

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.06114

盐池北部高氟地下水的分布规律及其影响因素

徐永, 姜军, 孙芳强, 张乐中, 赵振宏

(中国地质调查局西安地质调查中心 干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 西安 710054)

摘要: 随着宁东能源化工基地的建设, 对能源基地后备区集中供水水源地地下水水质的研究显得极为迫切和必要。利用盐池县北部不同深度 86 件地下水样品氟含量测试结果, 探讨了高氟地下水的空间分布规律, 结合地形地貌、地层岩性、水文地质条件和水化学特征对高氟地下水分布的影响因素进行了分析。结果表明, 高氟地下水的平面分布受地形地貌控制, 即汇水洼地和基岩梁岗的地下水氟含量高, 风积沙带的氟含量低; 在垂向上, 受地下水循环更替速率影响, 第四系风积砂和环河组 100~200 m 地下水的氟含量较低; 白垩系环河组砂泥岩中氟含量较高是高氟地下水的直接原因, 四周封闭的洼地地貌形成强烈的蒸发积盐环境, 是大面积高氟地下水形成的主要原因; 弱碱性、高 TDS 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型水等水化学特征, 有利于地下水中氟的富集。

关键词: 高氟水; 分布规律; 成因; 环河组; 蒸发积盐环境; 盐池北部; 宁东能源基地
中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0114-06

Distribution and Impact Factors of High Fluorine Groundwater in Northern Yanchi County

XU Yong, JIANG Jun, SUN Fang qiang, ZHANG Le zhong, ZHAO Zherr hong
(Key Laboratory of Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Regions,
Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China)

Abstract: With the construction of the Ningdong energy chemical base, water quality research of groundwater in the water supply source area of the energy base reserve area is of predominant significance. Based on the analysis of fluorine contents in 86 groundwater samples of different depths in the aquifers of northern Yanchi, the spatial distribution of groundwater with high fluorine was investigated, and its impact factors were also discussed, including the topography and geomorphology, formation lithology, hydrogeological conditions, and water chemical characteristics. The results showed that (1) the horizontal distribution of fluoride content is controlled by topography and physiognomy, with higher fluorine content in the ditch while lower fluorine content in the eolian sand area; (2) the vertical distribution of fluorine content is controlled by alternate rate of groundwater cycle, and therefore the Quaternary eolian sand aquifer and 100~200 m aquifer of upper Huanhe formation of Cretaceous have low fluorine content due to fast alternate rate; (3) higher fluoride content in the sandstone and mudstone of upper Huanhe formation of Cretaceous is the direct cause of high fluorine groundwater. Strong evaporation and salt accumulation in the ditch can cause the formation of high fluorine water; and (4) higher TDS, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ type, and alkalescent water is beneficial to the accumulation of fluorine.

Key words: high fluorine water; distribution regularity; cause; Huanhe formation; evaporation and salt accumulation environment; Northern Yanchi County; Ningdong energy base

高氟地下水是广泛分布于我国北方干旱半干旱地区的一种典型的劣质水源, 如松嫩平原、太原盆地、河套平原、关中盆地、定靖平原、宁夏平原等^[7]。其中宁夏回族自治区的盐池县就是典型的潜水高氟型地方病区。盐池县位于宁夏回族自治区东

端, 地貌上处于毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带, 属干旱半干旱季风气候区, 年降水量约 300 mm, 蒸发量为降水量的 6~8 倍。降水量少和水水质性缺水是盐池县水资源匮乏的主因, 而影响水质的最主要的因素高氟、高矿化度和高硬度。

收稿日期: 2013-04-24 修回日期: 2013-09-23 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1025.005.html>

基金项目: 中国地质调查局“鄂尔多斯盆地(宁夏)能源基地地下水勘查”项目(1212011121162); 国家自然科学基金项目“吕梁山西麓罗村红黏土剖面的古地磁年代及古环境记录”(41202133)

作者简介: 徐永(1981-), 男, 陕西佳县人, 助理研究员, 理学博士, 主要从事水文地质环境地质方面研究。E-mail: xyxuyong@163.com

通讯作者: 姜军(1969-), 男, 湖北英山人, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质工程地质方面研究。E-mail: jane8118159@163.com

