

鲁西南地区高氟地下水特征及成因探讨

鲁孟胜^{1,2} 韩宝平³ 武凡⁴ 孙德全² 张兆民²

(1.中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116; 2.山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东泰安 271000;
3.徐州工程学院, 江苏徐州 221008; 4.山东省煤田地质局, 山东泰安 271000)

摘要:在鲁西南地区,由于饮用高氟地下水而导致的地氟病,严重影响了当地群众的身心健康。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。水化学测试结果表明,氟含量为0.05~6.7 mg/L,平均1.20 mg/L,高氟分布区主要集中在嘉祥黄河冲洪积平原与山前冲洪积平原交接部位和曹县、单县、菏泽黄河冲洪积平原河间洼地;地下水中氟含量与pH、矿化度之间的相关性不明显、与 K^+Na^+ 和 Ca^{2+} 相对含量分别呈正相关和负相关关系、与 Ca^{2+} 含量相关性显著。本文从地质环境、水文地质环境、水文地球化学角度探讨了浅层高氟地下水的水文地球化学成因,研究了黄泛平原高氟地下水的形成机理,对于确定地氟病的成因及制定地氟病的防治措施,寻找适用饮用的低氟地下水,具有重要的理论和现实意义。

关键词:高氟地下水;地方病;水文地球化学成因;鲁西南

中图分类号:P592 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0294-09

中国分布范围广、危害大的地方病病种主要有地方性氟中毒病、地方性砷中毒、地方性甲状腺肿大、大骨节病和克山病等。这些地方病大多与人类居住环境水土中人体所需元素含量的不足和过量有关,地方性砷中毒和地方性氟中毒是两类最为典型的地方病。高氟地下水是广泛分布于中国北方干旱半干旱地区的一种劣质水源,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^[1-9],在南方地区主要表现为污染食物型和燃煤型地方性氟中毒^[10-11]。

鲁西南地区位于山东省西南部,水系属于淮河流域,主要包括枣庄市、济宁市和菏泽市,是山东省重要的农业经济区和能源基地,国家重点水利建设工程“南水北调东线工程”从东部穿过。地方性氟中毒病在鲁西南地区分布较广,部分地区发病率较高,对居民身心健康和区域经济社会发展造成危害。1978—1980年,全省以氟斑牙为线索,系统地

进行了饮水含氟量测定和定量流行病学调查,基本查清了山东省地方性氟中毒的病区分布和流行情况。2001年以来,山东省国土资源厅安排多个地勘基金项目,对鲁西南地区高氟地下水进行调查,并开展了供水安全示范工程,多个单位和专家学者在鲁西南地区开展了高氟地下水和降氟改水研究工作,取得了丰硕的研究成果^[12-15]。

开发利用适宜饮用地下水是保障病区群众饮水安全高效、经济的途径和手段,通过对鲁西南地区浅层地下水的水文地球化学环境研究,从地质环境、水文地质环境、水文地球化学角度探讨浅层高氟地下水中氟的环境水文地球化学环境,揭示地下水中氟元素的富集成因和地氟病的致病机理。这对于确定地氟病的成因及制定地氟病的防治措施,寻找适用饮用的低氟地下水,改善和提高地氟病区群众的生活质量,无疑具有重要的理论和现实意义。

收稿日期:2013-03-08;改回日期:2013-11-29

基金项目:山东省国土资源厅2006年度资源补偿费项目([2007]86号)资助。

作者简介:鲁孟胜,男,1968年生,工程技术应用研究员,主要从事水文地质、环境地质研究工作;Email:talums@163.com。

受自然地理环境的影响,鲁西南地区地下水中氟含量较高(最高可达16.40 mg/L)。京杭运河以西地区地下水中氟含量一般为2~4 mg/L,以东地区地下水中氟含量一般为1~2 mg/L^①。地氟病分布范围广、病情严重,本区共有2 818个村庄、1 998 753人受地氟病威胁(表1),其中轻病区1792个村庄、1 233 038人,中病区828个村庄、609 970人,重病区198个村庄、145 745人,轻、中、重病区人口占受地氟病威胁人口的比例分别是61.69%, 30.52%, 7.29%^②。

1 自然地理环境

1.1 地形地貌

鲁西南地区在地貌上处于黄河扇形平原与鲁中南中低山丘陵区西侧的山前冲洪积平原的接合地带,东南部自北向南发育南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖,统称为南四湖。东部多山,地势高亢,海拔一般为80~648 m,凤凰山为研究区最高点,山前冲积平原由东向西倾斜,与湖洼地交接,以西局部凸起,残丘出露,丘下地势平坦;湖西黄泛平原海拔40~60 m,由西向东微斜。地貌以平原、洼地为主,其次为湖泊、山地和丘陵。

