

广东惠州黄沙洞地区岩石圈热-流变结构及其热源启示

甘浩男, 简文静, 王贵玲, 闫晓雪, 岳高凡, 翁 炜, 张德龙

Lithospheric thermo-rheological structure of the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong and its heat-sources implications

GAN Haonan, LIN Wenjing, WANG Guiling, YAN Xiaoxue, YUE Gaofan, WENG Wei, and ZHANG Delong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

谭现锋, 王景广, 赵长亮, 王稳石, 翁炜, 段隆臣 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 195-202

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199

井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究

Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks

亓兆伟, 闫方平, 傅大庆, 邱建强 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 198-208

热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟

Simulation study on the effect of thermal barrier well on the heat transfer of groundwater heat pump

肖锐, 黄坚, 王小清 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 190-198

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302054

甘浩男, 蔺文静, 王贵玲, 等. 广东惠州黄沙洞地区岩石圈热-流变结构及其热源启示 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 26-38.

GAN Haonan, LIN Wenjing, WANG Guiling, *et al.* Lithospheric thermo-rheological structure of the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong and its heat-sources implications[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 26-38.

广东惠州黄沙洞地区岩石圈热-流变结构及其热源启示

甘浩男^{1,2}, 蔺文静^{1,2}, 王贵玲^{1,2}, 闫晓雪^{1,2}, 岳高凡^{1,2}, 翁 炜^{2,3}, 张德龙^{2,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质调查局北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 岩石圈热-流变结构研究是揭示岩石圈范围内热状态的有效手段, 开展地热异常区的岩石圈热-流变结构研究可以对热源贡献进行有效约束。东南沿海地区是我国地热资源重要分布区, 地表出露大量天然温泉, 地热钻探揭露深部具有较高的地温梯度, 然而关于其热源机制尚未有定论, 且深部是否赋存干热岩资源亦不清楚。以广东惠州黄沙洞地热田为研究对象, 分析岩石圈尺度温度分布和流变强度, 探讨黄沙洞地热田的热源构成, 分析浅部水热系统的热影响, 并对干热岩资源前景进行分析。结果表明: (1) 黄沙洞地热田水热活动影响下地表热通量为 130.3 mW/m², 地壳热流与地幔热流值相近, 表现为温壳温幔型岩石圈热结构, 此外, 构造活动相关热流达到了 30.5 ~ 60.3 mW/m²; (2) 岩石圈流变结构显示中地壳存在韧性流变层, 上地壳与下地壳以脆性破裂为主, 下地壳与地幔表现出流变结构耦合, 为相对稳固的地壳底界; (3) 黄沙洞地热田的热源以地壳构造活动产生的热源为主, 地幔热源和放射性生热是主要的热源组成部分, 构造热作用的主要方式包括区域深断裂的热聚敛和水热系统循环换热, 两者可能通过“接力式”热传递携带热量至浅表; (4) 区域深断裂的热聚敛在构造热作用中的占比是影响干热岩资源前景的关键因素。本研究可为后续东南沿海同类型地区的干热岩资源勘查与靶区选址提供参考。

关键词: 热-流变结构; 热源; 黄沙洞; 干热岩; 大地热流

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0026-13

Lithospheric thermo-rheological structure of the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong and its heat-sources implications

GAN Haonan^{1,2}, LIN Wenjing^{1,2}, WANG Guiling^{1,2}, YAN Xiaoxue^{1,2}, YUE Gaofan^{1,2},
WENG Wei^{2,3}, ZHANG Delong^{2,3}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 3. *Beijing Institute of Exploration Engineering, China Geological Survey, Beijing 100083, China*)

Abstract: The thermo-rheological structure of the lithosphere is an effective method to reveal the thermal state

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-05-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1507401)

第一作者: 甘浩男(1988-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事岩石圈热-流变结构研究工作。E-mail: ganhaonan@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 王贵玲(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地热资源赋存理论及勘查开发研究工作。E-mail: wanguiling@mail.cgs.gov.cn

within the lithosphere. Studies of the thermo-rheological structure of the lithosphere in geothermal anomaly areas can effectively constrain the contribution of heat sources. The southeastern China is an important distribution region for geothermal resources, with a large number of natural hot springs emerging on the land surface. Boreholes in this region have identified high geothermal gradients at depth. However, the mechanism of the heat sources is still controversial, and whether the hot dry rock resources exists is not clear. In this study, we take the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong as the research target. We analyze the temperature distribution and rheological strength of the lithosphere, discuss the heat sources of the Huangshadong geothermal field, examine the thermal influence of shallow hydrothermal systems, and predict the prospects of dry hot rock resources. The results show that the heat flux under the influence of hydrothermal systems in the Huangshadong geothermal field is 130.3 mW/m^2 , and the crustal heat flow is similar to the mantle heat flow, showing a warm-crust-warm-mantle lithospheric thermal structure. In addition, the structural heat flux reaches $30.5\text{--}60.3 \text{ mW/m}^2$. The rheological structure of the lithosphere shows that the middle crust has a ductile rheological layer, the upper crust and the lower crust are mainly controlled by brittle failure, and the lower crust and the lithosphere mantle show coupling in the rheological structure, which indicates a relatively stable crustal bottom boundary. The heat sources of the Huangshadong geothermal field is dominated by the tectonic heat source, and the mantle heat source and radiogenic heat production are the main heat source components. The main parts of tectonic heat source include the heat accumulation in regional deep faults and cyclic heat transfer in hydrothermal systems, both of which may carry heat to the surface through “relay” heat transfer. The proportion of heat accumulation of regional deep faults in the tectonic heat source is the key factor affecting the prospects of dry hot rock resources.

Keywords: thermal-rheological structure; heat source; Huangshadong; hot dry rock; heat flow

大陆岩石圈的强度受其热-流变结构控制, 而热-流变结构是研究造山带隆升、大陆边缘汇聚等地球动力学演化的重要参考依据^[1-3], 同时也是了解表层地热异常的热源构成的有效途径。研究岩石圈热结构的主要手段是利用一维稳态热传导方程计算不同深度的温度和热流情况, 并得到岩石圈的热结构特征^[4-8]。利用岩石圈流变结构可以分析壳内低速体所在深度的脆韧性特征, 判断其流变强度条件。随着深度增加与温度升高, 中、下地壳逐渐演变为以位错蠕变的韧性流动为主^[9-12]。

我国东南沿海位于亚洲大陆东部边缘南段, 是太平洋地区构造-岩浆带的重要组成部分。地热、地震、火山以及断裂的分布, 都严格受控于大地构造特征^[13-14]。东南沿海是我国典型地热异常区, 也是中低温地热资源的重要分布地区^[15-16], 出露有近 500 处天然温泉^[17], 整体的热储温度大致为 $100\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$, 少量地热田(如漳州、惠州)热储温度可以达到 $140\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$ ^[18-19]。广东省已发现超过 300 处天然热泉, 大部分都分布在区域性断裂及隐伏花岗岩体附近^[20], 预计可开采量高达 $23.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[21]。学者曾报道东南沿海地区在浅层水热活动影响下, 地温梯度可达到 $40\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, 在中高温热田中(如漳州、福州)可达到 70--

$85\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[15, 22]。然而, 在不受水热活动影响的地区, 如漳州盆地内钻孔揭露的热传导地温梯度仅为 $18.4\text{--}21.8\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[23-25], 与水热活动影响区的地温梯度具有显著差异。

