

张保健, 刘福义, 高宗军, 等. 鲁西北地区理疗热矿水的形成条件及找矿靶区[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1170-1178.
Zhang Baojian, Liu Fuyi, Gao Zongjun, et al. Formation conditions and prospecting targets of physiotherapy geothermal mineral water in northwest Shandong Province[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1170-1178(in Chinese with English abstract).

鲁西北地区理疗热矿水的形成条件及找矿靶区

张保健^{1,2,3} 刘福义³ 高宗军² 张凤禹¹ 郝栓虎¹ 臧建军³

(1. 内蒙古矿业开发有限责任公司博士后科研工作站, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 山东科技大学地质资源与地质工程博士后流动站, 山东 青岛 266590; 3. 神华地质勘查有限责任公司, 北京 100011)

摘要:鲁西北地区赋存发育碳酸盐岩类裂隙-岩溶型与砂岩类裂隙-孔隙型 2 种理疗热矿水, 碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水主要为氟·锶水; 砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水主要为锶水和溴·锶水。根据对理疗热矿水形成条件的分析, 研究区内的鲁西地块阳谷-齐河凸起与坳(凹)陷区内的顶部风化壳岩溶发育的基底凸起(潜山)是碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水的找矿靶区; 华北坳陷区内深大断裂及坳(凹)陷边缘较大断裂附近的次级构造发育区是砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水的找矿靶区。

关键词:理疗热矿水; 形成条件; 找矿靶区; 鲁西北地区

中图分类号: P641.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)04-1170-09

Formation conditions and prospecting targets of physiotherapy geothermal mineral water in northwest Shandong Province

ZHANG Bao-jian^{1,2,3}, LIU Fu-yi³, GAO Zong-jun², ZHANG Feng-yu¹,
HAO Shuan-hu¹, ZANG Jian-jun³

(1. Post-doctoral Scientific Research Work Station, Inner Mongolia Mining Exploitation Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 2. Geological Resources and Geological Engineering Post-doctoral Mobile Station, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 3. Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: There are two kinds of physiotherapy geothermal mineral water developed in the northwest of Shandong Province, one referring to carbonate fissure-karst type and the other referring to sandstone fissure-pore type. The carbonate fissure-karst water belongs to Sr·F water, whereas the sandstone fissure-pore water belongs to Sr water and Br·Sr water. According to the analysis of the formation conditions of geothermal mineral water, the authors hold that the weathering crust and karst well-developed buried hill at the top of the Yanggu-Qihe uplift and depression are favorable prospecting target areas for carbonate fissure-karst geothermal mineral water, whereas the secondary structural zones near the deep faults within the North China depression and on the edge of the depression are favorable prospecting target areas for sandstone fissure-pore geothermal mineral water.

收稿日期: 2014-09-13; 改回日期: 2015-01-12

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目——西部地区博士后人才资助计划(2014M552531XB)资助。

作者简介: 张保健, 男, 1973 年生, 博士, 高级工程师, 地下水科学与工程专业, 从事水文地质、地热地质、环境地质的勘查及研究工作;

E-mail: baojianzh@sohu.com。

Key words: geothermal mineral water; formation conditions; prospecting targets; northwest Shandong Province

About the first author: ZHANG Bao-jian, male, born in 1973, doctor, senior engineer, engages in exploration and study of geothermal geology, hydrogeology and environmental geology; E-mail: baojianzh@sohu.com.

矿水应用于人类的医疗保健有着悠久的历史。我国古代史中有“神农尝百草之滋味,水泉之甘苦,令民知所避就……”的记载。汉代天文学家张衡所作《温泉赋》阐述了温泉有治病、除秽和保健的功能。我国的一些主要名温泉,都在不同历史时期有过洗浴治病的记载,表明先人在不断的实践中认识了温泉的医疗洗浴作用。

1964年国家卫生部科委给医疗矿泉所作定义为:凡自地下自然涌出或人工开采的矿泉,可供保健医疗应用者(因含有一定量有益的矿物质或气体,或者有34℃以上温度),均可称为医疗矿泉,其中水温较高者就是通俗说的温泉。当医疗温泉溶解的成分当中达到命名矿泉浓度时,可以参与命名。可见,医疗热矿水属于医疗矿泉范畴。《地热资源地质勘查规范》(GBT 11615-2010)将医疗热矿水名称调整为理疗热矿水,并确定了理疗热矿水水质标准。

近几十年来中国地热资源的勘查、开发与研究突飞猛进,发现了大量有价值的理疗热矿水井泉。但是,对于理疗热矿水的赋存分布规律及形成条件的相关研究较少,多是在发现了理疗热矿水井泉后再依据相关标准规范做出理疗热矿水水质评价。本文依据鲁西北地区大量的地热水水质资料,进行理疗热矿水水质评价,研究其赋存分布规律及形成条件,进而指出理疗热矿水的找矿靶区及依据。

1 研究区地热资源概况

研究区以太古界、古生界、中生界为基底,其上沉积了巨厚的新生代地层。新生界分布普遍,厚度大,变化也大,凹陷最深处厚度可达数千米,向凹陷边缘地带至凸起逐渐减薄。研究区在地质构造上主要为一级构造单元华北板块的二级构造单元华北拗陷的山东部分,齐广断裂和聊考断裂为华北拗陷与鲁西地块的分界断裂(图1)。研究区内又可进一步划分为3个三级构造单元、4个四级构造单元(隆起与拗陷)和8个五级构造单元(凸起与凹陷)(表1)。齐广断裂和聊考断裂等深大断裂均为近期

或现在仍有活动的断裂,这些深大断裂往往断距达数千米或断至地幔。深循环地下水沿断裂带上涌至浅部,对局部地热异常的形成起到一定作用。

从总体上看,研究区属于以传导为主的大地热流作用机制下形成的中、低温地热资源。在深度2000 m范围内,具有勘探和开发意义的热储目的层组为坳(凹)陷地段的新近系馆陶组热储、古近系东营组热储和隆(凸)起地段(即古潜山^[1])的下古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩热储三个主要热储层组。按热储层岩性特征及含水空隙类型,又可分为古近—新近系砂岩类裂隙—孔隙型热水储层和寒武—奥陶系碳酸盐岩类裂隙—岩溶型热水储层2个类型^[2]。

