

红河断裂对莺歌海盆地地热系统的控制作用

杨培¹, 张佳豪², 宋荣彩³, 董贵宇⁴, 陈海雯³, 郑峰³

1. 成都理工大学 管理科学学院, 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

4. 中国电力工程顾问集团 东北电力设计院有限公司, 长春 130021

[摘要] 基于莺歌海盆地地热背景, 从地热系统的水源、流体通道、热储和盖层 4 个方面系统地评价红河断裂对其的控制作用。研究表明, 通过水样、气样分析, 断裂构造在地热水循环中起到重要的控制作用; 红河断裂的差异变形显著影响裂隙型热液热储的平面分布范围和纵向发育深度的异质性; 莺歌海盆地地热系统是以地幔热物质作为主要热源, 红河断裂带和盆地内中央凹陷底辟带为主要通道, 裂隙型热液热储和上部大面积水道、海底扇、三角洲等储集体为主要热储, 莺歌海组巨厚泥岩为主要盖层。

[关键词] 莺歌海盆地; 红河断裂; 底辟带; 控热作用; 地热系统

[分类号] P314.9

[文献标志码] A

Structural control of Red River Fault on geothermal system in Yinggehai Basin

YANG Pei¹, ZHANG Jiahao², SONG Rongcai³, DONG Guiyu⁴,
CHEN Haiwen³, ZHENG Feng³

1. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group, Changchun 130021, China

Abstract: This study uses the geothermal background of the Yinggehai Basin to systematically evaluate the role of the Red River Fault in controlling the source of water, pathway of fluid, reservoir, and cap layer of the geothermal system. The analysis of samples of water and gas show that the

[收稿日期] 2023-09-04。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52192622)。

[第一作者] 杨培(1990—), 男, 讲师, 研究方向: 文本挖掘与决策, 地热政策文本分析, E-mail: yangpei@cdut.edu.cn。

[通信作者] 宋荣彩(1975—), 女, 教授, 研究方向: 油气储层地质、地热地质, E-mail: songrongcai06@cdut.edu.cn。

[引用格式] 杨培, 张佳豪, 宋荣彩, 等, 2024. 红河断裂对莺歌海盆地地热系统的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 428-438.

Yang P, Zhang J H, Song R C, et al., 2024. Structural control of Red River Fault on geothermal system in Yinggehai Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 428-438.

fracture structure plays an important role in controlling the geothermal water cycle. The differential deformation of the Red River Fault significantly influences the range of planar distribution and heterogeneity of the depth of longitudinal development of rift-type hydrothermal reservoirs. The geothermal system of the Yinggehai Basin is grounded in thermal mantle material as the main source of heat, with the Red River Fault Zone and the bottom-penetrated zone of central depression in the basin acting as the major channels. Moreover, the rift-type hydrothermal reservoirs, upper large watercourses, submarine watercourses, submarine reservoirs and cap layers, submarine fans, deltas, and other storage groups in the upper part serve as the main thermal reservoirs, while the giant mudstone of the Yinggehai Formation acts as the main covering layer.

Key words: Yinggehai Basin; Red River Fault; bottom fissure zone; structural control of geothermal resources; geothermal system

地热能是一种天然可再生的清洁能源, 潜能巨大(Hu et al., 2022; Wang et al., 2022; Dong et al., 2022), 随着“双碳”目标的推动, 其重要性越来越受到关注。莺歌海盆地在多年的油气资源开发过程中常会伴随产生高温热水。如果能够充分利用该地区的地热资源, 就可以形成一个油、气、热三位一体的开采利用模式, 使得莺歌海盆地为人类提供更多的天然能源。

地热资源位于地壳上部, 蕴藏着巨大能量。其能源来源有 2 个方面: 未转化的地球形成初期势能和放射性同位素的衰变能, 人类经济开采的部分称为地热资源(汪集暘等, 2015; 庞忠和等, 2017)。在地热资源的开发过程中, 研究断裂构造的控制作用是至关重要的。具体而言, 郯庐断裂带和断裂带地质构造对地热流体成因和水化学特征具有影响(宋仁亮, 2021)。特别是在黄沙洞地热田, 断裂带对热控制和水控制起着重要作用(范艳霞等, 2022)。此外, 断裂交汇区域是高温热水的主要通道, 并决定了深部热储的位置(胡志华等, 2022)。四川康定地热田的地下热水储集层主要是透水性较好的花岗岩, 而盖层则是透水性较差的砂板岩。另外, 雅拉河和榆林河地下水主要分布在断裂带上(卞跃跃和赵丹, 2018)。莺歌海盆地的底辟运动为背斜构造的形成提供条件。断层和裂隙为深部气体迁移提供了快速通道。断层处的热流体活动较为强烈, 揭示了气田的成藏地质条件与底辟运动及深部热流体活动密切相关(童传新等, 2012)。

前人在断裂构造对热控制的研究中, 主要关注构造对热通道的控制作用, 其次是构造对热源和热储的控制作用。然而, 对于一个完整的地热

系统而言, 单一关注某一方面或几方面显得狭隘, 务必以全面的视角进行研究。为了研究红河断裂系统在热控制方面的作用, 需要从莺歌海盆地的地热背景入手, 并通过收集水样和气样的化验分析等手段, 全面系统地分析红河断裂在水源、流体通道、热储和盖层这 4 个方面对地热系统的控制作用, 获得更完整、更全面的认识。

1 红河断裂地质背景

1.1 红河断裂的演化

红河断裂带从云南经过越南北部一直延伸至红河口入海, 然后沿莺歌海盆地向东南延伸至海南岛南部海域(图 1)。这一断裂带具有强烈的走滑拉张性质, 导致莺歌海盆地沉积了大量的新生代沉积物(张功成等, 2018)。红河断裂从陆地延伸至海域, 对莺歌海盆地的形成和演化具有重要的控制作用。邵维晔等(2022)通过在红河断裂带陆地位置采集温泉水样, 认为地热的来源可能与下地壳及上地幔物质沿着深大断裂向上运移有关。

红河断裂的活动方式按活动期总体上经历左旋运动和右旋运动 2 个运动阶段。Tapponnier et al. (1986) 和 Leloup et al. (1995) 通过对印度和欧亚板块碰撞时盆地的错动研究认为, 自始新世早期开始, 红河断裂开始进行左旋剪切运动。此后, 许多学者对红河断裂的运动时间和活跃期进行了广泛研究, 其研究结果总体上较为一致。他们认为, 在地震反射界面 T40(10.5 Ma) 时, 莺歌海盆地红河断裂带的左旋走滑运动停止; 地震反射界面 T40~T30(10.5~5.5 Ma) 期间, 红河断裂构造相对平静; 地震反射界面 T30~T27(5.5~2.4 Ma) 期

