

中国北方高氟地下水分布特征和成因分析

何 锦 张福存 韩双宝 李旭峰 姚秀菊 张 徽

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:在中国北方地区,由于饮用高氟地下水而导致的地方病,严重影响了当地人民群众的身体健康。地下水中氟元素的富集是一个非常复杂的水文地球化学过程。本文在前人研究中国北方高氟水分布特征基础上,总结了高氟水形成的气候、水文、地质构造、岩性与土壤、水文地质条件和水化学特征,并结合项目成果提出高氟水地区适宜找水模式和一些去除水中氟元素有效的措施,从而避免氟中毒的发生。

关键词:氟;地下水;分布特征;浓缩富集

中图分类号:P641.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)03-0621-06

1 前言

高氟地下水($F > 1.0 \text{ mg/L}$)是广泛分布于中国北方干旱半干旱地区的一种典型的劣质水源。研究表明,长期饮用高氟地下水是导致地方性氟中毒的主要原因^[1-3]。据全国重点地方病防治规划(2004—2010年),全国饮水型氟中毒病区人口 4 194 万。高氟地下水的存在直接威胁着广大农牧民的饮水安全;同时,也使得原本贫水的地区更加缺水,供需矛盾突出,严重阻碍着地区经济建设的快速发展。2006 年以来,中国地质调查局组织了“地方病严重区地下水勘查及供水安全示范”计划项目,在东北、华北和西北地区开展了饮水型地方病区地下水勘查示范与供水安全示范工作,旨在解决地方病区居民的饮水安全问题。

本文在查阅整理前人研究成果基础上,对中国北方主要高氟地下水富集机制进行总结探讨,并依据项目工作成果,提出高氟水地区适宜找水模式,为今后寻找适宜供水水源地以及有针对性地选择降氟方法提供科学依据。

2 中国北方高氟地下水分布

中国北方高氟地下水分布十分广泛,主要以蒸

发浓缩作用形成的浅层高氟地下水为主,此外还有溶滤富氟矿物形成的深层高氟地下水和断裂热泉引起的地下水氟异常现象^[4]。

2.1 东北地区

高氟地下水主要分布在松嫩平原中西部、西辽河平原、呼伦贝尔高平原(图 1)。如辽宁省的盘山、黑山、辽中、康平,黑龙江省的肇源、肇东、肇州、安达、林甸,内蒙古自治区东部的通辽、赤峰、兴安盟、吉林省的通榆、白城、洮南等县市。

2.2 华北地区

主要分布在山西六大盆地、河套平原、太行山山前平原与中部平原毗邻的交界洼地、黄河冲积山前缘及黄泛洼地(图 1)。如内蒙古自治区华北片包括锡林郭勒盟、乌兰察布盟、呼和浩特市,山西的大同、运城、太原,河北的保定、石家庄、张家口,河南的许昌、周口、商丘,山东的菏泽、济宁等县市。其中在滨海平原地区深层地下水中含氟量亦较高,如天津、沧州、菏泽一带。

