

# 高产热花岗岩特征及其与岩浆—热液金属成矿效应研究



Pre-pub. on line: www.  
geojournals.cn/georev

冯军<sup>1)</sup>, 张涛<sup>2,3)</sup>, 黄泽<sup>3)</sup>

1) 广西百色工业投资发展集团有限公司, 广西百色, 533000;

2) 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊, 065000;

3) 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉, 430074

**内容提要:** 高产热花岗岩是指富含放射性产热元素 U、Th 和 K, 产热率值  $\geq 5\mu\text{W}/\text{m}^3$  的花岗岩类。作为潜在的地热资源——干热岩, 高产热(HHP——high heat production)花岗岩研究备受各国关注, 而其金属成矿效应却缺乏相应的重视与综述。高产热花岗岩通常为多期堆叠形成的杂岩体, 具有富碱、低磷特征, 多数呈现高分异演化特征, 一般与大型—超大型热液金属矿床密切相关。本文明确高产热花岗岩与稀有—稀土金属矿床(尤其 W—Sn 矿床)和与还原性侵入体有关金矿床关系密切, 而且高产热花岗岩具有持久分异与元素富集效应以及延迟加热效应, 该效应可能有助于长寿命岩浆—热液成矿系统与大型金属矿床形成。

**关键词:** 高产热花岗岩; 高分异花岗岩; 热液金属矿床; 延迟加热效应; 干热岩

作为大陆地壳的重要组成部分, 花岗岩类一直是地学领域关注的热点课题之一。我国约 14% 的出露基岩为花岗岩类(张德会, 2015), 如华南地区发育大面积的花岗岩体, 其中大量花岗岩体为富含放射性产热元素 U、Th 和 K 的花岗岩, 即为高产热(HHP = High heat production)花岗岩。众所周知, 富集于上地壳中具有长寿命(即半衰期较长)的放射性元素衰变所产生的放射性热能对地壳热流具有重要的影响(Mareschal & Jaupart, 2013; Jaupart & Mareschal, 2014; Jaupart et al., 2016), 尤其高产热花岗岩集中发育的地区。典型例子是澳大利亚中部热流省(Central Australian Heat Flow Province), 平均热流值高达  $82\text{ mW}/\text{m}^2$ , 约为全球大陆热流均值的 2 倍, 其中发育大量的高产热花岗岩体, 如 Mt. Painter Inlier、Mt. Isa Inlier、Pine Creek、Arunta Inlier 等(McLaren et al., 2003; 2006)。令人惊喜的是, 在该高热流区发育大量的金属矿床(Wyborn, 1998; McLaren et al., 1999; Oliver et al., 2008; Pirajno, 2009)。与之相类似的例子是我国华南高温 W—Sn 多金属成矿省, 同样也发育大量的高产热花岗岩体与相关的稀有、稀土金属矿床(图 1; Zhou Zuoming et

al., 2020; 李晓峰等, 2021; 汪相和楼法生, 2022; 胡瑞忠等, 2024)。

早在 20 世纪 70~80 年代, 高产热花岗岩作为潜在的固体地热资源——干热岩备受各国关注。干热岩(Hot dry rocks, HDR)一词最先由美国新墨西哥州国家实验室提出, 是指埋深为 3~10 km 的高温( $>150^\circ\text{C}$ )致密热岩体, 具有干的、不透水等特征, 是一种固体自然资源。具有一定埋深的高产热花岗岩, 若其上覆的低热导率盖层能将热能得以保存, 则可形成潜在的干热岩地热能(汪集旻等, 2012; 陆川和王贵玲, 2015)。除了作为潜在的地热能源——HDR 外(Hurter & Schellschmidt, 2003; Artemieva et al., 2017), 高产热花岗岩也与热液金属矿床(如 W—Sn、U、REE 和 Nb—Ta 等)具有密切的关系(Stone & Exley, 1985; Lehmann, 1990; Klominsky et al., 1996; McLaren et al., 1999; Pirajno, 2009)。1985 年, 学者专门在英国 St. Austell 召开了“高产热花岗岩、热液循环与矿床成因”国际会议, 会后发表了约 40 篇高产热花岗岩论文, 标志着高产热花岗岩与热液成矿研究热潮的到来。国际上对高产热花岗岩的研究以澳大利亚较为突出, 包括通过数值模

注: 本文为国家自然科学基金青年科学基金资助项目(编号: 42402083)的成果。

收稿日期: 2024-09-24; 改回日期: 2024-12-16; 网络首发: 2025-01-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.055

作者简介: 冯军, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事有色金属矿产勘查及矿业企业管理; Email: 234693737@qq.com。通讯作者:

张涛, 男, 1989 年生, 博士后, 主要从事金属矿产及其成矿规律研究; Email: nanyangxinzhuan@126.com。

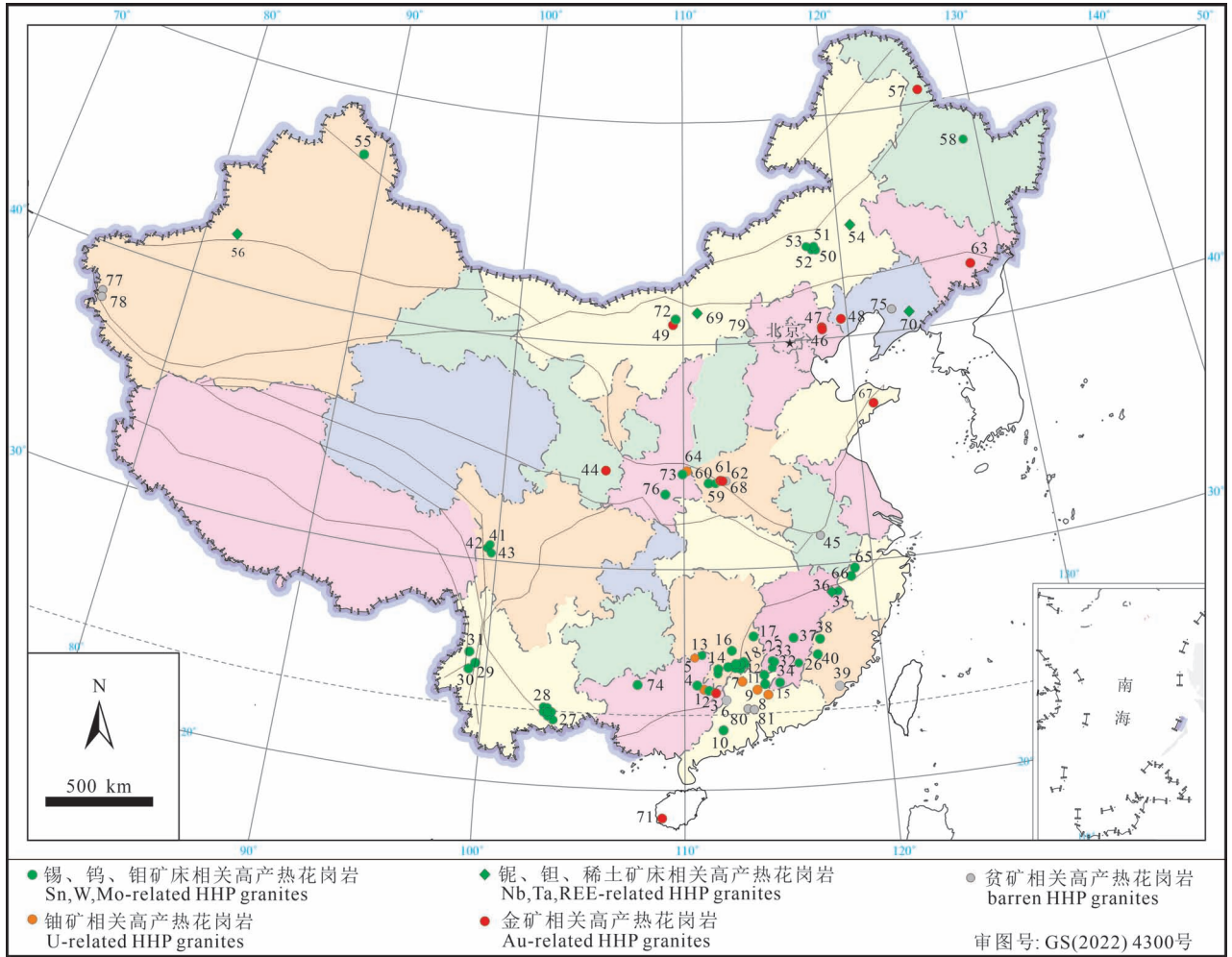


图 1 国内代表性高产热花岗岩体与相关金属矿床分布图 (张涛, 2021)

Fig. 1 The distribution map of representative high heat production granites and associated hydrothermal metal deposits (modified from Zhang Tao, 2021&)

注:1—广西花山;2—广西姑婆山;3—广西大宁;4—广西栗木大岐岭;5—广西苗儿山 U 矿豆乍山;6—广东连阳岩体;7—广东大东山;8—广东下庄 U 矿帽峰;9—广东长江 U 矿;10—广东西山岩体;11—广东石人嶂;12—广东诸广山;13—南岭越城岭;14—湖南祥霖铺;15—江西龙源坝;16—湖南大义山;17—湖南锡田;18—湖南金鸡岭;19—湖南螃蟹木;20—湖南雪花顶;21—湖南香花岭;22—湖南瑶岗仙;23—湖南骑田岭;24—湖南黄沙坪;25—湖南柿竹园/千里山;26—江西岩背/密坑山;27—云南都龙/老君山;28—云南个旧;29—云南大松坡/古永岩基;30—云南来利山;31—云南大竹棚;32—江西九龙脑;33—江西淘锡坑;34—江西西华山;35—江西大茅山—三清山;36—江西灵山;37—江西江北;38—福建河田;39—福建漳浦;40—福建红山;41—四川夏赛;42—四川雀儿山;43—四川格聂;44—甘肃天子山;45—安徽九华山;46—冀东峪耳崖;47—冀东牛心山;48—冀东柏杖子;49—内蒙古大桦背;50—内蒙古黄冈梁;51—内蒙古维拉斯托;52—内蒙古北大山;53—内蒙古白音查干;54—内蒙古巴尔哲;55—新疆喇嘛昭;56—新疆波孜果尔;57—黑龙江北大沟;58—黑龙江翠宏山;59—豫西鱼库;60—豫西南泥湖;61—豫西上房沟;62—豫西太山庙;63—吉林海沟;64—陕西华阳川;65—浙西北黄石潭—九里岗;66—浙西北儒洪;67—胶东三佛山;68—豫西合峪;69—内蒙古赵井沟;70—辽东赛马;71—海南抱伦/尖峰岭;72—内蒙古沙德盖;73—陕西金堆城;74—广西大厂/龙箱盖;75—辽东千山;76—陕西王家坪;77—新疆苦子干;78—新疆卡日巴生;79—山西武家山;80—广东佛冈;81—广东南昆山

The No. s represent the names of high heat production granites and associated hydrothermal metal deposits

拟阐明高产热花岗岩侵位固结期后热对流的成矿效应 (Fehn, 1985; McLaren et al., 1999) 等。尽管, 有关高产热元素 (Heat producing elements, HPEs) 与大地热流、HDR 与增强型地热系统、高产热花岗岩放射性产热与 (地壳) 部分熔融、热变质作用及其与

