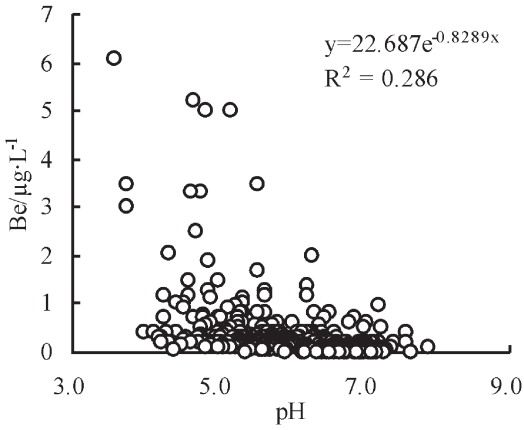


图 3 地下水铍与 pH 值的关系

Fig.3 Concentration of beryllium as a function of pH in groundwater

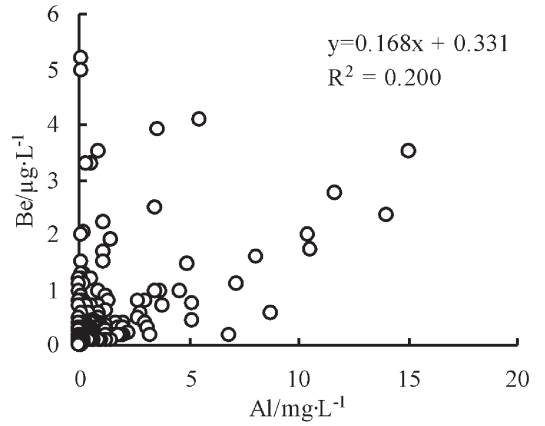


图 4 地下水铍和铝的相关关系

Fig.4 Concentration of beryllium as a function of aluminum content

于 6.5 的地下水分布范围占全区面积的 76.3%, 这对地下水中铍的迁移提供了有利环境。另外, 土壤的 pH 值也对铍迁移影响较大。土壤的 pH 值偏低, 一方面增强了 H<sup>+</sup> 从土壤胶体上置换铍离子的能力, 另一方面也使土壤矿物对铍离子的非专性吸附降低, 铍的交换能力增强<sup>[12]</sup>。珠江三角洲天然土壤以红壤、赤红壤及山地黄壤为主, pH 值为 4.0~5.5, 对铍的固定作用较差, 有利于铍的迁移。因此, 偏酸性的地下水及土壤环境, 是造成珠江三角洲浅层地下水中铍浓度增大的重要因素。

#### 4.2 铝

水中的其他离子可以干扰含水介质对铍的吸附, 与铍形成竞争作用, 争夺粘土矿物或胶体表面的吸附点。由于具有相似的地球化学性质, Al<sup>3+</sup> 被认为是 Be<sup>2+</sup> 最主要的竞争离子。Be<sup>2+</sup> 和 Al<sup>3+</sup> 的电子势很接近, 分别为 6.45 和 6.00, 而 Mg<sup>2+</sup> 为 3.08。因此, 相对于其他碱土金属, 铝和铍在许多化学性质方面都表现出更强的相似性(对角元素相似规则)<sup>[13]</sup>。在环境不变的情况下, 特定的粘土矿物或胶体的吸附点基本

恒定<sup>[14]</sup>。如果铝进入粘土矿物或胶体的吸附表面, 铍就会脱离吸附而进入地下水中。因此地下水中铝浓度升高时, 通常铍的浓度也会随之增大。珠江三角洲浅层地下水中 Al<sup>3+</sup> 与 Be<sup>2+</sup> 的相关性显著(图 4), 但随着 pH 值的变化有所不同(表 4)。当 pH 值小于 5.0 时, 铝和铍无明显相关性。这可能由于此时含水介质对铍的吸附作用较弱, 铝对铍的竞争效果不明显。随着 pH 值增大, 吸附作用增强, Al<sup>3+</sup> 对 Be<sup>2+</sup> 的竞争作用逐渐强烈, 表现为二者之间的相关性也随之增强。珠江三角洲地区地下水铝含量普遍较高, 全区超中国生活饮用水标准的样品约占 20%。表 2 显示, 铍的超标样品中, 铝的超标率达 87.5%。因此, 高铝的地下水环境也是促进该区地下水中铍迁移的重要因素。

### 5 来源浅析

自然环境中, 铍常以化合物形式存在于花岗岩中<sup>[5]</sup>, 伴随着岩石风化而进入环境中。珠江三角洲的天然土壤因具有明显富铝化特征被称为铁铝土, 铝的平均含量介于 7.38×10<sup>-6</sup>~8.89×10<sup>-6</sup>, 高于全国土

