

doi: 10.12029/gc20220221001

孙明行, 王瑞湖, 梁礼革, 邓宾, 李玉坤, 刘德民, 管彦武. 2023. 广西地热资源特征与潜力评价[J]. 中国地质, 50(5): 1387–1398.
Sun Minghang, Wang Ruihu, Liang Lige, Deng Bin, Li Yukun, Liu Demin, Guan Yanwu. 2023. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Guangxi[J]. Geology in China, 50(5): 1387–1398(in Chinese with English abstract).

广西地热资源特征与潜力评价

孙明行¹, 王瑞湖¹, 梁礼革¹, 邓宾¹, 李玉坤¹, 刘德民², 管彦武³

(1. 广西壮族自治区地质调查院, 广西南宁 530023; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074; 3. 吉林大学地球探测科学与工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:【研究目的】广西地热资源分布广泛, 是一种极具竞争力的低碳可再生清洁能源。目前, 针对广西地热资源赋存规律、分布特征和资源潜力的系统性研究相对薄弱, 在一定程度上制约了广西地热资源的综合性开发和利用。【研究方法】本文基于“十二五”以来广西浅层地温、水热型和干热型地热资源调查评价最新成果, 对广西壳幔圈层结构、现今地温场特征和地热资源分布规律进行系统性分析; 采用不同的资源量估算方法, 分别对浅层地热能资源、水热型地热资源和干热型地热资源的开发利用潜力进行评价。【研究结果】研究表明, 广西地热资源丰富, 发育明显的赋存规律和分区带性特征。其中, 广西浅层地热能资源和水热型地热资源均以直接利用为主要开发方式, 13 个主要城市浅层地热能资源总热容量为 1.23×10^{15} kJ/°C, 年可开采利用资源量为 1.36×10^{12} kJ/a, 折合标准煤 1.67×10^8 t; 广西现有温(热)泉出露点 24 处, 地热开采井 28 口, 地热能资源总量为 2.56×10^{17} kJ, 折合标准煤 87.58×10^8 t; 地热流体年可采热量为 28.89×10^{12} kJ/a, 折合标准煤 315.65×10^4 t。广西干热型地热资源量潜力巨大, 陆域 3~10 km 范围内干热岩资源总量为 55.42×10^4 EJ, 折合标准煤 18.91×10^{12} t, 按 2% 的可采率计算是中国 2020 年一次能源消耗总量(49.8 亿 t) 的 75.94 倍, 是最理想的传统化石能源的接替载体。【结论】广西在传统能源领域“缺煤、少油、乏气”, 但在新能源领域具有“风大、水足、热持久”的优势, 对地热资源的合理开发利用将有助于广西能源结构的优化和产业结构的战略性调整, 助力于中国“双碳”目标的达成。

关键词: 现今地温场异常; 壳幔圈层结构; 资源量估算; 潜力评价; 地热资源调查工程; 广西

创新点: 1) 首次系统性梳理了“十二五”以来广西地热资源调查评价的最新成果, 对广西地热资源赋存规律和分布特征进行系统性研究; 2) 采用不同的资源量估算方法, 对广西浅层地热、水热型和干热型地热资源的开发利用潜力进行综合性评价, 为广西地热资源的总体规划和综合开发奠定了基础。

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1387-12

Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Guangxi

SUN Minghang¹, WANG Ruihu¹, LIANG Lige¹, DENG Bin¹,
LI Yukun¹, LIU Demin², GUAN Yanwu³

收稿日期: 2022-02-21; 改回日期: 2022-03-10

基金项目: 广西关键矿产资源调查项目([2019] 85, 2019–2023)和广西合浦盆地热干岩地热资源调查项目([2021] 23)联合资助。

作者简介: 孙明行, 男, 1989 年生, 工程师, 主要从事区域地质和矿产调查工作; E-mail: smhxddy@163.com。

通讯作者: 邓斌, 男, 1965 年生, 高级工程师, 从事区域地质和矿产调查工作; E-mail: 416069109@qq.com。

(1. *Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, Guangxi, China*; 2. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*; 3. *College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China*)

Abstract: This paper is the result of geothermal resources survey engineering.

[Objective] In Guangxi, the geothermal resource is extensively distributed, and is a competitive low-carbon, renewable and clean energy. Up to now, the systematic research on the occurrence regulation, distribution characteristics and potential of geothermal resources is relatively weak, to a certain extent, which restricts the comprehensive development and utilization in Guangxi. **[Methods]** In this paper, we systematically analyzed the structure of the crust and mantle layer, the present characteristics of the geothermal field and the distribution pattern of geothermal resources, based on the latest results of the survey and evaluation of shallow geothermal, hydrothermal and hot dry rock geothermal resources in Guangxi since the “Twelfth Five-Year Plan”. And we chose different methods to evaluate the development and utilization potential of shallow geothermal energy resources, hydrothermal geothermal resources and hot dry rock geothermal resources. **[Results]** The research shows that the geothermal resources are rich in Guangxi, with obvious occurrence rules and zoning characteristics. In 13 major cities, the shallow and hydrothermal geothermal resources are mainly developed through direct utilization, and the shallow geothermal resources are 1.23×10^{15} kJ/°C, the annual exploitable resources are 1.36×10^{12} kJ/a, equivalent to 1.67×10^8 t standard coal. And 24 warm (hot) springs points and 28 geothermal mining wells locating in Guangxi, the total amount of geothermal energy resources is 2.56×10^{17} kJ, which is equivalent to 87.58×10^8 t of standard coal. On the other hand, the annual recoverable heat of geothermal fluid is 28.89×10^{12} kJ/a, which is equivalent to 315.65×10^4 t of standard coal. Finally, the potential of dry hot geothermal resources is great in Guangxi, within 3–10 km of the land area, the total amount of hot dry rock resources is 55.42×10^4 EJ, which is equivalent to 18.91×10^{12} t of standard coal, at a recoverable rate of 2% which is 75.94 times the 2020 Chinese primary energy consumption (4.98 billion tons). Therefore, it is becoming the most ideal replacement carrier for traditional fossil energy. **[Conclusions]** Guangxi is lack of coal, oil and gas in the traditional energy field, and has rich wind, water and heat in the new energy field. The rational development and utilization of geothermal resources will contribute to the optimization of energy structure and the strategic adjustment of industrial structure in Guangxi, and help to achieve the “dual carbon goal”.

Key words: present anomaly of geothermal field; crust-mantle layer structure; resource estimation; potential evaluation; geothermal resources survey engineering; Guangxi

Highlights: (1) For the first time, we systematically sorted out the latest results on the survey and evaluation of geothermal resources since the “Twelfth Five-Year Plan”, and systematically studied the occurrence law and distribution characteristics of geothermal resources in Guangxi; (2) We chose different methods to estimate the resources, carried out comprehensive evaluation of the shallow geothermal, hydrothermal and hot dry rock geothermal resources for the development and utilization potential, which has laid a foundation for the overall planning and comprehensive development of geothermal resources in Guangxi.

About the first author: SUN Minghang, male, born in 1989, engineer, engaged in regional geological and mineral investigation work; E-mail: smhgxddy@163.com.

About the corresponding author: DENG Bin, male, born in 1965, senior engineer, engaged in regional geological and mineral investigation work; E-mail: 416069109@qq.com.

Fund support: Supported by the Talents Small Highland Project of Key Mineral Resources Deep Prospecting in Guangxi (Guizhou Tongzi [2019] No.85, 2019–2023) and Hepu Basin Hot Dry Rock Geothermal Resources Survey Project in Guangxi (Guidi Kuangdi [2021] No. 23).