金属成矿关系等科学研究一直在持续推进, 但与国际研究进展相比, 我国在高产热花岗岩方面的研究相对滞后。近几年由于国内对清洁能源——干热岩的研究才开始关注高产热花岗岩, 如汪集旻等 (2012)、李德威和王焰新 (2015)、亢方超等 (2022)

等文献;但学者对高产热花岗岩的成矿效应研究更是鲜见。

本文主要以产热率值高于地壳约 5 倍,高于平均花岗岩约 2 倍的高产热花岗岩为研究对象,综述高产热花岗岩的岩石学特征及时—空分布特征,重点探讨了高产热花岗岩与热液金属矿床,尤其 Au 矿床的成矿联系,期待能够为矿床勘查提供找矿思路和探矿方向,指导找矿实践活动。

## 1 高产热花岗岩定义与地壳中放射性产热元素分布

花岗岩类是大陆地壳中最为丰富多样的岩石类型,其中富含放射性产热元素(HPEs:U、Th、K)的花岗岩类岩石,被称为高产热(HHP)花岗岩(张德会,2015),也可称为放射热花岗岩(Radio-thermal granites;Klominsky et al.,1996)。与一般花岗岩不同,高产热花岗岩主要是依据岩石中放射性产热元素(HPEs)含量与其放射性产热率值(Heat Production, HP)来定义的一类花岗岩类,即将产热率值  $HP \geq 5 \mu W/m^3$  的花岗岩类定为高产热花岗岩(Kromkhun et al.,2013),HPEs 含量一般相应分别为:  $U \geq 10 \times 10^{-6}$ 、 $Th \geq 30 \times 10^{-6}$ 、 $K_2O \geq 3.5\%$  或  $K \geq 3.0\%$ 。与地壳相比,花岗岩明显具有相对高的放射性产热率值(约  $2.0 \mu W/m^3$ ),其中酸性花岗岩和片麻岩的产热率值最高(图 2;Artemieva et al.,2017)。

通常来说,地球和地壳中元素分布具有不均一性。Sandiford 和 McLaren(2002)指出放射性产热元素(HPEs)的不均一分布控制了岩石圈的热力学状态,而且地壳中放射性产热元素的分异或调整对大陆岩石圈保持稳定非常重要。作为亲石元素的放射性产热元素 U、Th 和 K 均为不相容元素,一般倾向富集于上地壳中。随着地壳深度增加,HPEs 含量呈现非单调性降低(Brady et al.,2006;Mareschal & Jaupart,2013);与上地壳(约  $1.7 \mu W/m^3$ )相比,下地壳产热率值(约  $0.5 \mu W/m^3$ )显著降低(Kromkhun et al.,2013;Jaupart et al.,2016)。除放射性元素分布随深度变化外,地壳也具有水平尺度上 HPEs 分布的不均一性,这种空间不均一性可以解释大部分地表热流值的空间变化(Sandiford & McLaren,2002;Jaupart & Mareschal,2014)。

研究表明,地壳中放射性产热元素含量与分布主要受两种机制约束(Bea,2012):①壳幔相互作用与地壳分异过程中,作为不相容的放射性产热元素

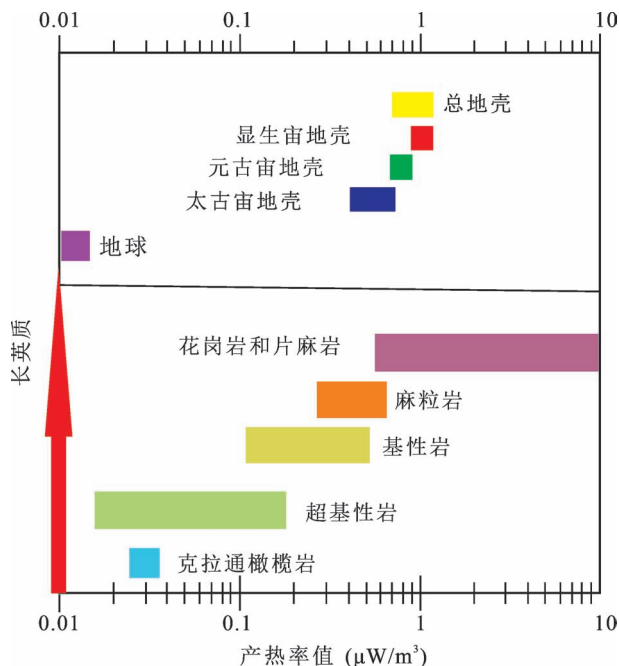


图 2 不同类型岩石的放射性产热率值 (Artemieva et al., 2017)

Fig. 2 Radioactive heat production for different rocks (after Artemieva et al., 2017)

倾向于向上地壳中分异富集;②放射性产热元素随时间不断衰减。因此,从长时间尺度来看,地壳中 HPEs 分布总是处于动态变化中。然而,Jaupart et al.(2016)表明在地壳稳定期间,地壳(校正因放射性元素随时间衰变产生的影响后)产热率值(或 HPEs 含量)基本保持不变;但在克拉通形成或改造—破坏过程中,地壳会重新调整 HPEs 分布,即在不同尺度下,地壳中 HPEs 含量与分布变化主要与大陆岩石圈改造(reworking)相关的一系列俯冲、构造—热事件或过程有关,包括俯冲作用、岩浆作用、变形—变质作用、沉积作用和剥蚀等过程;其中岩浆与俯冲作用,尤其地球早期阶段地壳增生(crustal growth)以及板块俯冲过程中伴随的岩浆活动对地壳中 HPEs 分异或调整更为重要(Sandiford & McLaren,2002;Bea,2012)。这暗示岩石圈活化与壳幔相互作用过程中可能会导致 HPEs 在交代岩石圈地幔与改造地壳中重新分配与富集,在一定程度上解释了高产热花岗岩中 HPEs 富集的原因(Zhang Tao et al.,2023)。

## 2 高产热花岗岩岩石学及其时—空分布特征

## 2.1 高产热花岗岩岩石学特征

高产热(HHP)花岗岩一般为淡色花岗岩,通常呈现粉红色、红色、白色等,粒度可从细粒到粗粒变化,呈斑状、花斑状和环斑以及连续不等粒结构(图3)。高产热花岗岩为中深成、富碱花岗岩,岩石类型包括黑云母花岗岩、碱长花岗岩、二长岩—二长花岗岩、钠长石花岗岩、环斑花岗岩、黄玉花岗岩和正长岩—石英正长岩等。高产热花岗岩常见(副)矿物有:石英、碱性条纹长石、斜长石、微斜长石、黑云母、萤石、锆石、褐帘石、独居石、磷灰石、绿帘石、磷钇矿、榍石、钍石、黑稀金矿和沥青油矿等。从岩石地球化学组成来看,高产热花岗岩主要为准铝质—弱过铝质岩石,一些为过铝质到弱过碱性岩石,碱含量高( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} > 8\%$ ),富含大离子亲石元素和高场强元素(如K、U、Th、Nb和Ta等),亏损Ti、Sr、P等元素,具有相对高的Ga/Al、Rb/Sr以及Eu负异常,与A型花岗岩地球化学特征类似。与其他火成岩相比,造山后和非造山A型花岗岩以及长英质碱性火成岩更为富集放射性产热元素。需要强调的是,高产热花岗岩与其岩石类型(如I、S、A型花岗岩)并无特定的对应关系,高产热花岗岩可以是A型花岗岩,也可以是高分异I型或S型花岗岩(Artemieva et al., 2017)。不过,Bea(2012)指出不同类型花岗岩产热率值从高到低依次为:A型花岗岩>S型花岗岩>I型花岗岩>M型花岗岩。

高产热花岗岩通常呈现明显的(高)分异或演化特征(张涛,2021;汪相,2023)。与一般花岗岩相比,高产热花岗岩通常经历中—高程度的结晶分异或演化过程,暗色矿物含量较低;矿物组成上主要以浅色矿物如石英、钾长石和钠长石为主,这与高分异或高演化(highly fractionated or evolved)花岗岩的岩石特征类似(吴福元等,2017)。高分异花岗岩可分为构造驱动分异型和热驱动分异型花岗岩,前者主要沿大型拆离断层就位并发生结晶分异作用,受构造驱动控制,如喜马拉雅淡色花岗岩(吴福元等,2023)。与构造驱动分异的喜马拉雅淡色花岗岩不同,华南高产热花岗岩(如南岭花岗岩;图1)为热驱动分异型花岗岩(吴福元等,2023)。野外调研表明,高产热花岗岩通常与花岗(似)伟晶岩或/和花岗细晶岩、正长岩脉、基性岩脉或暗色包体等伴生,甚至有时发育典型的代表岩浆—热液过渡阶段的晶洞(Miarolitic cavities)或双域结构(interconnected miarolitic texture; Candela & Blevin, 1995)、单向固结结构(UST; Shannon et al., 1982)等特殊地质现象。

如广西姑婆山花岗岩体和冀东峪耳崖白岗岩中发育明显的晶洞伟晶岩或晶洞结构(图3)。尽管,关于高产热花岗岩的岩石成因仍存在争议,但一般认为高产热花岗岩起源于富集HPEs源区的深熔作用,源区可能为古老交代岩石圈地幔或其改造下地壳,呈现幔幔混合同位素特征(Bea, 2012; Zhang Tao et al., 2023)。南岭高产热花岗岩为陆壳重熔型花岗岩,通常被认为是以陆壳为主的地壳物质部分熔融的产物,且可能有少量幔源物质贡献(华仁民, 2005)。由于篇幅所限,高产热花岗岩的岩石成因将另文讨论。

## 2.2 高产热花岗岩时—空分布特征

高产热(HHP)花岗岩在全球均有发育,而且不同地质时代均发育高产热花岗岩(Artemieva et al., 2017)。Artemieva et al. (2017)分析了全球花岗岩数据集——GRANITE2017后指出太古宙—古元古代的花岗岩产热率值一般最低,相应分别为 $1.67 \pm 1.49 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $1.25 \pm 0.83 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ;而中—新元古代的花岗岩产热率值最高(现今产热率值为 $4.36 \pm 2.17 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ),此后到中生代花岗岩产热率值一直呈现降低趋势。澳大利亚发育大量的高产热花岗岩,如澳大利亚中南部的Mount painter、Mount Babbage、Mt. Isa等地区以及澳大利亚北部的Pine Creek等地区元古宙花岗岩,如British Empire花岗岩、Cullen岩基等(Klominsky et al., 1996; McLaren et al., 2006; Oliver et al., 2008)。埃及、南非、埃塞俄比亚、尼日利亚和纳米比亚等地区的高产热花岗岩均有报道,时间上从元古宙到显生宙。如南非开普(Cape)省的Saldania造山带发育的新元古代高产热花岗岩,平均产热率值约为 $5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ;纳米比亚中西部发育早白垩世的Damalaland和Gross Spitzkoppe花岗岩,这些高产热花岗岩产热率值最高可达 $22 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Frindt & Haapala, 2004)。印度发现的高产热花岗岩主要分布在达尔瓦(Dharwar)克拉通、拉贾斯坦邦(Rajasthan)和辛格布姆(Singbhum)东部等地区,时间上从太古宙到中元古代均有发育,产热率值最高可达 $13 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (Kumar & Reddy, 2004)。在美洲地区,巴西境内亚马逊(Amazonian)和圣弗郎西斯科(Sao Francisco)克拉通发育大量元古代的高产热花岗岩和北美怀俄明(Wyoming)地区的元古宙红山(Red Mountain)花岗岩(Lenharo et al., 2003; Agnol & de Oliveira, 2007)。此外,还有英国康沃尔(Cornwall)地区的晚古生代Cornubian岩基和德国华力西期Erzgebirge岩体(Webster et al., 2004)等。