1.2 水文

汇入南四湖的大小河流有53条,其中流域面积超过1 000 km²的有白马河、泗河、东鱼河、洙赵新河等9条。上级湖入湖河流共有30条(包括上述9条大河),下级湖入湖河流有沿河、鹿口河、郑集河和

新薛河等23条。

1.3 气候

研究区属暖温带、半湿润季风区大陆性气候,多年平均降水量695.2 mm,降水量的年际变化大,汛期6—9月份降水量占年降水量的70%左右。多年平均水面蒸发量约1000 mm,陆面蒸发量500~650 mm。

2 地质及水文地质条件

2.1 地质概况

鲁西南地区属华北平原沉降带东南部的鲁西南拗陷区与鲁中隆起区西缘交合地带^[16-18]。受基底发育的活动断裂影响,自西向东形成东明凹陷、菏泽凸起、巨野凹陷、嘉祥凸起、济宁凹陷、兖州凸起等六级构造单元(图1)。这种隆起带、沉降带、凹陷及凸起的构造单元,构成了氟元素淋溶、迁移和富集的环境格局。研究区地层自下而上依次为:太古宇泰山群、新元古界土门群、古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、中生界侏罗系、新生界古近—新近系、第四系。

太古宇泰山群(Art):分布于东部蒙阴、沂水、平邑、枣庄等中低山区,由老而新分为万山庄组(Artw)、太平顶组(Artt)、雁翎关组(Artv)和山草峪组(Artv)。主要由片麻岩类、角闪岩类片岩、变粒岩及混合岩等深变质岩系组成,总厚达12 000 m以上。其时代大约早于20亿年,与上覆震旦系亚界土门群呈不整合接触。

第四系(Q):广布于全区,主要为冲积、洪积层,各地岩性、厚度变化较大,总体呈东北薄、西南厚,厚0~350 m。岩性主要为黄褐、棕、灰等杂色粘土、粘土质砂、砂砾石层等。

2.2 水文地质条件

研究区以峰山断裂为界分为东、西两个不同的水文地质单元。西区为一由东向西倾伏的新生代断陷带,新生界地层厚0~1200 m,广布全区。仅局部地段单斜断块凸起,古生界寒武、奥陶系地层出露,形成基岩地下水的直接补给区;东区以低山丘陵地貌为主,以剥蚀的山脊线为界形成分水岭(图2)。湖东山前倾斜平原,分布于京杭运河以

表1 地氟病区受害人口及地下水氟含量统计
Table 1 victims of fluorosis and fluorine content of groundwater table

病区	轻病区 /万人	中病区 /万人	重病区 /万人	合计 /万人	地下水氟 含量/(mg/L)
菏泽	33.40	21.60	4.66	59.66	1.20~8.00
济宁	82.32	34.67	8.38	125.38	1.04~16.40
枣庄	2.46	2.04	1.54	6.04	1.10~9.40
泰安	5.12	2.69		7.81	1.05~3.20
总计	123.30	61	14.58	198.88	1.04~16.40

①鲁孟胜. 鲁西南浅层高氟地下水环境水文地球化学研究[D]. 中国矿业大学, 2003.

②鲁孟胜, 李明建, 吴恩江, 等. 南四湖流域环境地质调查与评价[R]. 山东煤炭地质工程勘察研究院, 2002.



图1 鲁西南地区地形地貌及地质构造图

Fig.1 Topography and geological structure in southwest Shandong Province

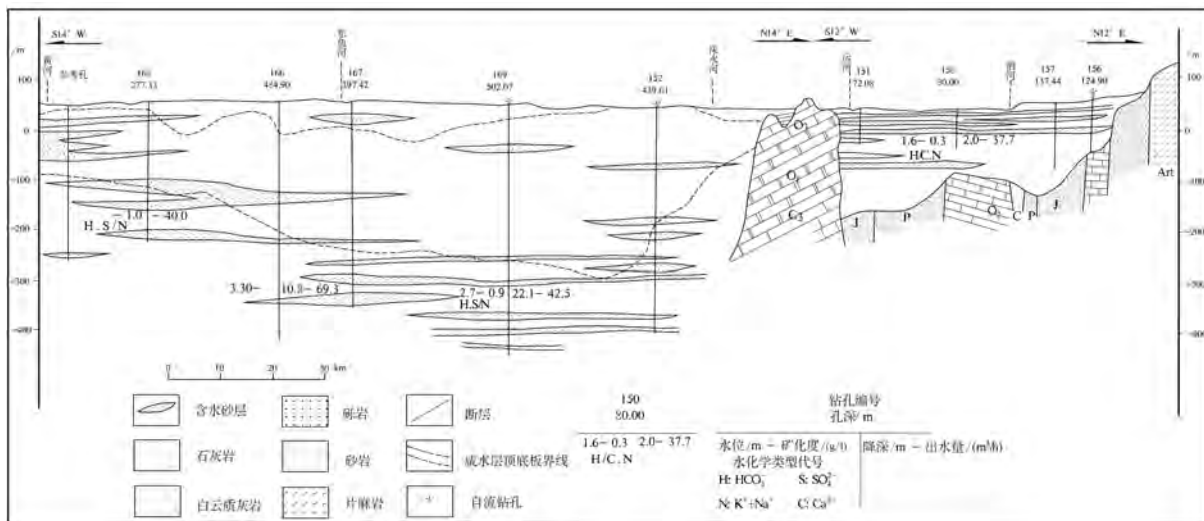


图2 兖州—菏泽山前及黄河冲积平原水文地质剖面图

Fig.2 Hydrogeological sectional drawing for piedmont and Yellow River flood plain in Yanzhou-Heze area

