

## 微山湖流域高氟地下水的成因分析

刘春华<sup>1)</sup>, 王威<sup>2,3)</sup>, 卫政润<sup>1)</sup>, 尚浩<sup>1)</sup>, 张卓<sup>1)</sup>

1)山东省地质调查院, 山东济南 250013; 2)中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;  
3)山东省第一地质矿产勘查院, 山东济南 250014

**摘要:** 依据2006—2016年间采集的区内475件地下水无机分析数据以及钻探岩心易溶盐测试数据, 详细研究了微山湖流域高氟地下水的分布特征和富集机制。结果表明: 微山湖流域高氟地下水的分布有明显的东西分区特征, 湖西冲积、湖积平原区有大范围的高氟地下水, 在深度0—40 m的浅层孔隙地下水中, 氟含量以1~2 mg/L为主, 仅现代黄河影响带地下水氟含量小于1 mg/L, 金乡、单县、嘉祥局部超过3 mg/L, 最大值9.5 mg/L; 在深度150—400 m的深层孔隙地下水中, 氟含量以1~1.5 mg/L为主, 菏泽—单县条带氟含量超过2 mg/L, 最大值3.5 mg/L。微山湖东冲积、洪积平原浅层孔隙地下水、深层岩溶地下水氟含量均小于1 mg/L。湖西冲积、湖积平原沉积物中可溶性氟含量随深度增加而降低。微山湖流域湖西高氟地下水形成受物质来源、淋滤和蒸发浓缩等三方面因素共同控制,  $\text{CaF}_2$ 的溶解平衡是控制地下水F含量的重要因素。

**关键词:** 微山湖流域; 高氟地下水; 分布特征; 成因

中图分类号: X523; O612.5 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.020601

## Distribution Characteristics and Genesis of High Fluoride Groundwater in Weishan Lake Watershed

LIU Chun-hua<sup>1)</sup>, WANG Wei<sup>2,3)</sup>, WEI Zheng-run<sup>1)</sup>, SHANG Hao<sup>1)</sup>, ZHANG Zhuo<sup>1)</sup>

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, Shandong 250013;  
2) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061;  
3) No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014

**Abstract:** Based on the analysis of 475 groundwater inorganic data collected from 2006 to 2016 and the data of soluble salts in sediments, the authors studied in detail the distribution characteristics and enrichment mechanism of high fluoride groundwater in Weishan Lake watershed. The results show that the distribution of high fluoride groundwater in Weishan Lake watershed is obviously characterized by east and west partitioning, and there is a wide range of high fluoride groundwater in the west alluvial and lacustrine plain. In the west alluvial and lacustrine plain, the fluoride concentration in shallow groundwater at the depth of 0–40 m is mainly 1~2 mg/L, only under the impact of the modern Yellow River the fluoride concentration is lower than 1 mg/L, and in the areas of Jinxiang, Shanxian, Jiexiang, the fluoride concentration is higher than 3 mg/L, with the maximum being 9.5 mg/L; in deep confined groundwater at the depth of 150–400 m, the fluoride concentration is mainly 1~1.5 mg/L, the fluoride whose concentration is higher than 2 mg/L is distributed in the area of Heze–Shanxian stripe, with the maximum concentration being 3.5 mg/L. In the east alluvial and flood plain, the fluoride concentration is lower than 1 mg/L both in the shallow groundwater and deep confined groundwater. The concentration of soluble fluorine in the sediments of the west alluvial and lacustrine plain decreases with the increasing depth. The formation of high fluoride groundwater in the west Weishan Lake watershed is controlled by three factors, i.e., material source, leaching and evaporation concentration. The dissolution equilibrium of calcium fluoride is an important controlling factor responsible for the fluoride content in groundwater.

**Key words:** Weishan Lake watershed; high fluoride groundwater; distribution characteristics; genesis

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0406106)和国家自然科学基金项目(编号: 41502253)联合资助。

收稿日期: 2017-10-19; 改回日期: 2018-01-29; 网络首发日期: 2018-02-09。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 刘春华, 女, 1981年生。博士, 高级工程师。从事水文地质环境地质研究工作。通讯地址: 250014, 山东省济南市历下区二环东路5948号。E-mail: chunhua\_liu321@126.com。

氟是人体所需的一种重要微量元素，在人体内具有重要的生理功能，但是过量摄入则会引发一种全身性慢性疾病——地氟病，主要症状表现为氟骨症和氟斑牙。我国《生活饮用水卫生标准》GB5749—2006 规定饮用水中氟的浓度不能超过 1.0 mg/L。氟含量超过 1.0 mg/L，并使人体产生地方性氟中毒疾病的地下水，称为高氟地下水。

高氟地下水广泛分布在我国北方的干旱、半干旱地区。长期以来，高氟地下水及其引起的地方性氟中毒引起了国际水文地球化学界的关注，对地下水中氟的研究多集中于以下方面：(1)高氟地下水的分布规律及成因研究(李向全等，2007；曹志洋等，2010；石维栋等，2010；孙一博等，2013；邢怀学等，2014；冯翠娥等，2015；左锐等，2015；毛若愚等，2016)；(2)高氟地下水中氟的迁移转化规律研究(曾溅辉，1997；刘征原和郝瑞彬，2007；梁秀娟，2008；吴旻等，2013)；(3)高氟地下水水化学特征的研究(赵伦山等，2007)；(4)地方性氟中毒及氟处理的研究(云

