

地质学报
Acta Geologica Sinica
ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 海南岛岩石热物性特征及其对地温场的影响
作者: 李科甫, 朱传庆, 马钊, 杨俊生, 苏宏, 邢书嶝
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023085
收稿日期: 2023-11-28
网络首发日期: 2024-12-27
引用格式: 李科甫, 朱传庆, 马钊, 杨俊生, 苏宏, 邢书嶝. 海南岛岩石热物性特征及其对地温场的影响[J/OL]. 地质学报.
<https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023085>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

海南岛岩石热物性特征及其对地温场的影响

李科甫^{1,2)}, 朱传庆^{*1,2)}, 马钊^{1,2)}, 杨俊生^{1,2)}, 苏宏^{1,2)}, 邢书颀^{1,2)}

1) 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要:岩石热物性是表征区域地温场特征的重要参数之一,对研究地温场和地热资源量评估有着重要作用。为了定量认识岩石热物性特征及其对地温场的影响,本次研究对海南岛野外露头样品进行热物性测试,得到了62个岩石热导率数据,57个岩石生热率数据,并系统分析海南岛岩石热物性特征以及岩石热物性差异对地温场的影响,为区域地热相关领域研究提供新的资料与参考。本次研究结果表明:①海南岛三类岩石热物性存在差异。对于热导率,所有样品热导率范围为1.03~7.02 W/(m·K),其中变质岩平均热导率最高(3.16±1.41 W/(m·K)),沉积岩次之(2.53±0.80 W/(m·K)),火成岩最低(2.40±0.74 W/(m·K));对于生热率,所有样品生热率范围为0.03~6.12 μW/m³,其中火成岩平均生热率最高(2.68±1.68 μW/m³),沉积岩次之(1.90±0.92 μW/m³),变质岩最低(1.10±0.95 μW/m³)。②不同物性参数与热导率表现出不同的相关性。孔隙度与热导率呈负相关关系,密度与热导率则呈正相关关系。岩石进行饱水校正之后,热导率值增加了1%~79%,平均增加率为17%±16%,针对海南岛地区,建立了符合海南岛地区的饱水校正经验公式。③岩石放射性元素产热贡献及其与生热率关系存在差异。岩石中U和Th为主要产热元素,并且均与生热率呈线性正相关;而K的产热贡献相对较低,其与生热率之间的正相关性也明显弱于U和Th。④岩石热物性影响了地层温度分布和地热差异聚集。岩石饱水性对热导率具有较大影响,在温度场模拟中应予以考虑。

关键词:热导率;生热率;地温场;海南岛;放射性生热元素

岩石热物性反映地质体产生、保存、传递热量的能力,是地表、地球内部温度分布及热传递研究不可缺少的参数,其主要包括岩石的热导率、比热、热扩散率和放射性生热率等(刘绍文等,2006;Vilà et al., 2010;汪集旻等,2015;周阳等,2017;张超等,2020;Zhu Chuanqing et al., 2022a, 2022b)。有效理解区域地层岩石热物性对于确定区域热流、岩石圈热结构有着重要意义,同时,也是地温场数值模拟的重要基础参数(邱楠生,2002;Zhu Chuanqing et al., 2016;Maystrenko et al., 2018;Norden et al., 2020;Cui Yue et al., 2022;丁蕊等,2023)。

目前,已有不少学者对中国西北、华北、东南等地区岩石热物性展开了研究工作(熊亮萍等,1994;赵平等,1995;邱楠生,2002;宋宁等,2011;雷晓东

等,2018;Tang Boning et al., 2019;朱传庆等,2022)。根据前人研究报道显示,不同地区同类岩石热物性存在差异,以砂岩导热率为例,东南地区砂岩热导率平均值为3.14 W/(m·K)(熊亮萍等,1994),北京地区砂岩热导率为3.66 W/(m·K)(雷晓东等,2018),而准噶尔盆地砂岩平均热导率较低,为2.22 W/(m·K)(邱楠生,2002)。此外,矿物成分、孔隙度、含水饱和度、孔隙结构以及温度和压力等内外因素会影响岩石热导率值的大小,同时,岩石的热物理性质与其岩性、埋藏深度和地层时代密切相关(邱楠生,2002;雷晓东等,2018;Tang Boning et al., 2019;朱传庆等,2022)。海南岛地区缺乏相关研究,一定程度上阻碍了区域地温场研究工作。为了填补这一空白,本次研究选择海南岛

注:本文为国家重点研发计划课题(编号2021YFA0716003)资助的成果。

收稿日期:2023-11-28;修回日期:2024-04-05;责任编辑:张永双;责任编辑:潘静。

作者简介:李科甫,男,1999年生。博士研究生,主要从事地热地质学研究。E-mail:1484505625@qq.com。

* 通讯作者:朱传庆,男,1981年生。教授,博士生导师,主要从事地热地质学和石油地质学研究。E-mail:zhucq@cup.edu.cn。

引用本文:李科甫,朱传庆,马钊,杨俊生,苏宏,邢书颀. 2024. 海南岛岩石热物性特征及其对地温场的影响. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023085.

Li Kefu, Zhu Chuanqing, Ma Zhao, Yang Junsheng, Su Hong, Xing Shudi. 2024. Thermophysical characteristics of rocks in Hainan Island and its influence on the geothermal field. Acta Geologica Sinica.

主要地层,通过野外采集岩石露头样品 63 件,对海南岛不同类型岩石的热物性进行系统性的分析研究,讨论了岩石热物性特征和取得的新认识,并建立二维地质模拟,分析海南岛三亚地区剖面考虑饱水和非饱水状态下温度场特征。

1 地质背景

海南岛地处南海西北部,构造位置上位于太平洋、菲律宾板块和华南、印支板块的交汇部位,是古太平洋构造和古特提斯构造域的叠置区,具有复杂的构造背景和演化史。海南岛岛内构造格局由北东向和东西向两组断层控制(图 1),北东向断层发育

两组,由西向东以此为戈枕断裂和白沙断裂;东西向断层发育四组,由北向南依次为王五-文教断裂、昌江-琼海断裂、尖峰-吊罗断裂和九所-陵水断裂(汪啸风等,1991;Metcalf, 1996)。根据构造运动、沉积相以及地层古生物等特征将海南岛由北向南分为三个地层分区,海口分区、五指山分区以及三亚分区,这三个分区之间以王五-文教断裂和感城-万宁断裂为界(汪啸风等,1991)。

海南岛受到多次强烈的构造运动,岩浆作用异常强烈,形成了大规模的不同期次岩浆岩,岛内存在大面积岩浆岩分布,其中侵入岩分布约占全岛总面积的 51%,主要分布于王五-文教断裂以南,二叠

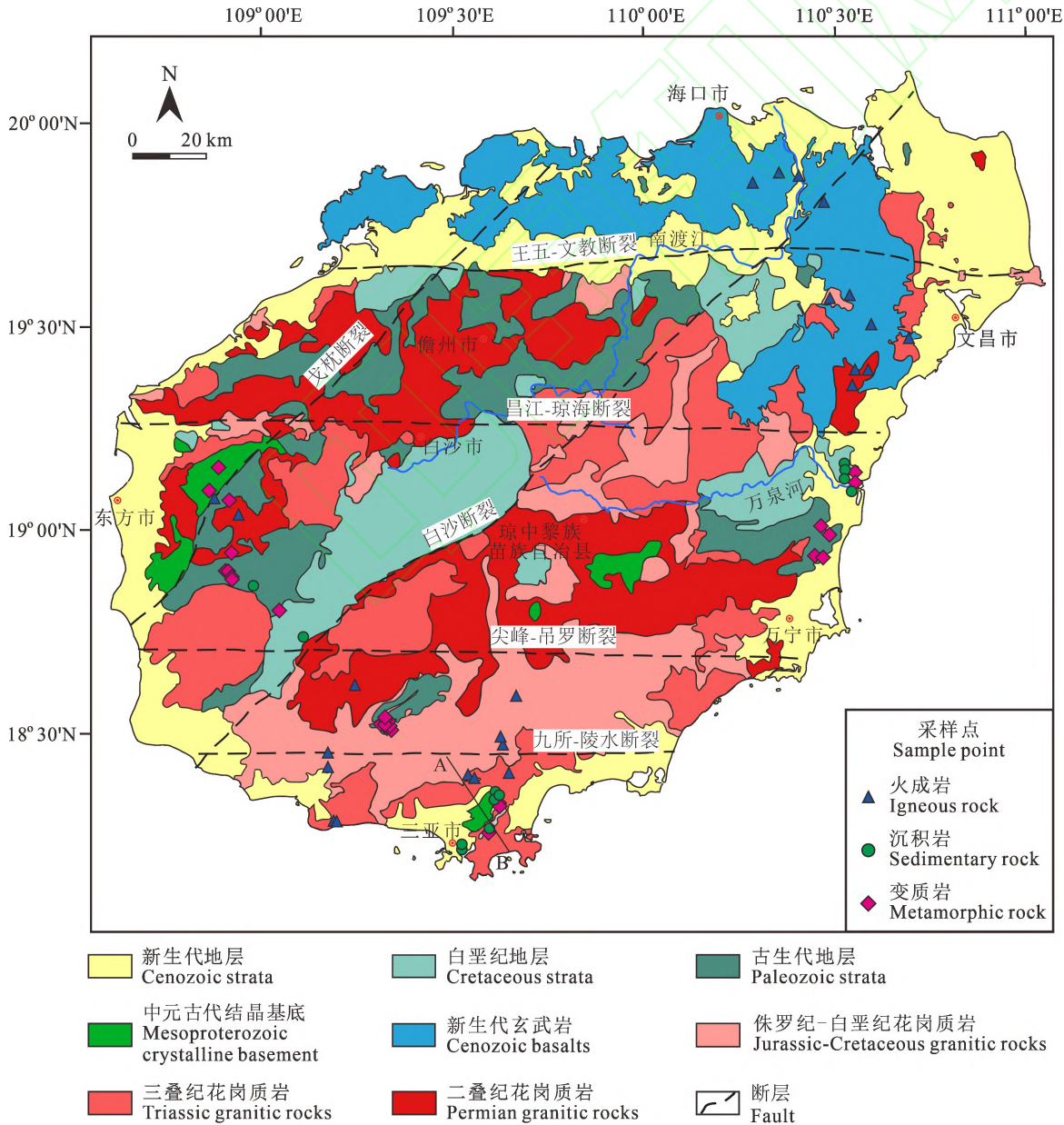


图 1 海南岛地质简图及采样点位(据张磊等,2022 修改)

Fig. 1 Geological map and sample points of Hainan Island (modified from Zhang Lei et al. , 2022)

纪—三叠纪花岗岩出露最多;火山岩出露面积约占全岛面积的 13%,主要分布与王五-文教断裂以北,以新生代玄武岩为主(王超等,2019;周云等,2021;石红才等,2022;齐重向等,2023)。海南岛大地热流值平均值约为 69.5 mW/m^2 ,与全球典型克拉通型大陆区与大洋区的大地热流值相比,海南岛总体上具有中等—较高的区域大地热流值(陈墨香等,1991;胡圣标等,2001)。

2 取样及测试

采集海南岛野外露头样品过程中,沉积岩和变质岩采样原则遵循尽量采取覆盖研究区所有具有一定厚度地层的代表岩性,其中部分地层(如奥陶系榆红组和寒武系孟月岭组等)因出露较少或无法采集而没有涉及,火成岩采样原则为采取涵盖从三叠纪到第四纪每个时代的火成岩。共采集样品 63 个,其中火成岩 24 个,沉积岩 12 个,变质岩 27 个(图 1)。

2.1 热导率测试

本次研究热导率测试使用 Hot Disk 热常数分析仪,实验在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成。Hot Disk 热常数分析仪原理基于瞬时平板热源法(transient plane source method, TPS),测量时,在室温 20°C 、正常大气压下进行,该测量方法误差小于 3%。使用该实验仪器测量样品,需要将样品加工使其具有两个相对光滑的平面,减少测试过程的接触热阻,提高测量

精度。
2.2 生热率与密度测试

岩石生热率使用电感耦合等离子体-质谱法(ICP-MS)测量岩浆岩样品中放射性元素(U、Th、K)浓度,仪器测量精准度为 5%,在核工业北京地质研究院进行测试。岩石体积密度测试采用阿基米德方法,由达宏美拓 AR-3000R 多功能密度测试仪完成测试,该仪器对固体岩石测试精准度较高(0.001 g/cm^3),在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成。

3 结果

3.1 热导率

海南岛野外露头样品热导率测试结果见附表 1,其中包括变质岩类 26 块,沉积岩类 12 块,火成岩类 24 块。测得样品热导率范围为 $1.03\sim7.02\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,最小值样品岩性为玄武岩,最大值为结晶灰岩,样品平均值为 $2.74\pm1.12\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。三类岩性热导率中,变质岩热导率平均值最大,为 $3.16\pm1.41\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,其次为沉积岩类,为 $2.53\pm0.80\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,火成岩类热导率最低,为 $2.40\pm0.74\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。通过手标本岩石鉴定,我们将三大岩类细分为 16 种岩石类型,包括花岗岩、玄武岩、灰岩、泥岩、千枚岩、石英砂岩等,并观察所有岩类的热导率差异。图 2 显示,不同岩性热导率有明显差异,石英岩热导率最高,为 $5.98\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,