广东惠州黄沙洞地热田是东南沿海的典型地热异常区, 天然温泉的水温在 $56.0\text{--}63.7\text{ }^\circ\text{C}$ ^[22]。其中深度为 591.5 m 的 ZK8 钻孔钻获了井口 $98.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、井底 $118.2\text{ }^\circ\text{C}$ 的中高温热水^[20]。黄沙洞 HSD-ZK001 钻孔揭示在孔底 820 m 处温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$, 地温梯度达到 $88.3\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[26]。黄沙洞惠热 1 井施工深度为 $3\ 009 \text{ m}$, 根据钻井测温曲线, 井底最高温度达到 $127.5\text{ }^\circ\text{C}$ ^[18]。然而黄沙洞地热田的浅部水热资源的热源仍不明确, 且深部是否赋存干热岩资源亦不清楚。Xi 等^[27]通过重力方法研究认为广东地区的热成因主要来自于伸展作用引起的软流圈上涌。岩石学和气体同位素研究认为岩石圈伸展可以引起新生代玄武质岩浆侵位, 地幔上涌叠加了高放射性花岗岩生热, 可能是区域主要的热源^[28-30]。祝小辉^[31]则认为岩浆余热和放射性生热是地热田主要热源, 断裂活动摩擦生热是次要热源。范艳霞等^[26]认为中新生代以来构造作用形成的深部结构可能是深层地热形成的主要因素。前人学者对惠州地区干热岩的资源潜力普遍看好^[18, 22, 32-33], 但并未

实际探获干热岩资源。

因此,本文以广东惠州黄沙洞地热田为研究对象,依托地热科学钻探惠热 1 井获取的地温曲线和岩心矿物学及热物性数据,通过岩石圈热-流变结构定量研究深部岩石圈结构的温度和流变强度,探讨黄沙洞地热田的热源来源,分析了水热系统的热影响,并对区域干热岩资源前景进行分析。

1 地质背景

惠州黄沙洞地热田大地构造位置属于华夏板块南部,北侧为江南造山带,东侧为太平洋构造域(图 1)。新元古代以来经历了复杂的多期次构造演化^[34-35]。晚中生代以来,经历了由特提斯构造域向太平洋构造域的转变,古太平洋俯冲造成了包括研究区在内

的整个华南地区发生广泛的岩浆-构造活动^[13, 36-37]。黄沙洞地热田处于 NE 向河源断裂带和莲花山断裂带之间。莲花山断裂带为地壳尺度的、近 NE 向的板内线性断裂,控制了侏罗~白垩纪时期的局部变形及岩浆作用^[37]。河源深断裂带是邵武—河源断裂的一部分,也是新生代河源盆地与中生代地层的天然分界^[38]。

黄沙洞地热田主要出露于前寒武系地层中,包括震旦系上统乐昌峡群老虎塘组(Z_2lh)、寒武系下统八村群牛角河组(C_1n)。岩浆岩主要位于黄沙洞地热田西北侧,为大点顶单元(J_1D)侵入体,呈岩株状产出,面积约 28.83 km²^[28]。惠热 1 井钻探位于黄沙洞地热田,钻孔揭露地层 1 550 m 以浅为前寒武系沉积盖层,1 550~3 009 m 为隐伏花岗岩体。

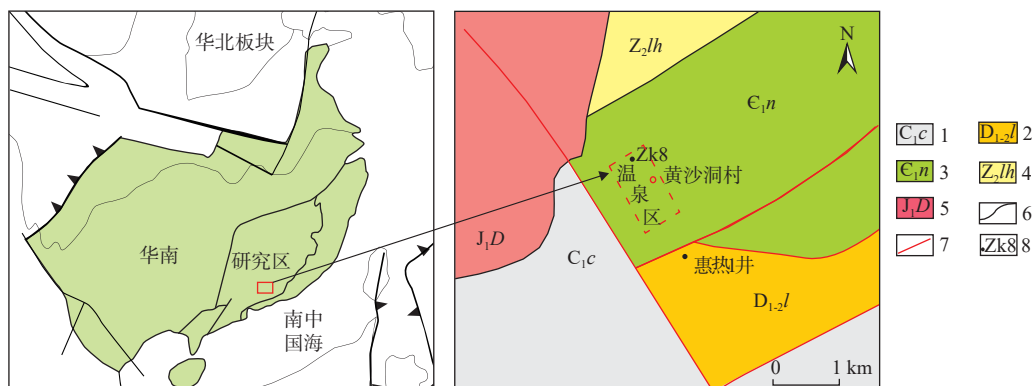


图 1 黄沙洞地热田地质构造简图(大地构造位置简图修改自文献 [39])

Fig. 1 Simplified geological map of the study area (Simplified tectonic map of South China is modified after Ref. [39])

1—石炭系下统测水组石英砂岩、粉砂岩;2—泥盆系中~下统老虎头组石英质砾岩、含砾砂岩、粉砂岩;3—寒武系下统牛角河组变余结构砂岩与板岩、碳质板岩;4—震旦系上统老虎塘组变质粉砂岩、砂岩、千枚状页岩;5—早侏罗世大点顶单元细粒黑云母二长花岗岩;6—整合岩层界线;7—断层;8—地热井

2 数据及研究方法

2.1 数据来源

本文获取了惠州及周边区域不同岩性的放射性生热率数据作为背景值(表 1)。同时收集了惠州黄沙洞地区惠热 1 井测温曲线,以及不同深度岩心热导率、密度、放射性生热率等数据,用于同区域背景值进行对比分析(表 2)。获取了惠热 1 井岩心及周边地层的矿物组成,用于分析矿物组成与岩石放射性生热率之间的联系(表 3)。热导率、放射性元素及矿物组成相关数据的测试方法详见文献 [28]。

岩石放射性生热率由实测的岩石中 U、Th、K 等 3 种放射性元素含量计算获得:

$$A = 10^2 \rho (9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K) \quad (1)$$

式中: A ——岩石生热率/($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$);

C_U 、 C_{Th} ——岩石中 U、Th 的质量分数/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$);

C_K ——K 的质量分数/%;

ρ ——岩石密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

2.2 岩石圈热结构分析方法

大陆热流数据主要基于钻井测温数据和岩石热导率测量结果获得,已知钻井的地温梯度和相应井段的岩石热导率,就可计算得到大地热流^[40]。计算公式如下:

$$q = -k \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

式中: k ——岩石热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);

dT/dz ——地温梯度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)。

从热源构成上来看,地表热通量 q_a 可表述为:

$$q_a = q_c + q_m + q_t \quad (3)$$

式中: q_c ——地壳总热流/($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$);

表 1 惠州及周边区域不同岩性放射性生热率统计表

Table 1 Radiogenic heat production of different rock types in Huizhou and surrounding area