间,左旋走滑运动逐渐转变为右旋走滑运动;地震反射界面 T27(2.4 Ma)以后,红河断裂开始右旋走滑活动,右旋运动还影响了坡折带和底辟构造的形成;自 T20(1.9 Ma)以来,右旋走滑活动逐

渐减弱(孙珍等,2002;鲁宝亮等,2015;杨东辉等,2019)。红河断裂是控制莺歌海盆地形成和演化的断裂,包括进入盆地的多条断裂构造和底辟构造。

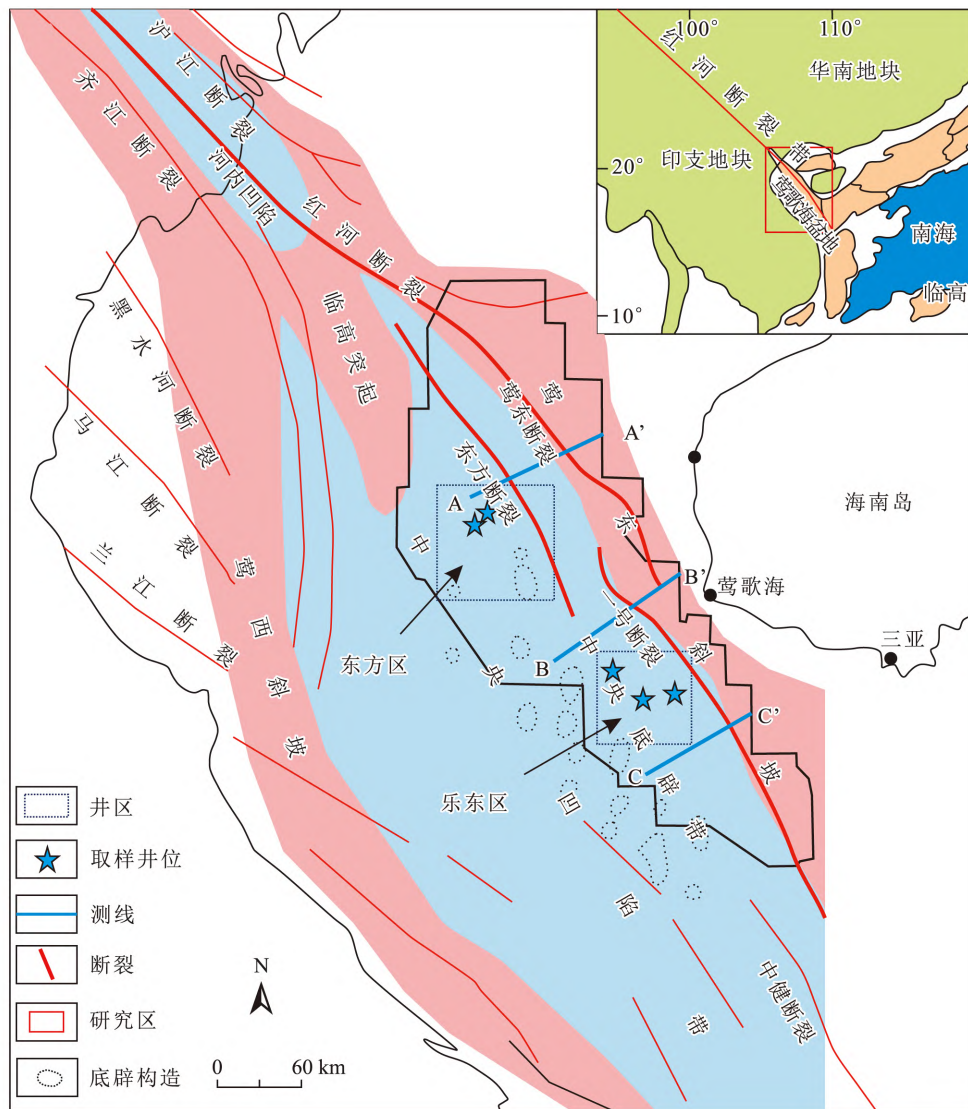


图 1 莺歌海盆地红河断裂示意图(底图据杨东辉等,2019 修改)
Fig. 1 Schematic diagram of the Red River Fault in the Yinggehai Basin

1.2 红河断裂带的分段性特征

红河断裂进入海域以后其延伸方向转为南北向、再转到北西向,主要由莺东断层、一号断层和东方断层组成(雷超等,2022),中部由转换带连接(图 1)。该断裂既是盆地的主断层也是盆地的边界断层,平面延伸长度约为 290 km,新生界最大断距约为 5 km(殷秀兰等,2002),控制了莺歌海盆地的形成演化。红河断裂整体特征为较陡的大型走滑断层,是强伸展构造背景下形成的产物。

盆地内多数断裂与主断裂成锐角相交的分布,表现出了明显的剪切断层分布模式。

在井震标定的基础上,通过地震资料精细解释发现,红河断裂沿断层走向断面形态变化特别明显,表现出强烈的分段性。根据断裂带剖面形态特征断层可分为北、中、南 3 段,各段形态差异较为明显,盆地发育初期,北段张裂性质较为明显,随时间推移,断裂向盆地边缘转移,以走滑性质为主,在剖面上呈阶梯状下降的形态(图 2-A),

主要反映以伸展运动为主、剪切为辅的动力学特征;中段断裂形态随盆地的发育走滑特征愈加明显,倾角较北部明显变陡,平面上被揭示为直线状单条断裂,构造特征主要表现为台阶式结构(图 2-B);南段张裂特征尤为强烈,构造带总体形态主要表现为狭窄的地堑地垒结构(图 2-C)。整体上

看,地震剖面揭示了该断裂带包括次级断裂很少有穿过梅山组、三亚组的不整合面,说明在三亚组地层沉积后,红河断裂带对莺歌海盆地的控制逐渐减弱。莺歌海盆地内红河断裂带由东方断裂、一号断裂、莺东断裂构成,中部由转换带连接,具有明显的分段性特征。