2 理疗热矿水的分布范围及水化学特征

本文通过分析研究区内57个地热井的水质资料,确定有30个地热井属于理疗热矿水,其分布情况见图1。由图1看出,目前研究区内已探获的碳酸盐岩类裂隙—岩溶型理疗热矿水井主要分布于鲁西地块的阳谷—齐河凸起内,砂岩类裂隙—孔隙型理疗热矿水井主要分布于华北拗陷区(山东部分)内深大断裂及较大断裂附近。

研究区理疗热矿水与非理疗热矿水井点的水质情况(表2~表3)显示:碳酸盐岩类裂隙—岩溶型理疗热矿水主要为氟·锶水,矿化度一般为3~7.5 g/L,水化学类型为SO₄-Ca水、SO₄·Cl-Ca·Na水或Cl·SO₄-Na·Ca水。由图1和表2可看出,距东南部地下热水的补给区鲁中山区由近到远,理疗热矿水的矿化度逐步升高,由3 g/L逐步增加到7 g/L以上;水化学类型由简单逐步趋向复杂,Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、Ca²⁺等组分含量显著增加,由SO₄-Ca水逐步演化为SO₄·Cl-Ca·Na水或Cl·SO₄-Na·Ca水;氟、锶、溴、锂、偏硼酸、偏硅酸等有益微量元素和组分含量表现出随温度、矿化度的增加和水-岩相互作用的时间的增长而增加的趋势,主要有益成分氟、锶的含量与矿化度呈明显的正相关关系(图2)。这说明自补给区至地下热水径流滞缓区,随着径流距离的增

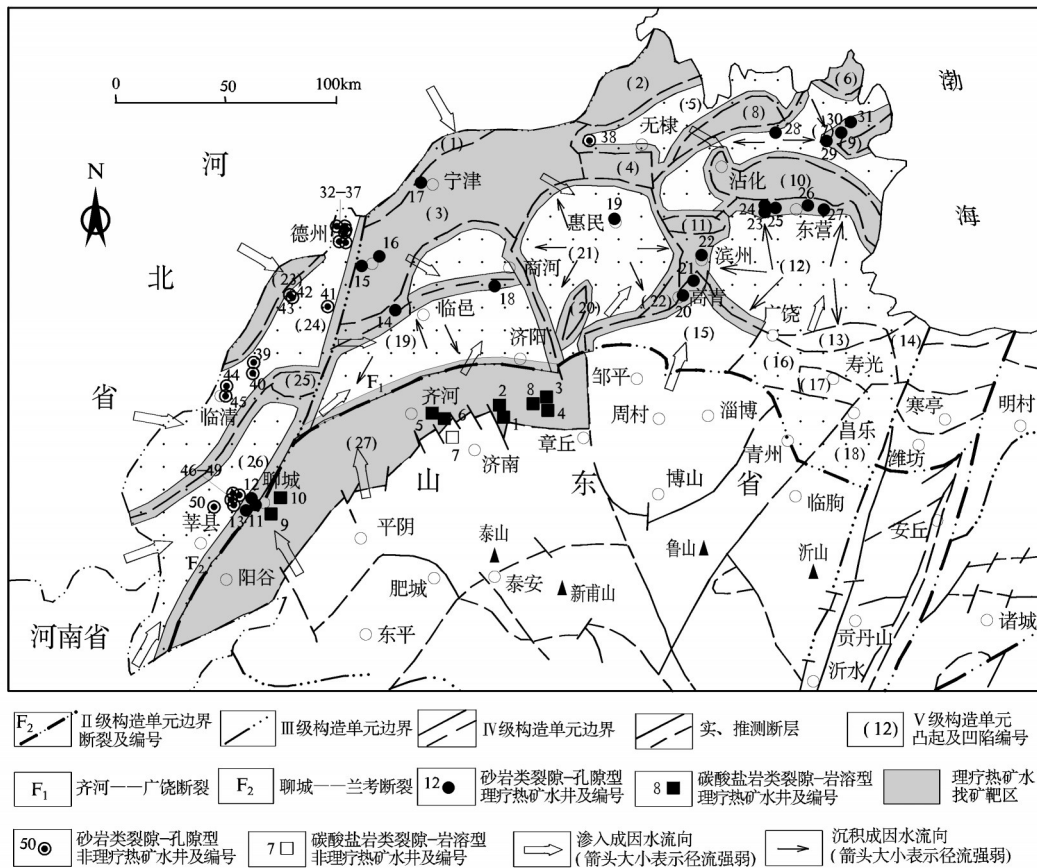


图1 鲁西北地区地质构造、理疗热矿水井及理疗热矿水找矿靶区分布图

Fig.1 Geological structure map and distribution of wells and prospecting targets of geothermal mineral water in northwest Shandong Province

表1 研究区大地构造单元划分简表

Table 1 Division of tectonic units in the study area

| I级 | II级 | III级 | IV级 | V级(数字编号见图1) |
|------|-------------|-------|----------|--|
| 华北板块 | 华北拗陷区(山东部分) | 济阳拗陷区 | 埕子口-宁津隆起 | (1)长官凹陷;(2)埕子口凸起;(3)宁津(陵县)凸起;(4)无棣凸起 |
| | | | 惠民拗陷 | (5)车镇凹陷;(6)刁口凸起;(7)沾化凹陷;(8)义和庄凸起;(9)孤岛凸起;(10)陈家庄-青驼凸起;(11)滨州凸起 |
| | | 临清拗陷区 | 临清拗陷 | (12)东营凹陷;(13)广饶凸起;(14)双河凸起;(15)博兴凹陷;(16)牛头凹陷;(17)寿光凸起;(18)昌乐凹陷 |
| | | | 鲁西地块 | 鲁西隆起区 |

