doi: 10.12097/gbc.2023.05.003

区小毅,杨富强,莫亚军,李叶飞,康志强,孙明行,李静和.2025.桂东南地区干热岩地球物理勘查与资源潜力分析[J].地质通报,44(6): 993-1006.

Ou Xiaoyi, Yang Fuqiang, Mo Yajun, Li Yefei, Kang Zhiqiang, Sun Minghang, Li Jinghe. 2025. Geophysical exploration and resource potential analysis of dry hot rocks in southeast Guangxi[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 993–1006(in Chinese with English abstract).

桂东南地区干热岩地球物理勘查与资源潜力分析

区小毅1,杨富强1,2*,莫亚军1,李叶飞1,康志强3,孙明行4,李静和5

(1. 广西壮族自治区地球物理勘察院,广西柳州 545005;2. 中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074;3. 广西壮族自治区地质矿 产勘查开发局,广西南宁 530023;4. 广西壮族自治区地质调查院,广西南宁 530023;5. 桂林理工大学地球科学学院,广西桂林 541004)

摘要: 【研究目的】针对广西干热岩资源探测研究不足的现状,重点围绕桂东南地区开展综合地球物理勘查与研究,探究干热 岩资源潜力,进一步提高该地区在该领域的研究工作程度,助力广西能源结构转型升级。【研究方法】基于研究区地球物理场 特征,综合运用大地电磁法开展深部探测工作,并结合干热岩地质研究成果,系统分析区域断裂与深部热源通道,通过地球物理 与地热地质资料耦合分析,探讨深部结构面埋深及隐伏岩体存在的可能性。【研究结果】通过研究分析,识别出多条深大断裂 作为深部热源通道,发现西场盆地底部存在隐伏岩体,埋深 3~5 km,规模达数百平方千米。经热储法估算,西场盆地干热岩资源 量为 182.48×10¹⁵ J,折合标准煤 622.63×10⁴ t,按 20% 的采收率,干热岩资源量可开采量为 36.5×10¹⁵ J,折合标准煤 124.53×10⁴ t, 占 2018 年广西全区能源生产总量的 3.31%。【结论】桂东南地区干热岩地热资源前景优越,西场盆地为理想的有利远景区,具 备进一步开展调查勘探与开发利用的价值。

关键词:桂东南地区;干热岩;地球物理勘查;正演拟合;非线性共轭梯度反演;潜力分析;洁净能源调查工程

创新点: 桂东南地区较广西其他地区而言具有更大的干热岩资源潜力,利用重磁电综合地球物理勘探技术能够有效查明深部热 源通道的发育、隐伏岩体的分布、主要结构面的埋深等关键信息,结合其他干热岩地质研究工作对其资源潜力作出评价

分析。

中图分类号: TK521⁺.33 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-0993-14

Geophysical exploration and resource potential analysis of dry hot rocks in southeast Guangxi

OU Xiaoyi¹, YANG Fuqiang^{1,2*}, MO Yajun¹, LI Yefei¹, KANG Zhiqiang³, SUN Minghang⁴, LI Jinghe⁵

Guangxi Geophysical Investigation Institute, Liuzhou 545005, Guangxi, China; 2. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Guangxi Bureau of Geology & Mineral Prospecting & Exploitation, Nanning 530023, Guangxi, China; 4. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, Guangxi, Ghina; 5. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] In response to the current situation of insufficient exploration and research on dry hot rock resources in Guangxi,

收稿日期: 2023-05-04;修订日期: 2023-12-12

资助项目:广西壮族自治区科学技术厅重点研发计划项目《短偏移地空瞬变电磁探测技术研究与应用示范》(编号:桂科 AB24010021)、广西 壮族自治区地质矿产勘查开发局部门预算前期工作科研项目《广西三维岩石圈结构建模与深部成矿背景研究》(编号:桂地矿函 [2024]67 号)、广西地球物理深部探测技术与试验研究人才小高地(编号:桂地矿办 [2023]55 号)

作者简介:区小毅(1986-),男,硕士,正高级工程师,从事电磁法的应用与研究工作。E-mail:15594097@qq.com

^{*}通信作者:杨富强(1984-),男,博士,正高级工程师,从事区域重磁应用与研究工作。E-mail: 1120179016@qq.com

this study focuses on carrying out comprehensive geophysical exploration and comprehensive research in the southeastern Guangxi region to explore its dry hot rock resource potential, further improve the research work level in this field in the region, and assist in the transformation and upgrading of Guangxi's energy structure. [Methods] Based on the characteristics of the geophysical field in the study area, magnetotelluric methods are comprehensively used to carry out deep exploration work. Combined with the geological research achievements of dry hot rocks, the regional faults and deep heat source channels are systematically analyzed. Through the coupling analysis of geophysical and geothermal geological data, the burial depth of deep structural planes and the possibility of the existence of hidden rock masses are discussed. [Results] Through research and analysis, multiple deep and large faults are identified as deep heat source channels, and hidden rock masses are found at the bottom of the Xichang Basin, with a burial depth of 3~5 km and a scale of hundreds of square kilometers. According to the thermal reservoir method estimation, the dry hot rock resource amount in the Xichang Basin is 182.48×10^{15} J, equivalent to 622.63×10^{45} tons of standard coal. Calculated based on a 20% recovery rate, the recoverable amount of dry hot rock resources is 36.5×10^{15} J, equivalent to 124.53×10^{4} tons of standard coal, accounting for 3.31% of the total energy production in Guangxi in 2018. [Conclusions] The geothermal resources of dry hot rocks in the southeastern Guangxi region have a superior prospect, and the Xichang Basin is an ideal favorable remote exploration area, with the value of carrying out further investigation, exploration, and development and utilization.

