松嫩平原氟中毒区地下水氟分布规律和成因研究

汤 洁 卞建民 李昭阳 邴智武 查恩爽 王晨野 毛子龙

(吉林大学环境与资源学院,吉林 长春 130012)

提要:自中新生代以来,在松嫩平原巨大的断陷盆地内沉积了巨厚的古近-新近系和第四系沉积物,形成了由潜水和承压水组成的大型蓄水构造。该区潜水和第四系承压水氟含量较高,在 194 个样品中,氟的均值为 3.45 mg/L,范围值为 0.25~14 mg/L。饮用高氟地下水导致氟中毒大规范流行。研究表明高氟地下水主要分布在山前补给区-蒸发排泄区的过渡带和盆地中部地下水强烈蒸发带,地下水化学类型为 HCO_3-Na·Mg 和 HCO_3-Cl·Na 型,总溶解性固体含量为 689.84~2005.6 mg/L。高氟水的形成与气候、水文、地质构造、岩石与土壤、水文地质和水化学条件等自然因素有关,同时受不合理开采地下水等人为因素的影响。开展氟病区地下水环境特征和高氟水成因研究对于有效实施安全供水有重要意义。

关 键 词:松嫩平原;氟中毒;水化学特征;富集;成因分析

中图分类号:P641.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-3657(2010)03-0614-07

1 前 言

松嫩平原位于中国东北地区,行政区包括吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区东部,地理坐标为北纬 42°30′~51°20′,东经 121°40′~128°30′之间,总面积 23.13×10^4 km^2。松嫩平原为中、新生代以来形成的巨大断陷盆地,西部以大兴安岭东麓的丘陵台地为界,北部和东部以小兴安岭和长白山地外围的山麓台地为邻,南部以松辽分水岭隆起带为界[1-2]。受气候、地质构造等因素控制,该区地下水氟含量较高,并流行地方性氟中毒。开展氟中毒流行区的地下水环境特征和高氟水成因研究,对于有效实施安全供水有重要意义。

2 氟的生物化学性质和研究区地氟病的分布

氟是人体必需的微量元素之一,对生长发育、骨骼代谢等有重要影响。人体摄入适量的氟有益于身体健康,但摄氟过量会导致氟中毒,缺氟又会引起多种生理和病理变化[3]。氟中毒是一种慢性全身性疾病,地方性氟中毒是由于长期生活在高氟地区,机体摄入过量氟化物而引起的全身慢性蓄积性中毒。过量的氟进入人体后,主要沉积在牙齿和骨骼上,形成氟斑牙和氟骨症。

松嫩平原是中国地氟病的重病区之一,具有病区分布广、病人多、病情重、危害大的特点。区域潜水中氟含量普遍较高,当地群众长期饮用含氟量较高的地下水,引发氟中毒流行。氟中毒流行区主要有吉林省的通榆、白城、洮南、乾安、长岭,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、兴安盟等县市。病区人口近 700 万人,患病人数约 200 万人,其分布及病情见表 1。这些病区在地貌上主要为低平原、高平原和山前扇形平原的低洼地带,居民用水主要是第四系浅层水,地下水氟含量一般为 1~3 mg/L,饮用高氟水是氟中毒的主要原因。

多年来,国家和省、市各级政府及相关业务部门

收稿日期:2010-03-05;**改回日期**:2010-04-08

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010634701)、吉林省地质调查局项目(1212010511208)及吉林省环境保护局项目(20070101)联合资助。

作者简介:汤洁,女,1957 年生,博士,教授,博士生导师,主要从事环境与健康,生态环境系统与信息管理研究;E-mail:tangjie@jlu.edu.cn。

表 1 松嫩平原主要地方病(氟中毒)高发区及患病人数(万人)

Table 1 Distribution of fluorosis areas and people in Songnen plain

吉林省	地　区	通榆县、大安、白城、洮南、乾安、长岭
	病区人口	386.33
	患病人数	71.78
黑龙江省	地　区	安达市、肇源、肇东、肇州
	病区人口	314.54
	患病人数	108.71