前人对氟含量及影响因素做过大量研究^[8-10],但氟含量在空间上受地形地貌、地层岩性、取水深度、地下水循环速度等众多因素影响。之前的研究仅局限在骆驼井水源地很小的范围内,含水层也仅集中在100~150 m以浅。随着宁东能源化工基地的建设,盐池北部被确定为能源基地后备区的集中供水和城市应急供水水源地。因此盐池县北部地下水中氟的含量,空间分布规律及影响因素的研究具有极其重要的现实意义。本文在地面调查的基础上,根据地质地貌条件和含水层岩性特征,采集了不同深度、不同地区的地下水样品,对区内氟含量分布规律、来源和影响因素进行探讨。

1 研究区概况及样品采集

1.1 研究区概况

研究区属宁夏回族自治区盐池县花马池镇,东北以宁陕蒙省界为界,南侧以八岔梁为界,西侧以南北向分水岭为界,北侧基本以左记湾-苏步井公路为界。全区东西最长33 km,南北最宽20 km,大致成一个“直角梯形”,面积约400 km²(图1)。地势南高北低,西高东低,海拔为1 300~1 500 m。

本区属北温带干旱半干旱大陆性季风气候,冬季严寒干燥,春季风沙频繁,夏季高温炎热,秋季凉爽湿润,昼夜温差悬殊,无霜期短,冰冻期长。区内降水少而集中,多年平均降水量为277.11 mm,多年平均蒸发量2 293.07 mm,为年降水量的8倍。因此大气降水对地下水的补给作用较弱,而蒸发作用成为该地区浅部地下水的重要排泄方式,使得本区地下水资源贫乏,平原、洼地水质恶化,在北部部分地区形成盐渍化、咸水湖泊。



图1 研究区地理位置

Fig. 1 The geographical location of the study area

1.2 样品采集与测试

综合考虑研究区地形地貌、含水层特征、地下水用途及高氟分布规律等因素,于2010年10月和2011年5月在盐池县北部布设了地下水采样点(图2),样品均在机(民)井中采取。最终选取了86件地下水样品作为研究对象,其中井深小于100 m的样品有32个,100~200 m的21个,大于200 m的33个。

采样容器采用聚乙烯塑料瓶,每个样品采集500~1 500 mL,采集后密封,送达实验室。样品在陕西省地矿局综合地质大队完成测试。氟含量测试采用离子选择电极法。

2 高氟地下水的分布特征

2.1 地下水中氟含量统计特征

测试结果显示,研究区地下水中氟含量在0.22~8.2

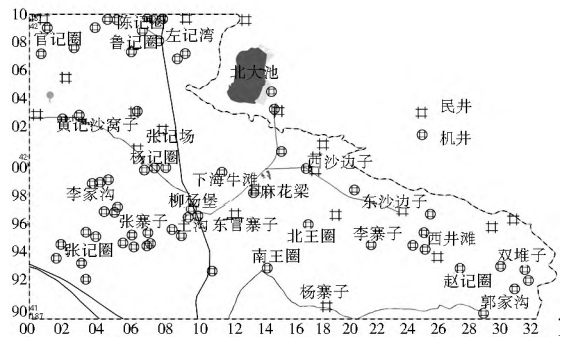


图2 采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling locations

mg/L之间变化,最高值是最低值的30多倍,氟含量变化范围较大。氟含量整体较高,含量在1~4 mg/L的样品占到总样品数的79.48%,平均值达到了2.41 mg/L,中值为2.13 mg/L,标准偏差为1.64 mg/L。

根据氟含量特征及《地下水环境质量标准》(GB T 14848-93)和《地方性氟中毒病区划分标准》(GB 17018-1997),按氟含量 ≤ 0.5 mg/L、0.5~1 mg/L、1~2 mg/L、2~4 mg/L、 > 4 mg/L划分为5个组,各组采集样品个数分别为2、8、21、41、6。统计结果见图3。可见,研究区高氟地下水占到了87.17%,其中1~2 mg/L的占到了26.92%,2~4 mg/L的占到了52.56%,大于4 mg/L占到了7.69%,研究区以高氟地下水为主。