编号	岩性	C_K /%	C_{Th} /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	C_U /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	A /($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
CHA026D		1.97	28.00	4.95	2.49	3.13
CHA036D		3.22	13.80	3.01	2.43	1.83
CHA058D		6.08	24.40	5.34	2.26	3.04
CHA038D		0.22	1.27	0.47	2.44	0.21
CHA040D		5.58	19.45	3.56	2.48	2.56
CHB092D		4.34	18.90	3.09	2.53	2.35
CHB156D		5.64	22.10	4.14	2.24	2.59
CHA044D		2.41	28.60	1.39	2.47	2.34
CHB107D	砂岩	1.60	7.91	2.24	2.41	1.14
CHB114D		4.57	17.70	4.68	2.05	2.17
CHA049D		3.27	33.80	3.19	2.48	3.18
CHB185D		1.28	11.45	2.13	2.55	1.38
HZB05D*		2.92	10.80	2.14	2.39	1.39
HZB056D*		2.75	19.90	4.15	2.48	2.48
HZB065D*		4.58	25.60	3.83	2.21	2.61
HZB072D*		3.69	16.25	4.90	2.20	2.22
HZB093D*		1.05	10.80	1.85	2.29	1.12
CHB098D		3.00	10.15	3.56	2.53	1.78
CHB196D		4.74	29.60	5.71	2.67	3.92
CHA006D		5.43	31.80	6.60	2.66	4.34
CHB110D		4.23	68.30	22.70	2.62	10.63
CHB164D		4.60	55.60	24.10	2.59	10.04
CHB127D		5.42	35.60	7.33	2.45	4.40
CHB068D		4.13	16.05	3.22	2.58	2.22
CHB130D		6.75	39.70	11.35	2.58	6.02
CHB176D		5.35	46.30	9.09	2.58	5.77
CHA047D		3.87	19.45	5.79	2.37	2.81
CHB126D		5.91	33.30	5.53	2.54	4.02
CHB063D		4.72	46.50	21.40	2.57	8.72
CHB048D		4.81	41.20	11.55	2.54	5.90
CHB060D		5.70	14.70	2.89	2.68	2.28
CHB049D	花岗岩类	4.37	25.00	29.30	2.61	9.35
CHB029D		5.43	37.70	14.90	2.62	6.74
CHB102D		5.19	67.50	15.30	2.47	8.31
CHB171D		4.90	55.40	11.90	2.66	7.24
CHB100D		4.41	81.70	20.90	2.60	11.01
CHA018D		4.60	31.30	11.35	2.54	5.19
CHB101D		4.70	61.20	17.05	2.62	8.79
CHB088D		5.11	41.90	7.20	2.46	4.76
CHB193D		5.28	49.60	8.42	2.68	6.04
CHA004D		3.89	20.10	4.29	2.67	2.83
CHB037D		6.06	25.30	4.59	2.59	3.36
HZB032D*		4.58	30.90	16.35	2.32	5.82
HZB036D*		3.30	31.40	7.81	2.24	3.72
HZB075D*		0.30	51.10	13.80	2.24	5.90
HZB086D*		4.62	37.00	14.25	2.34	5.77
HZB098D*		3.89	28.90	6.83	2.15	3.28
HZB017D*		5.15	20.00	3.78	2.36	2.48
HZB023D*	页岩	2.06	15.35	1.39	2.40	1.43
HZB043D-1*		2.80	16.25	3.32	1.93	1.60
HZB043D-2*		3.59	20.80	4.83	2.15	2.40

注: *样品数据来自同晓雪^[28]。表 2 惠热 1 井钻孔岩心热物性参数统计特征值^[28]

Table 2 Thermal properties of cores from HR1 in the Huangshadong geothermal field

编号	深度/m	岩性	测量热导率 /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	校正热导率 /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	生热率 /($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
HR-1	273	砂岩	3.53	3.45	1.79
HR-2	276	砂岩	6.157	5.99	3.21
HR-3	427	砂岩	7.294	6.97	2.09
HR-4	655	砂岩	2.778	2.69	2.71
HR-5	968	砂岩	2.778	2.64	1.29
HR-6	1 262	砂岩	5.197	4.58	2.09
HR-7	1 568	花岗岩类	1.697	1.64	4.39
HR-8	1832	花岗岩类	6.778	5.73	6.69
HR-9	2005	花岗岩类	4.361	3.72	4.52
HR-10	2 383	花岗岩类	1.937	1.93	7.31
HR-11	2 704	花岗岩类	5.311	5.30	7.46
HR-12	3 005	花岗岩类			5.87

表 3 惠热 1 井及周边岩石中各矿物组成质量占比

Table 3 Mineral composition of different rock types in HR1 and the surrounding area

编号	质量分数/%					
	钾长石	钠长石	石英	方解石	云母	黏土矿物
HR-1*				2	47	51
HR-2*	2	2	5	1	51	39
HR-3*		7	62		22	9
HR-4*		14	19		37	30
HR-5*			26			44
HR-6*			49		19	32
HR-7*	64	13	2		20	1
HR-8*	54	34	8			4
HR-9*			8	5		46
HR-10*	34	41	20			5
HR-11*	39	42	15			4
HR-12*	38	35	24			3
CHA004D	13.5	32.6	47.4			6.5
CHA006D	17.8	22.9	45.7			13.6
CHB028D			100			
CHB037D	21.7	27.3	51			
CHB045D			100			
CHB088D	16.2	18.9	64.9			
CHB102D	24.7	26.7	48.5			
CHB126D	20.3	18.8	52.1			8.8
CHB164D	16.3	33.1	50.6			
CHB176D	16.5	31.6	38.9			13
CHB193D	19.6	26.5	44.5			9.4

注: *样品数据来自同晓雪^[28]; 表中空白表示无此项或未测, 其余表中空白同此解释。 q_m ——地幔热流/($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$); q_t ——构造活动相关热流/($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)。大地热流 $q = q_c + q_m$, 属于地表热通量的一部分。

获取地表热通量后, 根据地球物理获取的研究区的分

层岩石圈模型,采用类似“回剥”法逐层计算由各层放射性元素生热产生的热流 q_r ,相加得到地壳总的热流贡献 $q_c = \sum q_r$ 。地幔热流 $q_m = q - q_c - q_r$,在构造稳定区 q_r 为 0, q_m 与 q_c 共同构成地表热通量;在构造活动区 q_r 大于 0,地表热通量则大于相应的构造稳定区,最终即可获得研究区的岩石圈热结构模型,这也是热源来源的计算基础。

假设深部岩层的热导率与生热率均为常数,且岩石圈内部热是以热传导方式向外传递,则一维稳态热传导方程可表示为^[41]:

$$T_z = T_0 + qH/k - AH^2/2k \quad (4)$$

式中: T_z ——深度 Z 处的温度/ $^{\circ}\text{C}$;

H ——计算层段的厚度/km;

T_0 、 q ——计算层段顶面的温度/ $^{\circ}\text{C}$ 和热流值/ $(\text{mW}\cdot\text{m}^{-2})$,地表温度可取研究区年平均气温;

A 、 k 意义同前。

2.3 岩石圈流变结构分析方法

岩石圈的分层结构流变强度根据脆性变形所需差应力(σ_b)与韧性变形所需差应力(σ_d)的大小确定。脆性变形采用脆性破裂准则计算^[42]:

$$\sigma_b = (\sigma_1 - \sigma_3) \geq \alpha \rho g z (1 - \lambda) \quad (5)$$

式中: α ——断层类型相关参数,取值 0.75^[43];

λ ——孔隙流体因子,取值 0.37^[43];

ρ ——平均密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$;

g ——重力加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 。

韧性变形采用幂律流变定律^[42]:

$$\sigma_d = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A_m} \right)^{\frac{1}{n}} \exp(E/nRT) \quad (6)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ ——应变速率/ s^{-1} ;

A_m 、 n ——物质相关常数;

E ——活化能/ $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$;

R ——普适气体常数,取值 8.314 J/(mol·K);

T ——温度/K,由岩石圈热结构获得的温度场确定。

取各深度上的脆性与韧性差应力最小值作为流变结构强度,即 $\sigma_z = \min(\sigma_b, \sigma_d)$ ^[42]。通过计算不同深度流变结构强度,即可建立岩石圈流变结构模型。

3 结果

3.1 地表热通量

根据式(2)计算获得惠热 1 井所在黄沙洞地热田的地表热通量,计算时样品热导率利用热导率与温度

的相关关系方程进行了温度校正^[44]。计算得到黄沙洞地热田的地表热通量为 130.3 mW/m^2 ,较前人计算的热流值(105 ~ 115.5 mW/m^2)^[28, 45-46]偏高。黄沙洞地热田周边稳定区域的大地热流值为 70 mW/m^2 ^[45],可以认为该值代表了不受构造和水热循环影响的区域热流背景值。

