

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008038

# 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

李明辉,袁建飞,黄从俊,刘慧中,郭 镜

(中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081)

**摘要:**岩溶热储赋存丰富的中-低温地热水,是广安市地热资源勘探和开发的主要目的层。通过地热地质、地球物理、地球化学和环境同位素等方法对手段对广安地区铜锣山背斜热储性质及成因模式进行了探讨。研究表明:①区内地温梯度值每百米为 1.8~2.0℃,水温为 26~42℃,水化学类型为  $\text{SO}_4\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$  型,属于低温中性热矿水。②氢氧同位素显示地热水的主要补给来源为大气降水,补给高程超过 1 100 m,位于区域北部的大巴山一带,具有较远的补给来源及较长的径流途径。③音频大地电磁测深解译成果和 2 503 m 地热钻井测温曲线揭示,牟家镇刘家沟村地下 800~1 100 m 存在低阻层和温度拐点,推测为导水断裂带。基于地热钻探认识、物探解译成果、水文地球化学和同位素分析结果,概化其地热成因模式为:大气降水在高隆起背斜槽谷区渗入地下,沿溶隙、管道和构造通道自北向南形成深部径流,吸收岩石热量后成为热水,并于河流深切峡谷地段以天然温泉出露或以地热井形式被人工揭露。此项研究可为广安市地热勘探、开发和利用提供科学依据。

**关键词:**铜锣山背斜;热储;成因模式;地热资源;广安市

中图分类号: P314.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0036-11

## A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

LI Minghui, YUAN Jianfei, HUANG Congjun, LIU Huizhong, GUO Jing

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** Abundant geothermal water of low-medium temperature occurs in the karstic geothermal reservoirs, which are the major target strata for the exploration and exploitation of geothermal resources in the city of Guang'an. In this paper, methods and means of geothermal geology, geophysics, geochemistry and environmental isotopes are used and the characteristics and genesis of the geothermal reservoirs in the Tongluoshan anticline are discussed. The comparative studies of regional geology, geological structure and geothermal wells suggests that (1) the regional geothermal gradients, water temperatures, and hydrochemical type are 18~20℃/km, 26~42℃ and  $\text{SO}_4\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$  type, suggesting a neutral and low-temperature thermal mineral water. (2) The thermal groundwater is of meteoric origin, and the recharge area is located in the Daba Mountain area to the north with an elevation of more than 1 100 m, indicating a deep groundwater circulation and a long flow path indicated by oxygen and hydrogen isotopes. (3) Results of the audio frequency magnetotelluric method and measured temperature curve of a geothermal well drilled to a depth of 2 503 m suggest a water conducted zone at depth of 800~1 100 m, since there is an area with low resistance

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2020-09-18

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190524); 成都地质调查中心科技基金项目 (KJ201867)

第一作者: 李明辉 (1968-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水工环方面的调查和研究工作。E-mail: lmh680408@163.com

通讯作者: 袁建飞 (1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质和水文地球化学研究工作。

E-mail: jianfeiyuan@163.com

belt and remarkable inflexion. Based on the results of geothermal drilling, the audio frequency magnetotelluric method, hydrogeochemistry and environmental isotopes, the genetic model of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline are summarized. Groundwater receives recharge from precipitation in valley areas of the high-ridge anticline, flows from north to south through dissolved-fissure, karst conduit, and structural channels. Thermal groundwater receives heat from heat flow and discharges naturally in the deep section of the canyon and/or tapped artificially by geothermal wells. This study may provide a scientific basis for geothermal exploration, development and utilization for the local government in the city of Guang'an.

**Keywords:** Tongluoshan anticline; geothermal reservoir; genetic model; geothermal resources; Guang'an city

在能源短缺、环境污染严重的今天,新能源和可再生能源的勘探与开发成为世界经济可持续发展的前提<sup>[1]</sup>。地热水是一种集热能、矿物质和水于一体的新型清洁能源和特殊矿产资源,具有分布广泛、可再生性等特点<sup>[2-3]</sup>,其开发利用对构建资源节约型和环境友好型社会、保障国家能源安全、改善能源结构、促进节能减排目标实现具有重要战略意义<sup>[4-7]</sup>。

广安市地处四川盆地东部,其东部为川东褶皱构造带<sup>[8]</sup>,构造带北东端的达州市及南西端的“中国温泉之都”重庆市均有较好的地热资源勘探与开发背景<sup>[7,9-21]</sup>,但构造带中段的广安地区地热资源勘探成效不大,致使区域热储性质及成因模式研究尚属空白。2019年中国地质调查局成都地质调查中心在铜锣山背斜西翼的广安市邻水县牟家镇刘家沟实施了1口井深2 503 m地热试验井,钻获日涌水量16 000 m<sup>3</sup>、孔口水温42℃、孔口压力1.4 MPa的自流地热水,为川渝两地涌水量最大的地热井。本文基于地热井的成功实施和前人资料综合分析研究,探讨了广安铜锣山背斜热储性质及成因模式,进一步丰富和完善了川东褶皱带控热机理,为广安市地热资源勘探、开发和利用提供了科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理

邻水县地处广安市东部,交通便捷,为川东门户,成渝双城经济圈川渝合作最前沿。属四川盆地东北部的川东平行岭谷地貌,以中、低山及丘陵为主,境内华蓥山、铜锣山、明月山由西向东平行展布,大洪河、御临河蜿蜒其间,形成“三山两槽”的独特地貌。广安铜锣山地区地热井位于邻水县牟家镇刘家沟村。

### 1.2 气象与水文

邻水县属亚热带湿润季风气候,年平均降水量1 206.8 mm,全年各季降水量分配不均,夏季平均降水量528.8 mm,冬季平均降水量66.5 mm。多年平均

气温16.9℃,1月平均气温6.1℃,7月平均气温27.3℃。区内水文网较密集,水量丰沛,河流均由北东流向南西平行排列,为长江水系的支流,主要有御临河、白水河、大洪河等。

### 1.3 地质与构造

广安市属四川中拗陷构造区域,NE向构造为主,以华蓥山大断裂为界可划分为2个型式及强度迥异的次级构造区<sup>[8]</sup>。华蓥山以西属于川中褶皱带、以东属于川东褶皱带。川东褶皱带属晚三叠世以来由SSE往NWW方向推挤,于华蓥山大断裂一带受阻后逐渐隆起并褶皱的地带,其构造形迹主要表现为一系列相互平行的长条形不对称褶曲和走向压性断裂,主要由华蓥山背斜、铜锣峡背斜、明月峡背斜等3条呈北东南西向延伸的长大紧闭背斜近平行排列组成,宽一般5~7 km,形成线形构造鲜明的褶皱带,其间为相对宽缓的向斜,宽10~20 km,具“隔挡式”构造型式(图1)。华蓥山背斜在西南部呈现向西南撇开的似帚状构造带,形成沥鼻峡、温塘峡和观音峡3个分支背斜。背斜核部多出露中下三叠统碳酸盐岩地层,翼部及向斜部位出露上三叠统和侏罗系碎屑岩,第四系地层零星分布(图1)。岩浆岩仅有二叠系峨眉山玄武岩,但在铜锣山地表未见出露。

