

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05002

郭镜,夏时斌,2022. 川东褶皱带地热系统的空间载体——相互连通的断裂系统:以四川广安牟家镇地热井为例. 沉积与特提斯地质,42(4): 642-652. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05002

GUO J, XIA S B, 2022. Spatial carrier of geothermal system in eastern Sichuan fold zone——interconnected fault system: A case study of geothermal well in Moujia Town, Guang'an, Sichuan. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4): 642-652. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05002

川东褶皱带地热系统的空间载体——相互连通的断裂系统: 以四川广安牟家镇地热井为例

郭 镜^{1,2}, 夏时斌^{2*}

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:在“双碳目标”背景下,发展低碳能源势在必行。作为重要的清洁能源,地热资源勘查及开发利用力度亟须加大。在地热资源丰富的川东褶皱带,已有研究认为,该区三叠系嘉陵江组灰岩地层是有利的热储层,也是地热勘查的主要目标体。然而,众多钻遇嘉陵江组未出地热水及未钻遇嘉陵江组出现地热水的事实,对此提出了质疑。本文在牟家镇地热勘查区,通过音频大地电磁测深发现勘查区深部存在相互连通的断裂系统,并以此为目标体进行钻孔验证,获得了日涌水量 $>12000\text{m}^3$ 、 42°C 的地热水,据此,推测相互连通的断裂系统可能是川东褶皱带地热系统的空间载体。通过探测华蓥山及铜锣山2处天然温泉及1处无水钻孔的深部构造特征,印证了川东褶皱带断裂控水的普适性;结合渗流分析,认为以相互连通的断裂系统为勘查目标体,有望实现川东褶皱带地热资源的可持续开发。本次研究将为带内普适的地热成因机制、勘查实践及可持续开发利用研究提供些许借鉴。

关键词:川东褶皱带;相互连通的断裂系统;地热系统;产研结合

中图分类号:P314

文献标识码:A

Spatial carrier of geothermal system in eastern Sichuan fold zone ——interconnected fault system:

A case study of geothermal well in Moujia Town, Guang'an, Sichuan

GUO Jing^{1,2}, XIA Shibin^{2*}

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Under the background of "Carbon peak and Carbon neutral", it is imperative to develop low carbon energy. As an important clean energy source, the exploration and utilization of geothermal resources need to be intensified. In the eastern Sichuan fold belt, which is rich in geothermal resources, the limestone stratum of Triassic Jialingjiang Formation is considered as a favorable thermal reservoir and the main target of geothermal exploration. However, the fact that many drilling in Jialingjiang Formation did not produce geothermal water and the geothermal water from other Formation calls into question the above statement. In this paper, in the geothermal

收稿日期: 2021-12-21; 改回日期: 2022-04-24 责任编辑: 黄春梅 科学编辑: 曹华文

作者简介: 郭镜(1985—),男,高级工程师,主要从事金属矿产及地热地球物理勘查工作。E-mail: 31376811@qq.com

通讯作者: 夏时斌(1985—),男,工程师,主要从事电磁法勘探工作。E-mail: 253509818@qq.com

资助项目: 四川省科技计划项目(2019YJ0269);国家自然科学基金青年科学基金项目(41604118);中国地质调查局地质调查项目(DD20190524)

exploration area of Mujia Town, it is found that there are interconnected fault systems in the deep part of the exploration area through the audio-frequency magnetotelluric sounding. Using this as the target body for drilling verification, geothermal water with daily water inflow $> 12000\text{m}^3$ and 42°C was obtained. Based on this, it is speculated that the interconnected fault system may be the spatial carrier of the geothermal system in the eastern Sichuan fold belt. By detecting the deep structural features of two natural hot springs in Huayingshan and Tongluoshan and one waterless borehole, the universality of water control by faults in the eastern Sichuan fold belt is confirmed. Combined with the seepage analysis, it is considered that taking the interconnected fault system as the exploration target body is expected to realize the sustainable development of geothermal resources in the eastern Sichuan fold belt. This study will provide some reference for the research on the ubiquitous geothermal genetic mechanism, exploration practice and sustainable development and utilization in the belt.

Key words: eastern Sichuan fold belt; interconnected fracture system; geothermal system; combination of production and research

0 引言

随着碳达峰、碳中和“双碳目标”的提出,能源结构调整和发展低碳能源势在必行。地热能是一种稳定可靠的清洁能源。川东褶皱带发育众多天然温泉,有着丰富的地热资源(罗云菊等,2006)。目前,温泉旅游开发是川东褶皱带地热资源的主要形式,而川东褶皱带地热资源利用以重庆市为代表。截至2012年,重庆市共查明106处温泉,其中包括天然温泉26处,坑道温泉16处,钻井温泉64处(曾敏,2013)。水温在 $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间有45处, $40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 之间有60处, $60^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 之间有1处,属中低温水热型地热资源,温泉流量多数 $< 50\text{ L/s}$ 。水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{—Ca}$ 型,可能与深部的石膏层有关(三叠系嘉陵江组、寒武系龙王庙组)。

地热水的氢氧同位素呈现大气降水特征,说明大气降水可能是地热水的重要补给(李东升和刘东升,2011;周训等,2015)。根据热模拟,岩浆岩的冷凝时间 $< 1\text{Ma}$ (毛小平等,2018)。而研究区缺少新近纪以来的岩浆活动,因此大气降水深循环加热可能是本区地热水增温的主要形式(陈荣华,1988)。通过对温泉勘探过程中得到的地温场、水动力、水化学等方面进行详细研究,论证了三叠系嘉陵江组碳酸盐为良好热储层,大气降水为地热水的主要补给(李鸿举,1987)。后来者,用更详尽的地球化学手段,为这一结论提供了支撑,如统景温泉水离子浓度明显高于岩溶地下水和地表水,认为温泉水流经碳酸盐岩热储层并发生强烈的水岩作用(余琴等,2017);锶同位素比值(约在0.708左右)与S同位素(约在32.5‰)与三叠系嘉陵江组二段硬石膏的同位素组成相似,说明地下热储的水岩作用主要在三叠系嘉陵江组二段(肖琼,2012);通过水化学

类型推测地热水大致的循环深度,对地热类型进行分类(Ta et al.,2020);通过水化学温度计计算深部碳酸盐热储温度(Yang et al.,2019; Ta et al.,2019);利用这一碳酸盐岩热储层结论,通过数值模拟为合理的温泉开发提供建议(罗云菊等,2007)。因此,川东褶皱带的碳酸盐岩热储模式越来越深入人心;三叠系嘉陵江组灰岩地层是有利的热储层;其上覆地层须家河组碎屑岩为盖层,下覆地层飞仙关组碎屑岩为良好的隔水层;大气降水沿背斜岩溶槽谷等向热储层补给,深循环加热后成为地热水资源。