2.3 西北地区

主要分布在西北内陆的塔里木盆地、准噶尔盆地、河西走廊、关中盆地以及秦晋黄土高原及泾、石、洛河冲积平原等地(图 1)。如新疆的和田、阿克苏,

收稿日期:2010-04-17;改回日期:2010-04-21

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010634714)资助。

作者简介:何锦,男,1980年生,工程师,主要从事地下水科学研究工作;E-mail:hejing007105@hotmail.com。

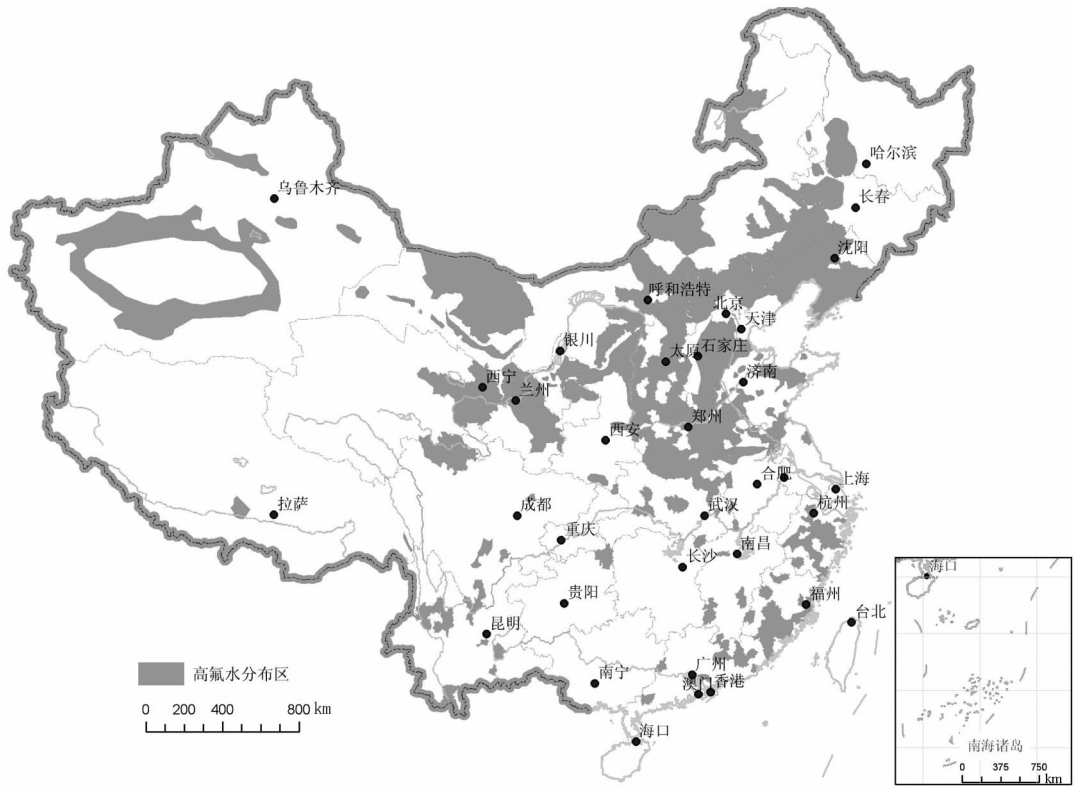


图1 中国高氟地下水分布图

(资料来源:中华人民共和国地方病与环境图集,1989)

Fig.1 The distribution of high-fluoride groundwater in China

(modified from Atlas of the Endemic Disease and Environment of People's Republic of China, 1989)

青海的西宁、互助、贵德,甘肃的酒泉、陇西,陕西的西安、定边、靖边和大荔,宁夏的盐池、固原等县市。另外在陇中黄土高原、秦岭北麓和关中盆地还有断裂构造形成的高氟地下温泉。

3 成因分析

氟在地下水中的富集是长期地质作用和地球化学演变的结果,其主要受不同的岩石类型、气候、地形地貌、地质构造、水文地质等地质环境因素的影响,此外还有一些人为因素的影响。

3.1 气候

气候因素主要是降水和蒸发力,是水盐运动的主要基础和能量(势能)的主要来源。中国北方属于干旱半干旱地区,多年平均降雨量小于450 mm,而蒸发量却高达2000 mm^[4]。强烈的蒸发作用致使浅层地下水沿包气带土体毛细管孔隙上升蒸发,包气带土壤氟含量逐步聚集增高;随着降水淋溶使土层中可溶性氟进入地下水而形成高氟地下水。例如:阿

拉善沙漠中心水井中的氟含量高达15.4 mg/L^[5]。刘东生(1983)在研究中国北方高地方性氟病区指出“氟在平原上的迁移与富集状况随着苏打盐渍化的轻重显示有强弱的差异,而高氟地下水分布范围与区域土壤盐渍化形影相随,造成二者共生的机制就是盐份的浓缩作用”^[6]。