### 1.4 水文地质

研究区属川东褶皱带复杂水文地质区,根据地下水赋存条件、水动力特征,结合含水介质组合状况,可将地下水类型划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水和基岩裂隙水4类。根据岩性结构特征,其中碎屑岩类孔隙裂隙水可划分为碎屑岩类孔隙裂隙层间承压水、红层承压水和相对隔水岩层;碳酸盐岩类裂隙溶洞水可划分为碳酸盐岩裂隙溶洞水、碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙溶洞水2个亚类;基岩裂隙水可划分为构造裂隙水和风化带网状裂隙水,见表1。

区内与地热相关的主要是碳酸盐岩类裂隙溶洞

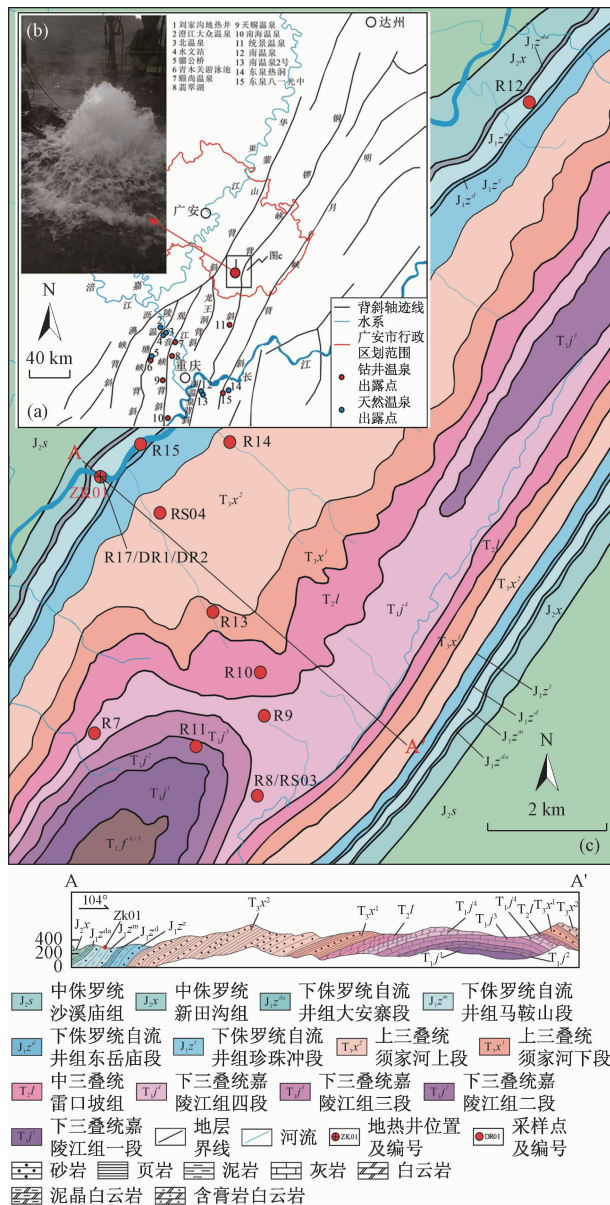


图1 铜锣山背斜地质构造、地热显示与钻孔及采样点分布图

Fig.1 Map showing geological structure, geothermal features and sampling points in the Tongluoshan anticline

(a) 研究区区域位置及构造纲要图; (b) 牟家镇刘家沟地热井孔口自流照片; (c) 研究区地质简图与剖面图(A-A')

水,主要分布在三叠系中、下统碳酸盐岩地层的裂隙、溶隙、溶蚀孔洞及溶穴中。根据研究区岩溶水的径流模式、埋藏深度、水文地球化学特征及出露方式,可划分为浅层岩溶水和深部岩溶热水2个系统<sup>[22-23]</sup>。

浅层岩溶水埋深较浅,水温和常温接近。主要接受大气降水补给,向当地最低侵蚀基准面运动,受隔水底板顶托或受河流切割影响排泄于陡崖边、河谷底板或地势低洼处,具“分散补给、统一径流、集中排泄”的特征<sup>[12-23]</sup>。

深部岩溶水埋深大,补给来自远处可溶岩地层地表露头的大气降水入渗,降水在背斜岩溶槽谷内顺构造线沿可溶岩地层向深部径流<sup>[12-23]</sup>,于背斜两翼加热形成热水,埋藏深度一般在深度500~2 000 m。

## 2 研究方法

本次采用地热地质调查、地球物理勘探、地热钻探和水文地球化学方法对广安铜锣山背斜热储性质及其热水成因模式开展研究工作。

### 2.1 地热地质调查

为了掌握广安铜锣山背斜地热显示特征及热储性质,采用一般区域和重点区域两种形式的地热地质调查工作。前者是了解铜锣山背斜地热露头及热储性质,后者则是查明地热拟开发区块内热储层结构、热水补径排特征及开发潜力,以指导地热勘探试验井实施。

在拟布钻孔区开展1:10 000地热地质调查约40 km<sup>2</sup>,完成1:5 000地热地质剖面1条(剖面长度7.5 km),同时进行泉、井、地表水及岩溶地貌点调查48处。

### 2.2 地球物理勘探

布设4条剖面开展音频大地电磁(AMT)勘探,以掌握该区深部地层结构、构造展布及含水岩组特征<sup>[24]</sup>。剖面1(M1)自华蓥山背斜西翼至铜锣山背斜东翼,长约20 km,点距200 m,采集103个点;剖面2(M2)自华蓥山背斜东翼至铜锣山中西部,长约10 km,点距200 m,采集45个点;剖面3(M3)自邻水向斜至铜锣山背斜东翼,长约10 km,点距200 m,采集23个点;剖面4(M4)于铜锣山西翼布设,长约4.5 km,点距200 m,采集23个点。

本次使用加拿大凤凰公司生产的V5-2000系列,包括2台主机、2台分机、2套AMT磁探头、1套MT磁探头。工作前,对仪器设备进行标定和一致性实验,以保证仪器精度满足要求。

使用加拿大生产的SCIP样品测试仪对244块岩石开展电性测定,结果见图2。从图2可知,研究区岩石电性存在明显差异,灰岩电阻率最大,砂岩次之,泥岩最小。

### 2.3 地热钻探

2019年8月,中国地质调查局成都地质调查中心在广安铜锣山背斜中段邻水县牟家镇刘家沟村马渡河左岸组织实施了1口井2 503 m深的地热井。开孔地层为侏罗系自流井组,终孔地层为二叠系长兴组,先后