十分重视病区饮水的改善和地氟病的防治，开展了大量的防病改水工作，在一定程度上抑制了氟中毒的流行。

3 病区地下水环境特征

松嫩平原是一个由第四系潜水、承压水和古近—新近系承压水组成的大型蓄水盆地。根据区域地貌分布特征可分为东部高平原,中部低平原,西部大兴安岭山前倾斜平原及河谷平原 4 个水文地质分区[4]。松嫩平原的高平原区以黄土状亚粘土为主,透水性差,富水性弱,地形切割强烈,不利于地下水富集,潜水贫乏。中部低平原自下而上由古近—新近系始新统—渐新统依安组承压水、中新统大安组承压水、上新统泰康组和第四系下更新统承压水、上部冲积层孔隙潜水多层结构组成的含水系统，是以承压水为主的大型蓄水盆地。西部山前地带为由砂砾石扇形地构成了极富水的蓄水构造，有利于地下水的富集和赋存。区域地下水沿水平方向呈现由盆地四周向中心运动，即呈现由东部高平原和西部山前倾斜平原向中部低平原运动的规律，第二松花江与嫩江汇合地带为区域地下水的汇集中心，地下水沿松花江河谷向东北方向运动并排出区外。在垂直方向上，孔隙潜水和孔隙承压水向下补给古近—新近系至第四系泰康组承压水;古近—新近系大安组、依安组和白垩系承压水,向上补给泰康组承压水。松嫩平原形成了山区为补给区，河谷及山前冲洪积扇为径流区，低平原和湖积中心为径流和排泄区的基本格局。地下水的主要排泄方式为垂直蒸发、侧向径流、河水排泄和人工开采(图 1)。

4 地下水氟的分布规律

松嫩平原地下水中氟的分布具有明显的水平分带性，即从平原中心到边缘，从浅层水到深部承压水,氟含量普遍存在着由高变低的规律。

为了解不同含水层氟的超标情况，笔者对 2005—2008 年区内不同含水层样品氟的范围值、平均值、超标点数以及超标率进行了统计与分析（表 2),潜水氟含量分布见图 3。

从表 2 中可以看出，高氟地下水主要分布在潜水和井深<80 m 的第四系承压水中,范围值、均值都较大程度上高于生活饮用水卫生标准（GB5749-2006)的标准值(1 mg/L),超标率大于 70%,其中在<10 m 的潜水中氟含量均值高达 4.56 mg/L,超