3.2 岩石放射性生热率

惠热 1 井的花岗岩类放射性生热率高达 4.39 ~ 7.46 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,在世界同类型岩石中生热率亦属较高值^[45, 47]。同类岩性条件下,深度对生热率的影响无明显规律。惠热 1 井岩心中的 U、Th 和 K 元素含量三元分布基本落入区域同类岩石的分布范围中(图 2)。其中惠热 1 井盖层砂岩放射性元素含量接近区域平均值,而惠热 1 井花岗岩类放射性元素相对更富集 U 元素,而贫 Th 元素。

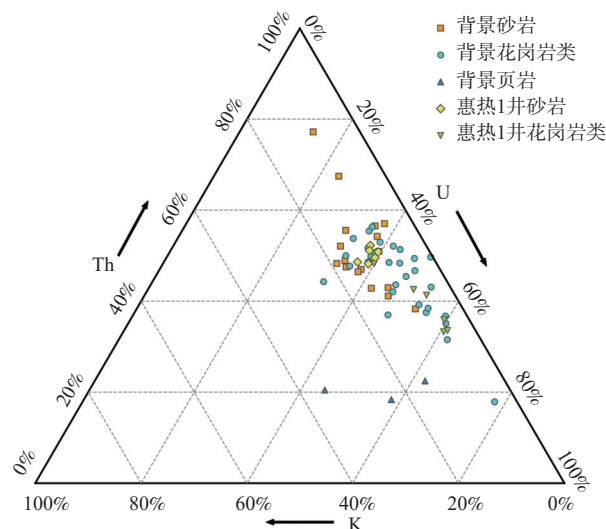


图 2 惠热 1 井及周边岩石生热率三元图

Fig. 2 Ternary scatter plot of radiogenic heat production of the core samples of HR1, showing the relative proportions of U, Th, and K in the total radiogenic heat production

为探究主要造岩矿物与岩石放射性生热率的相关性,绘制了惠热 1 井岩心放射性生热率与石英、长石及深度的相关性图解(图 3)。受岩性控制,散点图基本都呈现出两个显著的分区。其中生热率表现出随石英含量增大而减小,且随长石类含量增大而增大的趋势。这与前人证实的产热量与二氧化硅富集的相关性相似^[48]。

3.3 岩石圈热结构

横穿黄沙洞地热田的地震波速剖面结果显示,从化—惠州—港口剖面莫霍面深度为 33 ~ 30 km^[49-50],本文参考 Xiao 等^[46]设定莫霍面深度为 32 km。上地

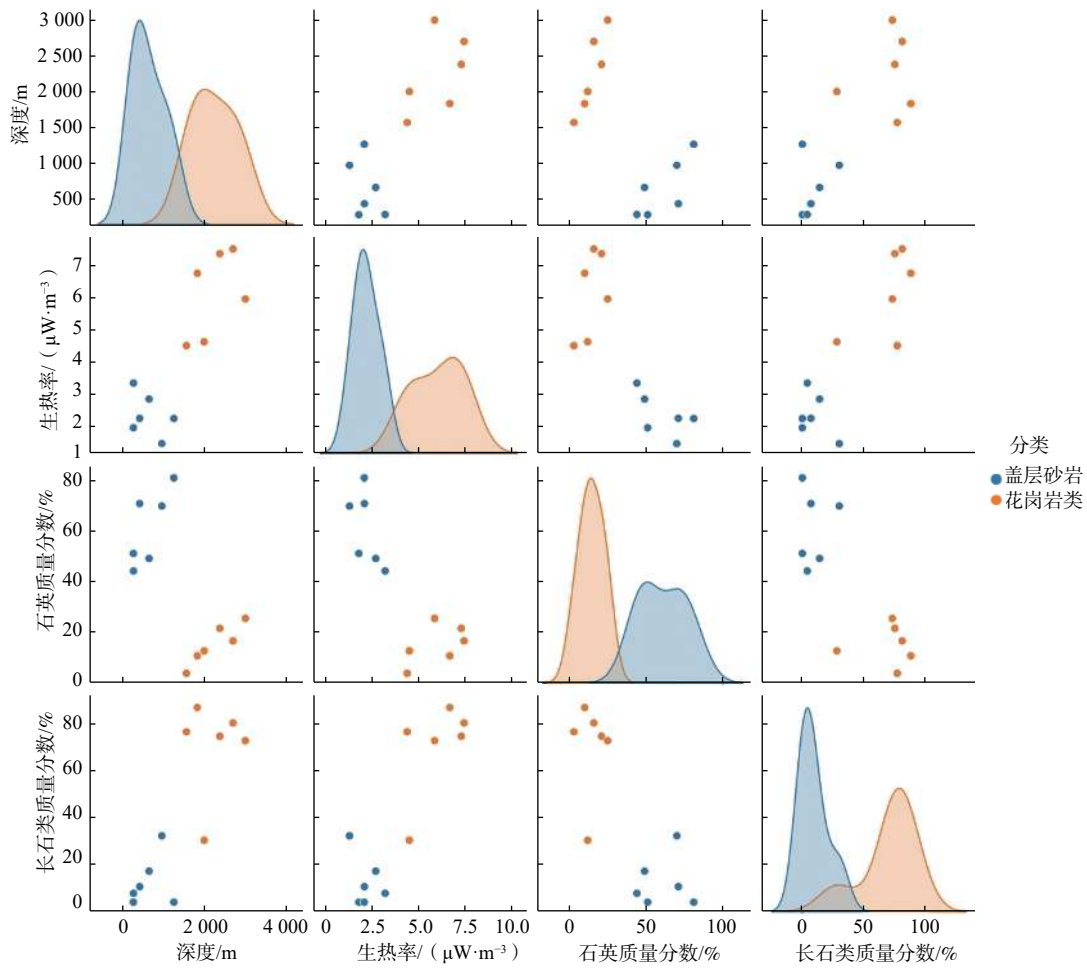


图 3 惠热 1 井主要造岩矿物与放射性生热率关系

Fig. 3 Radiogenic heat production verses main minerals of HR1

壳深度为 0~10 km, 结合惠热 1 井钻探揭露地层情况推测, 0~1.5 km 为前寒武系地层, >1.5~10 km 为花岗岩类岩石; 中地壳为 >10~20 km, 由闪长岩组成; 下地壳对应深度 >20~32 km, 平均成分相当于辉长岩^[46]; 岩石圈地幔设定为二辉橄榄岩。本文建立的热结构模型中使用的参数参见表 4。

表 4 黄沙洞地热田岩石圈分层结构及热物性

Table 4 Lithospheric layered structure and relative radiogenic heat production and thermal conductivity in Huangshadong geothermal field

地表热通量 / (mW·m ⁻²)	岩石圈分层/km	放射性生热率 / (μW·m ⁻³)	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
130.3(水热活动区)/ 70(稳定区)	上地壳 0~3	4.27	3.92
	>3~10	4.27exp(-z/D)	3.06
	中地壳 (>10~20)	0.80	2.70
	下地壳 (>20~32)	0.03	3.00
	岩石圈地幔 (>32)	0.03	3.40