加,径流深度的增深,地下热水温度相应增高,地下热水与围岩间的水-岩相互作用越充分,因而溶解的元素和组分更多。距离补给区较近的7号地热井水样地下热水的矿化度小于2 g/L,其溶解的有益微量元素和组分含量较低,尚未达到理疗热矿水的标准(图1,表3)。

由表2、表3、图1看出,总的说来,鲁西北地区砂岩类裂隙-孔隙型地下热水的矿化度自西南向东北整体上呈增加趋势,西部矿化度一般4~10 g/L,东部矿化度一般10~23 g/L。这是因为自新生代以来,济阳拗陷区沉降沉积中心逐步东移,东营组、馆陶组、明化镇组的沉积中心为渤海范围的渤中凹陷^[3-4],因此,济阳拗陷区东营组、馆陶组、明化镇组地下热水的补给来源除来自南、北部的隆起、凸起外,还有西南部拗(凹)陷区地下水的补给,地下热水总的径

表2 鲁西北地区理疗热矿水水质资料一览

Table 2 List of water quality of geothermal mineral water in northwest Shandong Province

| 地热井编号 | 地热水类型 | 温度/(°C) | 对人体有益成分含量(mg/L) | | | | | | | pH | 矿化度/(mg/L) | 水化学类型 | 矿水名称 |
|-------|-------|---------|-----------------|----------------|-----------------|-------|-------|------------------|-------|-----|------------|------------------------------|--------|
| | | | F ⁻ | I ⁻ | Br ⁻ | 锶 | 锂 | HBO ₂ | 偏硅酸 | | | | |
| 1 | | 36.2 | 4.75 | <0.10 | 2.45 | 14.30 | 1.02 | 4.75 | 22.10 | 7.4 | 5142.83 | SO ₄ -Cl-Na-Ca | 氟·锶水 |
| 2 | | 33 | 4.75 | <0.10 | 2.05 | 14.50 | 1.14 | 4.63 | 24.05 | 7.3 | 5082.81 | SO ₄ -Cl-Na-Ca-Mg | 氟·锶水 |
| 3 | 酸盐岩 | 40.6 | 5.00 | <0.10 | 3.85 | 17.60 | 2.20 | 8.85 | 29.90 | 7.3 | 7298.31 | Cl·SO ₄ -Na·Ca | 氟·锶水 |
| 4 | 类裂隙 | 42 | 5.00 | <0.10 | 4.00 | 17.32 | 2.22 | 8.85 | 31.20 | 7.3 | 7404.41 | Cl·SO ₄ -Na·Ca | 氟·锶水 |
| 5 | -岩溶 | 57 | 2.70 | <0.10 | 0.90 | 11.88 | 0.26 | 2.50 | 44.20 | 7.4 | 3470.11 | SO ₄ -Ca | 氟·锶水 |
| 6 | 型 | 43 | 3.25 | <0.10 | 0.77 | 12.50 | 0.22 | 2.75 | 35.10 | 7.9 | 3290.59 | SO ₄ -Ca | 氟·锶水 |
| 8 | | 39.9 | 3.25 | <0.10 | 3.08 | 17.25 | 2.20 | 8.50 | 33.80 | 7.2 | 7048.99 | Cl·SO ₄ -Na·Ca | 氟·锶水 |
| 9 | | 52 | 4.0 | <0.10 | 2.22 | 16.0 | 1.43 | — | 37.7 | 7.8 | 5321.79 | Cl·SO ₄ -Na·Ca | 氟·锶水 |
| 10 | | 62 | 3.9 | 0.09 | 2.08 | 15.14 | 0.942 | — | 41.57 | 6.9 | 5292.7 | Cl·SO ₄ -Na·Ca | 氟·锶水 |
| 11 | | 49.5 | 1.04 | 4.60 | 10.00 | 25.38 | 0.498 | 5.40 | 34.32 | — | 9870 | Cl-Na | 锶水 |
| 12 | | 58 | 1.50 | 3.95 | 1.80 | 13.74 | 0.438 | 4.10 | 34.87 | 7.3 | 8283.42 | Cl·SO ₄ -Na | 锶水 |
| 13 | | 53 | 0.90 | 5.50 | 7.00 | 22.31 | 0.392 | 4.70 | 34.94 | 7.2 | 10120.76 | Cl-Na | 碘·锶水 |
| 14 | | 57.5 | 1.0 | 0.5 | 4.0 | 13.94 | 0.334 | 10.0 | 39.25 | 7.2 | 8365.0 | Cl-Na | 锶水 |
| 15 | | 55 | 1.2 | 0.9 | 0.85 | 10.25 | 0.5 | 9.5 | 36.4 | 7.5 | 6343.04 | Cl-Na | 锶水 |
| 16 | | 55 | 1.3 | 1.3 | 3.6 | 10.75 | 0.2 | 10.38 | 33.8 | 7.7 | 6455.08 | Cl-Na | 锶水 |
| 17 | | 51 | 2.75 | — | — | — | — | — | — | 7.2 | 9416.39 | Cl-Na | 氟水 |
| 18 | | 56 | 1.0 | 0.56 | 4.38 | 17.0 | 0.30 | 10.75 | 39.00 | 7.5 | 9022.91 | Cl-Na | 锶水 |
| 19 | | 52 | 0.8 | 1.2 | 6.0 | 19.5 | 0.22 | 13.0 | 32.5 | 7.4 | 9479.2 | Cl-Na | 锶水 |
| 20 | 砂岩类 | 64 | 0.20 | 4.00 | 9.60 | 73.42 | 0.406 | 40.00 | 60.71 | — | 14724 | Cl-Na | 锶·偏硅酸水 |
| 21 | 裂隙- | 64 | 0.34 | 3.00 | 5.60 | 26.24 | 0.50 | 15.00 | 51.06 | — | 11926 | Cl-Na | 锶·偏硅酸水 |
| 22 | 孔隙型 | 64 | <0.1 | 3.2 | 23.75 | 50.5 | 1.7 | 23.0 | 44.2 | 7.0 | 21022.93 | Cl-Na | 锶水 |
| 23 | | 74 | 0.5 | 2.2 | 29.25 | 35.62 | 0.74 | 22.5 | 45.5 | 7.3 | 18875.67 | Cl-Na | 溴·锶水 |
| 24 | | 62 | <0.1 | 1.0 | 37.7 | 55.0 | 0.84 | 6.75 | 41.6 | 6.9 | 19078.87 | Cl-Na | 溴·锶水 |
| 25 | | 74 | 0.45 | 1.60 | 45.0 | 54.93 | 1.02 | 14.92 | 38.76 | 7.1 | 19162.42 | Cl-Na | 溴·锶水 |
| 26 | | 65 | 0.25 | 7.0 | 41.0 | 95.0 | 1.8 | 13.75 | 36.4 | 7.5 | 23012.27 | Cl-Na·Ca | 碘·溴·锶水 |
| 27 | | 60 | 0.25 | 0.80 | 41.88 | 69 | 1.65 | 4.5 | 39 | — | 21387.26 | Cl-Na | 溴·锶水 |
| 28 | | 73 | 0.65 | 2.5 | 12.0 | 8.12 | 0.32 | 9.25 | 52.0 | 7.2 | 9283.39 | Cl-Na | 偏硅酸水 |
| 29 | | 82 | 0.56 | 0.76 | 54 | — | — | 4.70 | — | — | 23764.88 | Cl-Na | 溴水 |
| 30 | | 79 | 0.4 | 0.29 | 0.72 | 85.1 | 1.987 | 8.0 | 48.1 | 7.1 | 22664.06 | Cl-Na | 锶水 |
| 31 | | 69 | 0.55 | 0.9 | 29.0 | 29.75 | 0.54 | — | 46.8 | 7.2 | 14974.07 | Cl-Na | 溴·锶水 |