揭穿 4 层含水层、3 层热储层,成井后井口水温为 42 ℃,日涌水量为 16 000 m<sup>3</sup>,为川渝地区出水量最大的地热井。

表 1 广安铜锣山地区地下水类型及含水岩组特征

Table 1 Characteristics of aquifers and groundwater types in the area of Tongluoshan near Guang'an

| 地下水类型      |               | 含水岩组                                                                                                | 含水岩组特征                                                       |
|------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 类          | 亚类            |                                                                                                     |                                                              |
| 碎屑岩类裂隙孔隙水  | 松散岩类孔隙水       | Q <sub>4</sub> 、Q <sub>3</sub>                                                                      | Q <sub>4</sub> 以冲洪积物为主,并含有少量残坡物;Q <sub>3</sub> 为粉砂土、黏砂土夹卵砾石层 |
|            | 碎屑岩类孔隙裂隙层间承压水 | T <sub>3xj</sub>                                                                                    | 以砂岩夹页岩为主夹煤层,砂岩 85.7%。                                        |
|            | 红层承压水         | J <sub>1z</sub> 、J <sub>1-2z</sub> 、J <sub>2x</sub> 、J <sub>2xs</sub> 、J <sub>2s</sub> <sup>1</sup> | 泥岩、页岩、砂岩等,裂隙较发育,裂隙率 4.1%                                     |
| 碳酸盐岩类裂隙溶洞水 | 碳酸盐岩裂隙溶洞水     | T <sub>2l</sub> 、T <sub>1j</sub>                                                                    | 灰岩、白云质灰岩、白云岩夹膏盐、页岩,其中碳酸盐岩占 91.2%,岩溶强烈发育,富含岩溶水                |
|            | 碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙溶洞水 | T <sub>1f</sub>                                                                                     | 结晶灰岩、白云岩、燧石灰岩、泥质灰岩夹页岩、粉砂岩,碳酸盐岩占 71.4%,岩溶较发育                  |
| 基岩裂隙水      | 构造裂隙水         | J <sub>2s</sub> <sup>1</sup>                                                                        | 泥岩夹砂岩,含薄片石膏,受区域构造影响,构造裂隙占主导,为地下水赋存提供空间                       |
|            | 风化带网状裂隙水      | J <sub>2s</sub> <sup>2</sup>                                                                        | 泥岩夹砂岩、粉砂岩,间有薄片状石膏                                            |

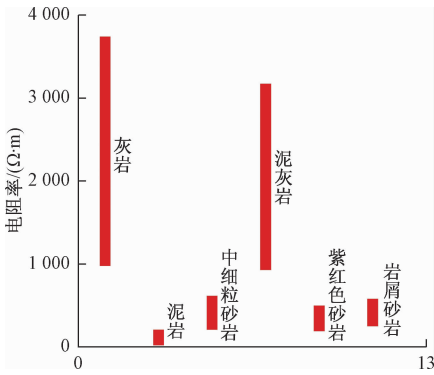


图 2 研究区岩石电性测试统计结果

Fig. 2 Statistics of electrical properties of rocks in the study area

2.4 水文地球化学

2019 年 8 月—11 月共采集水样 19 组,其中,雨水样 1 组,地热水样 6 组,地下冷水 9 组,河水 3 组,采样点分布见图 1。所有水样当日采用 0.45 μm 的微孔滤膜进行抽滤,并分成 3 份,分别用于氢氧同位素分析(δD 和 δ<sup>18</sup>O)、阴离子测试和阳离子测试。其中,用于阳离子测试的水样加入优级纯硝酸至 pH 值小于 2。

采样时,现场测定包括水温、pH、总溶解性固体(TDS)等指标。碱度(以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>计)当日采用稀盐酸(0.05 mol/L)滴定,其他指标在水样采集后 2 周内进行测试。阴离子、阳离子和氢氧同位素均在中国地质大学(武汉)环境学院测定,所有测试水样化学组分平行样误差均在 5% 以内,氢同位素和氧同位素测定仪器误差分别小于 0.5‰和 0.1‰。测试结果见表 2。

3 结果与分析

3.1 研究区地热热储结构及性质

3.1.1 热源及热水类型

研究区内无现代火山岩浆(侵入岩及喷出岩)活动,最近的岩浆岩为上古生界晚二叠系喷发的峨眉山玄武岩,其形成时代久远,残余热量已经消失殆尽。因此,与熔融热源关系不大。

鉴于该区无特殊热源,地温场热源主要属深循环地热,地热温度随深度增加而增加,在常温带以下按一定梯度升高。区内地热场与区域地热场基本一致。地热水形成机制与盆地内其它地区相似,主要为地下水通过深循环接受地温场正常增温,根据对项目邻区地热井的调查表明,区内地温梯度值每百米为 1.8 ~ 2.0 ℃。在背斜的缓翼,地热水温度及地热梯度较核部和陡翼高,这是由于背斜核部相对平缓,碳酸盐岩地层出露,岩溶发育,属于地下水补给区,而背斜陡翼一带,受地层产状影响,地下水径流速度快,吸收岩石热量增温程度偏弱。

区内地热水的形成属于“低温对流型地热系统”,即含水层在露头区接受大气降水及地表径流补给后,沿层间裂隙、构造裂隙、溶隙、溶洞等顺层间由上而下向深部径流,并吸收围岩温度和可溶盐类组分后,汇集形成地热水。

3.1.2 热水储层及盖层

区内地表出露的主要热储含水层有三叠系上统须家河组(T<sub>3x</sub>)砂岩、页岩层间裂隙含水岩组,三叠系中下统雷口坡组、嘉陵江组(T<sub>2l</sub>+T<sub>1j</sub>)碳酸盐岩类裂隙溶洞含水岩组和二叠系茅口组、栖霞组(P<sub>m</sub>+P<sub>q</sub>)古岩溶含水岩组,共三大含水岩组。

表 2 研究区水样的水化学成分和同位素组成测试结果  
Table 2 Hydrochemical and isotopic compositions of water samples in the study area