中杰等，2003)。

山东省有近 11 000 个村庄属于地氟病区(云中杰等，2003)，自 1980 年开始山东实施打低氟井、引地表水和理化除氟等措施改水降氟，截止目前仍有大量的病村遭受高氟的危害，尤其是鲁西北、鲁西南平原地区。本文基于微山湖流域的研究数据，对高氟地下水的分布特征及富集机制进行分析讨论。

微山湖又称为南四湖，位于山东省西南部(图 1)，由微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖组成，四湖中以微山湖面积最大，湖盆呈北西—南东方向延伸，最大湖水面积 1 266 km<sup>2</sup>，湖泊平均水深 1.46 m，是中国北方最大的淡水湖泊。微山湖流域面积 30 453 km<sup>2</sup>，属于暖温带、半湿润季风气候区，多年平均降水量 743.3 mm，多年平均蒸发量一般约为 1 815 mm。

湖西属于黄河冲积平原、冲积湖积平原，地势平缓、西高东低，比降约 1/5000~1/20000，发育冲积相、湖积相地层，第四系、新近系松散沉积物厚度 200~500 m，地下水类型主要为松散岩类孔隙地

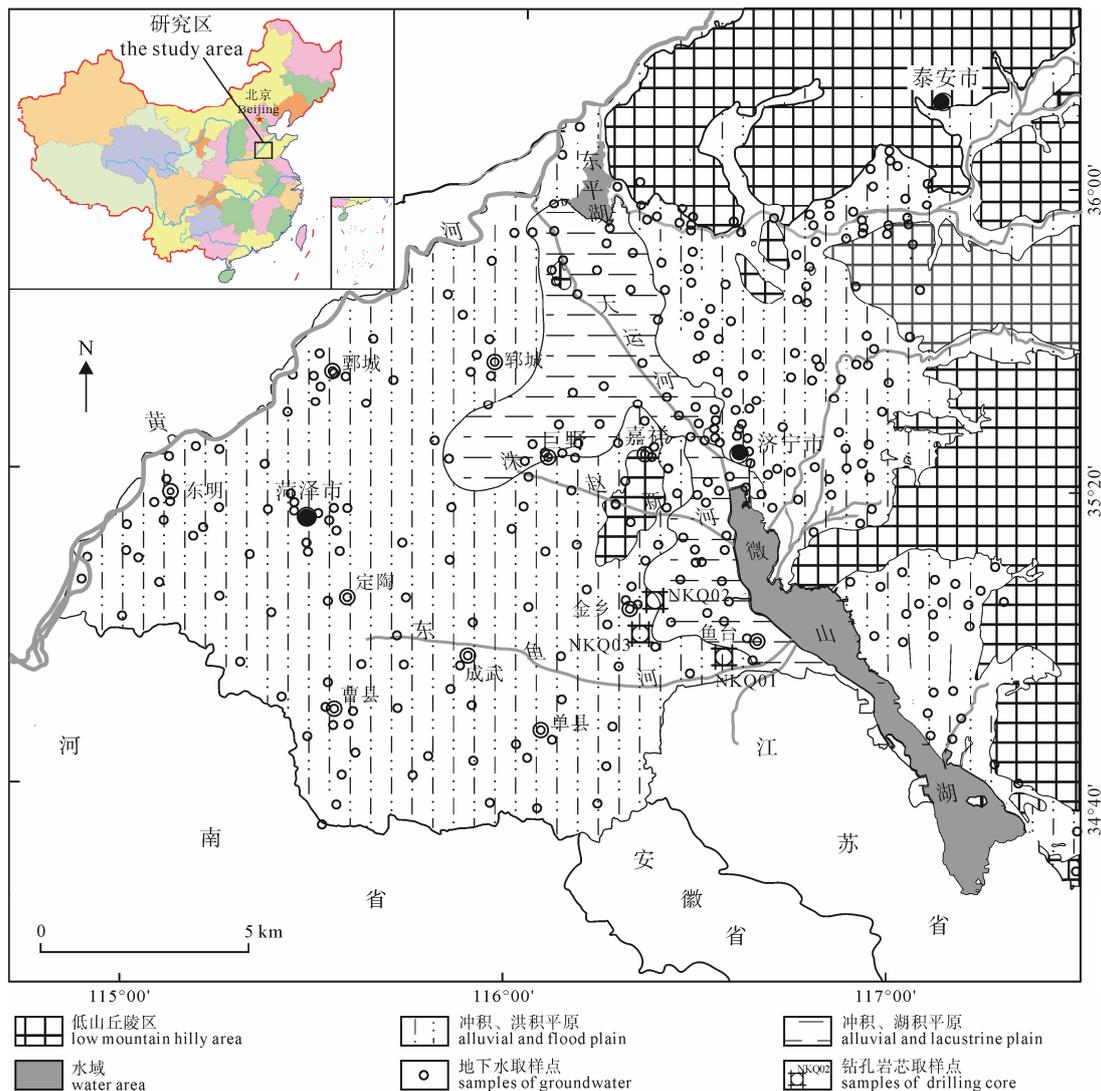


图 1 研究区地貌类型分区及样品采集位置分布  
Fig. 1 Landscape characteristics and groundwater sampling sites

