

川东地区大地热流及其对地热资源评价的启示

兰 镛¹⁾, 左银辉^{1)*}, 冯仁朋¹⁾, 蔡家兰²⁾,
杨梅华¹⁾, 徐文礼¹⁾, 徐 姚²⁾

1)成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059;

2)中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400707

摘要: 大地热流是揭示一个地区的温度空间展布、地热资源形成和赋存条件的综合性评价指标。川东地区大地热流的研究十分薄弱, 制约着对该地区地热资源潜力及展布的认识。本文首先利用4口钻井178个系统稳态测温数据和25口钻井76个试油温度数据, 计算得到了川东地区的地温梯度和大地热流, 再利用一维稳态热传导方程计算得到川东地区下二叠统栖霞—茅口组热储的地温, 最后明确栖霞—茅口组发育的地热资源类型及潜力。结果表明: 川东地区地温梯度在16.0~21.3 °C/km之间, 平均为(18.3±1.59) °C/km; 大地热流值在44.3~67.7 mW/m²之间, 平均为(55.5±6.0) mW/m², 具有构造稳定区的低温型地温场特征。栖霞—茅口组是川东地区最重要的热储, 主要发育中-低温型地热资源, 其中, 低温型地热资源主要发育在西南构造分区; 中温型地热资源主要发育在东南构造分区、东北构造分区及西北构造分区。结合热储特征, 可以得出川东地区栖霞—茅口组具有形成丰富地热资源的热储和地温条件。该成果可为川东地区的地热资源勘探评价提供重要的地热信息。

关键词: 川东地区; 地温梯度; 大地热流; 热储; 地热资源

中图分类号: P314 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.100901

Terrestrial Heat Flow in Eastern Sichuan Basin and Its Revelation to Geothermal Resource Evaluation

LAN Lei¹⁾, ZUO Yin-hui^{1)*}, FENG Ren-peng¹⁾, CAI Jia-lan²⁾,
YANG Mei-hua¹⁾, XU Wen-li¹⁾, XU Xu²⁾

1) State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,
Chengdu, Sichuan 610059;

2) Chongqing Gas Mine, Southwest Oil & Gas Field Company of PetroChina, Chongqing 400707

Abstract: Terrestrial heat flow is a comprehensive index that reveals the spatial distribution of temperature and the formation and occurrence conditions of geothermal resources in a region. The terrestrial heat flow in the Eastern Sichuan Basin has not been extensively studied, which restricts the understanding of the potential and distribution of geothermal resources in this area. In this study, the geothermal gradient and terrestrial heat flow in the Eastern Sichuan Basin are calculated using steady-state temperature measurement data of 178 systems in 4 wells and 76 formation-testing temperature data in 25 wells. Thereafter, the geotemperature of the Lower Permian Qixia–Maokou Formation thermal reservoir in the Eastern Sichuan Basin is calculated using the one-dimensional steady-state heat conduction equation. Finally, the types and potential of geothermal resources developed in the Qixia–Maokou Formation are obtained. The results show that the geothermal gradient in Eastern Sichuan Basin ranges from 16.0 to 21.3 °C/km, with an average value of (18.3±1.59) °C/km, and the terrestrial

本文由成都理工大学珠峰科学计划(编号: 80000-2021ZF11415)和国家自然科学基金项目(编号: 41972109)联合资助。

收稿日期: 2022-07-21; 改回日期: 2022-09-26; 网络首发日期: 2022-10-11。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 兰镭, 男, 1997年生。硕士研究生。主要从事现今地温场及地热地质方面的研究。通讯地址: 610059, 成都市成华区二仙桥东三路1号。E-mail: 577279247@qq.com。

*通讯作者: 左银辉, 男, 1980年生。博士, 教授。主要从事地热地质与石油地质方面的研究。通讯地址: 610059, 成都市成华区二仙桥东三路1号。E-mail: zuoyinhui@tom.com。

heat flow ranges from 44.3 to 67.7 mW/m², with an average value of (55.5±6.0) mW/m², which has the characteristics of a low-temperature geothermal field in the tectonic stable area. The Qixia–Maokou Formation is the most important thermal reservoirs in Eastern Sichuan Basin. It mainly develops medium–low temperature geothermal resources. Among them, low-temperature geothermal resources are mainly developed in the southwest structural zone, while medium-temperature geothermal resources are mainly distributed in the southeast, northeast, and northwest structural zones. Combined with the characteristics of thermal reservoirs, it can be concluded that the Qixia–Maokou Formation has the thermal reservoir and geothermal temperature conditions necessary to form rich geothermal resources. The results may provide important geothermal information for the exploration and evaluation of geothermal resources in this area.

Key words: Eastern Sichuan Basin; geothermal gradient; terrestrial heat flow; thermal reservoir; geothermal resource

大地热流的研究是地热资源勘探评价中重要的基础参数(胡圣标等, 2013; Zuo et al., 2020)。中国大地热流测试工作始于 20 世纪 50 年代末, 易善锋(1966)曾在 20 世纪 60 年代初报道过 3 个热流数据。近 40 年来, 大地热流的研究取得了较大的进展, 分别在西藏、攀西、西北、东北、华北等地区和海域做了大量的工作。截至 2016 年中国大陆地区已有 1230 个大地热流数据(Jiang et al., 2019)。目前中国大陆的大地热流数据大部分集中在沉积盆地中, 中国大陆东部盆地(如渤海湾盆地、松辽盆地、苏北黄海盆地等)热流高, 多为热盆, 中部盆地(如鄂尔多斯盆地、四川盆地等)多为温盆, 西部盆地(如塔里木盆地, 准噶尔盆地)多为冷盆(邱楠生等, 2019)。四川盆地大地热流的研究始于 20 世纪 80 年代, 30 多年来, 已经拥有一定数量的测温数据及岩石生热率、热导率等热物性参数和大地热流数据, 基本认识了四川盆地现今热状态(He et al., 2011; 徐明等, 2011; 朱传庆等, 2017)。但热流数据集中分布在川西南、川中、川东北等地区, 针对川东地区大地热流的研究十分薄弱, 制约着对川东地区的地热资源潜力及展布的认识, 进而影响后期的地热资源开发及利用。本文在 122 个实测岩石热导率数据, 4 口钻井 178 个系统稳态测温数据和 25 口钻井 76 个试油温度数据的基础之上, 结合前人的研究成果对川东地区的大地热流进行系统研究, 明确该地区地温梯度及大地热流的平面分布特征及控制因素。再分别采用一维热传导方程和体积法计算获取下二叠统栖霞—茅口组热储的地温和地热资源量, 明确地热资源类型及地热资源强度分布特征, 进而为川东地区的地热资源开发利用提供基础参数。

1 地质背景

1.1 四川盆地地质背景

四川盆地呈菱形, 四周的构造单元为东北侧的北大巴山推覆构造带, 该构造带向外过渡为南秦岭北部逆冲推覆构造带; 西北侧的龙门山造山带及松潘—甘孜褶皱带; 西南侧至东南侧分别为娄山褶皱

—冲断带和武陵山隔槽式褶皱—冲断带。构造表现为多构造边界和多构造体系特征(Liu et al., 2012)。四川盆地包括川西低陡构造区、川西南低缓构造区、川中低平构造区、川东高陡构造区、川北低平构造区和川南低陡构造区(图 1)。