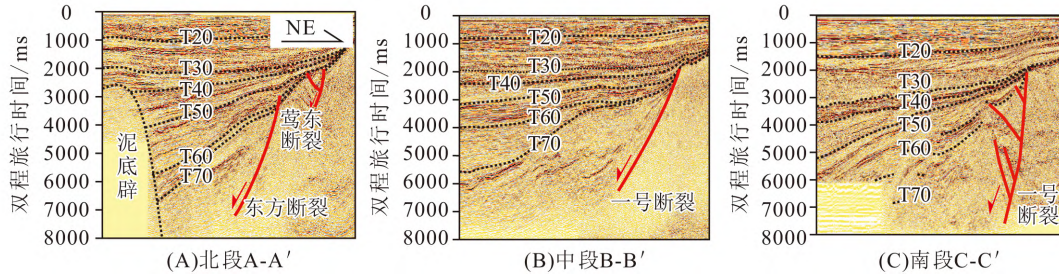


图 2 莺歌海盆地红河断裂带剖面特征(剖面位置见图 1)
Fig. 2 Cross-sectional characteristics of the Red River Fault Zone in the Yinggehai Basin

2 红河断裂对地热系统要素的影响

2.1 红河断裂对地热水补给源的影响

地热水源是地热系统的重要组成部分。一般来说,地下水的补给来源包括地表水和大气降水等。由于莺歌海盆地位于海平面以下,其地下水的补给方式相对复杂。为了确定海盆水源补给的主要来源,采用了取样水中氢氧同位素的特征,并结合 Wang et al. (2021)和 Ji-Hyun et al. (2022)在其研究中提出的几条水线方程对比氘含量(δD)和氧-18 含量($\delta^{18}O$)值,通过比较分析的方法,得出对莺歌海盆地地层中水源补给的推测结论。根据给定的地质条件,莺歌海盆地地热水的补给源可能来自地下深部的古海水及现代海水。当地大气降水的 δD 比全球的降水线更丰富,因此当地的大气降水可以在小量上进行补给,导致热水的 δD 增加。此外,部分地热水比浅层地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 更丰富,其中富含 $\delta^{18}O$ 的古海水可能是一个重要的补给源。

根据图 3,发现研究区域地热水样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值偏离全球大气降水线。由于一些位置的构造发育与地下钻井的连通,封存的古海水参与了地热水的循环,因此其主要来源是古海水,即地层水或邻层水。崖城区域的海水样品接近海水点,并且与海南古海水地层点相似,主要来源是古海水。东方区域的大部分海水样品位于深部海水蒸发线附近,2 个样点靠近大气降水线,但考虑莺

歌海盆地属于典型的高温高压盆地,所以大气降水无法对盆地内深部地层水进行补给,说明东方区域水源主要是深部古海水。

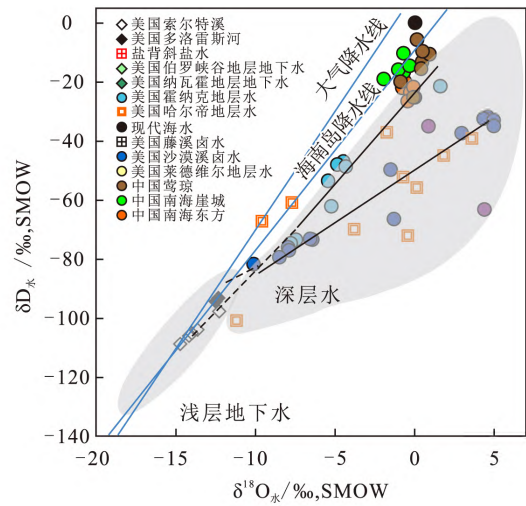


图 3 不同水域水稳定同位素之间的对比
(据 Ji-Hyun et al., 2022 修改,取样点见图 1)
Fig. 3 Comparison between stable isotopes of different water samples

通过地热水样品的分析,得出莺歌海盆地地层中水源补给的推测结论。东方区域和崖城区域水源补给主要为深部古海水即地层水或邻层水。这些推测结果与断裂构造的位置有关,验证了断裂构造在地热水循环中的控制作用。

2.2 红河断裂对地热通道的影响

对于水热型地热系统而言,了解水热运移的成因和水热运移通道的识别将有助于认识地热田

的形成过程(刘志杰等,2015)。底辟断层和裂隙是流体活动的主要通道,流体沿着断层垂直输送将深层超压转移到浅层(张启明和胡忠良,1992)。在中央底辟区,深层流体的主要通道是断裂和断层系统以及各种尺寸的微裂缝。正是这些裂隙和断裂形成了流体在盆地内纵向运移的通道(杜学斌等,2005)。同时,这些裂隙、断裂系统和新近纪海退形成的热储的横向通道相结合,在盆地中形成了复杂的网状通道,为地热的储集提供了基础(尤龙等,2014)。

本次研究中搜集了部分莺歌海盆地黄流组天然气数据,烃类组分以 CH₄ 为主,非烃类以 N₂ 和

CO₂ 为主(表 1)。通过对比 CO₂ 在不同深度相对含量发现(图 4),东方区处于底辟构造区域,多期强烈构造运动形成断裂,为天然气的运移提供通道,使得早期聚集较低含量的 CO₂ 向浅部再次运移和聚集,后期聚集较高含量的 CO₂(谢玉洪等,2014;Wang and Pang,2023);乐东区靠近一号断裂带,整体上 CO₂ 含量高,纵向上随着埋深增加,CO₂ 含量有增加的趋势(段亮等,2023)。表明在早期红河断裂构造薄弱的位置,底辟构造发育较多,与周围的断裂构造相连,形成了复杂的通道体系,可以为热和水在地层中的流通以及热流传递提供良好的通道。

表 1 莺歌海盆地黄流组天然气组分(体积分数/%) (据李弛,2021 修改)

Table 1 Gas composition of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin

区域	井号	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆₊	CO ₂	N ₂	
乐东区	L10-11	60.27	1.93	0.68	0.12	0.16	0.06	0.03	0.10	11.13	25.05	0.79
	L10-13	66.12	6.07	2.15	0.53	0.54	0.31	0.13	0.14	10.15	13.86	0.79
	L10-15	40.26	0.96	0.21	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	10.26	48.19	0.86
	L10-16	26.38	2.11	0.75	0.31	0.25	0.29	0.14	1.10	0.99	67.68	0.90
	L10-31	61.26	1.76	0.71	0.12	0.14	0.05	0.03	0.05	3.18	32.69	0.94
东方区	D29-21	48.87	1.78	0.43	0.04	0.05	0.01	0.00	0.00	1.04	47.79	0.78
	D13-16	44.95	0.51	0.23	0.12	0.05	0.03	0.01	0.02	27.45	26.64	1.05
	D13-22	68.05	1.09	0.59	0.17	0.13	0.07	0.03	0.21	5.33	24.32	0.69
	D13-24	44.42	0.43	0.31	0.13	0.08	0.05	0.02	0.07	3.60	50.59	0.78