东,包括汶河、泗河冲洪积平原和滕西冲积平原。含水层岩性以中粗砂、砾石为主,次为中细砂和粉砂,含水砂层分布连续而稳定,富水性强,矿化度 $<1\text{ g/L}$,属重碳酸盐或重碳酸盐氯化物型水。山前平原松散岩类孔隙水接受大气降水和上游侧向径流补给,排泄方式为蒸发、农灌开采和补给河湖水。湖西黄河冲积平原浅层含水层由于受古河道控制,呈条带状展布。自古河道中心线向边缘及河间地带,砂层渐薄,颗粒渐细,富水性渐弱。湖西平原自北向南发育3条与现代黄河大致平行的古河道带:东明—鄄城古河道带,菏泽—郓城古河道带,曹县—黄岗集古河道带,均为浅层地下水富水性较好的地段。矿化度 $1\sim 2\text{ g/L}$,部分 $<1\text{ g/L}$,水化学类型为重碳酸盐或重碳酸盐氯化物型。浅层孔隙水以垂直交替为主,接受大气降水和地表水补给,以蒸发和开采形式排泄。

湖东山前冲洪积平原的地下水自东向西运移,湖西黄河冲积平原地下水由西向东缓慢运移,两部分的地下水均向京杭大运河—南四湖—一线地势低洼处汇集,是鲁西南平原地下水动力场的重要特征。

东部中低山丘陵区,水化学特征基本一致。丘陵山区,岩石裂隙、岩溶发育,地下水径流、排泄条件良好,淋滤作用强烈,为单一的低矿化重碳酸盐型水,矿化度 $<0.5\text{ g/L}$ 。在河谷盆地石炭、二叠系煤系地层区,地形平缓,地下水运动缓慢,水中盐分容易积累,硫酸根离子含量增多,出现硫酸盐重碳酸盐型水。阳离子含量在各种不同岩石分布区有所不同,变质岩地区以钙、钠离子为主;石灰岩地区以钙离子为主;白云质灰岩地区以钙、镁离子为主。

前倾斜平原近山麓地带,含水层以砂砾石为主,颗粒粗,地形坡度大,地下水不仅可得到大气降水的垂直入渗补给,还有山区的侧向补给,径流条件好,为单一的重碳酸盐型水。远离山前地带特别是在与黄泛平原交接地区,含水层颗粒变细,地形坡度减缓,硫酸根离子含量增加,部分地区出现硫酸盐型水,矿化度随之增高到 $1\sim 2\text{ g/L}$ 。

西部平原地区黄河沿线为重碳酸盐型水,自西南向东北,为重碳酸硫酸盐型或重碳酸氯化物型水—重碳酸盐型水—重碳酸硫酸盐型或重碳酸氯化物型水,曹县、巨野等局部地区出现硫酸重碳酸盐型或硫酸盐氯化物型水。

3 采样地点、采样方法及分析方法

本次共采集浅层地下水水样232件进行简分析,收集、利用了125件水化学分析资料。采样地点主要分布于曹县、成武、单县、金乡、嘉祥、巨野、鄄城、汶上、兖州、邹城等地氟病高发区,收集的水化学资料主要也分布于上述地区。取样时,先用待取水样将水样瓶涮洗2~3次,再将水采集于采样瓶中,所采集的水样不得受到任何污染。采集的每个样品,均应在现场立即用石蜡封好瓶口,并贴上标签。标签上应注明样品编号、采样日期、水源种类、岩性、浊度、水温、气温。如加有保护剂,则应注明加入的保护剂名称及用量和测定要求等。水化学分析方法见表2,其中氟离子测试下限为 0.05 mg/L 。

4 高氟地下水特征

浅层地下水水化学类型比较复杂,357个水样分属8种不同的水化学类型,分别为 $\text{HCO}_3^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^- - \text{Mg}^{2+}$,以 $\text{HCO}_3^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型的重碳酸盐型为主,比例高达82%。全硬度为 $55.27\sim 2791.70\text{ mg/L}$,平均 591.94 mg/L ;pH为 $6.8\sim 9.1$,平均 7.6 ;碱度为 $35.39\sim 1122.80\text{ mg/L}$,平均 564.80 mg/L ;矿化度为 $102.50\sim 6156.54\text{ mg/L}$,平均 1213.70 mg/L 。阴、阳离子分别以 HCO_3^- 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为主。