1 引言

根据 Our World in Data (2021a) 最新能源数据, 地热能与太阳能、风能、水能、生物质能、海洋能约

占 2019 年全球一次能源消耗总量的 11.4% (中国 12.7%), 可并称为全球 6 大可再生能源。中国地热资源开发利用历史悠久, 早在先秦《山海经》已有记载, 《温泉碑》《山经注》《本草纲目》对其药用价

值均有记录。近30年间,中国中、低温地热能的直接利用蝉联世界第一,浅层地热“三联供”装机容量仅次于美国(汪集暘等,2015);中国在地热发电领域起步较早,自1970年相继在广东丰顺、河北怀来和江西宜春等地建成中低温地热发电站,1977年在西藏羊八井建成第一座中高温地热发电站,到1991年总装机容量达25.18 MW。1990—2020年,随着全球高温地热发电装机容量由5853.5 MW增至14075.0 MW,中国却呈下降趋势(由29.30 MW降至26.00 MW),目前仅占世界总装机容量的1.8%,发展缓慢(Huttrer, 2020; Our World in Data, 2021b)。

2020年,世界各国相继通过立法或规划、战略的制定,将“碳达峰”“碳中和”提上日程,成为可持续发展、绿色低碳发展新潮流。2020年9月,国家主席习近平提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”,意味着中国需要用西方国家(1990—2050年)一半的时间(2030—2060年)来实现“双碳”目标。自第一次工业革命以来,化石燃料(煤炭、石油、天然气)逐渐成为全球一次能源消耗的主要载体,排放出约四分之三的温室气体(Our World in Data, 2021a)。马冰等(2021)认为“双碳”目标的达成必须依赖于能源结构的战略性调整,转向低碳能源(可再生能源和核能)。

地热能作为低碳可再生资源的重要组成部分,按地质构造、热流传输方式、温度及开发利用方式,可划分为浅层地热能资源、水热型地热资源和干热型地热资源等3类(White and Williams, 1975; Wang et al., 2018),拥有巨大的发展潜力和市场空间。“十二五”期间地热资源调查评价结果显示,中国每年可采水热型地热资源量折合18.65亿t标准煤,336个地级以上城市浅层地热能资源每年可采资源量折合7亿t标准煤(蔺文静等, 2013; 王贵玲等, 2017),分别占中国2020年一次能源消耗总量(49.8亿t标准煤)的51.5%和14.1%。据估算,中国陆域3~10 km范围干热型地热资源总量可达 $20.9 \times 10^6 \sim 25.2 \times 10^6$ EJ,相当于714~860万亿t标准煤(蔺文静等, 2012; 汪集暘等, 2012),是中国2020年一次能源消耗总量的 $1.4 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5$ 倍,拥有巨大的高温发电潜力(Zhao et al., 2011; 孙明行等, 2022b)。

广西传统化石能源短缺、“风光水热”清洁能源丰富,素有“缺煤、少油、乏气”、“风大、水足、热持

久”的能源结构特点。地热资源作为“本土”能源,具有弥补传统化石能源缺口的潜力,是广西能源结构低碳转型的重要载体。然而,广西地热资源的总体勘查程度不高,家底不清,针对其赋存规律、分布特征和资源潜力的系统性研究相对薄弱,这在一定程度上制约了广西地热资源的综合性开发和利用。本文对中国地质调查局“十二五”期间组织实施的广西主要城市浅层地温调查、广西地热资源调查评价与区划成果进行总结,并结合近年来所开展的广西干热型地热资源远景调查与分级评价的最新成果,对广西地热资源的分布规律、地温场特征、地热资源开发利用潜力进行评估,以期为广西地热资源的开发利用规划、能源结构、产业结构战略性调整提供科学支撑。

2 地热资源分布规律及特征

2.1 广西地热资源分布规律

地热资源是指在当前经济技术条件下,能够被人类开发利用的地球内部热过程全部产物。国家能源局(2019)制定地热能行业标准(NB/T 10097-2018),浅层地热能一般是指埋深200 m范围内,储存于水体、土体、岩石中的温度低于25℃,采用热泵技术可提取用于建筑物供热或制冷的地热能;水热型地热资源赋存于天然地下水及其蒸汽中的地热能;干热岩是指不含或仅含少量流体,温度高于180℃,其热能在当前技术经济条件下可以利用的岩体。

目前,广西地热资源的开发方式主要为通过地源热泵技术、人工钻井技术对浅层地热能资源和水热型地热资源的直接利用(广西壮族自治区地质调查院, 2015a, b);深层干热型地热资源尚处于勘查和评价的起步阶段,仅部分学者对远景区的赋存条件、成因模式和资源潜力进行初步评价(蔺文静等, 2013; 王贵玲等, 2017; 康志强等, 2020; 孙明行等, 2020, 2022a, b)。

根据构造、水文地质条件和热量传递机制(Muffler, 1976),将广西水热型地热资源初步划分为隆起山地对流型和沉积盆地传导型两类,具有明显的分区、分带性(图1)。据统计,广西现有温(热)泉/井52处,均属于中低温型(26.3~83.4℃),主体分布于桂东北、桂东南,少量零星分布于桂西北、桂西