按照黄沙洞地热田水热活动区和周边稳定区 2 种热通量条件, 通过式(4)计算得到黄沙洞地热田水热

活动区及周边稳定区的岩石圈热状态(图 4、表 4), 莫霍面温度分别为 1 143 °C 和 442.7 °C。本文计算水热

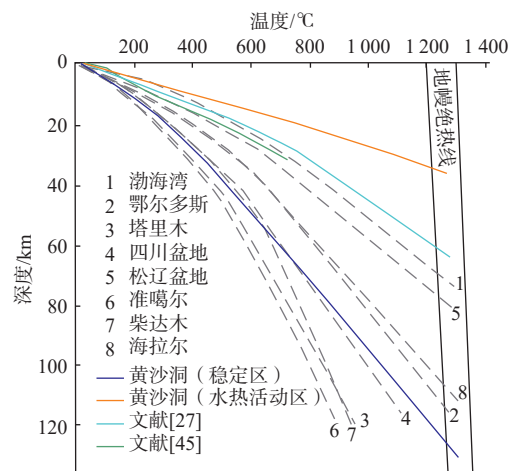


图 4 黄沙洞地热田岩石圈热结构

Fig. 4 Lithospheric thermal structure in Huangshadong geothermal field

注: 1—8 数据来自 Jiang 等^[50]。

活动区热状态时使用了惠热 1 井全井段的平均热导率和地温梯度,更为完整地包含了水热活动的影响。与我国典型盆地岩石圈热结构^[51]对比,黄沙洞地热田岩石圈热结构温度高于四川盆地、塔里木盆地等地区,其中稳定区热结构与四川盆地接近,水热活动区热结构地温场温度高于渤海湾盆地(图 4)。

考虑到水热活动区与周边稳定区在壳幔尺度构造背景相近,因此设定其具有相同的地壳热流和地幔热流值。放射性元素衰变产生的热能总和为 38.26 mW/m²,地幔热流为 31.74 mW/m²,区内壳、幔热流比为 1.2 : 1,表现出温幔温壳的特征,地壳热流略高于地幔热流。构造活动相关热流达到 35.0 ~ 60.3 mW/m²(表 5)。

3.4 岩石圈流变结构

温度场是计算研究岩石圈流变结构的基础^[11]。以稳定区岩石圈热结构为参考,基于黄沙洞地热田岩石圈分层岩石矿物特征,选取干石英和干二辉橄榄岩作为流变参数进行流变结构研究,结果如图 5 所示,选取的参数见表 6。

从壳幔结构来看,下地壳与相连的岩石圈地幔均以脆性破裂为主要流变形式,表现出壳幔的耦合流变作用。在地壳内部,中地壳(15 ~ 20 km)受干石英流变学控制,表现出韧性特征,也是壳内的弱强度层。岩石圈地幔上部(32 ~ 62 km)表现为脆性破裂为主,下部(62 km 以深)受干二辉橄榄岩流变学控制,过渡为韧性变形。整体来看,黄沙洞地热田地壳最大强度为 200 MPa,岩石圈地幔的最大强度为 964 MPa。需要指出的是,岩石圈地幔在干二辉橄榄岩流变学控制下

表 5 黄沙洞地热田岩石圈热结构及深部温度

Table 5 Lithospheric thermal structure and deep temperature in Huangshadong geothermal field

热结构	水热活动区热流值	稳定区热流值	
热流组成/(mW·m ⁻²)	地表热流	130.30	70.00
	地壳热流	38.26	38.26
	地幔热流	31.74	31.74
	构造热流	60.30	
	地壳热流/地幔热流	1.2	1.2
地壳深部温度/°C	地壳底界温度	1 091.4	442.7
	10 km 处温度	362.2	178.2
	20 km 处温度	722.3	314.9
	30 km 处温度	1 030.0	421.6

强度逐渐减弱,在 100 km 附近已减少至 5 MPa 以下,说明可能已达到岩石圈底界,但这一结果与计算获得的热岩石圈厚度(130 km)不一致,而与地震学岩石圈厚度相近^[54]。

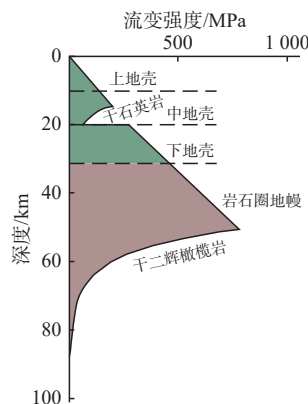


图 5 惠州黄沙洞地热田岩石圈热-流变强度曲线

Fig. 5 Thermal-rheological structure of the Huangshadong geothermal field

表 6 黄沙洞地热田岩石圈流变结构参数表

Table 6 parameters for the lithospheric rheological structures of the Huangshadong geothermal field

分层结构	岩性	选择岩性	活化能/(kJ·mol ⁻¹)	应力指数	物质相关常数/(MPa ⁻ⁿ ·s ⁻¹)	参考文献
上地壳	沉积地层和结晶基底	脆性破裂				[42]
中地壳	花岗质层	干石英	152	4	1.198×10 ⁻⁸	[52]
下地壳	辉长岩层	脆性破裂				[42]
岩石圈地幔	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩(干)	523	4	45.00	[53]

4 分析与讨论

4.1 热-流变结构可信性分析

对于地表热通量计算,本文使用了黄沙洞地区惠热 1 井的实测岩心热导率及地温测井曲线用于获取热导率和地温梯度值。岩心热导率通过校正,可代表岩心所在深度实际温压条件下的热导率值。通过惠

热 1 井测温曲线揭示的地温梯度,与岩石热导率的倒数进行线性拟合测试,结果也显示出一定的线性相关性,如图 6(a)所示,表明其为符合一维稳态傅里叶方程的计算公式。为验证测温曲线获取的地温与稳态条件下地层温度的差别,选择了 0 ~ 2 000 m 及 0 ~ 3 000 m 两次测温曲线约束的恒温带温度、中性点温度及井底温度推求近似稳态温度曲线^[55],如图 6(b)所示,

结果显示 4 个点连线的趋势线拟合度达到了 0.924 2, 估算的稳态地温梯度为 31.05 °C/km, 取矫正后的岩石热导率平均值为 4.06 W/(m·K), 估算地表热通量为 126.06 mW/m², 与本文估算的结果基本一致。热导率、地温梯度参数的取值及计算结果说明了热通量计算结果的可信。古气候和地形对钻孔地温的影响, 参考德国 KTB-VB 钻孔中的温度记录, 更新世地表温度变化在钻孔底部约为 1.3 K^[56]。本文参考该影响值换算为地表热通量则造成的影响为 1.82 mW/m²。

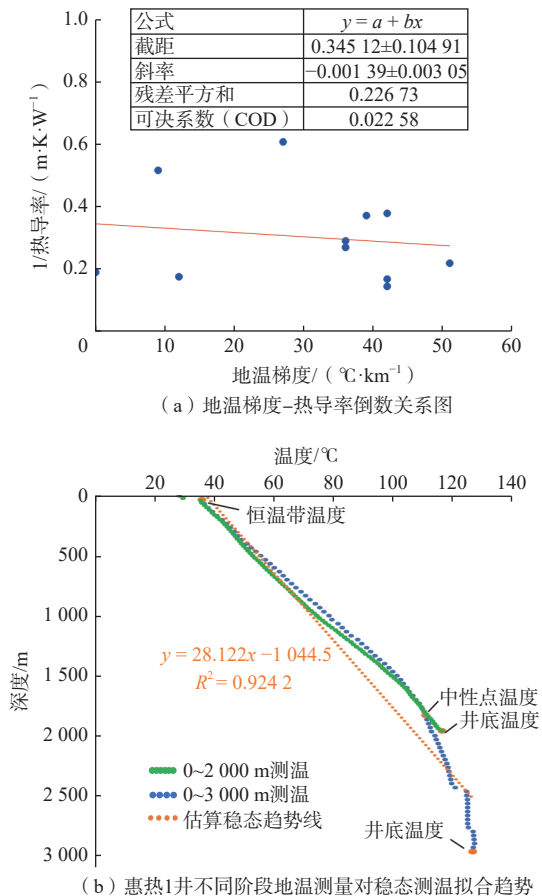


图 6 惠州黄沙洞地热田近似稳态温度推测曲线

Fig. 6 Approximate steady-state temperature estimation curve of the Huangshadong geothermal field