川中低平构造区和川西南低缓构造区与川西低陡构造区、川南低陡构造区之间分别以龙泉山断裂和华蓥山断裂为界, 川北低平构造区以川中古隆起的北部边缘为界将其与川西低陡构造区、川中低平构造区分开。该盆地经历了(1)南华纪—早古生代盆地演化阶段, 晚震旦世的强烈拉张作用导致陆壳移离, 陆块边缘裂陷进一步扩大成为被动边缘盆地; 扬子陆块与华北陆块在志留纪末期发生碰撞导致扬子克拉通全部抬升为陆。板块的构造背景在该演化阶段下呈现出一个“开-合”构造旋回过程(王林琪等, 2016); (2)晚古生代—中生代海相沉积阶段, 由于金沙江洋在晚石炭世扩张, 扬子陆块整体沉降, 甘孜—理塘洋从早二叠世晚期开始形成并扩张, 导致扬子地块表现为强烈区域拉张(段金宝等, 2019); (3)中新生代陆相沉积及抬升阶段, 中三叠世末期, 由于印支 I 幕运动的原因, 四川盆地由海相沉积转变为陆相沉积。龙门山和大巴山受晚三叠世末印支运动的影响, 相继冲断并褶皱成山。从早白垩世到晚白垩世, 川东地区受到米仓山、大巴山和龙门山逆冲推覆进一步作用, 开始发生隆升, 盆地逐渐向西收缩, 随后前陆盆地逐渐萎缩衰亡并开始遭受抬升剥蚀, 进入了构造改造阶段(田云涛等 2011; Tian et al., 2012)。

1.2 川东地区地质背景

川东地区即为川东高陡构造区, 位于华蓥山断裂与齐岳山—大娄山断裂带之间, 面积达 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是盆地内褶皱断裂最强烈的地区。主体为板溪群褶皱基底, 上覆地层较全, 加里东—海西运动抬升, 造成泥盆系—石炭系部分地层缺失(胡东风等, 2019), 海相地层厚达 5~6 km。燕山—喜马拉雅运动, 本区交替受大巴山北东—南西向和江南雪峰南东—北西向挤压, 在川东—重庆地区形成薄皮式褶皱、断裂和自北东往南西方向凸出的弧形构造, 发育

华蓥山、铁山、铜锣峡、七里峡、照月峡、大天池、南门场、黄泥堂、大池干井、方斗山等一系列高陡背斜构造, 主背斜高点一般出露中、下三叠统及古生界地层。而在川南泸州地区褶皱变缓, 平面上呈带状排列, 至川滇黔区变为北东东向和近东西向排列, 以低

缓背斜为主(孙自明等, 2021)。为便于后续的研究, 根据川东地区的现今构造展布特点和利用中国石油第四次油气资源评价的地层等厚图绘制的川东地区基底埋深图, 将川东地区划分为四个小区块: 西南构造区、西北构造区、东南构造区以及东北构造区(图2)。

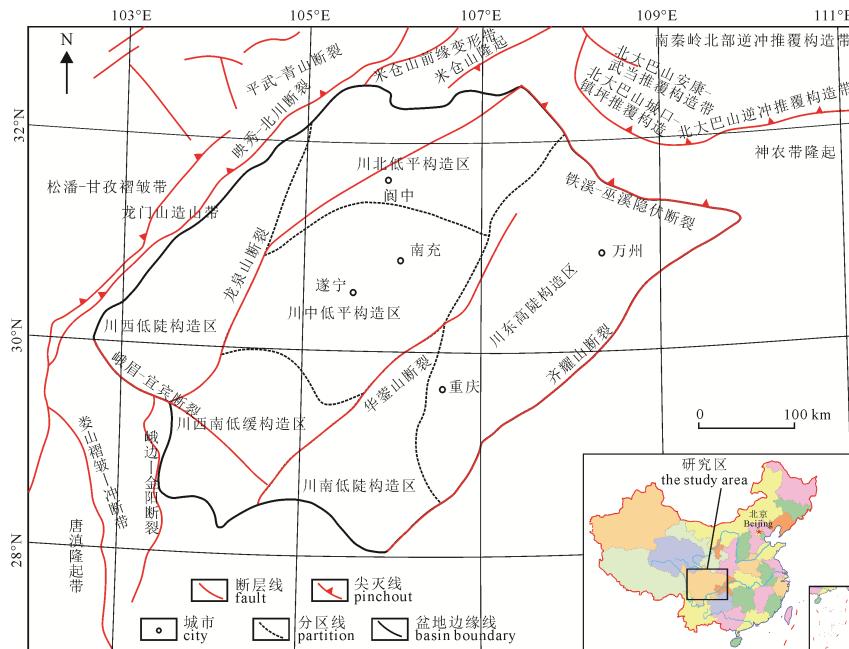


图1 四川盆地构造区划分(何登发等, 2011; 蔡希源等, 2016)

Fig. 1 Structural unit division in the Sichuan Basin (HE et al., 2011; CAI et al., 2016)

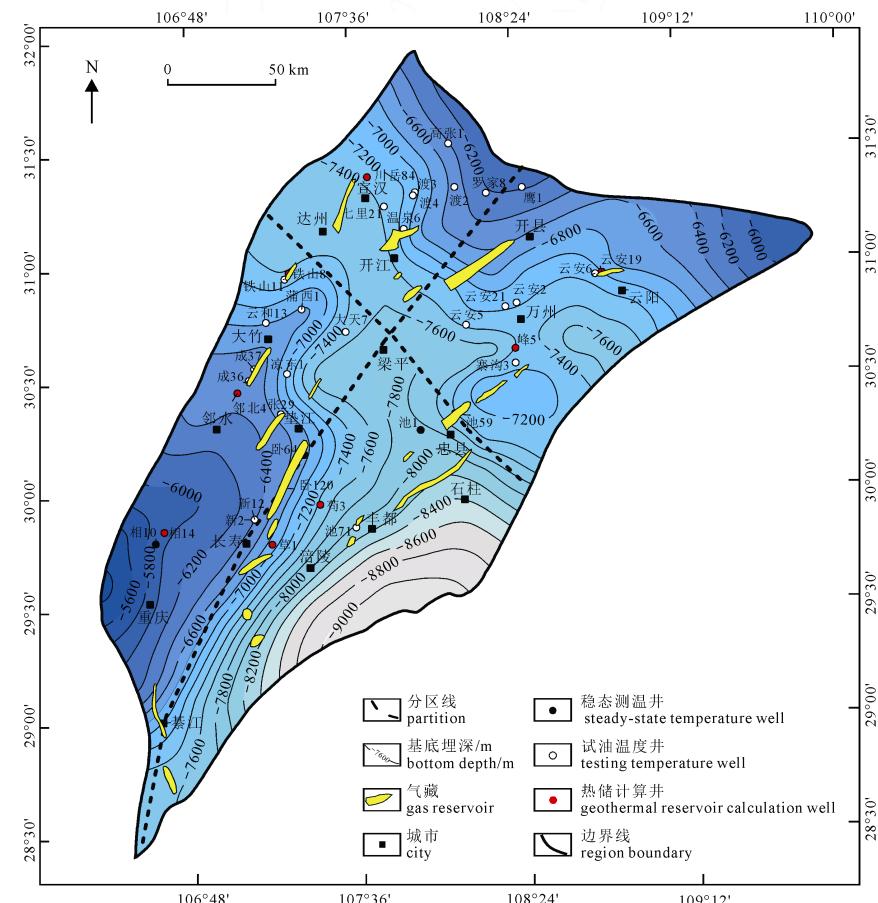


图2 川东地区基底埋深及构造分区图(李建忠, 2019)