注:依据《地热资源地质勘查规范(GBT 11615-2010)》F⁻、I⁻、Br⁻、锶、锂、HBO₂、偏硅酸的命名矿水浓度分别为2 mg/L、5 mg/L、25 mg/L、10 mg/L、5 mg/L、50 mg/L、50 mg/L。

流方向是自西南向东北部径流,自径流方向的上游至下游,地下热水径流越来越滞缓,变质程度增高,发生的水-岩相互作用更加充分,溶解的围岩化学元素成分更多。

砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水主要为锶水和溴·锶水,另外还有碘·锶水、锶·偏硅酸水、碘·溴·锶水、溴水等类型,由西向东,理疗热矿水类型由锶水逐步过渡为溴·锶水,溴的含量逐步增加。由西向东,矿化度整体呈增高趋势,西部矿化度一般6~10 g/L,东部矿化度一般10~23 g/L;水化学类型以Cl-Na水为主,少量为Cl·SO₄-Na或Cl-Na·Ca水。溴、锶、锂、

偏硼酸、偏硅酸等有益微量元素和组分含量表现出随温度、矿化度的增加和水-岩相互作用的时间的增长而增加的趋势,主要有益成分锶、溴的含量与矿化度呈明显的正相关关系(图3)。因此,东部地区砂岩类裂隙-孔隙型地下热水中理疗热矿水的比率明显高于西部地区(图1,表2~表3)。

3 理疗热矿水的形成条件及找矿靶区

地热田代表着一个高温条件下的化学系统,其化学特征是该系统的液体相(水、汽)与周围固体相(围岩)之间最终达到动平衡状态的反映^[5]。地下热

表3 鲁西北地区非理疗热矿水水质资料一览

Table 3 List of water quality of non-therapeutic mineral water in northwest Shandong Province

| 地热井 编号 | 地热水类型 | 温度/ (°C) | 对人体有益成分含量(mg/L) | | | | | | | pH | 矿化度/ (mg/L) | 水化学类型 |
|-----------|------------|-------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------|------------------|-------|---------|------------------------|------------------------|
| | | | F ⁻ | Γ | Br ⁻ | 锶 | 锂 | HBO ₂ | 偏硅酸 | | | |
| 7 | 酸盐岩类裂隙-岩溶型 | 38 | 1.60 | <0.10 | 0.28 | 4.58 | 0.10 | 1.38 | 31.20 | 7.3 | 1446.83 | SO ₄ -Ca |
| 32 | | 58 | 1.4 | 0.5 | 1.9 | 4.15 | 0.39 | 4.62 | 37.39 | 7.8 | 4854.91 | Cl-Na |
| 33 | | 59 | 1.08 | 0.62 | 2.4 | 5.235 | 0.2 | 6.0 | 36.55 | 8.2 | 4711.8 | Cl-Na |
| 34 | | 52 | 1.4 | 0.5 | 3.0 | 5.4 | 0.22 | 5.0 | 37.0 | 7.67 | 4932.39 | Cl-Na |
| 35 | | 54 | 1.32 | 0.45 | 3.4 | 4.15 | 0.211 | 4.4 | 37.71 | 7.75 | 4902.82 | Cl-Na |
| 36 | | 56 | 1.44 | 0.45 | 2.5 | 6.03 | 0.227 | 5.0 | 40.28 | 7.96 | 4882.38 | Cl-Na |
| 37 | | 56 | 1.3 | 0.54 | 2.05 | 5.4 | 0.36 | 5.2 | 32.5 | 7.7 | 4913.19 | Cl-Na |
| 38 | | 47 | 1.40 | 0.80 | 2.65 | 5.50 | 0.20 | 7.50 | 32.50 | 8.0 | 5448.61 | Cl-SO ₄ -Na |
| 39 | | 62 | 1.35 | 0.45 | 2.75 | 8.0 | 0.18 | 6.63 | 41.6 | 7.7 | 5300.26 | Cl-SO ₄ -Na |
| 40 | 砂岩类裂隙-孔隙型 | 62 | 1.40 | 0.70 | 2.65 | 8.50 | 0.20 | 5.75 | 45.50 | 7.7 | 5382.27 | Cl-SO ₄ -Na |
| 41 | | 58 | 1.2 | 0.8 | 2.25 | 7.75 | 0.2 | 8.25 | 36.4 | 7.8 | 5563.47 | Cl-SO ₄ -Na |
| 42 | | 53 | 1.05 | 0.60 | 2.38 | 8.50 | 0.22 | — | 46.80 | 7.7 | 5052.39 | Cl-Na |
| 43 | | 62.5 | 1.35 | 0.6 | 2.06 | 8.75 | 0.2 | 6.5 | 37.7 | 7.7 | 4811.1 | Cl-Na |
| 44 | | 63 | 1.24 | 0.55 | 0.55 | 8.01 | 0.232 | <0.04 | 46.63 | 7.78 | 5228.95 | Cl-Na |
| 45 | | 65 | 1.40 | 0.70 | 2.75 | 8.68 | 0.017 | 6.50 | 45.97 | 7.43 | — | Cl-Na |
| 46 | | 55 | 1.80 | 1.40 | 1.80 | 6.497 | 0.176 | 5.10 | 33.85 | 7.5 | 5035.87 | Cl-SO ₄ -Na |
| 47 | | 51 | 1.40 | 1.45 | 3.0 | 7.52 | 0.15 | 6.20 | 34.27 | 7.45 | 5487.54 | Cl-SO ₄ -Na |
| 48 | | 54 | 1.20 | 0.40 | 1.18 | 3.50 | 0.10 | — | 33.8 | 7.9 | 3969.60 | SO ₄ -Cl-Na |
| 49 | | 47 | 1.40 | 0.28 | 1.79 | 7.5 | 0.64 | — | 29.90 | 7.6 | 5027.91 | SO ₄ -Cl-Na |
| 50 | 45 | 1.30 | 0.45 | 1.70 | 1.95 | 0.90 | 6.00 | 39.0 | 8.1 | 4075.60 | Cl-SO ₄ -Na | |