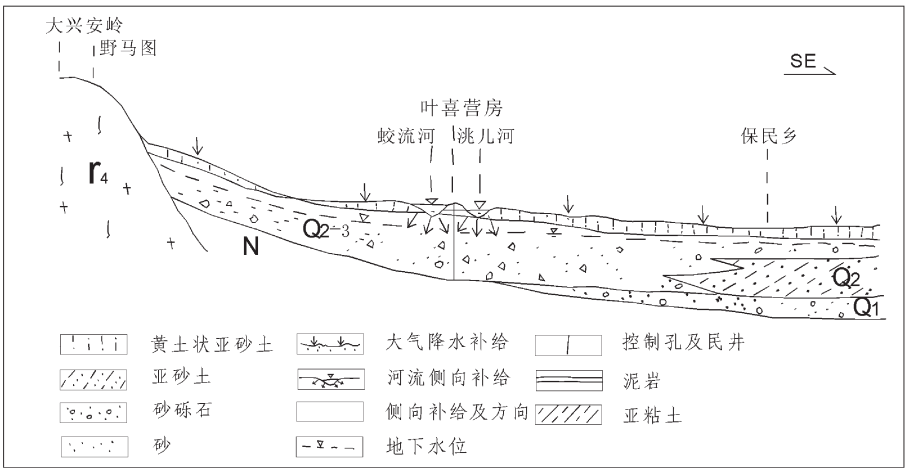

图 1 研究区西北部水文地质剖面示意图

Fig.1 Sketch hydrogeological profile in the northeast of the study area

表 2 研究区地下水不同深度水氟含量及分布

Table 2 Fluorine content distribution at different depths of the study area

类型	井深（m）	井数（眼）	范围值（mg/L）	平均值（mg/L）	标准值（mg/L）	超标井数（眼）	超标率（%）
潜水	<10	17	0.85～14	4.56	1	16	94.12
	10～20	42	0.25～13.2	2.4	1	31	73.80
	20～40	38	0.42～9.8	2.47	1	34	89.47
第四系承压水	40～50	10	0.72～2.82	1.878	1	9	90
	50～80	36	0.32～4.1	1.48	1	26	72.22
	80～100	20	0.44～1.9	1.18	1	10	50
古-新近系承压水	100～150	26	0.16～2.4	1.05	1	12	46.15
	>150	5	0.34～1.25	0.84	1	2	40

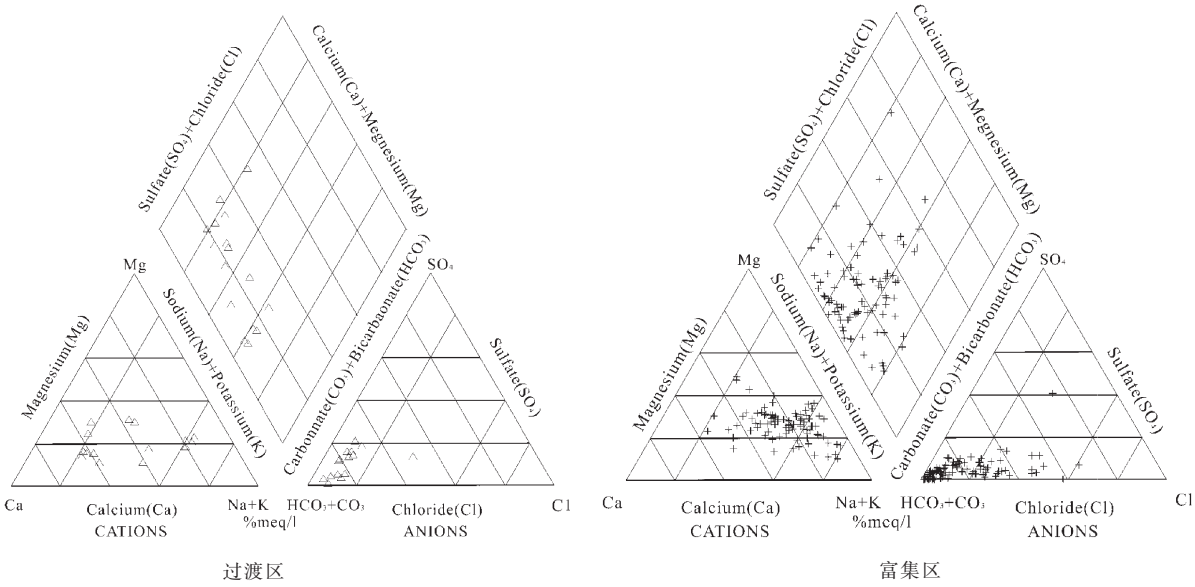

图 2 过渡区、富集区水化学类型

Fig.2 Hydrogeological types in transition and enrichment areas

标率为 94.1%,最大值为 14 mg/L。在>80 m 的地下水中,虽然,超标率也较高,但均值都较低。分析其原因,一是因为该深度的水样较少影响了其代表性,二是浅层地下水由于钻井工艺差等因素导致承压水水氟含量增高。