图3 国内代表性高产热花岗岩岩石照片:(a)粤西北连阳黑云母花岗岩;(b)桂东北姑婆山黑云母花岗岩;(c)冀东峪耳崖白岗岩;(d)冀东牛心山二长花岗岩;(e)冀东柏杖子二长岩—二长花岗岩;(f)内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗大桦背碱长花岗岩

Fig. 3 Photographs of the domestic representative high heat production granites: (a) Lianyang biotite granite in the northwest of Guangzhou Province; (b) Guposhan granite in the northeast of Guizhou province; (c) Yu'erya leucogranite in the Jidong area; (d) Niuxinshan monzogranite in the Jidong area; (e) Baizhangzi monzonite to monzogranite in the Jidong area; (f) Dahuabei alkali-feldspar granite in the Wulate Qianqi, Bayannur City, Inner Mongolia

然而,国内发现的高产热花岗岩以中生代为主,主要分布于克拉通周缘以及造山带,如华南地区(主要为南岭—浙西地区)、华北板块周缘和内蒙古中南部等地区(图1),如广东连阳岩体、广西姑婆山

岩体、湖南千里山、瑶岗仙、金鸡岭岩体、江西西华山岩体和大茅山—三清山岩体、冀东牛心山和峪耳崖花岗岩体、豫西南泥湖矿区、内蒙古维拉斯托矿区石英斑岩、黄岗梁岩体和白音查干岩体等。除中生代

高产热花岗岩外,一些为古生代高产热花岗岩体,如内蒙古大桦背岩体、新疆波孜果尔岩体、南岭雪花顶和越城岭岩体等。此外,还发现有元古代高产热花岗岩,如陕西华阳川岩体。需要指出的是,华南地区发育的高产热花岗岩主要与 W—Sn—Nb—Ta 等稀有金属矿床密切相关(华仁民,2005),相应高产热花岗岩平均产热率值范围一般约为  $5\sim 10\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ ,代表岩浆演化程度的地球化学参数 Rb/Sr 比值一般普遍相对偏高( $>10$ ),与澳大利亚多金属(W—Sn—Pb—Zn—Au—Bi; Audetat et al., 2000)矿床相关的 Mole 高产热花岗岩产热率值和相关地球化学参数相似(表 1)。然而,与华南稀有金属矿床相关的高产热花岗岩相比,华北克拉通周缘发育的高产热花岗岩主要与 Au、Mo 矿床关系密切(图 1)。

### 3 高产热花岗岩与金属矿床成矿探讨

#### 3.1 高产热花岗岩与热液金属矿床关系

作者统计和分析了全球(主要以国内矿山为主)约 70 个大型—超大型与高产热花岗岩相关热液金属矿床(张涛,2021),明确高产热花岗岩主要与 Sn—W(Mo)、U—Nb—Ta 等金属矿床密切相关;其次,也与一些热液金矿床有关(如图 1)。

##### 3.1.1 稀有金属矿床

金属成矿研究表明(Lehmann, 1990; 张德会,

2015),高产热(HHP)花岗岩通常与 Sn—W(Mo)、U、Nb—Ta 和 REE 等稀有、稀土金属矿床,尤其是这类大型—超大型矿床的形成密切相关。大量研究揭示南岭高产热花岗岩通常与中生代 W—Sn—Nb—Ta—REE 和 U 等金属的大规模成矿密切相关(华仁民,2005;汪相和楼法生,2022;汪相,2023)。典型矿床如湖南柿竹园钨多金属矿床(千里山岩体;Guo Chunli et al., 2015)、云南个旧锡矿(个旧岩体;Cheng Yanbo et al., 2010)、江西西华山 W—Sn 多金属矿床(西华山岩体;Guo Chunli et al., 2012)、广西苗儿山 U 矿(豆乍山岩体等;Zhao Kuidong et al., 2016)等。除此之外,相关典型矿床还有豫西栾川南泥湖钼多金属矿床(南泥湖岩体;包志伟等,2009)、内蒙古韦拉斯托 W—Sn 多金属矿床和巴尔哲稀有金属(REE—Nb—Be—Zr)矿床(Jahn et al., 2001)等。国外相关典型金属矿床如澳大利亚与 Mole 岩体相关的多金属(Sn—W—Mo—Bi、Au—Pb—Zn—Ag 等)矿床(Mole 岩体;Audetat et al., 2000)、英国西南部 Cornwall 地区与花岗岩相关的 Sn—W、U 以及高岭石矿床(Cornubian 岩基;Chappel & Hine, 2006)、德国/捷克边界的 Erzgebirge 锡多金属矿床(Erzgebirge 岩体;Webster et al., 2004)等。另外,澳大利亚巨型 Olympic Dam 铁氧化物铜金(IOCG)矿床的形成也与高产热花岗岩(Roxby

表 1 代表性高产热花岗岩平均产热率值和相关地球化学参数

Table 1 Key geochemical characteristics and average heat production (HP) values of representative high heat production granites

岩体/岩性	相关金属矿床	n	SiO <sub>2</sub> (%)	Th	U	K <sub>2</sub> O (%)	平均 产热率 ( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )	产热率 范围	Rb/Sr	资料来源
				( $\times 10^{-6}$ )						
峪耳崖/白岗岩	Au	9	76.3	27.6	13.4	4.3	5.8	4.7~12.2	7.8	Zhang Tao et al., 2023
牛心山/二长花岗岩	Au	9	73.9	28.2	15.8	4.9	6.6	2.8~10.6	5.4	Zhang Tao et al., 2023
柏杖子 /二长岩—二长花岗岩	Au	5	67.6	47.1	12.8	4.9	7.1	3.7~11.3	0.25	Zhang Tao et al., 2023
大桦背/碱长花岗岩	Au	11	73.2	35.6	7.6	4.8	4.9	3.7~7.3	1.29	王梁等,2015
Timbarra Tablelands /碱长花岗岩	Au	14	76.09	36.63	12.7	4.73	6.34		9.97	Mustard, 2004
连阳/黑云母花岗岩	W—Sn—Nb—Ta?	21	75.01	39.31	11.1	5.03	6.14	3.5~8.5	9.76	高剑锋等,2005; 马星华等,2014
姑婆山/花岗岩	W—Sn	2	76.62	47.57	19.9	4.78	9.02	8.3~10.3	33.2	作者未发表数据
大厂龙箱盖/黑云母花岗岩	Sn	11	74.04	13.26	32.1	4.74	9.78	7.4~13.4	17.8	Guo Jia et al., 2021
都龙老君山/花岗岩	Sn—Zn	13	73.88	12.25	15.3	4.58	5.27	4.3~6.6	10.1	Zhao Zhenyu et al., 2018
柿竹园千里山/花岗岩	W—Sn—Mo—Bi	23	74.95	31.36	23.7	4.81	8.86	5.4~14.3	34.7	Guo Chunli et al., 2015
Mole /花岗岩	W—Sn—Pb— Zn—Au—Bi	10	77.20	52.00	20.0	4.95	9.39	4.3~15.7	53.1	Audetat et al., 2000

注:n—参与计算的全岩样品数量。

Downs 岩体;Ferguson et al., 2019)有关。

研究表明,这些与高产热花岗岩相关的稀有金属矿床具有如下几个鲜明特征:①成矿与高度演化或高分异花岗岩具有成因联系,是典型岩浆热液矿床;②成矿效率高,金属矿床多为大型—超大型矿床,多发育完善的具有广谱元素组成的热液矿床分带;③通常发育长寿命的岩浆—热液成矿系统(华仁民,2005;张德会,2015)。第三个特征与斑岩型铜(金)矿床形成鲜明的反差,后者成矿时长一般相对较短。据McInnes et al. (2005)研究表明,一些斑岩型矿床热液矿化发生在几十万年时间范围内,如伊朗 Sar Cheshmeh 斑岩 Cu 矿(约 0.16 Ma)、印度尼西亚 Grasberg 斑岩 Cu—Au 矿床(约 0.10 Ma)和 Batu Hijau 铜金矿床(约 0.08 Ma)、菲律宾 Lepanto—Far South East 斑岩 Cu—Au 矿床(0.1~0.3 Ma;Arribas et al., 1995)、美国内华达 Round Mountain 金银矿床(约 0.1 Ma)。Von Quadt et al. (2011)使用同位素稀释热离子质谱(ID-TIMS)对单颗粒锆石进行高精度 U-Pb 定年,将斑岩侵位与矿石形成最大持续时间约束在一个短的范围內:Bingham Canyon 斑岩矿床约为 0.32 Ma, Bajo de la Alumbrera 斑岩 Cu—Au 矿床约为 0.09 Ma,这与变质热晕约束结果一致。Skinner(1997)指出,环太平洋沿岸斑岩铜矿成矿过程或成矿持续时间肯定小于 1 Ma,因为其中一些矿床成矿年龄小于 1Ma。与此不同,高产热花岗岩相关金属矿床的成岩—成矿持续时间漫长:英国 Cornwall 成矿作用自岩浆侵位直到低温热液活动持续时长达 200 Ma (Stone & Exley, 1985);德国 Erzgebirge 锡矿省热液循环事件持续时间超过 150 Ma (Lehmann, 1990);柿竹园矿床自岩浆侵位到~250℃的热液活动,至少持续了约 80 Ma (廖煜钟, 2019);峪耳崖金矿呈现多期或多阶段金矿化,岩浆—热液成矿系统寿命长达 16 Ma (Zhang Tao et al., 2020)。

成矿热液活动寿命(或时长)可能是大型—巨型矿床形成的一个重要因素之一(Moncada et al., 2019)。高产热花岗岩相关稀有金属矿床通常多呈现成矿作用延时或拖长(protracted)的长期性特征(张德会,2015)。需要强调的是,即使单个斑岩矿床成矿时长短暂,但赋存多个巨型斑岩铜矿的世界级矿集区的形成仍然需要漫长的时间(张德会, 2015)。如南美圣萨尔瓦多板块拥有世界上规模最大的斑岩型 Cu—Mo 矿床(如 Chuquicamata 和 El Teniente 等 Cu—Mo 矿床)的矿集区形成,归因为一

个持续时长达 200 Ma 的漫长岩浆活动历史(Clark, 1993; McInnes et al., 2005)。最新研究表明,加拿大育空(Yukon)地区一个斑岩—浅成热液成矿系统中热液活动持续了长达 50 Ma,且该矿床经历了多阶段的矿化作用,即早期斑岩型矿化,晚期经历了多次浅成热液型矿化作用的叠加改造作用(Mottram et al., 2024)。这种认识对目前热液金属矿床的成矿时长认识提出了挑战。