| 编号   | 类型   | 含水层 | 温度/<br>℃ | pH   | TDS     | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | /(mg·L <sup>-1</sup> ) |                               |                               |                |       | SiO <sub>2</sub> | δD    | δ <sup>18</sup> O | 水化学类型  |                                          |
|------|------|-----|----------|------|---------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------|------------------|-------|-------------------|--------|------------------------------------------|
|      |      |     |          |      |         |                 |                |                  |                  | Cl <sup>-</sup>        | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F <sup>-</sup> | Li    |                  |       |                   |        | Sr                                       |
| R7   | 暗河   | Tj  | 16       | 6.62 | 219.3   | 2.05            | 1.18           | 89.80            | 6.85             | 2.33                   | 19.50                         | 265.92                        | 0.023          | —     | 1.14             | 7.59  | -41.45            | -6.91  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R8   | 暗河   | Tj  | 14       | 6.52 | 221.9   | 2.36            | 1.69           | 98.20            | 7.20             | 4.02                   | 22.60                         | 265.92                        | —              | —     | 0.86             | 8.14  | -43.62            | -7.47  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R9   | 岩溶泉  | Tj  | 18       | 6.80 | 237.0   | 1.69            | 1.36           | 91.90            | 17.10            | 4.21                   | 23.50                         | 352.22                        | 0.138          | —     | 0.22             | 8.61  | -38.93            | -6.57  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R12  | 坑道水  | Tj  | 18       | 7.19 | 286.7   | 3.38            | 2.41           | 106.00           | 32.40            | 1.74                   | 110.00                        | 314.25                        | 0.362          | 0.025 | 2.22             | 13.71 | -46.15            | -8.05  | HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> —Ca·Mg |
| RS02 | 岩溶泉  | Tj  | 18       | 6.74 | 232.4   | 2.24            | 1.03           | 89.10            | 28.60            | 1.08                   | 44.40                         | 333.41                        | 0.166          | —     | 0.37             | 11.04 | -44.15            | -7.20  | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg                  |
| RS03 | 岩溶泉  | Tj  | 18       | 6.64 | 213.0   | 1.79            | 1.08           | 103.00           | 8.69             | 2.71                   | 21.30                         | 329.51                        | 0.033          | —     | 0.60             | 8.72  | -43.16            | -7.09  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R10  | 泉    | Q   | 18       | 7.00 | 272.8   | 1.61            | 1.12           | 84.40            | 32.30            | 2.19                   | 39.40                         | 384.43                        | 0.294          | 0.004 | 0.09             | 9.02  | -42.82            | -7.26  | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg                  |
| R11  | 泉    | Tx  | 16       | 4.71 | 17.77   | 1.88            | 1.07           | 3.50             | 1.44             | 0.594                  | 5.60                          | 14.20                         | —              | —     | 0.03             | 14.23 | -43.30            | -7.65  | HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> —Ca·Mg |
| RS04 | 钻孔   | Tx  | 23       | 6.45 | 666.3   | 11.8            | 4.13           | 328.00           | 70.80            | 3.43                   | 718.74                        | 241.03                        | 1.40           | 0.083 | 8.04             | 21.30 | -57.69            | -8.84  | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg                   |
| R16  | 地热钻孔 | Tj  | 30       | 6.69 | 749.8   | 2.41            | 2.63           | 393.00           | 58.30            | 1.35                   | 896.00                        | 225.26                        | 1.68           | 0.045 | 8.14             | 14.49 | -59.67            | -9.42  | SO <sub>4</sub> —Ca                      |
| R17  | 地热钻孔 | Tj  | 42       | 6.99 | 1 285.0 | 28.70           | 9.87           | 817.00           | 139.00           | 15.8                   | 1851.00                       | 192.21                        | 2.38           | 0.233 | 11.20            | 23.57 | -65.02            | -9.90  | SO <sub>4</sub> —Ca                      |
| RS01 | 地热钻孔 | Tj  | 26       | 6.60 | 448.3   | 4.56            | 1.88           | 226.00           | 43.90            | 3.00                   | 335.00                        | 317.30                        | 1.807          | 0.028 | 4.80             | 15.34 | -50.90            | -8.02  | HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> —Ca    |
| RS05 | 地热钻孔 | Tj  | 31       | 6.63 | 747.9   | 2.59            | 2.92           | 401.00           | 67.50            | 1.40                   | 884.74                        | 195.26                        | 1.67           | 0.055 | 8.27             | 15.17 | -59.62            | -9.33  | SO <sub>4</sub> —Ca                      |
| DR01 | 地热钻孔 | Tx  | 37       | 7.36 | 1 512.0 | 355.00          | 11.90          | 472.00           | 68.10            | 25.60                  | 2114.00                       | 91.53                         | 0.102          | 0.252 | 9.56             | 20.74 | -66.77            | -10.07 | SO <sub>4</sub> —Ca·Na                   |
| DR02 | 地热钻孔 | Tj  | 42       | 7.02 | 1 298.0 | 36.00           | 11.60          | 673.00           | 178.00           | 18.10                  | 1902.00                       | 201.37                        | 2.68           | 0.236 | 11.10            | 22.93 | -65.51            | -9.80  | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg                   |
| RS06 | 雨水   |     | 20       | 7.24 | 18.4    | 1.58            | 3.48           | 5.70             | 0.32             | 0.599                  | 2.40                          | 22.89                         | —              | 0.002 | 1.07             | 1.78  | -52.26            | -7.71  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R13  | 河水   |     | 16       | 6.24 | 139.5   | 2.84            | 2.47           | 49.10            | 14.5             | 2.16                   | 33.50                         | 186.11                        | 0.109          | —     | 0.16             | 10.01 | -41.09            | -7.33  | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg                  |
| R14  | 河水   |     | 16       | 6.85 | 103.6   | 2.71            | 2.08           | 40.60            | 7.09             | 2.33                   | 23.30                         | 122.04                        | 0.011          | —     | 0.18             | 11.36 | -41.90            | -7.01  | HCO <sub>3</sub> —Ca                     |
| R15  | 河水   |     | 18       | 6.74 | 120.9   | 8.94            | 3.31           | 40.50            | 6.42             | 6.92                   | 38.30                         | 109.84                        | 0.071          | —     | 0.43             | 12.41 | -40.74            | -6.93  | HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> —Ca    |

注: 氢氧同位素均以 V-SMOW 标准给出, “—” 表示低于检测限

区内热储盖层有侏罗系的沙溪庙组(Js)、新田沟组(Jx)和自流井组(Jz),岩性以砂岩、泥岩及其互层为主,含水性、透水性差,厚度几百至上千米。由于须家河组埋深不够,一般作为第一盖层处理。

3.1.3 典型地热井对广安铜锣山背斜热储结构和性质的揭露

(1) 音频大地电磁法解译内容

AMT 解译成果见图 3 和图 4。通过该方法确定了铜锣山背斜中段西翼地区多条隐伏断裂,且部分断裂沟通性较好,为深部热水运移和储存提供了良好通道或空间。该方法对牟家镇刘家沟地热井具有较好的解译,其推断含水断裂位置与钻探热水出水段位置吻合较好(图 4),说明 AMT 解译断裂具备导水与储水双向性质,断裂间的连通为地热井稳定涌水量提供重要条件<sup>[24]</sup>。