Fig. 2 Bottom depth and structural unit division in the Eastern Sichuan Basin (from LI, 2019)

2 研究方法及基本参数

2.1 研究方法

2.1.1 大地热流计算方法

陆地上, 大地热流 q 不能从地表直接测量得到, 但可以通过地温梯度和岩石热导率(式(1))计算得到:

$$q = -K \times G \quad (1)$$

式中, K 为测温井段内岩石的热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; q 为大地热流, mW/m^2 。负号表示大地热流由地球内部流向地表。

2.1.2 地温梯度计算方法

本文收集到的温度数据包括系统稳态测温和试油温度数据, 分别采用以下两种方法计算获取地温梯度。

针对试油温度数据, 利用式(2)计算地温梯度:

$$G = (T - T_0) / (Z - Z_0) \quad (2)$$

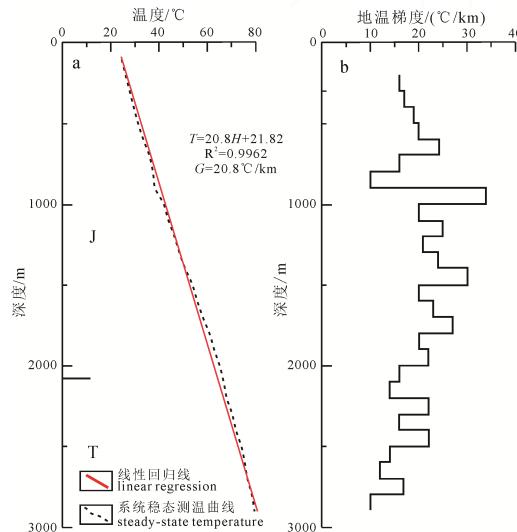
式中, T_0 为恒温带的温度, $^{\circ}\text{C}$, 取四川盆地年平均温度(约 20°C)(曹环宇, 2015); T 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; Z_0 为恒温带深度, 0.02 km ; Z 为地层深度, km ; G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

针对系统稳态测温数据, 根据温度与深度的关系曲线进行线性回归, 其斜率为该井的地温梯度。如新 2 井整体上温度与深度呈线性分布, 现今温度分布与线性回归线拟合度较高, 相关系数高达 0.996 2, 根据拟合法得出的地温梯度为 $20.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图 3)。

2.2 基本参数

2.2.1 岩石热导率及生热率

川东地区具有 122 个岩石热导率数据, 主要分布在侏罗系至志留系(Tang et al., 2019)(表 1)。上古生界—中生界岩石热导率在 $1.49\sim5.49 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间,



a—温度与深度关系; b—地温梯度与深度关系。
a—temperature vs. depth; b—geothermal gradient vs. depth.

图 3 新 2 井现今地温分布及地温梯度图

Fig. 3 Present geotemperature distribution and geothermal gradient of Well Xin2

平均为 $(3.10\pm0.91) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 其中三叠系的岩石热导率平均值最大, 为 $3.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 志留系的岩石热导率平均值最小, 为 $2.11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 用于计算单井大地热流的岩石热导率为该井段内各地层热导率的加权平均值。由于川东地区缺少岩石生热率数据, 采用川中古隆起和川西北地区的研究成果, 岩石生热率在 $0.1\sim3.9 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间(徐秋晨, 2018)。

2.2.2 温度数据

本文的温度数据包括 4 口井 178 个稳态测温数据以及 25 口井 76 个试油温度数据。其中, 4 口稳态测温井主要分布在研究区的东南构造区和西南构造区, 而 25 口试油温度井则在四个构造分区均有分布。通过图 4 和图 5 可以看出系统稳态测温数据与试油温度数据整体上都与深度呈线性关系, 揭示出川东地区具有热传导型地温场特征。

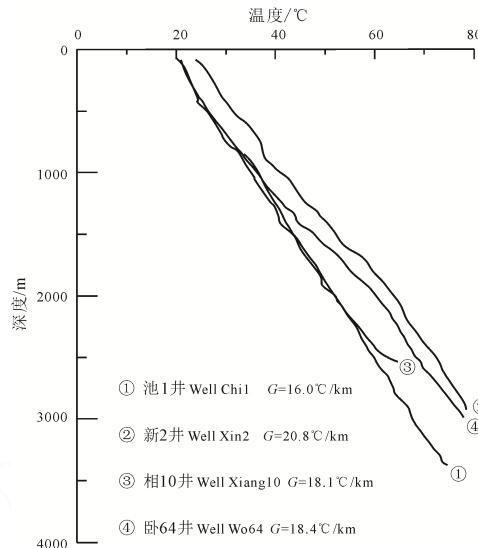


图 4 稳态测温数据与深度关系图

Fig. 4 Relationship between steady-state temperature and depth

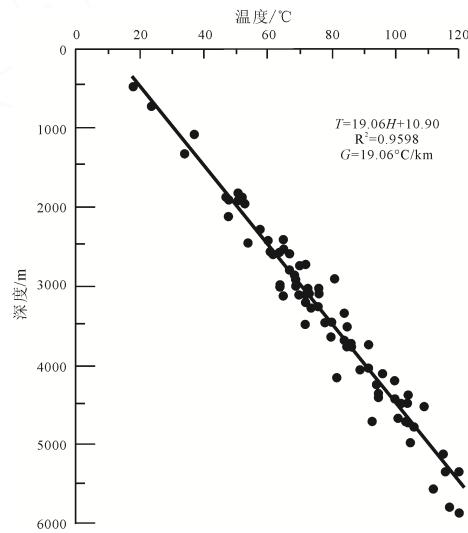


图 5 试油温度数据与深度关系图

Fig. 5 Relationship between formation-testing temperature and depth

3 现今地温场特征

通过计算获取了29口井的地温梯度和大地热流数据(表2),结果显示川东地区地温梯度在16.0~21.3 °C/km之间,平均值为(18.3±1.59) °C/km。大地热流值在44.3~67.7 mW/m²之间,平均值为(55.5±6.0) mW/m²。东南构造区的池1井地温梯度

最低,为16.0 °C/km,大地热流为54.4 mW/m²;西北构造区的温泉6井地温梯度较高,为21.1 °C/km,大地热流为67.7 mW/m²;其次,东北构造区的云安2井地温梯度较低,为16.1 °C/km,大地热流仅为51.6 mW/m²;西南构造区北部的蒲西1井地温梯度高达21.3 °C/km,大地热流值达到55.1 mW/m²。