下水。根据地层结构及含水层间水力联系,可分出浅、中、深三个含水岩组,浅层含水岩组底板埋深约 50 m,含水层岩性为细砂、粉砂,水位埋深 1~8 m,地下水流场总体上自西向东汇入微山湖;地下水矿化度一般小于 3 g/L,为农业灌溉水源开采层,大气降水是浅层地下水的主要补给来源。中层含水岩组埋深 50~150 m,含水层岩性为细砂、粉砂,水位埋深 3~12 m,矿化度一般 3~10 g/L,为咸水、微咸水,一般极少开发利用。深层含水岩组顶板埋深 150 m 左右,底板为基岩顶界面,含水层岩性为细砂、中砂以及含砾粗砂,水位埋深 11~70 m,是城市生活集中供水水源开采层,地下水流场总体上自西向东,在水源地形成开采漏斗,矿化度一般小于 2 g/L。

湖东地势东高西低,近湖区为泰沂山脉第四纪冲洪积扇及丘陵平原,一般发育残坡积和冲洪积相地层,松散沉积物厚度一般小于 60 m,下伏寒武系、奥陶系、石炭系地层,地下水类型包括松散岩类孔隙地下水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水;远湖区为蒙山岐脉山丘区,多为碳酸盐岩和侵入岩裸露地区。

湖西各河流均发源于黄河大堤的南缘,湖东诸河流发源于东部山区,均汇入微山湖。

### 1 样品分布特征与测试方法

2006—2016 年,在微山湖流域 30 453 km<sup>2</sup> 区域面积上,共采集地下水样品 475 件(图 1),样品基本上均匀分布全区,样品采集之前至少抽排出 3 倍井

管体积内储存的水后再采集,样品 3 天内送至实验室进行测试分析,除进行包括氟含量测试分析外,还进行了地下水其他无机组分、pH 值、溶解性总固体等的分析测试。氟的测试分析方法为茜素络合剂比色法,精度为 0.02 mg/L。所有采样点均采用德国 GARMIN GPS 定位仪定位。

2016 年在微山湖西金乡县高河镇和鱼台县王鲁镇施工了 NKQ01、NKQ02、NKQ03 等 3 眼水文地质勘探孔,孔深分别为 307.6 m、310 m、395.27 m,在钻探不同深度处共采集了 203 件沉积物进行包括氟等的易溶盐测试。

### 2 氟的空间分布规律

根据测试分析结果,微山湖流域地下水氟含量的分布具有明显的东西分区特征,湖西冲积、湖积平原区有大范围的高氟地下水,湖东冲积、洪积平原地下水氟含量均小于 1 mg/L(图 2,图 3)。

#### 2.1 湖西冲积、湖积平原地下水氟分布规律

埋藏 0—40 m 的浅层孔隙地下水,氟含量以 1~2 mg/L 为主,金乡南部及西北部、单县西南部、嘉祥县西北局部超过 3 mg/L,最高值 9.5 mg/L,最高值位于嘉祥县城西北。地下水氟含量小于 1 mg/L 主要分布于现代黄河影响带范围内,影响带宽度 5~20 km。另外,菏泽市城区周边以及洙赵新河—东鱼河间岛状分布地下水氟含量小于 1 mg/L(图 2)。黄河东明断面河水氟含量 0.8 mg/L;微山湖湖水氟含量 0.3~0.75 mg/L。

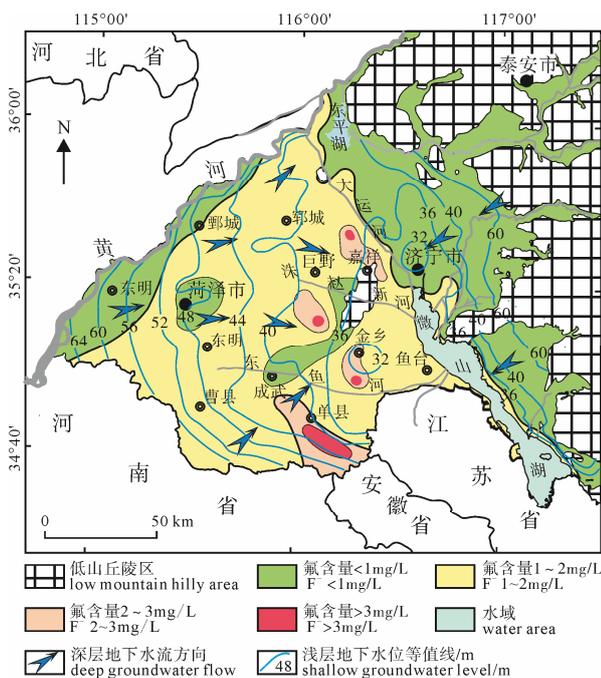


图 2 研究区浅层地下水氟含量分布图  
Fig. 2 Distribution characteristics of fluoride concentrations in shallow groundwater in the study area