表2 水化学分析依据方法

Table 2 water chemistry analysis based method

分析项目	使用方法
氯离子	硝酸银滴定法 ^a
氟离子	离子选择电极法 ^b
钙离子	EDTA络合滴定法
总硬度	EDTA络合滴定法
镁离子	EDTA络合滴定法
硫酸根离子	硫酸钡重量法
总碱度	酸滴定法
碳酸氢根、碳酸根	酸滴定法
总固体	质量法 ^c
pH	指示剂比色法 ^d

注:测量范围:a— $5\sim 400\text{ mg/L}$,稀释水样可扩大测定范围;
b— $0.05\sim 2.5\text{ mg/L}$,稀释水样可扩大测定范围;c— 200 mg/L 以上;d— $0\sim 14$ 。

F含量 >2.0 mg/L的水点主要集聚在 HCO_3^- - Na^+ 或 HCO_3^- - Mg^{2+} 水型中。由 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ 当量相关性图可见, $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 大多数点都在等当量直线以下(图3),说明 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 含量较低是浅层地下水中F富集的主要影响因素。

浅层地下水pH为6.8~8.2,低氟地下水的pH <7.8 ,大多数F含量 >1.0 mg/L的水点集聚在7.3 $<$ pH <7.7 的区间,F含量与pH无明显的相关关系。矿化度大部分 <2500 mg/L,矿化度 <2500 mg/L的水点F含量与矿化度之间无相关关系,在 >2500 mg/L的水点中,F含量与矿化度呈明显的负相关关系。

F含量分布区间随水化学类型不同而有所变化, Cl^- - K^+ - Na^+ 型水F含量变化于0.05~3 mg/L; HCO_3^- - Ca^{2+} 、 HCO_3^- - K^+ - Na^+ 、 HCO_3^- - Mg^{2+} 是本区浅层地下水的主要水化学类型,三者中又以 HCO_3^- - K^+ - Na^+ 型水为主。 HCO_3^- - Ca^{2+} 型水F含量变化于0.05~7 mg/L,主要集中在 <1.0 mg/L的区间内,而 HCO_3^- - K^+ - Na^+ 型水F含量变化于0.05~6 mg/L,大部分点集中于1~4 mg/L, HCO_3^- - Mg^{2+} 型水F含量变化于0.05~4 mg/L, >1.0 mg/L的点比较多; SO_4^{2-} - K^+ - Na^+ 型水F含量变化于0.05~3 mg/L,绝大多数点集中于 >1.0 mg/L的区间。

水质分析结果表明,浅层地下水 K^+ - Na^+ 含量介于0~1400 mg/L,大多数点含量 <800 mg/L; Ca^{2+} 含量介于0~450 mg/L,大多数点 <300 mg/L; Mg^{2+} 含量介

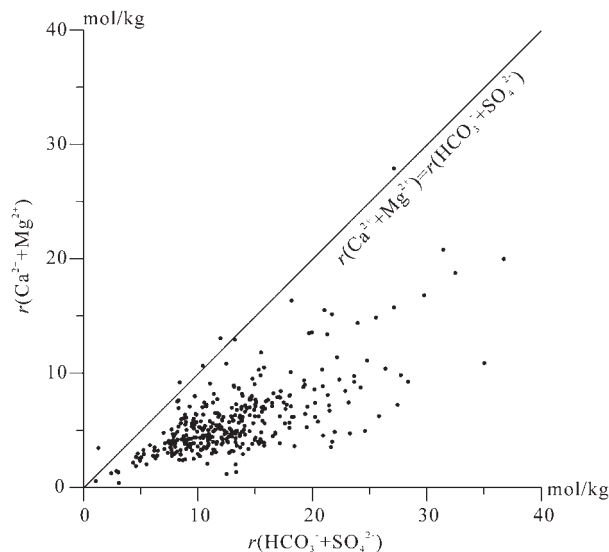


图3 $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 散点图

Fig.3 Scatter diagram of $r(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ and $r(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ in water samples

于0~400 mg/L,大多数点 <200 mg/L; Cl^- 含量一般 <1200 mg/L,以分布于0~500 mg/L区间为主; SO_4^{2-} 含量最高可达2200 mg/L,多集中在0~1200 mg/L; HCO_3^- 含量分布范围比较大,集中分布于200~1200 mg/L(图4)。

5 氟的地球化学来源

区域地质条件是高氟地下水形成的环境背景。其中地质构造作为区域地层分布和地貌基本形态的控制因素,在大的轮廓上决定了氟元素的地球化学作用过程以及氟元素迁移载体——水运动的特征^[19-20]。