5 地下水化学类型与氟含量的关系

已有研究表明,地下水化学类型与水氟含量具有一定的关系。目前,中国广泛应用舒卡列夫分类法对地下水水化学类型进行划分。根据研究区水文地质条件和地下水径流条件,将研究区划分为淋溶区、过渡区和富集区,利用 Rockwork 软件中的 Piper 模块分别绘制 3 个区的地下水水化学类型图,其中过渡区和富集区水化学类型图见图 2。

淋溶区分布于山前冲积和坡积倾斜平原、火山岩的基岩山区以及山前变质岩区的地下水补给区,该区地下水质较好,总溶解性固体含量为 365~544 mg/L,地下水类型为 HCO_3-Ca 型,水氟的范围值为 0.34~1.75 mg/L,均值为 0.93 mg/L。

过渡区位于从山前补给区—蒸发排泄区的过渡带上。地下水阳离子以 Ca^{2+}、Mg^{2+}为主,其次是 K^+、Na^+,阴离子以 HCO_3^-为主,位于以上三线图中部偏

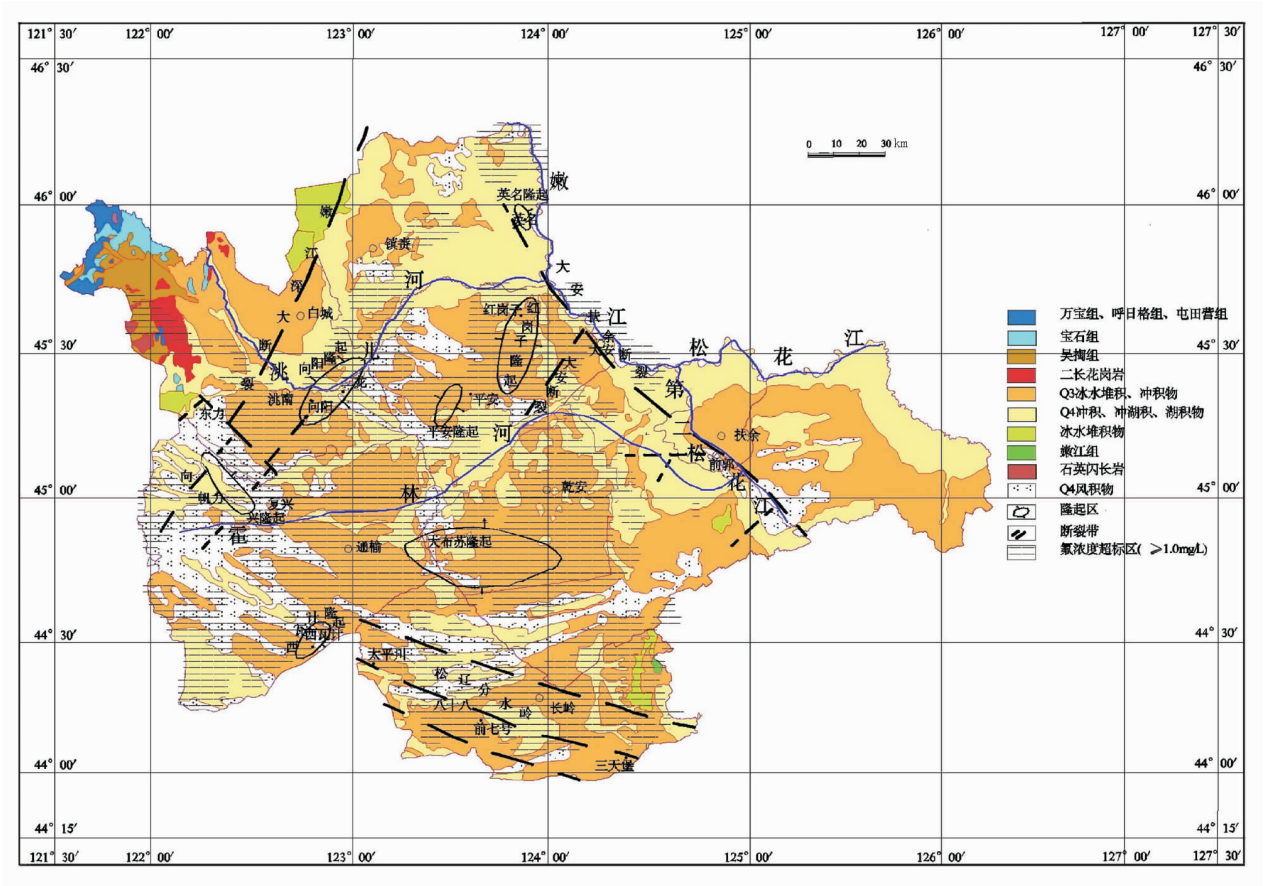

图 3　潜水氟含量分布与地质构造叠加结果图

Fig.3　Overlay map of fluorine content in phreatic water and geological structure

左,总溶解性固体含量为 519~1054 mg/L。由于该区地形坡度变缓,含水层中沉积物颗粒较细,地下水径流速度较缓慢,地下水以蒸发、离子交换作用为主。地下水中氟的范围值为 0.16~3.40 mg/L，平均值 1.21 mg/L,地下水类型为 HCO_3−Na·Mg(Na·Mg)型。

富集区位于盆地中部地下水强烈蒸发区。该区沉积物以冲湖积、风积为主,含水层渗透性差,地下水交替缓慢,区内地下水阴离子以 HCO_3^-、Cl^-为主,阳离子以 K^+、Na^+为主,位于三线图中部,地下水类型为 HCO_3Cl−Na 型，总溶解性固体含量为 610~2006 mg/L，水氟范围值为 0.50~14 mg/L，均值为 2.02 mg/L。