Key words: southeastern Guangxi; hot dry rock; exploration geophysics; forward fitting; NLCG inversion; potential analysis; clean energy survey project

Highlights: Compared with other regions in Guangxi, southeastern Guangxi has greater potential for hot dry rock (HDR) resources. The comprehensive geophysical exploration technology integrating gravity, magnetic and electrical methods can effectively identify key information such as the development of deep heat source channels, the distribution of hidden rock masses, and the burial depth of main structural planes. Combined with other geological research on HDR, this can be used to evaluate and analyze its resource potential.

About the first author: OU Xiaoyi, male, born in 1986, master's degree, senior engineer, mainly engaged in the application and research of electromagnetic methods; E-mail: 15594097@qq.com

About the corresponding author: YANG Fuqiang, male, born in 1984, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in the application and research of regional gravity and magnetics; E-mail: 1120179016@qq.com

Fund support: Supported by Key Research and Development Program of the Department of Science and Technology of Guangxi Zhuang Autonomous Region (No. Guike AB24010021) and Scientific Research Projects for Preparatory Work of Departmental Budget of Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Geology, Mineral Resources Exploration and Development (No. Guidi Kuang Han [2024] 67) and Guangxi Talent Highland for Deep Geophysical Detection Technology and Experimental Research (No. Guidi Kuang Ban [2023] 55)

地热资源由于储存量大、对环境负面影响小,被 众多国家列为重点发展的战略性新兴能源之一,并 在竞争中不断合理开发利用。作为地热资源的重要 组成部分,20世纪70年代,美国加州大学Los Alamos 实验室的研究人员提出了干热岩的概念,经过50多 年的研究,从理论到勘查技术等方面都取得了长足 的发展;国内学者从90年代开始陆续对该新型地热 资源开展了众多理论研究与调查评价(Leng et al., 2024)。前人对1990—2000年期间全球地热研究、 开发利用的现状与进展进行了综述(张季生等, 2001),对比分析了全世界多种干热岩资源的成因模 式,将中国的干热岩资源划分为4种主要赋存类型, 并对各类型的成因机制进行了深入研究(甘浩男等, 2015; Wang et al., 2018);也对中国干热岩地热资源 开展了潜力评估,并划分了深部热结构有利地区,表 明中国干热岩资源潜力巨大,尤其青藏铁路沿线和 东南沿海地区条件尤为优越(汪集旸等, 2012; 马峰等, 2015);同时,从地质学角度深刻论述了干热 岩地热能资源的结构构造与其建造系统,针对其形 成机理、分布规律、综合勘查、评价开发等重大问题 进行了深入探讨,并在共和盆地、松辽盆地及东南沿 海等干热岩资源潜力区开展了系统的地质-地球物 理勘查研究工作,圈定了若干优选靶区,取得了一批 新的研究成果(蔺文静等, 2012; 李德威等, 2015; 张 杨, 2016)。

国内外对干热岩地热资源的勘查手段通常以水

文地质调查、地球物理与地球化学方法为主,中国干 热岩资源勘查开发及其技术发展仍处于初级阶段, 与发达国家相比暂未形成全面系统的勘探开发方 法,但能够确定的是,地球物理方法在其中起到了重 要作用(陈雄, 2016; 杨冶等, 2019; Spichak et al., 2023)。重磁位场法能够进行大面积的测量,对与圈 定干热岩靶区关系密切的岩浆岩体划分、大地构造 格架厘定有着独特的优势;大地电磁法对于受含水 量和温度影响较大的岩(层)石导电性变化和差异较 敏感,因此在地热勘探中能够发挥重要作用(赵雪宇 等, 2015; Wang et al., 2023; Shah et al., 2024)。通过 对青海共和-贵德盆地的干热岩地质、地球物理场特 征的系统分析,结合 CSAMT 勘探成果,提出盆地深 部存在隐伏岩体的可能(薛建球等,2013);利用重磁 电综合方法,对五大连池火山机构与干热岩的形成 机制进行了系统研究(张森琦等, 2018);采用地震方 法对中国东南沿海及漳州盆地的壳幔结构进行了精 细划分,并对潜在的干热岩资源进行了探讨(滕吉文 等,2019),证实了地球物理技术方法在大深度干热 岩型地热资源勘探工作中的重要性和有效性。

桂东南地区位于东南沿海资源潜力区西部,该

地区具有较高的大地热流值,南部具有较高的地温 梯度。基于桂东南地区的地球物理勘查成果,将该 地区划分为4个远景区(周宁远,2021)。本次研究 是在合浦-南康盆地远景区实施的大地电磁法长剖面 勘查成果的基础上,充分结合重磁位场资料,对研究 区的隐伏岩体、断裂构造及深部地质结构面进行综 合分析,通过重、电联合反演分析探讨研究区的干热 岩资源潜力,为广西干热岩资源潜力调查研究提供 技术示范。

1 研究区干热岩地质背景

广西的构造演化历史漫长, 峒中-小董-藤县-梧 州-贺街-鹰扬关断裂为贯穿广西的区域性断裂带, 以 此为界可将全区划分为 2 个二级构造单元, 即扬子 克拉通和华南新元古代一早古生代造山带(图 1)。 桂东南地区又可细分为钦防结合带和北部湾凹陷 2 个三级构造单元, 燕山期以来的构造活动十分强 烈, 继承了防城-灵山、博白-岑溪等 NEE—EW 向大 型古构造带的格架; 中新生代的构造活动再次增强, 众多陆相盆地和巨厚盖层在该时期的地震活动下相 继形成, 同时伴随着频繁的岩浆侵位和火山活动; 形



图 1 桂东南地区陆相盆地分布特征图(据孙明行等, 2020 修改)