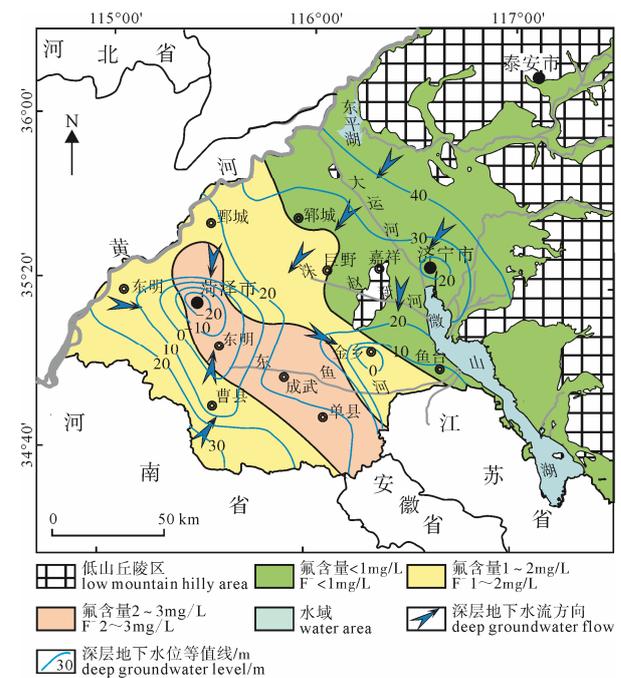


图 3 研究区深层地下水氟含量分布图  
Fig. 3 Distribution characteristics of fluoride concentrations in deep confined groundwater in the study area

埋藏 150—400 m 的深层孔隙地下水中, 氟含量以 1~1.5 mg/L 为主, 菏泽—成武—单县条带氟含量超过 2 mg/L, 最大值 3.5 mg/L(图 3)。

埋藏 50—150 m 的中部咸水、微咸水含水岩组, 地下水氟含量一般小于 3 mg/L。

## 2.2 湖东冲积、洪积平原地下水氟分布规律

微山湖东冲积、洪积平原孔隙地下水及下伏裂隙岩溶地下水氟含量均小于 1 mg/L。

## 3 地下水氟的富集机理探讨

### 3.1 地下水氟浓度与水化学的关系

本区地下水中  $F^-$  含量与某些化学组分的含量存在一定的相关关系。由图 4 可以看出, 湖西冲洪积平原孔隙地下水  $F^-$  含量与  $Ca^{2+}$  含量呈较明显的负相关关系, 与  $Na^+$  含量和  $HCO_3^-$  含量呈正相关关系, 与  $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  等离子含量相关关系不明显。

自然界的含氟矿物大约有 150 种(戎涛涛和翁焕新, 1990), 其中火成岩中氟的平均含量高于沉积岩, 沉积岩中页岩和黏土岩氟的平均含量高于灰岩

和砂岩, 大多数氟化物具有一定的水溶性, 但是溶解度差异大, 如在 20 °C 时氟化钙的溶解度为 40 mg/L, 而氟化钠可高达 40 540 mg/L(刘征原和郝瑞彬, 2007)。热力学研究表明钙与氟的活动性相关联(Rukah and Alsokhny, 2004; Chae, 2007)。湖西冲洪积平原孔隙地下水  $F^-$  含量与  $Na^+$  含量和  $HCO_3^-$  含量的正相关、与  $Ca^{2+}$  含量呈负相关表明:

①地下水中  $F^-$  与  $Na^+$  存在伴生关系(图 4b)。地下水中氟来源主要为含氟矿物的溶解, 研究区高氟地下水赋存于湖西冲洪积平原第四系和新近系松散沉积物中, 沉积物矿物种类主要为高岭石、蒙脱石、云母以及其他长石风化产物等, 此类矿物普遍含有氟和钠, 因此推论萤石及其他含氟铝硅酸盐是区内地下水中氟的物质来源。