然而,以嘉陵江组为地热勘查目标体,往往存在一些疑惑。在勘查方面,某些钻孔的出水地层并不是嘉陵江组,且即便打穿嘉陵江组也未见该地层出水,导致以嘉陵江组为目标体的勘查模式,地热勘查成功率不高。在成因方面,川东褶皱带内的地热水H-O同位素显示了大气降水的特征(李东升和刘东升,2011),而四川盆地嘉陵江组地层水明显发生了O漂移(林耀庭和熊淑君,1999),暗示大气降水不太可能沿嘉陵江组补给,否则这在地球化学上是矛盾的;若大气降水是沿断裂补给,那么断裂必然切穿须家河组,这又与须家河组是良好盖层的认识不一致。因此,川东褶皱带的地热成因机制还需深入研究。Engelen and Jones(1986)开创性地提出了不同于“含水层”的地下水系统概念。本文以地下水系统概念为基础,研究川东褶皱带的地热成因模式,并提出“川东褶皱带地热系统”,进而指导实际勘查。

1 地热地质背景

1.1 地质背景

川东褶皱带位于上扬子陆块——四川前陆盆

地(罗改等,2021),其西界为北东走向的华蓥山断裂带,东界为齐岳山断裂带(图1)。从前寒武系至中三叠系,该区域经历了稳定的扬子克拉通沉积阶段,沉积了一套巨厚的海相碳酸盐岩和碎屑岩,中三叠系至白垩系则主要沉积一套陆源碎屑岩(唐晓珊等,1997;刘春平等,2006;Liu et al., 2005)。川东褶皱带可能经历了三期构造作用,晚志留—中泥盆世、石炭纪末以及中、晚三叠世之交,以整体抬升作用为主,不发育任何褶皱构造(胡召齐等,2009;付宜兴等,2007);晚侏罗—早白垩世受古太平洋板块向北西俯冲作用,在华南内部形成宽阔的弧背前陆变形带(Li et al., 2018),构造应力场方向为北西—南东向,前侏罗纪地层发生了强烈的褶皱—冲断变形,形成了大量北东—南西向的褶皱和逆冲断层,该期断层大多具有左行走滑的特征(王宗秀等,2019);新生代晚期,印度大陆与欧亚大陆的汇聚作

用造成川滇地体的南东向挤出,四川盆地发生大规模逆时针旋转,盆地周缘断裂带发生大规模右行走滑(Wang et al., 2014;王二七等,2009),早期构造被强烈改造(王宗秀等,2019)。形成了两套差异明显的褶皱带,华蓥山断裂与齐岳山断裂之间的隔挡式褶皱,高陡背斜核部多出露三叠纪地层,宽缓向斜核部多为侏罗纪地层(张小琼等,2013);齐岳山与张家界断裂之间的隔槽式褶皱,宽缓背斜核部以出露南华系—奥陶系为主,向斜核部多为三叠系(王宗秀等,2019)。隔挡式褶皱带可能是为了协调深部主滑脱层而变形的滑脱褶皱(张小琼等,2013;刘重庆等,2013;He et al., 2018),地球物理剖面可以清晰地观测到变质基底并未卷入构造变形(Dong et al., 2015)。隔槽式褶皱除了受滑脱构造影响,还与差异升降剥蚀造成的不同构造层次褶皱出露有关,且变质基底卷入了褶皱变形(王宗秀等,2019)。

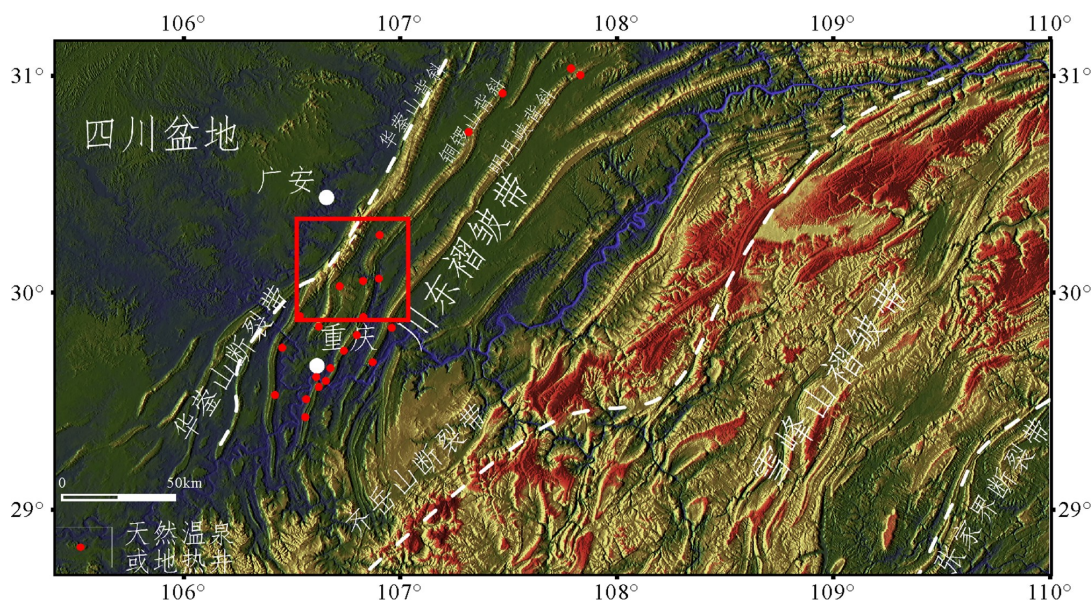


图1 川东褶皱带构造背景地形渲染图

Fig. 1 Rendering map of the tectonic background topography of the eastern Sichuan fold belt

1.2 地热背景

地热异常与现存的区域构造—热事件、最后一次热事件发生的时间、岩石圈拉张程度、地壳厚度等因素有关(袁玉松等,2006)。但最重要的是现存的构造—热事件,如金衢盆地,19 km深处存在厚度为8 km左右的低速高导层,该低速层亦是地壳内部的主滑脱面(吴奇之等,1997)。还有西藏地壳深部普遍存在的部分熔融层(Nelson et al., 1996; Brown et al., 1996; Wei et al., 2001),且深大断裂延伸至部分熔融层(图2c;张乐天等,2012;Guo et al., 2019),成

为有利的导热、导水构造,而四川盆地缺少这种现存的有利构造—热组合(图2c)。其次是最后一次热事件发生的时间。全球大地热流数据的统计显示,大陆地区热流值随地质体经历的最后一次热事件的年龄增加而呈现降低的趋势(Polack et al., 1993),而扬子克拉通中部地区最新的岩浆活动为180~130 Ma,呈现低的大地热流值(袁玉松等,2006)。