3.2 地形地貌

地貌特征反映了一个地区的地质构造、地层岩性、土壤类型、植被种属、地表水和地下水的赋存条件,以及水质、水量的形成特点,还可以反映一个地区的地球化学环境特征和元素迁移、富集的规律,进而影响高氟地下水的形成和分布。中国北方高氟地下水广泛分布在山前冲积扇的扇缘交接洼地和冲积平原区、盆地中心相对低洼的地区。如:河套平原、运城盆地、张掖盆地等中心地区均为高氟地下水分布地区。此处水动力条件差,地下水径流缓慢,加之地下水位埋深较浅,蒸发作用增强,故而导致地下水中氟离子的升高。

3.3 土壤与岩石

氟物质主要来源是岩土中的含氟矿物。中国北方主要平原周围山地的岩石主要以富氟的变质岩、岩浆岩、沉积岩组成。根据赵锁志^[7]统计,内蒙古河套地区三大岩类的含氟量大小依次为变质岩、岩浆岩、沉积岩。其中变质岩中作为主要矿物成分的黑云母、金云母、绢云母和角闪石的全氟量较高;经分析,斜长角闪岩的全氟量高达 1 867 mg/kg,远远高于地壳均值(660 mg/kg)。另外,中国北方一些地方富氟矿床的分布,如萤石矿、云母矿、磷矿、煤矿、油页岩及金属矿床,这些富氟矿床导致在该区域上岩石的氟背景值偏高。

土壤的母质来源为岩石风化物。在中国北方的基岩富氟的背景下,土壤中的氟含量也比较高。据刘东生(1966)对黄土物质成分的研究,黄土和古土壤层中,含有云母、角闪石、电气石、磷灰石等含氟矿物质。而陈庆沐、袁芷云^[8]分析表明,陕西洛川地区马兰黄土含氟平均为 490~520 mg/kg,年代较老的离石黄土含氟平均为 550 mg/kg,黄土层中的古土壤含氟平均为 560 mg/kg,其上述值均超过中国土壤氟含量平均值 440×10^6 和世界土壤均值 200×10^6 ^[9],而其他类型土壤如棕壤、褐土、潮土的氟含量也高于全国均值^[10],上述富氟土壤成为浅层地下水中氟的直接来源。此外,利用浅层高氟水灌溉的土壤,氟离子会大量吸附在土壤颗粒表面并固化,在降水的淋滤、溶解作用下而溶于地下水中,导致地下水中氟含量升高^[11]。

3.4 水化学及水文地质条件

大量研究表明^[12-16],地下水的水化学类型,对高氟地下水的分布起着重要的控制作用。典型的高氟地下水水化学类型多为弱碱性高矿化的 HCO_3^- -Na 型地下水, F^- 与温度、pH、TDS、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等常规离子在一定范围内都有比较明显的相关关系。任福弘(1996)^[16]研究华北平原高氟水时候发现地下水中氟在水中主要以自由离子形式出现,其次为 CaF^+ 、 MgF^+ 等络合物,而 MgF^+ 与地氟病呈现显著相关关系。王根绪(2000)^[13]对西北内陆干旱区地下水氟研究得出地下水中 SO_4^{2-} 含量的增加对氟在水中的稳定性有较强的抑制作用。李向全(2007)^[15]通过对太原盆地浅层地下高氟水取样分析发现 F^- 与 $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值,可以指示地下水中不同的氟离子富集机制。

水文地质条件是地下水中氟富集的最关键因素。地下水的交替循环速度控制着氟的迁移聚集,而含水层的岩性、结构、透水性、地下水埋深等因素又控制着地下水的循环交替强度。不同水文地质要素组合形成特定的水文化学场,会影响氟在地下水中的迁移分布。王根绪^[13]、任福弘^[16]、邵琳琳^[17]通过研究西北内陆盆地和华北平原高氟地下水,发现氟的迁移分布明显具有淋溶-径流、径流-淋溶蒸发、溶滤-强烈蒸发浓缩 3 个水文地球化学带,运用热力学理论验证了水土中氟的水平分布规律是一致的,并可以相互转化。