② $CaF_2$  溶解度低,  $CaF_2$  的溶解平衡是控制地下水中  $F^-$  含量的重要因素(图 4a)。

③碳酸平衡影响水中  $Ca^{2+}$  含量和  $HCO_3^-$  含量, 从而一定程度影响地下水中的  $F^-$  含量。

### 3.2 地下水氟浓度与埋藏深度的关系

虽然由于采样地点不同、地下水径流途径矿物含

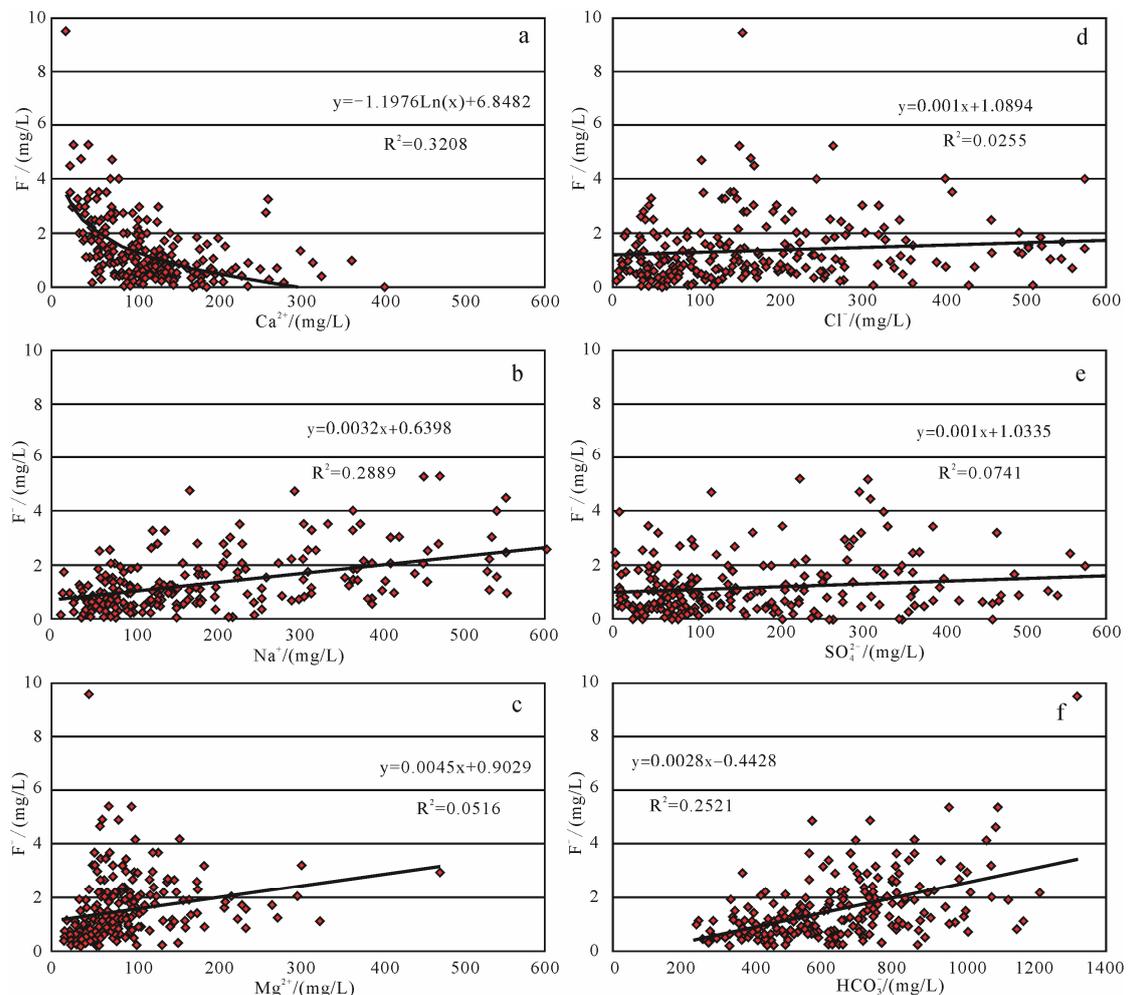


图 4 微山湖西冲洪积平原地下水氟含量与其他指标之间的关系

Fig. 4 Plots of  $F^-$  versus  $Ca^{2+}$  (a),  $F^-$  versus  $Na^+$  (b),  $F^-$  versus  $Mg^{2+}$  (c),  $F^-$  versus  $Cl^-$  (d),  $F^-$  versus  $SO_4^{2-}$  (e), and  $F^-$  versus  $HCO_3^-$  (f) in the west alluvial and lacustrine plain of Weishan Lake

氟量不同可能导致地下水氟浓度有所差异,但是从总体看来,随着深度的增加,地下水氟含量呈下降的趋势。深层地下水氟浓度一般小于 1.5 mg/L(图 5)。

根据沉积物中易溶性氟含量的测试结果发现,沉积物中易溶性氟含量随着深度的增加而降低(图 6), 0—60 m 深度沉积物氟含量一般大于 8 mg/kg, 150 m 深度往下沉积物中氟含量一般小于 4 mg/kg, 暗示着深部的地质岩层中能进入地下水中的氟矿物的量也越来越少。这一特征与地下水氟含量随深度增加逐渐降低的规律一致。

因此分析,地下水埋藏越深,受地表蒸发作用

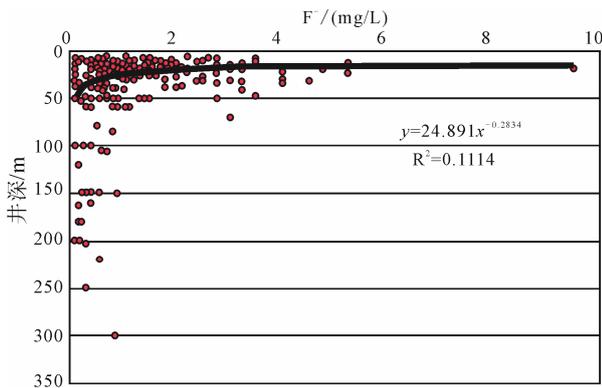


图 5 微山湖西冲洪积平原地下水氟含量与井深的关系  
Fig. 5 Relationship between fluoride concentration and the well depth in the west alluvial and lacustrine plain of Weishan Lake