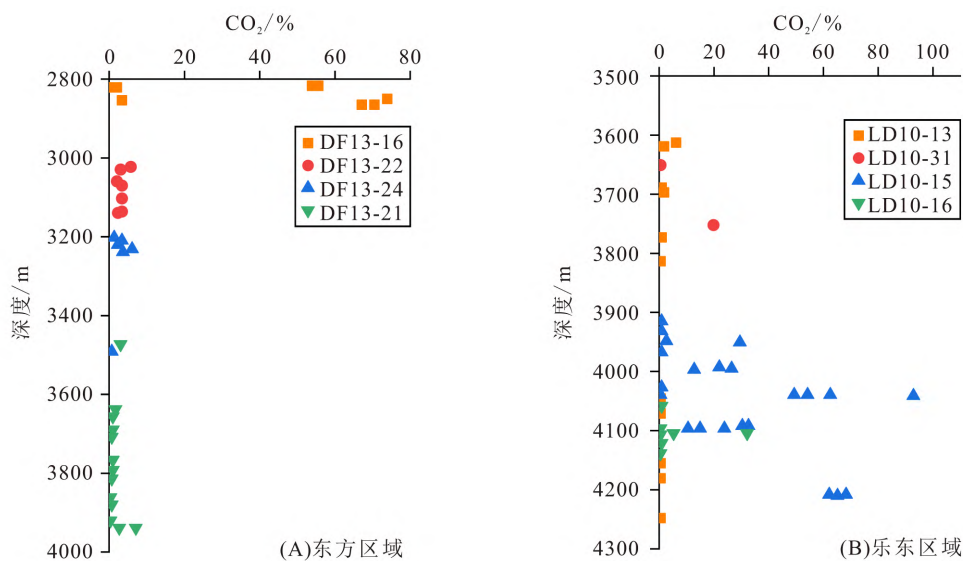


图 4 东方区域和乐东区域 CO₂ 随深度变化趋势(数据源自李弛,2021)

Fig. 4 Trend of CO₂ concentration with increasing depth in the Dongfang and Ledong region

综上所述,断层和底辟在莺歌海盆地非常发育,可以作为热源和水源传递的重要通道,对地热资源

的可持续开采和地热资源的品质有重要影响。红河断裂向下延伸切割地壳深度大(万玲等,2000;

滑玉璠,2019),并与上部的小断裂相连,构成了从深部至浅部的完整热流通道,底辟本身就是良好的热流垂向通道。

2.3 红河断裂对热储的影响

莺歌海盆地地层岩性主要为泥岩和砂岩,碳酸盐岩较少,属砂岩孔隙型热液热储。如图5所示,盆地内热储主要发育中央坳陷带低位海底扇和斜坡近坳带水道储集体(谢玉洪等,2015)。区带级走滑大断裂控制了储集相带的分布,中央坳陷带沉积和构造斜坡沉积演化通过一号断裂控制坡度、水深等条件,间接控制了低位海底扇朵叶体的展布形态、迁移方向,决定了可作为有利热储的储集相带有扇三角洲、河道、三角洲、海底扇等的砂、粉砂岩等储集体的发育规

模,进而控制了优质水道砂热储分布,是具有厚度大、分布广,且基质少、胶结程度低等特点的中孔、中-低渗优质热储(赵凡等,2012;谢玉洪等,2015;代龙等,2022)。

研究区现今地温梯度为 $37.0\sim 43.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,平均为 $40.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,区内黄流组与梅山组现今最大埋深为 $3\,524\sim 4\,748\text{ m}$ 。现今最大地层温度为 $143\sim 194\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,热储条件优越(曹江骏,2023),发育海底扇等优势储集体是盆地的优质热储。深部发育多条深大断裂,提供了地热流体运移的通道,流体可以通过断裂带内的连通裂缝和孔隙,沿着断裂带的走向或倾向运移,促进了地下流体的流动和分布,为上部热储提供良好的热源供给。

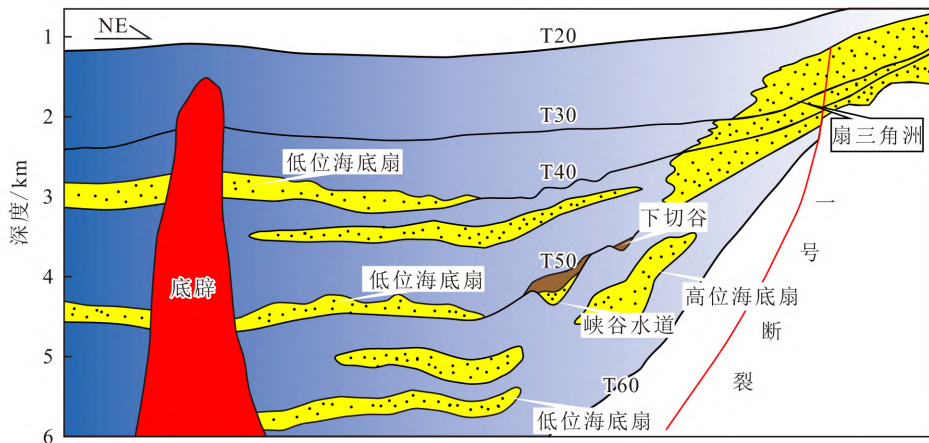


图5 莺歌海盆地地层格架及砂体发育预测图

Fig. 5 Predicted stratigraphic grid and development of the sand body in the Yinggehai Basin

将盆地内部靠近底辟带、深大断裂的海底扇、三角洲等储集体进一步分为断裂控制的裂隙型热液热储。渗透体系是一个地下热液的储集地,热液上升的基岩裂隙体系是地热流体的主要储藏空间(伍小雄,2011)。红河断裂在长时间的构造活动中发育大量伴生断裂构成巨大的断裂系统,断裂可以增加热储的渗透性和孔隙度,提高地下地热流体的储集和储存能力。断裂系统所产生的裂缝不但本身就是重要的储集空间,而且可以沟通相邻的缝洞从而形成大型的缝洞系统。走滑断裂力学性质差异,造成断裂破碎带内部构造活动差异。走滑断裂在活动过程中对其两侧围岩产生影响,同一次构造运动导致的断裂发育沿走向可能表现为不同的构造样式,且对其周围地层改造程度不同。沿走滑断裂主位移带,张扭段、压扭段、