总之，研究区高氟地下水往往为偏碱性水(pH 大于 8),水化学类型大多为 HCO_3 型、HCO_3−Cl 型或 Cl−HCO_3 型。而且地下水中的氟离子主要富集在高矿化度的苏打水中。高氟地下水中的总溶解固体(TDS)含量多大于 500 mg/L。这主要是在苏打化地区地下水 TDS 含量较高,当苏打水中 Ca 离子浓度较低,Na 为主要的阳离子，受 CaF_2 溶解度的限制，其水环境有利于 F 离子浓度的增加。另外,在 HCO_3 占优势的碱性环境中有利于含氟矿物中可交换的氟离子被水中的羟基置换,释放到地下水中,随着 Na/(Cl+SO_4)比值的增加,氟离子的浓度也呈增加的趋势。

6　高氟水的成因分析

高氟地下水是在特定的自然地理环境下形成的,其分布受到自然因素和人类活动影响。

6.1　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,进而影响地氟病的形成和分布。根据氟含量分布与地

貌类型叠加结果图(略)分析得出,高氟点分布于湖沼湿地、低洼地区,或按地貌成因形态分布于河流低阶地、河谷及河漫滩。本区地方性氟中毒因具体地形地貌的差异而显现出不同的特点,地形越低洼越易形成病区,同时病情也随之加重。

本区新构造运动继承了老构造运动的特点,以断裂和隆起活动等形式为代表。断裂带为嫩江深大断裂,经白城、洮南西、通榆保安屯控制着西部山地丘陵的隆起抬升。隆起带为复兴隆起、向阳隆起、大布苏隆起、西瓦计隆起,隆起作用使平原区下降,形成沉积中心。研究区地下水中氟含量等值线图与地质构造图叠加成果表明,氟含量大于 2.0 mg/L 的水样主要分布在嫩江深大断裂带、向海断裂带、向阳隆起带、车力—复兴隆起带与大布苏隆起带的四周及相对坳陷区(图 3)。

6.2 岩石与土壤

松嫩平原周围山地的岩石及含氟矿物长期暴露于地表,经风化、淋溶,并借助水动力条件迁移、富集于平原地区,为平原提供了大量氟的物质来源,其中大兴安岭是控制范围最广,影响程度最大的氟源。大兴安岭基岩中氟的含量范围值为 267~4404 mg/kg,平均值为 977.7 mg/kg,已远远超出地壳均值(660 mg/kg),也高于中国其他高氟地区[5]。大兴安岭岩石氟的释放系数为 0.24~0.5,较大的释放强度为平原区氟的富集提供了的主要来源。