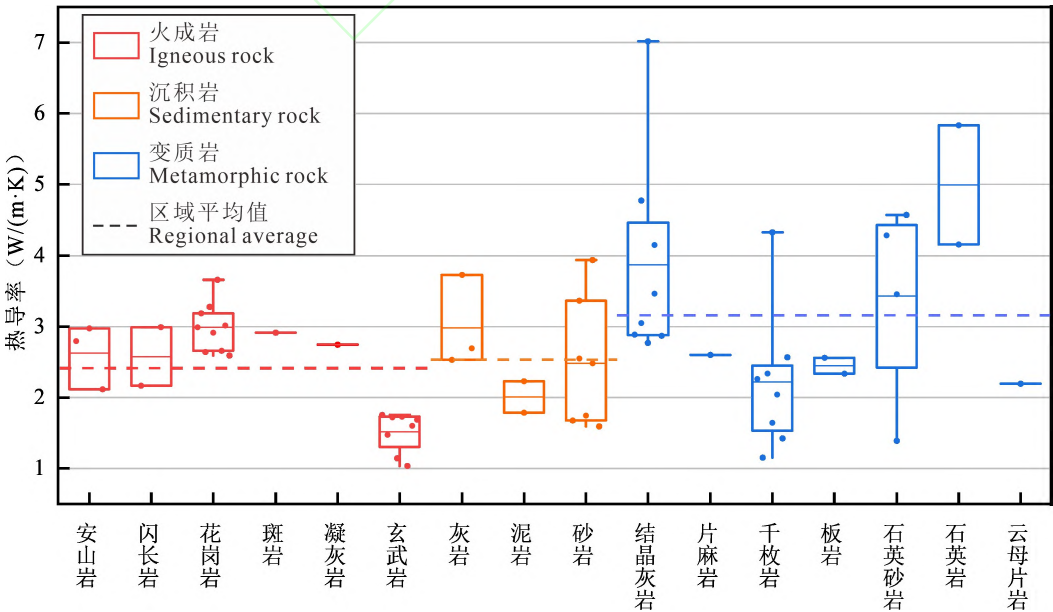


图 2 海南岛野外露头岩性热导率统计图

Fig. 2 Statistical chart of thermal conductivity of outcrop lithology in Hainan Island

其次为灰岩和英砂岩,分别为 $4.14\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $4.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,玄武岩热导率最低,为 $1.52\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

3.2 生热率

不同学者对于岩体放射性生热率计算提出了不同的计算公式(Rybach, 1976; Wollenberg et al., 1987)。最常用的经验公式为 Rybach (1976) 提出的岩石放射性生热率计算经验公式,公式如下:

$A=10^{-5}\rho(9.52C_U+2.56C_{Th}+3.48C_K)$ (1)
式中, A 为岩石放射性生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$); ρ 为岩石密度(kg/m^3); C_U 、 C_{Th} 分别为岩石放射性元素 U、Th 的含量($\times 10^{-6}$); C_k 为岩石中 K 的质量分数(%)。

本文共测量分析 57 块样品生热率,火成岩 19 块,沉积岩 11 块,变质岩 27 块,测量结果见附表 2。火成岩、沉积岩和变质岩 Th 含量分别介于 $2.29\times 10^{-6}\sim 53.1\times 10^{-6}$ 、 $3.33\times 10^{-6}\sim 24.8\times 10^{-6}$ 和 $0.08\times 10^{-6}\sim 19.6\times 10^{-6}$ 之间,平均值分别为 $20.73\times 10^{-6}\pm 15.74\times 10^{-6}$ 、 $13.36\times 10^{-6}\pm 7.05\times 10^{-6}$ 和 $7.67\times 10^{-6}\pm 7.42\times 10^{-6}$;U 含量分别介于 $0.45\times 10^{-6}\sim 9.11\times 10^{-6}$ 、 $0.71\times 10^{-6}\sim 5.78\times 10^{-6}$ 和 $0.08\times 10^{-6}\sim 6.58\times 10^{-6}$ 之间,平均分别为 $4.03\times 10^{-6}\pm 2.27\times 10^{-6}$ 、 $3.10\times 10^{-6}\pm 1.60\times 10^{-6}$ 和 $1.84\times 10^{-6}\pm 1.55\times 10^{-6}$;K 含量分别介于 $0.39\times 10^{-6}\sim 5.33\times 10^{-6}$ 、 $2.07\times 10^{-6}\sim 4.64\times 10^{-6}$ 和 $0.01\times 10^{-6}\sim 5.69\times 10^{-6}$ 之间,平均值分

别为 $3.26\times 10^{-6}\pm 1.46\times 10^{-6}$ 、 $3.33\times 10^{-6}\pm 0.91\times 10^{-6}$ 和 $1.79\times 10^{-6}\pm 1.75\times 10^{-6}$ 。采用公式(1)计算得到海南岛三类岩性的生热率值,其中火成岩平均生热率最高,为 $2.68\pm 1.68\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,介于 $0.3\sim 6.12\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间;其次为沉积岩,平均值为 $1.90\pm 0.92\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,生热率介于 $0.65\sim 3.45\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间;变质岩平均生热率最低,仅为 $1.10\pm 0.95\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,生热率介于 $0.03\sim 3.17\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间。在 16 种岩石中(图 3),花岗岩生热率最高($3.28\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$),安山岩次之($2.62\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$),有三种岩类生热率值低于 $0.5\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,分别为结晶灰岩($0.48\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$, $n=7$)、玄武岩($0.35\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$, $n=3$)、片麻岩($0.19\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$, $n=1$)和石英岩($0.11\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$, $n=3$)。花岗岩的高产热特征并不仅表现在本次研究中,从许多学者的研究报道中发现,花岗岩均具有高产热性,因此,大面积花岗岩侵入区域是寻找高温地热资源的重点地区(赵平等,1995;唐显春等,2020;旷健等,2020)。在三大岩中,变质岩的 7 种岩类生热率均值差异较大。经过分析,我们认为变质岩类生热率均一性较差的可能原因是:① 变质岩岩性特征受到原岩的控制,具有一定的继承性,因此,原岩富集放射性元素的程度对变质岩成岩后的生热率有着一定程度上的影响;② 海南到强烈的岩浆活动促使深部大离子亲石元素(包括 U、Th、K)向上迁移,并在浅层重新分配,而岩浆活动伴随着的变质作用使得原岩产生相应的变质岩,在此产生过程的变质岩的生热

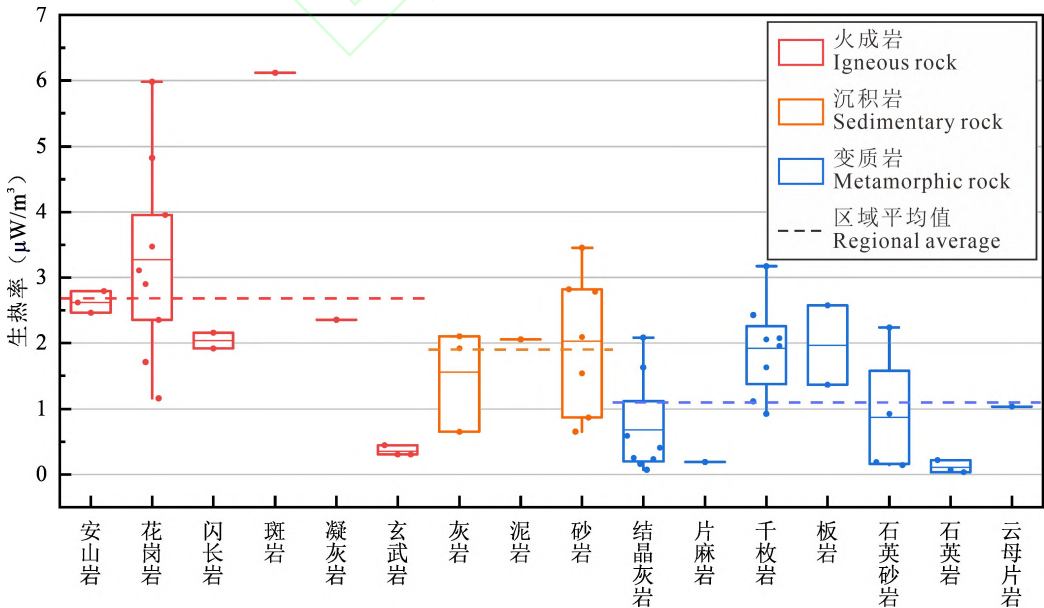


图 3 海南岛野外露头岩石生热率统计图

Fig. 3 Statistical chart of heat generation rate of outcrop rocks in Hainan Island

率将可能受到影响。

4 讨论

4.1 热导率及影响因素

4.1.1 孔隙度、密度、热扩散率、比热容与热导率的关系

孔隙度与热导率表现出良好的负相关关系,孔隙度大的样品,其热导率较小,反之亦然。本次实验与前人结果相比,除下降速率不同之外,都表现出相同变化趋势(图 4a)(Duchkov et al., 2014; 朱传庆等, 2022)。岩石具有复杂的孔隙结构,孔隙间填充

着空气、水和油等流体。而流体热导率通常远低于骨架热导率(空气热导率约为 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 水的热导率约为 $0.59 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 原油热导率约为 $0.14 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), 当这些流体填充孔隙时, 它们能够有效阻止热流传递, 进而降低岩石整体热导率下降。因此, 岩石孔隙度的增大通常会使得热导率出现不同程度的下降。

密度不会直接影响热导率大小, 但其与孔隙度有着一定关系, 一般情况下, 孔隙度越大, 密度则越大。因此, 密度与热导率在一定程度上能够呈现出相关性。如图 4b 所示, 参照密度与热导率关系大致

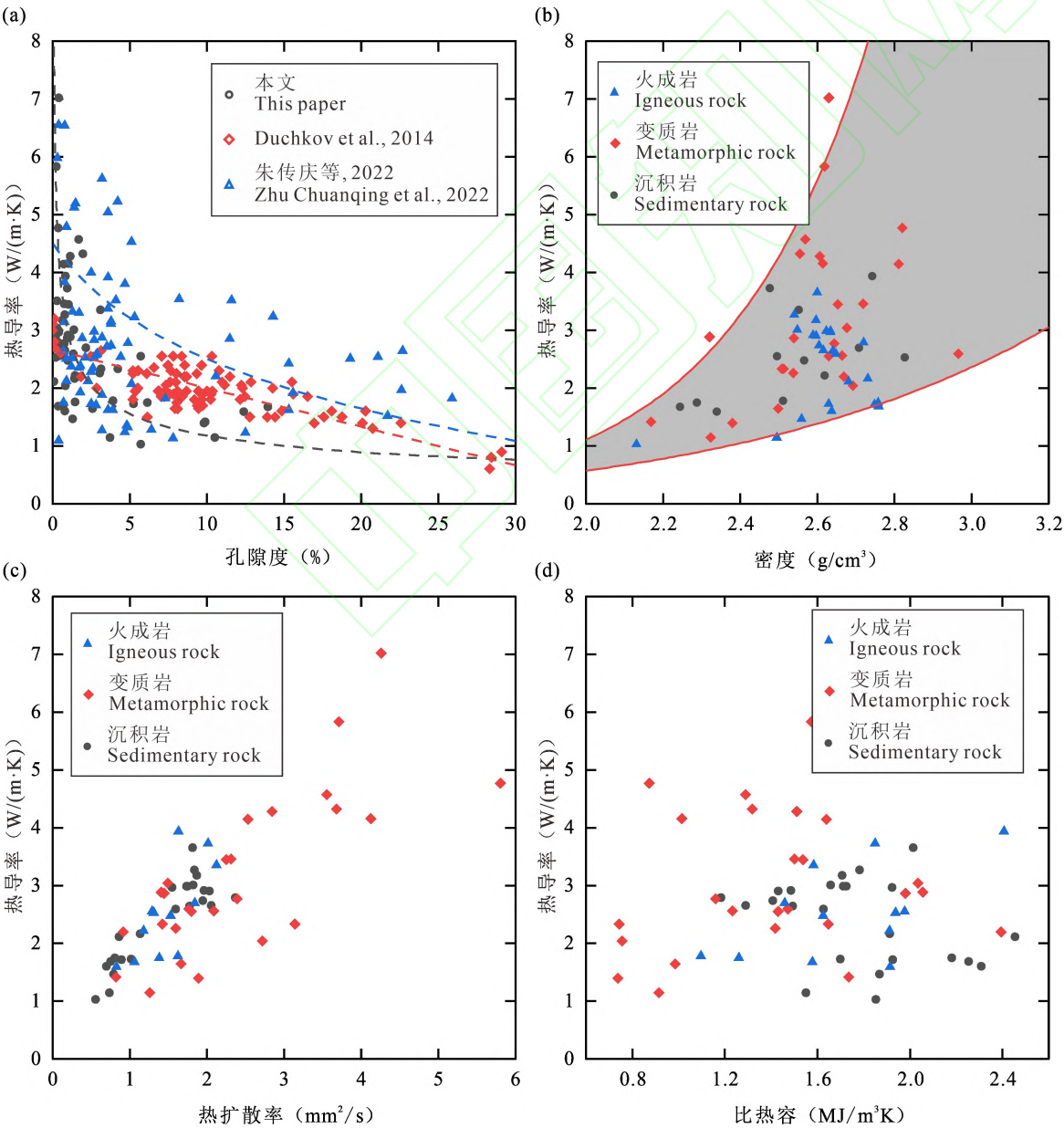


图 4 海南岛孔隙度、密度、热扩散率、比热容与热导率关系图

Fig. 4 Relationship between porosity, density, thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity in Hainan Island

的上限与下限,能较为清晰的看出,密度大的岩石的热导率也较大,两者有一定程度的正相关关系,与孔隙度表现出来的相关性相反。

热导率、热扩散率、体积比热容之间具有函数关系,其中热导率与热扩散率正相关。本次测试结果很好地反映出热导率与热扩散率的正相关性(图 4c),而比热容与热导率没有表现出清晰的关联特征(图 4d)。就表征岩石传递热能能力而言,热扩散率和热导率具有相似的物理意义,其影响因素及其变化情况基本相同,因此二者在关系上呈现出明显的正相关关系。而比热容常用于表征岩石的储热能力(辛守良等,2014),作为相对独立的热物性,与热导率和热扩散率的主要影响因素不同,因此与热导率之间的相关性较弱。