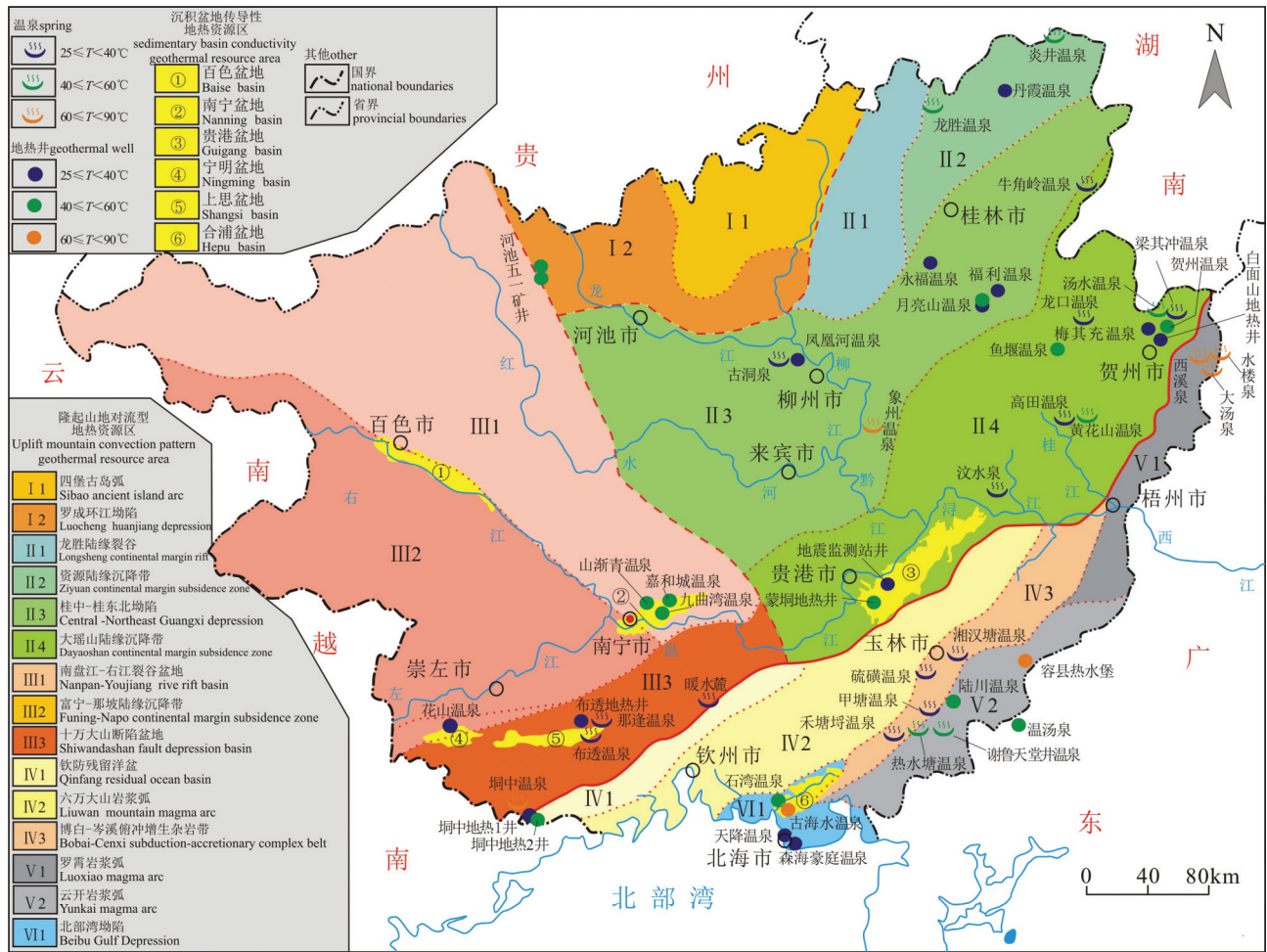


图1 广西浅层地热能及水热型地热资源分布图

Fig.1 Distribution of shallow geothermal energy and hydrothermal geothermal resources in Guangxi

南。其中,热水资源($60 \leq T < 90^\circ\text{C}$)主要分布于防城港峒中、贺州南乡、玉林容县一带;温热水资源($40 \leq T < 60^\circ\text{C}$)主要分布于桂林龙胜、全州一平乐、贺州黄山一里松一昭平、玉林陆川一博白一容县、南宁、河池南丹一带;温水资源($25 \leq T < 40^\circ\text{C}$)主要分布于桂林资源一灌阳一阳朔、贵港、柳州、玉林博白一带。

浅层地热能和深层干热型地热资源具有普遍分布的特点(West and Shankland, 2013; 王贵玲等, 2017),前者赋存于200 m以浅的水体、土体、岩石中,温度低于 25°C ;后者埋深一般 $> 3 \text{ km}$,赋存于不含或仅含少量流体的岩体中,温度高于 150°C 。其中,广西浅层地热资源分布具有明显的区域性特点,主体分布于河流冲积层(融江、柳江、右江、郁江及南流江等大河谷)、洞穴堆积层(碳酸盐岩分布

区)、残坡积黏土层(桂林、柳州等地势平缓的溶蚀山坡)、冲积—洪积黏土层(来宾低洼地段);其次分布于海陆交互相沉积层,主要为北海、钦州、防城港一带的海滨区和部分河流三角洲区域。

通过对毛翔等(2019)列述的20世纪70年代以来全球14个国家的33个典型干热岩/EGS项目的构造背景进行统计分析,11处位于褶皱带、火山带,22处位于各类(中—新生代)盆地,且均发育 $> 1 \text{ km}$ 的保温盖层。中国青海共和干热岩示范区位于新生代陆内盆地中,钻探结果证实盆内新生代碎屑岩盖层厚度介于1500~6000 m(唐显春等, 2020)。孙明行等(2020, 2022a)基于广西区域性资料和最新勘查成果认为,桂东南地区发育理想的壳、幔结构和构造—岩浆—沉积建造系统,为干热岩的孕育提供充分、必要的“生、运、储、盖”条件;尤其是合浦、钦州

中—新生代断陷盆地,拥有良好的动态热源(次级幔枝/热点、局部熔融层)、幔源热流物质上涌通道、隐伏花岗岩岩基和中—新生代碎屑岩沉积盖层,是广西干热型地热资源最具潜力的区域。另外,孙明行等(2022b)对广西陆域3~10 km范围内干热型地热资源($\geq 150^{\circ}\text{C}$)进行估算,其资源总量为 $55.42 \times 10^4 \text{ EJ}$,折合 $18.91 \times 10^{12} \text{ t}$ 标准煤;桂东南地区占广西资源总量25.63%,并集中分布于十万大山—南宁盆地、钦州—合浦—石康盆地和博白—玉林盆地等3个中—新生代断陷盆地中,按2%的可采资源量计算,折合标准煤 $260 \times 10^8 \text{ t}$,是中国2020年一次能源消耗总量的5.22倍。

2.2 广西地热资源分布特征

2.2.1 浅层地温场及现今热流特征

地壳浅层地温受太阳周期性辐射强度和地球内部热源(上地壳放射性生热、地核和地幔内热)双重影响,这种稳态和非稳态热场的叠加使得地温纵向分布上具有分带(层)性。自地表至地壳浅部某一深度范围内,地温受太阳辐射强度的影响而具有周期性变化,称为变温带;在一定深度以下,地温的变化主要受地球内热影响,随深度增加而不断增温,称为增温带。其中,在变温带与增温带之间部位,地温受内、外部热源的影响接近于消失的临界状态,即地温常年保持恒定,称为恒温层/带。恒温层的埋深一般较薄(15~30 m),温度值等于或略高于当地年平均气温(汪集暘,2015)。

广西自北向南划分为中亚热带、南亚热带和北热带3个气候带,其中北热带主要包括东兴市、北海市区、合浦县山口镇、沙田镇等地,中、南亚热带以梧州北、平南北、武宣、宾阳、上林、马山、都安、巴马至田林一线为界(图2a)。基于广西主要城市浅层地温能开发区1:5万水文地质调查成果(广西壮族自治区地质调查院,2015a),广西恒温层埋深主体介于10~20 m,平均厚度为6 m,温度介于 $22.11 \sim 33.46^{\circ}\text{C}$,平均为 24.51°C ,高于2020年气温平均值 21.2°C (广西壮族自治区气候中心,2021)。

通过自南部热带至北部亚热带浅层地温场剖面对比研究,南部热带区(北海市)恒温层埋深普遍比北部亚热带区浅,恒温层温度则偏高约 10°C ;南部碎屑岩区恒温层厚度(3~7 m)比北部碳酸盐岩区(5~10 m)略薄(图2b)。另外,根据康志强等(2020)发布的广西典型中深孔地温监测统计数据,碳酸盐岩区风化及沉积盖层较薄,导致散热快、地温梯度低,一般介于 $0.15 \sim 1.5^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$;第四系松散层—碎屑岩区、岩浆岩区的盖层较发育,起到隔热保温作用,地温梯度一般介于 $2.8 \sim 4.56^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$,略高于碳酸盐岩区(表1)。

王均等(1990)认为广西现今大地热流的分布具有东高西低的特征,桂东南地区位于海南—南宁地热异常高值区,现今大地热流值一般介于 $80 \sim 100 \text{ mW}/\text{m}^2$,高于中国大陆地区大地热流平均值($61 \pm 15.5 \text{ mW}/\text{m}^2$)(袁玉松等,2006);地温梯度大于 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$,与华北的