1—恭城、西湾断陷盆地带;2—南宁断陷盆地;3—十万大山盆地;4—宁明、海渊、上思断陷盆地带;5—社步-太平断陷盆地;6—钦州-平吉-陆 屋-大坡断陷盆地带;7—北部湾断裂;8—乌家-东平-马坡-容县-金鸡断陷盆地带;9—水汶、周公顶断陷盆地带;F₁—凭祥-大黎断裂;F₂—梧州-鹰扬关断裂;F₃—峒中-小董断裂;F₄—上思-在妙断裂;F₅—防城-灵山断裂;F₅—博白-梧州断裂;F₇—陆川-岑溪断裂 成了较薄的岩石圈结构和良好的地温场条件,建立 了良好的构造-岩浆-沉积建造的"生-运-储-盖"系统 (孙明行等,2020)。

广西居里面埋深最浅处位于桂东南地区钦州— 防城港—北海一带,平均埋深仅 19.5 km,防城港— 北海一带的大地热流密度值为全区最高;全区最大 平均地温梯度可达 3.0℃/100 m, 同样位于钦州—防 城港一带,与该地区现有的深孔测温数据基本吻合 (表1)。相关资料信息显示,5 km 埋深的地温空间 分布特征存在2个地温均超过150℃的地热异常 区,一是钦州一防城港一北海一带,二是梧州地区, 前者地温异常范围大、温度相对高。合浦盆地内没 有直接出露的温泉,但浅井水温较周边地区普遍偏 高 1~2℃;近年在合浦盆地施工的 2 个地热井测温结 果显示, 合浦 1 井在 1807 m 处的温度为 79.6℃, 地温梯度达 3.4℃/100 m; 合浦 2 井在 1800 m 处的温 度为 65.0℃, 地温梯度达 3.21℃。上述研究均表明, 桂东南地区深部有很大的地热资源潜力空间(康志 强等,2020a)。

2 研究区地球物理特征

2.1 岩(层)石物性特征

广西地壳表层岩石密度以超基性岩、基性岩最高,碳酸盐岩次之,花岗岩与变质岩的平均密度相

表 1 研究区部分钻孔地温梯度统计结果 (据康志强等, 2020a)

 Table 1
 List of geothermal gradient statistics for some boreholes in the study area

构造单元	钻孔	井深/m	测温深度/m	地温梯度/(℃/100 m)	
				分段实测值	平均计算值
西场凹陷	西1井	2800.00	123~800	1.85	2.55
			800~1204	1.25	
			1204~1520	3.04	
			1520~2540	1.91	
	西参2井	2409.07	914~1500	4.40	2.20
			1500~2404	3.63	5.29
	路1井	1500.00	—	—	3.25
	亚1井	1700.00	—	—	3.67
常乐凹陷	乐参1井	2698.49	56~95	2.05	3.14
			95~115	3.50	
			133~178	2.22	
			178~207	3.10	

近,居第三,碎屑岩类密度最低。火山岩较同类性质 侵入岩稍低,变化范围为 2.50×10³~2.91×10³ kg/m³, 平均值 2.74×10³ kg/m³;花岗岩类岩石的平均密度为 2.61×10³ kg/m³,不同时代、不同成因的花岗岩体密度 亦有一定的变化规律。若取密度平均值之差大于 0.10×10³ kg/m³ 作为划分标准,广西整体地下空间可 划分为 5 个密度层和 4 个密度界面(区小毅等, 2021)。

密度层包括古近系—新近系、白垩系、侏罗系及 志留系低密度层,三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系 中高密度层,奥陶系、寒武系、震旦系中等密度层,以 及丹洲群、四堡群高密度层。

密度界面包括侏罗系与三叠系密度界面,平均 密度差 0.17×10³ kg/m³,上低下高; 泥盆系与志留系 密度界面,平均密度差 0.24×10³ kg/m³,上高下低; 志留 系与奥陶系密度界面,平均密度差为 0.18×10³ kg/m³, 上低下高; 震旦系与前震旦系密度界面,平均密度差 为 0.14×10³ kg/m³,上低下高。上地幔上部的"软流 层"大约从 70 km 延伸至 250 km, 地壳与地幔之间存 在明显的密度界面(莫霍面),密度差值达 0.65× 10³ kg/m³(表 2)。

广西各类地层岩石的平均电阻率值在 *n*×10²~ *n*×10⁷ Ω·m 范围变化,大多数岩类的电阻率范围为 10³~10⁴ Ω·m,属高阻层;仅沉积岩中的泥岩、页岩、 粉砂岩和砾岩的电阻率相对较低,约为 10² Ω·m,属 中阻层。桂东南地区的碳酸盐岩电阻率平均值为 *n*×10⁴ Ω·m,属极高阻层;火山岩、岩浆岩的电阻率范 围为 *n*×10³~*n*×10⁴ Ω·m,属高阻—极高阻层;硅质岩 与泥灰岩则为 *n*×10³ Ω·m,属高阻—按属阻层;碎屑岩沉积层

表 2 广西地层结构及其密度特征

Table 2 Stratigraphic structure and density characteristics in Guangxi

名称	编号	分层	深度范围/km	密度范围/(10 ³ kg·m ⁻³)					
地壳	А	—	0~35	2.70~3.00					
M界面(莫霍界面)									
地幔	В	上地幔	35~400	3.32~3.65					
	С	转变区	400~1000	3.65~4.68					
	D	下地幔	1000~2900	4.68~5.69					
G界面(核一幔边界)									
地核	Е	外核	2900~4980	9.40~11.50					
	F	过渡层	4980~5120	11.50~12.00					
	G	内核	5120~6371	12.00~12.30					

的电阻率值通常小于 *n*×10² Ω·m, 属低阻层。由此可 见, 研究区可分为 2 个主要电性层, 白垩系—三叠系 为相对低阻层, 二叠系—奥陶系为相对高阻层(表 3)。

2.2 地球物理场特征

研究区的区域航磁异常整体表现较低缓,显示 为高低相间的格局,总体上自西向东呈现由高到低 的趋势,幅值变化较小,异常变化较平缓。平缓的磁 异常表明,研究区内的岩体并未产生较强的高磁化 作用,且磁异常走向为 NE 走向,整体上反映了研究 区 NE 向的主构造展布特征(图 2-a,b)。