四川盆地夹持于西太平洋汇聚板缘型地热域和特提斯汇聚板缘型地热域(图2a,何治亮等,

2017),缺乏较新的岩浆活动,也没有现存的部分熔融等热事件,大地热流值低于全球平均热流值(徐明等,2011)。除了峨眉山玄武岩形成的残留热异常,整个四川盆地表现负的地热异常,呈现“冷壳冷幔”的岩石圈地热结构特征(徐明等,2011)。而川东褶皱带更是位于四川盆地的低地温梯度区(图2b)。

2 方法

2.1 设备及完成工作

根据研究区温度梯度约在 $18 \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图2d),热水深度需在 $1000 \sim 3000\text{m}$,才能达到 $>40^{\circ}\text{C}$,实现温泉旅游开发。因此,选用音频大地电磁测深法探测深部热水,所用仪器为加拿大凤凰公司生产的 V5-2000 大地电磁采集系统。本次地热勘查共布设 8 条音频大地电磁测深剖面,基准点距 200m ,采集 393 个数据点,剖面位置见图 3。

2.2 电性特征

根据研究区的区域地质情况,将岩性分为灰岩、砂岩和泥岩,进行岩石电性特征测试。其中砂岩又分为中细粒砂岩、紫红色砂岩和岩屑砂岩三类。由图 4 可知,区内岩石电性存在一定差异,灰岩电阻率最大,砂岩次之,泥岩最小。不同类型的砂岩之间电性差异较小。

2.3 解译标志

大地电磁测深剖面对灰岩与砂泥岩之间的电性差异有一定响应,比如背斜碳酸盐出露区相较于向斜砂泥岩出露区,电阻率较高(图 5 中 L_1 、 L_2)。但同在背斜或向斜构造区域,相较于岩性变化造成的电阻率差异,断裂构造引起的地层含水率增加,电阻率降低,是音频大地电磁测深更易识别的电性特征(图 5 中 L_1 、 L_2)。对于断裂的解译,电阻率等值线呈现低阻特征且产状与地层不一致,解译为断裂带;若电阻率等值线呈现低阻特征且与砂泥岩地

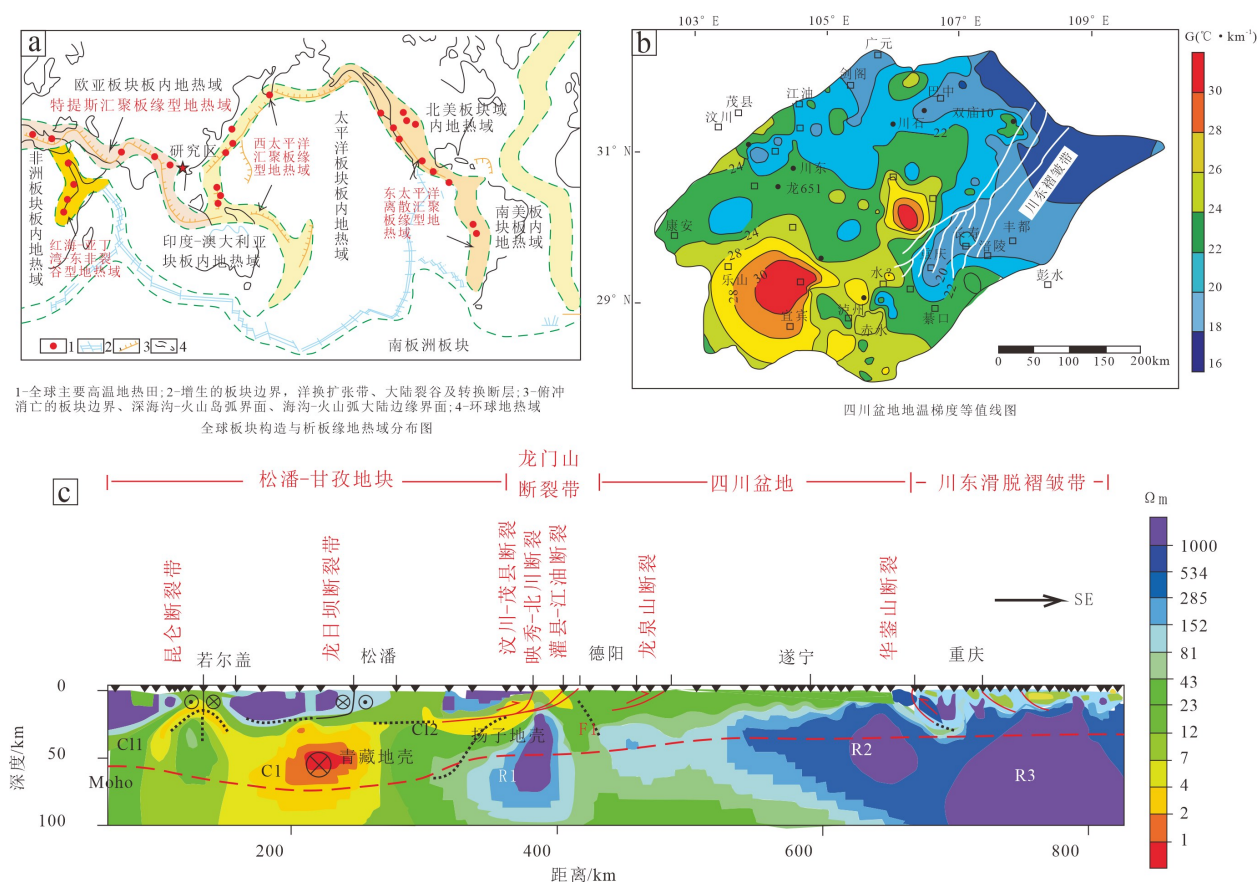


图2 全球板块构造与板缘地热域分布图(a;据何治亮等,2017),四川盆地地温梯度等值线图(b;据徐明等,2011)以及青藏高原与扬子克拉通深部电性结构差异图(c;据张乐天等,2012)

Fig. 2 Distribution map of global plate tectonics and marginal geothermal domain (a; according to He et al., 2017), the contour map of the geothermal gradient in the Sichuan Basin (b; according to Xu et al., 2011) and the difference map of the electrical structure between the Qinghai-Tibet Plateau and the deep part of the Yangtze Craton (c; according to Zhang et al., 2012)