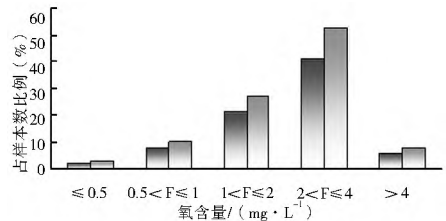


图3 盐池北部氟含量分级

Fig. 3 The classification results of fluoride content in groundwater of Northern Yanchi County

2.2 氟含量的水平变化规律

从地下水氟含量等值线图(图4)可以看出,大部分地区地下水中氟含量在2 mg/L以上,最高达到7 mg/L以上;氟含量较高的区域集中在北部东陈记圈、中部东冒寨子-张记场、东部赵记圈-李寨子等地,一般大于3 mg/L;氟含量最小的区域分布在东部边缘盐池县与内蒙古自治区和陕西省接壤的沙边子附近,多小于1.0 mg/L,适合饮用,见图4。

对比地质地貌图(图5)发现,高氟水在平面上受地形地貌和地层岩性控制,研究区东北部与陕西和内蒙古自治区交界处,广泛分布第四系风积砂层,含氟矿物少,渗透性好,易接受大气降水入渗补给,渗入淡化作用强烈,对下伏白垩系环河组含水层起到了淡化作用,形成了一个低氟水透镜体,水质良好,适合饮用。盐池县的供水水源一骆驼井水源地位于此区。梁坡或梁岗间洼地,由于地层中氟含量高,加之蒸发浓缩作用强烈,地下水氟含量高,例如位于八岔梁梁坡的郭家沟、李寨子南,地下水中氟含量一般在3 mg/L以上,而梁岗间洼地的下海牛滩、李寨子、赵记圈等地,氟含量均在3~6 mg/L之间。