4.1.2 岩石饱水率对岩石热导率的影响

岩石原位热导率一般受到温度、压力和含水量等因素影响,干燥状态下的热导率与饱和水状态下的热导率存在差异(Pribnow et al., 2014; Somerton, 2014)。为了更好反映地层原位热导率,对岩石样品进行饱水处理。饱水后(图 5、6),所有岩石样品热导率值均有不同程度的增加,幅度在 1%~79%之间,平均增加率为 17%±16%;全部岩石饱水热导率介于 1.22~7.41 W/(m·K)之间,平均值为 3.30±1.37 W/(m·K);火成岩饱水热导率介于 1.22~3.65 W/(m·K)之间,平均值为 2.64±0.82 W/(m·K);变质岩饱水热导率介于

2.06~7.41 W/(m·K) 之间,平均值为 4.03±1.67 W/(m·K);沉积岩饱水热导率介于 1.99~3.99 W/(m·K) 之间,平均值为 3.05±0.63 W/(m·K)。

为了进一步分析干燥和饱水状态下样品热导率的变化,利用 Lichtenceker (1926)提出的预测模型,计算岩石样品流体饱和度的实际影响(S_{obs})和理论影响(S_{theor})大小。假设固体岩石与流体混合物(即多孔介质)的热导率符合以下公式:

$$K = K_f^\varphi \cdot K_s^{(1-\varphi)} \tag{2}$$

式中, K_f 为流体热导率; K_s 为岩石骨架热导率,则

$$S_{theor} = \frac{K_{sat} - K_{dry}}{K_{dry}} = \frac{K_{water}^\varphi \cdot K_s^{(1-\varphi)} - K_{air}^\varphi \cdot K_s^{(1-\varphi)}}{K_{air}^\varphi \cdot K_s^{(1-\varphi)}} = \left[\frac{K_{water}}{K_{air}} \right]^\varphi - 1 \tag{3}$$

式中, S_{theor} 为流体饱和度理论影响值; K_{sat} 和 K_{dry} 别为样品在饱水状态和干燥状态下的热导率; K_{water} 和 K_{air} 分别为水和空气的热导率,为 0.59 W/(m·K) 和 0.027 W/(m·K),代入公式得 $S_{theor} = 21.85^\circ - 1$ 。

结果显示(图 7),就总体趋势而言,饱水对热导率的影响随孔隙度的增加而增加,另外,三大岩性表现出了不同的不确定性。为了更好的观察三大岩性不确定程度,我们给出了理论影响大小 S_{theor} 以及±20%和 40%的不确定边界(图 7),沉积岩和火成岩数据集中分布与 $S_{theor} \pm 20\%$ 范围内,而变质岩则表现出较强的不确定性,大部分点分布在 $S_{theor} \pm 40\%$

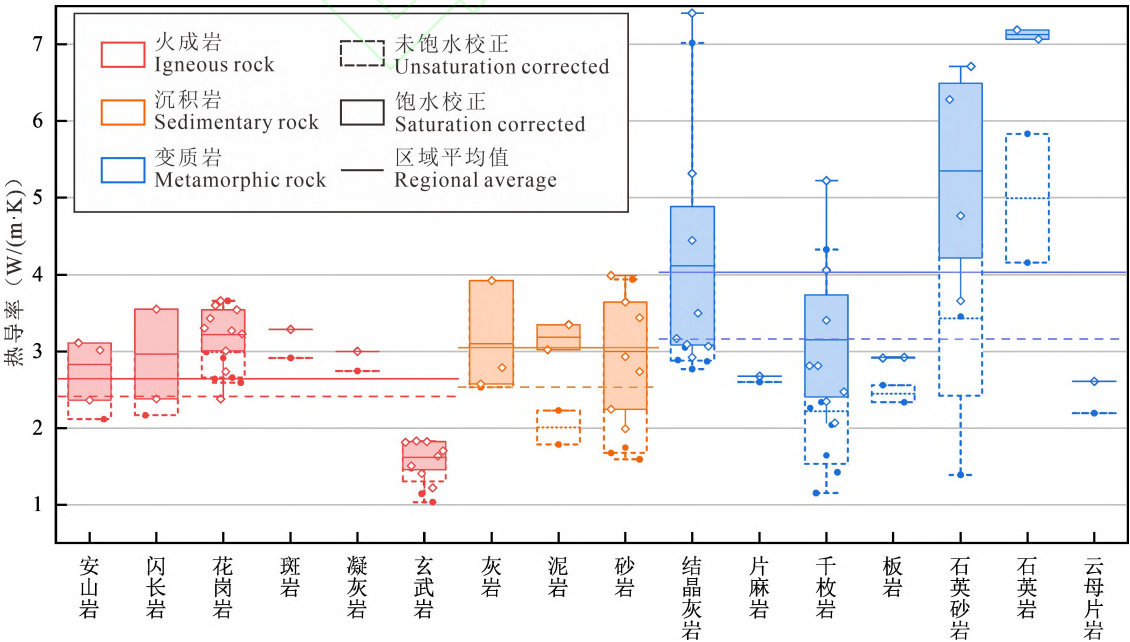


图 5 海南岛岩石饱水热导率统计图

Fig. 5 Statistical chart of rock saturated thermal conductivity in Hainan Island

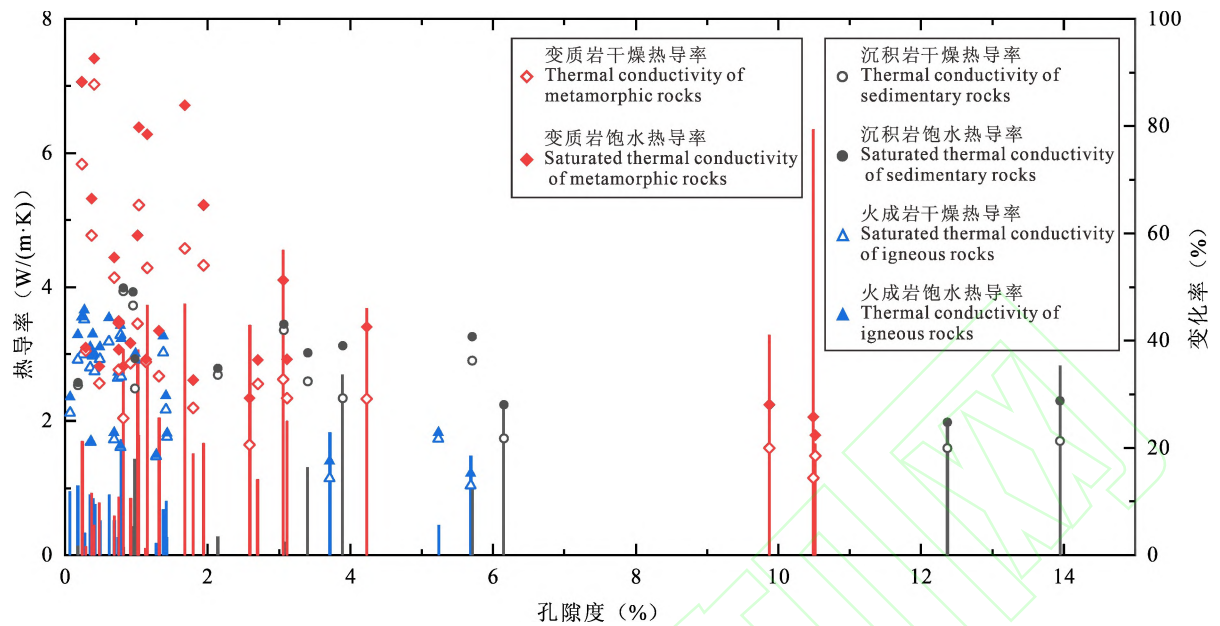


图 6 海南岛岩石饱水校正热导率变化图

Fig. 6 Change in corrected thermal conductivity of rock saturated with water in Hainan Island

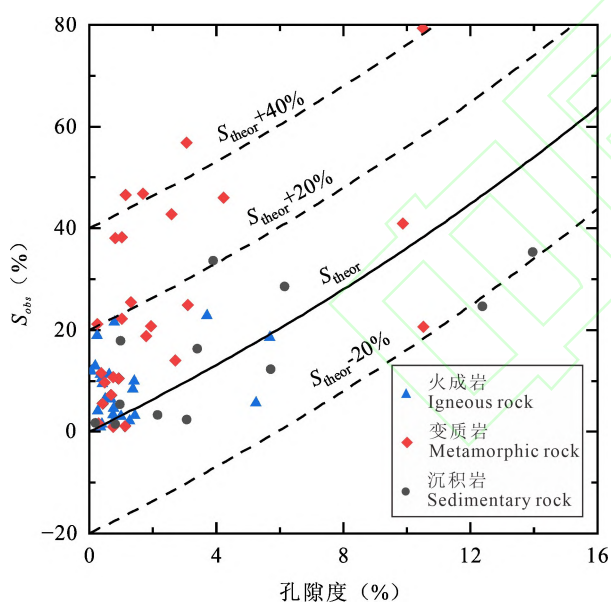


图 7 海南岛孔隙度与影响因子关系图

Fig. 7 Relationship between porosity and saturation influencing factors in Hainan Island

~ $S_{theor} - 20\%$ 范围内,但仍然存在不少数据在此范围之外。前人研究认为,水饱和度的不确定性主要归因于四个因素 (Nagaraju et al. , 2014):① 总孔隙度,其中未连通的孔隙中可能填充热导率较低的流体;② 饱和程度;③ 孔隙几何特征;④ 孔隙流体性质。考虑到本次研究采用相同的流体并充分饱和,因此,影响不确定性的原因主要来源于未连通孔隙中的流体和孔隙几何特征。此外,岩石复杂的孔隙几何形状和孔隙中的黏土矿物会影响“饱水”热导

率,增大流体饱和度影响的不确定性 (Schärli and Rybac, 1984; Jorand et al. ,2011; Nagaraju et al. , 2014)。在海南岛地区,由于频繁的火山活动和构造运动,变质岩在形成过程中经历了复杂的环境因素作用,可能致使其孔隙几何结构变得相对复杂,进而导致了该地区变质岩在实验室进行饱水的难度和不确定性,有的样品难以在实验室达到完全饱水,致使样品的饱水程度有差异,“饱水”后的热导率测量值表现出较大的不确定性。

4.1.3 岩石饱水热导率经验公式

岩石颗粒大小、颗粒排列、矿物成分、孔隙几何结构等因素会影响岩石热导率大小。由于岩石结构的复杂性和随机性,其内部颗粒分布、颗粒排列和孔隙结构等微观物理特征难以评估,这极大的制约岩石热导率研究进展 (陈驰等,2020;朱传庆等,2022; Zhu Chuanqing et al. , 2023)。基于经典物理理论和实验经验模型,矿物成分的串联和并联极端理想化排列模型以及几何平均经验模型相续提出 (Sugawara et al. , 1961; Woodside et al. , 1961; Zimmerman, 1989),前者假设矿物组分在岩石在以串联、并联和串联-并联方式分布 (图 8),通过算术和调和平均计算模型计算得到岩石热导率,具体公式如下:

$$K_{\text{并}} = \sum_{i=1}^n V_i K_i \quad (4)$$

$$K_{\text{串}} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{K_i} \quad (5)$$

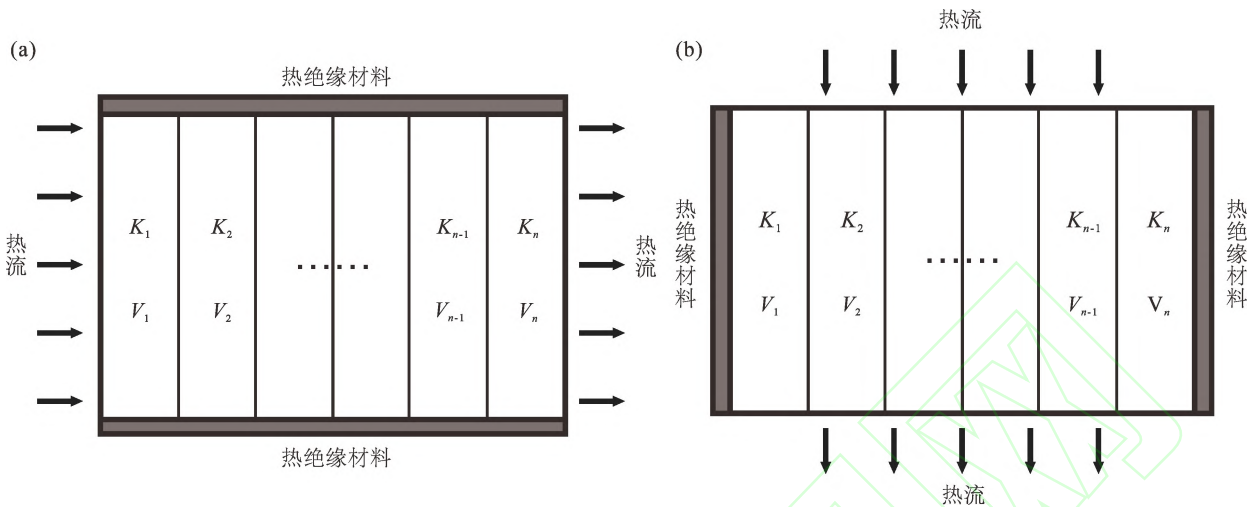


图 8 串联(a)和并联(b)模型
Fig. 8 Series (a) and parallel (b) models

式中, V_i 为第 i 种组分所占的体积分数, K_i 为第 i 种组分的热导率。

岩石结构的复杂性使得其难以被参数精细描述。建立精细化物理模型计算岩石热导率,是物理基础理论难以解决的问题。而借助实验数据建立经验模型,能够有效的避开这一问题。从更宏观的角度去观察岩石热导率变化规律,并基于相同规律变化建立经验模型来对其加以描述。据此,Woodside and Messmer (1961)提出了几何加权平均经验模型,并且该几何模型在现今研究中得到了很好的应用:

$$K = \prod_{i=1}^n K_i^{V_i} \tag{6}$$

本研究将岩石视为固流两相系统,岩石热导率由固体骨架热导率和孔隙流体热导率组成。假设岩石颗粒处于串联理想状态排列,干燥状态下,岩石孔隙被空气填充,其极低的热导率相当于一层类绝热材料,会极大的影响温度传输,导致计算值出现极大误差。为了更好的说明该问题,我们以三种模型为基础,建立了流体体积分数分别为 1% 和 10% (孔隙度为 0.01 和 0.1) 的二维热传导模型(图 9)。模型大小为 4 cm×4 cm,设定初始温度为 20℃,给定恒定上边界热源(2000 W/m²),加热时间为 30 min,假设固体骨架热导率为 3 W/(m·K),密度为 2600 kg/m³,比热容为 2000 J/(kg·K)。另外,为了便于观察模型结果差异,我们计算了在 30 min 时岩石垂直方向上平均热导率(由垂直方向上的热通量和地温梯度求得)(表 1)。