表1 川东地区岩石热导率柱

Table 1 Thermal conductivity column in the Eastern Sichuan Basin

地层	岩性	样品数	热导率/(W/(m·K))	均值±标准方差	地层热导率/(W/(m·K))
J	砂岩	8	1.79~3.76	2.56±0.72	2.33
	泥岩	16	1.49~2.75	2.22±0.45	
T	白云岩	54	1.71~4.81	3.40±0.70	3.40
	灰岩	13	1.73~3.42	2.51±0.48	
	砂岩	14	2.87~5.49	4.31±0.70	
	泥岩	1	2.01	2.01	
P	泥岩	1	3.34	3.34	2.65
	白云岩	3	2.60~3.25	2.99±0.34	
	灰岩	6	1.74~3.21	2.36±0.44	
C	白云岩	2	1.92~2.90	2.41±0.69	2.35
	灰岩	1	2.22	2.22	
S	灰岩	1	1.96	1.96	2.11
	泥岩	1	2.26	2.26	

表2 川东地区地温梯度和大地热流计算结果

Table 2 Computation of geothermal gradient and terrestrial heat flow in the Eastern Sichuan Basin

井名	顶界深度/m	底界深度/m	地层	大地热流/(mW/m ²)	地温梯度/(°C/km)
池59	2856	3244	T	53.3	16.6
池71	1815	2520	T	54.4	17.9
成37	2400	3015	T	56.2	16.1
成36	2270	2556	T	60.6	18.9
大天7	1063	1867	T	53.9	16.8
渡2	3733	4502	T	63.9	19.9
渡3	2416	4375	T	64.9	20.2
渡4	3488	5243	T	64.2	20.0
高张1	3021	4703	T	53.0	16.3
凉东1	4132	4695	P	52.7	17.6
罗家8	3470	4653	T	54.6	21.3
蒲西1	3445	4100	P	55.1	21.3
七里21	467	2108	T	54.6	16.5
铁山11	1900	2990	T	53.0	16.5
温泉6	1886	3081	T	67.7	21.1
卧120	4035	4412	P	51.4	19.1
新12	2732	3329	T	67.7	21.1
鹰1	2550	3081	T	65.4	20.4
云安2	3095	4047	T	51.6	16.1
云安5	2434	2980	P	44.3	16.5
安21	3761	5785	T、P	55.0	17.1
云和13	4237	4713	P	50.8	18.9
寨沟3	3100	3258	P	46.5	19.1
云安6	3155	3360	T	54.6	17.0
池1	850	3376	T	54.4	16.0
卧64	100	3004	J、T	52.6	18.4
相10	0	2480	J、T、P	50.7	18.1
新2	100	2900	J、T	54.6	20.8

根据单井的地温梯度和大地热流值,结合钻井、录井、岩性、岩石物性、构造分区及地震解释结果

等资料,绘制了川东地区现今地温梯度平面分布图(图6)和大地热流平面分布图(图7)。

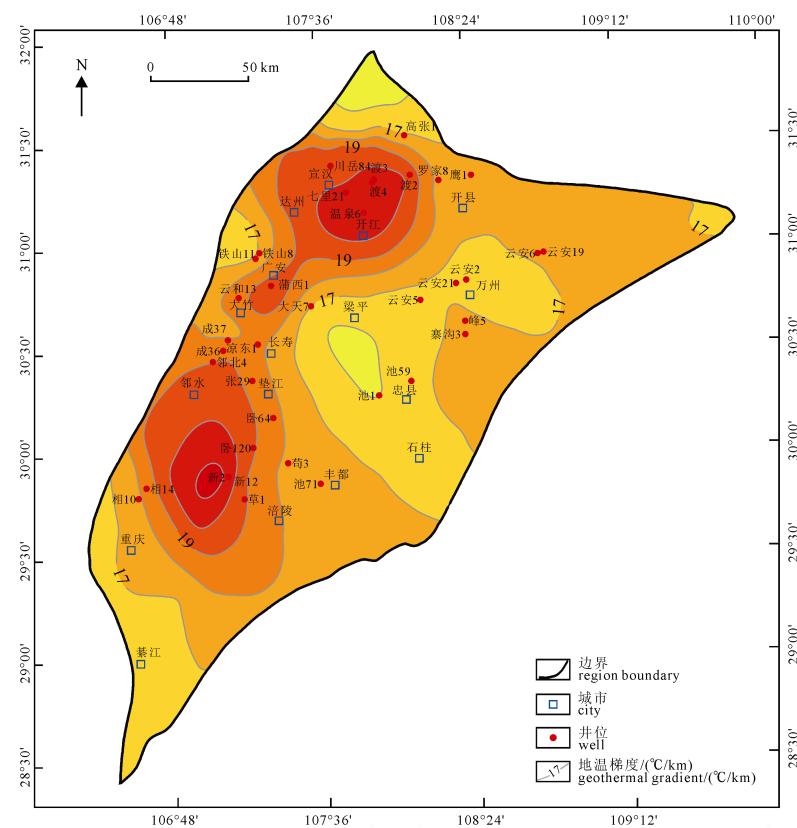


图6 川东地区地温梯度平面分布图

Fig. 6 Geothermal gradient contour map in the Eastern Sichuan Basin

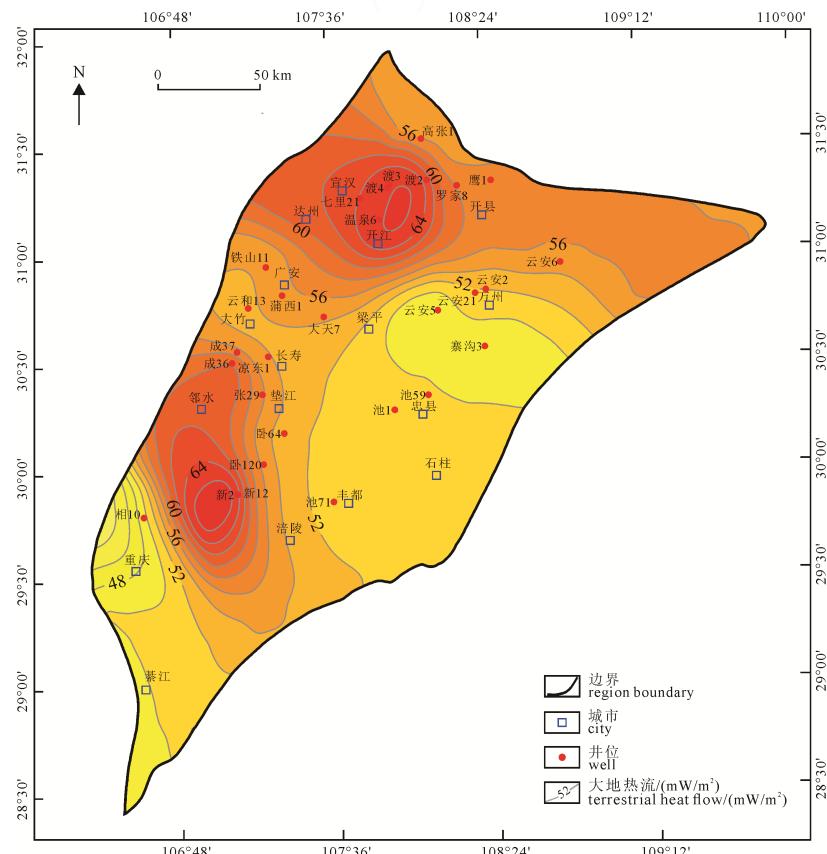


图7 川东地区大地热流平面分布图

Fig. 7 Terrestrial heat flow contour map in the Eastern Sichuan Basin

从整体来看, 川东地区东北构造区和东南构造区地温梯度和大地热流较低, 而西南构造区和西北构造区的地温梯度和大地热流较高。地温梯度的高值分别在开江一大竹一带及邻水—垫江一带, 低值则在万州—梁平—忠县一带; 大地热流高值在开县—开江一带及邻水—垫江一带, 低值区则在石柱—忠县—万州一带。