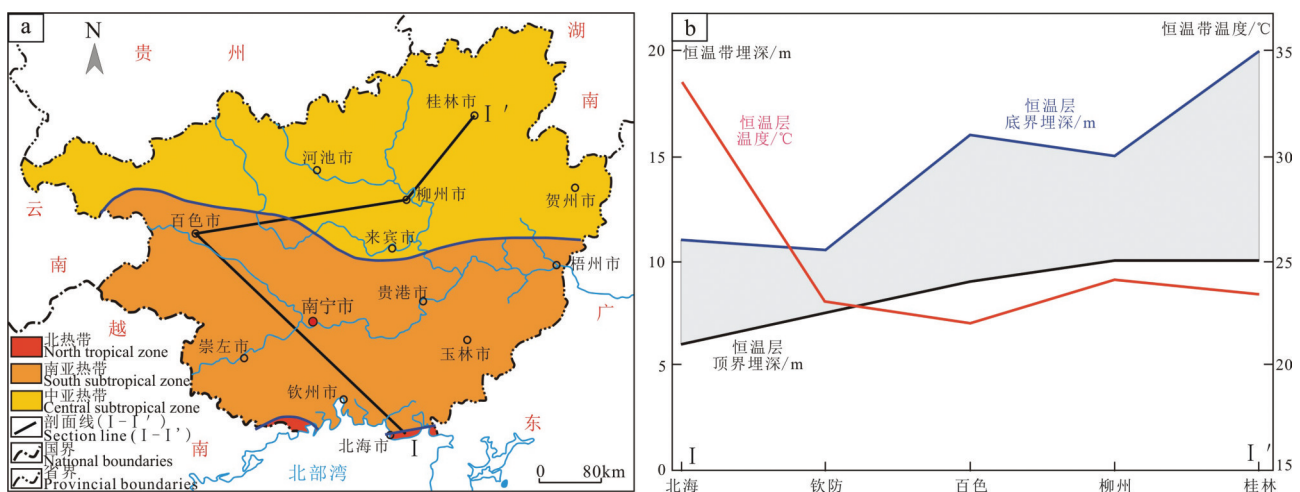


图2 广西气候分带及浅层地温场剖面位置(a)和恒温带典型剖面(b)

Fig.2 The distribution of climate zones and section position of shallow geothermal field(a) and typical section of constant temperature zones(b) in Guangxi

表1 广西典型中深孔地温监测统计(据康志强等,2020修编)

Table 1 Statistical table of ground temperature monitoring in typical in middle and deep holes in Guangxi(modified from Kang Zhiqiang et al., 2020)

| 气候带 | 观测点号 | 位置 | 测温深度/m | 恒温带埋深/m | 恒温带温度/°C | 孔底温度/°C | 地温梯度/(°C/100 m) | 热储岩性 |
|----------|-------|--------------|--------|---------|----------|---------|-----------------|----------------|
| 中亚 | GLZK1 | 桂林市三塘秦村机井 | 0~60 | 10~20 | 23.55 | 23.61 | 0.15 | 碳酸盐岩 |
| 热带 | LZZK1 | 柳州市鱼峰区北岸村机井 | 0~70 | 10~15 | 24.00 | 24.66 | 1.50 | |
| 南亚 热带 | BSZK1 | 百色市园博园北50 m | 0~70 | 8~12 | 24.42 | 26.12 | 2.83 | 第四系松散 层—碎屑岩 |
| | BSZK2 | 百色市半岛公园内 | 0~120 | 7~14 | 23.41 | 26.52 | 3.11 | |
| | BSZK3 | 百色市龙景高中东30 m | 0~200 | 7~12 | 24.21 | 29.53 | 2.80 | |
| | BSZK4 | 百色市上芹村西100 m | 0~200 | 14~26 | 23.40 | 28.2 | 4.56 | |
| | QZZK1 | 钦州市钦南区沙埠镇邱屋 | 0~200 | 2~5 | 22.21 | 27.72 | 2.83 | |
| | FCZK1 | 防城港市防城区旱水田 | 0~75 | 13~16 | 24.32 | 26.20 | 3.19 | |
| | WZZK1 | 梧州市龙圩区大寿村 | 0~200 | — | 22.11 | — | 2.22 | 岩浆岩 |
| 北热带 | BHZK1 | 北海市海洋地质研究所院内 | 0~200 | 6~11 | 33.46 | 35.37 | 1.4 | 第四系松散 层—碎屑岩 |

注:“—”为未统计数据。

地温梯度(33~35°C/km)、松辽盆地(38°C/km)相当,稍高于中国西部的塔里木盆地(20°C/km)和准噶尔盆地(22.6°C/km)(王均等,1990)。

2.2.2 圈层结构及深部地温场特征

广西岩石圈结构具有南、南东浅,向北、北西逐渐加深的变化趋势,且在不同深度(25 km之上和6~8 km处)分别发育厚约6 km和2 km的双层低速层/带,指示滑脱型韧性剪切或高温地质体(广西壮族自治区区域地质调查研究院,2017)。孙明行等(2020)认为桂东南发育区域上最薄的圈层结构,结晶基底面、康氏面、莫氏面的最小埋深分别为5 km、14 km、29.5 km;桂西北圈层结构则较厚,上述结构面埋深分别为20 km、37 km、44 km。康志强等(2020)、孙明行等(2022b)分别基于广西1:100万航磁测量数据,采用Parker-Oldenburg方法进行居里面(CPD)埋深反演。结果显示,广西陆域居里面埋深具有深、浅相间的分布格局,可圈定桂北四堡古岛弧(融水—元宝山一带)、桂南钦防结合带、北部湾凹陷(北海—钦州—南宁一带)、桂西南盘江—右江裂谷盆地(西林—隆林一带)和桂东北大瑶山陆缘沉降带、罗霄岩浆弧(梧州—昭平一带)等4个浅异常带,埋深介于20~22 km。地温梯度分布规律与居里面埋深特征高度一致性,以钦州—合浦盆地地温梯度最高(29°C/km)。

孙明行等(2022b)对广西陆域3~10 km范围内的埋藏地温进行估算,4 km以浅的地温值均低于

150°C;5 km断面上,北海—钦州—南宁一带、梧州—昭平一带埋藏地温开始出现150°C高温区,并在6 km埋深断面超过180°C;7 km埋深,广西全区地温均超过150°C,≥180°C的高温区占比约62%;随深度增加,地温逐渐升高,8~10 km全区埋藏地温均超过180°C,最高温度达310°C±。

3 广西地热资源潜力

广西处于滨太平洋与特提斯—喜马拉雅构造域复合部位,同时受南海扩张和南海地幔柱的联合控制,构造—岩浆—成矿作用极为广泛(王登红等,2020)。研究区先后经历古元古代基底形成(许效松等,2012)、中元古代—早古生代洋陆转换及扬子陆块增生(彭松柏等,2016)、泥盆纪—三叠纪华南陆块演化(宋博等,2013)、晚三叠世—第四纪陆内盆山演化(李三忠等,2019)等4个阶段,形成独具特色的隆、坳相间构造格局(广西壮族自治区区域地质调查研究院,2017)。这种因差异性流变所形成的基底正向(隆起、背斜)、负向(坳陷、向斜)构造(汪集暘,2015)和各地质体热导率的各向差异性(熊亮萍和高维安,1982),导致深部热流在向浅部传递的过程中发生折射效应和再分配,优先向具有较高热导率的隆起区和断裂导热系统较发育的区域聚集(孙明行等,2022a)。

3.1 地热资源潜力评价方法

通过对广西13个主要城市的浅层地热能资源

进行开发利用方式适宜性分区,进而对浅层地热能容量和换热功率进行计算。首先,采用容积法对200 m以浅埋管热泵系统和地下水源热泵系统适宜、较适宜区的包气带和饱水带静态热储量分别进行估算;然后,通过换热量现场测试或水量折算法进行换热功率计算。当同时满足上述两种热泵工程系统建设时,采用埋管换热功率的2/3和地下水换热功率的1/3进行总换热功率换算。