富氟岩层的存在是高氟地下水形成的物源和地质基础。自然界中氟元素主要来自岩浆,氟元素随岩浆活动或形成矿物,或转入地表直接参加到氟的地表循环中。土壤中的氟主要来自岩石,岩石氟是形成土壤氟的母体和物质基础。

研究区东侧为鲁中南中低山丘陵区,主要由花岗岩、变质岩、碳酸盐岩等组成,为西部山前冲洪积平原的蚀源区,氟元素含量明显偏高,最高可达906 mg/kg,是东部高氟的地球化学区,可为湖东地下水提供丰富而稳定的氟源。

氟的含量由前寒武系到下部古生界逐渐降低,再到上部古生界和中生界又复而升高,至新生界的第四系亚粘土中达到最高值。

第四系土壤中高含量氟的形成,无疑取决于沉积物源和多次黄泛冲积物的堆积对氟的叠加富集作用。从地形地貌上分析,湖东地形东高西低,水系由东向西流;湖西西高东低,水系由西向东流。因此该区沉积物的物源应主要来自东北部泰山和沂蒙隆起区,及黄河近代冲积物^[21]。如前所述,泰沂地区太古宇和元古宇的变质岩和混合花岗岩类有异常高的氟含量,这就不难理解其风化形成的土壤氟的高含量。此外,本区经受多次黄河泛滥,泛滥淤泥(通过粘土矿物对氟的吸附作用)多次堆积造成氟的叠加富集。徐州丰沛地区黄泛沉积物中F含量范围5.59~31.66 mg/kg,平均值为11.72 mg/kg,其含量随地层深度增加明显降低^[22]。