岩石是土壤发育的母质,成土母质中氟矿物的组成、结构不同,在土壤中的稳定程度不同。根据采样分析,土层中有钾冰晶石、方氟硅钾石等含氟矿物,氟含量较高的岩石其风化程度较高,风化层厚度达 10 余米,强风化层厚度达 1.5~3 m,较易被水溶解。测试数据表明,来自盆地西部大兴安岭岩石的含氟量范围值为 267~4404 mg/kg。在风化作用的影响下,岩石中的氟大量释放,再经流水搬运进入平原区富集。由于表层土中氟离子含量较高,在降水的淋滤、溶解作用下,土壤中的氟溶于地下水中,亦成为地下水,尤其是潜水中氟的直接来源。不同土壤中水溶氟含量不同,一般颗粒细、比表面积大的土壤氟含量高。研究区土壤中氟含量均值为 476.4 mg/kg,已超过中国土壤均值(440 mg/kg),是世界土壤均值(200 mg/kg)的 2.4 倍。高氟水样点主要分布在碱土、淡黑钙土以及风沙土这 3 种类型的土壤中,随着土壤中氟含量的增加,地下水中氟含量呈现增加的趋势。

6.3 气象与水文

高氟水主要分布于蒸发量大于降雨量的干旱和半干旱气候区,属于蒸发浓缩富集型高氟区。在蒸发浓缩作用和长期的水文地球化学作用下,内陆水系的地表水体和地下水的氟含量往往较高。发源于大兴安岭并注入本区的霍林河是运输大兴安岭含氟岩石,并释放氟的主要载体。霍林河在进入吉林省通榆县境后变为盲尾河,形成散流,所运载的氟全部汇集于松嫩平原的西南部,部分进入内陆湖泊,部分富集于土壤中。研究区主要湖泊氟含量背景值见表 3。地表水借助水体周边粘土的毛细作用将氟迁移至湖泡边的地形高处富集,由于包气带土壤氟含量的增高,随着降水的淋滤渗入使氟溶解进入地下水而形成高氟地下水。

表 3 吉林西部主要湖泊氟含量背景值(mg/L)

Table 3 Background values of the main lakes in western Jilin Province

湖泊	查干泡	月亮泡	花敖泡	大布苏泡	十三泡
F^-	7.49	5.75	12.20	9.20	1.05

6.4 水文地质和水化学条件

本区地下水中氟的迁移、富集是以地质构造作用的沉降运动为基础的,高氟地下水几乎均分布于沉降幅度最大的冲湖积平原的中部。该区地下水的水力坡度小,地下水径流滞缓,利于元素的富集。浅层水在蒸发浓缩作用和地下水对土壤、松散沉积物及围岩淋溶作用下形成了高氟地下水,而深层水在滞缓水运动条件下,通过氟自身的富集,以及地下水在对含水层氟的溶解和对吸附于含水介质的氟的解吸过程中形成高氟水。

本区下更新统承压水中氟含量分布特征明显地受径流环境所控制,即地下水系统的环境越不利于径流,其迁移系数就越小,地下水中含氟量就越大。区内地下水在洮南以西的车力—复兴—鸿兴一带,受大布苏隆起、西瓦计隆起所阻,地下水径流处于弱径流、滞缓径流状态,地下水的迁移系数变小,含氟量相应地增加,为高氟水区。