广西水热型地热资源以隆起山地对流型为主,沉积盆地热传导型次之。本文甄选地热田或地热异常区热储体的面积、厚度、温度和比热容参数,通过热储法对水热型地热资源进行估算。其中,隆起山地型地热资源多为温(热)泉/井,以断裂构造圈闭/半圈闭区域作为热储体面积,以25℃作为温度下限,分别对地热能资源量和地热流体可开采流量、热量进行估算;沉积盆地热传导型地热资源主要分布于南宁、合浦、桥圩、百色、宁明、上思等6大盆地,本次主要对埋深4 km以浅、井口温度>40℃,单井出水量>20 m³/h的地热能(可采)资源量、(考虑回灌条件)地热流体可开采流量和热量进行估算。

广西干热型地热资源埋藏较深,鉴于现阶段高温钻井工艺、成井技术、耐热材料及经济成本,本文基于区域1:100万航磁测量数据,在对居里面(CPD)埋深和地温梯度进行反演的基础上,甄选热储体/层的密度、比热容等参数,采用体积法对广西陆域3~10 km范围内的干热型地热资源进行初步估算。

3.2 地热资源潜力

3.2.1 浅层地热能资源

根据广西主要城市浅层地温调查成果(广西壮族自治区地质调查院,2015a),广西13个主要城市的浅层地热能资源重点规划区面积为2514.09 km²。根据“以地质条件为基础,水文地质条件为依托,热泵应用技术为媒介,经济效益与环境保护并重,平面划分与垂向控制相结合”的适宜性分区原则,地下水源热泵系统适宜区占总评价面积的44.15%,较适宜区占26.82%,集中在富水性好、回灌能力强的地区(桂林、柳州、玉林、贵港、来宾、崇左等碳酸盐岩区);埋管热泵系统适宜区占总评价面积的33.03%,较适宜区占47.80%,少量地区(河池、贺州)因施工难度大、建设成本高而不适宜。

广西浅层地热能资源主要赋存于200 m以浅的

岩土体骨架和地下水中,开发利用方式主要为夏季制冷和分布式供热。广西13个主要城市重点规划区的浅层地热能总热容量为 1.23×10^{15} kJ/℃,地下水源热泵系统换热功率为 5.23×10^7 kW,埋管地源热泵系统换热功率为 4.19×10^8 kW,总换热功率为 4.65×10^8 kW,年可利用资源量为 1.36×10^{12} kJ/a,折合标准煤 1.67×10^8 t(表2)。

3.2.2 水热型地热资源

根据广西地热资源调查评价与区划成果(广西壮族自治区地质调查院,2015b),广西现有自然泉点24处、地热井28口,流量高于5 L/s的23处(占44.2%),均属中一低温型(26.3~83.4℃)。其中,隆起山地对流型46处,地热能资源总量为 9.32×10^{15} kJ,折合标准煤 3.18×10^8 t;地热流体可采量为 1.22×10^7 m³/a,可采热量为 1.07×10^{12} kJ/a,折合标准煤 3.65×10^4 t(表3)。沉积盆地传导型6处,地热能资源总量为 24.63×10^{16} kJ,折合标准煤 8.44×10^9 t;地热能资源可开采量为 4.46×10^{16} kJ,折合标准煤 1.52×10^9 t;地热流体储量为 5.37×10^{11} m³,每年可开采量为 16.48×10^7 m³/a,可开采热量为 27.89×10^{12} kJ/a,折合标准煤 3.12×10^6 t;在考虑回灌条件下,地热流体每年可开采量为 19.21×10^8 m³/a,可开采热量为 36.50×10^{13} kJ/a,折合标准煤 12.50×10^6 t(表4)。

3.2.3 干热型地热资源

藺文静等(2012)、汪集暘等(2012)对中国大陆3~10 km范围内的干热型地热资源进行估算,总量介于 $20.9 \times 10^6 \sim 25.2 \times 10^6$ EJ,折合 $715 \times 10^{12} \sim 856 \times 10^{12}$ t标准煤,其商业化开采可释放数千兆瓦的电力(Bronicki, 2016),并可进行热水的梯级综合利用(Duchance, 1996; Lund and Boyd, 2016)。本文采用体积法对广西陆域3~10 km范围内高于150℃的干热型地热资源进行初步估算。

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_h - T_0)$$

其中, Q —干热型地热资源量(J); ρ —热储密度(kg/m³); C_p —热储比热容(J/kg·℃); V —热储体积(m³); T_h —埋深为h/m的热储温度(℃); T_0 —恒温层温度(℃)。

根据王谦身等(2017)完成的内蒙满都拉—广西凭祥超长重力探测剖面,3~5 km平均密度取值为2.61 g/cm³,5~8 km平均密度取值为2.68 g/cm³,8~10 km平均密度取值为2.7 g/cm³;根据汪集暘

表2 广西13个主要城市浅层地热能热容量、换热功率计算汇总
 Table 2 Summary of the calculation of heat capacity and heat transfer rate of shallow geothermal resources in 13 major cities in Guangxi

| 序号 | 资源评价区 | 评价区总面积/km ² | 开发利用适宜区面积/km ² | 地下水源热泵系统分区/km ² | | | | 地埋管热泵系统分区/km ² | | | | 浅层地热能资源热容量/(10 ¹² kJ/°C) | | | | 浅层地热能换热功率/10 ⁶ kW | | | |
|----|-------|------------------------|---------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|---------------------------|--------|---------|-------|-------------------------------------|--------|--------|-------|------------------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | 适宜 | 较适宜 | 不适宜 | 不适宜 | 适宜 | 较适宜 | 不适宜 | 不适宜 | 总容量 | 岩土体热容量 | 地下水热容量 | 热泵系统 | 地埋管系统 | 总功率 | 年可开采热量/(10 ⁸ kJ/a) | 按每天8小时计算折合标准煤/(10 ⁴ t/a) |
| 1 | 北海市 | 160 | 148.52 | 51.5 | 98.41 | 10.09 | 88.6 | 65.87 | 5.53 | 84.9 | 63.5 | 21.3 | 7.09 | 39.97 | 47.1 | 4.95 | 1.69 | | |
| 2 | 桂林市 | 475 | 442.37 | 277.95 | 158.28 | 38.77 | 325.96 | 0 | 149.04 | 262 | 204 | 57.9 | 9.15 | 82.8 | 92 | 9.67 | 3.30 | | |
| 3 | 柳州市 | 370 | 349.68 | 181.88 | 165.47 | 22.65 | 0 | 295.66 | 74.34 | 150 | 131 | 18.1 | 6.74 | 62.4 | 69.2 | 7.27 | 2.48 | | |
| 4 | 玉林市 | 185 | 180.66 | 143.23 | 0 | 41.77 | 31.35 | 139.43 | 14.22 | 127 | 102 | 25 | 3.28 | 7.98 | 11.2 | 1.18 | 0.40 | | |
| 5 | 贵港市 | 155 | 145.63 | 146.74 | 3.08 | 5.18 | 11.66 | 138.17 | 5.17 | 79.8 | 70.5 | 9.28 | 2.76 | 25.49 | 28.6 | 3.01 | 1.03 | | |
| 6 | 贺州市 | 84.09 | 84.09 | 61.39 | 18.31 | 4.39 | 0 | 62.52 | 21.57 | 47.3 | 38.2 | 9.1 | 1.38 | 12.63 | 14 | 1.47 | 0.50 | | |
| 7 | 来宾市 | 110 | 95.36 | 105.61 | 0 | 4.39 | 0 | 105.61 | 4.39 | 47.8 | 44 | 3.84 | 2.05 | 19.3 | 21.4 | 2.25 | 0.77 | | |
| 8 | 河池市 | 135 | 131.12 | 0 | 130.18 | 4.82 | 0 | 45.31 | 89.69 | 70.8 | 61.2 | 9.56 | 5.82 | 33.57 | 39.4 | 4.14 | 1.41 | | |
| 9 | 崇左市 | 100 | 96.97 | 59.64 | 35.83 | 4.53 | 1.38 | 95.39 | 3.23 | 49.1 | 44.1 | 5.04 | 3.67 | 17.27 | 21 | 2.21 | 0.75 | | |
| 10 | 百色市 | 125 | 115.04 | 29.83 | 0 | 95.17 | 91.95 | 26.42 | 6.63 | 65.3 | 50.2 | 13.1 | 4.74 | 23.32 | 28.1 | 2.95 | 1.01 | | |
| 11 | 钦州市 | 230 | 149.45 | 0 | 51.81 | 178.19 | 156.54 | 51.07 | 22.39 | 87 | 69.5 | 19 | 2.42 | 36.4 | 34.8 | 3.66 | 1.25 | | |
| 12 | 防城港市 | 160 | 148.52 | 0 | 12.83 | 147.17 | 91.05 | 11.63 | 57.32 | 49.8 | 35.5 | 14.3 | 2.86 | 14.91 | 17.7 | 1.86 | 0.63 | | |
| 13 | 梧州市 | 225 | 190.18 | 52.09 | 0 | 172.91 | 32.03 | 164.66 | 28.31 | 107.23 | 81.8 | 24.32 | 0.35 | 42.53 | 40.8 | 4.29 | 1.46 | | |
| | 合计 | 2514.09 | 2277.59 | 1109.86 | 674.2 | 730.03 | 830.52 | 1201.74 | 481.83 | 1228.03 | 995.5 | 229.84 | 52.31 | 418.57 | 465.3 | 48.91 | 16.69 | | |