表 1 垂向上模型平均热导率				
Table 1 Average thermal conductivity of vertical model				
模型类型	空气热导率(W/(m·K))		流体热导率(W/(m·K))	
	1%	10%	1%	10%
串联模型	1.51	0.58	2.88	2.14
并联模型	2.97	1.78	2.96	2.71
几何模型	2.87	2.06	2.98	2.80

表 1 和图 9 结果显示,串联模型模拟温度分布以流体介质为界,表现出明显的分层现象。串联模型的四个传热模型中,当孔隙流体为空气时,分层现象尤为明显,即使孔隙度为 10% 时,此现象依然明显(图 9a、b)。此外,该模型的平均热导率远低于几何模型和并联模型模拟计算的热导率。当流体为水时,孔隙度为 1% 的温度分布未有太大影响(图 9c),热导率值也未表现出较大差异。然而,当孔隙度增加至 10% 时,模型也出现了分层现象(图 9d),且热导率相对偏低。因此,在极低热导率介质存在高热导率骨架情况下,使用调和平均计算整体热导率并不符合实际情况。相比之下,以并联理想模型和几何模型为基础,建立的传热模型均表现的较为正常(图 9e~l),其热导率值也未出现较大差异。另外,在三种模型中,孔隙度的增高均导致了不同程度的温度变化和热导率降低,其很好的映证了前文提到的孔隙度与热导率的变化关系。因此,本次研究选择忽略串联排列模型,仅考虑并联模型和几何模型来开展研究工作。

利用并联模型和几何模型公式计算样品饱水状态下热导率,并与实际测量值加以对比。结果显示(图 10,表 2),采用算术平均模型(即并联模型)计算

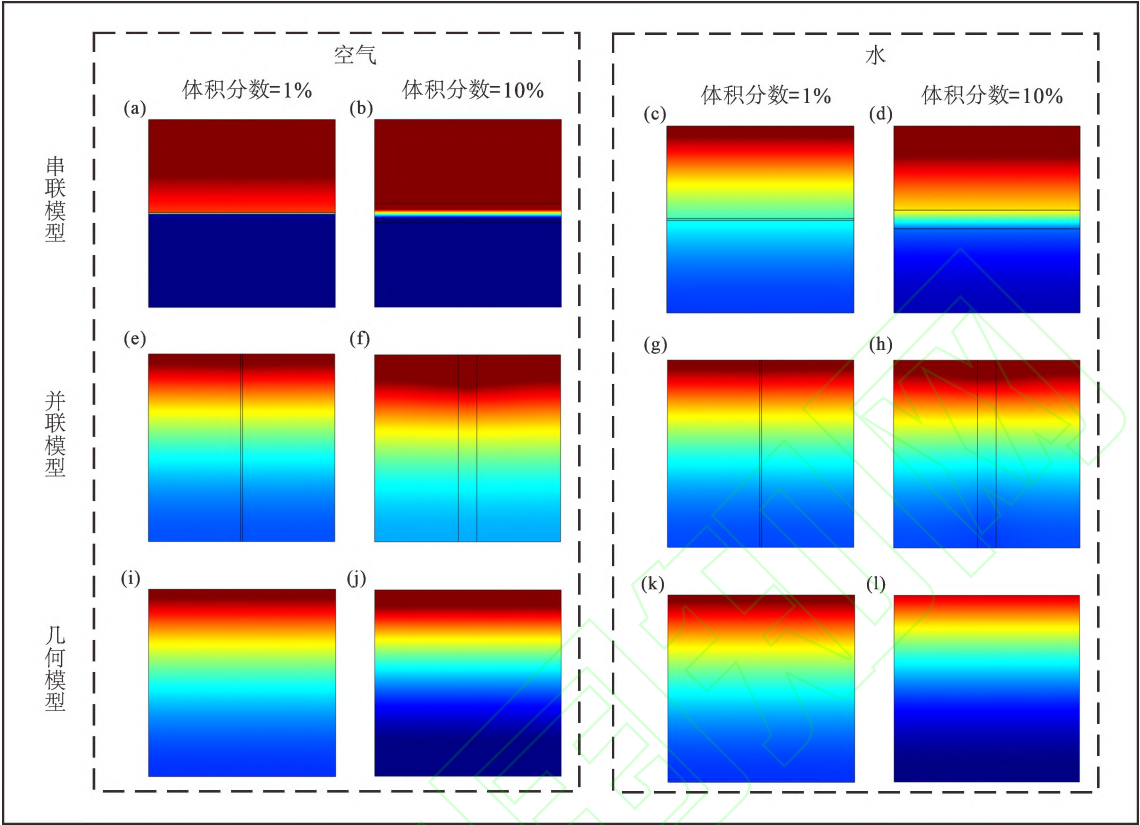


图 9 空气与流体的串联(a~d)、并联(e~h)、几何模型(i~l)温度模拟图

Fig. 9 Temperature simulation diagram of series (a~d), parallel (e~h), and geometric models (i~l) of air and fluid

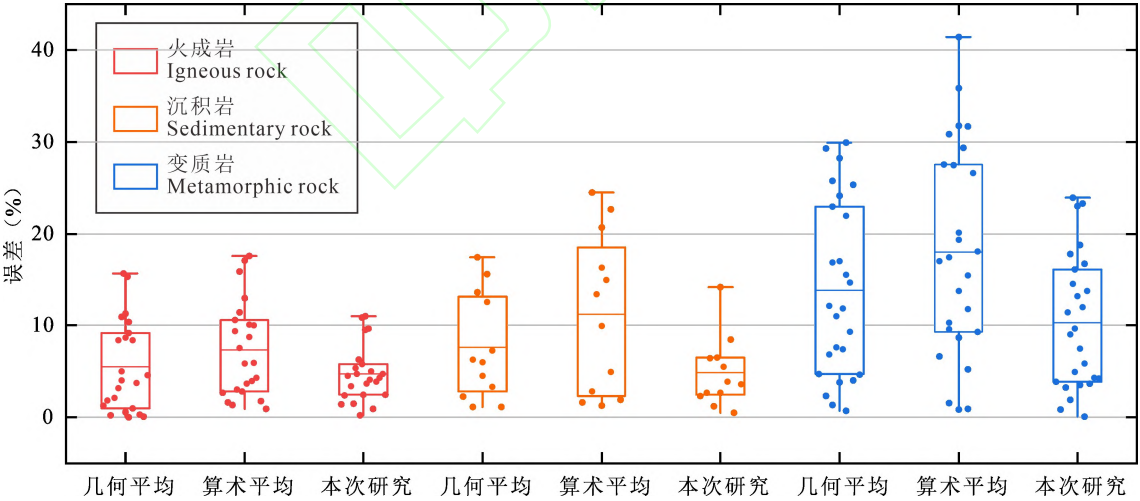


图 10 计算结果误差统计图

Fig. 10 Statistical chart of calculation result error

表 2 计算结果误差表

Table 2 Calculation result error table

	沉积岩		变质岩		火成岩	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均
算术平均公式	1.29%~24.46%	11.25%±8.32%	0.86%~41.38%	18.01%±11.26%	0.89%~17.56%	7.41%±4.98%
几何平均公式	1.12%~17.43%	7.60%±5.53%	0.72%~29.90%	13.82%±9.29%	0.03%~15.67%	5.57%±4.76%
经验公式	0.47%~14.15%	4.84%±3.61%	0.04%~23.91%	10.28%±7.17%	0.18%~10.89%	4.62%±3.73%

饱水热导率时, 沉积岩误差范围为 1.29% ~ 24.46%, 平均误差为 11.04% ± 8.02%; 变质岩误差范围为 0.86% ~ 41.38%, 平均误差为 18.01% ± 11.26%, 火成岩误差范围为 0.89% ~ 17.56%, 平均误差为 7.36% ± 5.08%, 而采用几何平均模型计算时, 误差值均略低于算术平均, 沉积岩误差范围为 1.12% ~ 17.43%, 平均误差为 7.58% ± 5.31%, 变质岩误差范围为 0.72% ~ 29.9%, 平均误差为 13.82% ± 9.29%, 火成岩误差范围为 0.03% ~ 15.67%, 平均误差为 5.49% ± 4.85%。另外, 两种模型公式所计算的饱和水热导率值大部分都低于实际热导率值(图 11)。

根据计算结果, 利用算术平均模型结算结果误差均高于几何模型结果。在计算变质岩热导率时, 两种模型的误差明显高于沉积岩和火成岩。Jorand et al. (2011) 在对含黏土矿物与不含黏土矿物岩石样品分布进行含水饱和度实验时发现, 含黏土矿物岩石样品不同含水饱和度热导率能够被算术-调和平均计算模型很好的拟合。而对于不含黏土矿物岩石样品, 当含水饱和度小于 60% 时, 算术-调和平均计算模型依然能够很好的进行拟合; 但当含水饱和度大于 60% 时, 算术-调和平均模型所模拟结果低于实验数据, 而几何加权平均则能更好的进行拟合。这些实验结果表明, 岩石样品中是否含有黏土矿物

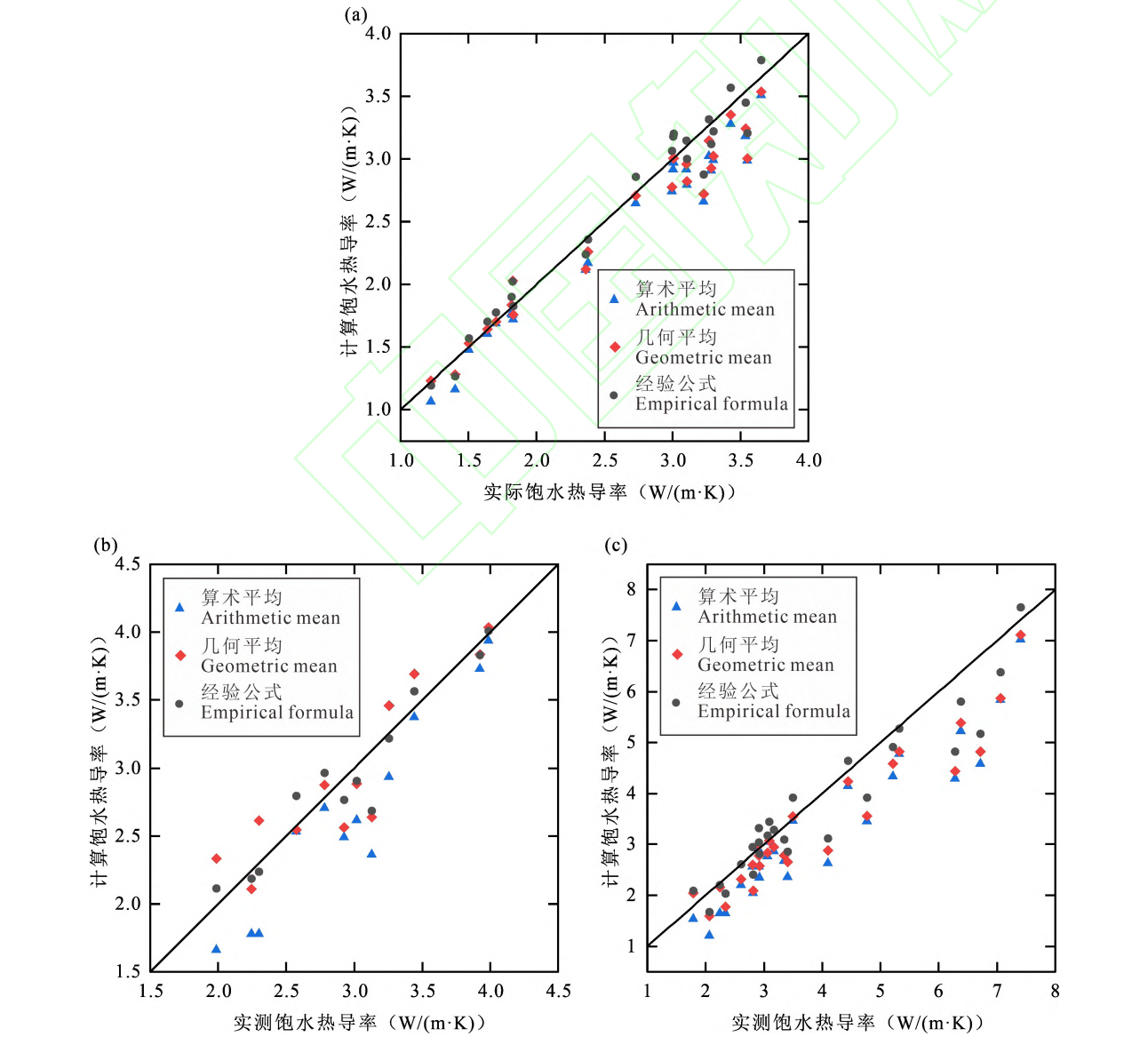


图 11 计算饱水热导率与实际热导率对比图

Fig. 11 Comparison between calculated saturated thermal conductivity and actual thermal conductivity