4 讨论

4.1 川东地区的热状态及主控因素

川东地区大地热流计算结果表明, 研究区平均热流值为 $(55.5\pm6.0)\text{ mW/m}^2$, 低于中国大陆地区的平均热流 $(61\pm15.5)\text{ mW/m}^2$ (姜光政等, 2016), 比构造活动区和构造稳定区之间的盆地低, 如东濮凹陷大地热流为 64.7 mW/m^2 (Zuo et al., 2014)、查干凹陷大地热流为 70.6 mW/m^2 (Zuo et al., 2020)。相较于中国大陆中、西部地区诸多盆地或构造稳定区来说, 其中鄂尔多斯盆地大地热流为 62.7 mW/m^2 (Yu et al., 2018); 南阳地区大地热流为 55.0 mW/m^2 (汪洋等, 2001), 与川东地区的大地热流相当, 与世界上典型的克拉通盆地, 如美国的 Williston 盆地大地热流为 49.0 mW/m^2 、Michigan 盆地为 $42.0\sim54.0\text{ mW/m}^2$ (Speece et al., 1985; Osadetz et al., 2002)相比稍高。如图 6、图 7 所示, 在平面分布上, 地温梯度低值与大地热流低值分布相近, 分别在万州—梁平—忠县一带及石柱—忠县—万州一带, 高值区则在开江一大竹一带及邻水—垫江一带, 整体表现为基底隆起区的地温梯度及大地热流值较高, 坎陷区的较低。在纵向上, 川东地区地温随深度而增加, 但是由于研究区内基底构造的差异, 在川东地区内部各构造区块地温纵向上的变化不同(图 8)。

川东地区大地热流为 $44.3\sim67.7\text{ mW/m}^2$, 平均值为 $(55.5\pm6.0)\text{ mW/m}^2$, 这是由于盆地基底的构造格局对大地热流的控制作用而造成的(Souche et al., 2017)。基底构造形态和沉积盖层厚度对川东地区现今地温场有很大影响, 川中古隆起基底埋深浅, 大地热流值较高, 约为 $60\sim65\text{ mW/m}^2$, 川西北地区基底埋藏较深, 大地热流值在 $48\sim57\text{ mW/m}^2$, 而川东区内的基底埋深比四川盆地中心区域深, 且基底埋深达到最大的区域为涪陵—丰都—忠县一带, 其大地热流低至 52 mW/m^2 。此外, 在印支期之后, 由于建始—彭水深断裂以西的地区大幅下陷, 新的沉降中心在万州、丰都一带形成, 巨厚的沉积层使得万州、丰都一带大地热流值低至 48 mW/m^2 。大地热流的分布与莫霍面的相对埋深之间存在负相关关系(熊盛青等, 2016)。如从东南沿海($30\sim32\text{ km}$)到四川盆地($38\sim42\text{ km}$)再到青藏高原($60\sim70\text{ km}$)莫霍面的深度

由浅到深(郝天珧等, 2014), 热流逐渐由 $70\sim110\text{ mW/m}^2$ 降至 40 mW/m^2 以下(姜光政等, 2016)。由于四川盆地地层地质年代较老, 且经历过燕山期深埋, 压实程度较高及热阻(与岩石热导率相反)变小, 多个低热阻岩相建造的存在, 形成了低热流背景下相对低地温梯度的热背景。地下水的深循环运动可能会导致局部地温升高, 也可能导致地下温度降低(高志友等, 2018), 根据图 4 中相 10 井 2500 m 以下温度与深度的变化趋势推测, 相 10 井区域可能为盆地排泄区, 地下水的深循环运动导致局部地温升高。岩浆活动也是造成局部地区热异常的关键因素, 并且岩浆侵入或喷出的地质时代越新, 所保留的余热就越多, 对现今地温场的影响就越强烈。四川盆地在距今约 259 Ma 的中二叠世末发生过著名的峨眉山地幔柱上涌热事件, 造成大量玄武岩喷发, 但研究表明, 岩石圈尺度的热扰动和热松弛时间约为距今 62 Ma(Turcotte and Schubert, 1983), 由于热扩散, 此次岩浆活动所造成的热异常已不能波及到现今, 而自中一新生代以来, 川东地区未受到大规模岩浆活动的影响, 所以岩浆活动对现今地温场的影响可以忽略不计。同时本区在晚三叠世—早白垩世由前陆盆地演化为陆内坳陷盆地, 晚白垩世—始新世沉积盆地萎缩衰亡, 开始以抬升剥蚀为主的构造改造, 由此决定了川东地区的低热流值属性。