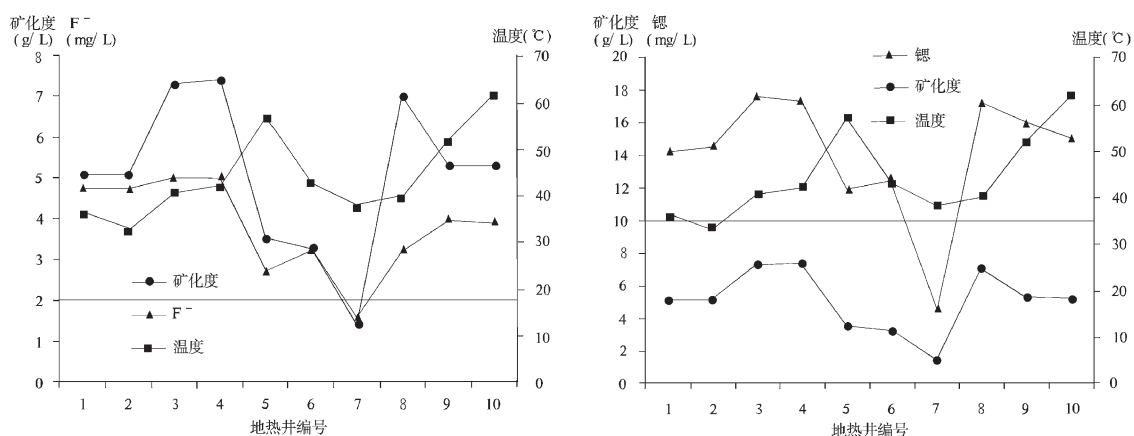


图2 碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水氟、锶含量与矿化度关系图

Fig.2 Relationship of F and Sr content with salinity of geothermal mineral water of carbonate fissure - karst type

水水文地球化学特征反映了地下热水系统的水文地球化学环境。本区地下热水中化学成分的形成和演化是含水介质的化学成分、水化学作用、沉积环境及水循环等诸多因素共同作用的结果。水文地质条件对地下热水的形成起主要作用。地下热水中化学成分及微量元素的富集受围岩、地下热水

循环交替条件及水文地球化学环境条件的制约。研究区碳酸盐岩类裂隙-岩溶型与砂岩类裂隙-孔隙型地下热水的形成条件不同。

3.1 酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水的形成条件

低温的岩溶冷水由边缘山地向盆地区区汇流,进入区域流动系统后,由于水文地质条件的差异,逐

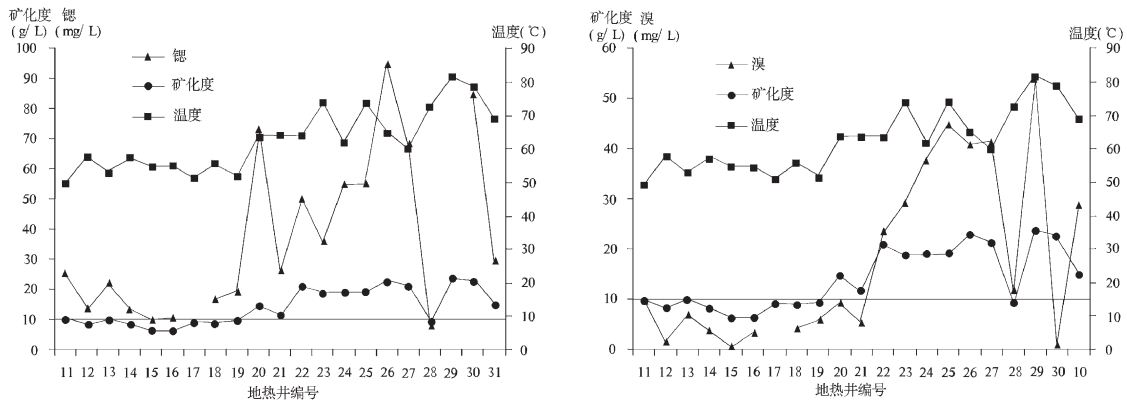


图3 砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水锶、溴含量与矿化度关系图

Fig.3 Relationship of Sr and Br content with salinity of geothermal mineral water of sandstone fissure-pore type