(a)—火成岩; (b)—沉积岩; (c)—变质岩

(a)—igneous rock; (b)—sedimentary rock; (c)—metamorphic rock

以及含水饱和度的大小影响着热导率估算模型的选取。这一发现与前文关于热导率计算的研究共同揭示了岩石热导率估算的不确定性和复杂性。

由于不同区域构造活动的不同,岩石成岩环境存在差异,产生的岩石内部结构也会出现差异,不同地区使用公式模型计算结果可能存在差异。因此,针对海南岛地区地层岩石,为了有效降低计算误差,本文基于算术平均计算模型和几何计算模型建立了海南岛地区的热导率饱水经验公式。

海南岛岩石饱水热导率公式如下:

$$K_{\text{饱}}=K_{\text{arith}}^S\cdot K_{\text{geo}}^{1-S}\tag{7}$$
$$K_{\text{arith}}=\left(a\cdot\frac{K_{\text{dry}}-\varphi\cdot K_{\text{air}}}{1-\varphi}+b\right)\cdot(1-\varphi)+\varphi\cdot K_{\text{water}}\tag{8}$$

$$K_{\text{geo}}=\left[c\cdot(K_{\text{dry}}/K_{\text{air}})^{\frac{1}{1-\varphi}}+d\right]^{1-\varphi}\cdot K_{\text{water}}^{\varphi}\tag{9}$$

式中, K_{dry} 为干燥状态下热导率; K_{air} 为空气热导率,取 $0.027\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; K_{water} 为水的热导率,取 $0.59\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; φ 为孔隙度; a 、 b 、 c 、 d 和 S 为无量纲值,取值见表 3。

表 3 饱水校正无量纲参数取值

Table 3 Dimensionless parameters for saturation correction

无量纲值	沉积岩	变质岩	火成岩
a	0.9	1.1	1.1
b	0.6	0.4	0
c	0.75	1	1.1
d	0.7	0.1	0.15
S	0.7	0.5	0.4

利用建立的校正经验公式计算饱水热导率值,同时计算误差值,并与基础平均公式计算结果进行对比(图 11,表 2)。校正后所计算的饱和水热导率值主要分布于实际值两侧,与原始公式计算结果有着明显不同。同时,三类岩性的校正经验公式计算结果的误差均有降低,沉积岩由 $11.25\%\pm8.32\%$ (算术)和 $7.60\%\pm5.53\%$ (几何)降低为 $4.84\%\pm3.61\%$;变质岩由 $18.01\%\pm11.26\%$ (算术)和 $13.82\%\pm9.29\%$ (几何)降低为 $10.28\%\pm7.17\%$;火成岩由 $7.41\%\pm4.98\%$ (算术)和 $5.57\%\pm4.76\%$ (几何)降低为 $4.62\%\pm3.73\%$ 。因此,本文基于海南岛实测样品数据与前人提出的理论模型所建立的经验公式对海南岛岩石饱水热导率预测有着较好的效果,同时,能为其他地区相关研究提供参考。

4.2 放射性元素与生热率的关系

放射性元素 U、Th、K 半衰期的不同使得三种

元素热贡献存在差异,热贡献率是研究岩石放射性生热率特征的重要参数之一(Hurley et al. , 1953; 赵平等,1995;汪集旸等,2015;蔺文静等,2023)。U 和 Th 一般作为主要的热贡献元素,而 K 的热贡献率一般不高于 20%,本次研究结果与此基本一致(图 12)。火成岩 Th 的平均热贡献率为 $48\%\pm9\%$,U 为 $39\%\pm6\%$,而 K 的产热贡献率仅为 $12\%\pm4\%$;变质岩放射性元素热贡献与火成岩类似,以 Th 和 U 为主,K 最低,均值依次为 $51\%\pm24\%$ (Th)、 $38\%\pm18\%$ (U)、 $11\%\pm7\%$ (K);与火成岩和变质岩相比,沉积岩热贡献表现有着不同,其 U 产热贡献最多($43\%\pm7\%$),Th 次之($38\%\pm7\%$),K 最低,且 K 的热贡献也相对较高,达到了 $19\%\pm9\%$ 。

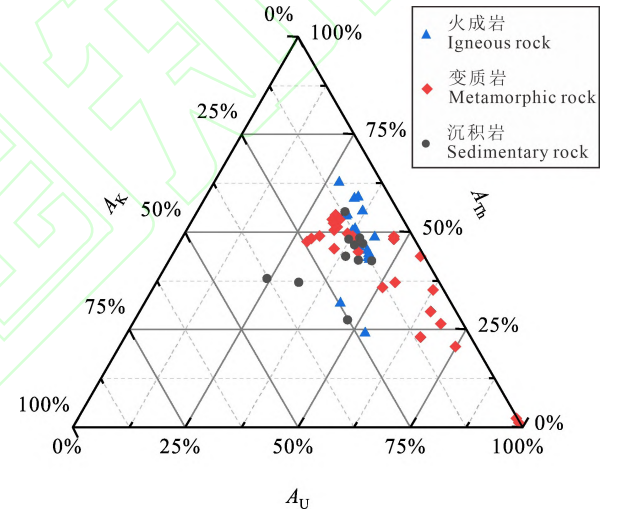


图 12 海南岛岩石放射性元素产热贡献三元图
Fig. 12 Triple diagram of the contribution of radioactive elements to heat generation in rocks in Hainan Island

放射性元素产热贡献在不同类型样品中具有较大差异(图 13)。为了提高说服力,本文收集了前人海南岛岩石的全岩元素分析数据(U、Th、K),与本次测试结果相结合进行分析判断(葛小月,2003;徐德明等,2005;云平等,2005;贾小辉等,2010;唐立梅,2010;周佐民等,2011;束云生,2013;刘强,2013;刘建强等,2013;董海龙,2014;张卓,2014;张志刚,2015;周云等,2015;李翔等,2016;何慧莹等,2016;赵国锋等,2018;苟琪钰等,2019;吕昭英等,2019;王超等,2019;陈婕,2020;牛晓露,2022;王国庆等,2022;宋宏星,2022;杜宇晶,2022)。图 13 结果显示,Th 和 U 含量与生热率表现出明显的线性正相关性,表明岩石中 U 和 Th 的含量对生热率值的大小有着重要影响,进一步体现了两者对岩石产生的

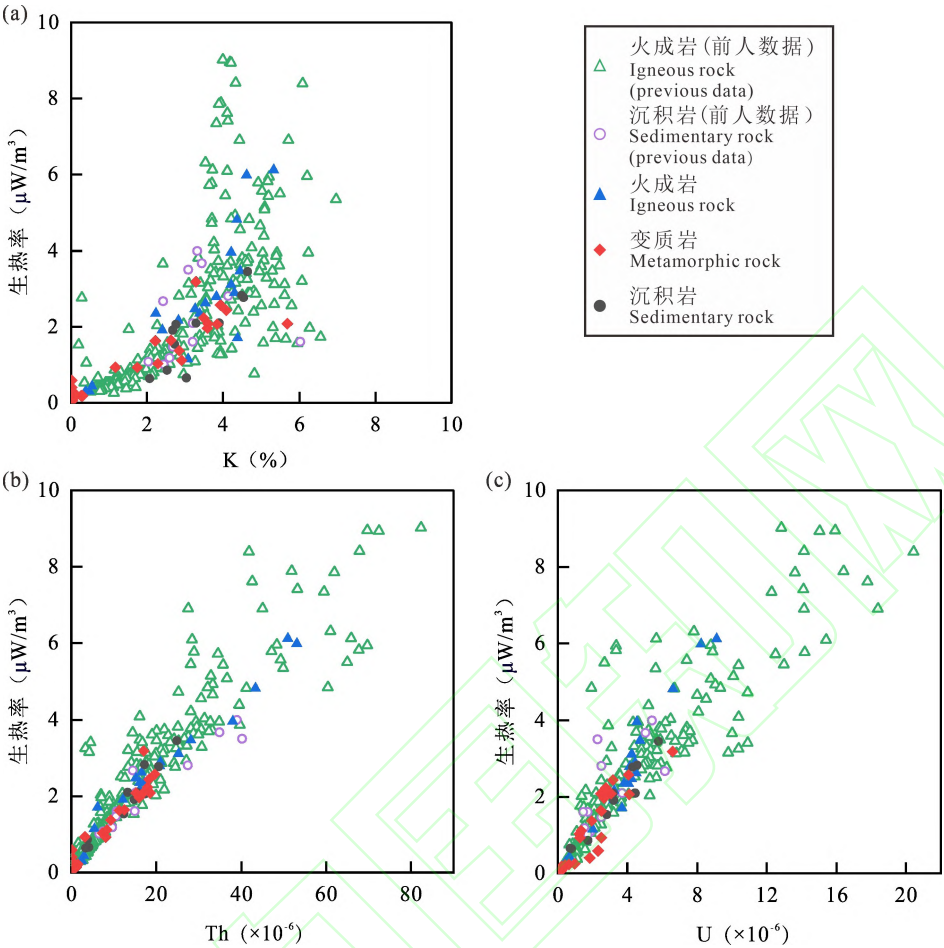


图 13 海南岛 K(a)、Th(b)和 U(c)含量与生热率之间关系散点图

Fig. 13 Scatter plot of the relationship between K (a), Th (b), U (c) contents and heat generation rate in Hainan Island

贡献;而 K 含量与生热率之间相关性明显弱于前两者,呈现出较为发散的正相关。

4.3 热物性对地温场的影响

岩石热导率在干燥和饱和水状态下的数值有着巨大差异。因此,在研究地层温度情况时,是否考虑饱水状态对分析地层温度有着重要影响。本文选取了海南岛三亚地区的一个地层剖面,建立二维地质模型(图 1 4 中 A—B 剖面),进行温度场模拟。温度场模型针对岩石是否考虑饱水状态进行研究。

由于海南岛地区大地热流数据较少,模拟地区缺少大地热流数据,选取距离研究区最近的陵水地区大地热流作为本次热流参数,为 $73.18\text{ mW}/\text{m}^2$ (胡圣标等,2001)。由于未能获取第四系沉积物和榆红组地层岩石(O_3yh)热物性值,因此前者热物性采用本次所有沉积碎屑岩热物性平均值,后者热物性使用干沟村组(O_3g)和尖岭组(O_3j)热物性平均值进行替代,其他沉积层和岩浆岩的热物性参数均来自本研究实际测试结果。设置顶部温度边界(20°C),底部为热流边界,两侧为绝热边界。利用

COMSOL Multiphysics 软件对地层不含水状态下和饱水状态下进行二维温度模拟。图 14 结果显示,两者温度聚集情况出现差异,从温度分布特征来看,干燥状态下地层温度略高于饱水状态。从地层热导率情况和 2 km 深度横向温度变化曲线来看(图 14d、e),温度在相对较低的热导率地层聚集,这表明低热导率地层更容易潜在有利的地热资源。

为了量化的观察温度变化情况,在模型中设置三口虚拟温度观测井(W1、W2、W3),用于观察底部温度变化。图 15 结果显示,考虑地层饱水状态的情况下时,三口观测井的井底温度均低于未考虑饱水情况。W1 井从 89°C 降为 76°C ;W2 井由 77°C 降为 66°C ;W3 井由 76°C 降为 68°C 。三口虚拟观测井平均降低了 10°C 。因此,地层岩石热导率对地温场研究尤为重要。在研究地温场过程中,是否考虑岩石饱水状态将对地温场结果有着显著影响。尤其在含水率高的地层,忽略饱水对岩石的影响可能导致预测的温度偏高,进而影响区域地热资源有利靶区的选取和开发利用。