6 高氟地下水成因模式

鲁西南地区高氟地下水是在特定的自然地理

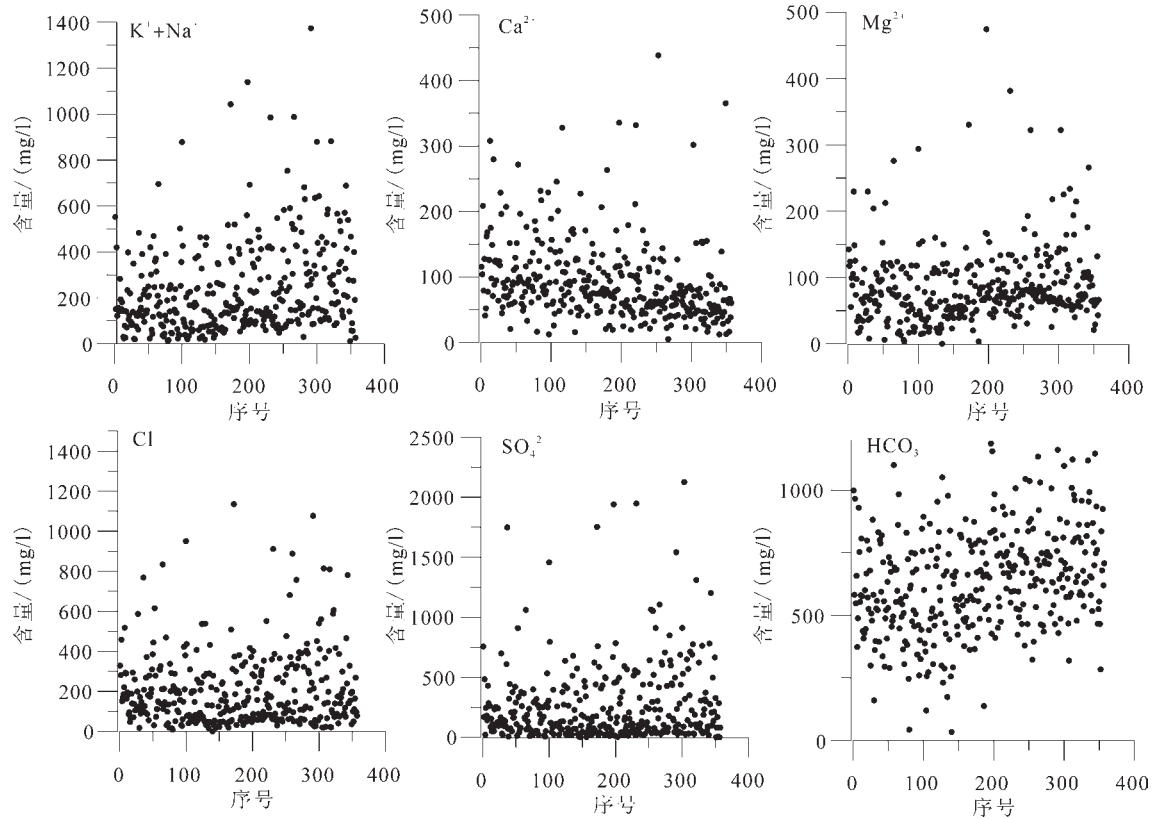


图4 主要阴阳离子含量分布图

Fig.4 Diagram of main cation and anion content in water samples

环境下,由各要素联合作用的结果,高氟地下水的成因机制见图5。湖东泰沂隆起区出露的岩浆岩和各类变质岩提供了丰富的氟源,由山前冲洪积作用形成的中粗砂及粗砂含砾组成的含水层氟矿物以角闪石、云母、磷灰石为主,处于地下水积极交替带,垂向入渗和侧向补给条件好,岩石中的氟通过表面扩散的反应动力学机制向地下水中传递,氟元素通过对氟矿物的溶解和溶滤进入地下水中。氟在地下水中的集聚程度取决于氟矿物的化学组成、性质及其集中分散特点,氟矿物的风化、淋溶程度以及水溶液的介质性质。由湖积、冲积作用形成的中细砂组成的含水层,氟矿物中云母含量增多,河道发育带广泛分布的浅层水含水层的垂向入渗条件好,侧向补给条件变差,上覆包气带细粒土体中的吸附性氟对水中氟的集聚具有重要影响。由黄河冲洪积、湖积作用形成的粘土、亚粘土和粉细砂为主组成含水层,氟矿物以云母为主,粘性土中有大量吸附性氟,垂向与侧向补给甚差,地下水交替

滞缓,氟在水中的集聚作用以蒸发浓缩为主,界面化学作用加强,有利于氟元素富集的水化学类型得到加强。

湖西黄河冲洪积平原浅层地下水含水层以粘土、亚粘土为主,氟含量较高,浅层地下水自西向东缓慢径流,在淋滤作用和强烈的蒸发作用影响下,氟元素在扇间、河间洼地等低平处集聚,形成浅层高氟地下水分布区(图5)。

7 结论

鲁西南地区的自然环境、气象气候和水文地质条件的复杂多变,是导致区域地下水中氟离子富集的多样性的主要影响因素。高氟地下水分布区域主要集中在嘉祥黄河冲洪积平原与山前冲洪积平原交接部位和曹县、单县、菏泽黄河冲洪积平原河间洼地。湖东隆起区岩浆岩和各类变质岩、湖西多次黄泛冲积物是高氟地下水成因的物源基础。在地质、地形地貌、水文地质条件控制下,在蒸发浓

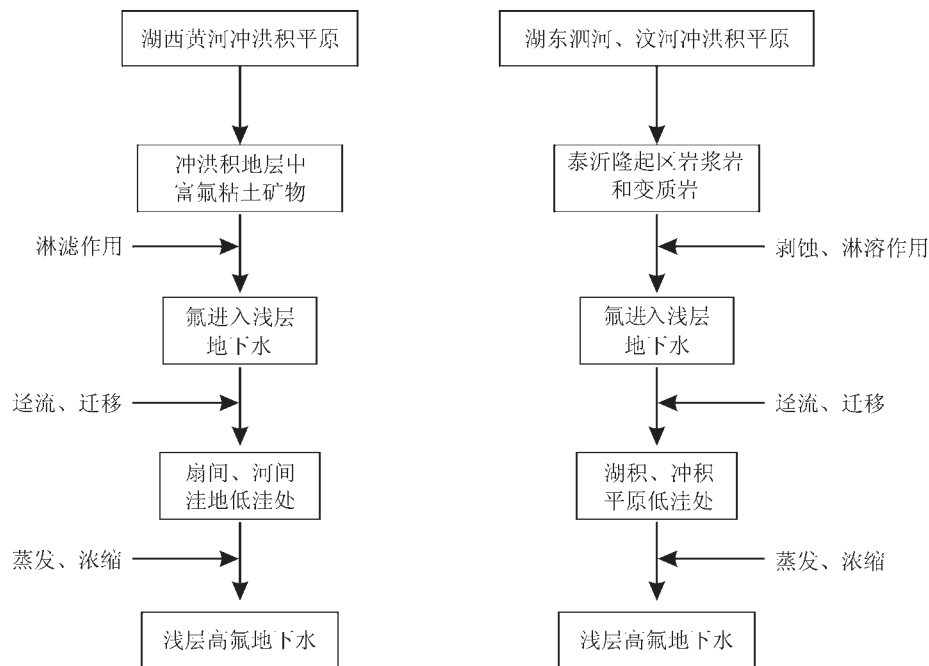


图5 鲁西南地区浅层高氟地下水形成机理

Fig.5 Mechanism for the formation of the high fluorine shallow-bed groundwater in southwestern Shandong province

缩、淋溶、解吸等作用下,土壤经天然水淋滤和地下水的浸取作用,将水溶态氟转入地下水,并在构造凹陷区或河间洼地区聚集形成高氟水区。

参考文献(References):