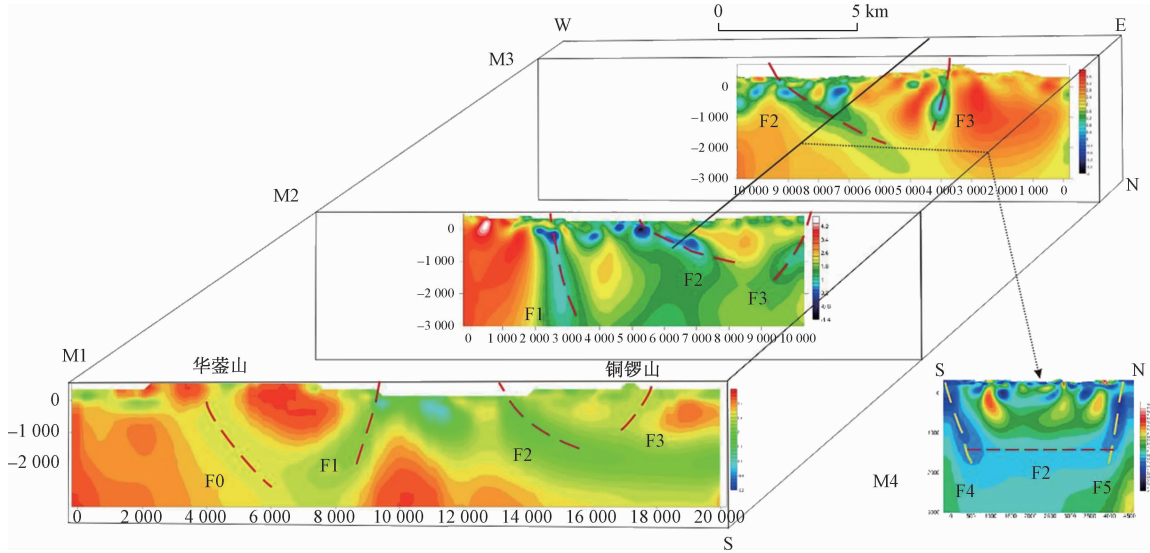


图 3 牟家镇刘家沟地热井音频大地电磁测深剖面三维切片图

Fig.3 3D slice diagram of the profile of AMT for the geothermal well in Liujiagou Village of the Moujia Town

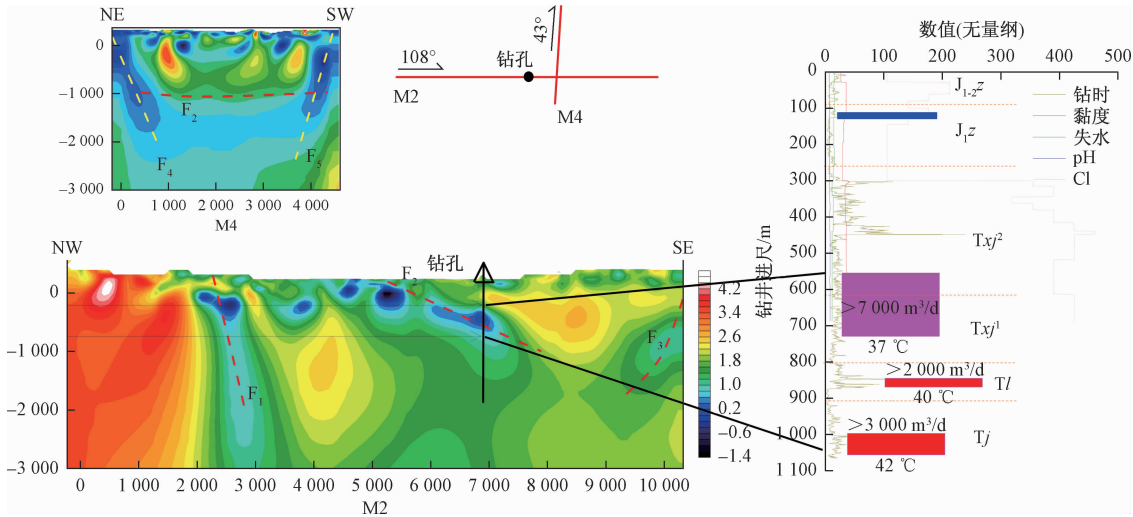


图 4 牟家镇刘家沟地热井音频大地电磁测深剖面与地热井地层柱及储水层对应关系

Fig.4 Correlation between stratigraphic column, geothermal reservoir and the profile of AMT for the geothermal well in Liujiagou Village of the Moujia Town

(2) 地热钻探获取热储性质

牟家镇刘家沟村地热井的实施准确刻画了广安铜锣山背斜西翼地层柱(表 3)及储水层特征。该井揭露了 4 层含水层,分别是侏罗系珍珠冲组含水层,井段

118 ~ 126 m,层厚 8 m,岩性为灰绿色砂岩,出水量为 1.6 ~ 2.3 m<sup>3</sup>/h,水温 34 °C;须家河组含水层,井段 577 ~ 726 m,层厚 149 m,岩性为白色砂岩,出水量为 7 000 m<sup>3</sup>/d,水温 37 °C。铜锣山背斜须家河含水层为

表3 牟家镇地热井地层及岩性特征

Table 3 Lithologic characteristics of the strata tapped by the geothermal well in the Moujia Town

| 地层   | 分层       |          | 岩性描述           |
|------|----------|----------|----------------|
|      | 视深/m     | 视厚/m     |                |
| 自流井组 | 90.46    | 81.46    | 泥岩、粉砂岩、泥质灰岩    |
| 珍珠冲组 | 301.30   | 210.84   | 泥岩、细砂岩、粉砂岩     |
| 须家河组 | 804.50   | 503.20   | 页岩、细砂岩、中砂岩、粉砂岩 |
| 雷口坡组 | 954.00   | 149.50   | 白云质灰岩、泥质灰岩     |
| 嘉陵江组 | 1 851.00 | 1 046.50 | 白云质灰岩、泥质灰岩、灰岩  |
| 飞仙关组 | 2 432.20 | 581.20   | 灰岩、泥质灰岩、泥岩     |
| 长兴组  | 2 490.00 | 57.80    | 灰岩、泥质灰岩        |

孔隙含水层,出水量每天为几十至上千立方米不等,刘家沟地热井揭露的须家河含水层水量较以往地热井揭露同段地层的大许多,可能为断层水,这与物探解译相吻合。同时,水化学组分及同位素信息亦显示须家河组热水和雷口坡、嘉陵江组热水相似,说明其较好的连通性,进一步说明断裂构造对该井的连通作用。此外,完井后物探测温曲线亦说明断裂构造对热储地层的影响(图5)。雷口坡组含水层,井段 841 ~ 857 m,岩性为灰岩、泥灰岩、白云质灰岩,出水量达 2 000 m<sup>3</sup>/d,水温 40 ℃;嘉陵江组四段含水层,井段 998 ~ 1 052 m,岩性为灰岩、白云质灰岩和泥灰岩,广泛出露于铜锣山背斜两翼,岩溶发育,补给区域面积大,出水量大于 10 000 m<sup>3</sup>/d,水温为 42 ℃。

完井测试雷口坡、嘉陵江组水量为 16 000 m<sup>3</sup>/d,井口水温 42 ℃(图5)。

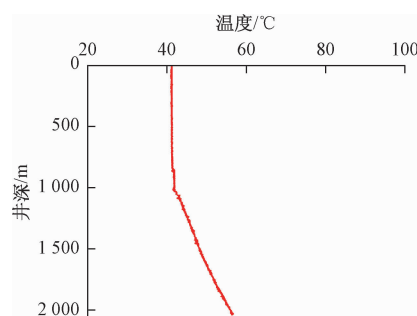


图5 牟家镇刘家沟村地热井测温曲线

Fig. 5 Temperature measurement curve of the geothermal well in Liujiaogou Village of the Moujia Town