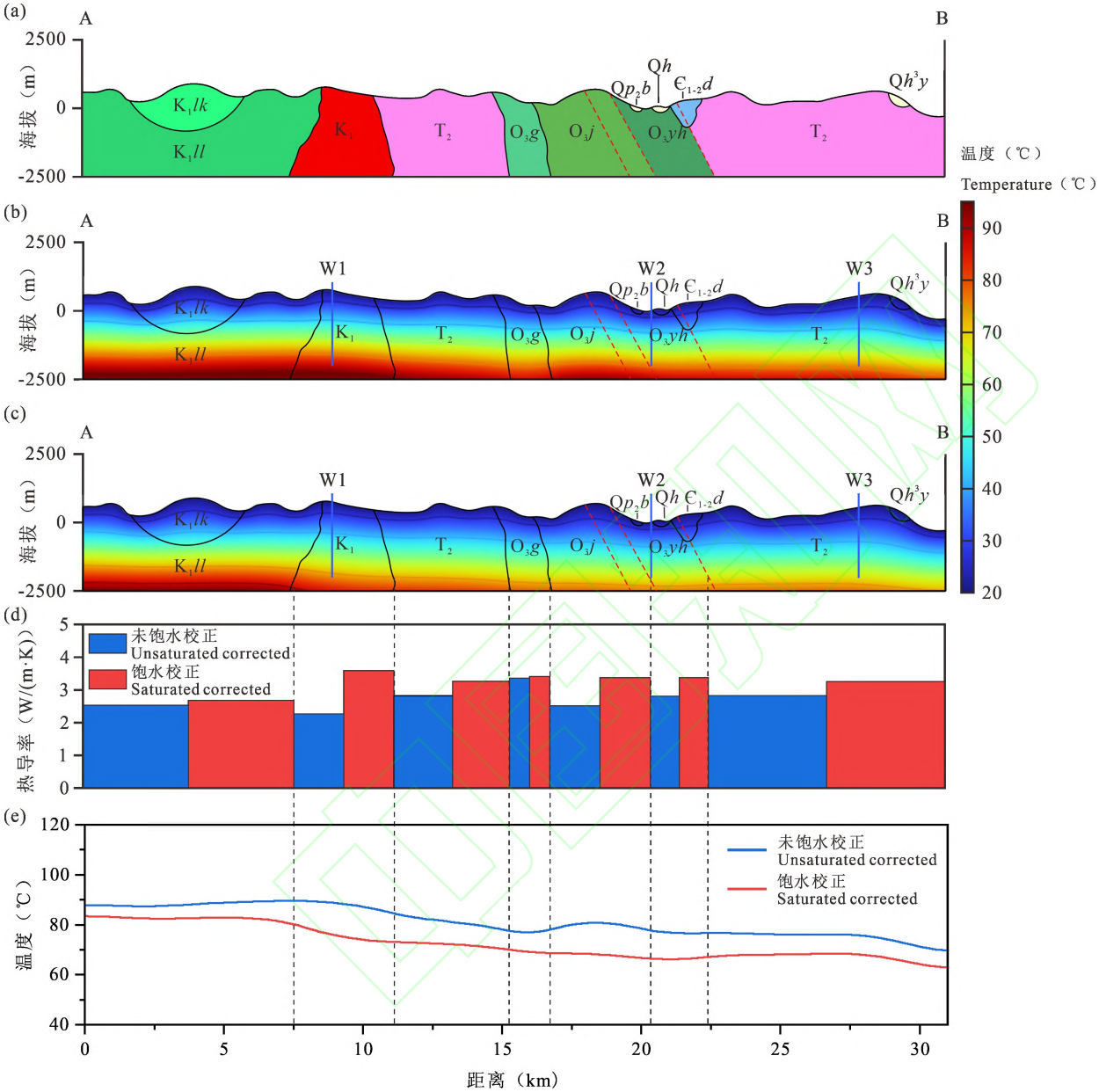


图 14 海南岛三亚 A—B 剖面温度模拟结果

Fig. 14 Temperature simulation results of Sanya A—B profile in Hainan Island

(a) 剖面简图; (b) 一未考虑饱水温度结果; (c) 一考虑饱水温度结果; K_1lk —岭壳村组火山岩; K_1ll —六罗村组火山岩; K_1 —早白垩世花岗岩; T_2 —中三叠世花岗岩; O_3g —干沟村组沉积岩; O_3j —尖岭组沉积岩; O_3yh —榆红组沉积岩; $E_{1-2}d$ —大茅组沉积岩; $Q_{p_2}b$ 、 Qh 、 Qh^3y —第四纪沉积物

(a)—profile sketch; (b)—without considering saturation temperature results; (c)—considering saturation temperature results; K_1lk —Lingqiaocun Formation volcanic rocks; K_1ll —Liuluocun Formation volcanic rocks; K_1 —Early Cretaceous granite; T_2 —Middle Triassic granite; O_3g —Gangoucun Formation sedimentary rocks; O_3j —Jianling Formation sedimentary rocks; O_3yh —Yuhong Formation sedimentary rocks; $E_{1-2}d$ —Damao Formation sedimentary rocks; $Q_{p_2}b$, Qh , Qh^3y —Quaternary sediment

5 结论

通过对海南岛各类岩石热物性系统分析,得到如下认识:

(1)海南岛三类岩石热物性存在差异。对于热

导率,变质岩最高($3.16 \pm 1.41 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),沉积岩次之($2.53 \pm 0.80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),火成岩最低($2.40 \pm 0.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$);对于生热率,火成岩最高($2.68 \pm 1.68 \mu\text{W}/\text{m}^3$),沉积岩次之($1.90 \pm 0.92 \mu\text{W}/\text{m}^3$),变质岩最低($1.10 \pm 0.95 \mu\text{W}/\text{m}^3$)。

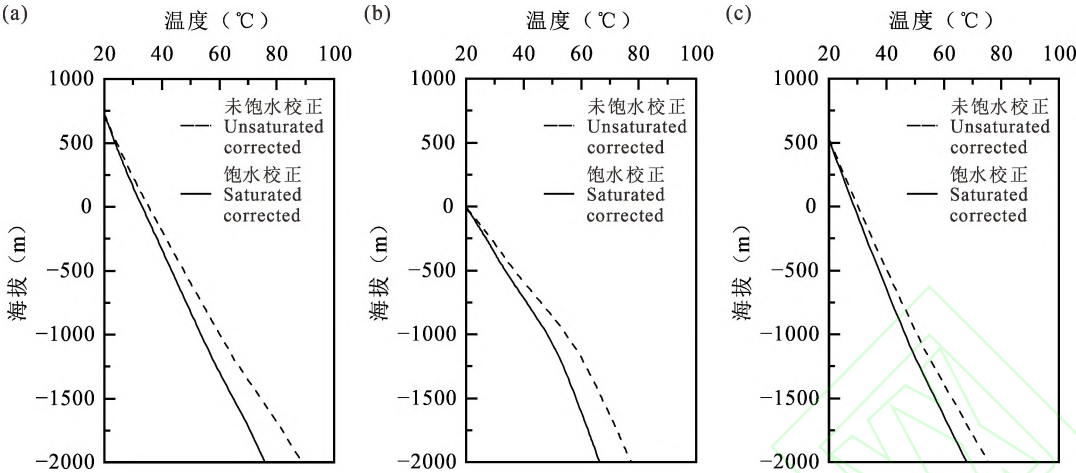


图 15 模拟井温度随深度变化曲线

Fig. 15 Simulated well temperature variation curve with depth

(a)—W1 观测井;(b)—W2 观测井;(c)—W3 观测井

(a)—W1 observation well; (b)—W2 observation logging; (c)—W3 observation well

(2)岩石进行饱水校正之后,热导率有着显著增加。饱水对岩石热导率的影响与孔隙度正相关。受复杂孔隙结构影响,不同岩性热导率的饱水影响呈现出差异性。基于实验结果和理论计算,建立了海南岛地区的岩石热导率饱水校正公式。

(3)岩石放射性元素产热贡献及其与生热率关系具有不同表现。岩石中 U 和 Th 为主要产热元素,产热贡献超过 30%,并且均与生热率呈线性正相关;而 K 在岩石生热率过程中贡献相对较低,产热贡献低于 20%,其与生热率之间的正相关性也明显弱于 U 和 Th。

(4)地层的热导率和生热率差异显著影响温度分布。考虑岩石饱水状态与未考虑此状态的温度场模拟结果之间存在明显差异。在具有高含水率的地层中,若忽视饱水对岩石的影响,可能会导致温度预测结果偏高。

References

Chen Chi, Zhu Chuanqing, Tang Boning, Chen Tiange. 2020. Progress in the study of the influencing factors of rock thermal conductivity. *Progress in Geophysics*, 35(6): 2047~2057 (in Chinese with English abstract).

Chen Jie. 2020. Petrological characteristics and genesis of Permian granite in Baoting area, Hainan Province. Master's thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).

Chen Moxiang, Xia Sigao, Yang Shuzhen. 1991. Local geothermal anomalies and their formation mechanisms on Leizhou Peninsula, South China. *Chinese Journal of Geology*, (4): 369~383 (in Chinese with English abstract).

Cui Yue, ZhuChuanqin, Qiu Nansheng, Tang Boning, Gou Sasa, Lu Zhiwei. 2022. The heat source origin of geothermal resources in Xiong'an New Area, North China, in view of the influence of igneous rocks. *Frontiers in Earth Science*,

10:818129.

Ding Rui, Zhu Chuanqing, Cao Qian, Fang Chaohe, Yang Yabo, Jiang Xiaoxue. 2023. Numerical simulation of buried hill geothermal resources exploitation in Hejian Erea. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 248~256 (in Chinese with English abstract).

Dong Hailong. 2014. The geochemical feature of Cretaceous granites from the south of Hainan-Vietnam and tectonic evolution of proro-South China Sea. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing).

Du Yujing. 2022. Geochemical characteristics and geological significance of early Paleozoic volcanic rocks on Hainan Island. Master's thesis of Guilin University of Technology (in Chinese with English abstract).

Duchkov A D, Sokolova L S, Rodyakin S V, Chernysh P S. 2014. Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the West Siberian Plate in relation to their humidity and porosity. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5~6): 784~792.

Ge Xiaoyue. 2003. Mesozoic magmatism in Hainan Island (SE China) and its tectonic significance: Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotope evidences. Doctoral dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

Gou Qiyu, Qian Xin, He Huiying, Zhang Yuzhi, Wang Yuejun. 2019. Geochronological and geochemical constraints on Lizhigou Middle Triassic felsic volcanic rocks in Hainan and its tectonic implications. *Earth Science*, 44(4): 1357~1370 (in Chinese with English abstract).

He Huiying, Wang Yuejun, Zhang Yuzhi, Chen Xinyue, Zhou Yongzhi. 2016. Extremely depleted Carboniferous N-MORB metabasite at the Chenxing area (Hainan) and its geological significance. *Earth Science*, 41(8): 1361~1375 (in Chinese with English abstract).

Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). *Chinese Journal of Geophysics*, (5): 611~626 (in Chinese with English abstract).

Hurley P M, Fairbairn H W. 1953. Radiation damage in zircons: A possible age method. In the central Alps, Switzerland. *Tectonophysics*, 41(3): 113~126.

Jia Xiaohua, Wang Qiang, Tang Gongjian, Jiang Ziqi, Zhao Zhenghua, Yang Yueheng, Wang Xiaodi, Zhao Wuqiang. 2010. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Late Early Cretaceous adakitic intrusive rocks in the Tunchang area, Hainan Province. *Geochimica*, 39

- (6): 497~519 (in Chinese with English abstract).
- Jorand R, Fehr A, Koch A, Clauser C. 2011. Study of the variation of thermal conductivity with water saturation using nuclear magnetic resonance. *Journal of Geophysical Research*, 116 (B8): 1~12.
- Kuang Jian, Qi Shihua, Wang Shuai, Xiao Zhicai, Zhang Min, Zhao Xun, Gang Haonan. 2020. Granite intrusion in Huizhou, Guangdong Province and its geothermal implications. *Earth Science*, 45 (4): 1466~1480 (in Chinese with English abstract).
- Lei Xiaodong, Hu Shengbiao, Li Juan, Yang Quanghe, Han Yuda, Jiang Guangzheng. 2018. Thermal properties analysis of bedrock in Beijing. *Progress in Geophysics*, 33(5): 1814~1823 (in Chinese).
- Li Wenjing, Wang Guiling, Gan Haonan. 2024. Differential crustal thermal structure and geothermal significance in the igneous region of southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, 98(2): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiang, Wei Junhao, Li Yangjun, Zhai Yulin. 2016. Zircon U-Pb age and geochemical and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of the early Cretaceous Shilu A-type granite in Hainan Island, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(3): 587~602 (in Chinese with English abstract).
- Lichtenecker K. 1926. Dielektrizitätskonstante natürlicher und künstlicher mischkörper. *Physikalische Zeitschrift*, 27: 115~158.
- Liu Jiangqiang, Ren Zhongyuan. 2013. Diversity of source lithology and its identification for basalts: A case study of the Hainan basalts. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(3): 471~488 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiang. 2013. The characteristics of the Cretaceous in the South Hainan and its significance to the tectonics of the north margin of the Proto-South China sea. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Shaowen, Wang Liangshu, Li Chen, Zhang Peng, Li Hua. 2006. Lithospheric thermo-rheological structure and Cenozoic thermal regime in the Tarim basin, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 344~350 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhaoying, Chen Mulong, Fu Yangrong, Yuan Qinmin, Wei Changxin, Chang Zhenyu, Hu Zailong. 2019. Petrogenesis study of two stages A-type granite and its geological significance in Danzhou area of Hainan Province. *Mineral Resources and Geology*, 33(4): 660~669 (in Chinese with English abstract).
- Maystrenko Y P, Gernigon L. 2018. 3-D temperature distribution beneath the Mid-Norwegian continental margin (the Vøring and Møre basins). *Geophysical Journal International*, 212(1): 694~724.
- Metcalfe I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605~623.
- Nagaraju P, Roy S. 2014. Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements. *Tectonophysics*, 626: 137~143.
- Niu Xiaolu, Liu Fei, Feng Guangying, Yang Jingsui. 2022. Geochemical evolution and origin of Late Cenozoic basalts from north Hainan Island (southern China). *Acta Geologica Sinica*, 96(8): 2705~2724 (in Chinese with English abstract).
- Norden B, Förster A, Förster H, Fuchs S. 2020. Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: Impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration. *Geothermal Energy (Heidelberg)*, 8(1): 1~19.
- Pribnow D, Williams C F, Sass J H, Keating R. 1996. Thermal conductivity of water-saturated rocks from the KTB Pilot Hole at temperatures of 25 to 300°C. *Geophysical Research Letters*, 23(4): 391~394.
- Qi Chongxiang, Wen Shunu, Pang Chongjin, Liang Hang, Wang Yong, Guan Jun, Yu Hongxia. 2023. Formation of Middle-Triassic A-type granites in Northern Hainan Island and its geological implications. *Geochimica*, 52(1): 69~83.
- Qiu Nansheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 196~206 (in Chinese with English abstract).
- Rybach L. 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 114(2): 309~317.
- Schärli U, Rybach L. 1984. On the thermal conductivity of low-porosity crystalline rocks. *Tectonophysics*, 103(1~4): 307~313.
- Shi Hongcai, Xie Hui, Zhao Weina, Liu Tangwei, Kong Deming. 2022. Denudation history of Northern Hainan Island since Late Mesozoic-Cenozoic: Evidence from low-temperature thermochronology. *Journal of Guangdong Ocean University*, 42(1): 78~89 (in Chinese with English abstract).
- Shu Yunsheng. 2013. Mesozoic magmatism in Yacheng-Sanya area (south of Hainan Island) and its tectonic significance: Geochronology and geochemistry evidences. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Somerton W H. 1958. Some thermal characteristics of porous rocks. *Transactions of the AIME*, 213(1): 375~378.
- Song Hongxing. 2022. Mesoproterozoic mafic magmatism and its geological significances on Hainan Island. Master's thesis of Guilin University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Song Ning, Shi Guanghui, Gao Gouqiang, Xin Renchen, Fang Nianqiao. 2011. Thermal conductivity of Paleogene-Upper Cretaceous rocks in Subei basin. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 4(1): 10~13 (in Chinese with English abstract).
- Sugawara A, Yoshizawa Y. 1961. An investigation on the thermal conductivity of porous materials and its application to porous rock. *Australian Journal of Physics*, 14(4): 469~480.
- Tang Boning, Zhu Chuanqing, Xu Ming, Chen Tiange, Hu Shengbiao. 2019. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Sichuan basin, Southwest China. *Energy Exploration & Exploitation*, 37: 691~720.
- Tang Limei. 2010. Magmatic evidence of two tectonic extension events during the Mesozoic in Hainan Island and geodynamic implications. Doctoral dissertation of Zhejiang University (in Chinese with English abstract).
- Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan, Zhang Dailei, Liu Zhong, Zhao Xun, Cheng Tianjun. 2020. Geological model of heat source mechanism and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052~2065 (in Chinese with English abstract).
- Vilá M, Fernández M, Jiménez-Munt I. 2010. Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling. *Tectonophysics*, 490(3~4): 152~164.
- Wang Chao, Wei Changxin, Yun Ping, Lü Change, Lü Zhaoying, Meng Zhongying. 2019. Zircon U-Pb age, geochemistry and geological significance of Shunzuo granite in Wuzhishan area, Hainan Island. *Geological Bulletin of China*, 38(8): 1352~1361 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gouqing, Gou Feng, Zhao Liang. 2022. Origin of Cenozoic basalts in Hainan Island: Constraints from Re-Os isotopes and PGE geochemistry. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(3): 483~500 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Ko Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. *Special Issues*, 30(32): 25~31 (in Chinese with English abstract).