表 4 不同 pH 值情况下地下水 Be 和 Al 的浓度关系  
Table 4 Correlation between beryllium and aluminum in groundwater characterized by various pH values

地下水 pH 值	样本数	回归方程	R <sup>2</sup>	P	方程显著性
3.0~5.0	31	[Be]=0.788+0.075×[Al]	0.006	0.684	不显著
5.0~6.0	111	[Be]=0.252+0.356×[Al]	0.087	0.002	显著
6.0~7.0	67	[Be]=0.147+0.131×[Al]	0.129	0.003	显著
7.0~9.0	22	[Be]=0.099+0.064×[Al]	0.408	0.001	显著

注: 铍的单位为 μg·L<sup>-1</sup>; 铝的单位为 mg·L<sup>-1</sup>。

壤背景平均值  $6.62 \times 10^{-6}$ 。而铍的含量较低,平均为  $1.35 \sim 1.67 \times 10^{-6}$ , 低于全国均值  $1.82 \times 10^{-6}$  [15]。土壤的富铝化过程,很可能对铍产生了竞争作用 [16], 与土壤的偏酸环境共同导致铍从土壤中释放出来,再随降雨入渗等方式进入地下水中。而同样高铝和偏酸的地下水环境,极大地增强了地下水中铍的迁移性。自然环境是珠江三角洲地下水铍的来源之一,并为铍的迁移提供了有利条件。

珠江三角洲地区经济迅速发展的同时,污染也随之而来。高新技术产业崛起使铍的需求量迅速增加。电子、陶瓷、石化、仪表等行业是该区主要的涉铍工业,通过“三废”的形式将铍排入环境中。此外,煤的燃烧也是铍的重要来源 [5]。笔者调查结果表明:人类活动与该区地下水铍的关系十分显著。表现在:①三分之二的超标点均位于人类活动密集的平原地区;②工业较发达的广州、佛山、东莞、深圳四市污染相对严重;③约有一半的超标点位于明显的污染场地中。通过对污染场地的调查,发现超标点附近的垃圾填埋场都为不经过处理而直接堆放。垃圾渗滤液直接在地表汇集并下渗,对周围的地下水造成了严重污染。污灌农田经长时间的污水灌溉,污染物逐渐入渗至地下水中。因此,人类活动造成的污染,是珠江三角洲地下水中铍的重要来源,尤其在垃圾场、污灌农田等典型污染地区。

## 6 结 论

(1) 珠江三角洲浅层地下水中铍含量普遍较低,大部分在  $0.05 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,检出点的平均值为  $0.66 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。超标点仅零散分布于广州、深圳、东莞、佛山和惠州地区,超标率 2.24%。检出的最高值  $40.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 超过生活饮用水标准的 20 倍之多。反映了污染呈局部点状分布特征,个别地区污染严重。按各市地下水铍的平均含量显示污染程度依次为:广州>深圳>东莞>惠州>佛山>江门>肇庆>珠海>中山。

(2) 水中 pH 值与铝含量是影响该区地下水铍迁移的主要因素。pH 值降低增强了铍的活性。铝的存在对铍产生了竞争作用,削弱了含水介质及悬浮颗粒对铍的吸附,增强了铍的迁移能力。该区偏酸与高铝含量的地下水及土壤环境为铍的迁移提供了有利条件。

(3) 自然环境和人类活动共同影响着珠江三角

洲地下水中铍的含量与分布。岩石风化及天然土壤的形成过程是地下水中铍的来源之一,人类活动造成的污染对该区地下水中铍的超标有重要贡献,垃圾场、污灌农田等典型污染地区尤为明显。