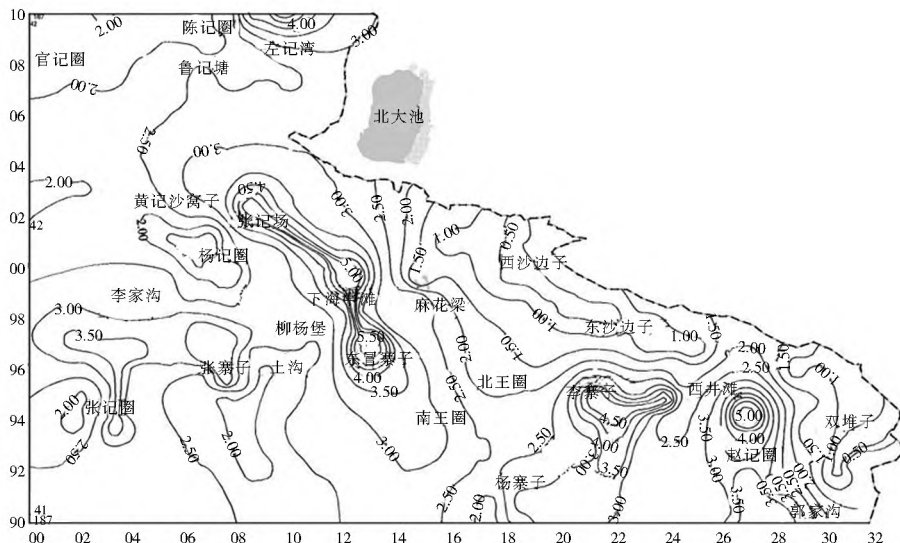


图 4 研究区地下水中氟含量等值线

Fig. 4 The isoline of fluoride content in groundwater of the study area

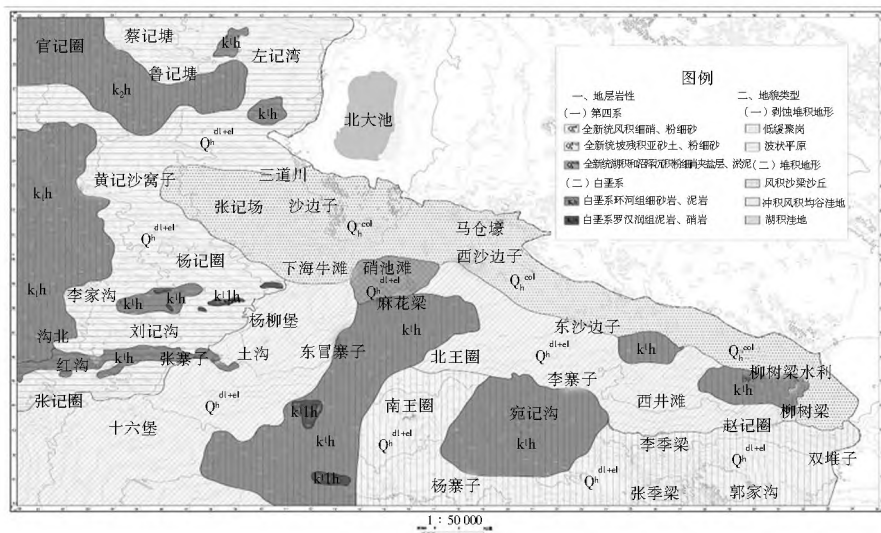


图 5 研究区地质地貌

Fig. 5 Geological and geomorphological map of the study area

2.3 氟含量的垂直变化规律

从环河组含水层不同深度氟含量统计结果(表 1)发现,深度小于 20 m 含水层氟含量最高,平均值达到了 3.18 mg/L,最大值可达 7 mg/L 以上;深度在 20~100 m 的含水层氟含量次之,平均值为 2.98 mg/L,最大值超过 7 mg/L;深度大于 200 m 含水层,氟含量平均值为 2.41 mg/L,最大值为 4.33 mg/L;深度在 100~200 m 含水层氟含量最小,平均值仅为 1.76 mg/L,最大值为 3.3 mg/L。

深度小于 20 m 基本上为上层滞水,多数水井已废弃,地下水循环速度缓慢,主要靠少量大气降水补给,有利于氟离子的聚集,因此氟含量高。调查发现,区内开采的地下水主要是 0~300 m 含水层,其中 20~100 m 含水层由于水量较小,供小面积灌溉和牲畜饮用,水循环较慢;大面积农灌区均开采 100~300 m 之间的含水层,此段地下水循环最快,因此氟含量较小。但随着深度的增加,地下水径流速度自上而下

由快变慢,交替循环作用由强变弱,氟含量又逐渐升高。因此,研究区地下水呈现出“小于 100 m 深度氟含量较高、100~200 m 深度氟含量最小、200 m 以下深度氟含量又增加”的规律。

表 1 不同深度氟含量对比

Table 1 Comparison of fluoride contents in different depths

含水层	氟含量/(mg·L ⁻¹)		
	平均值	最大值	最小值
白垩系环			
河组上部			
含水层			
$H < 20\text{ m}$	3.18	7.50	1.13
$20\text{ m} \leq H < 100\text{ m}$	2.98	7.30	0.22
$100\text{ m} \leq H < 200\text{ m}$	1.76	3.30	0.57
$H \geq 200\text{ m}$	2.41	4.33	0.34

值得注意的是,区内汇水中心一硝池滩和北大池地下水氟含量小于 1 mg/L(表 2),均未超标。五个水样均采自自流井,井深在 100~150 m 左右,再次印证区内 100~200 m 之间的地下水循环较快。

表2 硝池和北大池附近地下水中氟含量

Table 2 Fluorine contents in groundwater near Xiaochi pool and Beidachi pool

井号	采样地点	井深/m	氟含量/(mg·L ⁻¹)
YJ37	硝池东	120.00	0.90
YJ136	硝池	150.00	0.68
YJ40	北大池南	100.00	0.83
YJ41	北大池	110.00	0.76
YJ87	北大池西	120.00	0.85

2.4 氟含量随时间的变化规律

对典型地区不同时期地下水氟含量监测发现,5月份地下水氟含量多高于9月份(图6),这是因为5月份的蒸发量是降水量的数倍,水位浅埋地带的潜水受到强烈蒸发消耗,水中氟得以浓缩富集;而在9月份,集中降水大量入渗补给潜水,在一定程度上加快了地下水径流,水中氟受到稀释和转移。不过,位于硝池滩汇水洼地的下海牛滩、白春兰治沙基地,以及位于八岔梁梁坡的双堆子南机井,9月份大量降水入渗使聚集在岩土中的氟进入地下水中,反而使得这些地区9月份的氟含量高于5月份。