在断裂构造发育的地区,常常有富氟热泉的形成。这主要是由于地下水在深部循环过程中得到加温,并携带某些化学组分向浅部运动,因深部岩层中含有较多的氟化物;在高温高压下,地球化学作用强烈,高温热液会溶解围岩中的富氟矿物,同时热水中氟化氢发生电解与水中结合形成氟化物溶于水导致含氟量增高。

3.5 人为因素

人类活动造成的地下水氟含量超标,主要指人类在生产生活过程中释放出来的含氟物质,经过表生水文地球化学作用,进入含水层而导致水氟的异常升高。另外,人们在开采地下水时破坏含水层结构而改变氟的迁移途径,也会使得低氟含水层中氟含量增加^[18]。任荣(1991)^[18]在研究河北平原东部高氟地下水成因时发现,由于长期超采深层地下水,改变了当地局部地下水动力条件,致使上层高氟含水层的水越流补给下层低氟含水层的水,同时弱透水层中粘性土释水而释放出的氟离子,也导致同一含水层中氟浓度有逐渐增加的趋势。

4 找水模式与降氟方法

鉴于中国北方水资源的稀缺性,尤其是广大干旱-半干旱地区居民的主要饮用水源均为地下水,而在原本缺水的地区寻找适宜饮用水源成为当前面临的主要任务。高氟地下水其主要形成于构造断陷盆地、山前冲洪积扇前缘地下水溢出带、冲湖积平原、黄土地区地貌类型区。其水文地质特征多具有多层含水层结构、导水性能弱、地下水埋藏浅,水平径流滞缓、地下水动态为入渗-蒸发型等特点。根据上述特点可以利用遥感技术视域广、信息丰富、多时相、快速便捷等技术优势,在短时间内宏观上了解研

表 1 高氟水地区找水方向及关键点一览表
Table 1 Groundwater exploration direction and key points in the high-fluoride groundwater zone

地貌类型	找水方向	关键点
冲洪积平原区	松散岩类孔隙水	① 地层颗粒分布比较均匀,电差异小,解译难度大
		② 水质垂向交替变化大,部分含水层埋深大,寻找淡水水体难度大
黄土高原区	黄土层孔隙裂隙水	① 黄土层孔隙裂隙发育特征及富水性不易查明
	河谷松散孔隙水	② 多泥沙地层取水困难
构造山地区	基岩裂隙水	① 裂隙、断裂的空间分布特征及富水性不易查明
	碎屑岩溶水	② 岩溶构造分布复杂及施工过程中地层坍塌、冲洗液漏失等问题

究区环境水文地质条件,并通过遥感影像解译结果和常规水文地质资料相结合,对研究区环境水文地质条件进行综合分析,初步圈定出找水预测靶区。其次利用地球物理探测技术,对圈定靶区内不同的富水地段进行详细勘查,确定地层结构、构造空间分布特征和宜井位置,最后根据不同地层条件选择钻进、成井工艺技术,开采优质地下水(表 1)。

另外,在不具备改水条件的地区,应采用人工降低地下水氟含量。目前,国内外降氟方法多种多样,但主要分为三大类:混凝沉淀法(硫酸铝沉淀法、石灰沉淀法),利用活性炭、沸石、氧化铝等的吸附法和电化学法。前两类方法主要针对单纯氟离子含量较高,而其他指标相对较低或符合饮用水标准的高氟水地区,而第三类方法主要针对氟离子含量较高,而其他指标相对也较高,不符合饮用水标准的高氟—苦咸水地区^[9]。有些国家采用冰冻法降氟,取得了较好的效果。而利用中国北方冬季气温较低的特点,尝试采用天然冰冻法去除水中的 F^- ,应该是简单有效的方法。

5 结 论

综上所述,由于中国北方地区的自然环境,气象气候和水文地质条件复杂多变,造成了区域地下水中氟离子富集的多样性。因此,在实施区域改水降氟

时,因根据当地水文地质条件和经济合理技术可行性,有针对性地选择地下水开发与供水模式。如①在高氟地下水与优质水含水层叠置且供水目的层出水量和可持续开发能力满足需要的地区,利用新技术新方法确定低氟含水层和适宜井位,采用就地集中供水的方式。②在基本无低氟含水层或条件极为复杂或供水目的层出水量和可持续开发能力无法满足需要的地区,在其外围可接受距离之内施工供水井,然后利用管道输送集中供水。③在本地和经济条件允许距离内基本无低氟含水层或条件极为复杂或供水目的层出水量和可持续开发能力无法满足需要的地区,实施物理化学方法改良水质,集中或分散供水。