由于黄沙洞地热田所在区域新生代以来未出现广泛的岩浆-构造活动^[36-37], 笔者赞同前人关于随时间变化的热状态也可以用稳态地热来描述的观点^[57-58]。岩石圈作为对流地幔的导热上边界层, 因为垂直热梯度比水平梯度大得多, 一维热传导对于仅考虑垂直热传导的传热方程具有较好的近似^[58]。但需要注意, 通过水热循环和构造活动影响下获取的地表热通量包括了地壳总热流、地幔热流和构造活动相关热流三部

分, 以此计算的岩石圈热状态代表了区域地温场在构造活动条件下能达到的垂向温度上限, 而远离水热活动的稳定区可能代表了区域地温场在构造活动影响最小条件下的垂向温度下限。

文中使用的岩石圈分层结构参考了前人学者对研究区域地热及地球物理观测结果, 选取的分层热物性参数中, 0~3 km 采用惠热 1 井实测结果, 4 km 以深采用经验公式与经验值进行赋值^[5, 46, 59-60]。流变结构选取的分层流变参数主要参考了黄沙洞地热田岩石圈分层岩石矿物, 使用前人学者已取得的典型岩石矿物流变参数进行计算^[42, 52-53]。

对比分层岩石矿物干、湿状态下流变学强度随深度变化关系, 在使用湿石英矿物流变参数条件下^[61], 韧性流变的主要作用深度为 20~40 km, 而前人研究认为 20~40 km 的下地壳与岩石圈地幔主要岩石组成以辉长岩和二辉橄榄岩为主^[46], 与采用石英作为矿物流变参数相悖, 此外, 湿石英矿物流变参数条件下, 中上地壳以脆性破裂为主, 下地壳表现为韧性破裂但差应力最小值仍达到 47 MPa 以上, 这与估算的构造活动相关热流达到 35~60.3 mW/m² 构造背景存在矛盾。因此, 选择与深度相匹配的最优流变强度对应的参数值, 获取了中地壳以干石英、岩石圈地幔以干二辉橄榄岩为分层岩石特征, 与此同时, 上地壳和下地壳以脆性破裂为主导。

4.2 地热异常区的热源

地热异常区的热源通常包括壳内放射性生热, 以壳源热源表征; 地幔来热以幔源热源表征; 壳内构造活动及水热循环构造活动来热, 以地壳构造活动产生的热源表征。岩石圈热结构显示黄沙洞地热田的壳源热流是 38.26 mW/m², 幔源热流为 31.74 mW/m², 稳定区与水热活动区的差异在于构造与水热循环引起的构造活动相关热流可达到 35~60.3 mW/m², 因此黄沙洞地热田的主要热源中构造热占主导地位, 最高可以占到地表热通量的近一半。扣除构造活动相关热流, 剩余的 70 mW/m² 的热流略高于中国大陆地区大地平均热流值 (60.4±12.3) mW/m²^[62] 和全球大地热流平均值 65 mW/m²^[63], 但并不存在显著的高热流异常。

黄沙洞地热田的构造热作用主要包括区域深断裂的热聚敛作用和水热循环将深部热携带至浅表两部分, 也可能存在局部熔融的热传导。黄沙洞地热田地壳具有明显的分层流变特征, 与上地壳和下地壳的脆性变形相比, 中地表主体表现为韧性变形特征, 脆韧性转换带位于中地壳约 15 km, 此时流变强度为

200 MPa, 随着深度增加流变强度逐渐减弱, 至 20 km 深度流变强度已减小至约 70 MPa。福建沿海地区地球物理揭示的壳内低速体位于深部 10~16 km^[64], 与此深度相近。廖志杰^[65]认为福建沿海的低速体可能是铲状活动断裂的滑脱面。黄沙洞地热田虽未见中地壳低速体及铲状断裂的相关报道, 但不排除在区域构造应力作用下发生构造滑脱作用的可能。范艳霞等^[26]通过黄沙洞 HSD-ZK001 钻孔地应力计算得到最大水平主应力方向为 NWW 向, 有利于断裂以走滑形式活动。因此, 在中地壳韧性变形为主的流变作用下, 可能会形成 NEE 向铲状走滑断裂。根据本文获取的地壳热结构, 地壳 20 km 温度达到 314.9~722.3 °C。此温度条件下, 壳内岩石也存在发生熔融的可能^[66]。不论存在铲状走滑断裂或局部熔融, 均会导致构造热聚敛作用的热来源增大, 使得来源于水热循环携带热的比例相对减小。

4.3 水热系统的热影响

黄沙洞水热活动区相比稳定区地表热通量高出 35.0~60.3 mW/m²。由于构造活动相关热流的存在, 使用式(4)计算构造和水热循环影响条件下的深部温度会显著升高。目前壳内构造活动向浅部的热聚敛效应能够达到的深度尚不确定, 因此, 水热活动区计算的温度场是岩石圈地温场的最高值。设定区域地温梯度为 40 °C/km, 前人计算水热循环深度为 3.5 km^[19], 在此深度范围水热活动区较稳定区的地温高出近 60 °C(图 5)。水热系统的循环换热属于地壳构造活动产生的热源的一部分。假设相同区域大地构造背景下, 深部来热在区域性高导构造体(如大断裂、基底凸起区)的位置向上聚集, 在接近浅部水热系统后, 由水热循环将构造体导热运移至浅表。在此种推论下, 区域深断裂的热聚敛和水热系统循环换热扮演了“接力式”热传递, 将深部来热通过接力方式运移至浅表。黄沙洞地热田位于 NE 向区域性深断裂(如河源断裂带、莲花山断裂带)影响范围内, 前人研究认为此一系列 NE 向区域断裂具有热聚敛作用或作为热流体上升通道^[26, 38, 47, 67]。因此黄沙洞地热田的深部来热传递至浅部的模式可能是由区域性深断裂将热传导至约 3.5km 深部, 然后由水热系统循环“接力”将热携带至浅表。

尽管目前尚无法获取深断裂热聚敛和水热系统循环导热在地壳构造活动产生热源中所占比例, 但通过地热水化学温标估算的热储温度可以提供一定的佐证。前人学者对黄沙洞地热田的热储温度估算为

120~165 °C^[19, 28, 68], 即水热系统循环深度最深处获取的最高温度预计应达到 120~165 °C, 而在此特定深度达到此温度的需求, 应由深断裂热聚敛作用来满足。如果可以获取受断裂影响且不受水热系统影响的地温梯度值, 则可以估算深断裂热聚敛作用的热流增值大小, 进而判断深断裂热聚敛与水热系统循环导热在地壳构造活动产生热源中的占比, 增进水热系统循环对地热田的影响的认识。

4.4 干热岩资源前景分析

黄沙洞地热田岩石圈热结构揭示了构造活动和水热循环系统对深部地温场的重要影响, 地壳构造活动产生的热源可能是黄沙洞地热田的主导热源, 壳内放射性生热和地幔来热体量相近, 是区域构造背景提供的相对稳定热源。在此热源条件下, 由于水热系统的循环深度有限, 其对深部的热影响迅速减小, 因此构造活动相关热流中水热系统的热影响占比是影响深部热状态的不确定因素。如果水热系统热影响较小, 则构造活动相关热流主体由区域深断裂的热聚敛引起, 可以保障深部的构造热源供给, 相对具有较好的干热岩前景。如果构造活动相关热流主要受水热系统热影响控制, 则深部失去了水热系统热影响后缺乏足够的构造热源支撑, 深部温度相对偏低。