表4 研究区碳酸盐岩地下水萤石、天青石饱和度指数

Table 4 List of saturation indexes of fluorite and celestite of carbonate rocks

| 地热井编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 萤石 (CaF ₂) | 0.75 | 0.12 | 0.79 | 0.79 | 0.25 | 0.42 | -0.37 | 0.44 | 0.59 | 0.57 |
| 天青石 (SrSO ₄) | -0.01 | -0.01 | 0.07 | 0.07 | -0.02 | -0.01 | -0.59 | 0.05 | -0.01 | -0.05 |

渐分化成浅部流动系统和深部流动系统。浅部流动系统形成浅部的岩溶冷水。另一部分岩溶水以缓慢的流速向盆地区隔水底板较低处汇流,形成深部流动系统;在经历了较长时间的地下径流过程中,深部岩溶水不断吸收周围岩体的热量,尤其在靠近盆地边缘基底凸起(潜山)处,相对较大的热流对岩溶水进行加热,缓慢的流动速度使之有充足的时间加热,水温因此增高;同时,运移途中与碳酸盐岩热储及围岩发生水-岩反应,溶解石膏、岩盐等矿物,矿化度升高,Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、Ca²⁺等组分及微量元素含量显著增加,水化学类型由HCO₃-Ca水演变为SO₄-Ca水、Cl·SO₄-Na·Ca水或SO₄·Cl-Na·Ca水,形成阳谷-齐河凸起的碳酸盐岩类裂隙-岩溶型地下水。

研究区酸盐岩类裂隙-岩溶型地下热水中氟的含量明显高于砂岩类裂隙-孔隙型地下水。这可能三个原因:一是因为在研究区寒武-奥陶系的下部为太古宇黑云母角闪花岗岩及片麻岩,含有黑云母和角闪石成分,而黑云母和角闪石中的氟含量较高,深循环的地下水长期溶滤热储下部和围岩中的含氟岩层,使其中的氟盐和氟硅酸盐矿物发生溶解和水解,这可能是F⁻含量较高的主要原因;二是因为聊考断裂、齐广断裂等深大断裂沟通了深部

热源,地下水经过深循环,不断被加热,在此过程中使含氟矿物的溶解度增大;三是因为奥陶纪石灰岩和白云岩中常含有膏盐,石膏的溶解,导致水中钙离子增大,致使HCO₃⁻和Ca²⁺沉淀生成碳酸钙,而促使萤石的溶解。自然界中含锶的主要矿物为天青石等,天青石主要产于白云岩、石灰岩等沉积岩中,因此,锶主要富集在碳酸盐岩中,在地下热水中锶富集的最有利的环境是碳酸盐岩地层。这就是研究区碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水主要表现为氟·锶水的主要原因。7号地热井水样地下热水中萤石和天青石尚未饱和(表4),而距补给区较远的碳酸盐岩地下水萤石和天青石都处于饱和或基本饱和状态。也进一步说明随温度、矿化度的增加和水-岩相互作用的时间的增长碳酸盐岩地下热水中氟和锶的含量是逐步增加的。

3.2 砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水的形成条件

总的来说,济阳-临清坳陷区是华北坳陷的一部分,坳陷区地下水属于中、新生代沉积盆地中的地下水系统,所处水动力环境为大型盆地(华北盆地)内部的径流滞缓带。为盆地周边山区地下水进入盆地内部的径流滞缓带转为长距离的水平(近水平)运移,吸取岩层热量并与所赋存的岩层发生较充分的水-岩相互作用,溶解岩层中的岩盐等

成分而形成的。由于热水被封存于缺氧的较封闭的水文地球化学环境中,在漫长的地质历史演化过程中热水的水化学类型趋于一致,以Cl-Na水为主,地下热水的可更新能力差。因此,总的说来自地下热水的补给区直至拗陷区内部的沉积中心,地下热水径流越来越滞缓,变质程度增高,发生的水-岩相互作用更加充分,溶解的围岩化学元素成分更多。因此,自径流方向的上游至下游,理疗热矿水出现的概率逐步增大。

作为沉积盆地地下水的一个组成部分,要全面掌握拗陷区地下热水的形成条件,就有必要了解整个沉积盆地的地下水动力场及水化学场的特征及其形成演化过程。自20世纪80年代末以来,国内外学者在沉积盆地地下水动力学方面开展了一系列卓有成效的研究工作,如 Berg et al.^[6], Chapman^[7], Toth^[8]在重力作用下的地下水流动模式方面做了大量的研究工作,杨绪充^[9]总结了沉积盆地地下水动力场的基本特征,地质矿产部水文地质工程地质研究所^[10]、刘方槐等^[11]、李伟等^[12]分别对含油气沉积盆地的油田水文地质学和水文地球化学作了详细的研究。李春光^[13]、杨绪充^[14]、王志欣^[15]、曾溅辉^[16]、楼章华^[17]、陈中红^[18]等分别从不同角度研究阐述了研究区拗陷区的地下水动力场及水化学场的特征及其形成演化。

当今石油水文地质工作者就含油气盆地水文地质特征研究方面,形成了“在沉积盆地内地下水

的区域性流动,存在着两种流动方向截然不同的水流——向盆地内部流动的渗入成因和向盆地周边流动的沉积成因水流”的共识^[12],即在沉积盆地中存在着两种不同成因的水动力系统,一种是渗入水动力系统,另一种是沉积承压水动力系统;两种成因的地下水在碎屑岩层中均具有区域性水动力联系。渗入成因水在重力作用下,沿盆地边缘(补给区)流向盆地中心(排泄区),表现为“向心流”;沉积成因水主要来自盆地内沉积物经压实(异常高压)而被排挤出来的水,其流动方向是从盆地沉积中心向周边呈“离心”式流动(图4)。