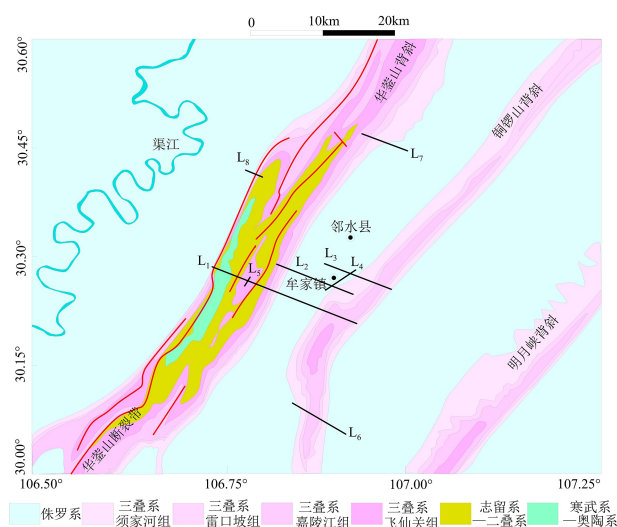


图3 音频大地电磁测深剖面位置图

Fig. 3 Location map of audio magnetotelluric sounding profiles

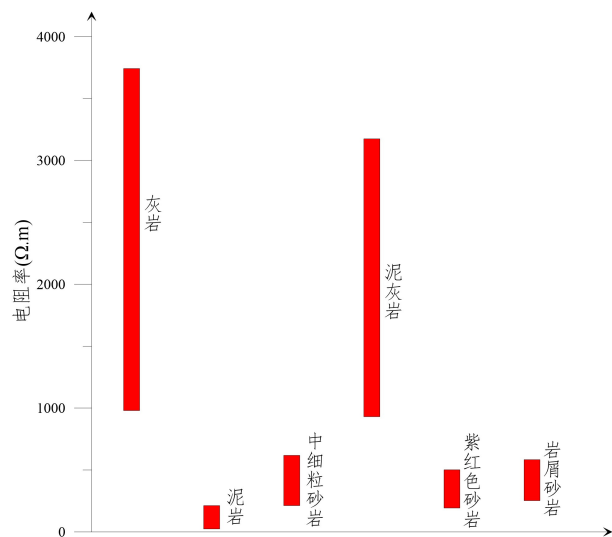


图4 岩石电性测试结果图

Fig. 4 Statistical results of rock resistivity test

层产状吻合,暂不解译为断裂带。

3 结果

3.1 牟家镇地热井深部空间结构

在牟家镇地热勘查区,布置“三横两纵”的音频大地电磁测深剖面(L_1-L_5),来探测其深部空间结构,为钻孔布设提供依据。测线位置见图3。 L_1 剖面自华蓥山西翼至铜锣山东翼垂直主构造方向自北西至南东布设,长约20 km,共采集103个点,解译断裂4条, F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 (图5)。 L_2 剖面自华蓥山东翼至铜锣山中西部垂直主构造方向自北西至南东布设,长约10 km,共采集49个点,解译断裂3条, F_1 、 F_2 、 F_3 。 L_3 剖面自向斜部位至铜锣山东翼垂直主

构造方向自北西至南东布设,长约10 km,共采集52个点,解译断裂2条, F_2 、 F_3 。 L_4 剖面沿铜锣山西翼平行主构造方向自南西至北东布设,长约4.5 km,共采集23个点,解译断裂3条, F_2 、 F_4 、 F_5 ,其中 F_2 为 L_4-L_6 剖面中 F_2 的等深度响应。通过图6-3可知, F_1 、 F_2 、 F_3 为区域性的断裂,且沿主构造方向延伸较大; F_4 、 F_5 断裂为北西南东向次级断裂,起到了连通 F_1 、 F_2 、 F_3 主干断裂的作用。 F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 组成了相互连通的断裂网络。那么,如此广泛分布的断裂系统可能存在可开采的巨量地热水。

L_1 剖面23点至28点处有一低阻异常区 C_0 (图5),在 C_0 上方垂直 L_1 剖面布设 L_5 剖面,发现 C_0 在主构造方向上存在稳定延伸,推测其为一规模较大的地下暗河(图5)。该暗河与 F_0 连接,那么,可能存在 $C_0 \rightarrow F_0 \rightarrow F_4$ 和/或 $F_5 \rightarrow F_2$ 的补给通道。说明该相互连通的断裂系统可以作为大气降水从补给→深循环加热→出露地表的通道。

3.2 钻孔验证

以 F_2 断裂为目标体布设地热钻孔(图5中 L_2 剖面),发现出水位置在550~1050 m,与 L_2 解译的含水断裂 F_2 位置吻合。出水地层为须家河组、雷口坡组和嘉陵江组上段。日涌水量 $>12000 \text{ m}^3$ 、水温 42°C ,满足温泉旅游开发的要求。据此,我们推测相互连通的断裂系统可能是川东褶皱带地热勘查的首要目标体,而不是传统认为的嘉陵江组:(1)出水位置与解译的 F_2 断裂位置吻合, F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 组成了相互连通的断裂系统,由上图可知该断裂系统面上广泛展布,那么其具有“通道”与“储层”的双重属性,可作为地热勘查目标体;(2)出水位置并不全位于嘉陵江组,且后续800 m的嘉陵江组并未出水,这与川东褶皱带内“钻遇嘉陵江组未出地热水及未钻遇嘉陵江组出现地热水”的勘查事实相符。因此,嘉陵江组可能并不是该区地热水的主控因素。

3.3 断裂控水在川东褶皱带具有普适性

为了查明断裂控水在川东褶皱带是否具有普适性,在华蓥山背斜与铜锣山背斜的两个出水点及1个干孔分别布设3条剖面 L_6 、 L_7 、 L_8 (图3),查明其深部空间结构。 L_6 线,查明铜锣山背斜中已知天然出水点和人工出水钻孔的地下电性结构。剖面长约9.7 km,自南东至北西(约 295°)共采集73个点。结合地质概况对剖面图进行解译(图6):(1)1—22点、61—73点范围内,1000 m以浅的低阻区域可能是沙溪庙组砂泥岩的电性响应;(2)28—60点

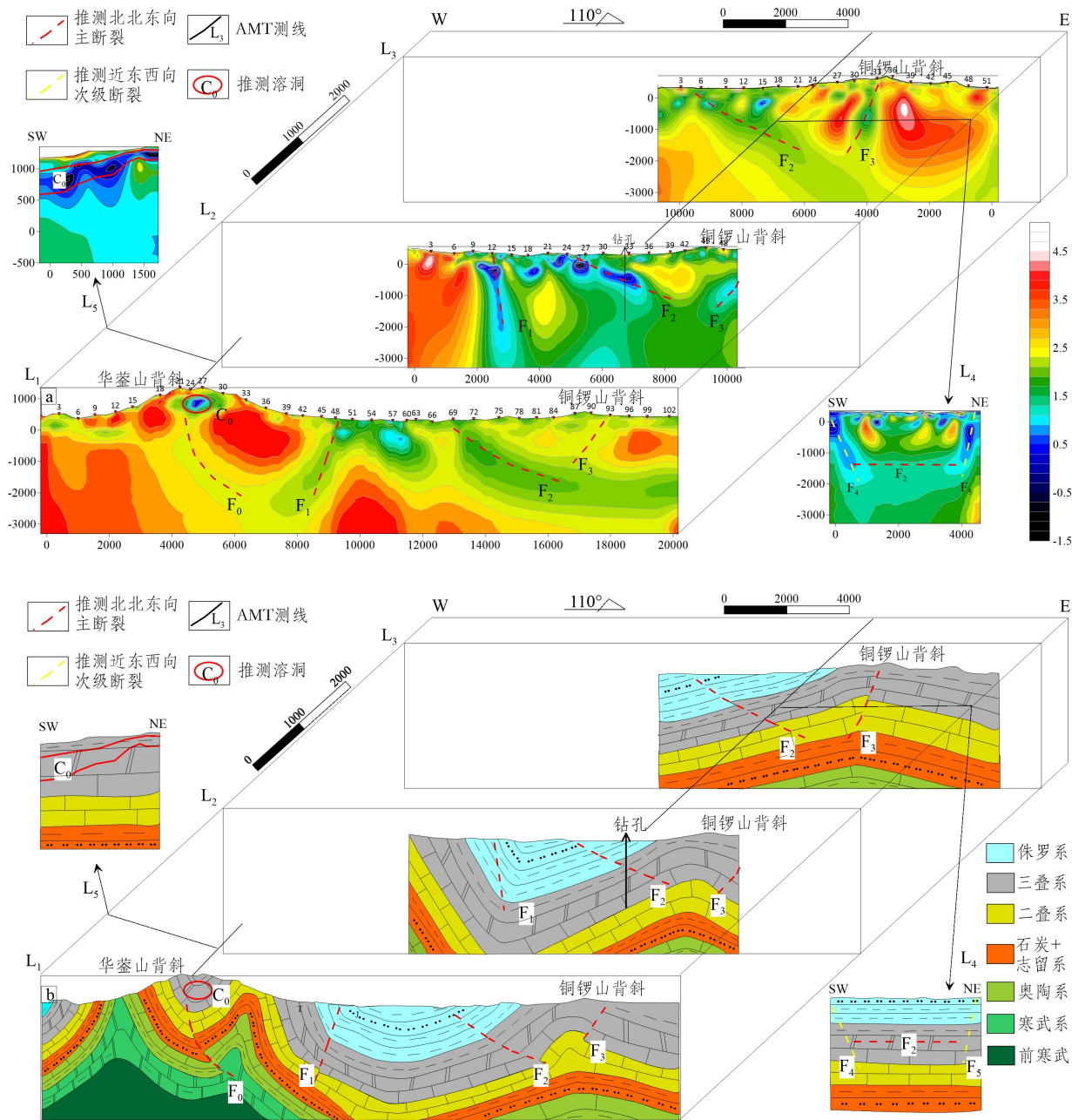


图5 牟家镇地热重点勘查区 L₁-L₅ 音频大地电磁测深反演剖面(a)和音频大地电磁测深解释剖面(b)

Fig. 5 Inversion and interpretation of L₁-L₅ audio magnetotelluric sounding inversion profile (a) and Audio magnetotelluric sounding interpretation profile (b) in the key geothermal exploration area of Mujia Town

的高阻区域为嘉陵江组灰岩的电性响应,28—51 点的次高电阻率区,可能是背斜形成过程中,产生的裂隙充填水作用造成;(3)20 点与 67 点处存在两条断裂带 F₁、F₂,且出水钻孔已深至断裂带。通过该剖面可知:(1) 钻孔深部存在大型断裂;(2) 钻孔深部出水地层为嘉陵江组;(3) 天然出水点可能通过背斜翼部的裂隙带与含水断裂连通。

L₇线,查明华蓥山背斜东翼人工出水钻孔的地下电性结构。剖面长约 7.7km,自南东至北西

(300°)共采集 40 个点。结合地质概况对剖面图进行解译(图 6):(1)0—27 点为砂泥岩,电阻率大约在 10²Ω·m,28—40 点为灰岩,电阻率约在 10³Ω·m;(2)解译出 5 条断裂带,出水钻孔位于断裂带中,出水地层为须家河组砂岩。通过该剖面可知:(1) 钻孔深部存在大型断裂;(2) 钻孔深部出水地层为须家河组砂岩。

L₈线,查明华蓥山西翼无水钻孔的地下电性结构。剖面长约 2.6km,自北西至南东(115°)共采集

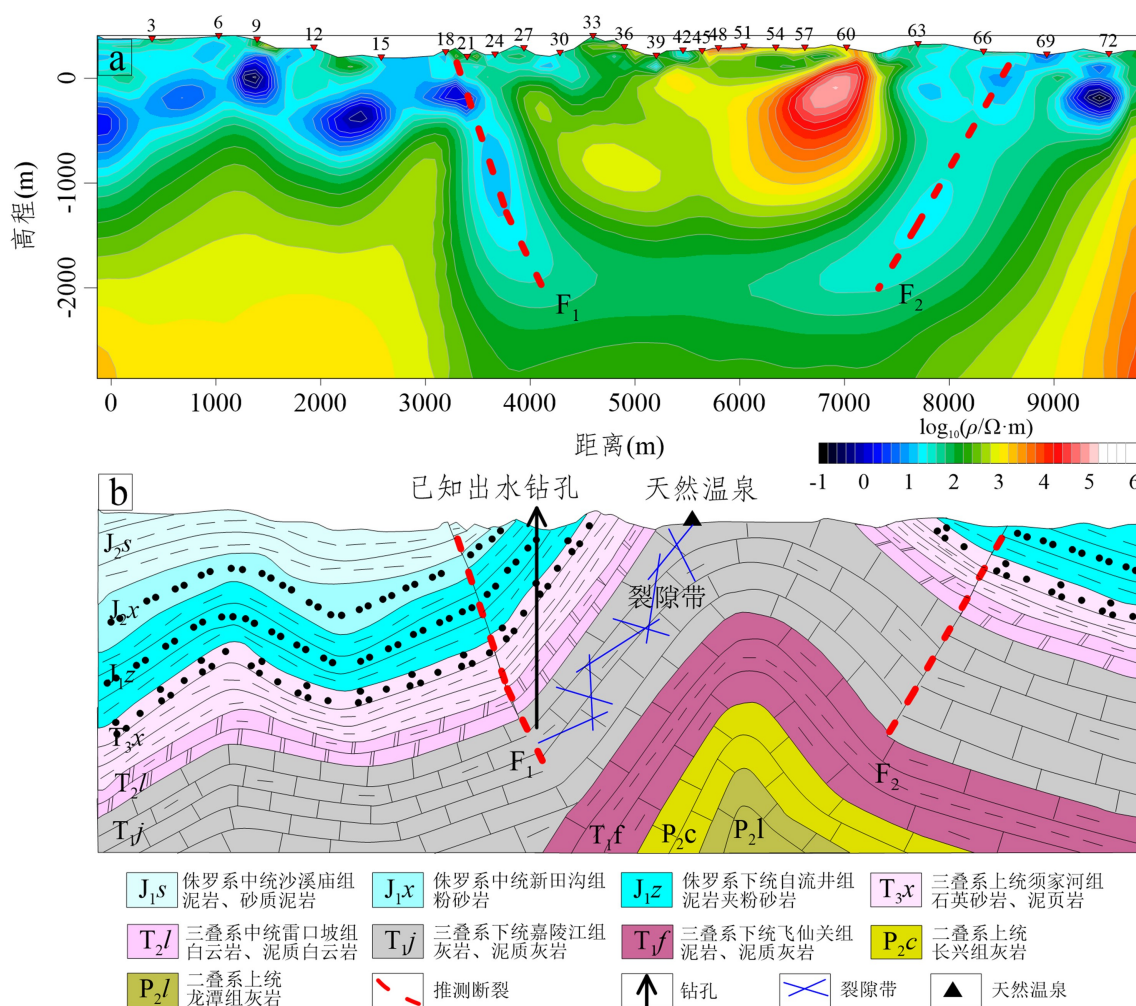


图6 L_6 线音频大地电磁测深反演剖面(a)和音频大地电磁测深解译剖面(b)

Fig. 6 Inversion and interpretation of L_6 audio magnetotelluric sounding inversion profile (a) and audio magnetotelluric sounding interpretation profile (b) in the key geothermal exploration area of Mujia Town

14 个点。结合地质概况解译出 3 条断裂(图 8)。通过该剖面可知:(1) 钻孔深部不存在大型断裂;(2) 嘉陵江组未出水。

通过三条剖面可知:(1) 出水钻孔必在断裂带上;(2) 嘉陵江组不一定出水;(3) 其他地层也可能出水。综上, 断裂控水在川东褶皱带具有普适性。

4 讨论

4.1 嘉陵江组与相互连通的断裂系统两种勘查目标体的空间矛盾

上述音频大地电磁测深解译断裂与嘉陵江组呈斜交关系,如图 9。根据区域地温梯度及勘查经验,设计 1500~2500m 左右的地热勘查井。以嘉陵江组为目的层的勘查模式,认为随嘉陵江组的埋深

地温增加,以相互连通的断裂系统为目标的勘查模式,认为随断裂的埋深地温增加(图 9),两者有着较大的空间矛盾。这种空间矛盾会产生三种勘查失误(图 9)。一是,偏离断裂,即使钻至嘉陵江组也无水,造成勘探失误;1 号钻孔应往左边布设(图 9)。二是,误打误撞钻遇断裂,以为深部嘉陵江组有温度更高的热水,加大勘探深度,造成经费增加;2 号钻孔应往右边布设,或钻遇断裂即可停止钻进(图 9)。三是,断裂埋深大于嘉陵江组,打到嘉陵江组,未打到断裂,造成勘探失误;3 号钻孔应往右边布设,或增加钻进深度(图 9)。据此,解释了“钻遇嘉陵江组未出地热水及未钻遇嘉陵江组出现地热水”的勘查事实。

4.2 相互连通的断裂系统是可持续开发的地热水空间载体

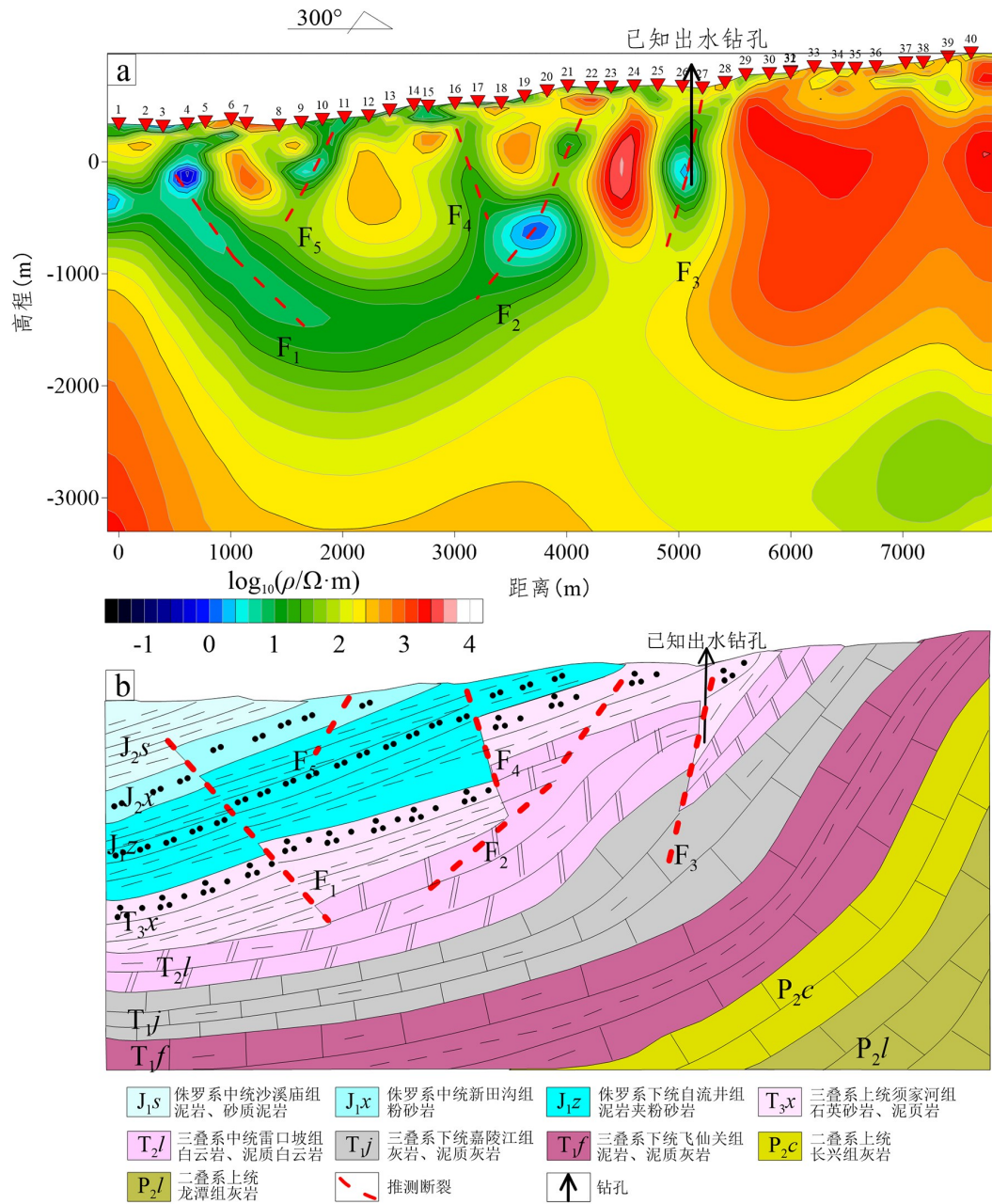


图 7 L₇线音频大地电磁测深反演剖面(a)和音频大地电磁测深解译剖面(b)

Fig.7 Inversion and interpretation of L₇ audio magnetotelluric sounding inversion profile (a) and audio magnetotelluric sounding interpretation profile (b) in the key geothermal exploration area of Mujia Town

相互连通的断裂系统在空间上的广大展布,使其具有通道与储层的双重属性,我们提出其是地热水“空间载体”的概念。嘉陵江组含有大量的地热水,毫无疑问是正确的。但这些地热水能够在人类可开采的时间内运移吗(而不是地质时间)?根据平面径向流压力波及半径计算公式(公式1,巴斯宁耶夫等,1992),进行半定量分析。

$$R(t) \approx 2 \sqrt{\frac{kpt}{\mu\varphi}} \quad (1)$$

式中, $R(t)$ —压力波及半径; k —渗透率; p —边界压力; μ —地下水黏度; φ —地层孔隙度; t —波及时间。

设川东褶皱带嘉陵江组渗透率约为 0.062mD(根据气田开发内部资料,石炭系碳酸盐地层渗透率统计资料为 0.062mD,依此设定嘉陵江组碳酸盐地层渗透率),边界压力为 2000m 水柱,40℃的地热水粘度为 $0.656 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$,地层孔隙度 2%。据公式 1,嘉陵江组 2 天时间压力波及半径约为 8m,1000 天的地层压力波及半径约为 179m,10000 天的

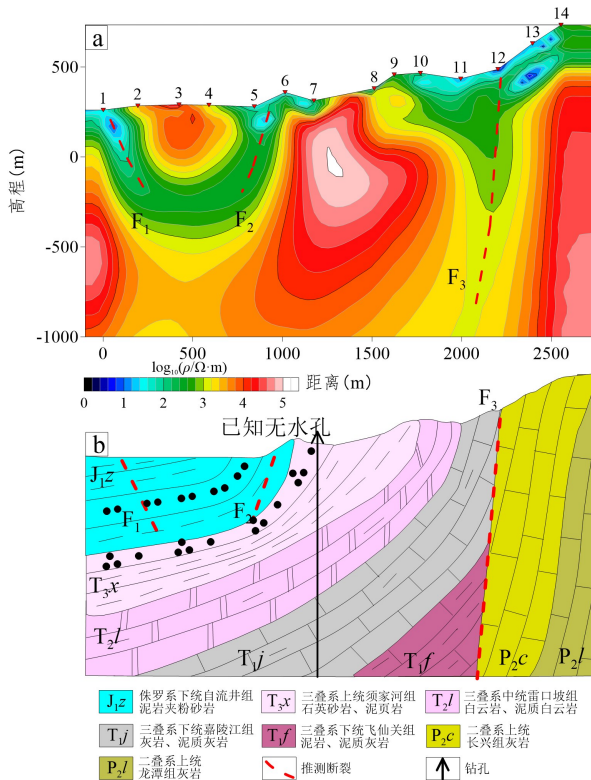


图8 L_8 线音频大地电磁测深反演剖面(a)和音频大地电磁测深解译剖面(b)

Fig. 8 Inversion and interpretation of L_8 audio magnetotelluric sounding inversion profile (a) and audio magnetotelluric sounding interpretation profile (b) in the key geothermal exploration area of Mujia Town

地层压力波及半径约为566m。也就是说嘉陵江组地层极低的渗透性,无法建立汇水端与温泉终端的水力联系,只能通过抽水维持开采量,随着抽水的进行,压降漏斗剧烈增大,最终导致无水可抽。而

相互连通的断裂系统则具有极高渗透性,可以建立汇水端与温泉终端的水力联系(图10),合理的开发形成稳定渗流场,保证温泉可持续开发利用。因此,碳酸盐岩地层为地热水开发目标体,其内的流体是静态的(相对于开发时间),不可持续开发的;而以相互连通的断裂系统为空间载体的川东褶皱带地热系统,其内的流体是动态的,可持续开发的。

4.3 川东褶皱带地热系统

“储层”似乎是地热方面的重点研究对象。“储层”概念来源于油气勘探,演化到其他行业,如矿床中的“源-运-储”系统,包括地热行业中的“源-运-储-盖”四要素。但我们会发现,无论是油气、还是矿床中“储”的概念,是流体运移过来后进行储集。那么,我们对储层开发后,总有开发殆尽的时候。显然,川东褶皱带的地热水在无穷无尽的流淌。若用“储层”的概念,那么地热水是不可持续开发的。因此,我们需要坚定地运用地热系统的概念,把川东褶皱带看作整体进行研究。

晚侏罗—早白垩世古太平洋板块向北西俯冲(Li et al., 2018),叠加喜山期印度大陆与欧亚大陆的碰撞作用,形成了如今的川东褶皱带(王宗秀等, 2019)。在挤压过程中,侧向应力不均一,容易形成北东向构造为主,北西向构造为辅,网状相互连通的断裂系统。川东褶皱带缺乏新近纪以来的岩浆岩,深部也不存在部分熔融体,说明川东褶皱带地热系统的增温主要为地热梯度加热。根据地热水H-O同位素位于当地大气降水线上,推断大气降水为地热水的主要补给。根据图5,地下暗河与深部断裂相连通(或者说地下暗河是断裂系统在径流区

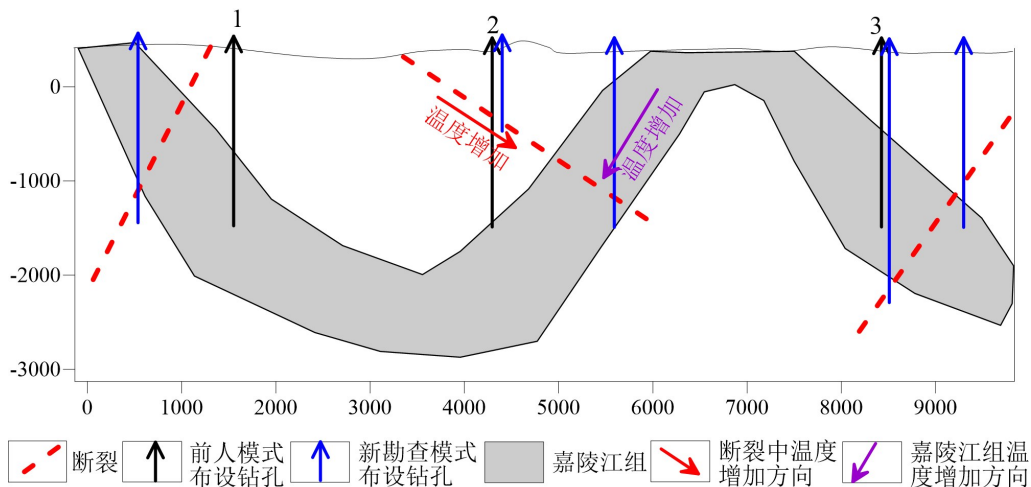


图9 新、老勘查模式空间矛盾示意图

Fig. 9 Schematic diagram of spatial contradiction between new and old exploration modes

- 490; 170–179.
- Liu S F, Steel R, Zhang G W, 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: Record of continent-continent collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 (1) : 9–27.
- Wang E, Meng K, Su Z, et al., 2014. Block rotation: Tectonic response of the Sichuan basin to the southeastward growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe-Xiaojiang fault[J]. *Tectonics*, 33 (5) : 686–718.
- Nelson K D, Zhao W, Brown L D, et al., 1996. Partially Molten Middle Crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results[J]. *Science*, 274(5293):1684–1688.
- Pollack H N, Hunter S J, Johnson J R, 1993. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set [J]. *Reviews of Geophysics*, 31:267–280.
- Ta M M, Zhou X, Guo J, et al., 2019. Hydrogeochemical characteristics and formation of the hot springs occurring in the plunging ends of an anticline in Chongqing, Eastern Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 78:468.
- Ta M M, Zhou X, Xu Y, et al., 2020. Occurrence and flow systems of the anticline-controlled thermal groundwater near Chongqing in eastern Sichuan Basin of China[J]. *Hydrology Research*, 51(4) : 739–749.
- Wei W B, Unsworth M, Jones A, et al., 2001. Detection of Widespread Fluids in the Tibetan Crust by Magnetotelluric Studies[J]. *Science*, 292(5517) : 716–719.
- Yang P H, Dan L, Groves C, et al., 2019. Geochemistry and genesis of geothermal well water from a carbonate-evaporite aquifer in Chongqing, SW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 78:33.
- K. C. 巴斯宁耶夫, A. M. 费拉索夫, И. H. 科钦娜, 等, 1992. 地下流体力学[M]. 北京:石油工业出版社.
- 陈荣华, 1988. 重庆市统景风景区温泉成因与开发利用[J]. *重庆师范学院院报*, 2(5):51–54.
- 付宜兴, 张萍, 李志祥, 等, 2007. 中扬子区构造特征及勘探方向建议[J]. *大地构造与成矿学*, 31(3):308–314.
- 何治亮, 冯建赞, 张英, 等, 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地学前缘*, 24(3):168–179.
- 胡召齐, 朱光, 刘国生, 等, 2009. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代:不整合面的证据[J]. *地质论评*, 55(1):32–42.
- 李东升, 刘东升, 2011. 重庆地热水资源热储构造与径流补给[J]. *河海大学学报*, 39(4):372–376.
- 李鸿举, 1987. 重庆市小泉宾馆地下水的水文地质特征及开采利用条件[J]. *四川地质学报*(1), 66–72.
- 林耀庭, 熊淑君, 1999. 氢氧同位素在四川气田地层水中的分布特征及其成因分类[J]. *海相油气地质*, 4(4):39–45.
- 刘重庆, 周建勋, 朗建, 2013. 多层滑脱条件下褶皱冲断带形成制约因素研究:以川东—雪峰构造带为例[J]. *地球科学与环境学报*, 35 (2) : 45–55.
- 刘春平, 王拥军, 林娟华, 等, 2006. 江汉盆地印支—喜马拉雅期构造演化与海相地层油气成藏模式及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 11(2):24–29.
- 罗改, 王全伟, 陈宇龙, 等, 2021. 四川省大地构造单元划分及其基本特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(4):633–647.
- 罗祥康, 2000. 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*, 19(2):159–163.
- 罗云菊, 刘东燕, 许模, 2006. 重庆地下热水径流特征研究[J]. *地球与环境*, 34(1):49–54.
- 罗云菊, 许模, 唐光洁, 2007. 重庆南温泉背斜地下热水资源衰减过程数值模拟研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 34(2):201–205.
- 毛小平, 汪新伟, 李克文, 等, 2018. 地热田热量来源及形成主控因素[J]. *地球科学*, 43(11):4256–4266.
- 唐晓珊, 黄建中, 郭乐群, 1997. 再论湖南板溪群及其大地构造环境[J]. *湖南地质*, 16(4):219–226.
- 拓明明, 周训, 郭娟, 等, 2018. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. *水文地质工程地质*, 45(1):165–172.
- 谭志远, 侯学文, 魏继生, 等, 2021. 四川盆地下三叠统嘉陵江组主要成盐期岩相古地理特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(4):564–572.
- 王二七, 苏哲, 许光, 2009. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. *地质科学*, 44(4):1266–1288.
- 汪洋, 邓晋福, 汪集昉, 等, 2001. 中国大陆热流分布特征及热—构造分区[J]. *中国科学院研究生院学报*, 18(1):51–58.
- 王宗秀, 李春麟, 李会军, 等, 2019. 川东—武陵地区构造格局及演化[J]. *地质力学学报*, 25(5):827–839.
- 吴奇之, 王同和, 李明杰, 等, 1997. 国油气盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:石油工业出版社, 177–178.
- 肖琼, 2012. 重庆三叠系碳酸盐岩热储成因与水—岩作用过程研究[D]. 重庆:西南大学博士学位论文.
- 徐明, 朱传庆, 单竞男, 等, 2011. 四川盆地岩石圈热结构[J]. *地球物理学报*(6):225.
- 余琴, 杨平恒, 王长江, 等, 2017. 重庆市统景温泉水化学特征及混合作用[J]. *中国岩溶*, 36(1):59–66.
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等, 2006. 中国南方现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 49(4):1118–1126.
- 张乐天, 金胜, 魏文博, 等, 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究[J]. *地球物理学报*, 55(12):4126–4137.
- 张小琼, 单业华, 聂冠军, 等, 2013. 中生代川东褶皱带的数值模拟:滑脱带深度对地台盖层褶皱型式的影响[J]. *大地构造与成矿学*, 37(4):622–632.
- 曾敏, 2013. 重庆温泉分布及类型研究[J]. *地下水*, 35(5):4–7.
- 周训, 曹琴, 尹菲, 等, 2015. 四川盆地东部高褶皱三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 89(11):1908–1920.