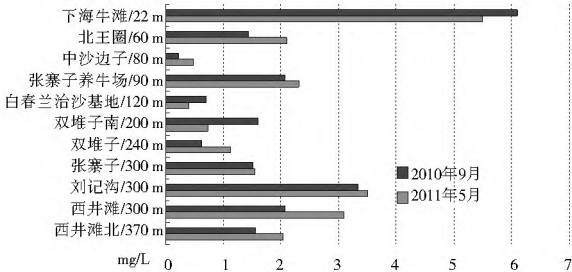


图6 丰枯水期地下水中氟含量对比

Fig.6 Comparison of fluoride contents in high and low flow periods

3 盐池北部高氟地下水的成因探讨

3.1 地层岩性

已有研究认为,第三系泥岩层和白垩系环河组砂质泥岩为咸苦水和高氟潜水的形成提供了物质基础,证据是水溶氟、井孔水含氟量与岩土全氟含量存在对应关系^[8],并认为环河组砂质泥岩的全氟含量存在自下而上逐渐增高的趋势^[9]。但是此次在地表和钻孔中均未见第三系泥岩层。

为探明地下水中氟的来源,本次在中部施工的钻孔中按10~40m间隔取了易溶盐样品。对比易溶盐与地下水中氟含量,发现环河组上部岩土中全氟含量普遍较高,而且向上有增高的趋势,与地下水中氟含量趋势一致,见图7。所以白垩系环河组地层在地下水长期溶滤作用下,岩土中的大量氟溶解于水形成高氟水。

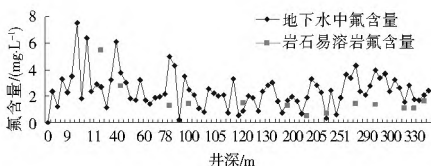


图7 环河组上部易溶岩中氟含量随深度变化曲线

Fig.7 Vertical variation of fluoride contents in soluble salt of upper Huanhe formation

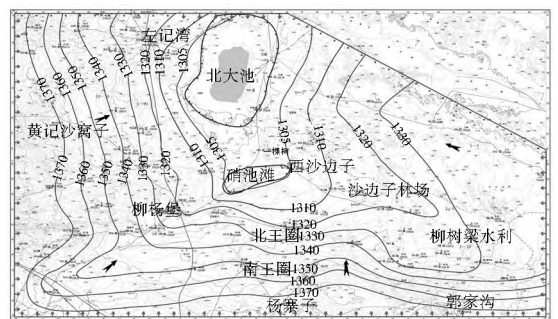
3.2 水文地质条件

研究区位于鄂尔多斯白垩系地下水盆地北部,属于沙漠

高原单一结构含水层亚系统都思图河—盐池水流系统,含水介质颗粒较粗,岩性单一,含水岩组间缺乏稳定连续的隔水层,垂向水力联系比较密切,地下水流场受地形控制^[11-13],其水文地质特征如下。

(1)按含水介质特点及水力特征,区内地下水类型分为第四系松散岩类孔隙水和白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水。第四系松散岩类孔隙水含水层以风积砂为主,厚度数米至十几米,岩性以细砂为主,地下水埋深1.0~3.0m。白垩系环河组碎屑岩类裂隙孔隙水含水层岩性主要为细砂岩。研究区东北部地下水埋深在3~5m左右;东部地下水埋深在5~30m之间;向南部、西部分水岭,水位埋深逐渐加大,大于30m;西部分水岭附近,地下水水位埋深多在70~90m之间。但白垩系环河组含水层与第四系松散岩类含水层之间并不存在明显的隔水层,构成统一的含水介质。

(2)研究区地下水的补给主要靠大气降水入渗,其次为农灌入渗和南侧、西侧侧向补给。地下水径流明显受地表水分水岭的影响:地下水在北大池四周高地接受补给后,以北大池为中心,地下水呈辐射状径流,向北大池集中汇聚排泄,见图8。北大池为区域现代侵蚀基准面,是区内浅层地下水的最终排泄区,控制着区域地下水总体的径流方向、循环深度。区内分布的梁间洼地、丘间洼地为次一级侵蚀基准面,降水形成的地表径流和浅层地下水首先在此汇集,集中向北大池排泄。