### 3.1.2 金矿床

尽管高产热(HHP)花岗岩主要与稀有金属矿床密切相关,但高产热花岗岩也与一些金矿床有关,尤其与还原性侵入体有关金矿床或系统(IRGD 或 IRGS:Reduced intrusive-related gold deposit/system)。IRGD 型金矿床是指 20 世纪 90 年代在北美科迪勒拉造山带北部阿拉斯加(Alaska)和加拿大育空地区新发现的一类金矿床(Thompson et al., 1999),该类金矿床通常与还原性长英质侵入体关系密切,成矿与赋矿岩体或附近侵入体具有清晰的时空和成因联系(图 4),相关花岗岩体明显发育流体出溶或代表岩浆—热液过渡特征的地质证据,如 Fort Knox 和 Dublin Gulch 等典型 IRGD 型金矿床中发育显著的细晶岩、伟晶岩、脉状岩墙、晶洞以及单向固结结构(UST)等(Hart, 2004; Goldfarb et al., 2005)。与造山型金矿床明显不同,IRGD 型金矿床常产于克拉通边缘带或远离俯冲带靠近克拉通的长英质侵入岩体内和/或热变质晕中,甚至发育在远离岩体(<10 Km)的围岩地层中。IRGD 型金矿床通常以席状脉产出,多数形成在中等深度 4~8 Km;在矿区尺度上表现出以侵入体为中心的成矿分带(图 4),即随着远离侵入体呈现出 Au—Bi—Te ± W/Mo → Au—As ± Sb → Ag—Pb—Zn。金矿床中 Au 与含 Bi 和 Te 的矿物相交生,局部含有辉钼矿和/或白钨矿,矿石整体硫化物含量低(体积上一般 < 5%),以具有还原特征的黄铁矿和/或雌黄铁矿为主。需要指出的是,以 IRGD 型金矿闻名的 Tintina 金矿省中成矿花岗岩体一般具有相对高的产热率值,甚至一些成矿花岗岩体即为高产热花岗岩,如加拿大与 Au—Bi—U 多金属矿化相关的 Tombstone Deadman 花岗岩体(平均产热率值约为 4.5  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )和与钨矿化相关的 Tungsten 花岗岩体(约 5.5  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ; Hart, 2004)。

澳大利亚 Timbarra 金矿床位于澳大利亚新南威尔士的新英格兰褶皱带的南部,是一个与侵入体有关金矿床(Musturd, 2004; Musturd et al., 2006)。

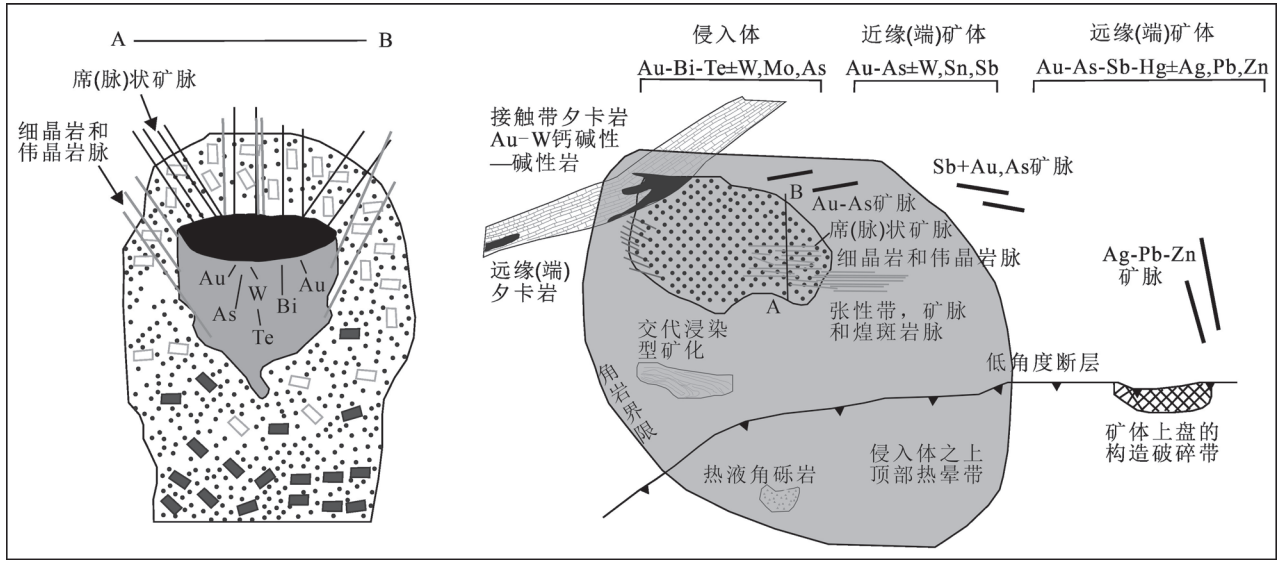


图4 与还原性侵入体相关金矿 (IRGD) 成矿模式 (Lang & Baker, 2001)

Fig. 4 The ore-forming model of reduced intrusive-related gold deposit (Lang & Baker, 2001)

Timbarra 岩体由 Bungulla 二长花岗岩 (248 ~ 243 Ma) 和 Stanthorpe 正长花岗岩 (242 ~ 238 Ma) 组成, 其中金矿呈浸染状分布于 Stanthorpe 正长花岗岩相上部。Timbarra 岩体可以分为 7 个岩相带, 矿体主要赋存于分异或演化程度 (可以用 Rb/Sr 比值来表征) 高的 VI 带 (Rb/Sr 约为 46.4) 和 VII 带 (Rb/Sr 约为 10) 中, 产热率值为  $6.3 \sim 9.1 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。VI—VII 带中可见晚期岩浆流体与熔体共存的岩浆—热液过渡阶段标志性结构, 如晶洞、似伟晶岩、单向固结结构 (UST) 以及内部联通的晶洞结构 (IMT) 等 (Candela & Blevin, 1995; Mustard, 2004)。

作为与澳大利亚 Timbarra 金矿类似的金矿床, 冀东峪耳崖金矿深部隐伏花岗岩体—白岗岩为高分异花岗岩 (Rb/Sr 约为 7.8), 同时也是高产热花岗岩, 产热率值最高可达  $12.2 \mu\text{W}/\text{m}^3$  (表 1); 矿区内同样也发育典型岩浆—热液过渡阶段标志的似伟晶岩、晶洞和晶洞花岗岩 (图 5) 等地质现象。白岗岩发育锰铝榴石、独居石、黑稀金矿、磷钇矿、钽石等副矿物。研究表明, MnO 通常在岩浆演化的晚期富集, 岩浆锰铝榴石是在低压条件下从富 MnO 晚期岩浆中结晶, 为 I 型或 A 型花岗岩高度演化的特征矿物 (Nédélec & Bouchez, 2015)。从峪耳崖 (上部) 白色和红色二长花岗岩到深部白岗岩演化程度逐渐增高, 稀土元素配分曲线相应呈现从“右倾”向“左倾”变化趋势 (Zhang Tao et al., 2023)。此外, 似伟晶岩壳或脉附近常常发育以黑云母为主的暗色析离

体, 呈现囊状或线 (脉) 状 (图 5)。上述地质特征表明, 峪耳崖岩体经历了高度演化过程, 尤其深部高演化白岗岩局部岩浆挥发分达到饱和和出溶, 与金矿脉关系密切。峪耳崖金矿以石英脉型矿体为主, 主要赋存于早期侵位的二长花岗岩体中, 二长花岗岩体 (图 5a) 侵位年龄为 175 ~ 173 Ma, 中细粒白岗岩 (图 5b) 和晶洞花岗岩 (图 5c) 侵位于约 171 ~ 170 Ma, 细晶岩、似伟晶岩与伟晶岩脉形成年龄为 167 ~ 165 Ma; 限定多期金成矿事件, 相应年龄分别为约 176 Ma、172 ~ 168 Ma 和 162 ~ 160 Ma (图 6; Zhang Tao et al., 2020)。矿床地质、成岩—成矿年代学与同位素 (如 H、O、S 和 Pb 等) 研究表明, 峪耳崖金成矿与深部隐伏白岗岩体具有密切的时—空和成因联系, 呈现出由多期岩浆侵位活动构成的长寿命 (176 ~ 160 Ma) 岩浆—热液成矿系统特征 (Zhang Tao et al., 2020)。此外, 峪耳崖金矿围岩高于庄组地层中可见热变质矿物, 如透闪石、硅灰石等。

铍尖金矿与峪耳崖金矿同属冀东矿集区, 二者距离约 17 km, 成矿特征相似。铍尖金矿区的牛心山复式杂岩体为高产热花岗岩 (Rb/Sr 为 4.4 ~ 7.2), 产热率为  $2.8 \sim 10.6 \mu\text{W}/\text{m}^3$ , 平均值约为  $6.6 \mu\text{W}/\text{m}^3$  (表 1)。牛心山复式杂岩体主要由边缘相中粗粒似斑状红色花岗岩 (约 185 Ma) 和中间相中细粒红色/白色花岗岩 (172 ~ 170 Ma) 组成。铍尖金矿以细脉浸染蚀变岩型和石英脉型金矿化为主, 细脉浸染蚀变岩型金矿化 (如 #13 矿脉) 发育在牛心山岩



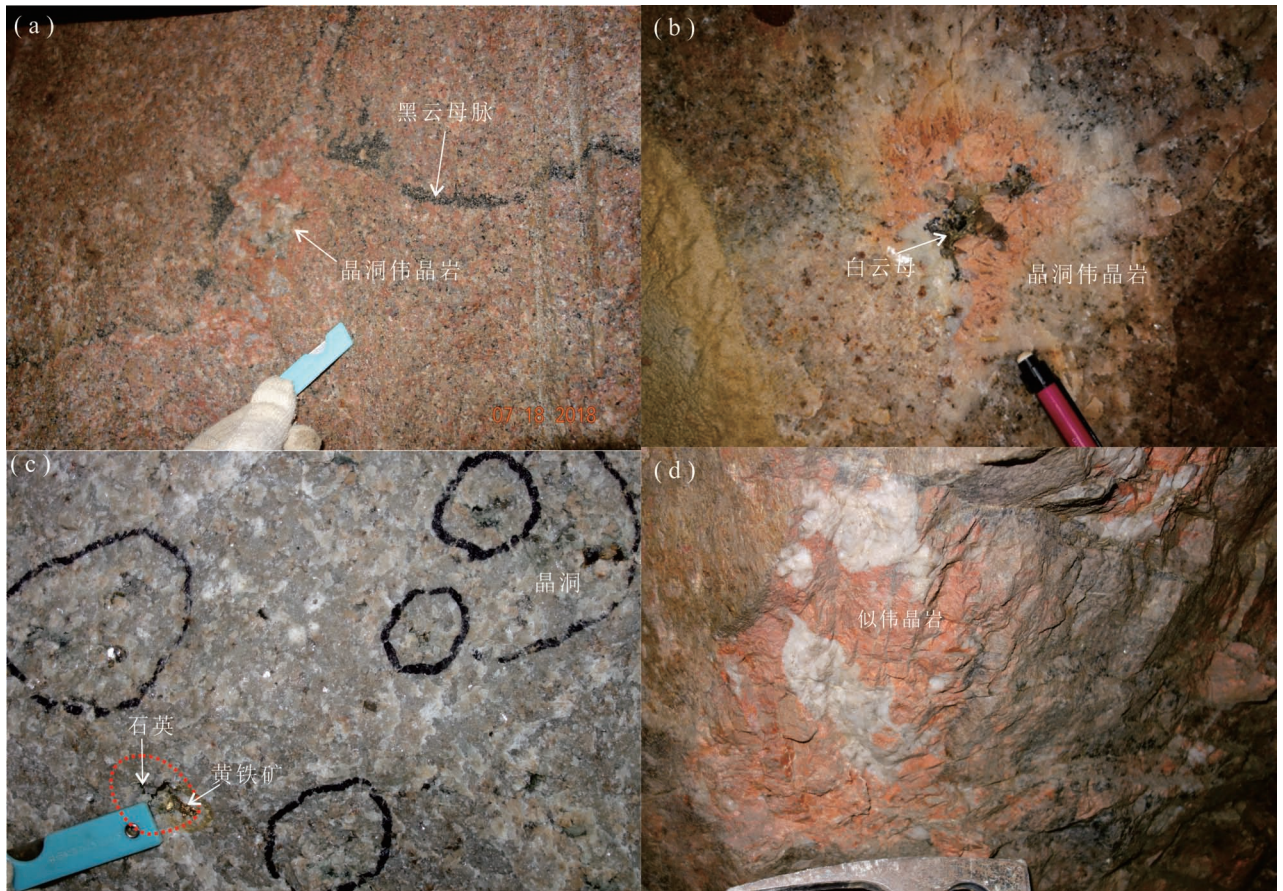


图5 冀东金矿床相关高产热花岗岩体发育的晶洞伟晶岩、晶洞和似伟晶岩结构:(a) 峪耳崖金矿中细粒二长花岗岩中发育的晶洞伟晶岩和黑云母脉;(b) 峪耳崖金矿白岗岩中发育的晶洞伟晶岩,晶洞内可见白云母和/或黄铁矿;(c) 峪耳崖金矿白岗岩中发育的晶洞结构,晶洞内可见黄铁矿和白云母等热液矿物;(d) 铯尖金矿牛心山花岗岩体靠近#13金矿脉发育的似伟晶岩