表3 广西主要隆起山地型地热资源评价
Table 3 Evaluation of geothermal resources of main uplifted mountains in Guangxi

| 序号 | 隆起山地型 地热资源区 | 地热能资源 | | 地热流体 | | |
|----|----------------|-----------------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|-------------------------|
| | | 资源量 /10 ¹⁴ kJ | 折合标准 煤/10 ⁸ t | 年可开采量/ (10 ⁶ m ³ /a) | 年可开采热量/ (10 ¹⁰ kJ/a) | 折合标准煤/10 ⁴ t |
| 1 | 九万大山隆起 | 2.73 | 0.09 | 0.36 | 0.40 | 0.01 |
| 2 | 龙胜褶皱带 | 9.11 | 0.31 | 16.99 | 16.99 | 0.58 |
| 3 | 来宾凹陷 | 6.07 | 0.21 | 4.39 | 2.95 | 0.10 |
| 4 | 桂林弧形褶皱带 | 3.49 | 0.12 | 0.53 | 0.17 | 0.01 |
| 5 | 海洋山凸起 | 6.01 | 0.21 | 0.64 | 0.34 | 0.01 |
| 6 | 大瑶山隆起 | 23.44 | 0.80 | 27.00 | 21.67 | 0.74 |
| 7 | 西大明山凸起 | 1.91 | 0.07 | 1.86 | 1.38 | 0.05 |
| 8 | 十万大山断陷 | 14.52 | 0.50 | 15.30 | 8.37 | 0.29 |
| 9 | 那梭—灵山断褶带 | 1.76 | 0.06 | 1.37 | 0.26 | 0.01 |
| 10 | 六万大山凸起 | 2.87 | 0.10 | 2.88 | 0.84 | 0.03 |
| 11 | 博白断褶带 | 5.94 | 0.20 | 6.22 | 6.58 | 0.22 |
| 12 | 云开隆起 | 14.65 | 0.50 | 31.49 | 26.17 | 0.89 |
| 13 | 鹰扬关褶皱带 | 8.18 | 0.28 | 9.34 | 19.84 | 0.68 |
| | 合计 | 93.2 | 3.18 | 122 | 107 | 3.65 |

(2015)借助全球地震速度模型(PREM)建立的地球各圈层的热力学参数和温度系统,3~10 km范围硅铝质上地壳的比热容统一取值为1168 J/(kg·°C);根据广西地热资源调查评价与区划研究成果(广西壮族自治区地质调查院,2015b),恒温层的埋深统一取值为16 m,恒温层平均温度统一取值为23°C;借鉴固体矿产资源储量估算的几何断面法(叶松青和李守义,2011),进行不同埋深热储体积的估算。另外,基于广西1:100万航磁测量数据,采用Parker-Oldenburg法对广西陆域居里面的埋深进行反演,居里温度取值为580°C,进而计算不同区域的地温梯度和埋藏地温(孙明行等,2022b)。

估算结果显示,广西陆域3~10 km范围内的干热型地热资源总资源量为55.42×10¹⁴EJ,折合标准煤18.91×10¹²t,占全国干热岩资源总量的2.20%~2.65%(表5)。若按2%的可开采资源量计算,是中国2020年一次能源消耗总量(49.8亿t标准煤)的75.94倍,具有巨大的高温发电和综合性梯级利用潜力,是传统化石能源最佳的低碳可再生替代载体。

4 广西地热资源开发利用现状和建议

广西地热资源开发利用历史悠久,早在唐朝武德年间,陆川县有“温泉县”“温水郡”之称,陆川温

泉已位列中国八大温泉之一。20世纪90年代之前,广西地热资源多为民间对天然温(热)泉简单的生活利用;之后,随着经济高速发展,能源短缺、环境恶化等问题逐渐突显,对地热资源的开发利用需求加大,全区掀起“向地球要热”的高潮。广西浅层地热能主要通过地源热泵技术用于学校、医院及一些企事业单位的空调制冷、制供热水;水热型地热资源多为中低温型,以直接利用为主,主要包括温泉旅游、医疗保健、休闲娱乐、洗浴、游泳、农业灌溉及育种育秧、水产养殖、烘干、漂染、矿泉水生产、房地产开发等领域。改革开放以来,随着旅游市场需求高涨,广西逐渐形成以温(热)泉开发为龙头,融合旅游、度假、休闲、保健、娱乐和房地产多链条的“温泉经济圈”,主要包括南宁市嘉和城、九曲湾综合体,桂林市龙胜、资源、永福温泉乡,玉林市容县天堂山温泉度假山庄等十余处。

另外,来宾象州、贺州南乡等地热异常区,温(热)泉/井深部热储体推断温度最高可达154.5°C,具有一定发电潜力。早在20世纪70年代,曾针对象州热水村开展高温(121°C)热水试发电研究,虽未取得成功,但积累了一定经验。广西干热型地热资源远景广阔,陆域3~10 km范围内干热岩资源总量约55.42×10¹⁴EJ,热储温度以200~250°C为主,主体赋存于6~10 km,占资源总量的50.24%,拥有巨大