的影响越小,同时,含水介质能溶解于水的氟越少,导致地下水氟含量随深度的增加呈下降的趋势。

### 3.3 地下水氟浓度与地貌的关系

从地貌类型来看,高氟地下水均分布于湖西冲积、湖积平原,尤其是地势低洼、地下水径流滞缓的地区,湖东低山丘陵区及冲洪积平原地下水氟浓度均低于 1 mg/L,因此,不管是浅层地下水还是深部地下水都受地貌、或者说是区域地质构造特征的影响。

### 3.4 地下水氟浓度与流场的关系

从浅层地下水流场分布来看(图 2),浅层地下水径流方向整体上与地形一致,以微山湖为汇自东、西往微山湖径流。湖西冲积湖积平原受黄河侧渗补给,位于补给区的现代黄河影响带 5~20 km 范围内,呈狭长条带状分布有氟含量小于 1 mg/L 的地下水,说明黄河水侧渗以及引黄灌溉稀释了当地地下水氟含量。另外,在洙赵新河和东鱼河两岸局部地区,分布片状、岛状地下水低氟区(小于 1 mg/L),进一步说明浅层地下水氟的分布与地下水流场关系密切,补给区地下水氟含量低、排泄区地下水氟含量高。

深层地下水自 1980 年开始开采以来流场发生了较大的变化,天然流场分布与浅层地下水流场分布近似,以微山湖湖西的济宁—鱼台一带为最低水

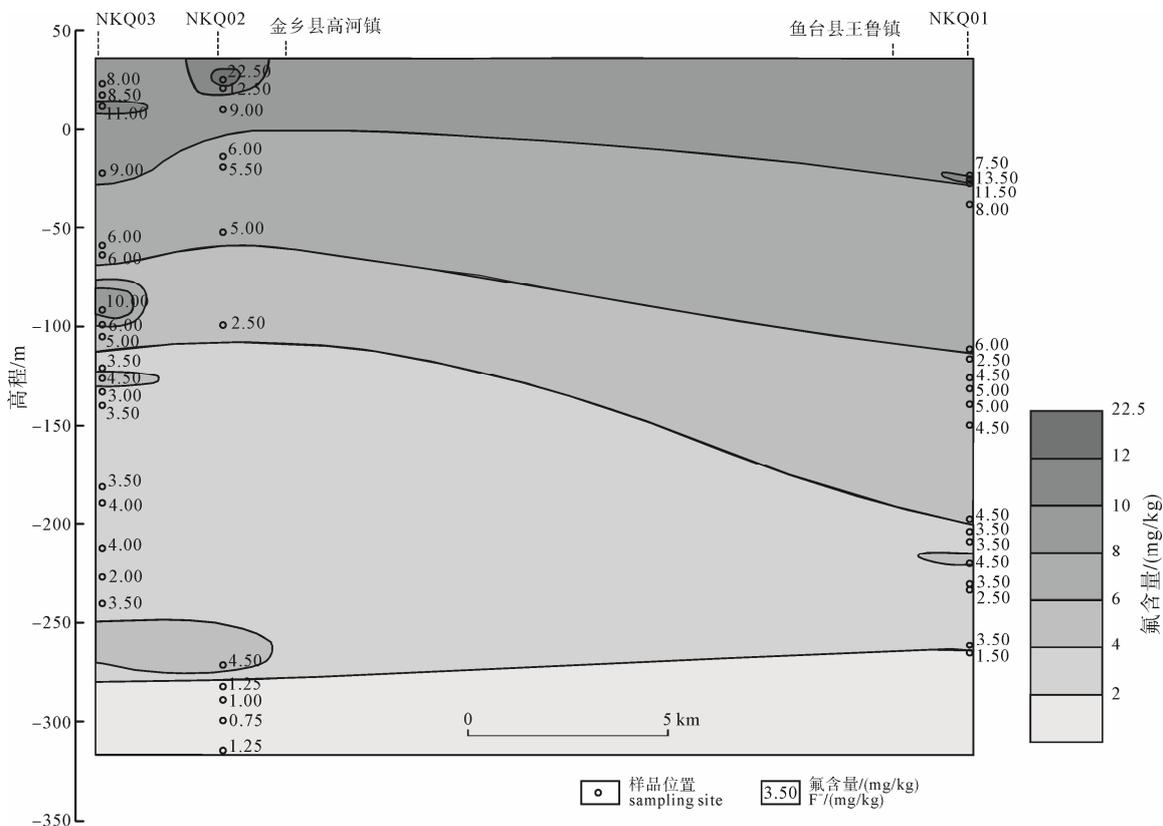


图 6 沉积物中可溶性氟的分布  
Fig. 6 Vertical distribution section about fluoride in sediments