研究区位于北部湾重力高异常区,布格重力异 常虽整体变化不大,但仍表现出南东高、北西低的总 体变化趋势特征;由北西往南东逐渐增大的重力异 常趋势,主要反映了区域深部构造面由北西往南东 逐渐抬升的梯级形态,往大洋方向逐渐变浅(图 2-c)。 剩余重力异常特征,从西往东呈现出低一高一 低一高的变化趋势,基本对应那梭-灵山断褶带、六 万大山隆起、博白断褶带、云开隆起等四级构造单元 (图 2-d)。总体而言,研究区的航磁异常与重力异常 走向一致、相互对应,对研究区的主要构造体系和基 底起伏情况均有很好的反映与呈现(黄启勋,2018; 李静和等,2018)。

2.3 深部构造面特征

自元古宙中晚期以来,广西有大量的基性—超

表 3 桂东南地区地层电阻率统计结果

 Table 3 Statistic table of formation resistivity in Southeast

 Guangxi

	地目目位	化旦	电阻率/(Ω·m)	
构起力区	地方运位	15	低阻层	高阻层
	上白垩统	K2	50	_
云开隆起带	中泥盆统东岗岭组	$D_2 d$	_	6×10^4
	寒武系黄洞口组	$\in h$	—	10 ³
	加里东期混合岩	$P_2\gamma_3$	_	10 ³
	下白垩统新隆组	$K_1 x$	15	_
	中侏罗统	J_2	30	—
	下三叠统	T_1	90	—
钦州华力西褶皱带	上二叠统一下泥盆统	$P_2 - D_1$	_	$10^{3} \sim 10^{4}$
	中志留统合浦组一 下志留统连滩组	S_2h-S_1l	20~80	—
	中奥陶统	O_2	_	6×10 ³

基性岩(特别是玄武质岩石)及中酸性岩出露。桂东 南地区主要经历了印支期和燕山期2个岩浆活动 期,自西向东形成西大明山−大瑶山(Ⅳ)、十万大山− 大容山(Ⅴ)、云开地区(Ⅵ)等岩浆岩带与区域深大 断裂带相间的 NE—NEE 向展布格局。印支期岩浆 岩多以酸性岩基的形式产出;中—新生代火山活动 强烈,主要有早白垩世中酸性火山岩、晚白垩世中基



图 2 研究区区域地质-地球物理综合剖析图

Fig. 2 Comprehensive analysis map of regional geology and geophysics in the study area
 a一研究区区域地质图; b一研究区区域航磁 *ΔT* 平面等值线图; c一研究区区域布格重力异常图;
 d一研究区区域剩余重力异常图; e一研究区区域重磁推断平面成果图

性、酸性火山岩和新近纪—第四纪基性火山岩。新 生代火山岩分布最广泛,主要出露于合浦新圩和北海涠 洲岛、斜阳岛等地。根据区域重磁资料揭示的深部 岩浆岩的发育和展布具有明显的分带性,全区共划 分了7条岩浆岩带(图 3-a)(孔繁业等,2005;朱国器 等,2011)。

广西地壳的厚度由南东往北西逐渐增厚,莫氏面、康氏面和结晶基底面具有逐渐加深的趋势,研究区的深部构造面亦表现出该特征。区内的古老陆壳经历了多期构造作用及岩浆侵入、喷出作用,老地层受构造和岩浆作用影响发生变质和重结晶,使结晶基底面深度相对较小,为3.0~6.0 km(图 3-b);康氏面为向 NW 和 NE 两个方向倾没的斜坡,深度为14.5~18.0 km(图 3-c);莫氏面的起伏与倾没形态与

康氏面相似, 深度为 29.5~32.0 km(图 3-d)。桂东南 地区地震活动频繁、构造发育复杂、岩体分布广泛, 且地处太平洋板块和印度洋板块的交接地带, 也是 陆壳向洋壳过渡的变异地带, 地壳厚度较内陆地区 薄, 其深部构造面埋深相对浅, 十分有利于地壳深部 热流向地表传导传递, 为广西深部地热资源的成藏 与富集提供了良好的基础条件(梁礼革等, 2015; 黄 启勋, 2018; 李静和等, 2018; 康志强等, 2020a; 孙明 行等, 2022)。

3 重电资料处理与分析

3.1 重力异常正演拟合

本次研究从区域重力场中切取了一条与 MT 剖 面重合的重力剖面曲线进行正演计算研究。布格重



图 3 广西区域重磁推断岩浆岩带与研究区主要地质界面埋深推断图

Fig. 3 Inferred map of the burial depth of the main geological interface between the gravity and magnetic inferred magnetic rock belt in Guangxi

a一广西区域重磁推断岩浆岩带分布图;b一研究区结晶基底面埋深推断平面等值线图(km);c一研究区康氏面埋深推断平面等值线图(km); d—研究区莫氏面埋深推断平面等值线图(km) 力异常曲线呈现由北西往南东逐渐增大的趋势, 剖面 60~70 km 段呈现明显的重力低异常, 异常极值达到近-30×10⁻⁵ m/s²; 20~35 km 和 76~85 km 段也呈现出 2 个次级重力低异常。

根据桂东南地区的地质条件与岩石物性统计结 果,以2.7×10³ kg/m³ 作为背景密度值建立了初始模 型,利用 RGIS 重力数据库管理系统进行2.5 维人机 交互正演拟合计算,将地下分为以下4个密度层:新 生界—中生界侏罗系相对低密度层,密度取值2.44× 10³ kg/m³;中生界三叠系—上古生界相对高密度层, 密度取值2.61×10³ kg/m³;下古生界志留系相对低密 度层,密度取值 2.37×10³ kg/m³; 地壳密度取值 2.70×10³ kg/m³, 坚硬地幔岩密度取值 3.5×10³ kg/m³, 上地 幔软流圈密度取值 3.2×10³ kg/m³。