表4 广西主要沉积盆地地热资源评价

Table 4 Evaluation of geothermal resources of main sedimentary basins in Guangxi

| 序号 | 沉积盆地 地热资源区 | 地热能源 | | | | 地热流体 | | | | 地热流体(考虑回灌条件) | | |
|----|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|------------------------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------|
| | | 资源量 (10 ⁶ kJ) | 折合标准 煤/10 ⁹ t | 年可开 采量/10 ⁶ kJ | 折合标准 煤/10 ⁹ t | 资源量 /10 ¹¹ m ³ | 年可开采量/ (10 ⁷ m ³ /a) | 年可开采热量/ (10 ¹² kJ/a) | 折合标准煤/ 10 ⁶ t | 年可开采量/ (10 ⁸ m ³ /a) | 年可开采热量/ (10 ¹⁰ kJ/a) | 折合标准 煤/(10 ⁶ t/a) |
| 1 | 南宁盆地 | 1.83 | 0.63 | 0.47 | 0.16 | 0.62 | 3.00 | 7.09 | 0.79 | 1.91 | 2.77 | 0.95 |
| 2 | 桥圩盆地 | 15.70 | 5.38 | 2.22 | 0.76 | 0.92 | 4.59 | 9.71 | 1.09 | 8.95 | 23.10 | 7.91 |
| 3 | 合浦盆地 | 4.78 | 1.64 | 1.19 | 0.41 | 1.02 | 5.12 | 7.33 | 0.82 | 4.83 | 7.16 | 2.45 |
| 4 | 百色盆地 | 1.26 | 0.43 | 0.32 | 0.11 | 2.28 | 1.14 | 2.06 | 0.23 | 1.07 | 1.93 | 0.66 |
| 5 | 宁明盆地 | 0.53 | 0.18 | 0.13 | 0.04 | 0.23 | 1.14 | 0.85 | 0.10 | 1.05 | 0.78 | 0.27 |
| 6 | 上思盆地 | 0.53 | 0.18 | 0.13 | 0.04 | 0.30 | 1.49 | 0.85 | 0.10 | 1.40 | 0.80 | 0.27 |
| | 合计 | 24.63 | 8.44 | 4.46 | 1.52 | 5.37 | 16.48 | 27.89 | 3.12 | 19.21 | 36.50 | 12.50 |

的高温发电和综合梯级利用潜力。

基于本次研究成果,建议广西应“立足水热、展望干热”,即以水热型地热资源及浅层地热的勘查开发为着力点,围绕“温泉经济圈”建设总体规划,一方面总结水热型地热资源赋存模式,摸清热源机制、热能传导机理和成藏地质条件,建立水热型地热资源勘查模型,以指导现有温泉点边部、深部优质高温水热型地热资源的勘查工作;另一方面,依托广西现阶段干热型地热资源勘查的阶段性成果,对干热岩的“生、运、储、盖”赋存条件、成因机制进行全面总结,深化干热岩资源远景区的对比性研究和精细化评价工作,进而建立起“广西本土”的干热岩赋存模式,为干热型地热资源的勘查提供理论依据。

5 结 论

在对“十二五”期间中国地质调查局组织实施

表5 广西陆域3~10 km干热型地热资源评价
Table 5 Evaluation of hot dry rock geothermal resources at the depth of 3-10 km in Guangxi's land area

| 序号 | 热储体 埋深/km | 干热型地热资源量 | | | 干热型地热资源 可开采量(按2%计算) | |
|----|--------------|--|---------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | | 体积 /10 ⁴ km ³ | 热量 /10 ⁴ EJ | 折合标准 煤/10 ¹² t | 地热能 /10 ⁴ EJ | 折合标准煤 /10 ¹² t |
| 1 | 4~5 | 0.44 | 0.19 | 0.07 | 0.004 | 0.001 |
| 2 | 5~6 | 9.29 | 4.14 | 1.41 | 0.08 | 0.028 |
| 3 | 6~7 | 20.53 | 9.65 | 3.29 | 0.19 | 0.066 |
| 4 | 7~8 | 21.27 | 11.72 | 4.00 | 0.23 | 0.080 |
| 5 | 8~9 | 22.65 | 14.23 | 4.86 | 0.28 | 0.097 |
| 6 | 9~10 | 22.63 | 15.47 | 5.28 | 0.31 | 0.106 |
| | 合计 | 96.81 | 55.42 | 18.91 | 1.11 | 0.378 |

的广西主要城市浅层地温调查、广西地热资源调查评价与区划成果进行总结的基础上,结合近年来所主持开展的广西干热型地热资源远景调查与分级评价等项目的最新认识,对广西地热资源的分布规律、地温场特征、地热资源开发利用潜力进行初步评估,得出如下结论:

(1)广西浅层地热能资源丰富,13个主要城市浅层地热能资源总热容量为1.23×10¹⁵kJ/℃,年可采利用资源量为1.36×10¹²kJ/a,折合标准煤1.67×10⁸t。

(2)广西水热型地热资源开发利用历史悠久,现有温泉出露点24处,地热开采井28口,均属中低温型(26.3~83.4℃),地热能资源总量为2.56×10¹⁷kJ,折合标准煤87.58×10⁸t;地热流体年可开采量为1.77×10⁸m³/a,可采热量为28.89×10¹²kJ/a,折合标准煤3.16×10⁶t。

(3)广西干热型地热资源潜力巨大,陆域3~10 km范围150℃以上高温地热资源总量为55.42×10⁴EJ,折合标准煤18.91×10¹²t,按2%的可采率计算是中国2020年一次能源消耗总量的75.94倍,是传统化石燃料最为理想的低碳可再生接替能源。

Reference

Bronicki L Y. 2016. Geothermal Power Generation—Introduction to Geothermal Power Generation[M]. Woodhead Publishing:1-3.
Climate Center of Guangxi. 2021. Guangxi 2020 Climate Bulletin [EB/OL]. http://gx.cma.gov.cn/qxfw/qxgb/202105/t20210527_3356241.html(in Chinese).
Duchance D V. 1996. Geothermal energy from hot dry rock: A renewable energy technology moving towards practical implementation[J]. Renewable Energy, 9(1/4): 1246-1249.