## 参考文献 (References):

- [1] 符剑刚, 蒋进光, 李爱民, 等. 从含铍矿石中提取铍的研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2009, 37(1): 40-44.  
Fu Jiangan, Jiang Jinguang, Li Aimin, et al. The latest development of beryllium extraction from beryllium-containing ore [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2009, 37 (1): 40-44 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李春雷. 浅谈氧化铍的应用市场与生产技术现状 [J]. 新疆有色金属, 2007, 30(4): 31-33.  
Li Chunlei. The application of beryllium oxide status of market and production technology[J]. Xinjiang: Nonferrous Metals, 2007, 30(4): 31-33(in Chinese with English abstract).
- [3] 王保卫. 浅谈铍中毒的预防[J]. 化工劳动保护, 2000, 21(9): 347.  
Wang Baowei. Discussion on prevention of beryllium [J]. Chemical Industry Occupational Safety and Health, 2000, 21 (9): 347 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨师. 铍人体健康[J]. 金属世界, 2001, (1): 25.  
Yang Shi. Beryllium and health [J]. Metal World, 2001, (1): 25 (in Chinese with English abstract).
- [5] 龙圣喜. 铍的污染与危害[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 1988(1): 51-53.  
Long Shengxi. Pollution and harm of beryllium [J]. Railway Occupational Safety, Health and Environmental Protection, 1988 (1): 51-53(in Chinese with English abstract).
- [6] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2007[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.  
Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong Statistical Yearbook in 2007 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [7] 梁国玲, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水锰的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 899-906.  
Liang Guoling, Sun Jichao, Huang Guanxing, et al. Origin and distribution characteristics of manganese in groundwater of the Zhujiang River Delta[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 899-906.
- [8] Vesely J, Norton S A, Skrivan P. Environmental chemistry of beryllium[J]. Mineralogical Society of America, 2002(50): 291-318.
- [9] Vesely J, Majer V. The effect of pH and atmospheric deposition on concentrations of trace elements in acidified freshwaters: a statistical approach[J]. Water Air Soil Poll, 1996, (88): 227-246.
- [10] Krainov S R. The Influence of Acidic alkaline conditions of underground waters upon the concentration and migration of rare elements in them[J]. Geochemistry International, 1971, (11): 1332-1341.
- [11] Edmunds W M, Trafford J M. Beryllium in river baseflow, shallow groundwaters and major aquifers of the U.K. [J]. Applied

- Geochemistry, 1993, Suppl2(26):223-233.
- [12] 魏显有, 刘云惠, 王秀敏, 等. 土壤中铍的存在形态及提取研究 [J]. 环境化学, 1999, 18(3):249-253.
- Wei Xianyou, Liu Yunhui, Wang Xiumin, et al. Study on chemical forms of beryllium in soil and its extraction [J]. Environmental Chemistry, 1999, 18(3):249-253 (in Chinese with English abstract).
- [13] 顾学民, 龚毅生, 汤卡罗. 无机化学丛书 (第二卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Gu Xuemin, Gong Yisheng, Tang Kaluo. Inorganic Chemistry Series (Vol. II)[M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郭华明, 王焰新, 李永敏. 山阴水砷中毒区地下水砷的富集因素分析[J]. 环境科学, 2003, 24(4):60-67.
- Guo Huaming, Wang Yanxin, Li Yongmin. Analysis of factors resulting in anomalous arsenic concentration in groundwaters of Shanyin, Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(4):60-67(in Chinese with English abstract).
- [15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- Environmental Monitoring of China. Soil Element Background Values of China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990(in Chinese with English abstract).
- [16] 孙文舜, 董旭辉. 铍的土壤背景值研究 [J]. 环境科学研究, 1991, 4(6):13-17.
- Sun Wenshun, Dong XuHui. The study of beryllium element background value in soil [J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(6):13-17 (in Chinese with English abstract).

## Distribution of beryllium in shallow groundwater of the Zhujiang Delta and a preliminary analysis of its origin

ZHANG Yu-xi, SUN Ji-chao, HUANG Guan-xing, LIU Jing-tao, JING Ji-hong,  
XIANG Xiao-ping, CHEN Xi, WANG Jin-cui, CUI Hai-wei

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

**Abstract:** The distribution of beryllium-bearing shallow groundwater and the major factors affecting beryllium enrichment were studied in this paper on the basis of chemical data of beryllium, aluminum and pH of more than 900 groups of groundwater samples collected in the Zhujiang Delta. The results show that beryllium content varies from 0 to  $40.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , mostly lower than  $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , and that the average content of beryllium is  $0.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The points in excess of the standard are only scattered in Guangzhou, Shenzhen, Dongguan, Foshan and Huizhou, with the standard-exceeding rate being 2.24%. Beryllium contamination of groundwater has shown characteristics of local spot distribution. The pH and aluminum are the major factors affecting the distribution of beryllium in groundwater. Acidic and high aluminum content in groundwater and soil provides favorable conditions for the migration of beryllium. Rock weathering and natural soil formation are sources of beryllium in groundwater, and pollution caused by human activities has made an important contribution to the standard-exceeding phenomenon of beryllium in groundwater.

**Key words:** beryllium; distribution characteristics; origin; shallow groundwater; Zhujiang Delta

**About the first author:** ZHANG Yu-xi, male, born in 1982, assistant researcher, engages in the study of hydrological geology; E-mail: kobzhang@qq.com.