- Wang Xiaofeng, Ma Daquan, Jiang Dahai. 1991. Geology of Hainan Island (1): Stratigraphic Paleontology. Beijing: Geological Publishing House, 1~280 (in Chinese).
- Wollenberg H A, Smith A R. 1987. Radiogenic heat production of crustal rocks: An assessment based on geochemical data. *Geophysical Research Letters*, 14(3): 295~298.
- Woodside W, Messmer J H. 1961. Thermal conductivity of porous media. I. unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics*, 32(9): 1688~1699.
- Xin Shouliang, Wang Jiali, Dou Huiping, Wang Yi, Zhang Jing, He Yaqin. Experiments and analysis of thermal physical property of rocks and its effect factor on buried hill resource. *Mineralogy and Petrology*, 34(4): 102~107 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Liangping, Hu Shengbiao, Wang Jian. 1994. Analysis on thermal conductivity of rocks from SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 10(3): 323~329 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deiming, Xie Caifu, Zhang Yeming, Fu Taian, Li Zhihong. 2005. Sm and Nd isotopic geochemistry of Paleo-Mesoproterozoic meta-basic volcanics from Middle Hainan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, (5): 453~459 (in Chinese with English abstract).
- Yun Ping, Lei Yuhong, Lü Changyan. 2005. SR and ND isotope constraints on the source regions of the Triassic granitoids in central-northern Hainan Island and their significance. *Geotectonica et Metallogenia*, (2): 234~241 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Hu Shengbiao, Song Rongcai, Zou Yinhui, Jiang Guangzheng, Lei Yupeng, Zhang Shengsheng, Wang Zhuting. 2020. Genesis of the hot dry rock geothermal resources in the Gonghe basin: Constraints from the radiogenic heat production rate of rocks. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(7): 2697~2709.
- Zhang Lei, Mai Fahai, Wang Chaoqun, Jia Liyun, Zhang Yaoling, Sun Dongxia, Hu Daogong. 2022. Sr-Nd isotopic composition and provenance tracing of Late Cenozoic sediments in the northern Hainan Island. *Geological Bulletin of China*, 41(11): 1996~2006 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhigang. 2015. The Petrological characteristics and tectonic setting of Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks, Hainan Island. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhuo. 2014. Petrogenesis of the Early Permian (strongly) peraluminous granites from Wuzhishan area, Hainan and its geotectonic implications. Master's thesis of East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhao Guofeng, Liu Huichuan, Qian Xin, Zhang Aimei, He Jingwen, He Huiying, Wang Yuejun. 2018. Petrogenesis of late Permian I-type granites in SE Hainan Island and its tectonic implication for Paleotethyan evolution. *Earth Science*, 43(4): 1321~1332 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping, Wang Ji, Wang Jian, Luo Dinggui. 1995. Distribution characteristics of heat production distribution in SE China. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 292~305 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, Wang Ke, Liu Jianguo, Zhang Yage. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin. *Geology in China*, 44(5): 1017~1026 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yun, Liang Xinqun, Liang Xirong, Jiang Ying, Cai Yunhua, Zou Shuichang, Wang Ce, Fu Jiangang, Dong Chaohe. 2015. Geochronology and geochemistry of Cretaceous volcanic rocks from Liuluo Formation in Hainan Island and their tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 903~918 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yun, Zhao Yongshan, Du Yujing, Cai Yongfeng, Feng Zuohai, Liu Xijun, Song Hongxing. 2021. Identification of early Paleozoic andesite in Northwestern Hainan Island and its geotectonic significances. *Earth Science*, 46(11): 3850~3860 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zoumin, Xie Caifu, Xu Qian, Gao Dafei. 2011. Geological and geochemical characteristics of the Middle Triassic syenite-granite suite in Hainan Island and its geotectonic implications. *Geological Review*, 57(4): 515~531 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Chuanqing, Hu Shengbiao, Qiu Nansheng, Rao Song, Yuan Yusong. 2016. The thermal history of the Sichuan basin, SW China: Evidence from deep boreholes. *Science China: Earth Sciences*, 59: 70~82.
- Zhu Chuanqing, Xu Tong, Qiu Nansheng, Chen Tiange, Xu Ming, Ding Rui. 2022a. Distribution characteristics of the deep geothermal field in the Sichuan basin and its main controlling factors. *Frontiers in Earth Science (Lausanne)*, 10: 824056.
- Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Chen Tiange, Xu Ming, Ding Riu, Yang Yabo. 2022b. Thermal lithospheric thickness of the Sichuan basin and its geological implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 96(4): 1323~1330.
- Zhu Chuanqing, Chen Chi, Yang Yabo, Qiu Nansheng. 2022. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment. *Petroleum Science Bulletin*, 3: 321~333 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Chuanqing, Chen Chi, Jiang Xiaoxue. 2023. Numerical simulation of internal factors that influence the thermal conductivity of rock. *International Journal of Thermophysics*, 44: 24.
- Zimmerman R W. 1989. Thermal conductivity of fluid-saturated rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 3(3): 219~227.

参 考 文 献

- 陈驰, 朱传庆, 唐博宁, 陈天戈. 2020. 岩石热导率影响因素研究进展. *地球物理学进展*, 35(6): 2047~2057.
- 陈婕. 2020. 海南保亭地区二叠纪花岗岩岩石学特征及其成因研究. 成都理工大学硕士学位论文.
- 陈墨香, 夏斯高, 杨淑贞. 1991. 雷州半岛局部地热异常及其形成机制. *地质科学*, (4): 369~383.
- 丁蕊, 朱传庆, 曹倩, 方朝合, 杨亚波, 江晓雪. 2023. 河间潜山地热资源开发方案数值模拟. *地球学报*, 44(1): 248~256.
- 董海龙. 2014. 琼南越南白垩纪花岗岩岩石地球化学特征与古南海构造演化. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 杜宇晶. 2022. 海南岛早古生代火山岩地球化学特征及地质意义. 桂林理工大学硕士学位论文.
- 葛小月. 2003. 海南岛中生代岩浆作用及其构造意义. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所) 博士学位论文.
- 苟琪钰, 钱鑫, 何慧莹, 张玉芝, 王岳军. 2019. 海南荔枝沟中三叠世酸性火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义. *地球科学*, 44(4): 1357~1370.
- 何慧莹, 王岳军, 张玉芝, 陈新跃, 周永智. 2016. 海南岛晨星早石炭世高度亏损 N-MORB 型玄武岩及其地质意义. *地球科学*, 41(8): 1361~1375.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集咏. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版). *地球物理学报*, (5): 611~626.
- 贾小辉, 王强, 唐功建, 姜子琦, 赵振华, 杨岳衡, 王晓地, 赵武强. 2010. 海南屯昌早白垩世晚期埃达克质侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学与岩石成因. *地球化学*, 39(6): 497~519.
- 旷健, 祁士华, 王帅, 肖志才, 张敏, 赵旭, 甘浩男. 2020. 广东惠州花岗岩体及其地热意义. *地球科学*, 45(4): 1466~1480.
- 雷晓东, 胡圣标, 李娟, 杨全合, 韩宇达, 姜光政, 郑佳. 2018. 北京地区基岩地层热物性参数特征. *地球物理学进展*, 33(5): 1814~1823.
- 李翔, 魏俊浩, 李艳军, 翟玉林. 2016. 海南岛早白垩世初期 A 型花岗岩成因: U-Pb 年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素制约. *大地构造与成矿学*, 40(3): 587~602.

- 蒯文静, 王贵玲, 甘浩男. 2024. 华南陆缘火成岩区差异性地壳热结构及地热意义. 地质学报, 98(2): 1~14.
- 刘建强, 任钟元. 2013. 玄武岩源区母岩的多样性和识别特征: 以海南岛玄武岩为例. 大地构造与成矿学, 37(3): 471~488.
- 刘强. 2013. 琼南白垩系与古南海北缘构造环境特征. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 刘绍文, 王良书, 李成, 张鹏, 李华. 2006. 塔里木盆地岩石圈热-流变学结构和新生代热体质. 地质学报, 80(3): 344~350.
- 吕昭英, 陈沐龙, 傅杨荣, 袁勤敏, 魏昌欣, 常振宇, 胡在龙. 2019. 海南岛儋州地区两期 A 型花岗岩的岩石成因与地质意义. 矿产与地质, 33(4): 660~669.
- 牛晓露, 刘飞, 冯光英, 杨经绥. 2022. 海南岛北部晚新生代玄武岩成分演化及成因讨论. 地质学报, 96(8): 2705~2724.
- 齐重向, 温淑女, 庞崇进, 梁航, 王勇, 官军, 余红霞. 2023. 海南岛北部中三叠世 A 型花岗岩的成因及其地质意义. 地球化学, 52(1): 69~83.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征. 地质科学, 37(2): 196~206.
- 石红才, 谢辉, 赵维娜, 刘唐伟, 孔德明. 2022. 海南岛北部晚中-新生代剥露过程的低温年代学约束. 广东海洋大学学报, 42(1): 78~89.
- 束云生. 2013. 海南岛南部崖城-三亚一带中生代岩浆作用及其构造意义. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 宋宏星. 2022. 海南岛中元古代基性岩浆活动及其地质意义. 桂林理工大学硕士学位论文.
- 宋宁, 史光辉, 高国强, 辛仁臣, 方念乔. 2011. 苏北盆地古近系-上白垩统的岩石热导率. 复杂油气藏, 4(1): 10~13.
- 唐立梅. 2010. 海南岛中生代两期构造伸展作用的岩浆记录及其大陆动力学意义. 浙江大学博士学位论文.
- 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. 地质学报, 94(7): 2052~2065.
- 汪集旻, 等. 2015. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社.
- 汪集旻, 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. 科技导报, 30(32): 25~31.
- 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991. 海南岛地质(一): 地层古生物. 北京: 地质出版社, 1~280.
- 王超, 魏昌欣, 云平, 吕嫦艳, 吕昭英, 蒙忠盈. 2019. 海南岛五指山地区顺作花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质通报, 38(8): 1352~1361.
- 王国庆, 郭锋, 赵亮. 2022. 海南岛新生代玄武岩成因的 PGE 与 Os 同位素地球化学制约. 大地构造与成矿学, 46(3): 483~500.
- 辛守良, 王家立, 豆惠萍, 王艺, 张晶, 和雅琴. 2014. 潜山油藏岩石热物理性质影响因素实验及分析. 矿物岩石, 34(4): 102~107.
- 熊亮萍, 胡圣标, 汪缉安. 1994. 中国东南地区岩石热导率值的分析. 岩石学报, 10(3): 323~329.
- 徐德明, 谢才富, 张业明, 付太安, 李志宏. 2005. 琼中古-中元古代变质基性火山岩地球化学特征. 成都理工大学学报(自然科学版), (5): 453~459.
- 云平, 雷裕红, 吕嫦艳. 2005. 海南岛中北部三叠纪花岗岩源区的锶、钕同位素制约及其意义. 大地构造与成矿学, (2): 234~241.
- 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 左银辉, 姜光政, 雷玉鹏, 张盛生, 王朱亨. 2020. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制: 来自岩石放射性生热率的约束. 地球物理学报, 63(7): 2697~2709.
- 张磊, 麦发海, 王超群, 贾丽云, 张耀玲, 孙东霞, 胡道功. 2022. 海南岛北部晚新生代沉积物 Sr-Nd 同位素组成及其物源示踪. 地质通报, 41(11): 1996~2006.
- 张志刚. 2015. 海南中新新生代火山岩岩石学特征及形成构造背景. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文.
- 张卓. 2014. 海南五指山地区早二叠世(强)过铝花岗岩成因及构造意义. 东华理工大学硕士学位论文.
- 赵国锋, 刘汇川, 钱鑫, 张爱梅, 何景文, 何慧莹, 王岳军. 2018. 琼东南晚二叠世 I 型花岗岩成因及其构造指示. 地球科学, 43(4): 1321~1332.
- 赵平, 汪集, 汪缉安, 罗定贵. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报, (3): 292~305.
- 周阳, 穆根胥, 张卉, 王克, 刘健国, 张亚鸽. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素. 中国地质, 44(5): 1017~1026.
- 周云, 梁新权, 梁细荣, 蒋英, 蔡运花, 邹水长, 王策, 付建刚, 董超阁. 2015. 海南白垩纪六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义. 大地构造与成矿学, 39(5): 903~918.
- 周云, 赵永山, 杜宇晶, 蔡永丰, 冯佐海, 刘希军, 宋宏星. 2021. 海南岛西北部早古生代安山岩的识别及其大地构造意义. 地球科学, 46(11): 3850~3860.
- 周佐民, 谢才富, 徐倩, 高大飞. 2011. 海南岛中三叠世正长岩-花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义. 地质论评, 57(4): 515~531.
- 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 邱楠生. 2022. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示. 石油科学通报, 7(3): 321~333.