地下水中常量组分的含量和性质可以影响氟的水文地球化学行为。常量组分离子浓度的变化,可产生同离子效应,使氟的浓度发生变化。利用统计学软

件 SPSS 分析了 F^-与 HCO_3^-、Ca^{2+}的相关性[5],相关系数分别为 0.907 和−0.659，表明氟离子与重碳酸根呈显著正相关关系,而与钙离子呈负相关关系。但这仅是单纯从统计学角度进行的分析，据笔者进一步研究后发现，当氟离子浓度小于 2.0 mg/L 时,F^-与 Ca^{2+}的含量不存在相关关系，此时地下水与萤石未达成溶解平衡，钙离子浓度在一定范围内的增减对萤石的溶解未起到同离子效应的抑制作用；当氟离子浓度介于 4.0~12.0 mg/L 时,F^-与 Ca^{2+}的含量存在负相关关系,与萤石的溶解平衡相一致,由于地下水体系中萤石达到饱和状态，溶解度受控于体系的氟离子和钙离子浓度，显示了氟和钙相互抑制的同离子效应;当氟离子浓度特高时,如高于 12.0 mg/L,随着 F^-含量的增长,Ca^{2+}含量并没有继续明显减少,而是维持在一定浓度，这是由于随着 Ca^{2+}浓度在低水平上继续下降,萤石的溶解度迅速增加(图 4)。

6.5 人为因素

人类活动形成高氟地下水的途径有两个：一是人为污染形成污染型高氟水，二是人类开采地下水时破坏含水层结构而改变氟的迁移途经，导致高氟含水层的水进入低氟含水层,使其氟含量增加[6-9]。该区无大的工矿企业,也少有含氟农药的施放,即高氟地下水可排除工业污染所致。近年来,在局部地区的第四系承压水和古近—新近系承压水呈现氟含量增高的趋势,其原因是由于成井工艺粗糙,人们在防氟打深井的同时也破坏了含水层的结构，导致浅层高氟水下渗到深层。

7 结 语

受气候和地质等因素的控制，中国在干旱和半干旱区广泛分布高氟地下水，并伴有因饮用高氟水导致的地方性氟中毒流行，松嫩平原是东北地区典型的高氟地下水分布区和地氟病的流行区。地氟病的流行既影响当地居民的身心健康，又严重制约地方经济的发展。

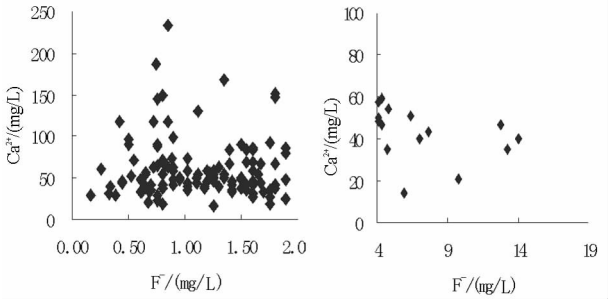

图 4 氟离子含量与钙离子含量的散点关系图

Fig.4 Scatter diagram of F^- and Ca^{2+} content

松嫩平原为一巨大的断陷盆地，沉积了巨厚的古近—新近系和第四系沉积物，构成了由潜水和承压水组成的大型蓄水构造。高氟水的形成与气候、水文、地质构造、岩石与土壤、水文地质和水化学条件等自然因素有关，同时也与不合理开采地下水等人为因素有关。地下水中氟含量在地质、地貌、水文地质条件控制下,在蒸发浓缩、淋溶、解吸等作用下,从平原周边到中心，从浅层水到深部承压水呈现由低到高的分布规律。在松嫩平原氟中毒流行区,启动安全改水工程，将高氟潜水和第四系承压水改为古近—新近系低氟承压水是防治地方性氟中毒的重要措施,同时在地下水开发过程中,要注意对古近—新近系承压水的保护，以确保区域优质地下水不被污染和可持续利用。

参考文献(References)：

[1] 周福俊. 松嫩平原中部地区地下水化学研究[M]. 长春:吉林大学出版社, 1994:68-90.
Zhou Fujun. The Study of Groundwater Chemisrty in the Middle Part of Songnen Plain [M]. Changchun:Jilin University Publishing House,1994:68-90(in Chinese).