Fig. 5 Photograph of miarolitic pegmatite (-like), miarolitic cavities and pegmatite-like textures occurring within the high heat production granites associated with gold deposits in the Jidong district: (a) Miarolitic pegmatite and biotite veins developed in the medium- to fine-grained monzogranite in the Yu'erya gold deposit; (b) Miarolitic pegmatite, including hydrothermal mica and pyrite in the cavities, hosted in the Yu'erya leucogranite; (c) Miarolitic cavities, including pyrite and mica, developed in the Yu'erya leucogranite; (d) Pegmatite-like developed in the Niuxinshan granite next the #13 gold vein in the Huajian gold deposit

体内接触带,且该矿化附近花岗岩中可见似伟晶岩(图5d),白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年限定金矿化形成于173~171 Ma(作者未发表数据);而石英脉型金矿石主要赋存于新太古代遵化群变质岩内,部分含金石英矿脉发育在牛心山岩体中,金矿化形成于170~165 Ma,该类型金矿化与其平行共生的细晶岩脉关系密切,且细晶岩脉与牛心山花岗岩体具有同源性(如相似的Hf同位素和稀土配分曲线等)。

总体来看,上述三个金矿床均为IRGD型金矿,且都是与高产热花岗岩有关的金矿。同时,这三个金矿区内与金矿关系密切的花岗岩体(如Stanthorpe正长花岗岩、峪耳崖白岗岩和牛心山岩体)的结晶

分异或演化程度高(表1)。与高产热花岗岩相关金矿床通常发育长寿命的岩浆—热液成矿系统,成矿相关高产热花岗岩通常为多期堆叠形成的杂岩体,发育挥发分饱和和出溶的地质证据,金成矿具有多期或多阶段叠加特征。然而,关于高产热花岗岩的金成矿机制有待进一步阐明与深化。

### 3.1.3 高产热花岗岩相关金属成矿特征差异对比

一般来说,高产热花岗岩多数为高度分异或高演化花岗岩,而高度演化或分异是稀有金属矿床(如钨、锡矿等)有关花岗岩的一般特征(Lehmann, 1990; 汪相等, 2022)。金属成矿研究表明,稀有金属矿床,尤其W—Sn矿与高产热(或高分异)花岗

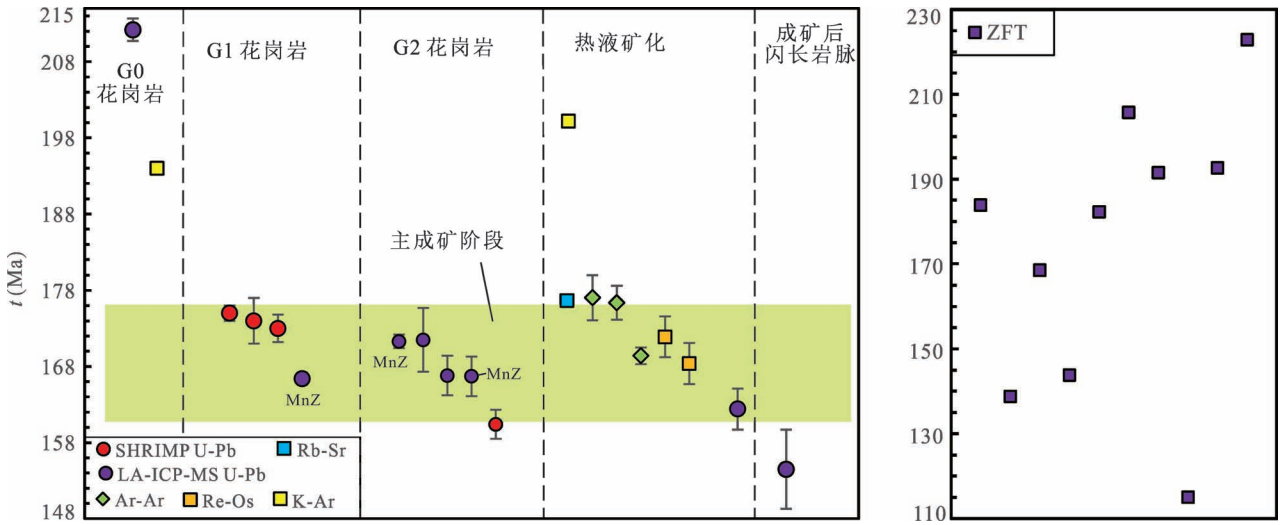


图6 冀东峪耳崖金矿成岩—成矿年代框架(引自 Zhang Tao et al., 2020)

Fig. 6 The geochronological framework of intrusive rocks and associated gold mineralization at the Yu'erya gold deposit in the Jidong district (Zhang Tao et al., 2020)

ZFT—锆石裂变径迹年龄

ZFT—Zircon fission track age

岩之间紧密的时—空和成因联系得到了多数矿床学家的认可(Lehmann, 1990;张德会, 2015;吴福元等, 2017)。从图7和表1来看,稀有金属矿床相关的高产热花岗岩为高分异花岗岩, Rb/Sr 比值( $Rb/Sr > 10$ )一般相对高,其产热率值(HP)也相对高。与普通(或贫矿)花岗岩( $Th/U \approx 4$ )相比,成矿高产热花岗岩,尤其含稀有金属矿化高产热花岗岩体的 Th/U 比值( $< 3$ 左右)普遍较低,即在 Th/U vs. Rb/Sr 图解上高产热花岗岩分布于 I 区(图 7a),这与成矿高产热花岗岩具有高度分异或演化特征一致,岩浆高度演化或分异过程导致大量富 Th 矿物(如钍石、独居石等)相对结晶析出,可能很好地解释了高演化高产热花岗岩普遍呈现相对较低 Th/U 比值。

然而,相较于稀有金属矿床相关的高产热花岗岩,与 Au 矿床相关的高产热花岗岩一般演化程度( $Rb/Sr < 10$ )和产热率值(图 7b)总体都要相对偏小,而其 Th/U 比值一般相对较大,通常位于该图解的 II 区(图 7a)。尽管如此,仍有部分金矿床与高分异/高演化的高产热花岗岩相关,如澳大利亚 Timbarra 矿床金的富集与演化度最高的淡色花岗岩密切相关(Musturd, 2004)。由于花岗岩的高度分异和演化,从而导致金矿床相关高产热花岗岩的 Rb/Sr 比值增大,而 Th/U 比值减小,分布于图 7a 中 I 与 II 的交叉区域(III 区),即这类金矿床(如峪耳

崖金矿等)常常与高度演化或高分异花岗岩(如白岗岩等)密切相关,呈现出与稀有金属矿床(如 Sn、W 等)相关高产热花岗岩相似的岩石学和其地球化学特征。此外,这类高演化、成矿高产热花岗岩普遍富集大离子亲石元素和高场强元素(如 Nb、W、Bi、U、Rb、Li、REE 等),岩浆晚期出溶成矿流体从而导致相关金矿床呈现出亲花岗岩元素组合,如 Au、W、Bi、Te、As 等;而且形成的金矿床一般表现出与相对还原性花岗岩体关系密切,金矿石整体硫化物含量低(通常 $< 5\%$ ),但广泛发育含 Te(Se)矿物和/或含 Bi 矿物,如碲金矿、碲铋矿、辉铋矿等。

从矿床角度来看,不同类型的稀有金属矿床(如锡矿床)和金矿床能够共生发育的实例却很少。这一方面可能与 Au、Sn 两种元素的地球化学性质差异有关,即 Sn 具有亲氧、亲铁和亲硫的三重性(刘英俊等, 1984),但更多体现的是亲氧性,形成以锡石矿物为主的锡矿床;而 Au 则为亲铁—亲硫元素,但更多体现的是亲硫性,形成含硫化物的金矿床。另一方面 Au 与 Sn 的富集成矿不仅在岩浆演化程度以及液体/熔体分配系数上存在差异,而且也在岩浆氧逸度、流体成矿温度、元素迁移形式与沉淀机制等因素方面不同(Musturd et al., 2006),即以 Sn 为代表的稀有金属矿床通常为高温岩浆—热液成矿系统( $> 400^\circ\text{C}$ )的产物,与还原性花岗岩浆的