平移段内断层破碎带型热储的特点具有明显差异。平移段局部构造特征不明显,以平移特征为主,断裂带宽度较窄、热储规模有限、横向连通性较好;张扭段拉张应力作用条件下,形成正花状构造(图6-A),断裂带纵向深度大、热储横向连通性强;压扭段挤压应力作用条件下,形成负花状构造(图6-B),断裂带纵向深度小于张扭段,热储横向连通性一般(图7)。

综上,研究区内黄流组、莺歌海组、眉山组三角洲、海底扇、水道和浅海砂岩由下部红河断裂带不断提供热源,地层温度高、地温梯度高,是优势热储;此外深层区域内红河断裂带发育,拥有大型的裂缝系统,改善自身储集性,形成巨大的裂隙型储热空间,也可作为优势的热储,所以红河断裂对莺歌海盆地地热储具有较强的控制作用。

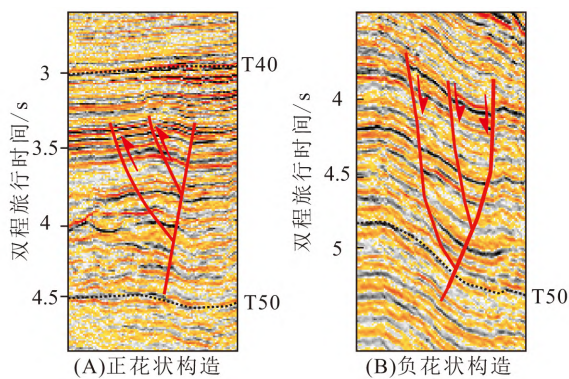


图 6 莺歌海盆地走滑断裂演化特征

Fig. 6 Evolutionary characteristics of strike-slip fault in the Yinggehai Basin

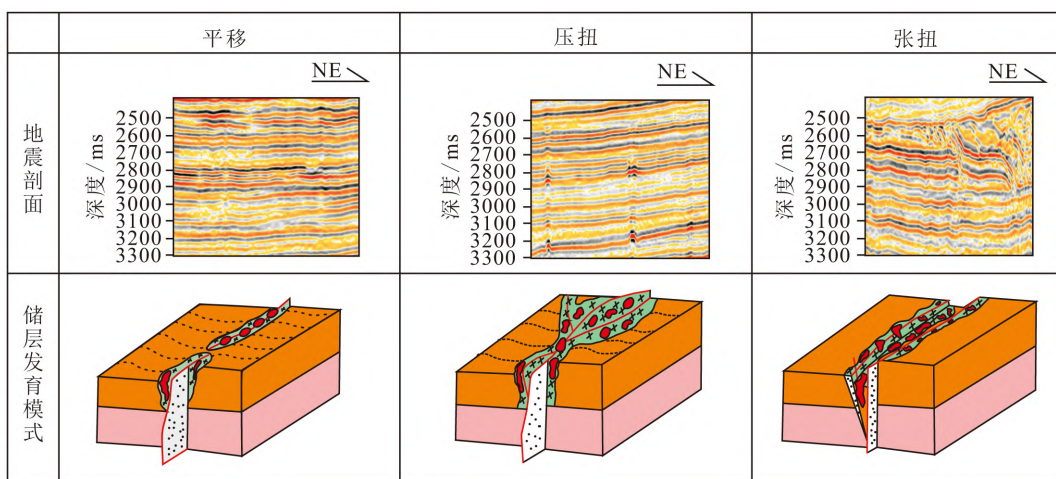


图 7 破碎带热储发育模式图(据王清华,2022 修改)

Fig. 7 Model of the development of the fracture zone

2.4 红河断裂对地热盖层的影响

研究区内莺歌海组(T20~T30)地层位于黄流组(T30~T40)之上,岩性以泥岩为主,泥岩渗透性差,剖面上该层厚度大,平面上分布范围广、连续性好、地温梯度低、导热性差且构造活动较弱,能够有效地封住热储,防止深层热源热外泄(曹江骏,2023)。红河断裂自黄流组之后趋于平静,对上覆沉积层产生的影响较弱,没有较大断裂的发育,上覆泥岩层具有低热导率、低渗透率和低孔隙度的致密非渗透性岩层,使得莺歌海组地层有良好的保温作用,是地热系统中热储上方能够阻止热量外泄的重要组成部分,所以红河断裂对上覆泥岩层的影响较弱。

3 红河断裂控储模式

地热系统的要素包括以下 4 个部分,“源”即热源和水源,“通”是地热流体运移通道,“储”为热

储,“盖”是热储上面的透水性较弱构造不发育的地层(汪集暘等,2015;张英等,2017)。在莺歌海盆地,这些要素形成了一个更加复杂的地热系统,受红河断裂活动的特殊影响,形成了一种独特的断裂控储模式。莺歌海盆地的形成时代较晚,沉积速度快,且红河断裂构造活动强烈,这些断裂对地热系统中各个要素产生了系统性的影响,进一步塑造了该地区的地热特征。在这一特殊的断裂控储模式中,红河断裂起着重要的作用。

走滑断层具有简单的形式和线性结构(王子轶,2020)。主断层区没有或存在较少次级断层,断层破坏区在断层平面两侧都有发展。推升和拉开段在地震剖面上显示出花状复杂结构,并有多组断层平面,发展了多组断层破坏区(图 8)。盆地内发育的红河断裂切割岩石圈,又与上部的小断裂相通,结合底辟与周围的断裂构造相连组成复杂的热流通道体系,加强了热和水在地层中的