这种沉积盆地内渗入成因水和沉积成因水共存的认识同样可以用来分析研究拗陷区地下热水的形成演化过程。有关研究表明,研究区内拗陷区异常高压一般在埋深2000 m左右开始出现^[12,16,19]。大约2000 m以上为正常静水压力带,主要受地表水活动的影响,水交替活动强烈,流体运动主要表现为大气降水向心流方式;2000 m以下为封闭性水文迟缓带,开始受异常高压系统影响,在该带矿化度、氯离子等物质含量相对处于稳定高值,水交替活动很弱,水文活动迟缓,是相对封闭的水文地质系统。李春光^[13]在研究东营、惠民盆地油田水与油气聚集关系时发现,在惠民盆地(沙河街组)二段油田水的高含盐度带断层走向分布,并指出其原因主要是深层高含盐度地层水沿断层运移并侵入浅层,在断层伴生圈闭中聚集的结果。张保健^[20-21]通过研究指

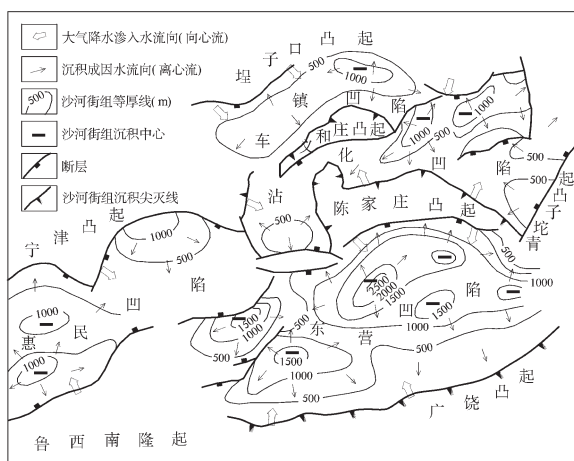


图4 济阳拗陷沙河街组沉积成因水的运动方向^[14]
Fig.4 Movement direction of sedimentary water of Shahejie Formation in Jiyang depression

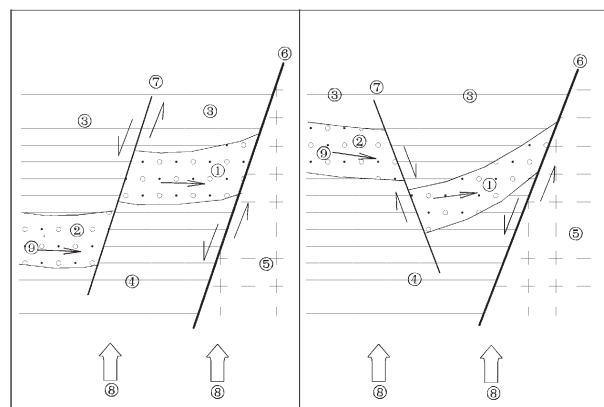


图5 圈闭型地下热储概念模式示意图^[20]
①—圈闭型砂岩类热储;②—非圈闭型砂岩类热储;③—热储盖层(泥岩类);④—热储底部岩层;⑤—构造凸起;⑥—主干断裂;⑦—一次级断裂;⑧—热源;⑨—水源
Fig.5 Schematic diagram of conceptual model of trapped heat storage

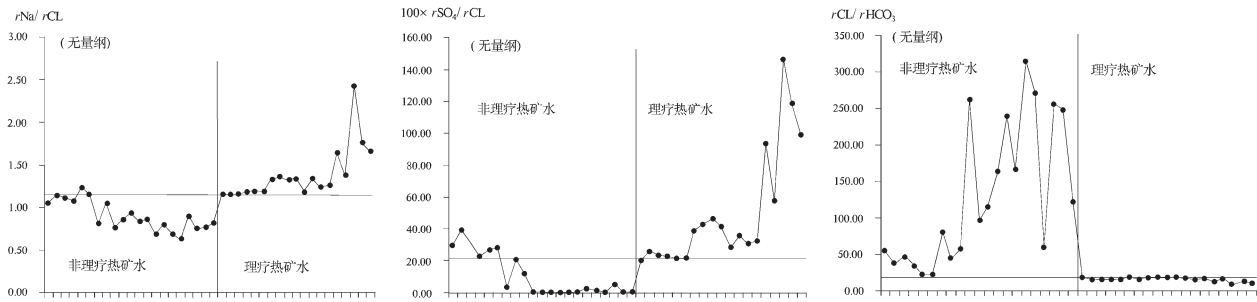


图6 理疗热矿水与非理疗热矿水特征系数对比关系图

Fig.6 Comparison of characteristic coefficients of therapeutic and non-therapeutic geothermal mineral water

出,在研究区坳(凹)陷边缘处于构造密集区的圈闭型地下热水(图5)由于含有一部分来自盆地中心的与热储本身同层位或深部地层的沉积成因水,矿化度、主要组分和微量元素含量显著增高,地下热水的可更新能力很差(表2)^[21]。通过变质系数(rNa^+ / rCl^-)、脱硫系数($100 \times rSO_4^{2-} / rCl^-$)和盐化系数($rCl^- / (rHCO_3^- + rCO_3^{2-})$)的组合关系,可以反映出地层水的封闭程度和变质程度。由图6看出,理疗热矿水的变质系数和脱硫系数一般要明显比非理疗热矿水高,而盐化系数明显比非理疗热矿水低,说明理疗热矿水比非理疗热矿水封闭越好、越浓缩,变质越深,受渗入水的影响越小。由于水-岩相互作用更充分,锶、溴等微量元素含量明显高于非理疗热矿水。