图例 流入边界 零流量边界 自流区界限 等水位线数字为水位高程(m) 地下水流向

图8 研究区地下水流场

Fig.8 Groundwater flow field of the study area

根据以上条件分析,降水形成的地表和地下径流汇集于丘陵间的洼地中,使得土壤和岩石中溶出的氟在地下水中聚集成高氟水。盐池县北部处于干旱区向半干旱区的过渡地带,降水少而时间集中,大气降水对地下水的补给作用微弱;相反,强烈的蒸发作用,对浅部地下水的排泄十分有利,由此推测,强烈的蒸发积盐环境是面积高氟地下水形成的原因之一。

3.3 水化学特征

区内地下水的水化学特征受补给、径流、排泄条件和地层积盐作用的制约,水化学成份比较复杂,水质较差。地下水中阳离子以Na⁺为主,Mg²⁺次之,Ca²⁺含量较低,阴离子以SO₄²⁻为主,CO₃²⁻+HCO₃⁻和Cl⁻次之,水化学类型多为SO₄·ClNa型,见图9。钠型、钠镁型和镁钠型水中氟含量高,平均为2.02mg/L;钙镁型和镁钙型水中氟含量低,均小于1mg/L。由于钠镁形成易溶的氟盐,保证了氟在水中

的稳定,使得水中氟含量高;而钙与氟形成较难溶的氟盐,造成水中氟含量低的现象。前人研究发现,当地下水演化进入蒸发浓缩阶段时,其中 F^- 浓度主要受 NaF (水氟) 溶解度的控制,而 NaF 的溶解度高,使得氟能在水中随着蒸发作用的进行不断积累^[14-16]。

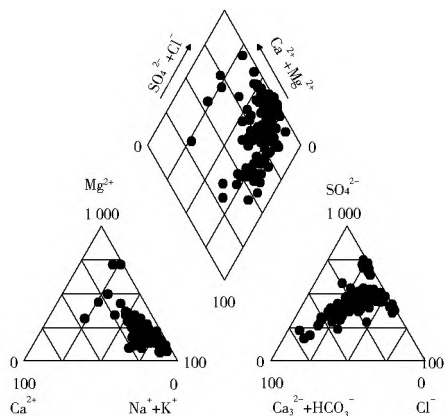


图 9 盐池北部白垩系地下水水化学三线图

Fig. 9 Piper diagram of groundwater in Cretaceous system in Northern Yanchi County

研究区地下水 pH 值集中分布在 7.4~8.2 的区间,高氟水都为碱性水,而且表现出随 pH 值的增大氟含量升高的变化趋势,见图 10(a)。这是因为 pH 值加速了含氟物质的溶解同时抑制了水中钙含量,有利于氟在水中积累^[16-17]。地下水 TDS 多在 1~3 g/L,但 F^- 浓度并不是随 TDS 增大而无限增大,且当 TDS>3 g/L 时, F^- 浓度反而有降低的趋势。分析发现有利于 F^- 富集的 TDS 范围为 500~3 000 mg/L,见图 10(b)。

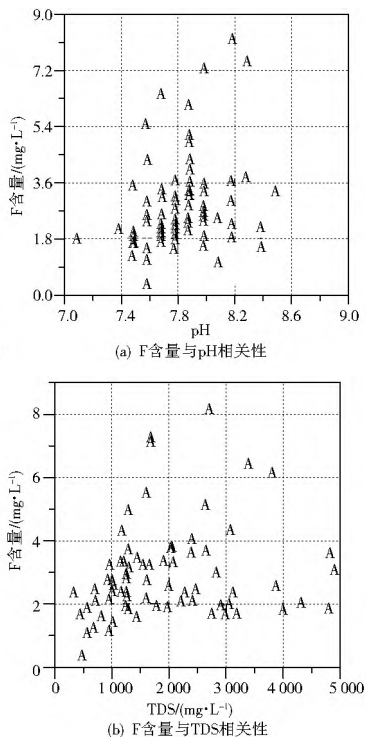


图 10 盐池北部地区 F 含量与 pH 值和 TDS 的相关性

Fig. 10 The relationships between fluorine content and TDS and between fluorine content and pH in Northern Yanchi County