### 3.2 研究区地下水水化学类型及组分特征

从广安铜锣山背斜雨水、河水、地下水和地下热水的物理化学指标测试结果(表2)可知,地热水温度为 26 ~ 42 ℃,pH 为 6.60 ~ 7.36,总溶解性固体(TDS)含量为 448.3 ~ 1 512 mg/L。阳离子以 Ca<sup>2+</sup> 为主,平均含量为 497 mg/L;阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主,平均含量为

203.82 mg/L。相比之下,地热水中溶质组分含量远较地下冷水、雨水和河水高(图6)。由水化学 Piper 三线图可知,地热水以中性硫酸型为主,而地下冷水、雨水和河水以重碳酸型水为主(表2和图7)。

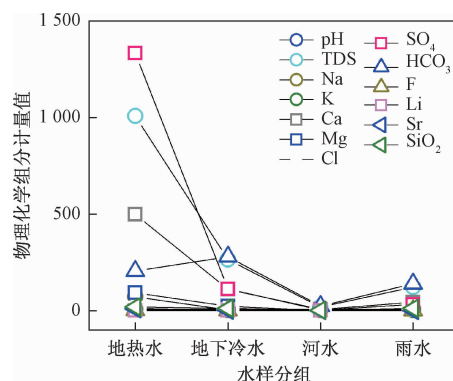


图6 研究区地热水、地下冷水、河水和雨水主要组分含量图

Fig. 6 Plot of the major hydrochemical components of thermal water, cold groundwater, river water and rain water in the study area

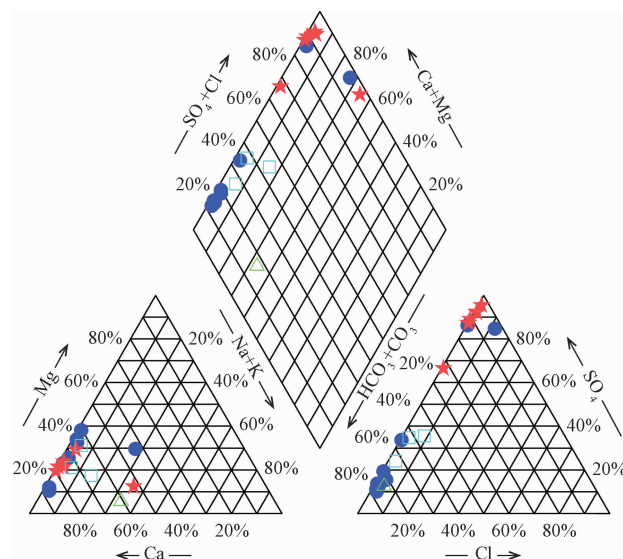


图7 研究区地下水 Piper 图

Fig. 7 Piper diagrams of the groundwater samples in the study area

★ 地热水样; ● 地下水样; □ 河水样; △ 雨水样

### 3.3 研究区地热水补径排特征

#### 3.3.1 地热显示及其特征

铜锣峡背斜地热水丰富,温泉出露有两种形式,一是天然出露的温泉,二是钻井揭露的温泉以及坑道温泉(表4)。从表4可知铜锣山背斜北段达州地区和南段重庆地区已有大量温泉和地热井的勘探和开发,铜锣山背斜成热背景较好。

3.3.2 地热水补给

氢氧同位素常用于示踪地下水和地热水的补给来

源,并判断地下水和地热水的径流强弱,识别地下水和地热水运移过程中与围岩矿物的水岩作用过程<sup>[25-26]</sup>。

表 4 铜锣山背斜地热井泉水温和流量特征

Table 4 Characteristics of geothermal wells and springs near the Tongluoshan anticline

| 温泉类型     | 编号  | 出露部位   | 名称          | 地点         | 温度/℃ | 流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 井深/m  | 水化学类型                   |
|----------|-----|--------|-------------|------------|------|---------------------------------------|-------|-------------------------|
| 钻井<br>温泉 | Z1  | 背斜东翼   | 统景度假村 RK1   | 重庆统景       | 42   | 1 271                                 | 200   | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z2  | 背斜东翼   | 统景温泉城 ZJ2   | 重庆统景       | 53   | 4 483                                 | 118   | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z3  | 背斜东翼   | 统景温泉城 ZJ1   | 重庆统景       | 46   | 1 191                                 | 349   | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z4  | 背斜西翼   | 龙门桥 2 号     | 铁山坪        | 52   | 3 755                                 | 2 178 | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | Z5  | 背斜西翼   | 龙门桥 1 号     | 铁山坪        | 35   | 800                                   | 1 316 | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | Z6  | 背斜西翼   | 玉峰山温泉       | 铁山坪        | 27   | 1 000                                 | 1 139 | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg |
|          | Z7  | 背斜西翼   | 桂一井         | 铁山坪        | 45   | 2 521                                 | 1 490 | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | Z8  | 背斜南倾没端 | 铜锣峡         | 铜锣峡        | 41   | 1 438                                 | 518   | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg |
|          | Z9  | 背斜东翼   | 望江          | 铜锣峡        | 41   | 2 186                                 | 227   | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z10 | 背斜南倾没端 | 南山          | 铜锣峡        | 42   | 2 500                                 | 702   | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z11 | 背斜东翼   | 铜锣峡东翼(新)    | 重庆统景       | 64   | >3 000                                | 2 131 | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z12 | 背斜西翼   | 铜锣峡西翼(新)    | 重庆高嘴       | 40   | 2 095                                 | 1 820 | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | Z13 | 背斜东翼   | 铜五井         | 重庆统景       | 62   | 7 200                                 | 2 005 | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z14 | 背斜东翼   | 邻水小南海地热     | 邻水玄滩       | 50   | 2 808                                 | 1 980 | SO <sub>4</sub> —Ca     |
|          | Z15 | 背斜西翼   | 大竹县朝阳温泉     | 大竹朝阳       | 52   | 11 233                                | 1 963 | SO <sub>4</sub> —Ca     |
| 天然<br>温泉 | Z16 | 背斜西翼   | 广安铜锣山地区地热钻探 | 邻水县牟家镇刘家沟村 | 42   | 16 000                                | 2 503 | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | T1  | 背斜东翼   | 统景悬泉        | 统景         | 46   | 616                                   |       | SO <sub>4</sub> —Ca·Mg  |
|          | T2  | 背斜西翼   | 感应洞         |            | 38   | 190                                   |       | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg |
| 坑道温泉     | T3  | 背斜东翼   | 铜锣峡         | 铜锣峡        | 28   | 400                                   |       | HCO <sub>3</sub> —Ca·Mg |
|          | K1  | 背斜东翼   | 铁山坪隧道       | 铁山坪        | 25   | 800                                   |       | SO <sub>4</sub> —Ca     |

研究区采集水样的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值在  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系图上的位置可以反映其不同的来源或成因(图 8)。广安铜锣山背斜地热水的  $\delta D$  值介于  $-51.9‰ \sim -66.77‰$ , 平均值为  $-61.25‰$ ;  $\delta^{18}O$  值介于  $-8.02‰ \sim -11.07‰$ , 平均值为  $-9.42‰$ 。地下冷水的  $\delta D$  值介于  $-38.93‰ \sim -57.69‰$ , 平均值为  $-44.59‰$ ;  $\delta^{18}O$  值介于  $-6.57‰ \sim -8.84‰$ , 平均值为  $-7.45‰$ 。地下热水较地下冷水贫重同位素,说明地热水补给高程较高,径流途径较长。