- [1] 杨忠芳,朱立,陈岳龙. 现代环境地球化学[M]. 北京:地质出版社,1999:1-453.
Yang Zhongfang, Zhu Li, Chen Yuelong. Geochemistry of Modern Environments[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-453 (in Chinese with English abstract).
- [2] 沈照理,郭华明,徐刚,等. 地下水化学异常与地方病[J]. 自然杂志,2010,32(2):83-89.
Shen Zhaoli, Guo Huaming, Xu Gang, et al. Abnormal groundwater chemistry and endemic disease[J]. Chinese Journal of Nature, 32(2): 83-89(in Chinese with English abstract).
- [3] 张福存,文东光,郭建强,等. 中国主要地方病区地质环境研究进展与展望[J]. 中国地质,2010,37(3):551-562.
Zhang Fucun, Wen Dongguang, Guo Jianqiang, et al. Research progress and prospect of geological environment in Nain endemic disease area[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 551-562(in Chinese with English abstract).
- [4] 何锦,张福存,韩双宝,等. 中国北方高氟地下水分布特征及成因分析[J]. 中国地质,2010,37(3):621-626.
He Jin, Zhang Fucun, Han Shuangbao, et al. The distribution and

genetic types of high-fluoride groundwater in northern China[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 621-626(in Chinese with English abstract).

- [5] 蔡贺,王长琪,张梅佳,等. 中国东北饮水型地方性氟中毒的地质环境特征及防治[J]. 中国地质,2010,37(3):645-650.
Cai He, Wang Changqi, Zhang Meijia, et al. Geological environment characteristics of potable water endemic fluorosis areas in in northeast China and the prevention and control measures[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 645-650(in Chinese with English abstract).
- [6] 李旭光,王长琪,郭长来,等. 呼伦贝尔高原地下水氟分布特征及其开发利用建议[J]. 中国地质,2010,37(3):665-671.
Li Xuguang, Wang Changqi, Guo Changlai, et al. Fluorine distribution characteristics of groundwater in Hulun Buir plateau and some suggestions for groundwater exploitation and application[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 665-671(in Chinese with English abstract).
- [7] 曹玉和,齐佳伟,熊绍礼. 吉林省氟中毒病区水文地质特征及防氟改水对策[J]. 中国地质,2010,37(3):691-695.
Cao Yuhe, Qi Jiawei, Xiong Shaoli, et al. Hydrogeological characteristics of endemic fluorine disease areas of Jilin Provie and water source project countermeasures for fluorine prevention[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 691-695(in Chinese with English abstract).
- [8] 汤洁,卞建民,李昭阳,等. 松嫩平原氟中毒区地下水氟分布规律