因此,针对中国北方高氟水形成特点,寻找适宜低氟水源,采用适当的人工降氟方法应该是减少高氟水危害的主要和有效的措施,但若根治其危害应长期加强对生态环境的综合治理,同时政府应加强防病知识教育工作。

致谢:感谢为此项研究提供资料的各省地调院的工作人员。

参考文献(References):

- [1] David L.ozsvath. Fluoride and environmental health:a review [J]. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. , 2008, 22(1):4-37.
- [2] 范基姣, 佟元清, 李金英, 等. 我国高氟水形成特点的主要影响因素及降氟方法[J]. 安全与环境工程, 2008, (5)1:14-16. Fan Jijiao, Tong Yuanqing, Li Jinying, et al. Affecting factors of high-fluorine water in our country and scheme to avoid fluorosis[J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, (5) 1:14-16 (in Chinese with English abstract).
- [3] 安永会, 张福存, 孙建平, 等. 我国饮水型地方病地质环境特征与防治对策[J]. 中国地方病学杂志, 2006, 25(2):220-221. An Yonghui, Zhang Fucun, Sun Jianping, et al. Characteristics of geological environment of endemic in drinking water and control countermeasure in China [J]. Chinese Journal of Endemiology, 2006, 25(2):220-221(in Chinese with English abstract).
- [4] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近 40 年中国北方降水量与蒸发量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2):6-10 Yang Jianpin, Ding Yongjian, Cheng Rensheng, et al. Variations of precipitation and evaporation in North China in recent 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17 (2):6-10(in Chinese with English abstract).
- [5] Yang Z Y. Types of formation cause of hydrogeochemistry for fluor disease [C]//Researches on Theory and Method of Environmental Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 1987:32-36.
- [6] 郑宝山. 土壤的苏打盐渍化与地方性氟病 [J]. 环境科学学报,