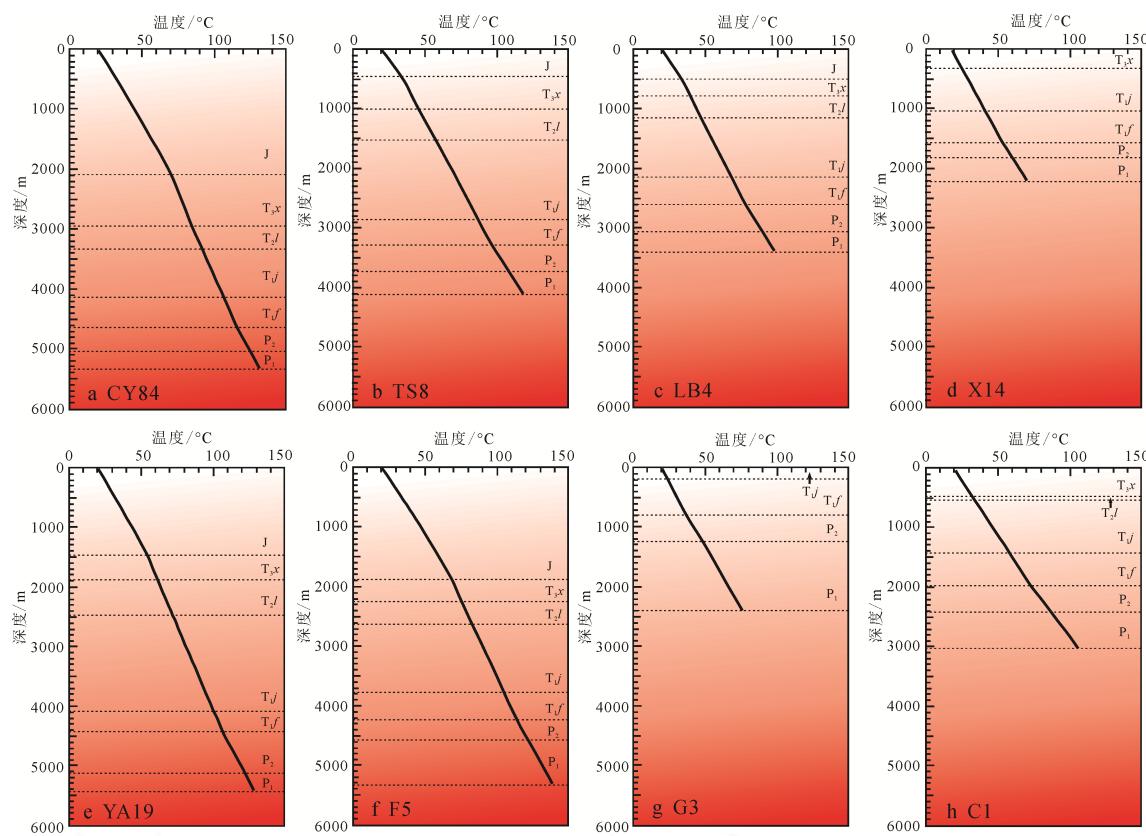
4.2 地热资源开发前景

四川盆地拥有丰富的地热资源, 水热型可采资源量四川盆地排第一, 折合标准煤 5.44 亿吨, 占全国大中型盆地的 32%(王贵玲等, 2017)。本文利用一维稳态热传导方程计算得到川东地区主要热储的地温, 再以基础地质参数和热参数为基础, 绘制了热储地热资源强度的平面分布图, 并采用体积法计算得到川东地区栖霞—茅口组的地热资源量为 $3.861\times10^{12}\text{ GJ}$, 最后对主要热储的地热资源类型及潜力进行分析。

川东地区下二叠统栖霞—茅口组沉积晚期, 受东吴运动的影响, 地层遭受到大气淡水的风化剥蚀, 发育风化壳岩溶储层, 且溶洞和裂缝发育, 是一套优质的热储层(李大军等, 2019)。本文在川东地区的不同构造分区选取了八口典型井, 利用一维稳态热传导方程(式(3))计算得到川东地区主要热储的地温(图 8)。

$$T_i^b = T_i^t + (q_i^t \times Z_i) / K_i \cdot (A_i \times Z_i^2) / (2 \times K_i) \quad (3)$$

其中, T_i^t 和 T_i^b 分别是第 i 套地层的顶底温度, $^{\circ}\text{C}$; t 是地层顶部; b 是地层底部; i 是地层数, 无量纲; q_i^t 是第 i 套地层顶部热流值, mW/m^2 ; K_i 是第 i 套地层的岩石热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; A_i 是第 i 套地层的岩石生热率, $\mu\text{W/m}^3$; Z_i 是第 i 套地层的地层厚度, km 。



J—侏罗系; T_{3x} —须家河组; T_{2l} —雷口坡组; T_{1j} —嘉陵江组; T_{1f} —飞仙关组; P_2 —二叠系上统; P_1 —二叠系下统。
J—Jurassic; T_{3x} —Xujiahe Formation; T_{2l} —Leikoupo Formation; T_{1j} —Jialingjiang Formation; T_{1f} —Feixianguan Formation;
 P_2 —Upper Permian; P_1 —Lower Permian.

图 8 川东地区典型井温度与深度曲线

Fig. 8 Relationship between temperature and depth of typical wells in the Eastern Sichuan Basin

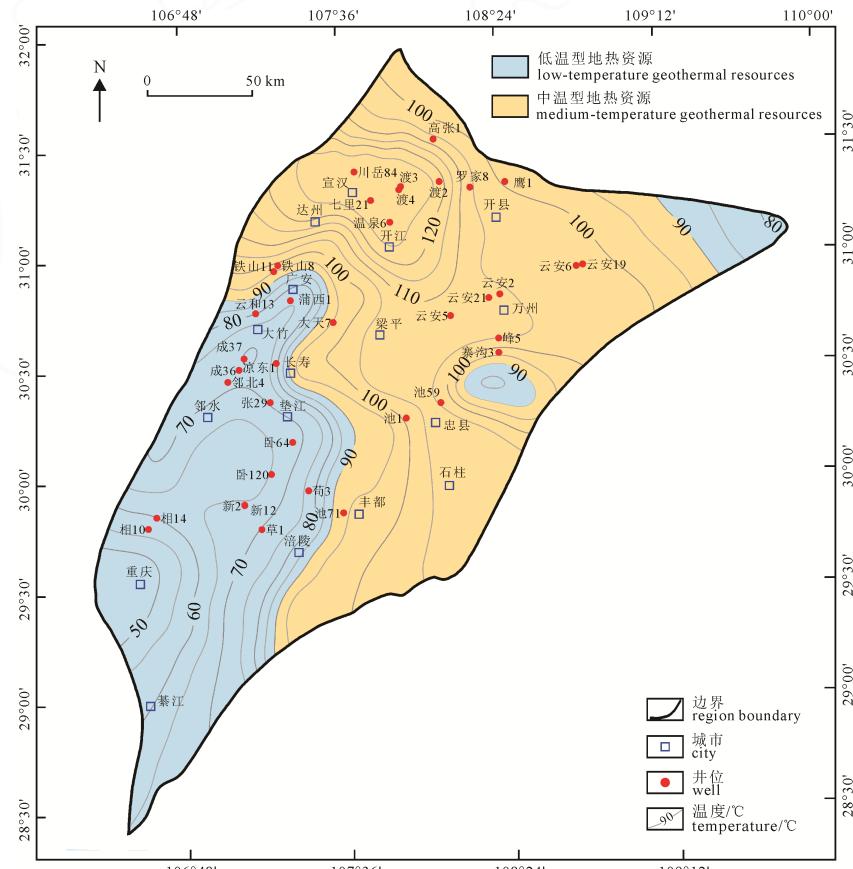


图 9 川东地区栖霞—茅口组顶部温度平面分布图

Fig. 9 Top temperature contour map of Qixia-Maokou Formation in the Eastern Sichuan Basin