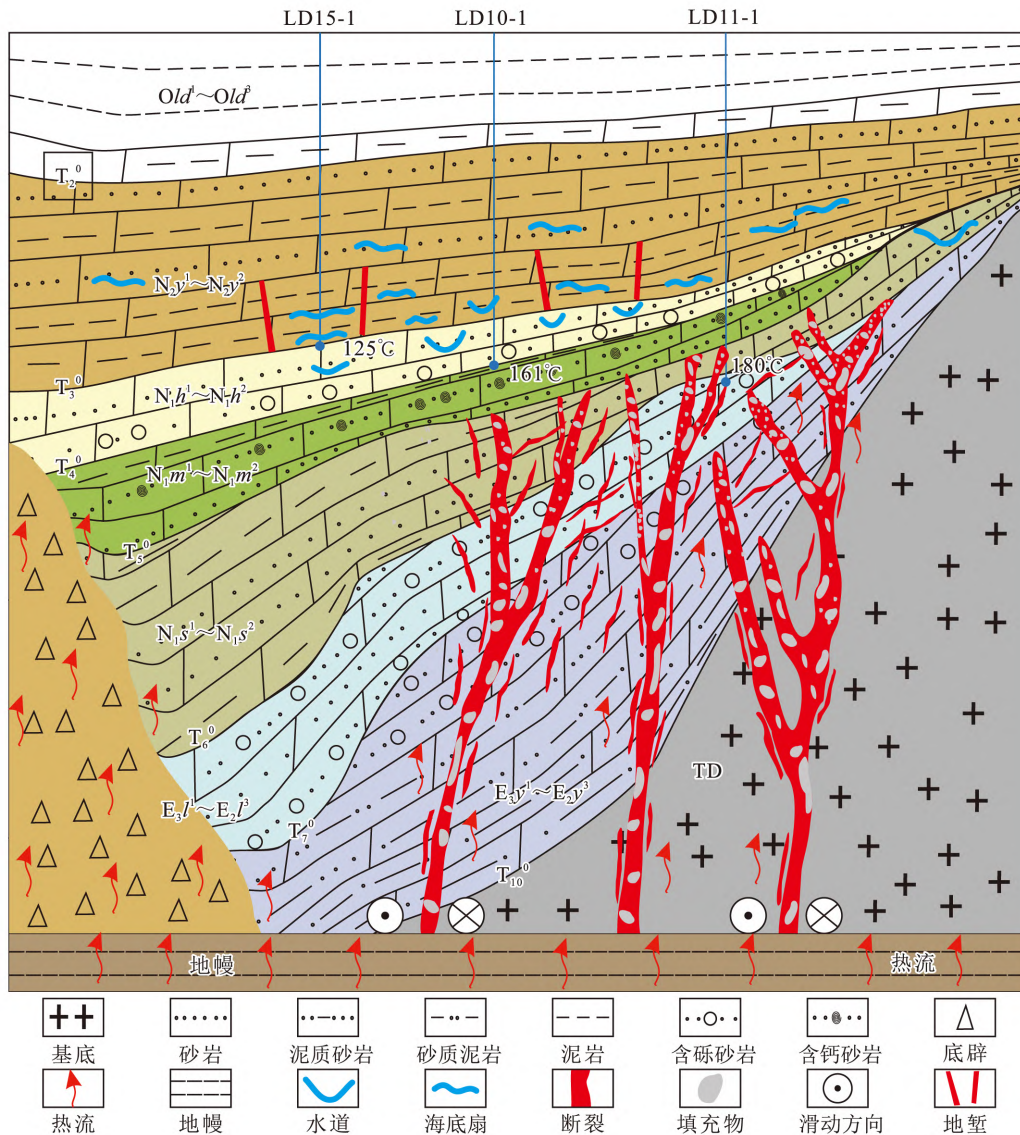


图 8 红河断裂控储模式图

Fig. 8 Map of the model for the control and water storage of the Red River Fault

流通,构成了从深部至浅部的完整热流通道(图 8)。随着盆地拉张,岩石圈减薄,深部的岩浆活动变得剧烈,可以使流体携带高温热流从深部热源区域向热储输送热能。断裂带的裂隙和裂缝提供流体流动的通道,促进了地热流体的运移和补给。

因走滑断裂力学性质差异,造成断裂破碎带内部构造活动差异。走滑断裂在活动过程中对其两侧围岩产生影响,同一次构造运动导致的断裂发育沿走向可能表现为不同的构造样式,且对其周围地层改造程度不同。沿走滑断裂主位移带,张扭段、压扭段、平移段内断层破碎带型热储的特点具有明显差异。拉张应力作用下,断层破碎带

热储在纵向上发育深度大,并且沿主位移带方向具有良好的连通性(图 8)。据已有测试数据,LD15-1 井的平均地温梯度为 38.9 °C/km,井底温度为 125 °C;LD10-1 井的平均地温梯度为 39.4 °C/km,井底温度为 161 °C;LD11-1 井的平均地温梯度为 48.9 °C/km,井底温度为 180 °C(图 8)。发现平均地温梯度及井底温度在靠近深大断裂处表现出较高值,在远离深大断裂处表现出较低值,进一步证明了红河断裂带对莺歌海盆地热储的控制作用。地热流体在走滑断裂中的运移与补给过程中,会沿断裂带两侧发生渗透,促使走滑断裂带两侧的围岩发生岩溶作用。压扭隆高部位,局部可形成高角度张性缝,利于岩溶热储

发育(图 8)。红河断裂构造活动减弱,黄流组地层进行快速热沉积,发育厚度大、横向连续的砂岩沉积,上层莺歌海组地层岩性主要以泥岩为主,且厚度大、范围广、孔隙度低、渗透率低、地层导热性差,所以莺歌海组的巨厚泥岩层是研究区热储的良好盖层,具有良好的保温作用。

综上,研究区主要形成了以地幔热物质作为热源(张健和宋海斌,2001),红河断裂带和盆地底辟带为主要通道,裂隙型热液热储和上部大面积热沉积砂岩为主要热储,莺歌海组巨厚泥岩为主要盖层结合的地热系统。

4 结论

a. 水样、气样分析显示不同区块的水源可能来自地下深部的古海水即地层水或邻层水、降水和现代海水,气体通过断裂、底辟带向上运移,验证了断裂构造和底辟构造在地热水循环中的控制作用。

b. 莺歌海盆地热储主要以砂岩孔隙型热储为主,其中受红河断裂和底辟带控制的裂隙型热液热储表现出不同特征。红河断裂的张扭段与压扭段断层破碎带的受应力状态直接影响了热储在平面分布范围和纵向发育深度上的差异性,这为热储的开发提供了有益的指导和方向。

c. 莺歌海盆地地热系统是以地幔热物质作为主要热源,红河断裂带和底辟带为主要通道,裂隙型热液热储和上部大面积水道、海底扇、三角洲等储集体为主要热储,莺歌海组巨厚泥岩为主要盖层结合的地热系统。

[参 考 文 献]