位分布区,自东、西向济宁—鱼台低水位区径流。现状开采条件下菏泽、金乡等地均形成了深层地下水水位降落漏斗,深层地下水天然流场被漏斗所打断,演变为以漏斗中心为汇的复杂流场。不管是天然流场状态还是现状开采状态下,深层地下水氟含量与流场关系均不密切。

上述分析表明,大范围的高氟地下水主要存在于干旱或半干旱地区的内陆或封闭盆地、由冲积层形成的含水层中,更倾向于形成于地质历史上早期的岩石风化产物、且地势低平、地下水流动迟缓的地区,尤其是地下水排泄区。研究区 0—350 m 深度内均检出氟,说明区内高氟地下水主要是形成于地质历史时期,含水层沉积物及地下水径流途径中的萤石、氟磷灰石、氟盐、氟镁石、氟铝石等各类含氟岩石是区域地下水氟的来源。

## 4 结论

(1)微山湖流域高氟地下水的分布有明显的东西分区特征,湖西冲积、湖积平原区有大范围的高氟地下水,在深度 0—40 m 的浅层孔隙地下水中,氟含量以 1~2 mg/L 为主,仅现代黄河影响带地下水氟含量小于 1 mg/L,金乡、单县、嘉祥局部超过 3 mg/L,最大值 9.5 mg/L;在深度 150—400 m 的深层孔隙地下水中,氟含量以 1~1.5 mg/L 为主,菏泽—单县条带氟含量超过 2 mg/L,最大值 3.5 mg/L。微山湖东冲积、洪积平原浅层孔隙地下水、深层岩溶地下水氟含量均小于 1 mg/L。

(2)湖西冲积、湖积平原沉积物中可溶性氟含量随深度增加而降低,地下水氟含量也随深度增加而降低。

(3)湖西冲积、湖积平原孔隙地下水  $F^-$  含量与  $Ca^{2+}$  含量呈较明显的负相关关系,与  $Na^+$  含量和  $HCO_3^-$  含量呈正相关关系,与  $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  等离子含量相关关系不明显。

(4)推测  $CaF_2$  的溶解平衡是影响微山湖流域地下水  $F^-$  含量的重要因素之一。碳酸平衡影响  $Ca^{2+}$  进而一定程度上间接影响地下水  $F^-$  含量。

(5)微山湖流域湖西高氟地下水形成受物质来源、淋滤和蒸发浓缩等三方面因素共同控制。含氟矿物的溶解是地下水中氟的物质来源,淋滤、蒸发浓缩使得地下水氟含量进一步升高。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program (No. 2017YFC0406106), and National Natural Science Foundation of China (No. 41502253).

## 参考文献:

- 曹志洋,冯启言,吴晴晴,孟磊. 2010. 江苏丰沛地区浅层地下水氟含量的空间变异与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 37(3): 127-132.
- 中华人民共和国卫生部. 2006. 生活饮用水卫生标准 GB5749—2006[J]. 北京: 标准出版社.
- 冯翠娥,高存荣,王俊涛,刘文波,宋建新,康伟. 2015. 内蒙古河套平原浅层高铁高氟地下水分布与成因[J]. 地球学报, 36(1): 67-75.
- 李向全,祝立人,侯新伟,张莉. 2007. 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, 28(1): 55-61.
- 梁秀娟. 2008. 吉林西部洋沙泡水库水土环境中氟的迁移转化机理研究[D]. 长春: 吉林大学: 5-12.
- 刘征原,郝瑞彬. 2007. 氟的环境地球化学特征及生物效应[J]. 唐山师范学院学报, 29(2): 34-35.
- 毛若愚,郭华明,贾永峰,姜玉肖,曹永生,赵威光,王振. 2016. 内蒙古河套盆地含氟地下水分布特点及成因[J]. 地学前缘, 23(2): 260-268.
- 戎秋涛,翁焕新. 1990. 环境地球化学[M]. 北京: 地质出版社: 228-229.
- 石维栋,郭建强,张森琦,叶成明,李健,马新华. 2010. 贵德盆地高氟、高砷地下热水分布及水化学特征[J]. 水文地质工程地质, 37(2): 36-40.
- 孙一博,王文科,张春潮,段磊,王宇航,李慧. 2013. 关中盆地浅层高氟水形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 40(6): 117-122.
- 吴昉,郭华明,韩双宝,张福存. 2013. 宁南西吉含水层沉积物的氟释放特征[J]. 水文地质工程地质, 40(5): 117-123.
- 邢怀学,李亮,葛伟亚,叶念军,龚建师,周锴镔,朱春芳. 2014. 安徽省淮北市地下水中氟的空间分布特征及成因[J]. 地球学报, 35(2): 163-168.
- 云中杰,陈培忠,边建朝,郝继涛,秦玉平,高红旭,王玉涛,马爱华. 2003. 山东省地方性氟中毒防治工作现状分析[J]. 中国地方病学杂志, 22(7): 384-386.
- 曾溅辉,张宗祜,任福弘. 1997. 非饱和带土体-浅层地下水系统氟的地球化学——以河北邢台山前平原为例[J]. 地球学报, 18(4): 389-396.
- 赵伦山,武胜,周继华,王敬华,王建武. 2007. 大同盆地砷、氟中毒地方病生态地球化学研究[J]. 地学前缘, 14(2): 225-235.
- 左锐,谷鹏,滕彦国,王强,王金生,王朕. 2015. 下辽河平原高氟地下水空间分布及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 42(3): 135-140.