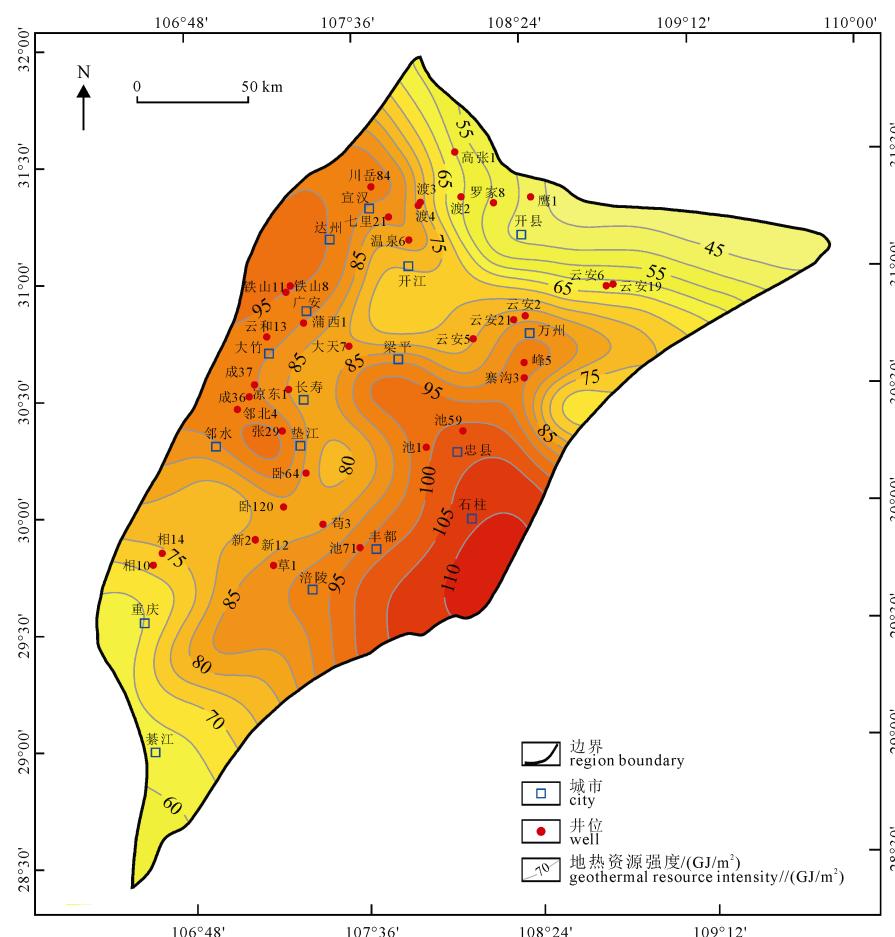


图 10 川东地区栖霞—茅口组地热资源强度平面分布图

Fig. 10 Geothermal resource intensity contour map of the Qixia–Makou Formation in the Eastern Sichuan Basin

依据邱楠生等(2019)按温度将地热资源分为高温型地热资源(温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$)、中温型地热资源($90^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} \leq 150^{\circ}\text{C}$)和低温型地热资源(温度 $< 90^{\circ}\text{C}$), 通过热储顶部温度的计算, 发现川东地区下二叠统栖霞—茅口组发育中-低温型地热资源(图9), 且热储的低温型地热资源主要分布在西南构造分区; 中温型地热资源主要分布在东南构造分区、西北构造分区及东北构造分区。同时, 川东地区地热资源强度分布范围为 $45\sim 110\text{ GJ}/\text{m}^2$ (图10), 高值分布在西北构造分区和东南构造分区, 该套热储的地热资源量为 $3.861 \times 10^{12}\text{ GJ}$ 。在地温梯度值和大地热流值较高的西北构造分区及西南构造分区, 热储埋深相对较浅, 主要分布在 $3000\sim 5000\text{ m}$ 之间, 地热资源强度分布在 $50\sim 95\text{ GJ}/\text{m}^2$ 之间, 是寻找中-低温型地热资源的有利地区。总之, 川东地区栖霞—茅口组具有形成中-低温型地热资源的地质及地温条件, 是重要的地热开发潜在地区。

5 结论

(1)川东地区地温梯度在 $16.0\sim 21.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间, 平均为 $(18.3 \pm 1.59)\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 大地热流值在 $44.3\sim 67.7\text{ mW}/\text{m}^2$ 之间, 平均为 $(55.5 \pm 6.0)\text{ mW}/\text{m}^2$, 具有

构造稳定区的低温型地温场特征。川东地区现今地温场分布受构造格局控制, 整体上表现为东部构造区的地温梯度和大地热流较低, 而西部较高。

(2)下二叠统栖霞—茅口组是川东地区最重要的热储, 具有形成丰富的中-低温型地热资源的热储及地温条件, 是重要的地热开发的潜在地区。其中, 低温型地热资源主要分布在西南构造分区, 中温型地热资源主要分布在东南构造分区、东北构造分区及西北构造分区。结合热储埋深、温度及地热资源强度指出西北构造分区和西南构造分区是寻找中-低温型地热资源的有利地区。

致谢: 感谢中国科学院地质与地球物理研究所胡圣标教授提供的系统稳态测温数据。

Acknowledgements:

This study was supported by Zhufeng Scientific Research Program of Chengdu University of Technology (No. 80000-2021ZF11415), and National Natural Science Foundation of China (No. 41972109).

参考文献:

蔡希源, 郭旭升, 何治亮, 付孝悦, 刘光祥. 2016. 四川盆地天然气动态成藏[M]. 北京: 科学出版社.

曹环宇. 2015. 四川盆地东部地区古生界泥页岩层系热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学.

段金宝, 梅庆华, 李华松, 梁子锐. 2019. 四川盆地震旦纪-早寒武世构造-沉积演化过程[J]. 地球科学, 44(3): 738-755.

高志友, 宁文锋, 李宁. 2018. 莱州市浅层地温能初步评价[J]. 化工矿产地质, 40(4): 227-234.

郝天珧, 胡卫剑, 邢健, 胡立天, 徐亚, 秦静欣, 刘少华, 雷受益. 2014. 中国海陆 1: 500 万莫霍面深度图及其所反映的地质内涵[J]. 地球物理学报, 57(12): 3869-3883.

何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606.

胡东风, 王良军, 黄仁春, 段金宝, 徐祖新, 潘磊. 2019. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 39(6): 13-21.

胡圣标, 黄少鹏, 何丽娟, 庞忠和, 汪集旸. 2013. 中国大陆地区岩石圈热结构与地热资源潜力[J]. 地质学报, 87(S1): 36.

姜政, 高珊, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892-2910.

李大军, 陈洪德, 侯明才, 徐胜林, 庞崇友, 郭海洋. 2019. 四川盆地中二叠世栖霞期—茅口期岩相古地理特征及其地球动力学机制探讨[J]. 地质科学, 54(4): 1114-1134.

邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 2019. 沉积盆地地热学[M]. 东营: 中国石油大学出版社.

孙自明, 张荣强, 孙炜, 郝运轻, 卞昌蓉. 2021. 四川盆地东部海相下组合油气勘探领域与有利勘探方向[J]. 现代地质, 35(3): 798-806.

田云涛, 朱传庆, 徐明, 饶松, KOHN B P, 胡圣标. 2011. 晚白垩世以来川东北地区的剥蚀历史——多类低温热年代学数据综合剖面的制约[J]. 地球物理学报, 54(3): 807-816.

汪洋, 邓晋福, 汪集旸, 熊亮萍. 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.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-459.

王林琪, 范存辉, 范增辉, 蒋波. 2016. 地震勘探技术对四川盆地构造演化及其区域沉积作用的推定[J]. 天然气工业, 36(7): 18-26.

熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2016. 中国陆域居里等温面深度特征[J]. 地球物理学报, 59(10): 3604-3617.

徐明, 朱传庆, 田云涛, 饶松, 胡圣标. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征 [J]. 地球物理学报, 54(4): 1052-1060.

徐秋晨. 2018. 四川盆地中西部海相地层热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学.

易善锋. 1966. 世界地热测量情况简介[J]. 地质快报, (4): 10-13.

朱传庆, 邱楠生, 曹环宇, 刘一峰, 江强. 2017. 四川盆地东部构造—热演化: 来自镜质体反射率和磷灰石裂变径迹的约束[J]. 地学前缘, 24(3): 94-104.