从正演拟合结果看,正演参数选择较合理、拟合 效果较理想,拟合曲线与实测曲线的重合度较高,对 研究区内的各密度层、密度界面及其横向变化特征 均有较好的反映;但 60~70 km 段的重力低异常未能 完全拟合,仍存在约-5.83×10⁻⁵ m/s² 的异常剩余幅 值,指示该段下方仍存在较大规模的低密度体,致使 密度亏损(图 4),因此在该剖面上布置了 MT 法探测 进行联合反演与综合分析。



Fig. 4 2.5-dimensional forward fitting curve model of gravity anomaly in the study area a—实测、拟合重力异常曲线图; b—密度模型图(g/cm³)

3.2 重电联合分析

大地电磁法(MT)作为以天然电磁场为场源的 频率域电磁测深方法之一,具有野外施工便捷、勘探 深度大、不受高阻层屏蔽、横向分辨率高等特点,在 干热岩地热资源调查中不仅可以反映热储盖层的分 布与厚度,同时也能够对大型导热构造进行有效探 测。本次 MT 法探测使用的是 MTU-5A 大地电磁法 探测系统, 剖面长度 90 km, 点距 5.0 km, 采集频率范 围为 320~0.0005 Hz, 各测点数据采集时长均大于等 于 40 h,采用张量模式进行数据采集。数据处理首 先通过傅里叶变换将时间序列数据由时间域转换至 频率域,利用 Robust 进行阻抗估计获得阻抗张量信 息,并有针对性地压制了随机噪声;再利用 MT Editor 对原始数据中的噪声叠加进行剔除,有效压制 干扰、消除"飞点";然后对整条剖面曲线使用空间滤 波法进行静态效应压制;最后采用带地形的非线性 共轭梯度法(NLCG)进行 TE&TM 联合模式反演计 算,得到结果如图5所示。

剖面上的重力布格异常从西往东呈现波浪式起 伏、逐渐升高的趋势,这是由于莫霍面从北西往南东 方向(即海洋方向)呈现逐渐抬升的梯级形态;而波 浪式的起伏形态特征是由中浅部局部地层岩性变 化、起伏、缺失及横跨大构造所致。15~35 km 测段 存在明显的布格重力低值异常,主要为密度相对较 低的花岗岩体(那丽岩体)所致; 60~70 km 的布格重 力低异常段较好地反映了西场盆地。结合大地电磁 法测深结果分析,断面中浅部横向电阻率变化较大, 0~20 km 测段、深度 20km 以浅的相对高阻层为古生 代坚硬的岩石层; 55~75 km 测段、近地表存在一明 显的水平椭圆相对低阻异常,与布格重力低值异常 段对应,推断该低阻体为西场盆地的综合反映,深度 可达 5 km 左右; 30~60 km 段、深度 10 km 存在一局 部相对中高阻隆起异常体,与上述盈余的相对重力 低异常段对应,根据电阻率异常形态拟合了一密度 值为 2.55×10³ kg/m³ 的局部低密度体, 布格重力异常 曲线的拟合度得到了极大提升。因此,结合研究区 地质特征认为,该中高阻、低密度异常体可能为隐伏 于西场盆地之下的三叠纪花岗岩侵入岩。

- 4 干热岩资源条件分析
- 4.1 广西干热岩资源潜力

广西地处欧亚板块、印度板块和太平洋板块的

交汇地带,岩石圈厚度较薄,断裂构造发育,大面积 出露的岩浆岩放射性元素含量较高,为产热和储热 提供了有利条件。全区共经历了7个岩浆活动期, 分布各类岩体 1200 多个, 出露面积约 2×10⁴ km²; (半)隐伏岩体 109 处,其中隐伏花岗岩体 100 处, 9处为隐伏基性岩体;经反演计算,隐伏酸性岩体埋 深在 2~3 km 的有 28 处, 岩体底界深度在 15 km 以 内,大的岩基底界一般在10~12 km 之间,这对于干 热岩的形成和贮藏十分有利(李静和等,2018;康志 强等,2020a)。广西的大地热流密度值介于47.0~ 57.6 mW/m²之间,平均值为 51.4 mW/m²,相较广东、 湖南、贵州等省区,桂东南地区的大地热流密度值较 高;受强烈的构造运动影响,广西岩浆活动频繁,放 射性元素含量较高,结晶基底面埋深较浅,尤其桂东 南地区的莫霍面埋深为 29 km,结晶基底面埋深仅 9 km, 对于深部热流向地表的传导传递十分有利; 桂 东南地区的区域性深大断裂规模巨大且常切割硅铝 层或硅镁层,活动时间长的复合型断裂对沉积相和 岩浆活动有着明显的控制作用,是区域性控热构造 和导热的主要通道;特别是该地区的韧性剪切带,仍 处于缓慢活动状态,是岩石圈热量的主要来源(孙明 行等,2022)。

广西全区的平均地温梯度为 2.0~3.0℃/100 m, 据现有深钻的测温数据统计结果可知,有2个钻井 的地温梯度相对较高:①桂来地1井,位于桂中坳陷,测 温深度段为 0.05~1445.4 m, 深度从 80 m 到 1445.4 m, 温度由 25.3℃ 上升至 79.5℃, 地温梯度为 3.97℃/ 100 m; ②明1井, 位于宁明盆地, 全孔平均地温梯度 为 4.68℃/100m, 且古近系的地温梯度较高, 达 5.60℃/100 m,但揭穿古近系后,下伏中三叠统的平 均地温梯度仅为 2.20℃/100 m(图 6)。其余几个钻 孔的地温梯度相对较小,东塘1井测温深度段为1.0~ 1219.5 m, 井底温度为 53.9℃, 地温梯度为 2.34℃/ 100 m; 雒容 1 井测温深度段为 2.0~1505 m, 井底温 度为 47.9℃, 地温梯度为 1.77℃/100 m; 桂柳地 1 井 测温深度段为 0~1960 m, 深度从 180 m 到 1960 m, 温度由 27.0℃ 上升至 72.7℃, 地温梯度为 2.44℃/ 100 m; 贵港桥圩盆地中深孔测温资料显示, 盆地的 地温梯度为3.84℃/100m。总体显示,广西在中深部 区域拥有较理想的地热资源潜力和开发利用空间。