4 结论

(1) 盐池县北部地下水中氟含量整体较高,均超过 1 mg/L,平均值达到 2.43 mg/L,最大值超过 7 mg/L。

(2) 在平面上,梁坡及梁岗间低洼地区地下水中氟含量高。在垂向上,深度小于 20 m 的地下水氟含量最高,20~100 m 和大于 200 m 深度的地下水氟含量较高,100~200 m 深度和第四系风积砂地下水中氟含量最低。在时间上,一般是 5 月份地下水中氟含量高于 9 月份。

(3) 白垩系环河组泥岩是盐池北部地下水中氟的主要来源,地下水长期溶滤使岩土中的大量氟溶解于水形成高氟水;封闭的内流区和强烈的蒸发积盐环境是大面积高氟地下水形成的主要原因;而地下水水化学类型多为 SO_4-Na 型,有利于氟离子的聚集。

致谢:在野外调查采样和论文成文过程中得到“宁东能源基地地下水勘查”项目组王冬、马洪云、张俊、郭莉等同志的大力支持,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 何锦,张福存,韩双宝,等.中国北方高氟地下水分布特征和成因分析[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))
- [2] WANG Yanxin, SHVARTSEV Stepan L., SU Chunli, Genesis of Arsenic/fluoride enriched Soda Water: A Case Study at Datong, Northern China[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24: 641-649.
- [3] GUO Qinghai, WANG Yanxin, MA Teng, et al. Geochemical Processes Controlling the Elevated Fluoride Concentrations in Groundwaters of the Taiyuan Basin, Northern China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2007, 93: 1-12.
- [4] 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 Fluoride in Groundwater of the Fluorosis Area, Songnen Plain[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 614-620. (in Chinese))
- [5] ZHU Cansheng, BAI Guanglu, LIU Xiaoli, et al. Screening High fluoride and High arsenic Drinking Waters and Surveying Endemic Fluorosis and Arsenism in Shaanxi Province in Western China[J]. Water Research, 2006, 40: 3015-3022.
- [6] GUO Huaming, ZHANG Yang, XING Lina, et al. Spatial Variation in Arsenic and Fluoride Concentrations of Shallow Groundwater from the Town of Shahai in the Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. Applied Geochemistry, 2012, doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.01.016.
- [7] 朱桦,杨炳超,赵阿宁,等.陕西省大荔县高氟地下水的形成条件分析[J].中国地质,2010,37(3):672-676. (ZHU Hua, YANG Bingchao, ZHAO Aning, et al. The Formation Regularity of High fluoride Groundwater in Dali County, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 672-676. (in Chinese))
- [8] 单鹏飞.宁夏地貌格局与咸苦水、高氟潜水分布规律的系统