- 卞跃跃,赵丹,2018. 四川康定地热田地下热水成因研究[J]. 地球学报,39(4):491—497.
- Bian Y Y,Zhao D,2018. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field,Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica,39(4):491—497. (in Chinese)
- 杜学斌,姜涛,王振峰,等,2005. 莺歌海盆地 CO₂ 气富集与热流体活动关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,(2):109—114.
- Du X B,Jiang T,Wang Z F,*et al.*,2005. Relationship between CO₂ gas enrichment and thermal fluid activity in the Yinggehai Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,(2):109—114. (in Chinese)
- 曹江骏,2023. 异常高压背景下成岩流体活动对储层成岩孔隙演化的影响——以莺歌海盆地乐东 X 区中深层砂岩储层为例[D]. 西安:西北大学档案馆.
- Cao J J,2023. Diagenetic Fluid Activity and Its Influence on Diagenesis-pore Evolution of the Reservoir under Abnormally High Pressure Background: A Case Study of the Medium-deep Buried Sandstone Reservoir in the Ledong X Area of the Yinggehai Basin,the Northern South[D]. Xi'an:The Archive of Northwest University. (in Chinese)
- 段亮,史德锋,刘航,等,2023. 莺歌海盆地斜坡区 CO₂ 分布特征及主控因素[J]. 石化技术,30(10):146—148.
- Duan L,Shi D F,Liu H,*et al.*,2023. Characteristics of CO₂ distribution and main controlling factors in the slope area of Yinggehai Basin [J]. Petrochemical Technology,30(10):146—148. (in Chinese)
- 范艳霞,李海龙,张军龙,等,2022. 东南沿海黄沙洞地热田地应力与控热构造研究[J]. 地球物理学报,65(10):3944—3961.
- Fan Y X,Li H L,Zhang J L,*et al.*,2022. Research on the in-situ stress state and the geothermal-controlling structure of the Huangshadong Geothermal Field in the Southeast Coast of China[J]. Chinese Journal of Geophysics,65(10):3944—3961. (in Chinese)
- 代龙,尤丽,吴仕玖,等,2022. 莺歌海盆地乐东东区高温超压储层物性下限及分类[J]. 海相油气地质,27(2):157—166.
- Dai L,You L,Wu S J,*et al.*,2022. Physical property lower limit and classification of high temperature and overpressure reservoirs in Ledong area of Yinggehai Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,27(2):157—166. (in Chinese)
- 胡志华,高洪雷,万汉平,等,2022. 西藏羊八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J]. 地质论评,68(1):359—374.
- Hu Z H,Gao H L,Wan H P,*et al.*,2022. Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing Geothermal Field,Xizang(Tibet)[J]. Geological Review,68(1):359—374. (in Chinese)
- 滑玉璵,2019. 基于体波层析成像的青藏高原东南缘地壳上地幔速度结构研究[D]. 武汉:武汉大学档案馆.
- Hua Y J,2019. Crustal and Upper-mantle Velocity Structures beneath Southeastern Margin of the Tibetan Plateau based on Body-wave Tomography[D]. Wuhan:The Archive of Wuhan University. (in Chinese)
- 鲁宝亮,王万银,张功成,等,2015. 红河断裂带海域延伸位置的地球物理证据及其与南海扩张的关系[J]. 热带海洋学报,34(5):64—74.

- Lu B L, Wang W Y, Zhang G C, *et al.*, 2015. Geophysical evidence of the Red River Fault extending position in the South China Sea and the relationship with sea-floor spreading [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 34(5): 64–74. (in Chinese)
- 雷超, 任建业, 裴健翔, 等, 2022. 莺歌海—琼东南盆地结合部记录的红河断裂带向海延伸及其演化过程 [J]. *中国科学: 地球科学*, 52(1): 81–97.
- Lei C, Ren J Y, Pei J X, *et al.*, 2022. Tectonics of the offshore Red River Fault recorded in the junction of the Yinggehai and Qiongdongnan Basins [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 52(1): 81–97. (in Chinese)
- 刘志杰, 卢振权, 张伟, 等, 2015. 莺歌海盆地中央泥底辟带东方便与乐东区中深层成藏地质条件 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 35(4): 49–61.
- Liu Z J, Lu Z Q, Zhang W, *et al.*, 2015. Assessment of accumulation conditions for medium-deep oil in Ledong area of the central diapir belt, Yinggehai Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(4): 49–61. (in Chinese)
- 李弛, 2021. CO₂ 流体活动影响下的砂岩储层成岩演化过程及孔隙发育机制 [D]. 西安: 西北大学档案馆.
- Li C, 2021. Impact of CO₂ Fluid Activities on Mechanism of Diagenetic Evolution and Porosity Development [D]. Xi'an: The Archive of Northwest University. (in Chinese)
- 庞忠和, 罗霖, 龚宇烈, 2017. 国内外地热产业发展现状与展望 [J]. *中国核工业*, (12): 47–50.
- Pang Z H, Luo J, Gong Y L, 2017. Development status and prospect of geothermal industry at home and abroad [J]. *China Nuclear Industry*, (12): 47–50. (in Chinese)
- 宋仁亮, 2021. 基于大地热流的庐庐断裂带(安徽段)构造控热探讨 [J]. *上海国土资源*, 42(4): 61–67.
- Song R L, 2021. Discussion on tectonic control heat of the Tan-Lu fault zone (Anhui Section) based on terrestrial heat flow [J]. *Shanghai Land & Resources*, 42(4): 61–67. (in Chinese)
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据 [J]. *热带海洋学报*, (2): 1–9.
- Sun Z, Zhong Z H, Zhou D, *et al.*, 2003. Deformation mechanism of Red River Fault zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin Formation [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, (2): 1–9. (in Chinese)
- 邵维晔, 王云, 李其林, 等, 2022. 红河断裂带温泉水文地球化学及构造活动特征研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 41(3): 612–624.
- Shao W H, Wang Y, Li Q L, *et al.*, 2022. A study on hydrogeochemistry and tectonic activity features of hot springs in the Red River Fault Zone [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(3): 612–624. (in Chinese)
- 童传新, 王振峰, 李绪深, 2012. 莺歌海盆地东方 1-1 气田成藏条件及其启示 [J]. *天然气工业*, 32(8): 11–15+26.
- Tong C X, Wang Z F, Li X S, 2012. Pooling conditions of gas reservoirs in the Dongfang 1-1 Gas Field, Yinggehai Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 32(8): 11–15+26. (in Chinese)
- 汪集暘, 庞中和, 胡圣标, 等, 2015. 地热学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社.
- Wang J X, Pang Z H, Hu S B, *et al.*, 2015. *Geothermics and Its Applications* [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 万玲, 姚伯初, 吴能友, 2000. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义 [J]. *南海地质研究*, (12): 22–32.
- Wan L, Yao B C, Wu N Y, 2000. The extending of Honghe faults in the South China Sea and its tectonic [J]. *Geological Research of South China Sea*, (12): 22–32. (in Chinese)
- 王清华, 杨海军, 李勇, 等, 2022. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式 [J]. *地学前缘*, 29(6): 239–251. (in Chinese)
- Wang Q H, Yang H J, Li Y, *et al.*, 2022. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin—A reservoir model [J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 239–251. (in Chinese)
- 伍小雄, 2011. 辽河盆地地热资源定量评价 [D]. 大庆: 东北石油大学档案馆.
- Wu X X, 2011. Quantitative Assessment of Geothermal Resource in Liaohe Basin [D]. Daqing: The Archive of Northeast Petroleum University. (in Chinese)
- 王子轶, 2020. 塔里木盆地顺北五号走滑断裂带南段构造特征及其控储模式 [D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Wang Z Y, 2020. Structural and Reservoir Characterization of the South Part of the Shunbei No. 5 Strike-slip Fault Zone, Tarim Basin [D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 谢玉洪, 张迎朝, 徐新德, 等, 2014. 莺歌海盆地高温超压大型优质气田天然气成因与成藏模式——以东方 13-2 优质整装大气田为例 [J]. *中国海上油气*, 26(2): 1–5+34.
- Xie Y H, Zhang Y Z, Xu X D, *et al.*, 2014. Natural gas origin and accumulation model in major and excellent