4.2 桂东南地区干热岩资源潜力

要形成良好的干热岩增强型地热资源,需具备



图 5 研究区大地电磁测深剖面推断成果图



以下3个有利条件:①较大规模的年轻火山喷发或 岩浆侵入活动;②隔水性较好的稳定盖层;③渗透率 较低的热储岩体。研究区紧邻北部湾,莫霍面和结 晶基底面均埋藏较浅,结晶基底面、康氏面、莫氏面 的埋深分别小于7km、17km和31.5km;对于合浦、 钦州2个中—新生代断陷盆地,其结晶基底面埋深 在5~6km之间,康氏面埋深一般在15~16km之间, 但其在合浦盆地和钦州盆地的埋深分别介于29.5~ 30km和30.5~31km之间;地表出露元古宙—古生 代地层,受防城-梧州断裂的控制,盆地内沉积古近 系—新近系,具有理想的覆盖层条件。合浦盆地发 育石湾温泉和古海水温泉,二者温度介于40~60℃ 和60~90℃之间,均为具有较高价值的水热型地热 资源(康志强等,2020b;孙明行等,2022)。



图 6 广西部分深部钻井测温曲线图(据康志强等, 2020a 修改)

Fig. 6 Temperature measurement curves of some deep drilling in Guangxi

在重力和大地电磁测深成果的基础上,结合区 域岩石圈结构、地热地质、钻井等研究成果认为, "两高夹一低"的重力异常主要反映了新生代断陷盆 地及其下方可能存在较大规模的酸性隐伏岩体,两 侧的重力异常梯度带则很好地反映了桂东南地区的 防城-灵山和博白-岑溪2条区域大断裂,这2条区域 断裂带也是深部热源向地表运移的主要通道;桂东 南地区深部显示的大范围低阻异常反映了上地幔软 流圈,且局部呈上凸形态,为软流圈底侵和隆起所 致,岩石圈则因为软流圈底侵和隆起而变薄,而软流 圈的底侵及隆起形成了岩浆通道及热流通道的基 础,推断岩石圈与上地幔软流圈界面埋深在 50~70 km; 而地壳与上地幔之间的界面(莫霍面)相对于岩石圈 与软流圈之间的界面,在电阻率上并未体现得很清 晰,但通过地质成果、重力异常特征等多种资料互相 约束,显示莫霍面整体由北西至南东呈现逐渐抬升 的趋势(图7)。

干热岩蕴含的地热资源量取决于干热岩的温度 及干热岩岩石的热物性。干热岩地热资源储量*Q*采 用热储法进行估算(蔺文静等,2012;汪集旸等,2012):

$Q = \rho \cdot C_{\rm p} \cdot V \cdot (T - T_0)$

式中, Q为地热资源总量(J); ρ 为岩石密度(kg/m³); C_p 为岩石比热容(J/(kg· \mathbb{C})); V为岩体体积(m³); T为所计算深度的岩石温度(\mathbb{C}); T_0 为地表平均温 度(\mathbb{C})。

根据重力异常和密度物性测定的岩石平均密度 取值 2.70×10³ kg/m³; 西场盆地陆域面积约 167.10 km², 古近系盖层的埋藏平均厚度为 2~4 km, 盆地岩体体 积为 362.11×10⁶ m³; 研究区岩石比热容为 1397 J/ (kg·℃); 合浦县平均气温为 22.4℃, 恒温带温度按 照 24.9℃ 取值, 广西 5 km 埋深地温异常显示, 在西 场盆地一带热储温度为 158.5℃(康志强等, 2020b)。 综合上述数据计算得到,西场盆地的干热岩地热资 源储量 Q 为 182.48×10¹⁵ J, 折合标准煤 622.63×10⁴ t; 按照开采量中值 20% 的采收率计算, 西场盆地干热 岩资源量可开采量为 36.5×10¹⁵ J, 折合标准煤 124.53× 10⁴ t; 据资料统计, 2018 年广西全区能源生产总量为 3756.69×104 t标准煤,能源消费总量为10823.39× 10⁴t标准煤,由此计算得到西场盆地干热岩资源储 量及可开采量分别占 2018 年广西能源生产总量和 能源消费总量的 3.31% 和 1.15%。

研究区发育隐伏的三叠纪花岗岩和新元古代片 麻岩基底,它们富含Th、U、K等放射性元素。区内 的隐伏花岗岩岩基规模巨大、埋深适宜(3.0~7.7 km),比热容、热导率、扩散率等在该区域处于中等 水平,尽管其放射性生热率远低于世界上典型的高 放射性生热型干热资源区,但仍然是较理想的热储 层。2个中-新生代断陷盆地(钦州盆地和合浦盆 地)的上部盖层较厚,以密度较高、孔隙度和裂隙率 较低的碎屑沉积岩、粘土层为主,该层圈闭性好、热 扩散率低(0.993×10⁻⁶ m²/s),是理想的保温覆盖层。 此外, 钦州盆地深部的幔源热流物质上涌通道发育, 深部地幔热源与浅部隐伏花岗岩体热储层紧密相 连,形成了以深部地幔热为补给,以深大断裂构造为 热物质上涌通道系统的构造-盆地地幔热对流型资源 区;而在合浦盆地下部不仅拥有良好的幔源热流物 质上涌通道,在约30km深度区域还发育壳内部分 熔融层,是该地区地热资源的直接热源。另外盆地 东侧发育众多 OIB 型火山热通道, 如烟墩和涠洲岛 一带,它们是南海地幔柱中雷琼地幔分支的次生地 幔分支和热点,具有直接连通地幔热源与浅层熔融 层和断裂构造系统的作用,形成了以地幔热为主要 供给、以壳内熔融层为传热"中转站",以 OIB 型火 山通道、合浦-梧州韧性剪切带、盆缘断裂为梯级导 热构造系统的火山-盆地地幔柱热对流型资源区。总 体而言,研究区具备良好的干热岩生热、保存条件, 开发利用条件便利, 钦州盆地、西场盆地具有一定厚 度的、稳定的、隔水性好的盖层,热源通道汇集,区域 范围内已有岩浆岩侵入现象,其侵入深度最浅约为 5 km, 可为盆地提供源源不断的热量; 石湾温泉和古 海水温泉即位于西场盆地中(康志强等,2020b;孙明 行等,2022)。因此认为,钦州盆地和合浦盆地(西场 盆地)为桂东南地区寻找干热岩的有利远景区(图8)。