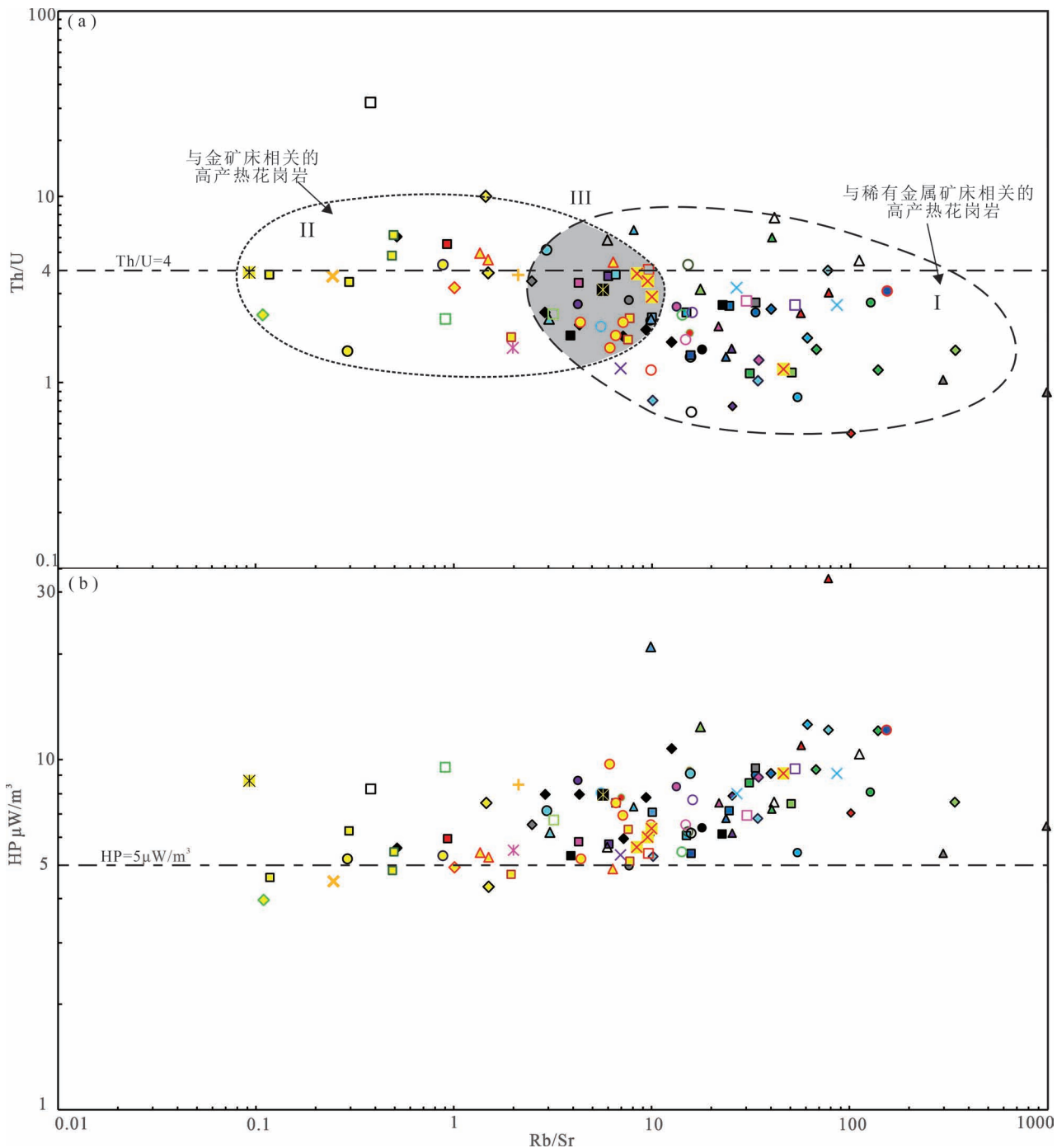


图7 高产热花岗岩 Rb/Sr vs Th/U (a) 和 Rb/Sr vs 产热率 HP (b)图解

Fig. 7 Diagrams of Rb/Sr vs Th/U (a) and Rb/Sr vs heat production (HP; b) in the high heat production granites

I 区为与稀有金属矿床相关的高产热花岗岩,代表高度分异演化的花岗岩区域;II 区为与金矿床相关的高产热花岗岩,代表相对演化分异程度较低的花岗岩区域;III 区为两者交叉区域(阴影区域),暗示部分金矿床可能与高度分异演化花岗岩相关;数据来源于张涛,2021;黄色符号代表金矿相关的高产热花岗岩,其它颜色的符号代表稀有金属矿床相关的高产热花岗岩

Zone I is a high heat producing (HHP) granite associated with rare metal deposits, representing a highly differentiated and evolved granite region. Zone II is a HHP granites associated with gold deposits, which represent the granites relatively low evolution and differentiation. Zone III is the intersection area (shaded area), suggesting that some gold deposits may be related to highly differentiated evolutionary granites. Data from Zhang Tao, 2021& Yellow symbols represent HHP granites associated with gold deposits; other colored symbols represent HHP granite associated with rare metal deposits

高分异过程密切相关(Lehmann, 1990);而 Au 矿床通常与中低温成矿系统( $< 400^{\circ}\text{C}$ )相关,与中等氧逸度花岗岩浆关系密切(Zhang Tao et al., 2023)。然而,高产热花岗岩通常发育由多期次岩浆侵位构成的长寿命岩浆—热液系统或岩浆热场(张旗等, 2017),可能将相对还原性的热液金矿和钨(钨—锡)矿以不同的空间关系统一在同一岩浆热液系统中,如典型的 IRGD 型金矿床一般发育在钨矿成矿省内(Thompson et al., 1999; Hart, 2004)。花岗岩的高度分异/高演化以及延长的岩浆—热液过程,可以将 W—Sn 或 Au 在岩体内或其附近富集形成矿体;同时,由于高产热花岗岩延迟加热效应所诱发持久的热对流有利于在远离岩体的围岩中形成脉型矿体。然而,目前对于区域内发育的 W—Sn 矿床与 Au 矿床是否属于同一岩浆—热液成矿系统仍存在较大争议。不过,湘西金—铋—钨矿床(如沃溪 Au—Sb—W 矿床等)很可能为阐明上述科学问题提供了新的思路与研究实例。

### 3.2 高产热花岗岩的成矿效应

高产热花岗岩通常具有持久的岩浆分异与岩浆—热液演化过程特征,一般与长寿命热液成矿系统密切相关,呈现相对高的金属成矿效应(张德会, 2015; Zhang Tao et al., 2020)。Sawka 和 Chappell (1986)研究表明蚀变花岗岩与未蚀变花岗岩产热率值相当,而且高产热花岗岩一般未遭受明显蚀变,这暗示花岗岩中放射性元素异常的原因并非碱交代或流体蚀变等因素,可能主要与富集源区有关(Zhang Tao et al., 2023)。高产热花岗岩可能具有两方面的成矿效应:一是高产热花岗岩高度分异与元素的富集效应;二是高产热花岗岩的延迟加热效应——即岩体固结后因放射性产热而引发的热对流(张德会, 2015)。

与一般花岗岩不同,作为高分异高产热花岗岩的演化与元素富集涉及岩浆—热液系统整个链条,包括岩浆演化或分离结晶导致元素(如 Sn、Au 等)富集、岩浆—热液过渡阶段和高温气成到低温浅成热液演化过程,都为包括高场强元素在内的不相容元素的成矿富集作出了贡献,导致成矿富集元素具有广谱性(W、Sn、Nb、Ta、Zr、REE、F、Ba、U、Th、Ag、Au、Sb、Bi 等)特征(Lehmann, 1990)。尽管张旗和原杰(2024)及之前的文章否认花岗岩岩浆可以发生分离结晶作用,但汪相和楼法生(2022)认为花岗岩浆的分离结晶作用可以发生在深部岩浆房中,且在长期存活的深部岩浆房的上部可以出现高度分异

(富含不相容组分)的残余岩浆,后者与南岭地区钨锡成矿作用之间存在着密切的成因联系。具体地说,在造山运动晚期,携带巨量成矿物质(包括成矿元素、助溶剂和流体等)的残余岩浆在被动侵位过程中将会发生熔体与流体之间的溶离作用,两者分别形成小体积的花岗岩体(补体花岗岩或造山后花岗岩)和花岗岩浆热液型钨锡矿体(汪相和楼法生, 2022)。这里的补体花岗岩与矿体属于在时空上紧密共生在一起的同源分体,而不属于传统的成矿理论上的“母子”关系(汪相和楼法生, 2022)。众所周知,在岩浆演化晚期,花岗岩浆一般富集  $\text{H}_2\text{O}$ 、Li、F、B、Cl、S 和 P 等挥发分,有助于降低固相线温度,从而导致岩浆结晶时间延长和晚期残余熔体中挥发分与不相容元素以及成矿元素富集,同时伴随着与该岩浆演化过程相关的含挥发分流体出溶(张德会, 2015)。然而,具有持久放射性热能的高产热花岗岩一般由多期岩浆堆积构成,通常能够提供更持久的热量或热能,这可能有助于进一步强化或延长岩浆演化或结晶分异过程,导致金和伴生元素在高演化岩浆中低程度富集(Musturd et al., 2006; 汪在聪等, 2021)。而且,延长的岩浆演化过程有助于更多的成矿元素(如 W、Sn 等)从熔体相进入流体相,明显地提高了成矿元素从岩浆进入出溶流体的提取效率(Liu Xiangchong et al., 2023)。该认识得到了数值模拟的支持(Liu Xiangchong et al., 2023)。正是高产热花岗岩具有持久的热能与高度分异演化过程,明显地延长了花岗岩浆演化过程从而导致晚期岩浆熔体富集大离子亲石元素和成矿元素,同时也大大增加了岩浆挥发分饱和出溶的概率,导致高产热花岗岩体更容易发育岩浆—热液过渡阶段特殊的地质现象,这可能是高产热花岗岩与热液金属矿床关系密切的原因(Musturd et al., 2006; Liu Xiangchong et al., 2023)。同时,一定程度上也解释了 IRGD 型金矿床通常呈现出亲花岗岩元素组合(如 Au、Bi、Te、W、Mo、As 等)的原因。

另一方面,与一般花岗岩不同,高产热花岗岩侵位形成两类热流体系,一是岩浆侵位引起的热对流;二是岩体冷却过程及固结后放射性元素衰变热及其与之相关的热对流——即延迟加热效应,指除因岩浆自身侵位造成的热和流体对流之外,在岩体固结后岩体中的 HPEs 因衰变热诱发产生的热对流效应(Fehn, 1985; McLaren et al., 1999)。虽然,高产热花岗岩放射性热能产生的热异常温度较低(仍高于背景温度)但可以引起规模更大、持续时间更久的

热变质、热异常和热对流,即与岩浆侵位形成的温度场相比,放射性元素衰变热的温度梯度不高,但仍高于花岗岩周围背景温度约 40℃,且热异常场持续寿命是前者的数十甚至数百倍,最长达 300 Ma (McLaren et al., 1999)。热扰动加热效应被记录在距岩体达 10 Km 远的围岩中,使其中的大气降水或同生水等被加热,形成热液对流,可以解释远离岩体脉型金矿的成因 (Wall & Taylor, 1990); 同时也有助于理解为什么分布于岩体及接触带附近的成矿流体主要为岩浆热液,而相同地区与花岗岩有成因联系但离岩体有一定距离的矿床成矿流体具有“大气降水”、“变质水”或“盆地水”的特征争论 (张德会, 2015)。

## 4 未来主要研究方向

(1) 高产热花岗岩成因与其驱动分异机制研究。与构造驱动分异的喜马拉雅淡色花岗岩 (一般不是高产热花岗岩) 不同, 华南花岗岩为热驱动分异型花岗岩 (吴福元等, 2023), 这些花岗岩一般为高产热花岗岩 (如图 1), 为华南 W—Sn 等稀有金属矿床 (华南高温成矿省) 的主要成矿岩体 (胡瑞忠等, 2024)。华南花岗岩多为复式岩体, 通常由主体和补体花岗岩构成; 相较于主体花岗岩, 补体花岗岩普遍被认为由残余花岗岩浆形成, 呈现更高的演化分异程度, 一般与华南稀有金属矿床关系密切 (汪相和楼法生, 2022; 吴福元等, 2023)。然而, 目前关于花岗岩岩浆能否发生结晶分异作用仍存在较大争议, 其原因可能在于岩浆驱动分异过程与其分异机制仍不清楚 (张旗和原杰, 2024)。高产热花岗岩岩石成因和其放射性产热与地幔对流热机制对花岗岩浆驱动分异过程研究可能为探索岩浆分异理论提供新认识。

(2) 高产热花岗岩的岩浆热场与其热液金属成矿机制研究。虽然本文明确高产热花岗岩与 W、Sn、Nb、Ta、U、REE 和 Au 等金属矿床具有密切的成因联系, 然而目前对于高产热花岗岩、岩浆热场与其热液金属成矿过程及其成矿机制等研究严重不足 (张旗等, 2017), 明显制约了本文高产热花岗岩的成矿效应与其成矿规律总结。花岗岩侵位形成的岩浆热场是一个复杂的、多因素时—空耦合系统, 如何刻画或限定岩浆热场范围、存在寿命与其驱动流体成矿过程仍是矿床学研究的难点与热点问题。期待在未来矿床学研究中, 能够对高产热花岗岩的金属成矿机制与成矿效应等科学问题给予重视。