- 1983, 3(2):113-122
- Zheng Baoshan. Soil soda solinization and endemic fluorosis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1983, 3 (2):113-122 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵锁志, 王喜宽, 黄增芳, 等. 内蒙古河套地区高氟水成因 [J]. 岩矿测试, 2007, 26(4):131-139.
- Zhao Suozhi, Wang Xikuan, Huang Zengfang, et al. Study on formation causes of high fluorine groundwater in Hetao area of Inner Mongolia [J]. Rock and Mineral Analysis, 2007, 26 (4):131-139(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985:376.
- Liu Dongsheng. Loess and Environment [M]. Beijing:Science Press, 1985:376(in Chinese).
- [9] 魏复生, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值 [M]. 北京:地质出版社, 1984:26.
- Wei Fusheng, Cheng Jinsheng, Wu Yanyu, et al. The Background Values of Soil in China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1984:26(in Chinese).
- [10] 毕桂英, 王志忠, 马淑英. 黄土地区各土类中含氟量的测定[J]. 水土保持通报, 1989, (9)4:35-39.
- Bi Guiying, Wang Zhizhong, Ma Shuying. Fluorine determination of the soil on loess area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, (9)4:35-39(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨军耀. 土壤氟吸附动力学模型 [J]. 土壤通报, 1997, 28(6):283-284.
- Yang Junhui. The adsorption kinetics models of fluoride in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(6):283-284(in Chinese with English abstract).
- [12] 何锦, 安永会, 韩双宝. 张掖市甘州区地下水氟的分布规律和成因[J]. 水资源保护, 2008 (24)6:53-56.
- He Jin, An Yonghui, Han Shuangbao. Distribution and origin of fluorin ion in Ganzhou District of Zhangye City [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(6):53-56(in Chinese with English abstract).
- [13] 王根绪, 程国栋. 西北干旱区水中氟的分布规律及环境特征[J]. 地理科学, 2000, 20:153-158.
- Wang Genxu, Cheng Guodong. The distributing regularity of fluorine and its environmental characteristics in arid area of northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20:153-158 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨忠耀. 氟病水文地球化学成因类型的划分[C]//地矿部水文地质与工程地质研究所. 环境水文地质理论及方法研究. 北京:地质出版社, 1987:32-37.
- Yang yaohui. Characters of the Hydrogeochemistry in Fluorosis[C] // The Engineering geology and hydrogeology institute of mineral of Ministry. Study of Environmental Hydrogeology Theory and Method. Beijing:Geological Publishing House, 1987:32 -37 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李向全, 祝立人, 候新伟, 等. 太原盆地浅层高氟水分布特征及形成机制研究[J]. 地球学报, 2007, 28(1):55-61.
- Li Xiangquan, Zhu Liren, Hou Xinwei, et al. Distribution and evolutionary mechanism of shallow high-fluoride groundwater in Taiyuan basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1):55-61 (in Chinese with English abstract).
- [16] 任福弘, 曾澍辉, 刘文生, 等. 高氟地下水的水文地球化学环境及氟的赋存形式与地氟病患率的关系 [J]. 地球学报, 1996, (17) 1:86-97.
- Ren Fuhong, Zeng Jianhui, Liu Wensheng, et al. Hydro-geochemical environment of high fluorine groundwater and the relation between the speciation of fluorine and the diseased ratio of endemic fluorosis[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, 17(1):86-97 (in Chinese with English abstract).
- [17] 邵琳琳, 杨胜科, 等. 奎屯河流域水土中氟的分布规律 [J]. 地球科学与环境学报, 2006, 12(4):64-68.
- Shao Linlin, Yang Shengke, et al. Distribution regularity of fluorine in shallow groundwater in unsaturated soils of Kuitun river basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 12(4):64-68(in Chinese with English abstract).
- [18] 任荣, 马开俊. 试论河北平原东部高氟地下水的形成[J]. 勘察科学技术, 1991, 2(1):25-33
- Ren Rong, Ma Kaijun. Study of high fluorine groundwater in east of Hebei plain [J]. Site Investigation Science and Technology, 1991, 2(1):25-33(in Chinese with English abstract).
- [19] 佟元清, 李金英, 王立新, 等. 地下水降氟方法对比研究[J]. 中国水利, 2007, 10:35-39.
- Tong Yuanqing, Li Jinying, Wang Lixin, et al. Comparative studies of groundwater fluorine reduction methods [J]. China Water Resources, 2007, 10:35-39(in Chinese with English abstract).

The distribution and genetic types of high-fluoride groundwater in northern China

HE Jin, ZHANG Fu-cun, HAN Shuang-bao, LI Xu-feng, YAO Xiu-ju, ZHANG Hui

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Fluoride poisoning by drinking high-fluoride water is a rather common phenomenon in the world, and groundwater with high fluoride is very widespread in northern China. As regional groundwater is the main source of water supply, fluoride poisoning has developed to such an extent that it has seriously affected human health. The enrichment of fluoride in the groundwater is a very complicated hydrogeochemical reaction. Results of the studies conducted in northern China are summarized in this paper. It is indicated that regional high fluoride-bearing groundwater on the whole exhibits some characteristics in distribution. The formation of high fluoride water was studied in relation to climate, hydrology, geological structure, rock and soil, geological and hydrological conditions of water chemistry and other natural factors. The groundwater exploration direction and some key points in the high-fluoride groundwater zone are pointed out on the basis of relevant results. Having analyzed the distribution and environmental characteristics of high fluoride-bearing groundwater, this paper advances many effective measures to reduce the fluoride content in drinking water and to cure the disease.

Key words: fluoride; groundwater; distribution and characteristics; concentration and enrichment

About the first author: HE Jin, male, born in 1980, engineer, mainly engages in groundwater science; E-mail: hejing007105@hotmail.com.