- 分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 1989, (4): 63-68. (SHAN Peng-fei. A Systematic Analysis on the Distributional Law of Salt bitter Water, High fluorine Phreatic Water and Geomorphologic Setup in Ningxia[J]. Journal of Ningxia University(Natural Science Edition), 1989, (4): 63-68. (in Chinese))
- [9] 陶书华, 徐继刚. 陕西定边平原高氟地下水的形成、分布及改水途径研究[J]. 陕西地质, 1992, 10, (1): 75-86. (TAO Shu hua, XU Ji gang. Studies of the Formation Distribution and Purifying Methods of High fluoride Underground Water in the Dingbian Plain, Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 1992, 10 (1): 75-86. (in Chinese))
- [10] 窦妍, 钱会. 盐池地区地下水中氟离子的分布及其成因[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2007, 10(1): 81-85. (DOU Yan, QIAN Hui. Cause Analysis of Fluorine Ion Distribution of Groundwater in Yanchi, Ningxia Autonomous Region[J]. Journal of Xi'an University of Arts & Science (Nat Sci Ed), 2007, 10(1): 81-85. (in Chinese))
- [11] HOU Guangcai, LIANG yongping, SU Xiaosi, et al. Groundwater Systems and Resources in the Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(5): 1061-1069.
- [12] 董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 288-292. (DONG Wei hong, SU Xiaosi, HOU Guang cai, et al. Distribution Law of Groundwater Hydrochemical Type in the Ordos Cretaceous Artesian Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37 (2): 288-292. (in Chinese))
- [13] 万玉玉, 苏小四, 董维红, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地中深层地下水可更新速率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3): 623-630. (WAN Yu yu, SU Xiaosi, DONG Wei hong, et al. Evaluation of Groundwater Renewal Ability in the Ordos Cretaceous Groundwater Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(3): 623-630. (in Chinese))
- [14] 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 Xiang quan, ZHU Li ren, HOU Xin wei, et al. Distribution and Evolutional Mechanism of Shallow High Fluoride Groundwater in Taiyuan Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1): 55-61. (in Chinese))
- [15] 王新娟, 李世君, 周俊, 等. 北京大兴区第四系地下水氟分布特征及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 28-33. (WANG Xin juan, LI Shi jun, ZHOU Jun, et al. Fluoride Distribution and Its Genetic Analysis in Quaternary Groundwater of Daxing District in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 28-33. (in Chinese))
- [16] 王存龙, 庞绪贵, 王红晋, 等. 高密市高氟地下水成因研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 355-362. (WANG Cun long, PANG Xu gui, WANG Hong jin, et al. High F Groundwater in Gaomi City Its Genetic Study[J]. Earth and Environment, 2011, 39 (3): 355-362. (in Chinese))
- [17] 韩洪伟, 吴国学, 王永祥, 等. 高氟地下水在内蒙古赤峰地区的分布与形成初探[J]. 世界地质, 2004, 23(4): 376-381. (HAN Hong wei, WU Guo xue, WANG Yong xiang, et al. Preliminary Study on Formation and Distribution of Groundwater with High Fluorine in Chifeng District, Inner Mongolia[J]. Global Geology, 2004, 23(4): 376-381. (in Chinese))
- (上接第 113 页)
- [6] 王湘锋, 李天斌, 王小群. 成都市大邑县干岩子滑坡成因机制及稳定性评价[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 92-94. (WANG Xiang feng, LI Tian bin, WANG Xiao qun. The Analysis of Formation Mechanism and Stability Assessment for a Landslide in Ganyanzi of Dayi, Chengdu[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 92-94. (in Chinese))
- [7] 邹小虎, 沈军辉, 张进林, 等. 雅砻江江西滑坡成因机制及其稳定性分析[J]. 地质灾害与环境, 2006, 17(4): 39-42. (ZOU Xiao hu, SHEN Jun hui, ZHANG Jin lin, et al. Analysis of Formation Mechanism and Stability of Jiayi Landslide of Yalong River[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, 17(4): 39-42. (in Chinese))
- [8] 黄达, 裴向军, 张志刚, 等. 某公路滑坡成因机制及稳定性[J]. 山地学报, 2008, 26(6): 721-726. (HUANG Da, PEI Xiang jun, ZHANG Zhi gang, et al. Study on the Formation Mechanism and Stability of a Landslide of a Highway[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(6): 721-726. (in Chinese))
- [9] 刘涛, 李渝生, 汪波. 贵州水城曾家包包大型基岩滑坡的成因机制及稳定性[J]. 山地学报, 2005, 23(3): 342-347. (LIU Tao, LI Yu sheng, WANG Bo. Genesis Mechanism and Stability of Large Zengjiabao Bedrock Slide in Water City of Guizhou[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(3): 342-347. (in Chinese))
- [10] 李会中, 王吉亮, 黄孝泉, 等. 乌东德水电站右岸拱肩槽边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8): 83-88. (LI Hui zhong, WANG Ji liang, HUANG Xiao quan, et al. Slope Stability at the Right Abutment of Wudongde Hydropower Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 83-88. (in Chinese))
- [11] 李守定, 李晓, 张军, 等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2908-2915. (LI Shou ding, LI Xiao, ZHANG Jun, et al. Study of Geological Origin Mechanism of Tangjashan Landslide and Entire Stability of Landslide Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp. 1): 2908-2915. (in Chinese))
- [12] 杨建国, 晏鄂川, 程温鸣. 滑坡变形特征的 GPS 监测信息识别研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 24-28. (YANG Jian guo, YAN E chuan, CHENG Wen ming. Identification of GPS Monitoring Information of Landslide Deformation Characteristics[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 24-28. (in Chinese))
- [13] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454. (HUANG Run qiu. Large scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese))