

四川盆地地热地质条件及勘探潜力评价

孙东, 李金玺, 曹楠, 李智武, 张志鹏, 谢小国, 袁梦雨, 蔡鸿燕

A preliminary study of the geothermal geological characteristics and exploration potential of the Sichuan Basin

SUN Dong, LI Jinxi, CAO Nan, LI Zhiwu, ZHANG Zhipeng, XIE Xiaoguo, YUAN Mengyu, and CAI Hongyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

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

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 193-204

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110028

孙东, 李金玺, 曹楠, 等. 四川盆地地热地质条件及勘探潜力评价 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 193-206.

SUN Dong, LI Jinxi, CAO Nan, *et al.* A preliminary study of the geothermal geological characteristics and exploration potential of the Sichuan Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 193-206.

四川盆地地热地质条件及勘探潜力评价

孙东^{1,3}, 李金玺², 曹楠^{1,3}, 李智武², 张志鹏^{1,3}, 谢小国³, 袁梦雨², 蔡鸿燕²

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川成都 610081; 2. 地球勘探与信息技术教育部重点实验室 (成都理工大学), 四川成都 610059; 3. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川成都 610081)

摘要: 地处特提斯—喜马拉雅构造域与滨太平洋构造域交接转换部位的四川盆地, 是造山带环绕的多旋回沉积盆地, 地热资源禀赋较好, 但地质构造复杂, 不同构造带地热条件和成热模式差异较大, 严重制约地热勘探开发与利用。在四川盆地已有地热勘探开发资料和油气勘探研究成果的基础上, 系统总结了四川盆地的地热储层、地热流体、大地热流和地温梯度场的特征及分布规律, 对比研究了四川盆地不同类型盆地结构区的地热储盖层组合和地热条件的异同性, 指明了不同构造单元的勘探靶区。结果表明: (1) 四川盆地及周缘的大地热流值为中低热流值, 地温梯度在 16~30 °C/km 之间, 地热源受活动断裂和基底构造控制明显, 发育传导型水热系统, 多属中低温 (<90 °C) 地热资源; (2) 四川盆地的地热资源分布主要受盆地构造、地层分布和水文条件等控制; (3) 海相层系至少存在 4 个岩溶型热储层, 陆相地层局部偶夹 1~2 个砂砾岩型热储层, 地下水多为 SO₄-Ca 型微咸水。研究建议以中~下三叠统和中二叠统岩溶型热储为重点层系, 尤其在川东和川西地区二者勘探潜力较大, 其次优选其他海相层系岩溶型热储进行勘探, 而陆相碎屑岩热储层盖层、地下水补给和热源等条件较差, 勘探潜力一般, 开发风险高且需谨慎。该研究可为四川盆地地热勘探开发利用提供理论依据。

关键词: 地热地质; 地质构造; 地热资源; 地热储盖层; 四川盆地

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0193-14

A preliminary study of the geothermal geological characteristics and exploration potential of the Sichuan Basin

SUN Dong^{1,3}, LI Jinxi², CAO Nan^{1,3}, LI Zhiwu², ZHANG Zhipeng^{1,3}, XIE Xiaoguo³,
YUAN Mengyu², CAI Hongyan²

(1. *Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China;*

2. *Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques, Ministry of Education (Chengdu*

University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. *Sichuan Huadi Construction*

Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: The Sichuan Basin located in the intersection of the Tethys-Himalaya and Pacific domains is a multicycle sedimentary basin surrounded by orogenic belts. The geothermal resources are good, but with complex geological structures. Geothermal conditions and heat generation models are different in different tectonic zones in the basin, which seriously restrict the geothermal exploration, development and utilization of geothermal

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2021-12-20

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602153; 41472107; 41230313)

第一作者: 孙东 (1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地热地质、构造地质方向的研究。E-mail: 67986685@qq.com

通讯作者: 李金玺 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质和地球物理方向的研究。E-mail: lijinxi23@qq.com

resources. In this paper, the distribution of geothermal resources, characteristics of geothermal fluids, heat flow and geothermal gradients in the Sichuan Basin are comprehensively analyzed by collecting the existing geothermal and petroleum exploration and development data. The geothermal reservoirs and caprocks, the burial depth and the resource conditions of different types of the basin-mountain structure areas in the Sichuan Basin are analyzed. The suggested exploration target for exploration and development are proposed in different tectonic units of the Sichuan Basin. The results show (1) the terrestrial heat flow values in the Sichuan Basin and its surrounding areas are from medium to low, and the geothermal gradient varies between 16 °C/km and 30 °C/km. The terrestrial heat source is obviously controlled by active faults and basement structure, and the hydrothermal systems are conductive and belong to the low-moderate temperature geothermal resources in the Sichuan Basin. (2) The distribution of geothermal resources in the Sichuan Basin is mainly controlled by basin structure, stratigraphic distribution and hydrologic conditions. (4) There are at least 4 karst-type geothermal reservoirs in the marine strata, and 1 – 2 glutenite-type geothermal reservoirs in clastic strata. Geothermal water is of SO₄—Ca type and is brackish. The Middle-Lower Triassic and Middle Permian carbonate rocks are considered as the best marine reservoirs, especially in the eastern and western basin. Secondly, other marine karst-type geothermal reservoirs are selected for exploration. The continental clastic rocks should be cautious because their caprocks, groundwater recharge and heat source are worse than the geothermal conditions of the marine carbonate rocks. This study may provide important guidance for further promoting geothermal exploration, exploitation and utilization in the Sichuan Basin.

Keywords: geothermal geology; structures; geothermal resource; geothermal reservoir and cap; Sichuan Basin

地热能属于可再生的清洁能源,是化石燃料碳替代的主要能源之一。我国地热资源禀赋良好,年热值可达 3.06×10^{18} kWh^[1-2],分布广泛且具有明显的规律性和分带性^[3]。加大地热资源的开发和利用,可提升可再生清洁能源占比,进而优化能源消费结构^[4]。

受地形地貌和气候环境等影响,四川盆地风能和光能的应用前景不乐观^[3,5-6],地热成为可再生能源中主要开发利用方向^[4-7]。四川盆地是我国重要的油气资源战略基地,勘探程度较高,地质、地震和钻井资料非常丰富,为地热资源勘探开发利用奠定了良好的基础^[8-9]。四川盆地为典型的多旋回沉积盆地,地热资源较好,但盆地经历了多期构造叠加,热储构造复杂^[10-11],新生代地表差异隆升剥蚀,导致盆地不同构造带的地热条件差异较大,地热成因模式不清,制约着四川盆地的地热勘探开发利用^[12-13]。本文初步梳理了四川盆地地热地质条件和地热资源分布特征,对比分析了四川盆地不同盆山结构区地热条件和勘查潜力,提出了四川盆地不同构造带的有利勘查区和重点目的层,可为四川盆地及周缘地热勘查、选区、选靶提供依据,提高地热资源的综合开发利用水平。

1 地质背景

四川盆地位于特提斯—喜马拉雅构造域与滨太平洋构造域交接转换部位,其形成与演化受这两大构造域控制^[3,14-19]。四川盆地属于典型的叠合盆地,是在早期稳定的克拉通海相盆地之上叠加了晚期陆相前陆盆地^[20-21],沉积了以巨厚的震旦纪~中三叠世的海相碳酸盐岩为主和少量上三叠世~始新世的陆相碎屑岩^[19,22-23]。

四川盆地群山环绕,盆内发育龙泉山和华蓥山。基于盆山过渡区构造样式、基底构造、深部结构和盆山耦合关系等,四川盆地可以划分为川北突变型盆山结构区(I)、川西突变型盆山结构区(II)、川西南渐变型盆山结构区(III)、川南渐变型盆山结构区(IV)、川东渐变型盆山结构区(V)以及川中原地隆起盆地结构区(VI)^[20](图 1)。

2 地热地质条件

2.1 地热开采利用储层特征

四川盆地内及周缘的地热井和地热露头热储层信息显示(表 1): (1) 地热储层主要包括上侏罗统~白垩统砂砾岩和砂岩^[7,12]、中~下侏罗统砂岩及砾

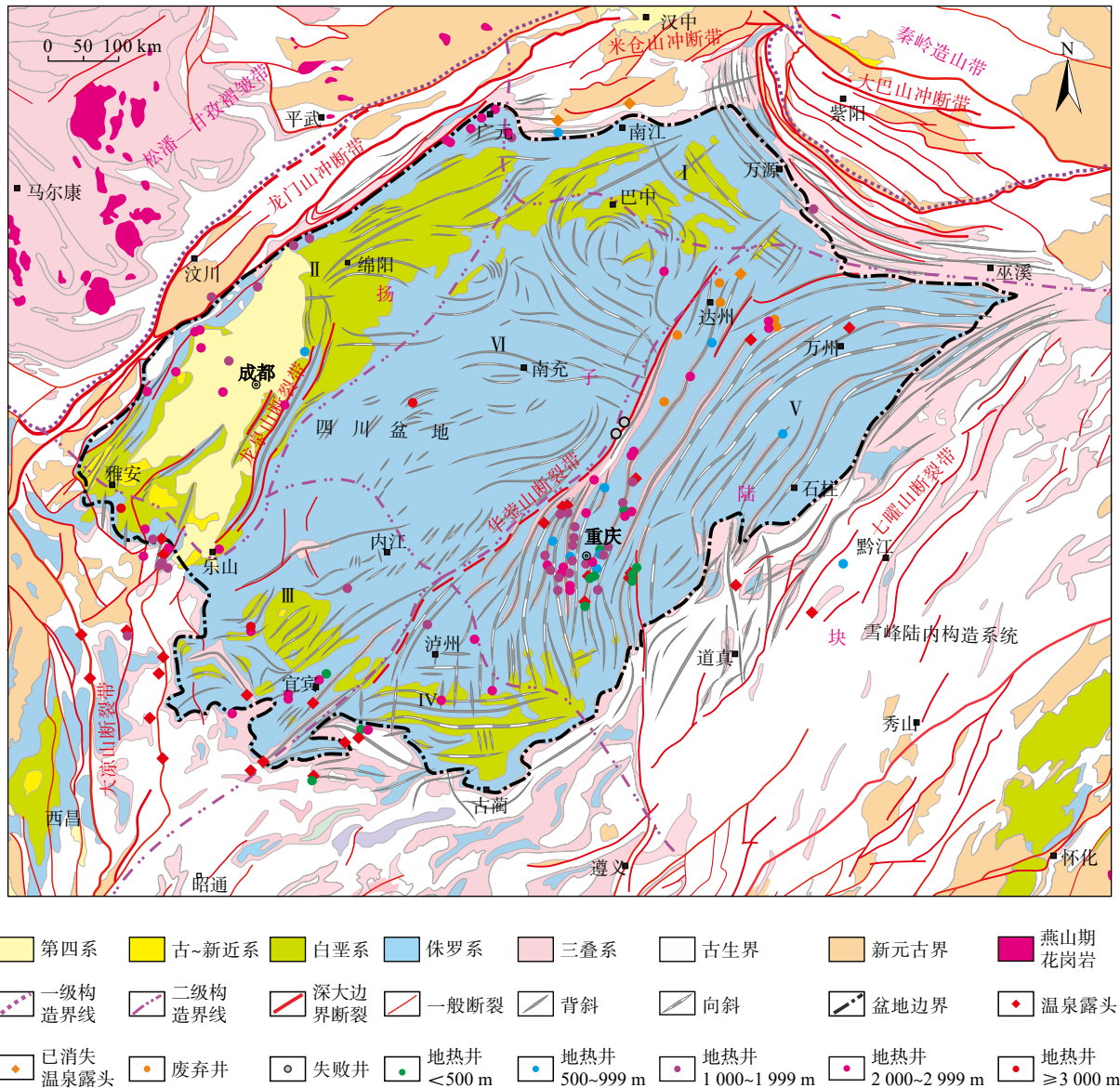


图 1 四川盆地地质构造与地热资源分布

Fig. 1 Geological map of the Sichuan Basin with the structural units, hot springs and geothermal wells

岩^[24]、上三叠统须家河组砂岩、中~下三叠统嘉陵江组和雷口坡组碳酸盐岩^[7, 13, 25-28]、中二叠统栖霞组和茅口组碳酸盐岩^[7, 29-31], 以及奥陶系、寒武系和震旦系的碳酸盐岩或其夹层^[7, 32]。(2)中~下三叠统嘉陵江组和雷口坡组储层开采点为 102 处, 占比为 65.8%; 另约 12.9% 的地热点位于中二叠统栖霞组+茅口组储层内; 震旦系灯影组、寒武系、奥陶系有部分地热点分布, 极个别位于中生界红层内, 反映了下三叠统和中二叠统碳酸盐岩是主力地热储层, 总占比约为 80%。盆地多数地区陆相红层碎屑岩地热勘探潜力较差^[31]。

2.2 大地热流特征

四川盆地大地热流值介于 35.4~68.8 mW/m², 平

表 1 四川盆地构造区内地热储层统计表

Table 1 Geothermal reservoirs for the tectonic units of the Sichuan Basin

构造区	各区地热储层数/处						合计/处
	I	II	III	IV	V	VI	
上侏罗统~下白垩统	—	5	2	—	—	—	7
中~下侏罗统	—	1	—	—	1	1	3
上三叠统	—	3	1	—	2	—	6
中~下三叠统	2	8	7	3	81	1	102
中二叠统	—	1	12	6	1	—	20
奥陶系	—	—	—	1	4	—	5
寒武系	—	—	4	—	—	—	4
震旦系	3	—	5	—	—	—	8

均为 53.2 mW/m^2 , 总体上为“温盆”, 呈现中低热流的特征, 反映了较为稳定的中生代构造热演化特征^[33]。基底隆起区的大地热流较高, 坳陷区的大地热流较低。川中和川西南的大地热流达到 $60 \sim 70 \text{ mW/m}^2$, 而川西北的大地热流为 $50 \sim 60 \text{ W/m}^2$, 在川东北大巴山褶皱带前缘低至 40 W/m^2 左右。总体反应了盆内基底构造对大地热流明显的控制作用, 盆外大凉山活动断裂对川西南地区大地热流产生影响。

2.3 地温梯度特征

本文在全面收集前人地温梯度数据基础上^[34-40], 补充了 19 口井温测井数据, 综合绘制了四川盆地及

周缘地区的地温梯度图(图 2), 基本轮廓与前人成果类似。地温梯度主要为 $16 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C/km}$, 川北、川东和川南地温梯度稍低, 一般低于 $20 \text{ }^\circ\text{C/km}$, 川西南和川中地区存在 2 个高值区^[33], 但细节上存在一定差别, 主要表现在: (1) 龙泉山构造带地温梯度为 1 个相对高值区, 地温梯度为 $22 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C/km}$, 且从南西向北东递减; (2) 川西南高值区的形态有所差别可能与川滇南北构造带北端的大凉山断裂带有关; (3) 川中地温梯度一般在 $22 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C/km}$, 相对高值区形态表现为北东向, 向北延伸至巴中附近; (4) 川东北的相对高值区向东延伸更远, 可能达到巫溪以西地区; (5) 在重庆东南

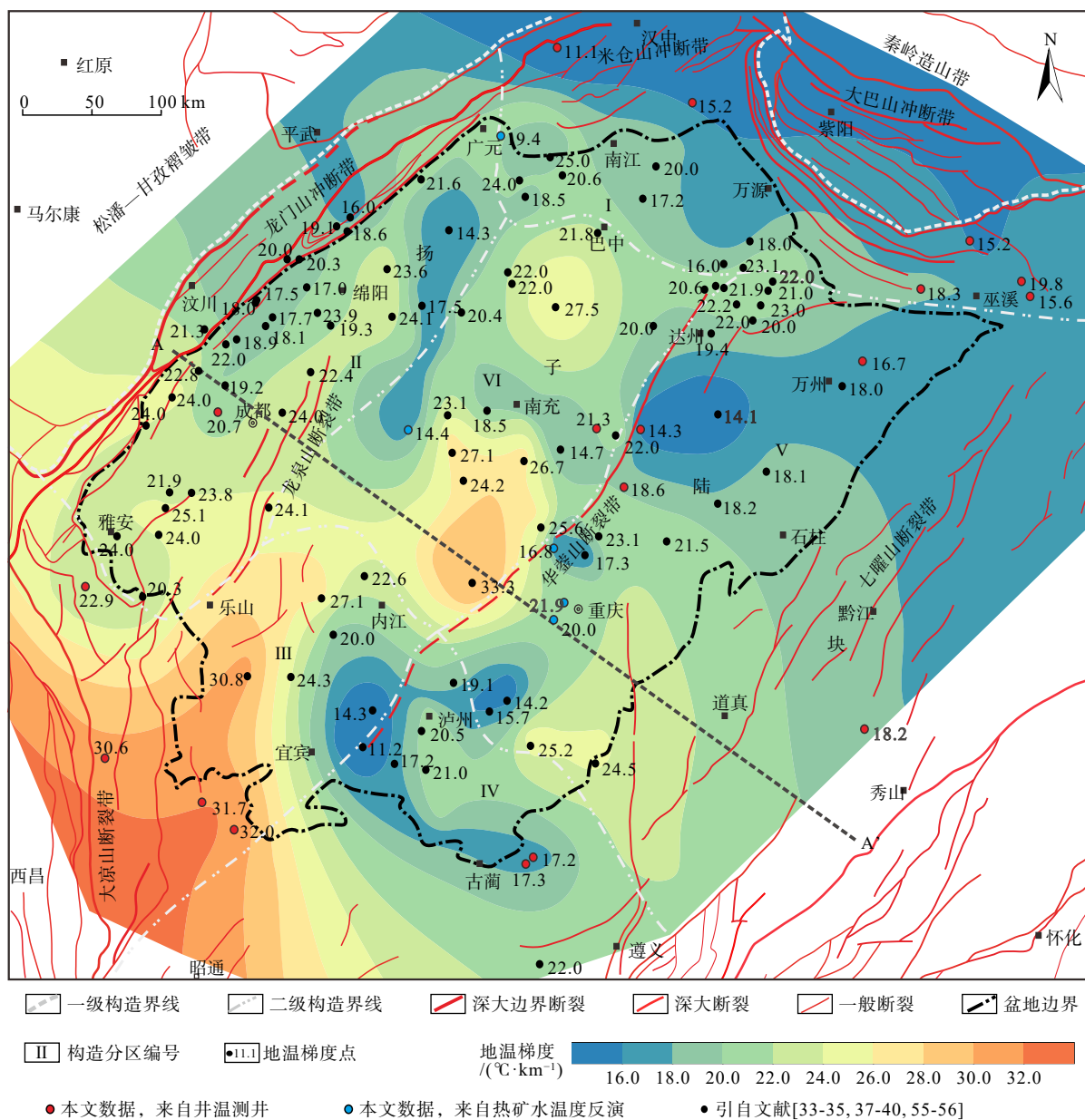


图 2 四川盆地地温梯度图
Fig. 2 Geothermal gradients of the Sichuan Basin

侧存在1个地温梯度在24~25 °C/km的相对高值区,推测可能与南北走向的遵义—松坎断裂有关。综上所述,现今四川盆地及周缘南北向构造带的地温梯度最高;其次是川中基底隆起区,其西侧北东向构造的南段受构造活动性强的影响,地温梯度稍高于其他区域。

3 地热资源分布特征

3.1 地热资源分布

四川盆地内及周缘地区地热水天然露头出露的温泉较少,主要以凿井开采为主。温泉露头主要分布在川西南盆地外侧的构造带(图1、表2),受控于区域性大断裂,其次在川北的米仓山构造带和川东雪峰山陆内造山带中有少量点出露;盆地内露头数量很少,仅在川东平行岭谷的河流深切地区有少量出露(图1)。

表2 四川盆地地热资源分布统计表
Table 2 Distribution of geothermal resources in the Sichuan Basin

构造分区	温泉点/个	百分比/%	钻井/个	百分比/%	合计/个	百分比/%
I	2	5.88	4	3.31	6	3.87
II	—	0.00	16	13.22	16	10.32
III	11	32.35	20	16.53	31	20.00
IV	5	14.71	7	5.79	12	7.74
V	16	47.06	73	60.33	89	57.42
VI	—	0.00	1	0.83	1	0.65
小计	34	100.00	121	100.00	155	100.00

四川盆地深部地热井(含油气废井)共计121口,主要分布在川东^[13, 41-43],数量达到73口,占整个盆地的60.33%,其中在重庆一带最为密集(图1、表2);其次在川西、川西南和川南地区,有部分井点分布^[44];而川北和川中地区地热井较少(图1、表1)。

结合天然露头和地热井来看,川东地区内数量最多,占57.42%,其次是川西南、川西和川南,分别占20.00%、10.32%和7.74%(表2)。

3.2 地热流体特征

3.2.1 水量特征

四川盆地露头和地热井可开采水量累计达23.23×10⁴ m³/d,其中天然温泉露头或人工平硐、隧洞揭露的自流量达2.45×10⁴ m³/d,地热井可采资源量约17.24×10⁴ m³/d。天然温泉露头的流量最小约30.2 m³/d,最大达到6 037 m³/d,多数小于300 m³/d(表3)。地热井的单井开采量差别大(表3),热储层位为碎屑岩的地热井可采资源量多小于300 m³/d;热储层位为碳酸盐岩的地热井可采资源量多在1 000~3 000 m³/d,个别

超过3 000 m³/d,如广安邻水县牟家镇地热井、广元市利州区的川北温泉和雅安市的周公山温泉等^[29, 45]。

表3 四川盆地地热点资源统计

Table 3 Recoverable pumpage and flow rate of the geothermal wells and hot springs in the Sichuan Basin

可开采量/流量/(m ³ ·d ⁻¹)	地热井/个	地热露头/个
[0, 300)	26	20
[300, 1000)	26	6
[1000, 2000)	29	4
[2000, 3000]	30	3
>3000	10	1

3.2.2 水温特征

天然温泉露头温度一般为21~48 °C,平均为35.25 °C,地热井开采的地热水(井口)温度一般为21~95 °C,平均为46.08 °C^[24, 45-46]。统计显示地热井井口温度主要在30~60 °C,地热露头的温度区间主要介于30~40 °C。各温度区间地热井和地热露头的个数见表4。

由表4可知,四川盆地地热水绝大多数为低温(<90 °C)地热资源,其中钻井揭露的温度属于低温温热水,占钻井数量58.93%,其次为低温温水,占25.89%。天然温泉露头中低温温水比重较大,占65.63%^[46],其次为低温温热水占28.13%。整个四川盆地到目前仅在川西南有1口地热井(孝姑温泉)揭露到中温热水。

表4 四川盆地地热水温度统计

Table 4 Temperature of the geothermal wells and hot springs in the Sichuan Basin

温度/°C	分类	地热井/个	地热露头/个
<25	冷水	2	2
[25, 40)	低温温水	29	21
[40, 60)	低温温热水	66	9
[60, 90)	低温热水	14	—
[90, 150)	中温热水	1	—

3.2.3 水化学特征

按《水文地质手册》^[47]标准中的溶解性总固体(TDS)指标分类,四川盆地地热水占比最高的为微咸水,达到46.46%,其次分别是淡水、咸水、盐水和卤水(表4)。淡水在除川中之外均有分布;微咸水、咸水、盐水主要集中在川东、川西南、川南和川西^[8, 25, 41, 48];卤水在除川北和川东外均有分布。统计表明,川中TDS较高,基本达到了盐水和卤水,川东南受径流和埋藏条件的限制,形成卤水的条件稍差,其余各区受地层和径流条件控制,各类水均有。

如图 3、表 5 所示, 地热水的 TDS 和地下水类型受地层和径流条件的控制, 总体表现为碳酸盐岩储层在径流途径较短时, TDS 略低, 同样径流长度的碎屑岩储层 TDS 较高, 如在川西深部中~下三叠统碳酸盐岩储层内的天赐温泉和罗浮山温泉 TDS 低于其上部上三叠统碎屑岩储层内的文锦江温泉、望丛温泉和香

颂湖温泉。川中中~下三叠统碳酸盐岩储层荣海井、女基井(中国死海)均为卤水, TDS 远高于川西和川东, 表明了碳酸盐岩储层随着距离增加, 地下水径流条件变差。龙泉山一带的碎屑岩及构造裂隙储层中的地下水也达到了卤水标准, 表明了碎屑岩中地下水径流缓慢。

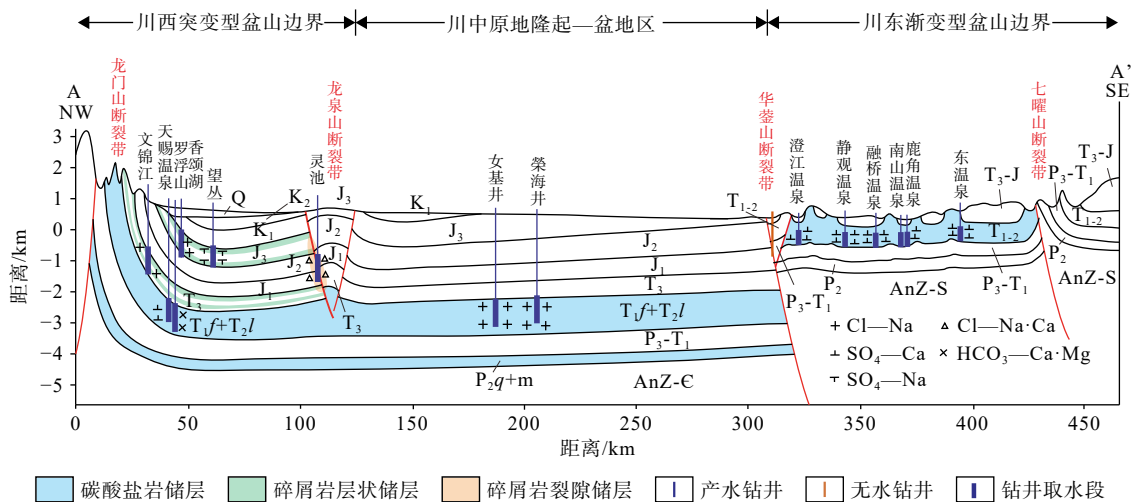


图 3 四川盆地地热资源结构及水化学剖面 (剖面位置见图 2)

Fig. 3 Geological and hydrochemical profile of the Sichuan Basin (profile location in figure 2)

表 5 四川盆地地热温泉水 TDS 统计表

Table 5 TDS of geothermal hot spring in the Sichuan Basin

温泉	TDS/(g·L ⁻¹)	温泉	TDS/(g·L ⁻¹)
文锦江	93.90 ~ 96.70	荣海井	141.94
天赐温泉	3.87 ~ 3.97	澄江温泉	2.01
罗浮山	14.32 ~ 14.73	静观温泉	1.51
香颂湖	18.60 ~ 24.30	融桥温泉	2.66
望丛	9.22	南山温泉	3.03
灵池	81.71 ~ 91.08	鹿角温泉	2.76
女基井	230.60	东温泉	2.86 ~ 2.99

根据 Piper 三线图可知(图 4), 四川盆地及周缘地热水阳离子主要以 Ca²⁺、Mg²⁺为主, 阴离子主要以 Cl⁻、SO₄²⁻为主。全区地下水类型较为分散, SO₄-Ca 占比最高, 达到的 54.7%。川东地区地下水化学类型主要以 SO₄-Ca 为主, SO₄-Ca·Mg 次之; 川西地区地下水化学类型较为集中, 以 Cl-Na 和 SO₄-Ca 为主; 川西南地区地下水化学类型较为分散, 主要有 Cl-Na、HCO₃·SO₄-Ca·Mg 和 HCO₃-Ca·Mg; 川中地区地下水化学类型以 Cl-Na 为主; 川北地区地下水化学类型主要有 SO₄-Ca·Mg 和 HCO₃-Cl-Na·Ca; 川南地区地下水化学类型较为集中, 主要为 Cl-Na。总体的地热水水化学类型与储层关系明显, 前述的 SO₄-Ca 地热

水储层多为中~下三叠统碳酸岩盐地层, 且该储层内其他水化学类型的地热水只占 26.8%, 其阴离子主要是 SO₄²⁻, 其次有少部分的 Cl⁻、HCO₃⁻, 阳离子除 Ca²⁺以外, 有少量的 Na⁺、Mg²⁺[7, 13, 25-27, 41, 48-51]。二叠系储层中阴离子主要为 Cl⁻, 其次有少量的 HCO₃⁻; 阳离子主要为 Na⁺, 其次有少量的 Ca²⁺[25]。震旦系灯影组的阴离子主要为 HCO₃⁻、Cl⁻, 但基本都含少量 SO₄²⁻; 阳离子主要为 Na⁺、Ca²⁺。寒武系、奥陶系储层中阴离子 HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻均有, 阳离子主要为 Mg²⁺, 其次有少量的 Ca²⁺和 Na⁺。上三叠统碎屑岩中获取的数据较少, 主要为 Cl-Ca 型和 SO₄-Ca·Mg。中~下侏罗统碎屑岩储层仅有 1 个数据为 Cl-Na·Ca。上侏罗统、下白垩统碎屑岩储层阳离子基本为 Na⁺, 阴离子以 Cl⁻为主, 含少量的 SO₄²⁻和 HCO₃⁻[24]。

4 讨论

4.1 热储层和盖层组合区域差异

通过四川盆地及周缘地热资料, 结合不同构造单元的构造变形特征, 初步探讨热储盖组合特征及分布差异。

(1) 北缘米仓—大巴山突变型盆山结构区。该区

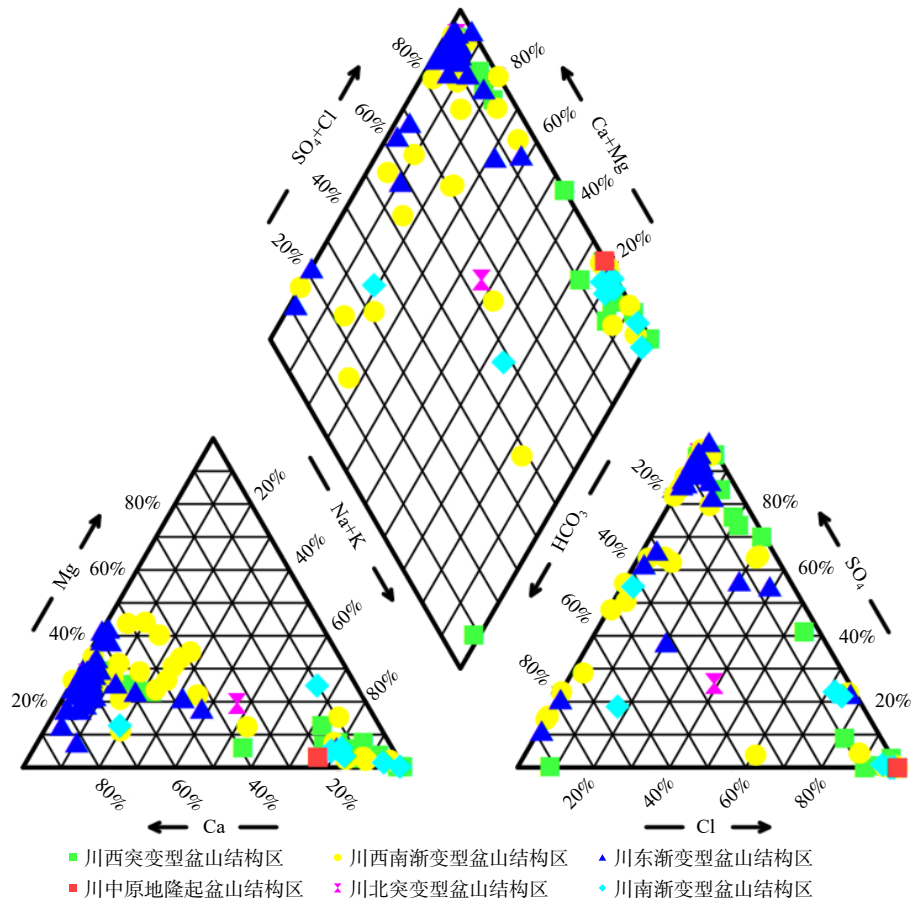


图 4 四川盆地地热水的 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of geothermal waters in the Sichuan Basin

域震旦系~三叠系存在 4 个碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合: ①震旦系灯影组白云岩储层+下寒武统页岩、粉砂岩盖层组合; ②中~上寒武统、奥陶系灰岩储层+志留系页岩盖层组合; ③中~上二叠统灰岩储层+下三叠统泥质灰岩、泥岩盖层组合; ④中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合, 见图 5(a)。其中①③④储层厚度大、盖层相对稳定且具有一定厚度, 开发潜力好, 地热资源较丰富, ②组合储层分段明显, 单层厚度一般, 但盖层较稳定, 具有一定的开发潜力。上三叠统须家河组砂岩、砾岩层较稳定、裂隙发育, 储层较好, 有一定的开发潜力, 但其盖层或隔水底板中往往有煤系分布, 影响地热水的水质; 侏罗系白田坝组、沙溪庙组和蓬莱镇组砂砾岩段可作为储层, 多呈透镜状, 径流条件欠佳, 开发效果不好, 开发需谨慎。

(2) 西缘龙门山突变型盆山结构区。该区域震旦系~三叠系亦存在 4 个碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合, 分别是: ①震旦系灯影组白云岩储层+下寒武统泥质粉砂岩、粉砂岩盖层组合; ②泥盆系、石炭系灰岩

储层+下二叠统页岩、泥岩盖层组合; ③中二叠统灰岩储层+上二叠、下三叠统泥质灰岩、泥岩、页岩盖层组合; ④中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合, 见图 5(b)。其中④组合储层厚度大、盖层相对稳定且具有一定厚度, 组合地热资源勘探潜力好, 地热资源较丰富; ①组合的储层、盖层厚度均一般, 且多受断裂切割, 完整性受影响, 地热资源勘探潜力一般; ②③组合虽储层好, 但盖层极薄, 且同样受构造改造后保存条件不好, 因此潜力较差。陆相上三叠统须家河组、上侏罗统莲花口组中的砂岩、砾岩段可以作为稍好的储层, 且上部盖层较稳定, 具有一定的地热资源勘探潜力; 中侏罗统沙溪庙组砂岩段由于厚度不稳定、层厚一般, 作为储层条件一般; 白垩系和新近系受埋深或盖层制约, 地热资源勘探潜力较差。

(3) 川西南渐变型盆山结构区。该区域震旦系~三叠系存在 3 个主要的碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合, 分别是: ①震旦系洪椿坪组白云岩储层+中~下寒武统粉砂质泥岩、页岩盖层; ②中二叠统灰岩+上二叠

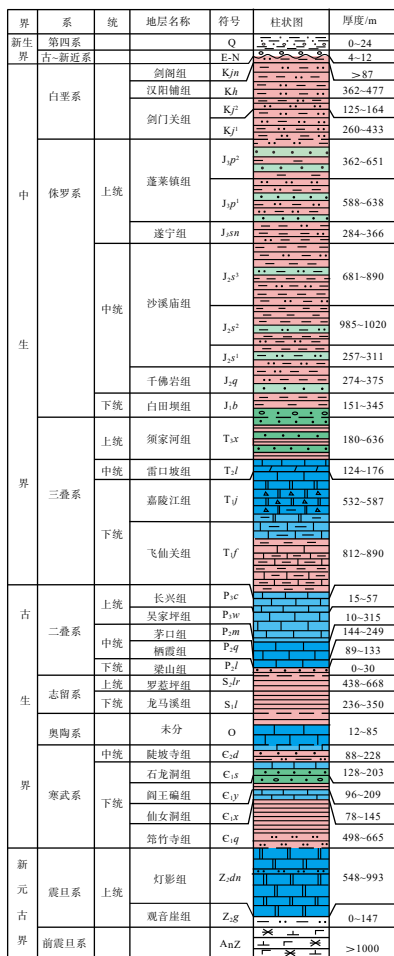
统玄武岩、泥岩盖层;③中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合,见图 5(c)。上述组合中热储和盖层厚度大、较稳定,地热资源勘探潜力较好。其次在上三叠统须家河组和中侏罗统沙溪庙组中分布有较稳定的砂岩层段,上部有稳定的盖层,具有一定的地热资源勘探潜力,但水量偏小。

(4)川南渐变型盆山结构区。该区域震旦系~三叠系存在 3 个主要的碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合,分别是:①寒武系、下奥陶统灰岩储层+中下奥陶统泥岩、页岩盖层;②中二叠统灰岩+上二叠统玄武岩、泥岩盖层;③中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合,见图 5(d)。②③组合在该区域均有勘探开发成功的案例,以②组合资源量最好,③组合总体资源量一般,尚未对①组合进行勘查,需进一步开展研究工作。目前,该区内的侏罗系~白垩系陆相砂岩储层地热条件欠佳,未有勘探开发成功案例。

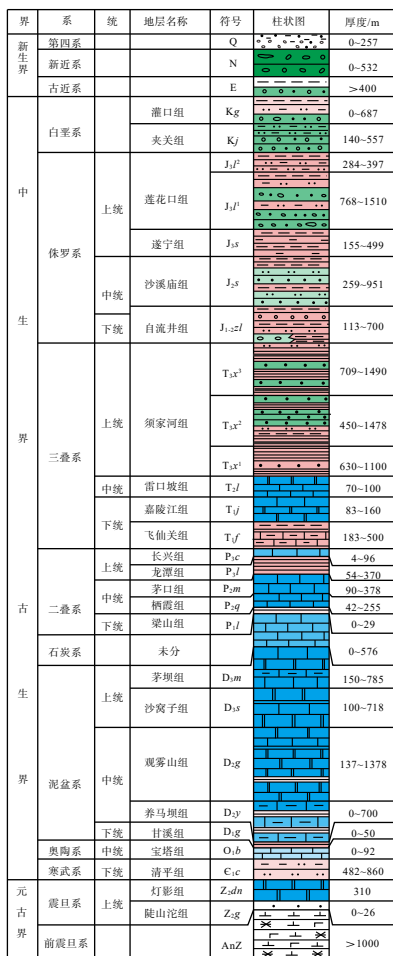
(5)川东渐变型盆山结构区。华蓥山以东的川东

地区存在 3 个主要的碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合,分别是:①寒武系、下奥陶统灰岩储层+中下奥陶统泥岩、页岩、粉砂岩盖层^[26, 42-43, 52-56];②中~上二叠统灰岩+下三叠统泥岩、泥灰岩盖层;③中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合,见图 5(e)。其中组合③地热资源量极好,开发程度高,占该区域已开发利用地热资源的 95% 以上。组合①目前均为天然露头,未进行钻井勘探,但资源量亦较好,可进一步勘探。该地区基本未对陆相地层地热资源进行勘探。

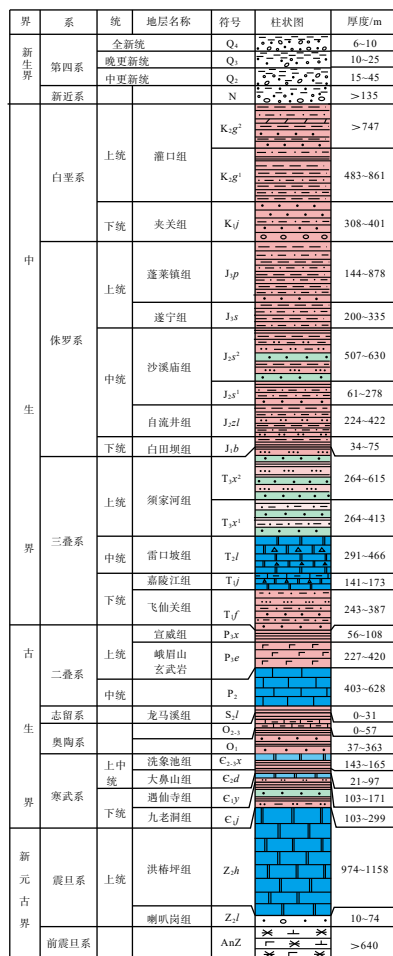
(6)川中原地隆起盆山结构区。该区域存在 4 个主要的碳酸盐岩储层+碎屑岩盖层组合,分别是:①震旦系灯影组白云岩储层+下寒武统泥质粉砂岩、粉砂岩盖层组合;②上寒武统、石炭系、中二叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统泥岩、粉砂岩盖层组合;③上二叠统、下三叠统灰岩、泥质灰岩储层+下三叠统泥岩盖层组合;④中~下三叠统灰岩、白云岩储层+上三叠统页岩、泥岩盖层组合,见图 5(f)。其次在陆相地层中



(a) 北缘米仓-大巴山突变型盆山结构区



(b) 西缘龙门山突变型盆山结构区



(c) 川西南渐变型盆山结构区

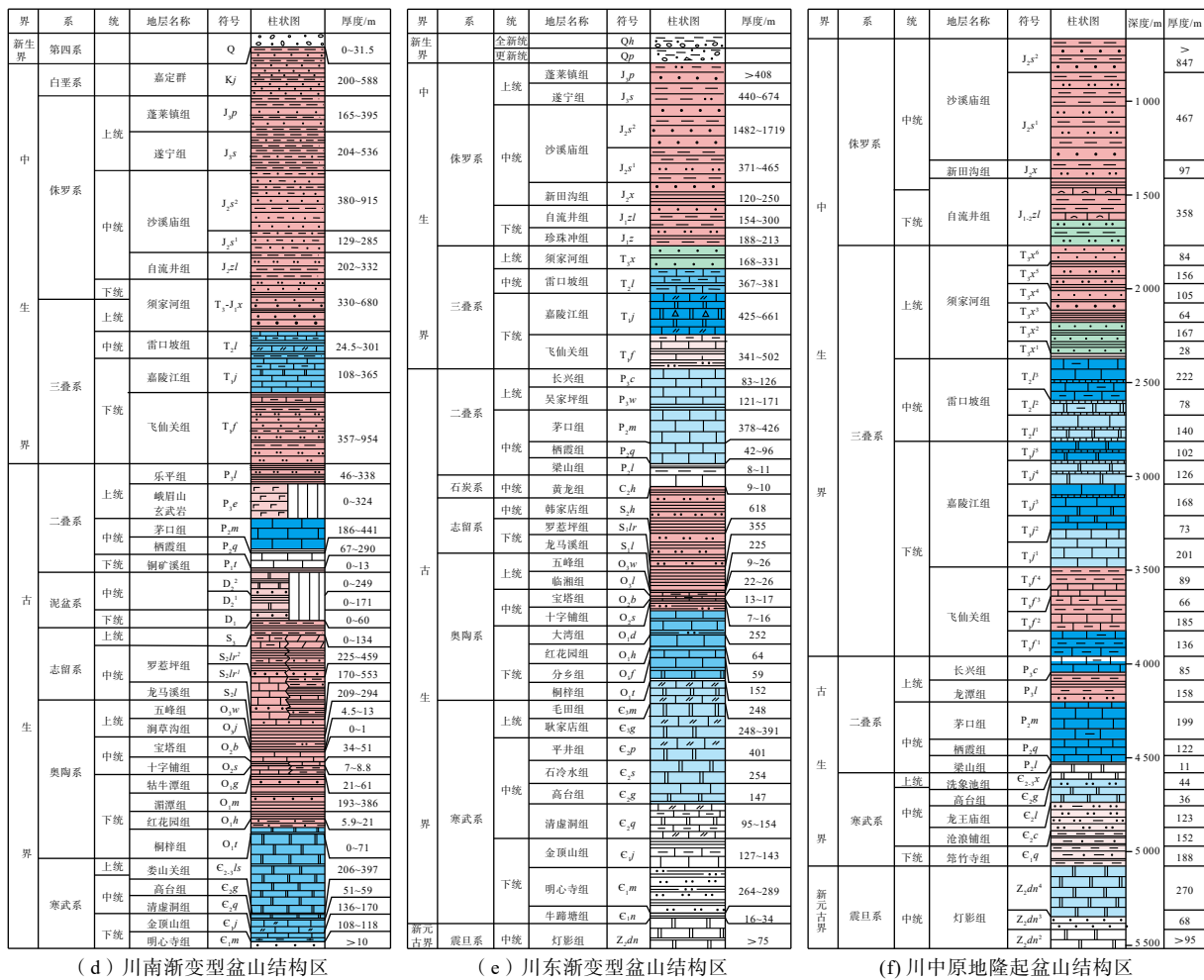


Fig. 5 Geothermal reservoirs and caprocks of the typical basin-mountain structures in the Sichuan Basin

存在 2 个主要的碎屑岩储层盖层组合, 分别是: ⑤上三叠统须家河组第二段砂岩储层+第三段~第六段泥岩夹砂岩盖层组合, ⑥下侏罗统自流井组下部粉砂岩、灰岩储层+自流井组上部、中统新田沟组泥岩、泥质粉砂岩盖层组合。组合④的开发利用如遂宁市大英县“中国死海”和自贡市大安区采卤制盐井。总体上, 川中地区各储层中的地下水受补给和径流条件的限制, 多为原生地层水, 总体资源量一般, 且属于不可再生型。

4.2 勘探潜力区及目标层系

综合分析不同构造单元热储的地质条件, 认为四川盆地热储勘查应以海相碳酸盐岩热储为主(图 6), 陆相地层地热条件较差, 勘探开发宜慎重。各个构造单元地热勘探潜力如下:

川东无疑是勘探潜力最好的地区, 具有“地热水补给明确、储层埋深合适、热储构造简单”的特点, 成为勘探开发主要利用区域。开采层位寒武系、奥陶系储层基本未进行开发, 具有一定勘探潜力, 见图 6(a); 中二叠统栖霞组和茅口组勘探潜力中等, 见图 6(b); 开采层位以嘉陵江组第二段和第四段为主, 见图 6(c)。

川西地热资源勘探潜力较好。由于多向构造叠加明显, 发育背斜型、向斜型和褶皱—断裂复合型等多种类型的热储构造, 储层埋深差异较大, 由此造成多个热储均有较好的勘探潜力。雅安—乐山—宜宾一线较好, 以中二叠统栖霞组和茅口组储层为主, 见图 6(b), 可加大雷口坡组、嘉陵江组和灯影组储层的勘探开发力度。

川西龙门山前缘中三叠统雷口坡组地热资源良

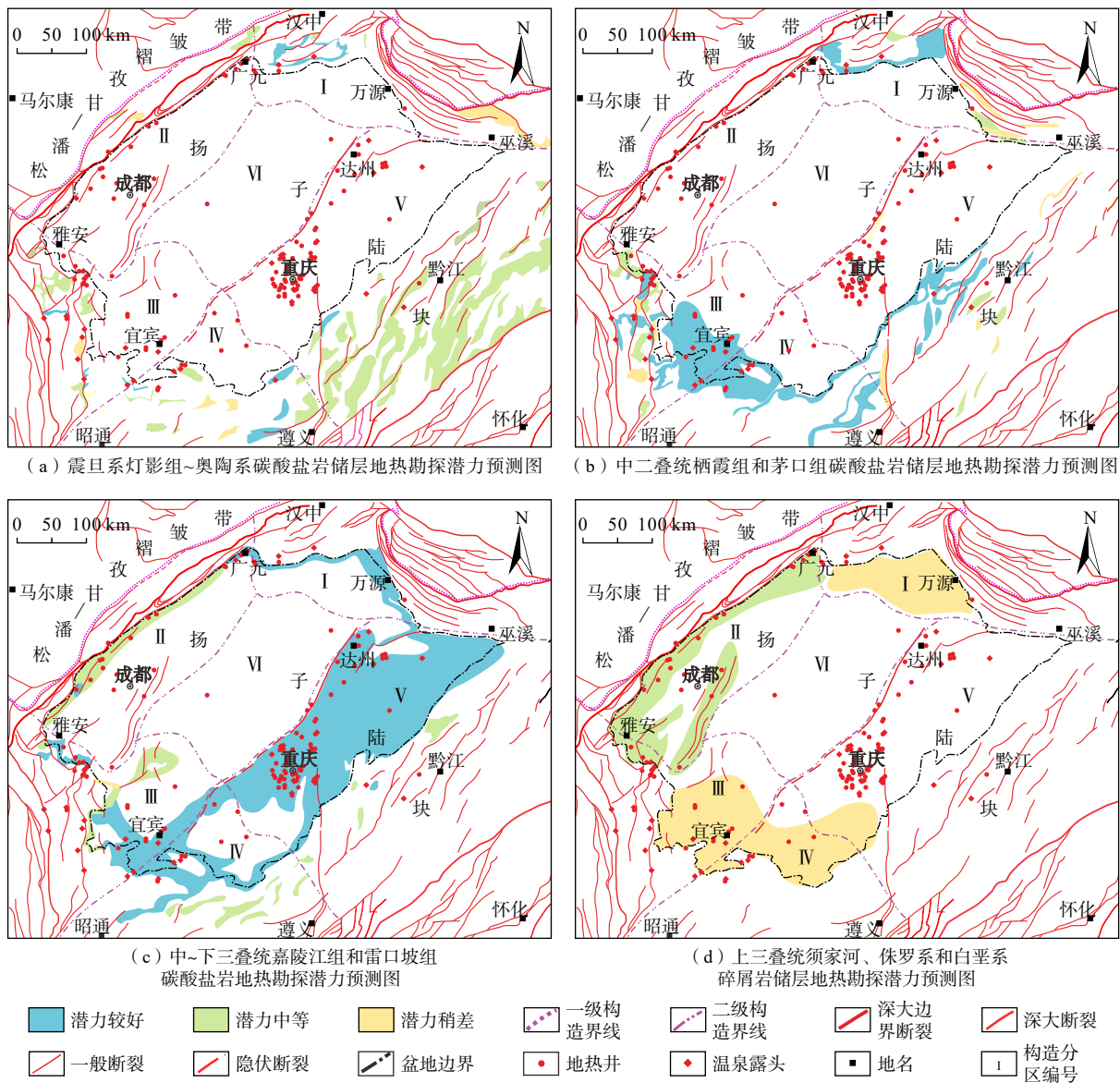


图 6 四川盆地及周围不同储层地热勘探潜力预测图

Fig. 6 Prediction maps of geothermal exploration potential of different geothermal reservoirs in the Sichuan Basin and its periphery

好,是极具开发潜力的层位,见图 6(c),但地下热水补给尤为关键,取决于断层导水或阻水能力。川西凹陷陆相储层虽有成功开发案例,但总体显示资源开发潜力一般,见图 6(d),基本单井产量不高,且 TDS 极高,勘探开发需加强储层的非稳定性及构造裂隙研究确保资源量和开发效果。

川北和川南地热勘探开发程度不高,基本未进行商业开发。勘探开发优先以中~下三叠统碳酸盐岩热储为主,见图 6(c),靠近造山带更深层位的中二叠统和灯影组碳酸盐岩亦可考虑。

川中地热资源具有特殊性,中~下三叠统地热水属于交替循环不畅、高 TDS 的“死水”,单井水量亦

小,在有特殊利用时可考虑开发,其下伏二叠系、震旦系的储层盆内由于埋深过大,不建议进行商业开发。

5 结论

(1)四川盆地大地热流值总体为温盆,地热资源均属于低温地热资源,地热水以中低温温水为主,地热水 TDS 具有盆地周缘低、盆地中部高的特征。四川盆地的地热资源分布主要受盆地构造、地层分布和水文条件等控制。

(2)川东隔挡式褶皱区为重要地热勘查区,热储以中三叠统和中二叠统碳酸盐岩为主。川西雅安—乐山—宜宾一带,以连续褶皱型、单斜型和局部褶皱—

断裂复合型构造模式为主要勘查对象,地热储层主要是中二叠统碳酸盐岩,其次是中下~三叠统和灯影组碳酸盐岩。川西龙门山前缘,发育单斜型和褶皱—断裂复合型构造地热模式,地热储层以中三叠统碳酸盐岩为主。盆地其他区地热条件不及上述地区,且勘探程度相对低,宜以中~下三叠统和中二叠统碳酸盐岩为主,建议谨慎勘探开发。

致谢:感谢四川省环境保护地下水污染防治工程技术中心和中国地质科学院探矿工艺研究所提供的数据资料!

参考文献 (References) :

- [1] ZHANG Lei, CHEN Shuai, ZHANG Chun. Geothermal power generation in China: Status and prospects[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7: 1428 – 1450.
- [2] 李悦, 关铨. 我国地热资源开发利用优势对比分析[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(6): 139 – 141. [LI Yue, GUAN Xin. Comparative analysis on the advantages of geothermal resources development and utilization in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 139 – 141. (in Chinese)]
- [3] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 1923 – 1937. [WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1923 – 1937. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘育平. 地热资源的低碳排放效益分析[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(6): 134 – 138. [LIU Yuping. Analysis of low carbon emission efficiency of geothermal resources[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(6): 134 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ZHAO Xingang, WAN Guan. Current situation and prospect of China's geothermal resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 651 – 661.
- [6] 崔希林. 四川盆地中西部温泉成因模式研究[D]. 成都: 成都理工大学. [CUI Xilin. Study on genetic model of hot springs in central and western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, . (in Chinese with English abstract)]
- [7] 肖汉全. 川南地下热水资源研究及其开发利用[J]. *四川地质学报*, 2009, 29(2): 180 – 183. [XIAO Hanquan. On utilization of geothermal resources in South Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(2): 180 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 罗敏, 任蕊, 袁伟. 四川地热资源类型、分布及成因模式[J]. *四川地质学报*, 2016, 36(1): 47 – 50. [LUO Min, REN Rui, YUAN Wei. Type, distribution and genesis of geothermal resource in Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2016, 36(1): 47 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 肖琼, 沈立成, 杨雷, 等. 重庆北温泉地热水碳硫同位素特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(4): 127 – 133. [XIAO Qiong, SHEN Licheng, YANG Lei, et al. Environmental significance of carbon and sulfur isotopes of the North hot spring in Chongqing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(4): 127 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 等. 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 81 – 89. [ZHAO Jiayi, ZHANG Wei, ZHANG Hanxiong, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 81 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 等. 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 36 – 46. [LI Minghui, YUAN Jianfei, HUANG Congjun, et al. A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in East Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 36 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 阚艳伶, 王成锋, 陈怡西. 四川盆地中西部红层区地热资源赋存规律研究[J]. *地下水*, 2019, 41(2): 35 – 39. [KAN Yanling, WANG Chengfeng, CHEN Yixi. Study on the occurrence law of geothermal resources in red beds in the central and western Sichuan Basin[J]. *Ground Water*, 2019, 41(2): 35 – 39. (in Chinese)]
- [13] 拓明明. 四川盆地东部重庆主城区附近盆地—背斜出露型地下热水特征及成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [TA Mingming. Characteristics and genetic mechanism of basin – anticline exposed geothermal water near the main city of Chongqing in the east of Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 罗志立, 龙学明. 龙门山造山带崛起和川西陆前盆地沉降[J]. *四川地质学报*, 1992, 12(1): 1 – 17. [LUO Zhili, LONG Xueming. The uplifting of the Longmenshan orogenic zone and the subsidence of the West Sichuan foreland basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1992, 12(1): 1 – 17. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. [LIU Shugen. The formation and evolution of Longmenshan Thrust Zone and Western Sichuan Foreland Basin, Sichuan, China [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)]
- [16] 毛琼, 邹光富, 张洪茂, 等. 四川盆地动力学演化与油气前景探讨 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(11): 7 - 10. [MAO Qiong, ZOU Guangfu, ZHANG Hongmao, et al. Discussion on geodynamic evolution and oil/gas prospect of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11): 7 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 川西坳陷复合-联合构造及其对油气的控制 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 538 - 551. [LI Zhiwu, LIU Shugen, CHEN Hongde, et al. Structural superimposition and conjunction and its effects on hydrocarbon accumulation in the Western Sichuan Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 538 - 551. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 贾承造, 李本亮, 雷永良, 等. 环青藏高原盆山体系构造与中国中西部天然气大气区 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1621 - 1631. [JIA Chengzao, LI Benliang, LEI Yongliang, et al. Basin-mountain system structure around Qinghai-Tibet Plateau and natural gas atmospheric area in central and Western China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(10): 1621 - 1631. (in Chinese)]
- [19] 何登发, 李英强, 黄涵宇. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 2020. [HE Dengfa, LI Yingqiang, HUANG Hanyu. Formation, evolution and oil and gas accumulation of Sichuan multi-cycle superimposed basin [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)]
- [20] 刘树根, 邓宾, 孙玮, 等. 四川盆地: 周缘活动主控下形成的叠合盆地 [J]. *地质科学*, 2018, 53(1): 308 - 326. [LIU Shugen, DENG Bin, SUN Wei, et al. Sichuan Basin: A superimposed sedimentary basin mainly controlled by its peripheric tectonics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2018, 53(1): 308 - 326. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 魏国齐, 杨威, 刘满仓, 等. 四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 1 - 12. [WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. [TONG Chongguang. Tectonic evolution and oil and gas accumulation in Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. (in Chinese)]
- [23] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. [GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese)]
- [24] 徐艳秋. 四川盆地西部边缘地下热水水化学特征及成因研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). [XU Yanqiu. Study on hydrochemical characteristics and genesis of underground hot water in the western margin of Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李晓, 舒勤峰. 四川屏山灯盏窝温泉地球化学特征及成因 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2017, 28(4): 64 - 68. [LI Xiao, SHU Qinfeng. Hydrochemistry and origin of hot spring in Dengzanwo Pingshan Sichuan [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2017, 28(4): 64 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张彦普. 重庆市东温泉地热地质特征及成因模式探讨 [J]. *地下水*, 2018, 40(1): 36 - 39. [ZHANG Yanpu. Discussion about the geothermal geological characteristics and genetic model of east temperature in Chongqing City [J]. *Ground Water*, 2018, 40(1): 36 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郭娟. 四川盆地东北部盐泉、咸泉和卤水水文地球化学特征及演化 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). [GUO Juan. Hydrogeochemical characteristics and evolution of salt springs, salty springs and brine in northeast Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 林耀庭. 论四川盆地三叠系地下水水文地质条件 [J]. *盐湖研究*, 2006, 14(1): 1 - 8. [LIN Yaoting. On the hydrogeological conditions of groundwater in the Triassic system of Sichuan Basin [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14(1): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 冯玉梅, 王华, 涂林玲, 等. 四川雅安周公2井地热水环境同位素的初步研究 [J]. *中国岩溶*, 2002, 21(1): 51 - 54. [FENG Yumei, WANG Hua, TU Linling, et al. Preliminary study on environmental isotopes in hot mineral water from No. 2 Zhongong Well in Ya'an City, Sichuan Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(1): 51 - 54. (in Chinese with English abstract)]

- [30] 倪高倩, 张恒, 韦玉婷, 等. 四川地热流体水文地球化学及同位素特征简析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(3): 184 – 194. [NI Gaoqian, ZHANG Heng, WEI Yuting, et al. Hydrogeochemical and isotope characteristics of geothermal fluid in Sichuan[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(3): 184 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王海真, 池英柳, 赵宗举, 等. 四川盆地栖霞组岩溶储层及勘探选区[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 833 – 842. [WANG Haizhen, CHI Yingliu, ZHAO Zongju, et al. Karst reservoirs developed in the Middle Permian Qixia Formation of Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 833 – 842. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 林怡, 陈聪, 山述娇, 等. 四川盆地寒武系洗象池组储层基本特征及主控因素研究[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 610 – 617. [LIN Yi, CHEN Cong, SHAN Shujiao, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Cambrian Xixiangchi Formation in the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5): 610 – 617. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 1052 – 1060. [XU Ming, ZHU Chuanqing, TIAN Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 1052 – 1060. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. *地质科学*, 1988, 23(2): 196 – 204. [WANG Jiyang, HUANG Shaopeng. Compilation of heat flow data for continental area of China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1988, 23(2): 196 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. *地震地质*, 1990, 12(4): 351 – 363. [WANG Jiyang, HUANG Shaopeng. Compilation of geothermal flow data in Chinese mainland area (second edition)[J]. *Seismology and Geology*, 1990, 12(4): 351 – 363. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 韩永辉, 吴春生. 四川盆地地温梯度及几个深井的热流值[J]. *石油与天然气地质*, 1993, 14(1): 80 – 84. [HAN Yonghui, WU Chunsheng. Geothermal gradient and heat flow values of some deep wells in Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1993, 14(1): 80 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 611 – 626. [HU Shengbiao, HE Lijuan, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (third edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 611 – 626. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 朱传庆, 邱楠生, 江强, 等. 川西坳陷鸭子河地区基于多种古温标的钻井热史恢复[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(10): 3660 – 3670. [ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, JIANG Qiang, et al. Thermal history reconstruction based on multiple paleo-thermal records of the Yazihe area, western Sichuan depression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(10): 3660 – 3670. (in Chinese with English abstract)]
- [39] ZHU Chuanqing, HU Shengbiao, QIU Nansheng, et al. The thermal history of the Sichuan Basin, SW China: Evidence from the deep boreholes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(1): 70 – 82.
- [40] 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. [JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (fourth edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 沈治安. 重庆南温泉热水水文地球化学特征及其成因[J]. *成都地质学院学报*, 1982, 9(2): 62 – 70. [SHEN Zhian. Hydrogeochemical characteristics and genesis of hot water in south hot springs of Chongqing[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 1982, 9(2): 62 – 70. (in Chinese)]
- [42] 樊新庆. 重庆市观音峡背斜北段东翼地热地质环境特征与地热资源开发研究[D]. 成都: 成都理工大学. [FAN Xinqing. Characteristics of geothermal geological environment and development of geothermal resources in the east wing of the northern section of Guanyinxia anticline in Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 肖琼, 王鹏, 伍坤宇. 重庆三叠系碳酸盐岩热储热水水文地球化学特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1351 – 1357. [XIAO Qiong, WANG Peng, WU Kunyu. Hydrogeochemical feature of thermal groundwater in carbonate reservoir in Triassic in Chongqing[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1351 – 1357. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 陈茂勋, 何银武. 成都大邑花水湾地热水的特征及其发现意义[J]. *四川地质学报*, 1996, 16(2): 142 – 146.

- [CHEN Maoxun, HE Yinwu. Nature of geothermal water resources in Huashuiwan, Dayi, Chengdu and the significance of its discovery[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1996, 16(2): 142 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 马天才, 王冰杜, 文举, 等. 广元剑门关热矿泉水产出特征与成因探讨分析[J]. *中国西部科技*, 2009, 8(14): 1 - 3. [MA Tiancai, WANG Bingdu, WEN Ju, et al. The discussion and analysis about the output characteristic and cause of formation of the hot mineral water in Jian MenGuan GuangYuan[J]. *Science and Technology of West China*, 2009, 8(14): 1 - 3. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 曾敏. 重庆温泉分布与成因研究[D]. 成都: 成都理工大学. [ZENG Min. Study on the distribution and causes of hot springs in Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 肖琼, 沈立成, 杨雷. 地下热水的来源与补给机制分析——以重庆北温泉为例[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(4): 91 - 103. [XIAO Qiong, SHEN Licheng, YANG Lei. Analysis on origin and recharge mechanism of geothermal water - A case study of Beiwengquan hot spring in Chongqing, China[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(4): 91 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 朱克亮, 赵斌. 四川安县罗浮山温泉热储层的初步研究[J]. *兴义民族师范学院学报*, 2013(3): 19 - 22. [ZHU Keliang, ZHAO Bin. Preliminary study of an County Luofushan hot spring thermal reservoir in Sichuan Province[J]. *Journal of Xingyi Normal University for Nationalities*, 2013(3): 19 - 22. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 刘民生. 四川盆地及盆周地区深部岩溶地下水的循环模式分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 49 - 51. [LIU Minsheng. Analysis of cyclic pattern of deep Karst groundwater in Sichuan basin and the surroundings[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(2): 49 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 曹琴. 川东高褶带三叠系深层卤水和温泉的水化学特征及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [CAO Qin. Hydrochemical characteristics and genesis of Triassic deep brine and hot springs in the high fold belt of eastern Sichuan[D]. Beijing: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 罗祥康. 重庆市地下热水开发利用条件的初步研究[J]. *四川地质学报*, 1987, 7(1): 58 - 65. [LUO Xiangkang. Preliminary study on the development and utilization conditions of underground hot water in Chongqing[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1987, 7(1): 58 - 65. (in Chinese)]
- [53] 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 Xiangkang. 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 with English abstract)]
- [54] 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 Dongsheng, LIU Dongsheng. 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 with English abstract)]
- [55] 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1110 - 1116. [LU Qingzhi, HU Shengbiao, GUO Tonglou, et al. The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1110 - 1116. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 杨怀辉, 李忠惠. 从古热流值和剥蚀量的研究来判断地热的发育——以四川盆地川合100井为例[J]. *四川地质学报*, 2004, 24(3): 180 - 185. [YANG Huaihui, LI Zhonghui. Development of geothermal pool deduced from old thermal current values and denudation quantity: By the example of well 100 at chuanhe in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2004, 24(3): 180 - 185. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