- Guangxi Institute of Geological Survey. 2015a. Investigation, Evaluation and Regionalization of Geothermal Resources in Guangxi[R]. Nanning: Guangxi Institute of Geological Survey(in Chinese).
- Guangxi Institute of Geological Survey. 2015b. Hydrogeological Survey Report (1:50000) of Shallow Geothermal Energy Development Zones in Major Cities in Guangxi[R]. Nanning: Guangxi Institute of Geological Survey (in Chinese).
- Guangxi Regional Geological Survey Research Institute. 2017. Regional Geology of Guangxi[R]. Guilin: Regional Geological Survey Research Institute (in Chinese with English abstract).
- Huttrer G W. 2020. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Kang Zhiqiang, Zhang Qizuan, Guan Yanwu, Feng Bo, Yuan Jinfu, Sun Minghang, Liu Demin, Wang Xinyu, Yang Zhiqiang, Lu Jipu, Zhang Qinjun, Feng Minhao. 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).
- Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Wang Guangzeng, Liu Bo, Li Xiyao, Suo Yanhui, Jiang Zhaoxia, Guo Lingli, Zhou Jie, Wang Pengcheng, Zhu Junjiang, Wang Gang, Zhao Shujuan, Liu Yongjiang, Zhang Guowei. 2019. Meso– Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 642–677 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. An estimation of HDR resources in China's Mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(5): 807–811(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China,40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- Lund J W, Boyd T L. 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review[J]. Geothermics, 60: 66–93.
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon Neutralization: Current status and development direction[J]. Geology in China, 48(2): 347–358 (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiang, Guo Dianbin, Luo Lu, Wang Tinghao. 2019. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. Geological Review, 65(6): 1462–1472 (in Chinese with English abstract).
- Muffler L J P. 1976. Tectonic and Hydrologic Control of the nature and Distribution of Geothermal Resources[R]. Process Second U. N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. San Francisco, 499–507.
- Our World in Data. 2021a. Installed geothermal energy capacity [EB/OL]. <https://ourworldindata.org/energy-mix>.
- Our World in Data. 2021b. Installed geothermal energy capacity [EB/OL]. <https://ourworldindata.org/search?q=Geothermal>.
- Peng Songbai, Liu Songfeng, Lin Musen, Wu Changfeng, Han Qingsen. 2016. Early Paleozoic subduction in Cathaysia (II): New evidence from the Dashuang high magnesian– magnesian andesite[J]. Earth Science, 41(6): 931– 947 (in Chinese with English abstract).
- Song Bo, Yan Quanren, Xiang Zhongjin, Chen Huiming, Ma Tieqiu, Yang Guangyuan. 2013. Sedimentary characteristics and tectonic setting of the Middle Triassic Pingxiang basin,Guangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 87(4): 453– 473(in Chinese with English abstract).
- Sun Minghang, Liu Demin, Kang Zhiqiang, Guan Yanwu, Liang Guoke, Huang Xiqiang, Ye Jiahui, Guo Shangyu, Sun Xingting, Tang Weri, Feng Minhao. 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 Minghang, Wang Ruihu, Guan Yanwu, Liu Demin. 2022a. An estimate of hot– dry geothermal resources in the continental area, Guangxi[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),97(4): 454–474 (in Chinese with English abstract).
- Sun Minghang, Zhang Qizuan, Liu Demin, Sun Xingting, Lin Shan, Wu Xiangke, Liang Guoke, Guan Yanwu, Ye Jiahui, Li Yefei. 2022b. Research on the genesis and occurrence models of Hot–Dry geothermal resources in Guangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(3): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan, Zhang Dailei, Liu Zhong, Zhao Xu, Cheng Tianjun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2052–2065 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Jiang Biao, Huang Fan, Wang Yan, Li Huaqin, Hou Kejun. 2020. Preliminary study on the Triassic continental mineralization system in China[J]. Earth Science Frontiers, 27(2): 45–59 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 449–450,134,451–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Ma Feng, Lin Wenjing, Liang Jiyun, Zhu Xi. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. China Geology, 1: 273–285.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 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).
- Wang Jiyang. 2015. Geothermics and Its Applications[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, Wang Jiyang. 1990. The Basic Characteristics of Chinese Geothermal Distribution[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Qianshen, Teng Jiwen, Zhang Yongqian, Chen Shi, Wen Wu, Pi Jiaolong, Ma Xueying. 2017. Discussion on the crustal density distribution and deep crustal structure of the super-long profile from Mandala (Inner Mongolia) to Pingxiang (Guangxi) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4681–4698 (in Chinese with English abstract).
- West F G, Shankland T J. 2013. Hot dry rock: Widespread but invisible[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 58(5): 299–302.
- White D E, Williams D L. 1975. Assessment of Geothermal Resources of the United States[R]. Arlington, Virginia, US: US Geological Survey.
- Xiong Liangping, Gao Weian. 1982. Characteristics of geotherm in uplift and depression[J]. Acta Geophysica Sinica, (5): 448–456 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaosong, Liu Wei, Men Yupeng, Zhang Haiquan. 2012. Probe into the tectonic nature of Neoproterozoic southern Hunan–northern Guangxi marine basin[J]. Acta Geologica Sinica, 86(12): 1890–1904 (in Chinese with English abstract).
- Ye Songqing, Li Shouyi. 2011. Mineral Exploration (3rd ed) [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao, Guo Tonglou, Fu Xiaoyun. 2006. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1118–1126 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jianbin, Feng Xiaoyan, Yan Keqi, Guo Hui. 2011. The key technical analysis on the hot dry rock in northeast cold in China[J]. Applied Mechanics & Materials, 71–78: 1268–1272.
- ### 附中文参考文献
- 广西壮族自治区地质调查院. 2015a. 广西壮族自治区地热资源调查评价与区划报告[R].
- 广西壮族自治区地质调查院. 2015b. 广西主要城市浅层地温能开发区 1:5 万水文地质调查报告[R].
- 广西壮族自治区气候中心. 2021. 广西 2020 年气候公报[EB/OL]. http://gx.cma.gov.cn/qxfw/qxgb/202105/t20210527_3356241.html.
- 广西壮族自治区区域地质调查研究院. 2017. 广西壮族自治区区域地质志[R].
- 康志强, 张起钻, 管彦武, 冯波, 袁金福, 孙明行, 刘德民, 王新宇, 杨志强, 陆济璞, 张勤军, 冯民豪. 2020. 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.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 刘博, 李玺瑶, 索艳慧, 姜兆霞, 郭玲莉, 周洁, 王鹏程, 朱俊江, 汪刚, 赵淑娟, 刘永江, 张国伟. 2019. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 25(5): 642–677.
- 蔺文静, 刘志明, 马峰, 刘春雷, 王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 33(5): 807–811.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312–321.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. 中国地质, 48(2): 347–358.
- 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 王婷灏. 2019. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. 地质论评, 65(6): 1462–1472.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 吴长峰, 韩庆森. 2016. 华夏早古生代俯冲作用(Ⅱ): 大爽高镁—镁质安山岩新证据[J]. 地球科学, 41(6): 931–947.
- 宋博, 闫全人, 向忠金, 陈辉明, 马铁球, 杨广元. 2013. 广西凭祥中三叠世盆地沉积特征与构造属性分析[J]. 地质学报, 87(4): 453–473.
- 孙明行, 刘德民, 康志强, 管彦武, 梁国科, 黄锡强, 叶家辉, 郭尚宇, 孙兴庭, 唐维, 冯民豪. 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, 王瑞湖, 管彦武, 刘德民. 2022a. 广西陆域干热型地热资源潜力估算[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 97(4): 454–474.
- 孙明行, 张起钻, 刘德民, 孙兴庭, 林珊, 吴祥珂, 梁国科, 管彦武, 叶家辉, 李叶飞. 2022b. 广西干热型地热资源成因机制与赋存模式研究[J]. 地质科技通报, 40(3): 1–11.
- 唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 94(7): 2052–2065.
- 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 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.
- 汪集暘. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 王登红, 陈毓川, 江彪, 黄凡, 王岩, 李华芹, 侯可军. 2020. 中国三叠纪大陆成矿体系[J]. 地学前缘, 27(2): 45–59.
- 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): 449–450, 134, 451–459.
- 王均, 黄尚瑶, 黄歌山, 汪集暘. 1990. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社.
- 王谦身, 滕吉文, 张永谦, 陈石, 文武, 皮娇龙, 马学英. 2017. 内蒙满都拉—广西凭祥超长剖面地壳介质密度分布及深部结构特征探榷[J]. 地球物理学报, 60(12): 4681–4698.
- 熊亮萍, 高维安. 1982. 隆起与拗陷地区地温场的特点[J]. 地球物理学报, (5): 448–456.
- 许效松, 刘伟, 门玉澎, 张海全. 2012. 对新元古代湘桂海盆及邻区构造属性的探讨[J]. 地质学报, 86(12): 1890–1904.
- 叶松青, 李守义. 2011. 矿产勘查学(3版) [M]. 北京: 地质出版社.
- 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 郭彤楼, 付孝悦. 2006. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 49(4): 1118–1126.