5 结 论

(1)广西桂东南地区大地热流值较高,莫霍面埋 深较浅,具有较高的放射性岩浆岩体,以及仍在活动 的活动断裂和火山;陆相沉积地层广泛发育,隐伏花 岗岩体分布广泛。研究区岩浆的侵入与分布受到防 城-灵山、博白-岑溪断裂带严格控制,研究区及其周 边地区的地热田通过这些深大断裂形成的通道向上 传导而形成;结合软流圈底侵、隆起及区域大断裂的 分布及延伸,认为新生代盆地沉积厚度大、下方存在



Fig. 7 Model map of hot dry rock resource potential in the study area

a一实测、拟合重力异常曲线图;b一中深部大地电磁法二维反演成果图;c一中深部大地电磁法反演推断地质成果图

1003





图 8 研究区干热岩赋存模式图(据孙明行等, 2022)

Fig. 8 Occurrence of the HDR resources in the study area

较大规模隐伏岩体,区域断裂构造延伸深度大,形成了研究区主要的热源通道,"生-运-储-盖"条件优越。

(2)西场盆地干热岩资源量潜力评价及计算结 果显示,盆地的干热岩资源量为182.48×10¹⁵ J,折合 标准煤 622.63×10⁴ t;按 20%的采收率计算,西场盆 地干热岩资源量可开采量为36.5×10¹⁵ J,折合标准 煤 124.53×10⁴ t;分别占 2018 年广西全区能源生产总 量和能源消费总量的3.31%和1.15%。

(3)西场盆地是桂东南地区干热岩地热资源的 有利远景区,值得部署实施进一步的调查勘探 工作。

致谢:项目实施过程中得到广西壮族自治区地 质矿产勘查开发局、广西壮族自治区地质调查院、 吉林大学及众多专家的大力支持与指导; 审稿专家 提出许多宝贵的修改意见和建议; 在此一并表示诚 挚的感谢。

References

- Chen X. 2016. Research on the application of geophysical methods in hot dry rock prospecting[D]. Doctoral Dissertation of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Gan H N, Wang G L, Lin W J, et al. 2015. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J].

Science & Technology Review, 33(19): 22–27 (in Chinese with English abstract).

- Huang Q X. 2018. Analysis of the Potential of dry hot rock resources in Guangxi[J]. Southern Land and Resources, (1): 45–48 (in Chinese with English abstract).
- Kang Z Q, Zhang Q Z, Guan Y W, et al. 2020. Analysis on the occurrence condition of geothermal resources of hot dry rock in Guangxi[J]. Earth Science Frontiers, 27(1): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Kang Z Q, Zhang Q Z, Guan Y W, et al. 2020. Evaluation of thermal conditions and potential of dry hot rock resources in Hepu Basin, Guangxi[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 50(4): 1151–1160 (in Chinese with English abstract).
- Kong F Y, Liang L G. 2005. Evaluation of geothermal geological conditions and geothermal resource development prospects in the Nanning Basin[C]//Proceedings of the National Symposium on Sustainable Development of Geothermal Industry: 125–139 (in Chinese).
- Leng G J, Lei D, Liu X C, et al. 2024. Evaluation of the development potential of hot dry rock in Hainan Island[J]. Natural Gas Industry B, 11(1): 19–27.
- Li D W, Wang Y X. 2015. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth science—Journal of China University of Geosciences, 40(1): 1858–1869 (in Chinese with English abstract).
- Li J H, Yang J, Meng S J. 2018. Status analysis of geophysical exploration for shale oil and gas in Guangxi Province[J]. CT Theory

and Applications, 27(1): 123-136 (in Chinese with English abstract).