内陆性大气降水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值具有显著的高程效应<sup>[23,27-28]</sup>。据此可以估算地热水的补给区及补给高程。广安铜锣山背斜地热水补给高程的计算公式为:

$$H = h + (D - D_r) / \text{grad}D$$

式中: $H$ ——地热水补给高程/m;

$h$ ——地热水采样点参考高程/m;

$D$ ——地热水的  $\delta D$  值/‰;

$D_r$ ——参考点水样的  $\delta D$  值/‰,本文取所采集

地下冷水  $\delta D$  值的平均值( $-44.59‰$ );

$\text{grad}D$ ——高程点的递减梯度/(‰ · (100 m)<sup>-1</sup>),本文取  $-3‰/100 \text{ m}$ 。

通过估算,铜锣山背斜地热水的补给高程超过

1 100m,而广安市铜锣山高程小于 1 000m,推测该构造带地热水补给区可能位于北边大巴山一带,径流途径较长,为深循环地热水,这与前期重庆地区地热水径流研究成果相吻合<sup>[12-21]</sup>。

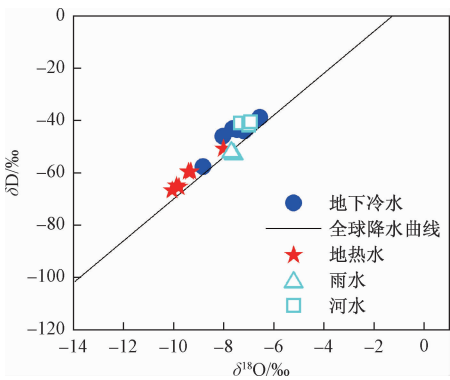


图 8 研究区水样氢氧同位素组成

Fig. 8 Oxygen and hydrogen isotopes of the groundwater samples in the study area

注:全球降水曲线方程: $\delta D = 8\delta^{18}O - 10$ 。

3.3.3 径流条件

地热水的运移主要沿背斜翼部热储层中的纵横裂隙系统向下渗透补给深部的地热水,然后沿深部的岩溶裂隙通道由北向南作纵向径流<sup>[29]</sup>。

根据铜锣山背斜的构造特点,结合已出露的牟家镇、统景、铜锣峡及南延斜接的南温泉背斜的南泉、小泉、桥口坝等温泉(或地热水钻井)水年龄测定结果表明,铜锣峡地热水同位 $^3\text{H}$ 浓度为 $6 \pm 1$  TU,说明地热“古水”中有现代水的混入; $^{14}\text{C}$ 测定结果表明,统景地热水绝对年龄为10 800 a,铜锣峡为11 000 a,南温泉地热水为11 300 a,桥口坝地热水为13 000 a<sup>[4]</sup>。说明铜锣山背斜至南温泉背斜中储藏地热水的年龄具有由北往南逐渐增大的特点,即地热水由北向南作纵向迳流,这与氢氧同位素估算高程而获得的信息相吻合。

### 3.3.4 排泄条件

地热水在纵向运动过程中,常在构造转折端、构造鞍部所开启的“减压天窗”地段,尤其是在河流深切峡谷地段泄流<sup>[29]</sup>。如铜锣峡背斜的铜锣峡(长江)、统景温泉(温塘河)和响水凼温泉(御临河)。

### 3.4 研究区地热水成因模式

广安铜锣山核部主要为三叠系嘉陵江组和雷口坡组的白云岩、灰岩,在地下水的运移过程中不断溶蚀,形成大量的溶洞、溶穴和溶槽,并沟通形成岩溶通道,从而为地热水提供良好的运移通道和储存空间,地热水具有区域流动、局部受断裂影响的特点,地热水运移形成多个地热热储层<sup>[22,30]</sup>(图9)。铜锣山背斜地热水成因模式为:在高程约1 100 m的川东平行岭谷北段灰岩裸露区或构造有利区段、槽谷区域,大气降水入渗补给深层岩溶水系统,并经历较长的流动途径和滞留时间,在地层增温梯度条件下吸收岩体热量,并在运移过程中溶解灰岩地层中的膏盐矿物,形成具有一定稳定流量和温度的硫酸型地热水。处于良好封闭环境中的岩溶型地热水,在长时间长距离的运移过程中,部分岩溶热水在大河深切峡谷出露成泉(邻水县御临镇响水凼温泉),或经地热井揭露形成自流地热水(邻水县牟家镇刘家沟村地热井)。

## 4 结论

(1)广安铜锣山背斜地热属深循环低温地热水。

(2)地热储层主要为三叠系中下统嘉陵江组、雷口坡组碳酸盐岩热储层;上覆上三叠统的须家河组至侏罗系红色的砂页岩、煤层、泥岩构成隔水保温层;而下伏的三叠系下统飞仙关组泥质岩夹灰岩,其中的泥页岩层孔隙度低、渗透率小、热导率低,可有效控制地热水向深部运移,形成隔水底板。三者共同构成了完整的铜锣山背斜的热储构造。

(3)刘家沟地热井水量较大,且须家河组含水层

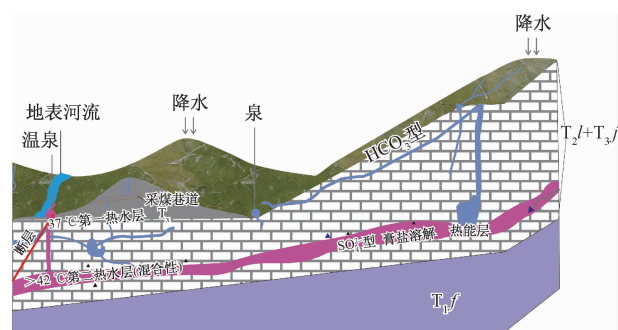


图9 广安铜锣山背斜地热水来源与补给机制示意图

Fig.9 Schematic diagram showing the origin and recharge mechanism of geothermal water in the Tongluoshan anticline near Guang'an

水化学特征与下伏碳酸盐岩水化学特征基本一致,说明有断裂贯通了几层地热水,与物探解译结果吻合。

(4)铜锣山背斜西翼刘家沟地热井水头高,水源补给远。据 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析数据,铜锣山背斜刘家沟地热井地热水的补给高程超过1 100 m,地热水补给区可能位于北边更高的大巴山一带,地热水具有从北东往南西顺构造线作纵向径流的特点,与重庆地区铜锣峡背斜地热水补给高程和 $^{14}\text{C}$ 测年表明的结果一致,说明铜锣山背斜纵向上可能是一个完整、统一的地下热水系统。