从岩石圈流变结构来看, 黄沙洞地热田的壳幔未发生流变结构解耦是区别于其他地区的显著特征, 这与区域下地壳以辉长岩为主密切相关^[46]。中地壳(15~20 km)表现出的韧性流变对应的温度区间为 250~722 °C, 不排除存在铲状断裂滑动和局部熔融的可能, 在韧性流变是由于局部熔融作用形成的条件下, 具备较好的干热岩资源前景。

5 结论

(1)黄沙洞地热田水热活动区的地表热通量为 130.3 mW/m², 其中地壳热流为 38.26 mW/m², 地幔热流为 31.74 mW/m², 壳、幔热流比为 1.2:1, 表现出温壳温幔型岩石圈热结构, 构造活动相关热流达到了 30.5~60.3 mW/m²。岩石圈流变结构显示中地壳存在韧性流变层, 上地壳与下地壳以脆性破裂为主, 脆韧性转换带约为 15 km, 下地壳与岩石圈地幔在流变结构上耦合, 表现为相对稳固的地壳底界。

(2)黄沙洞地热田的主要热源包括壳内放射性生热、地幔来热和地壳构造活动产生的热源, 其中地壳构造活动产生的热源占主导地位, 最高可达总热源的近一半。地幔来热和放射性生热是黄沙洞地热田的

热源组成部分。区域深断裂的热聚敛和水热系统循环换热是构造活动产生的热源的主要热传递方式,二者可能通过“接力式”热传递将热携带至浅表,但仍需进一步工作进行验证。

(3) 区域深断裂的热聚敛在构造热作用中的占比是影响干热岩资源前景的关键因素,岩石圈流变结构揭示中地壳不排除存在铲状断裂滑动和局部熔融的可能。

参考文献 (References) :

- [1] KIRBY S H, KRONENBERG A K. Rheology of the lithosphere: Selected topics[J]. *Reviews of Geophysics*, 1987, 25(6): 1219.
- [2] CHEN Wangping, HUNG S H, TSENG T L, et al. Rheology of the continental lithosphere: Progress and new perspectives[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(1): 4 - 18.
- [3] BUROV E B. Rheology and strength of the lithosphere[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(8): 1402 - 1443.
- [4] LACHENBRUCH A H. Crustal temperature and heat production: Implications of the linear heat-flow relation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(17): 3291 - 3300.
- [5] FURLONG K P, CHAPMAN D S. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41: 385 - 410.
- [6] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地地热学[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2019. [QIU Nansheng, HU Shengbiao, HE Lijuan. Geothermics in sedimentary basins[M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2019. (in Chinese)]
- [7] 王良书, 李成, 刘福田, 等. 中国东、西部两类盆地岩石圈热-流变学结构[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2000, 30(增刊 1): 116-121. [WANG Liangshu, LI Cheng, LIU Futian, et al. Thermorheological structure of lithosphere in eastern and western basins of China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2000, 30(Sup 1): 116 - 121. (in Chinese)]
- [8] 王贵玲, 蔺文静, 刘峰, 等. 地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 639 - 660. [WANG Guiling, LIN Wenjing, LIU Feng, et al. Theory and survey practice of deep heat accumulation in geothermal system and exploration practice[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 639 - 660. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘俊来. 大陆中部地壳应变局部化与应变弱化[J]. 岩石学报, 2017, 33(6): 1653 - 1666. [LIU Junlai. Strain localization and strain weakening in the continental middle crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(6): 1653 - 1666. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王恺, 熊熊, 周宇明, 等. 联合多种资料确定华北岩石圈三维热-流变结构: 对裂陷形成的意义[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2020, 50(7): 946 - 961. [WANG Kai, XIONG Xiong, ZHOU Yuming, et al. Three-dimensional thermo-rheological structure of the lithosphere in the North China Craton determined by integrating multiple observations: Implications for the formation of rifts[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(7): 946 - 961. (in Chinese)]
- [11] 李忠海, 崔起华, 钟辛易, 等. 大陆动力学数值模拟: 问题、进展与展望[J]. *地质学报*, 2021, 95(1): 238 - 258. [LI Zhonghai, CUI Qihua, ZHONG Xinyi, et al. Numerical modeling of continental dynamics: Questions, progress and perspectives[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 238 - 258. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 龙登红, 周小龙, 杨坤光, 等. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(3): 721 - 731. [LONG Denghong, ZHOU Xiaolong, YANG Kunguang, et al. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 721 - 731. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LI Zhengxiang, LI Xianhua. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179 - 182.
- [14] LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean continent connection zone to subduction of the Paleopacific Plate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 91 - 137.
- [15] 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等. 中国南方现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1118 - 1126. [YUAN Yusong, MA Yongsheng, HU Shengbiao, et al. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1118 - 1126. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 449 - 450. [WANG

- Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 449 – 450. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 姚足金, 陈宗宇. 中国东南沿海地区地热资源的地质评价[C]//中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊(第6号). 1990, 47 – 80. [YAO Zujin, CHEN Zhongyu. Geological assessment of geothermal potential for regional development in southeast coast of China[C]//Bull. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS (No. 6). 1990, 47 – 80. (in Chinese)]
- [18] 李亭昕, 蔺文静, 甘浩男, 等. 东南沿海干热岩资源成因模式探讨及勘查进展[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(2): 187 – 200. [LI Tingxin, LIN Wenjing, GAN Haonan, et al. Research on the genetic model and exploration progress of hot dry rock resources on the southeast coast of China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(2): 187 – 200. (in Chinese with English abstract)]
- [19] TIAN Jiao, STEFÁNSSON A, LI Yiman, et al. Geochemistry of thermal fluids and the genesis of granite-hosted Huangshadong geothermal system, Southeast China[J]. *Geothermics*, 2023, 109: 102647.
- [20] XIAO Zhicai, WANG Shuai, QI Shihua, et al. Petrogenesis, tectonic evolution and geothermal implications of Mesozoic granites in the Huangshadong geothermal field, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(1): 141 – 158.
- [21] 袁建飞. 广东沿海地热系统水文地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013. [YUAN Jianfei. Hydro-geochemistry of the geothermal systems in coastal areas of Guangdong Province, South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 等. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J]. *地质学报*, 2016, 90(8): 2043 – 2058. [LIN Wenjing, GAN Haonan, WANG Guiling, et al. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in southeastern of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 2043 – 2058. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1366 – 1381. [LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1366 – 1381. (in Chinese with English abstract)]
- [24] GAN Haonan, WANG Guiling, WANG Bo, et al. Abnormally low heat flow in Southeast China resulted from remnant slab subducted beneath the East Asian lithosphere[J]. *Terra Nova*, 2022, 34(4): 340 – 348.
- [25] LIN Wenjing, YIN XiaoXiao. Temperature estimation of a deep geothermal reservoir based on multiple methods: A case study in Southeastern China[J]. *Water*, 2022, 14: 3205.
- [26] 范艳霞, 李海龙, 张军龙, 等. 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*, 2022, 65(10): 3944 – 3961. [FAN Yanxia, LI Hailong, ZHANG Junlong, et al. 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*, 2022, 65(10): 3944 – 3961. (in Chinese with English abstract)]
- [27] XI Yufei, WANG Guiling, LIU Shuang, et al. The formation of a geothermal anomaly and extensional structures in Guangdong, China: Evidence from gravity analyses[J]. *Geothermics*, 2018, 72: 225 – 231.
- [28] 闫晓雪. 广东惠州黄沙洞地热系统表征及成因机理研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2019. [YAN Xiaoxue. The characteristic and genesis mechanism in Huangshadong geothermal field, Guangdong[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [29] KUANG Jian, WANG Shuai, QI Shihua, et al. Cenozoic tectonic evolution of South China: A brief review, and new insights from the Huangshadong-Shiba area, Southeast China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(12): 7716 – 7737.
- [30] 王帅. 地下水中稀有气体同位素及其火山型地热成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020. [WANG Shuai. Isotope geochemistry of rare gases in groundwater and their volcanic geothermal genesis[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 祝小辉. 广东河源高埔岗地热资源热储特征及资源潜力评价[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(6): 126 – 128. [ZHU Xiaohui. Thermal storage characteristics and resource potential evaluation of Gaopugang geothermal resources in Heyuan, Guangdong Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(6): 126 – 128. (in Chinese)]
- [32] 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 22 – 27. [GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al.

- Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 22 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 旷健, 祁士华, 王帅, 等. 广东惠州花岗岩体及其地热意义 [J]. *地球科学*, 2020, 45(4): 1466 – 1480. [KUANG Jian, QI Shihua, WANG Shuai, et al. Granite intrusion in Huizhou, Guangdong Province and its geothermal implications[J]. *Earth Science*, 2020, 45(4): 1466 – 1480. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035 – 1053. [SHU Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1035 – 1053. (in Chinese with English abstract)]
- [35] SHU Liangshu, WANG Bo, CAWOOD P A, et al. Early Paleozoic and early Mesozoic intraplate tectonic and magmatic events in the cathaysia block, South China[J]. *Tectonics*, 2015, 34(8): 1600 – 1621.
- [36] 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应 [J]. *科学通报*, 2018, 63(16): 1550 – 1593. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian Ocean-continent connection zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(16): 1550 – 1593. (in Chinese with English abstract)]
- [37] LI Jianhua, CAWOOD P A, RATSCHBACHER L, et al. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103056.
- [38] TANNOCK L, HERWEGH M, BERGER A, et al. The effects of a tectonic stress regime change on crustal-scale fluid flow at the Heyuan geothermal fault system, South China[J]. *Tectonophysics*, 2020, 781: 228399.
- [39] FAURE M, CHEN Yan, FENG Zhuohai, et al. Tectonics and geodynamics of South China: An introductory note[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 141: 1 – 6.
- [40] 邱楠生, 许威, 左银辉, 等. 渤海湾盆地中-新生代岩石圈热结构与热-流变学演化 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 13 – 26. [QIU Nansheng, XU Wei, ZUO Yinhui, et al. Evolution of Meso-Cenozoic thermal structure and thermal-rheological structure of the lithosphere in the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 13 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [41] CORREIA A, RAMALHO E C. One-dimensional thermal models constrained by seismic velocities and surface radiogenic heat production for two main geotectonic units in southern Portugal[J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(3/4): 261 – 268.
- [42] RANALLI G. Regional variations in lithosphere rheology from heat flow observations[M]//ČERMÁK V, RYBACH L, Eds. *Exploration of the Deep Continental Crust*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991: 1 – 22.
- [43] WANG Yang. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: Constraints on active deformation[J]. *Phys Earth Planet Inter*, 2001, 126: 121 – 146.
- [44] MOTTAGHY D, VOSTEEN H D, SCHELLSCHMIDT R. Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, 97(2): 435 – 442.
- [45] LIN Wenjing, WANG Guiling, GAN Haonan, et al. Heat source model for Enhanced Geothermal Systems (EGS) under different geological conditions in China[J/OL]. *Gondwana Research*, (2022-08-19)[2023-01-20]. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.08.007>
- [46] XIAO Zhicai, WANG Shuai, QI Shihua, et al. Crustal thermo-structure and geothermal implication of the Huangshadong geothermal field in Guangdong Province[J]. *Journal of Earth Science*, 2023, 34(1): 194 – 204.
- [47] ZHENG Herong, LUO Jun, ZHANG Ying, et al. Geological characteristics and distribution of granite geothermal reservoir in southeast coastal areas in China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 683696.
- [48] GARD M, HASTEROK D, HAND M, et al. Variations in continental heat production from 4 Ga to the present: Evidence from geochemical data[J]. *Lithos*, 2019, 342/343: 391 – 406.
- [49] 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 等. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(10): 2560 – 2574. [DENG Yangfan, LI Shoulin, FAN Weiming, et al. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(10): 2560 – 2574. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 深地震探测揭示的华南地

- 区莫霍面深度[J]. *地球学报*, 2009, 30(6): 774 – 786. [XIONG Xiaosong, GAO Rui, LI Qiusheng, et al. The Moho depth of South China revealed by seismic probing[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 774 – 786. (in Chinese with English abstract)]
- [51] JIANG Guangzheng, HU Shengbiao, SHI Yizuo, et al. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. *Tectonophysics* 2019, 753, 36 – 48.
- [52] LUAN F C, PATERSON M S. Preparation and deformation of synthetic aggregates of quartz[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B1): 301 – 320.
- [53] BERCKHEMER H, AUER F, DRISLER J. High-temperature anelasticity and elasticity of mantle peridotite[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1979, 20(1): 48 – 59.
- [54] 安美建, 石耀霖. 中国大陆岩石圈厚度分布研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 23 – 30. [AN Meijian, SHI Yaolin. Review on lithospheric thickness research of the Chinese continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 23 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 汪集暘, 庞中和, 胡圣标, 等. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [WANG Jiyang, PANG Zhonghe, HU Shengbiao, et al. *Geothermics and its applications*[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]
- [56] CLAUSER C, GIESE P, HUENGES E, et al. The thermal regime of the crystalline continental crust: Implications from the KTB[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 18417 – 18441.
- [57] GOUTORBE B, POORT J, LUCAZEAU F, et al. Global heat flow trends resolved from multiple geological and geophysical proxies[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(3): 1405 – 1419.
- [58] GOES S, HASTEROK D, SCHUTT D L, et al. Continental lithospheric temperatures: A review[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 306: 106509.
- [59] RUDNICK R L, MCDONOUGH W F, O'CONNELL R J. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145(3/4): 395 – 411.
- [60] ARTEMIEVA I M, MOONEY W D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B8): 16387 – 16414.
- [61] GLEASON G C, TULLIS J. A flow law for dislocation creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell[J]. *Tectonophysics*, 1995, 247(1/2/3/4): 1 – 23.
- [62] 姜光政, 高珊, 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(4th edition)*[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892 – 2910. (in Chinese with English abstract)]
- [63] DAVIES J H. Global map of solid earth surface heat flow[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4608 – 4622.
- [64] 熊绍柏, 金东敏, 孙克忠, 等. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(1): 55 – 63. [XIONG Shaobai, JIN Dongmin, SUN Kezhong, et al. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighbourhood in the Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(1): 55 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [65] 廖志杰. 福建无岩浆热源的深循环水热系统[J]. *现代地质*, 2012, 26(1): 85 – 98. [LIAO Zhijie. Deep-circulation hydrothermal systems without magmatic heat source in Fujian Province[J]. *Geoscience*, 2012, 26(1): 85 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [66] WANG Qiang, HAWKESWORTH C J, WYMAN D, et al. Pliocene-Quaternary crustal melting in central and northern Tibet and insights into crustal flow[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11888.
- [67] WANG Shuai, KUANG Jian, HUANG Xuelian, et al. Upwelling of mantle-derived material in southeast China: Evidence from noble gas isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2022, 96(1): 100 – 110.
- [68] 魏正安, 黄少鹏, 王成善, 等. 粤港澳大湾区地下热水地球化学特征及其热储含义[J]. *地球学报*, 2023, 44(1): 117 – 132. [WEI Zheng'an, HUANG Shaopeng, WANG Chengshan, et al. Geochemistry and its geothermal reservoir implications of geothermal water in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 117 – 132. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真