[2] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):20-28.
Zhang Guangxin, Deng Wei, He Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):20-28 (in Chinese with English acstract).

[3] 林年丰. 医学环境地球化学 [M]. 长春：吉林科学技术出版社, 1991:177-184.
Lin Nianfeng. Medical Environmental Geochemistry [M]. Changchun:Jilin Technology and Science Publishing House, 1991:177-184(in Chinese).

[4] 苑丽华. 松嫩平原地下水化学特征 [J]. 地质与资源, 2006, 15(2):122-124.
Yuan Lihua. Hydrochemistry of the groundwater in Songnen Plain [J]. Geology and Resourse, 2006,15 (2):122-124 (in Chinese with English abstract).

[5] 王政权. 地统计学在生态学中的应用 [M]. 北京：科学出版社, 1999.
Wang Zhengquan. The Application of Geostatistics in Ecology[M]. Beijing：Science Press, 1999(in Chinese with English acstract).

[6] 赵新民. 吉林省通榆、乾安县承压地下水氟污染的原因及其防治

对策[J]. 吉林地质, 2000, 19(4):47-50.
Zhao Xinmin. The cause of Tongyu-Qianan, Jilin Province confined groundwater fluorine pollution and control countermeasure [J]. Jilin Geology, 2000, 19(4):47-50.
[7] 许宏伟, 梁宝成, 唐红艳, 等. 通榆县地方性氟中毒重点病区调查结果分析[J]. 中国地方病防治杂志. 2005, 20(5):311-313.
Xu Hongwei, Liang Baocheng, Tang Hongyan, et al. The outcome analysis of Fluoride in Tongyu Conty[J]. China J Ctrl. Endem. Dis., 2005, 20(5):311-313(in Chinese with English acstract).
[8] Dhiman S D, Keshari K. Hydrogeochemical evaluation of high-fluoride groundwaters:a case study from Mehsana District, Gujarat, India[J]. Hydrological Sciences, 2006, 51(6):1149-1162.
[9] Jacks G, Bhattacharya P, Chaudhary V, et al. Controls on the genesis of some high-fluoride groundwater in India [J]. Appl. Geochem., 2005, 20:221-228.

The distribution regularity and causes of fluoride in groundwater of the fluorosis area, Songnen plain

TANG Jie, BIAN Jian-min, LI Zhao-yang, BING Zhi-wu,
ZHA En-shuang, WANG Chen-ye, MAO Zi-long

(*College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun* 130026, *Jilin, China*)

Abstract: Since Mesozoic-Cenozoic, great thickness of Tertiary and Quaternary sediments has been deposited in Songnen fault basin, which has constituted the foundation of water storage structure for the phreatic and confined water. There exists high fluoride in the phreatic and Quaternary confined water, with the fluoride in 194 samples ranging from 0.25 to 14 mg/L (3.45mg/L on average). Large-scale prevalence of fluorosis has resulted from the drinking of high fluoride water. The researches conducted by the authors show that high fluoride groundwater is mainly distributed in the piedmont area, the evaporation discharge zone and the transitional zone in the middle of Songnen basin, where evaporation is strong. In this area, the groundwater hydrochemistry is of HCO_3-Na · Mg and HCO_3-Cl · Na types, and the total dissolved solid is about 689.84-2005.6 mg/L. The formation of high fluoride water is related to climate, hydrology, geological structure, rock and soil, geological and hydrological conditions of water chemistry and other natural factors, and is also affected by human activity factors such as the irrational exploitation of groundwater. The research on the groundwater environmental characteristics and causes of high fluoride is very important for the effective implementation of safe water supply.

Key words: Songnen plain; fluorosis; hydrogeochemical feature; enrichment; cause analysis

---

About the first author: Tang Jie, female, born in 1957, professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of environment and health, environmental system and information management; E-mail: tangjie@jlu.edu.cn.