3.3 理疗热矿水的找矿靶区

研究区内已探获的碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水井主要分布于鲁西地块的阳谷-齐河凸起内,砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水井主要分布于华北坳陷区(山东部分)内深大断裂及较大断裂附近。因此,根据上述对研究区理疗热矿水形成条件的分析,在研究区内的鲁西地块阳谷-齐河凸起与坳(凹)陷区内的顶部风化壳岩溶发育的基底凸起(潜山)是碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水的找矿靶区;华北坳陷区(山东部分)内深大断裂及坳(凹)陷边缘较大断裂附近的次级构造发育区是砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水的找矿靶区(图1)。

4 结论

鲁西北地区赋存发育碳酸盐岩类裂隙-岩溶型与砂岩类裂隙-孔隙型2种理疗热矿水,碳酸盐岩类

裂隙-岩溶型理疗热矿水主要为氟·锶水;砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水主要为锶水和溴·锶水。研究区内的鲁西地块阳谷-齐河凸起与坳(凹)陷区内的顶部风化壳岩溶发育的基底凸起(潜山)是碳酸盐岩类裂隙-岩溶型理疗热矿水的找矿靶区;华北坳陷区内深大断裂及坳(凹)陷边缘较大断裂附近的次级构造发育区是砂岩类裂隙-孔隙型理疗热矿水的找矿靶区。

参考文献(References):

- [1] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321(in Chinese with English abstract).
- [2] 尚宇宁, 高明志, 吴立进, 等. 济南北部地热资源区划研究[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 778-783.
Shang Yuning, Gao Mingzhi, Wu Lijin, et al. Division of geothermal resources in northern Jinan[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 778-783(in Chinese with English abstract).
- [3] 国景星. 济阳坳陷上第三系沉积体系研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2002.
Guo Jingxing. Sedimentary System of the Upper Tertiary of Jiyang Depression[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2002 (in Chinese with English abstract).
- [4] 苏宗福. 济阳坳陷古近系区域层序地层对比与岩性-地层圈闭有利区带预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
Su Zongfu. Regional Sequence Stratigraphic Correlation and Predication of Favorable Lithologic Stratigraphic Traps Zones for Palaeogene in Jiyang Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002(in Chinese with English abstract).
- [5] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1983:135.
Shen Zhaoli. Hydrogeochemical Basis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983:135(in Chinese).

- [6] Berg R R Demis W D, Mitsdarffer A R. Hydrodynamic effects on Mission Canyon (Mississippian) oil accumulations, Billings Nose area, North Dakota[J]. AAPG Bull., 1994, 78: 501-518.
- [7] Chapman R E. Effects of oil and gas accumulation on water movement[J]. AAPG Bull., 1982, 66: 368-378.
- [8] Toth J. Gravity-induced cross-formational flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada: analysis, patterns and evolution[J]. Water Resources Research, 1987, 14(5): 805-843.
- [9] 杨绪充. 论含油气盆地的地下水动力环境[J]. 石油学报, 1989, 10(4): 27-34.
Yang Xuchong. On the underground hydrodynamic environment in an oil and gas basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(4): 27-34 (in Chinese with English abstract).
- [10] 地质矿产部水文地质工程地质研究所. 油田古水文地质与水文地球化学——以冀中坳陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 10-26.
Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. Paleohydrogeology and Hydrogeochemistry for Oil Fields——A Case Study from the Central Hebei Depression[M]. Beijing: Science Press, 1987: 10-26 (in Chinese).
- [11] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 55-95.
Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principle of Hydrogeology in Oil and Gas Fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-95 (in Chinese).
- [12] 李伟, 赵克斌, 刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
Li Wei, Zhao Kebin, Liu Chongxi. Study of Petroliferous Basin Hydrology Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008 (in Chinese).
- [13] 李春光. 论山东东营、惠民盆地油田水与油气聚集关系[J]. 地质论评, 1994, 40(4): 340-346.
Li Chunguang. The relationship between oil-field water and hydrocarbon accumulation in the Dongying and Huimin basins, Shandong[J]. Geological Review, 1994, 40(4): 340-346 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨绪充. 济阳坳陷古水文地质条件与油气移聚[J]. 石油实验地质, 1986, 8(3): 205-214.
Yang Xuchong. The paleohydrogeological condition and the migration-accumulation of oil and gas in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1986, 8(3): 205-214 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王志欣, 信荃麟. 东营凹陷压实水水动力特征[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 21-25.
Wang Zhixin, Xin Quanlin. Hydrodynamics of compaction driven flow in the Dongying depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- [16] 曾贇辉. 东营凹陷第三系流体物理化学场及演化[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 212-219.
Zeng Jianhui. Fluid physicochemical field and its evolution in Tertiary system, Dongying Sag[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 212-219 (in Chinese with English abstract).
- [17] 楼章华, 朱蓉, 金爱民, 等. 东营凹陷地下水动力场的形成与演化[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 85-96.
Lou Zhanghua, Zhu Rong, Jin Aimin, et al. Formation and evolution of hydrodynamic field in the Dongying depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(1): 85-96 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈中红, 查明, 刘太勋. 东营凹陷古近系古湖盆演化与水化学场响应[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 705-714.
Chen Zhonghong, Zha Ming, Liu Taixun. Response and evolution of formation water chemical fields of the Paleogene in Dongying sag[J]. Journal of Lake Science, 2008, 20(6): 705-714 (in Chinese with English abstract).
- [19] 许晓明, 刘震, 谢启超, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷异常高压特征分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 345-349.
Xu Xiaoming, Liu Zhen, Xie Qichao, et al. Overpressure characteristics in the Jiyang depression, The Bohaiwan basin[J]. Petroleum Geology Experiment, 2006, 28(4): 345-349 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张保建, 文冬光, 沈照理, 等. 一种值得重视的地热资源概念模式——构造圈闭型地热资源[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 927-931.
Zhang Baojian, Wen Dongguang, Shen Zhaoli, et al. An important geothermal resource conceptual model—Geothermal resource of structural trap-type[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 927-931 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张保建. 鲁西北地区地下热水的水文地球化学特征及形成条件研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
Zhang Baojian. Hydrogeochemical Characteristics and Formation Conditions of the Geothermal Water in Northwestern Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011 (in Chinese with English abstract).