- 和成因研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 614-620.
- Tang Jie, Bian Jianmin, Li Zhaoyang, et al. The distribution regularity and causes of fluorine in groundwater of the fluorosis area, Songnen plain[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 614-620(in Chinese with English abstract).
- [9] 张红梅. 运城盆地土壤中氟运移规律动态试验研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 686-689.
- Zhang Hongmei. A dynamic experimental study of the fluorine transport regularity in soil of Yuncheng Basin[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 686-689(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘红樱, 赖启宏, 陈国光, 等. 珠江三角洲地区土壤F分布及其与地氟病关系初探[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 657-664.
- Liu Hongying, Lai Qihong, Chen Guoguang, et al. Distribution characteristics of fluorine in soils of Zhujiang river delta in relation to endemic fluorosis[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 657-664(in Chinese with English abstract).
- [11] 谢兴能, 杨秀忠, 杨胜元, 等. 贵州地氟病氟源探讨——以黔中地氟病区地质环境调查为例[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 698-703.
- Xie Xingneng, Yang Xiuzhong, Yang Shengyuan, et al. A tentative discussion on the source of endemic fluorosis: Geo-environmental evidence from three counties in Guizhou Province[J]. Geology in China, 2010, 31(1): 698-703(in Chinese with English abstract).
- [12] 龚建师, 叶念军, 葛伟亚, 等. 淮河流域地氟病环境水文地质因素及防病方向的研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 633-639.
- Gong Jianshi, Ye Nianjun, Ge Weiye, et al. The relationship between fluorine in geological environment and endemic fluorosis in Huaihe River basin[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 633-639 (in Chinese with English abstract).
- [13] 庞绪贵, 高宗军, 边建朝, 等. 山东省黄河下游流域地方病与生态地球化学环境相关性研究[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 824-830.
- Pang Xugui, Gao Zongjun, Bi Jianchao, et al. The correlation between endemic disease and eco-geochemical environment in the lower Yellow River basin, Shandong Province[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 824-830(in Chinese with English abstract).
- [14] 高宗军, 庞绪贵, 王敏, 等. 山东省黄河下游部分县市地方病与地质环境的关系[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 627-632.
- Gao Zongjun, Pang Xugui, Wang Min, et al. The relationship between endemic disease and geological environment of several cities in the lower Yellow River basin of Shandong Province[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 627-632(in Chinese with English abstract).
- [15] 鲁孟胜, 吴恩江, 李明建. 鲁西南浅层高氟地下水成因的水文地球化学研究[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 76-80.
- Lu Mengsheng, Wu Enjiang, Li Mingjian. Study on the hydrochemistry genesis of high fluorine shallow-bed groundwater in southwestern Shandong Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5): 76-80(in Chinese with English abstract).
- [16] 牛树银, 胡华斌, 毛景文, 等. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 34-39.
- Niu Shuyin, Hu Huabin, Mao Jingwen, et al. Structure in western Shandong and its genetic mechanism[J]. Geology in China, 2010, 31(1): 34-39(in Chinese with English abstract).
- [17] 胡秋媛, 李理, 唐智博, 等. 鲁西隆起晚中生代以来伸展断裂特征及形成机制[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1233-1244.
- Hu Qiuyuan, Li Li, Tang Zhibo, et al. Characteristic and mechanism of late Mesozoic extensional faults in west Shandong uplift[J]. Geology in China, 2010, 31(1): 1233-1244(in Chinese with English abstract).
- [18] 姜慧超, 张勇, 任凤楼, 等. 济阳、临清及鲁西地区中新世构造演化对比分析[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 963-973.
- Jiang Huichao, Zhang Yong, Ren Fenglou, et al. Comparative analysis of Meso-Cenozoic tectonic evolutions of the Jiyang and Linqing depressions and Luxi area[J]. Geology in China, 2010, 31(1): 1233-1244(in Chinese with English abstract).
- [19] 郑明凯, 杨国洲, 朱利霞. 焦作市地下水高氟区的成因探讨[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(2): 138-141.
- Zheng Mingkai, Yang Guozhou, Zhu Lixia. Discussion on the origin cause of fluorine district of groundwater in Jiaozuo area[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(2): 138-141 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李随民, 栾文楼, 韩腾飞, 等. 冀中南平原区土壤氟元素来源分析[J]. 中国地质, 2010, 39(3): 794-803.
- Li Suimin, Luan Wenlou, Han Tengfei, et al. A source analysis of soil fluorine in central and southern Hebei plain[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 794-803(in Chinese with English abstract).
- [21] 张景荣, 朱法华, 陈汝秀, 等. 江苏丰沛铜地区高氟地下水成因探讨[J]. 高校地质学报, 1998, 4(2): 139-146.
- Zhang Jingrong, Zhu Fahua, Chen Ruxiu, et al. Inquiry on the genesis of groundwater with high fluoride in Fengxian Penxian Tongshan counties of Jiangsu[J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(2): 139-146(in Chinese with English abstract).
- [22] 袁训珂, 冯启言, 孟庆俊, 等. 黄泛沉积物中水溶性氟的垂向分布及水文地球化学特征[J]. 水科学及工程技术, 2008, 1: 66-68.
- Yuan Xunke, Feng Qiyang, Meng Qingjun, et al. Vertical distribution and hydrochemical characteristics of water-soluble fluorine in flooding sediment of Huanghe river[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008, 1: 66-68(in Chinese with English abstract).

Characteristics and genesis of high-fluorine groundwater in southwestern Shandong Province

LU Meng-sheng^{1,2}, HAN Bao-ping³, WU Fan⁴, SUN De-quan², ZHANG Zhao-min²

(1. School of Environment & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. Shandong Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Tai'an 271000, Shandong, China;

3. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;

4. Shandong Bureau of Coal Geology, Tai'an 271000, Shandong, China)

Abstract: In southwest Shandong Province, high fluorosis in drinking water caused by high fluoride groundwater seriously affects the health and well-being of local people. Fluorine concentration in groundwater is a very complex hydrological and geochemical process. Water chemical test results indicate that fluoride content is 0.05~6.7 mg/L, 1.20 mg/L on average, and high-fluorine areas are mainly distributed in the juncture between the Jiaxiang Yellow River alluvial-pluvial plain and piedmont alluvial-pluvial plain as well as the interstream depression of the Yellow River alluvial-pluvial plain in Caoxian County, Shanxian County and Heze. Fluorite content of the groundwater has no distinct relationship with pH and mineralization intensity but is positively and negatively correlated with relative values of K^+Na^+ and Ca^{2+} respectively and obviously correlated with Ca^{2+} content. The authors probed into the hydrogeochemical genetic mechanism of the shallow-layer high-fluorine groundwater in the aspects of geological environment, hydrogeological environment and hydrogeochemistry, and studied the formation mechanism of the high-fluorine groundwater in the plain formerly flooded by the Yellow River. The results obtained by the authors are of important theoretical and practical significance for determining the cause of the fluorine-related endemic diseases, formulating the measures for prevention and cure of such diseases, and finding low fluorine groundwater suitable for drinking.

Key words: high fluoride groundwater; endemic disease; hydrogeochemical genesis; southwestern Shandong Province

About the first author: LU Meng-sheng, male, born in 1968, senior researcher, mainly engages in the study of hydrogeology and environmental geology; E-mail: talums@163.com.