- Liang L G, Zhu M Z, Zhu S M, et al. 2015. Spatial distribution and enrichment of fluoride in geothermal water from eastern Guangxi, China[J]. Safety and Environmental Engineering, 22(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Lin W J, Liu Z M, Ma F, et al. 2012. An estimation of HDR resources in China's mainland [J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(5): 807–811 (in Chinese with English abstract).
- Ma F, Lin W J, Lang X J, et al. 2015. Deep geothermal structures of potential hot dry rock resources area in China[J]. Geological Science and Technology Information, 34(6): 176–181 (in Chinese with English abstract).
- Ou X Y, Shi K, Mo Y J, et al. 2021. Application of comprehensive geophysical exploration in shale gas potential investigation in Guizhong depression[J]. Progress in Geophysics, 36(4): 1597–1606 (in Chinese with English abstract).
- Shah M, Yadav K, Sircar A. 2024. Shallow and deep geothermal water sources identification in Unai geothermal field, Gujarat, India with applications of Magnetotelluric (MT)[J]. Unconventional Resources, 4: 100086.
- Spichak V V, Goidina A G, Zakharova O K. 2023. Electromagnetic prediction of rock thermal properties beyond boreholes: Soultz-sous-Forets (France) case study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 216: 1–13.
- Sun M H, Liu D M, Kang Z Q, et al. 2020. Analysis of hot—dry geothermal resource potential in southeastern Guangxi[J]. Earth Science Frontiers, 27(1): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- Sun M H, Zhang Q Z, Liu D M, et al. 2022. Genesis and occurrence models of hot—dry geothermal resources in Guangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 41(3): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Teng J W, Si X, Zhuang Q X, et al. 2019. Fine structures of crust and mantle and potential hot dry rock beneath the Zhangzhou Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(5): 1613–1632 (in Chinese with English abstract).
- Wang G, Cao H, Xiao D, et al. 2023. Geothermal field model in the southeast of Shijiazhuang Region (China) deduced from magnetotelluric data[J]. Journal of Applied Geophysics, 219: 105235.
- Wang G L, Zhang W, Ma F, et al. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China [J]. China Geology, 1(2): 275–283.
- Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & technology review, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Xue J Q, Gan B, Li B X, et al. 2013. Geological—geophysical characteristics of enhanced geothermal systems(hot dry rocks) in GongHe—GuiDe Basin[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 37(1): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Jiang Z H, Yue J H, et al. 2019. Discussion on application of geophysical methods in Hot Dry Rock (HDR) exploration [J]. Progress in Geophysics, 34(4): 1556–1567 (in Chinese with English abstract).

- Zhang J S, Wu G J. 2001. The present state of direct utilization of geothermal resources in the world[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 25(2): 90–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S Q, Jia X F, Li B X, et al. 2018. Characteristics of Wudalianchi volcanic edifice and hot dry rock geophysical field in Heilongjiang Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 42(3): 473–480 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y. 2016. The formation mechanism and development potential of hot dry rock: A case study of Songliao Basin[D]. Master's Thesis of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Zhao X Y, Zeng Z F, Wu Z W, et al. 2015. Delineating the area of HDR in Songliao basin using geophysical methods [J]. Progress in Geophysics, 30(6): 2863–2869 (in Chinese with English abstract).
- Zhou N Y. 2021. Geophysical Exploration of the Hot Dry Rock Resources in the Southeast of Guangxi[D]. Master's Thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhu G Q, Li H L, Wen R X. 2011. Prediction and analysis of deep mineral exploration in Guangxi[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 8(6): 713–722 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈雄. 2016. 地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究[D]. 吉林大学 博士学位论文.
- 甘浩男,王贵玲, 蔺文静, 等. 2015. 中国干热岩资源主要赋存类型与成 因模式[J]. 科技导报, 33(19): 22-27.
- 黄启勋. 2018. 广西干热岩资源潜力分析 [J]. 南方国土资源, (1): 45-48.
- 康志强, 张起钻, 管彦武, 等. 2020a. 广西干热岩地热资源赋存条件分析[J]. 地学前缘, 27(1): 55-62.
- 康志强, 张起钻, 管彦武, 等. 2020b. 广西合浦盆地干热岩资源成热条 件及潜力评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(4): 1151-1160.
- 孔繁业,梁礼革.2005.南宁盆地地热地质条件与地热资源开发前景评价[C]//全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集:125-139.
- 李德威, 王焰新. 2015. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学一中国地质大学学报, 40(1): 1858-1869.
- 李静和,杨俊,孟淑君.2018.桂地区页岩油气地球物理勘探现状及展望[J].CT理论与应用研究,27(1):123-136.
- 梁礼革,朱明占,朱思萌,等.2015.桂东地区地热水中氟的分布及其富 集过程研究[J].安全与环境工程,22(1):1-6.
- 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地 球学报, 33(5): 807-811.
- 马峰, 蔺文静, 郎旭娟, 等. 2015. 我国干热岩资源潜力区深部热结构[J]. 地质科技情报, 34(6): 176-181.
- 区小毅,石科,莫亚军,等.2021.综合地球物理勘探在桂中坳陷页岩气 资源潜力调查中的应用研究[J].地球物理学进展,36(4):1597-1606.
- 孙明行, 刘德民, 康志强, 等. 2020. 桂东南地区干热型地热资源潜力分析[J]. 地学前缘, 27(1): 72-80.
- 孙明行, 张起钻, 刘德民, 等. 2022. 广西干热型地热资源成因机制与赋 存模式[J]. 地质科技通报, 41(3): 1-11.
- 滕吉文,司芗,庄庆祥,等.2019. 漳州盆地精细壳、幔异常结构与潜在

干热岩探讨[J]. 地球物理学报, 62(5): 1613-1632.

- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 25-31.
- 薛建球,甘斌,李百祥,等.2013.青海共和-贵德盆地增强型地热系统 (干热岩)地质-地球物理特征[J].物探与化探,37(1):35-41.
- 杨冶,姜志海,岳建华,等.2019.干热岩勘探过程中地球物理方法技术 应用探讨[J].地球物理学进展,34(4):1556-1567.
- 张季生,吴功建. 2001. 世界直接利用地热资源的现状[J]. 物探与化探, 25(2): 90-101.

张森琦, 贾小丰, 李百祥, 等. 2018. 黑龙江省五大连池火山机构与干热

岩地球物理场特征[J]. 物探与化探, 42(3): 473-480.

- 张杨. 2016. 干热岩形成机理及开发潜力研究——以松辽盆地为例[D]. 长安大学硕士学位论文.
- 赵雪宇,曾昭发,吴真玮,等. 2015. 利用地球物理方法圈定松辽盆地干 热岩靶区[J]. 地球物理学进展, 30(6): 2863-2869.
- 周宁远. 2021. 广西东南部区域干热岩资源的地球物理勘查[D]. 吉林 大学硕士学位论文.
- 朱国器, 黎海龙, 温融湘. 2011. 广西深部找矿特征分析与找矿预测[J]. 工程地球物理学报, 8(6): 713-722.