- gas fields with high temperature and overpressure in Yinggehai basin; A case of DF13-2 gasfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 26(2): 1-5+34. (in Chinese)
- 谢玉洪, 李绪深, 童传新, 等, 2015. 莺歌海盆地中央底辟带高温高压天然气富集条件、分布规律和成藏模式[J]. *中国海上油气*, 27(4): 1-12.
- Xie Y H, Li X S, Tong C X, *et al.*, 2015. High temperature and high pressure gas enrichment condition, distribution law and accumulation model in central diapir zone of Yinggehai basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 27(4): 1-12. (in Chinese)
- 杨东辉, 童亨茂, 范彩伟, 等, 2019. 莺歌海盆地构造转折界面的确定及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 43(3): 590-602.
- Yang D H, Tong H M, Fan C W, *et al.*, 2019. Determination of the tectonic transformation surface in Yinggehai Basin and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 590-602. (in Chinese)
- 殷秀兰, 李思田, 杨计海, 等, 2002. 琼西莺歌海盆地断裂系统的成因机制[J]. *地质通报*, 21(10): 653-657.
- Yin X L, Li S T, Yang J H, *et al.*, 2002. Genetic mechanism of the fault system in the Yinggehai basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 653-657. (in Chinese)
- 尤龙, 王璞珺, 吴景富, 等, 2014. 莺歌海盆地前新生代基底特征[J]. *世界地质*, 33(3): 511-523.
- You L, Wang P J, Wu J F, *et al.*, 2014. Basement characteristics of Yinggehai Basin in pre-Cenozoic[J]. *Global Geology*, 33(3): 511-523. (in Chinese)
- 张功成, 贾庆军, 王万银, 等, 2018. 南海构造格局及其演化[J]. *地球物理学报*, 61(10): 4194-4215.
- Zhang G C, Jia Q J, Wang W Y, *et al.*, 2018. On tectonic framework and evolution of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 4194-4215. (in Chinese)
- 张启明, 胡忠良, 1992. 莺—琼盆地高温高压环境及油气运移机制[J]. *中国海上油气(地质)*, 6(1): 1-9.
- Zhang Q M, Hu Z L, 1992. Hot, geopressured Yinggehai-Qiongdongnan Basin, its hydrocarbon migration[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 6(1): 1-9. (in Chinese)
- 赵凡, 贾承造, 袁剑英, 等, 2012. 柴达木盆地西部走滑相关断裂特征及其控藏作用[J]. *地质论评*, 58(4): 660-670.
- Zhao F, Jia C Z, Yuan J Y, *et al.*, 2012. Characterization of strike-slip related fractures in the western Qaidam Basin and their role in controlling reservoirs[J]. *Geological Review*, 58(4): 660-670. (in Chinese)
- 张英, 冯建赞, 何治亮, 等, 2017. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. *地学前缘*, 24(3): 190-198.
- Zhang Y, Feng J B, He Z L, *et al.*, 2017. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 190-198. (in Chinese)
- 张健, 宋海斌, 2001. 南海北部大陆架盆地热结构[J]. *地质力学学报*, 7(3): 238-244.
- Zhang J, Song H B, 2001. Thermal structure of the northern shelf basin of the South China Sea[J]. *Journal of Geomechanics*, 7(3): 238-244. (in Chinese)
- Dong B, Dong S Y, Wang Y C, *et al.*, 2022. Detecting geothermal resources in a plateau area: Constraints from land surface temperature characteristics using Landsat 8 data[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 785900.
- Hu J, Tian Y T, Li Z W, *et al.*, 2022. GeothermoTool: An open-source software for basic geothermal calculations and plots[J]. *Geothermics*, 106: 102551.
- Ji-Hyun K, Lydia B, Chandler N, *et al.*, 2022. Hydrogeochemical evolution of formation waters responsible for sandstone bleaching and ore mineralization in the Paradox Basin, Colorado Plateau, USA[J]. *GSA Bulletin*, 134(9-10): 2589-2610.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.*, 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 251: 3-84.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo P, 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 115-157.
- Wang Y C, Gu H Y, Li D, *et al.*, 2021. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of geothermal fluid in the Zhaxikang geothermal field in Cuona County, southern Tibet[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80(11): 1-19.
- Wang Y C, Li L, Wen H G, *et al.*, 2022. Geochemical evidence for the nonexistence of supercritical geothermal fluids at the Yangbajing geothermal field, southern Tibet[J]. *Journal of Hydrology*, 604: 127243.
- Wang Y C, Pang Z H, 2023. Heat flux in volcanic and geothermal areas: Methods, principles, applications and future directions[J]. *Gondwana Research*, 122: 260-278.

(责任编辑:魏 巍)