Thermophysical characteristics of rocks in Hainan Island
and its influence on the geothermal field

LI Kefu^{1,2)}, ZHU Chuanqing^{* 1,2)}, MA Zhao^{1,2)}, YANG Junsheng^{1,2)}, SU Hong^{1,2)}, XING Shudi^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University
of Petroleum, Beijing 102249, China;

2) College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

* Corresponding author: zhucq@cup.edu.cn

Abstract

The thermal properties of rocks are one of the important parameters for studying the characteristics of geothermal fields, and play an important role in studying geothermal fields and evaluating geothermal resources. In order to quantitatively understand the thermal properties of rocks and their impact on the geothermal field. This study systematically analysis of the thermophysical characteristics of rocks in Hainan Islandby thermal physical properties testing of outcrop samples, providing new data and references for research in areas related to regional geothermal energy. The results of this study indicate that: ① There are differences in the thermal properties of the three types of rocks in Hainan Island. For thermal conductivity, metamorphic rocks have the highest ($3.16 \pm 1.41 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Sedimentary rocks have the second highest ($2.53 \pm 0.80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). And igneous rocks have the lowest ($2.40 \pm 0.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); Igneous rocks have the highest heat generation rate ($2.68 \pm 1.68 \mu\text{W}/\text{m}^3$), followed by sedimentary rocks ($1.90 \pm 0.92 \mu\text{W}/\text{m}^3$). And metamorphic rocks have the lowest ($1.10 \pm 0.95 \mu\text{W}/\text{m}^3$). ② Porosity and thermal conductivity are negatively correlated, while density and thermal conductivity are positively correlated. After the saturation correction of the rock, the thermal conductivity value has significantly increased. At the same time, based on the specific situation of Hainan Island, we established an empirical formula for saturation correction that is suitable for the area. ③ U and Th are the main heat-generating elements in rocks, and both have a linear positive correlation with the heat generation rate. While the correlation of K is relatively weak. ④ The different thermal conductivity and heat generation rate of the strata result in uneven temperature distribution, which affects the accumulation of strata temperature; At the same time, in the simulation of temperature field, there are differences in the simulation results between considering and not considering the saturation of the rock.

Key words: thermal conductivity; heat generation rate; geothermal field; Hainan Island; radioactive heat generation elements

附表 1 热导率测量数据

Appendix 1 Thermal conductivity measurement data

样品编号	岩性	热导率 (W/(m·K))	饱和热导率 (W/(m·K))	热扩散率 (mm ² /s)	比热容 (MJ/m ³ ·K)	孔隙度 (%)
HK-1	玄武岩	1.73	1.82	1.02	1.70	5.24
HK-2	玄武岩	1.14	1.40	0.74	1.55	3.71
HK-3	玄武岩	1.03	1.22	0.56	1.85	5.69
HK-4	玄武岩	1.72	1.83	0.89	1.93	0.69
LD-1	石英砂岩	4.57	6.71	3.56	1.29	1.68
LD-2	板岩	2.34	2.92	1.42	1.65	3.11
LD-3	结晶灰岩	7.02	7.41	4.26	1.65	0.41
LD-4	千枚岩	2.33	3.41	3.14	0.74	4.23
LD-5	千枚岩	2.56	2.81	2.08	1.23	0.48
LD-6	结晶灰岩	4.15	4.44	2.53	1.64	0.69
LD-7	结晶灰岩	4.77	5.32	5.81	0.87	0.37
LD-8	板岩	2.56	2.91	1.79	1.43	2.7
LD-9	结晶灰岩	2.87	3.17	1.45	1.98	0.92
LD-10	花岗岩	2.91	3.00	1.96	1.49	0.99
LD-11	砂岩	2.48	2.93	1.53	1.63	0.98
LD-12	千枚岩	1.64	2.34	1.67	0.99	2.59
LD-13	砂岩	1.75	2.24	1.39	1.26	6.15
LD-14	结晶灰岩	3.46	3.50	2.31	1.50	0.75
LD-15	结晶灰岩	3.04	3.09	1.50	2.04	0.29
LD-16	结晶灰岩	2.77	3.07	2.39	1.16	0.75
LD-17	结晶灰岩	2.89	2.92	1.40	2.06	1.13
LD-18	千枚岩	2.04	2.81	2.72	0.76	0.82
LD-19	花岗岩	3.65	3.65	1.81	2.01	0.27
LD-20	千枚岩	1.15	2.06	1.26	0.92	10.49
LD-21	闪长岩	2.98	3.55	1.75	1.71	0.24
LD-22	片麻岩	2.60	2.68	1.77	1.47	1.32
LD-23	石英岩	5.83	7.06	3.71	1.57	0.24
QH-1	砂岩	2.55	3.64	1.29	1.98	5.71
QH-2	泥岩	1.78	3.35	1.63	1.10	3.89
QH-2-1	泥岩	2.22	3.02	1.18	1.91	1.44
QH-3	砂岩	1.68	2.73	1.06	1.58	13.95
QH-5	千枚岩	1.42	2.47	0.82	1.74	9.87
QH-6	千枚岩	2.26	4.06	1.60	1.42	3.06
QH-7	砂岩	3.93	3.99	1.63	2.41	0.82
QH-8	石英砂岩	1.39	3.65	1.89	0.74	9.81
QH-9	千枚岩	4.32	5.22	3.68	1.32	1.94
QH-10	云母片岩	2.19	2.61	0.92	2.40	1.8
SY-1	花岗岩	2.64	2.73	1.77	1.49	0.74
SY-2	花岗岩	2.16	2.38	1.13	1.91	1.42
SY-3	斑岩	2.91	3.29	2.03	1.43	0.18
SY-4	花岗岩	2.66	3.23	2.06	1.29	0.79
SY-5	安山岩	2.79	3.11	2.37	1.18	0.35
SY-6	安山岩	2.11	2.36	0.86	2.46	0.07
SY-7	石英砂岩	4.28	6.28	2.84	1.51	1.15
SY-8(1)	石英砂岩	3.45	4.77	2.25	1.54	1.02
SY-8(2)	砂岩	1.59	1.99	0.83	1.92	12.37
SY-9	砂岩	3.36	3.44	2.12	1.58	3.07
SY-10	灰岩	2.69	2.78	1.85	1.46	2.14
SY-11	石英岩	4.16	7.18	4.13	1.01	1.03
SY-12	灰岩	3.72	3.92	2.02	1.85	0.95
SY-13	灰岩	2.53	2.58	1.31	1.94	0.18
SY-14	花岗岩	3.28	3.43	1.84	1.78	0.78
SY-15	花岗岩	3.02	3.27	1.82	1.66	1.38
SY-16	安山岩	2.97	3.01	1.54	1.92	0.39

续附表 1

样品编号	岩性	热导率 (W/(m·K))	饱和热导率 (W/(m·K))	热扩散系 (mm ² /s)	比热容 (MJ/m ³ ·K)	孔隙度 (%)
SY-17	凝灰岩	2.74	3.00	1.95	1.41	0.42
WC-1	玄武岩	1.60	1.64	0.70	2.31	0.78
WC-2	玄武岩	1.47	1.50	0.79	1.87	1.28
WC-3	玄武岩	1.69	1.70	0.75	2.25	0.36
WC-4	花岗岩	2.99	3.30	1.73	1.73	0.39
WC-5	玄武岩	1.75	1.81	0.80	2.18	1.43
WC-6	花岗岩	2.59	3.60	1.59	1.62	0.49
WC-7	花岗岩	3.18	3.54	1.86	1.71	0.62

附表 2 生热率测量数据

Appendix 2 Heat generation rate measurement data

样品编号	岩性	U(×10 ⁻⁶)	Th(×10 ⁻⁶)	K(%)	密度 (g/cm ³)	生热率 (μW/m ³)
HK-3	玄武岩	0.65	2.56	0.50	2.13	0.31
LD-1	石英砂岩	0.27	1.04	0.07	2.568	0.14
LD-2	板岩	4.05	19.60	3.92	2.513	2.57
LD-3	结晶灰岩	0.35	1.04	0.01	2.63	0.16
LD-4	千枚岩	1.35	8.42	2.91	2.508	1.12
LD-5	千枚岩	3.17	18.30	4.07	2.664	2.43
LD-6	结晶灰岩	0.65	0.67	0.11	2.811	0.23
LD-7	结晶灰岩	0.17	0.25	0.03	2.821	0.07
LD-8	板岩	1.93	9.30	2.84	2.63	1.37
LD-9	结晶灰岩	2.44	15.20	5.69	2.539	2.08
LD-10	花岗岩	3.69	6.23	4.38	2.59	1.72
LD-11	砂岩	5.78	24.80	4.64	2.565	3.45
LD-12	千枚岩	2.63	16.00	3.58	2.499	1.96
LD-13	砂岩	2.78	12.30	2.72	2.287	1.54
LD-14	结晶灰岩	2.48	11.20	2.22	2.719	1.63
LD-15	结晶灰岩	0.97	0.08	0.01	2.677	0.25
LD-16	结晶灰岩	2.31	0.10	0.01	2.644	0.59
LD-17	结晶灰岩	1.81	0.08	0.01	2.321	0.41
LD-18	千枚岩	6.58	17.10	3.29	2.692	3.17
LD-19	花岗岩	8.22	53.10	4.62	2.60	5.99
LD-20	千枚岩	3.07	18.60	3.61	2.323	2.08
LD-21	花岗闪长岩	3.22	16.20	2.82	2.64	2.16
LD-22	片麻岩	0.22	1.27	0.31	2.966	0.19
LD-23	石英岩	0.08	0.14	0.02	2.619	0.03
QH-1	砂岩	1.73	3.75	2.52	2.495	0.87
QH-2	泥岩	2.78	17.30	2.75	2.565	2.06
QH-3	砂岩	4.42	15.60	3.29	2.243	2.10
QH-4	石英岩	0.18	0.37	0.02	2.581	0.07
QH-5	千枚岩	4.08	16.70	3.84	2.168	2.06
QH-6	千枚岩	2.45	12.50	2.62	2.537	1.63
QH-7	砂岩	4.53	17.20	4.48	2.742	2.82
QH-8	石英砂岩	1.27	8.11	1.75	2.38	0.93
QH-9	千枚岩	2.50	3.27	1.16	2.554	0.92
QH-10	云母片岩	1.23	7.38	2.28	2.669	1.03
SY-1	花岗岩	3.80	16.10	3.38	2.64	2.35
SY-2	闪长岩	3.21	12.20	2.41	2.73	1.92
SY-3	斑岩	9.11	51.00	5.33	2.60	6.12
SY-4	花岗岩	4.43	21.00	4.29	2.62	2.90
SY-5	安山岩	4.23	15.20	3.26	2.72	2.46
SY-6	安山岩	4.52	16.60	3.53	2.68	2.62
SY-7	石英砂岩	0.38	1.00	0.27	2.607	0.19
SY-8(1)	石英砂岩	2.76	17.90	3.49	2.653	2.24
SY-8(2)	砂岩	0.71	4.16	3.03	2.339	0.65

续附表 2

样品编号	岩性	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	K(%)	密度 (g/cm^3)	生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
SY-9	砂岩	4.27	20.50	4.54	2.551	2.78
SY-10	灰岩	3.15	13.30	3.89	2.708	2.10
SY-11	石英岩	0.41	1.56	0.11	2.614	0.22
SY-12	灰岩	3.21	14.70	2.68	2.477	1.92
SY-13	灰岩	0.76	3.33	2.07	2.826	0.65
SY-14	花岗岩	4.56	38.10	4.21	2.54	3.95
SY-15	花岗岩	6.63	43.40	4.37	2.55	4.83
SY-16	安山岩	4.12	20.80	3.83	2.64	2.79
SY-17	凝灰岩	4.07	17.20	2.23	2.61	2.36
WC-1	玄武岩	0.45	2.29	0.39	2.64	0.30
WC-3	玄武岩	0.66	3.07	0.56	2.76	0.44
WC-4	花岗岩	4.71	28.20	4.45	2.62	3.48
WC-6	花岗岩	2.00	5.41	3.08	2.65	1.16
WC-7	花岗岩	4.25	25.30	4.21	2.60	3.11