## References:

- CAO Zhi-yang, FENG Qi-yang, WU Qing-qing, MENG Lei. 2010. Spatial variability and distribution of fluorine contents in shallow groundwater in the Fengpei area, Jiangsu[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 37(3): 127-132(in Chinese with English abstract).
- CHAE G T, YUN S T, MAYER B, KIM K H, KIM S Y, KWON J

- S, KIM K, KOH Y K. 2007. Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 385(1): 272-283.
- FENG Cui-e, GAO Cun-rong, WANG Jun-tao, LIU Wen-bo, SONG Jian-xin, KANG Wei. 2015. Distribution and Causes of High-iron and High-fluoride Shallow Groundwater in the Hetao Plain of Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(1): 67-75(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang-quan, ZHU Li-ren, HOU Xin-wei, ZHANG Li. 2007. Distribution and Evolutional Mechanism of Shallow High-Fluoride Groundwater in Taiyuan Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(1): 55-61(in Chinese with English abstract).
- LIANG Xiu-juan. 2008. Research on the transportation and change mechanism of fluorine in water and soils in Yangshapao reservoir, western Jilin province[D]. Changchun: Jilin University: 5-12(in Chinese with English abstract).
- LIU Zheng-yuan, HAO Rui-bin. 2007. Environmental Geochemistry Characteristics of Fluorine and Its Biological Effects[J]. *Journal of Tangshan Teachers College*, 29(2): 34-35(in Chinese with English abstract).
- MAO Ruo-yu, GUO Hua-ming, JIA Yong-feng, JIANG Yu-xiao, CAO Yong-sheng, ZHAO Wei-guang, WANG Zhen. 2016. Distribution characteristics and genesis of fluoride groundwater in the Hetao basin, Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 260-268(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Health P. R. China. 2006. Standards for Drinking Water Quality GB5749—2006[J]. Beijing: Standard Press(in Chinese).
- RONG Qiu-tao, WENG Huan-xin. 1998. Environmental Geo-chemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House: 217-230(in Chinese).
- RUKAH Y A, ALSOKHNY K. 2004. Geochemical assessment of groundwater contamination with special emphasis on fluoride concentration, North Jordan[J]. *Chemie der Erde*, 64: 171-181.
- SHI Wei-dong, GUO Jian-qiang, ZHANG Sen-qi, YE Cheng-ming, LI Jian, MA Xin-hua. 2010. The distribution and geochemistry of geothermal groundwater bearing F and as in the guide basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(2): 36-40(in Chinese with English abstract).
- SUN Yi-bo, WANG Wen-ke, ZHANG Chun-chao, DUAN Lei, WANG Yu-hang, LI Hui. 2013. Evolution mechanism of shallow high fluoride groundwater in the Guanzhong basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(6): 117-122(in Chinese with English abstract).
- WU Yang, GUO Hua-ming, HAN Shuang-bao, ZHANG Fu-cun. 2013. Characteristics of fluoride release from aquifer sediments in Xiji of southern Ningxia[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(5): 117-123(in Chinese with English abstract).
- XING Huai-xue, LI Liang, GE Wei-ya, YE Nian-jun, GONG Jian-shi, ZHOU Kai-e, ZHU Chun-fang. 2014. Spatial Distribution Characteristics and Origin of Fluorine in Groundwater of Huaibei City, Anhui Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(2): 163-168(in Chinese with English abstract).
- YUN Zhong-jie, CHEN Pei-zhong, BIAN Jian-chao, HAO Ji-tao, QIN Yu-ping, GAO Hong-xu, WANG Yu-tao, MA Ai-hua. 2003. Analysis of endemic fluorosis prevention and control in Shandong[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 22(7): 384-386(in Chinese).
- ZENG Jian-hui, ZHANG Zong-hu, REN Fu-hong. 1997. Fluorine Geochemistry in the Unsaturated Soils-Shallow Groundwater Systems—A Case Study on the Xingtai Piedmont Plain, Hebei[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4): 389-396(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Lun-shan, WU Sheng, ZHOU Ji-hua, WANG Jin-hua, WANG Jian-wu. 2007. Eco-geochemical investigation on the endemic As and F poisoning in Datong Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 225-235(in Chinese with English abstract).
- ZUO Rui, GU-Peng, TEN Yan-guo, WANG Qiang, WANG Jin-sheng, WANG Bin. 2015. Spatial distribution and Genesis of the hig-fluorine groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 42(3): 135-140(in Chinese with English abstract).