## 参考文献 (References):

- [1] 汪集旸. 能源环境危机下的地热能开发[J]. 科技导报, 2012, 30(4):3. [WANG J Y. Geothermal energy development under energy and environment crisis[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(4):3. (in Chinese)]
- [2] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [WANG J Y. Geothermal Science and its Application[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]
- [3] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224 - 1230. [PANG Z H, KONG Y L, PANG J M, et al. Geothermal resources and development in Xiongan new area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224 - 1230. (in Chinese)]
- [4] 陈墨香, 汪集旸. 中国地热研究的回顾和展望[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊1): 320 - 338. [CHEN M X, WANG J Y. Review and prospect on geothermal studies in China[J]. Chinese Journal

- of Geophysics, 1994, 37 (Supl): 320 - 338. (in Chinese)]
- [5] 陈墨香. 中国地热资源分布及其开发利用[J]. 自然资源, 1991, 13(5): 40 - 46. [CHEN M X. Distribution and development of geothermal resources in China[J]. Nature Resources, 1991, 13(5): 40 - 46. (in Chinese)]
- [6] 庞忠和, 胡圣标, 汪集旻. 中国地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 18 - 24. [PANG Z H, HU S B, WANG J Y. A roadmap to geothermal energy development in China [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 18 - 24. (in Chinese)]
- [7] 程群, 杨华林, 曾敏. 重庆市主城区岩溶地热水资源的形成与保护[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 217 - 227. [CHENG Q, YANG H L, ZENG M. The formation and protection of karst geothermal water resources in the main urban area of Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(3): 217 - 227. (in Chinese)]
- [8] SHI H C, SHI X B, GLASMACHER U A, et al. The evolution of eastern Sichuan basin, Yangtze block since Cretaceous: Constraints from low temperature thermochronology [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 116: 208 - 221.
- [9] 杨华云, 徐静. 重庆都市圈地热资源评价与开发利用方向[J]. 中国水运: 学术版, 2006, 6(8): 217 - 218. [YANG H Y, XU J. The geothermal resources evaluation and of Chongqing metropolitan area [J]. China Water Transport: Academic Version, 2006, 6(8): 217 - 218. (in Chinese)]
- [10] 罗祥康. 重庆市渝北区统景风景旅游区温泉的形成及其特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 159 - 163. [LUO X K. Formation and characteristics of the geothermal spring in Tongjing scenic spot, north Chongqing district, Chongqing City [J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(2): 159 - 163. (in Chinese)]
- [11] 曾敏. 重庆温泉分布于成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. [ZENG M. Study on the distribution and origin of hot springs in Chongqing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)]
- [12] 漆继红, 许模, 杨华云, 等. 川东铜锣山背斜 - 南温泉背斜温泉水力联系分析[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 5 - 9. [QI J H, XU M, YANG H Y, et al. Analysis on hydraulic connection of hot springs of Tongluo Mountain anticline to south hot spring anticline in eastern Sichuan Province [J]. Yangtze River, 2011, 42(11): 5 - 9. (in Chinese)]
- [13] 李东升, 刘东升. 重庆地热水资源热储构造与径流补给[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 372 - 376. [LI D S, LIU D S. Geothermal reservoir structure and runoff flow recharge of geothermal water resources in Chongqing City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(4): 372 - 376. (in Chinese)]
- [14] 罗云菊, 刘东燕, 许模. 重庆地下热水径流特征研究[J]. 地球与环境, 2006, 34(1): 49 - 54. [LUO Y J, LIU D Y, XU M. Study on the geothermal water runoff in Chongqing [J]. Earth and Environment, 2006, 34(1): 49 - 54. (in Chinese)]
- [15] 郭彤, 刘之葵, 陈成. 重庆市铜锣峡背斜地热水资源的形成与水力联系分析[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(1): 61 - 68. [GUO T, LIU Z K, CHEN C. Analysis on hydraulic connection and formation of geothermal water resources in Tongluo mountain anticline, Chongqing [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(1): 61 - 68. (in Chinese)]
- [16] 罗云菊, 刘东燕, 刘新荣. 重庆南温泉背斜地下热水系统的探讨[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(3): 131 - 133. [LUO Y J, LIU D Y, LIU X R. System of the geothermal water in the Nanwenquan anticline [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(3): 131 - 133. (in Chinese)]
- [17] 拓明明, 周训, 郭娟, 等. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 165 - 172. [TA M M, ZHOU X, GUO J, et al. Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 165 - 172. (in Chinese)]
- [18] YANG P H, CHENG Q, XIE S Y, et al. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 50 - 61.
- [19] 肖琼. 重庆三叠系碳酸盐热储成因与水 - 岩作用过程研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012. [XIAO Q. Water-rock interaction and genesis of thermal groundwater in carbonate reservoir in Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2012. (in Chinese)]

- [20] 杨雷. 重庆市温塘峡背斜地下热水水文地球化学特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012. [YANG L. Hydrogeochemical characteristics of geothermal water in Wentangxia anticline, Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2012. (in Chinese)]
- [21] 舒泽宣. 重庆西部地区地下热水分布规律及水化学特征[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 462 – 468. [SHU Z X. Distribution law and the feature of water chemistry of geothermal water in western area of Chongqing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 462 – 468 (in Chinese).]
- [22] 马瑞. 碳酸盐热储隐伏型中低温热水的成因与水-岩相互通研究: 以山西太原为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007. [MA R. Water-rock interaction and genesis of low-medium temperature thermal groundwater in carbonate reservoir: A case study at Taiyuan, Shanxi[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese)]
- [23] YANG P H, YUAN D X, YE X C, et al. Sources and migration path of chemical compositions in a karst groundwater system during rainfall events [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 2488 – 2496.
- [24] 黄力军, 孟银生, 陆桂福. 可控源音频大地电磁测深在深部地热资源勘查中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊1): 60 – 63. [HUANG L J, MENG Y S, LU G F. An application of CSAMT sounding to exploration of deep geothermal resources [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(Sup1): 60 – 63. (in Chinese)]
- [25] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 12 – 21. [YUAN J F, DENG G S, XU F, et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in the northern part of the City of Bijie [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 12 – 21. (in Chinese)]
- [26] 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 等. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 803 – 810. [ZHAO Z, YU P L, CHEN H J, et al. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 803 – 810. (in Chinese)]
- [27] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 川西南喜德热田地下水水文地球化学特征[J]. 现代地质, 2017, 31(1): 200 – 208. [YUAN J F, DENG G S, XU F, et al. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in the Xide geothermal field, southwest Sichuan, China [J]. Geoscience, 2017, 31(1): 200 – 208. (in Chinese)]
- [28] 邹鹏飞, 邱杨, 王彩会. 南京汤山温泉区地热水成因模式分析[J]. 高校地质学报, 2015, 21(1): 155 – 162. [ZOU P F, QIU Y, WANG C H. Analyses of the genesis of Tangshan hot spring area in Nanjing[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(1): 155 – 162. (in Chinese)]
- [29] WANG S F, PANG Z H, LIU J R, et al. Origin and evolution characteristics of geothermal water in the Niutuozen geothermal field, North China Plain[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 891 – 902.
- [30] ZIJL W. Scale aspects of groundwater flow and transport systems[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 139 – 150.