References:

- CAI Xi-Yuan, GUO Xu-sheng, HE Zhi-liang, FU Xiao-yue, LIU Guang-xiang. 2016. Dynamic accumulation of natural gas in Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- CAO Huan-yu. 2015. Study on thermal evolution of Paleozoic shale strata in eastern Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(in Chinese with English abstract).
- DUAN Jin-bao, MEI Qing-hua, LI Bi-song, LIANG Zi-rui. 2019. Sinian-Early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 44(3): 738-755(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhi-you, NING Wen-feng, LI Ning. 2018. Preliminary evaluation of shallow ground temperature energy in Laizhou city[J]. Geology of Chemical Minerals, 40(4): 227-234(in Chinese with English abstract).
- HAO Tian-yao, HU Wei-jian, XING Jian, HU Li-tian, XU Ya, QIN Jing-xin, LIU Shao-hua, LEI Shou-yu. 2014. The Moho depth map (1: 5000000) in the land and seas of China and adjacent areas and its geological implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(12): 3869-3883(in Chinese with English abstract).
- HE Deng-fa, LI De-sheng, ZHANG Guo-wei, ZHAO Lu-zi, FAN Chun, LU Ren-qi, WEN Zhu. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606(in Chinese with English abstract).
- HE Li-juan, XU He-hua, WANG Ji-yang. 2011. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan Basin during the Early Permian-Middle Triassic[J]. Science China Earth Sciences, 54(12): 1948-1954.
- HU Dong-feng, WANG Liang-jun, HUANG Ren-chun, DUAN Jin-bao, XU Zu-xin, PAN Lei. 2019. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39(6): 13-21(in Chinese with English abstract).
- JIANG Guang-zheng, GAO Peng, RAO Song, ZHANG Lin-you, TANG Xiao-yin, HUANG Fang, ZHAO Ping, PANG Zhong-he, HE Li-juan, HU Sheng-biao, WANG Ji-yang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2892-2910(in Chinese with English abstract).
- JIANG Guang-zheng, HU Sheng-biao, SHI Yi-zuo, ZHANG Chao, WANG Zhu-ting, HU Di. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 753: 36-48.
- LI Da-jun, CHEN Hong-de, HOU Ming-cai, XU Sheng-lin, PANG Chong-you, GUO Hai-yang. 2019. Lithofacies and paleogeographic characteristics of Middle Permian Qixia and Maokou Periods in Sichuan Basin and the geodynamic mechanism[J]. Chinese Journal of Geology, 54(4): 1114-1134(in Chinese with English abstract).

- LIU Shu-gen, DENG Bin, LI Zhi-wu, SUN Wei. 2012. Architecture of basin-mountain systems and their influences on gas distribution: A case study from the Sichuan basin, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 204-215.
- OSADETZ K G, KOHN B P, FEINSTEIN S, O'SULLIVAN P B. 2002. Thermal history of Canadian Williston basin from apatite fission-track thermochronology—implications for petroleum systems and geodynamic history[J]. *Tectonophysics*, 349(1): 221-249.
- QIU Nan-sheng, HU Sheng-biao, HE Li-juan. 2019. Sedimentary basin geotherm[M]. Dongying: China University of Petroleum Press(in Chinese).
- SOUCHÉ A, SCHMID D W, RÜPKÉ L. 2017. Interrelation between surface and basement heat flow in sedimentary basins[J]. *AAPG Bulletin*, 101(10): 1697-1713.
- SPEECE M A, BOWEN T D, FOLCIK J L, POLLACK H N. 1985. Analysis of temperatures in sedimentary basins; the Michigan Basin[J]. *Geophysics*, 50(8): 1318-1334.
- SUN Zi-ming, ZHANG Rong-qiang, SUN Wei, HAO Yun-qing, BIAN Chang-rong. 2021. Petroleum exploration domains and favorable directions of the lower marine assemblage in eastern Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 35(3): 798-806(in Chinese with English abstract).
- TANG Bo-ning, ZHU Chuan-qing, XU Ming, CHEN Tian-ge, HU Sheng-biao. 2019. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(2): 691-720.
- TIAN Yun-tao, KOHN B P, ZHU Chuan-qing, XU Ming, HU Sheng-biao, GLEADOW A J W. 2012. Post-orogenic evolution of the Mesozoic Micang Shan Foreland Basin system, central China[J]. *Basin Research*, 24(1): 70-90.
- TIAN Yun-tao, ZHU Chuan-qing, XU Ming, RAO Song, KOHN B P, HU Sheng-biao. 2011. Post-Early Cretaceous denudation history of the northeastern Sichuan Basin: constraints from low-temperature thermochronology profiles[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(3): 807-816(in Chinese with English abstract).
- TURCOTTE D L, SCHUBERT G. 1983. Geodynamics-Application of Continuum Physics to Geological Problem[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 134: 461-464.
- WANG Gui-ling, ZHANG Wei, LIANG Ji-yun, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Lin-qi, FAN Cun-hui, FAN Zeng-hui, JIANG Bo. 2016. Presumption of the tectonic evolution and regional sedimentation of the Sichuan Basin based on seismic exploration technology[J]. *Natural Gas Industry*, 36(7): 18-26(in Chinese with English abstract).
- WANG Yang, DENG Jin-fu, WANG Ji-yang, XIONG Liang-ping. 2001. Terrestrial heat flow pattern and thermo tectonic domains in the continental area of China[J]. *Journal of the Graduate School Academia Sinica*, 18(1): 51-58(in Chinese with English abstract).
- XIONG Sheng-qing, YANG Hai, DING Yan-yun, LI Zhan-kui. 2016. Characteristics of Chinese continent Curie point isotherm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3604-3617(in Chinese with English abstract).
- XU Ming, ZHU Chuan-qing, TIAN Yun-tao, RAO Song, HU Sheng-biao. 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(4): 1052-1060(in Chinese with English abstract).
- XU Qiu-chen. 2018. Thermal evolution of marine strata in the central and western Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(in Chinese with English abstract).
- YI Shan-feng. 1966. Brief introduction of geothermal measurement in the world.[J]. *Geology Letters*, (4): 10-13(in Chinese).
- YU Qiang, REN Zhan-li, LI Rong-xi, WANG Bao-jiang, QIN Xiao-li, TAO Ni. 2018. Paleogeotemperature and maturity evolutionary history of the source rocks in the Ordos Basin[J]. *Geological Journal*, 52(S1): 97-118.
- ZHU Chuan-qing, QIU Nan-sheng, CAO Huan-yu, LIU Y-i-feng, JIANG Qiang. 2017. Tectono-thermal evolution of the eastern Sichuan Basin: constraints from the vitrinite reflectance and apatite fission track data[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 94-104(in Chinese with English abstract).
- ZUO Yin-hui, JIANG Shu, WU Shi-hu, XU Wei, ZHANG Jiong, FENG Ren-peng, YANG Mei-hua, ZHOU Yong-shui, SANTOSH M. 2020. Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the Chagan Depression of the Yingen-Ejinaqi Basin, north central China[J]. *Basin Research*, 32(6): 1328-1346.
- ZUO Yin-hui, QIU Nan-sheng, HAO Qing-qing, ZHANG Yun-xian, PANG Xiong-qi, LI Zhong-chao, GAO Xia. 2014. Present geothermal fields of the Dongpu sag in the Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(3): 915-930.