## 5 结论

(1) 高产热 (HHP) 花岗岩一般呈现明显的分异或演化特征, 矿物组成上以浅色矿物如石英、钾长石、钠长石为主, 暗色矿物含量低; 一般为富碱花岗岩, 富含大离子亲石元素和高场强元素。高产热花岗岩在全球均有发育, 从太古宙到显生宙均可形成, 太古宙—古元古代花岗岩产热率值最低, 中—新元古代最高, 此后到中生代呈降低趋势。

(2) 高产热花岗岩通常具有持久的岩浆分异与岩浆—热液演化过程特征, 有助于形成长寿命的岩浆—热液系统或岩浆热场, 呈现相对显著的金属成矿效应。高产热花岗岩一般与大型—超大型 Sn—W (Mo)、U、Nb—Ta 和 REE 等稀有、稀土金属矿床密切相关, 其次也与还原性侵入体有关金矿床有关; 与 Au 矿床相关的高产热花岗岩 ( $Rb/Sr < 10$ ) 相比, 稀有金属 (W—Sn) 矿床相关的高产热花岗岩演化程度 ( $Rb/Sr > 10$ ) 和产热率值通常相对偏高。

**致谢:** 在本文成稿过程中, 审稿专家和章雨旭研究员对初稿提出了很多宝贵意见和建议, 明显地提高了本稿件的质量, 笔者等在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 2009. 东秦岭钨矿带南泥湖—上房沟花岗岩成因及其对钨成矿作用的制约. 岩石学报, 25 (10): 2523~2536.
- 高剑峰, 凌洪飞, 沈渭洲, 陆建军, 张敏, 黄国龙, 谭正中. 2005. 粤西连阳复式岩体的地球化学特征及其成因研究. 岩石学报, 21 (6): 1645~1656.
- 胡瑞忠, 高伟, 付山岭, 苏文超, 彭建堂, 毕献武. 2024. 华南中生代陆内成矿作用. 地学前缘, 31(1): 226~238.
- 华仁民. 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩—成矿的时间差及其地质意义. 地质论评, 51(6): 633~639.
- 亢方超, 唐春安, 李迎春, 李天娇, 门金龙. 2022. 增强地热系统研究现状: 挑战与机遇. 工程科学学报, 44(10): 1767~1777.
- 李德威, 王焰新. 2015. 干热岩热能研究与开发的若干重大问题. 地球科学 (中国地质大学学报), 40(11): 1858~1869.
- 李晓峰, 韦星林, 朱艺婷, 李祖福, 邓宣驰. 2021. 华南稀有金属矿床: 类型、特点、时空分布与背景. 岩石学报, 37(12): 3591~3614.
- 廖煜钟. 2019. 千里山花岗岩及其与柿竹园矿田矿化分带的成因联系. 导师: 张德会. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文: 1~198.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 科学出版社: 1~518.
- 陆川, 王贵玲. 2015. 干热岩研究现状与展望. 科技导报, 33(19): 13~21.

- 马星华,陈斌,王志强,高林,孙克克. 2014. 南岭连阳复式岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd—Hf 同位素约束. 地质前缘, 21(6):264~280.
- 汪集昉,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.
- 汪相,楼法生. 2022. 论岩浆热液矿床的成矿期——以南岭地区燕山期钨矿为例. 地质论评, 68(2):507~530.
- 汪相. 2023. 关于南岭花岗岩及其成矿作用问题的思考——与吴福元教授等商榷. 地质论评, 69(6):2023~2031.
- 汪在聪,王焰,汪翔,程怀,许喆. 2021. 交代岩石圈地幔与金成矿作用. 地球科学, 46(12): 4197~4229.
- 王梁,王根厚,雷时斌,常春郊,侯万荣,贾丽琼,赵广明,陈海舰. 2015. 内蒙古乌拉山北大桦背岩体成因:地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr—Nd—Hf 同位素制约. 岩石学报, 31(7): 1977~1994.
- 吴福元,郭春丽,胡方泱,刘小驰,赵俊兴,李晓峰,秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1~36.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,王佳敏,杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学:地球科学, 47(7), 745~765.
- 张德会. 2015. 成矿作用地球化学. 北京:地质出版社: 1~481.
- 张旗,焦守涛,李承东,陈万峰. 2017. 花岗岩与大陆构造、岩浆热场与成矿. 岩石学报, 33(5): 1524~1540.
- 张旗,原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. 地质论评, 70(5): 1907~1926.
- 张涛. 2021. 高产热(HHP)花岗岩及其与金矿床成矿机制研究——以华北克拉通北缘金矿为例. 导师:张德会. 中国地质大学(北京)博士论文: 1~206.
- Agnol R D, de Oliveira D C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. Lithos, 93(3~4): 215~233.
- Arribas Jr A, Hedenquist J W, Itaya T, Okada T, Concepcion R A, Garcia Jr J S. 1995. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu—Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines. Geology, 23(4): 337~340.
- Artemieva I M, Thybo H, Jakobsen K, Sorensen N K, Nielsen L S K. 2017. Heat production in granitic rocks: Global analysis based on a new data compilation GRANITE2017. Earth-Science Reviews, 172: 1~26.
- Audat A, Güther D, Heinrich C A. 2000. Magmatic—hydrothermal evolution in a fractionating granite: A microchemical study of the Sn—W—F-mineralized mole granite (Australia). Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(19): 3373~3393.
- Bao Zhiwei, Zeng Qiaosong, Zhao Taiping, Yuan Zhenlei. 2009&. Geochemistry and petrogenesis of the ore-related Nannihu and Shangfanggou granite porphyries from east Qinling belt and their constraints on the molybdenum mineralization. Acta Petrologica Sinica, 25(10):2523~2536.
- Bea F. 2012. The sources of energy for crustal melting and the geochemistry of heat-producing elements. Lithos, 153:278~291.
- Brady R J, Ducea M N, Kidder S B, Saleeby J B. 2006. The distribution of radiogenic heat production as a function of depth in the Sierra Nevada batholith, California. Lithos, 86: 229~244.
- Candela P A, Blevin P L. 1995. Do some miarolitic granites preserve evidence of magmatic volatile phase permeability? Economic Geology, 90(8): 2310~2316.
- Chappell B W, Hine R. 2006. The Cornubian Batholith: an Example of Magmatic Fractionation on a Crustal Scale. Resource Geology, 56(3): 203~244.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan Province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 120(3): 258~276.
- Clark A H. 1993. Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? Soc. Econ. Geol. Special Publ., (2): 213~283.
- Fehn U. 1985. Post-magmatic convection related to high heat production in granites of southwest England: A theoretical study. In: The Institution of Mining and Metallurgy. ed. High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis. St. Austell, Cornwall, England: 99~112.
- Ferguson M R M, Ehrig K, Meffre S. 2019. Insights into magma histories through silicate—oxide crystal clusters: Linking the Hiltaba Suite intrusive rocks to the Gawler Range Volcanics, Gawler Craton, South Australia. Precambrian Research, 321: 103~122.
- Frindt S, Haapala I. 2004. Anorogenic Gross Spitzkoppe granite stock in central western Namibia: Part II. Structures and textures indicating crystallization from undercooled melt. American Mineralogist, 89(5~6): 857~866.
- Gao Jianfeng, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Lu Jianjun, Zhang Min, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. 2005&. Geochemistry and petrogenesis of Lianyang granite composite, west Guangdong province. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1645~1656.
- Goldfarb R J, Baker T, Dube B, Groves D I, Hart G J, Gosselin P. 2005. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In: Economic Geology 100th Anniversary volume. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA: 407~450.
- Guo Chunli, Chen Yuchuan, Zeng Zailin, Lou Fasheng. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan granites in southeastern China: Constraints from geochemistry and in-situ analyses of zircon U—Pb—Hf—O isotopes. Lithos, 148: 209~227.
- Guo Jia, Wu Kai, Seltmann Reimar, Zhang Rongqing, Ling Mingxing, Li Congying, Sun Weidong. 2021. Unraveling the link between mantle upwelling and formation of Sn-bearing granitic rocks in the world-class Dachang tin district, South China. GSA Bulletin, 134(3~4): 1043~1064.
- Guo Chunli, Wang Rucheng, Yuan Shunda, Wu Shenghua, Yin Bing. 2015. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis and geodynamic setting of the Qianlishan granitic pluton, Southeast China. Mineralogy and Petrology, 109(2): 253~282.
- Hart C J. 2004. Mid-Cretaceous magmatic evolution and intrusion-related metallogeny of the Tintina Gold Province, Yukon and Alaska. University of Western Australia: 1~192.
- Hu Ruizhong, Gao Wei, Fu Shanling, Su Wenchao, Peng Jiantang, Bi Xianwu. 2024&. Mesozoic intraplate metallogensis in South China. Earth Science Frontiers, 31(1): 226~238.
- Hua Renmin. 2005&. Differences between rock-forming and related ore-forming times for the Mesozoic granitoids of crust remelting types in the Nanling Range, south China, and its geological significance. Geological Review, 51(6):633~639.
- Hurter S, Schellschmidt R. 2003. Atlas of geothermal resources in Europe. Geothermics, 32: 779~787.
- Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Capdevila R, Martineau F, Zhao Zhenhua, Wang Yixian. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad

- REE patterns; The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4): 171~198.
- Jaupart C, Mareschal J C. 2014. Constraints on crustal heat production from heat flow data. In: *Treatise on Geochemistry (2nd Edition)*: 53~73.
- Jaupart C, Mareschal J C, Iarotsky L. 2016. Radiogenic heat production in the continental crust. *Lithos*, 262: 398~427.
- Kang Fangchao, Tang Chun'an, Li Yingchun, Li Tianjiao, Men Jinlong. 2022. Challenges and opportunities of enhanced geothermal systems: A review. *Chinese Journal of Engineering*, 44(10): 1767~1777.
- Klominsky J, Partington G A, McNaughton N J, Ho S E, Groves D I. 1996. Radiothermal granites of the Cullen batholith and associated mineralization (Australia). In: *Czech Geological Survey Special Papers 5*, Prague.
- Kromkhun K, Foden J, Hore S, Baines G. 2013. Geochronology and Hf isotopes of the bimodal mafic—felsic high heat producing igneous suite from Mt. Painter Province, South Australia. *Gondwana Research*, 24: 1067~1079.
- Kumar P S, Reddy G K. 2004. Radioelements and heat production of an exposed Archaean crustal cross-section, Dharwar Craton, south India. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3~4): 309~324.
- Lang J R, Baker T. 2001. Intrusion-related gold systems: The present level of understanding. *Mineralium Deposita*, 36: 477~489.
- Lehmann B. 1990. *Metallogeny of Tin*. Berlin: Springer-Verlag: 1~211.
- Lenharo S L R, Pollard P J, Born H. 2003. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, 66: 37~61.
- Li Dewei, Wang Yanxin. 2015. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy. *Earth Science*, 40(11): 1858~1869.
- Li Xiaofeng, Wei Xinglin, Zhu Yiting, Li Zufu, Deng Xuanchi. 2021. Rare metal deposits in south China: Types, characteristics, distribution and tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3591~3614.
- Li Zhen, Liu Jianchao, Zhang Haidong, Fan Kai, Zhang Xue, Deng Juting, Zhang Jingwen. 2021. Multistage gold mineralization in the Hadamengou gold deposit in the northern margin of the North China Craton: Insights from in-situ trace element contents and sulfur isotope analyses of pyrite. *Ore Geology Reviews*, 134: 104135.
- Liao Yuzhong. 2019. *The Qianlishan Granite Genetically Related to the Zoning of Shizhuyuan Ore-field*. Supervisor: XXX. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1~198.
- Liu Junchen, Wang Yitian, Mao Jingwen, Jian Wei, Lü Guxian, Hu Qiaoqing, Zhang Baolin, Wang Hongcai, Ma Yue, Gao Peng, Fang Guicong. 2024. Two episodes of mineralization in the Baolun high-grade lode gold deposit, Hainan Island, South China: Insight from LA-ICP-MS analysis of hydrothermal rutile. *Ore Geology Reviews*, 168: 106052.
- Liu Xiangchong, Zhang Dehui, Yang Jianwen, Xiao Changhao, Zhang Tao, 2023. High heat producing granites and prolonged extraction of tungsten and tin from melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 348: 340~354.
- Liu Yingjun, Cao Limin, Li Zhaolin, Wang He'nian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1984. *Geochemistry of Elements*. Beijing: Science Press: 1~518.
- Lu Chuan, Wang Guilin. 2015. Current status and prospect of hot dry rock research. *Science & Technology Review*, 33(19): 13~21.
- Ma Xinghua, Chen Bin, Wang Zhiqiang, Gao Lin, Sun Keke. 2014. Petrogenesis of the Lianyang Composite granite, Nanling region: U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd—Hf isotopes constraints. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 264~280.
- Mareschal J C, Jaupart C. 2013. Radiogenic heat production, thermal regime and evolution of continental crust. *Tectonophysics*, 609: 524~534.
- McInnes B I A, Evans N J, Fu F Q, Garwin S. 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58: 467~498.
- McLaren S, Neumann N, Sandiford M, Wyborn L. 1999. Post-intrusion heating associated with high-heat-producing Proterozoic granites—implications for mineralization. *AGSO Research Newsletter*, 30: 23~26.
- McLaren S, Sandiford M, Hand M, Neumann N, Wyborn L, Bastrakova I. 2003. The hot southern continent: Heat flow and heat production in Australian Proterozoic terranes. *Geological Society of Australia Special Publication*: 151~161.
- McLaren S, Sandiford M, Powell R, Neumann N, Woodhead J. 2006. Palaeozoic intraplate crustal anatexis in the Mount Painter Province, South Australia: Timing, thermal budgets and the role of crustal heat production. *Journal of Petrology*, 47: 2281~2302.
- Moncada D, Rimstidt J D, Bodnar R J. 2019. How to form a giant epithermal precious metal deposit: Relationships between fluid flow rate, metal concentration of ore-forming fluids, duration of the ore-forming process, and ore grade and tonnage. *Ore Geology Reviews*, 113: 103066.
- Mottram C M, Kellett D A, Barresi T, Chapman G G, Halle J. 2024. Tracking the porphyry—epithermal mineralization transition using U-Pb carbonate dating. *Geology*, <https://doi.org/10.1130/G52211.1>.
- Mustard R. 2004. Textural, mineralogical and geochemical variation in the zoned Timbarra Tablelands pluton, New South Wales. *Australian Journal of Earth Sciences*, 51(3): 385~405.
- Mustard R, Ulrich T, Kamenetsky V S, Mernagh T. 2006. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization. *Geology*, 34(2): 85~88.
- Nédélec A, Bouchez J L. 2015. *Granites: Petrology, Structure, Geological Setting, and Metallogeny*. Oxford: Oxford University Press: 1~335.
- Oliver N H S, Butera K M, Rubenach M J, Marshall L J, Cleverley J S, Mark G, Tullemaes F, Esser D. 2008. The protracted hydrothermal evolution of the Mount Isa Eastern Succession: A review and tectonic implications. *Precambrian Research*, 163(1): 108~130.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Dordrecht: Springer: 1~1250.
- Sandiford M, McLaren S. 2002. Tectonic feedback and the ordering of heat producing elements within the continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1~2): 133~150.
- Sawka W N, Chappell B W. 1986. The distribution of radioactive heat production in I- and S-type granites and residual source regions: Implications to high heat flow areas in the Lachlan Fold Belt, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 33(2): 107~118.
- Shannon J R, Walker B M, Carten R B, Geraghty E P. 1982. Unidirectional solidification textures and their significance in

- determining relative ages of intrusions at the Henderson Mine, Colorado. *Geology*, 10: 293~297.
- Skinner B J. 1997. Hydrothermal mineral deposits: What we do and don't know. In: Barnes H L. ed. *Geochemistry of Hydrothermal ore Deposits*. 3rd ed. , New York: Wiley and Sons: 1~30.
- Stone M, Exley C S. 1985. High heat production granites of southwest England and their associated mineralization: A review. In: The Institution of Mining and Metallurgy. ed. *High Heat Production (HHP) Granites, Hydrothermal Circulation and Ore Genesis*. St. Austell, Cornwall, England: 25~36.
- Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, Lang J R, Mortensen J K. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten—tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34: 323~334.
- von Quadt A, Erni M, Martinek K, Moll M, Peytcheva I, Heinrich C A. 2011. Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatic—hydrothermal systems. *Geology*, 39(8): 731~734.
- Wall V J, Taylor J R. 1990. Granite emplacement and temporally related gold mineralization. In: Geological Society of Australia, Abstracts, 25: 264~265.
- Wang Jiyang, Hu shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoying, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012&. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. *Science & Technology Review*, 30(32): 25~31.
- Wang Liang, Wang Genhou, Lei Shibin, Chang Chunjiao, Hou Wanrong, Jia Liqiong, Zhao Guangming, Chen Haijian. 2015&. Petrogenesis of Dahuabei pluton from Wulashan, Inner Mongolia: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb dating and Sr—Nd—Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1977~1994.
- Wang Xiang, Lou Fasheng. 2022&. On the ore-forming period of magmatic—hydrothermal deposits—A case study of the Yanshanian tungsten deposits in the Nanling Range. *Geological Review*, 68(2): 507~530.
- Wang Xiang. 2023&. Thoughts on granite and its mineralization in Nanling Range—A discussion with Prof. WU Fuyuan et al. *Geological Review*, 69(6): 2023~2031.
- Wang Zaicong, Wang Christina Yan, Wang Xiang, Cheng Huai, Xu Zhe. 2021&. Metasomatized lithospheric mantle and gold mineralization. *Earth Science*, 46(12): 4197~4229.
- Webster J, Thomas R, Forster H J, Seltmann R, Tappen C. 2004. Geochemical evolution of halogen-enriched granite magmas and mineralizing fluids of the Zinnwald tin—tungsten mining district, Erzgebirge, Germany. *Mineralium Deposita*, 39(4): 452~472.
- Wu Fuyuan, Guo Chunli, Hu Fangyang, Liu Xiaochi, Zhao Junxing, Li Xiaofeng, Qin Kezhang. 2023&. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1~36.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin. , Yang Lei. 2017&. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Science China Earth Sciences*, 47(7): 745~765.
- Wyborn L. 1998. Younger ca 1500 Ma granites of the Williams and Naraku Batholiths, Cloncurry district, eastern Mt. Isa Inlier: Geochemistry, origin, metallogenic significance and exploration indicators. *Australian Journal of Earth Sciences*, 45(3): 397~411.
- Zhang Dehui. 2015#. *Geochemistry of ore-forming processes*. Beijing: Geological Publishing House: 1~481.
- Zhang Qi, Jiao Shoutao, Li Chengdong, Chen Wanfeng. 2017&. Granite and continental tectonics, magma thermal field and metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1524~1540.
- Zhang Qi, Yuan Jie. 2024&. The crisis and opportunity of geochemical research. *Geological Review*, 70(5): 1907~1926.
- Zhang Tao, Zhang Dehui, Danyushevsky L V, Wu Mingqian, N' dri K A, Liao Yuzhong, Zhang Jilin. 2020. Timing of multiple magma events and duration of the hydrothermal system at the Yu' erya gold deposit, eastern Hebei Province, China: Constraints from U-Pb and Ar-Ar dating. *Ore Geology Reviews*, 127: 103804.
- Zhang Tao, Zhang Dehui, Liu Xiangchong, Qiu Huaning, Zhang Jilin, Liu Yanbing, 2023. Petrogenesis of high heat production granite in eastern Hebei Province, China: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr—Nd—Hf—O isotopes. *Lithos*, 436~437: 106974.
- Zhang Tao. 2021&. High heat production (HHP) granite and its metallogenic mechanism—Example from the gold deposits in northern North China Craton. Beijing: China University of Geosciences: 1~206.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Sun Tao, Chen Weifeng, Chen Peirong, Pu Wei. 2016. Late Triassic U-bearing and barren granites in the Miao' ershan batholith, South China: Petrogenetic discrimination and exploration significance. *Ore Geology Reviews*, 77: 260~278.
- Zhao Zhenyu, Hou Lin, Ding Jun, Zhang Qiming, Wu Songyang. 2018. A genetic link between Late Cretaceous granitic magmatism and Sn mineralization in the southwestern South China Block: A case study of the Dulong Sn-dominant polymetallic deposit. *Ore Geology Reviews*, 93: 268~289.
- Zhou Zuomin, Ma Changqian, Qi Shihua, Xi Yufei, Liu Wei. 2020. Late Mesozoic high-heat-producing (HHP) and high-temperature geothermal reservoir granitoids: The most significant geothermal mechanism in South China. *Lithos*, 366~367: 105568.

## High heat production granites and its metallogenic effects

FENG Jun<sup>1)</sup>, ZHANG Tao<sup>2,3)</sup>, HUANG Ze<sup>3)</sup>

1) Guangxi Baise Industrial Investment and Development Group Co. Ltd., Baise, Guangxi, 533000;

2) Langfang Integrated Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Langfang, Hebei, 065000;

3) School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074

**Objectives:** As potential geothermal resources, high heat production (HHP) granites have attracted attention from countries around the world. However, the genetic links between HHP granites and hydrothermal metal



deposits have not received the corresponding emphasis and reviews.

**Methods:** Based on the detailed investigation and research of typical HHP granites and related metal deposits, we summarize the petrology and spatial—temporal distribution characteristics of HHP granites and discuss the ore-forming relationship between HHP granites and hydrothermal metal deposits.

**Results:** High heat production (HHP) granites are enriched in radioactive heat producing elements—HPEs: U, Th, K and their heat production values are higher than or equal to  $5 \mu\text{W}/\text{m}^3$ . HHP granites are closely related to the rare- and rare- earth metal deposits (especially W—Sn deposits) and some gold deposits that are associated with reduced intrusive rocks. HHP granites exhibit protracted differentiation with associated element enrichments and delayed heating effects, which may be conducive to the formation of long-lived magmatic—hydrothermal mineralization systems and large metal deposits.

**Conclusions:** The HHP granites, usually assembled by multiple magma pulses, are accumulated complex with alkali-rich and low-phosphorus characteristics and most are characterized by high differentiation/evolution, which are generally associated with large to super-large hydrothermal metal deposits.

**Keywords:** high heat production granites (HHP granite); highly evolved granites; hydrothermal metal deposits; delayed heating effect; hot dry rocks

**Acknowledgement:** This article is supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 42402083)

**First author:** Jun Feng, male, born in 1983, Ph. D., Senior Engineer, is primarily engaged in the exploration of metal minerals and the management of mining enterprises; Email: 234693737@qq.com

**Corresponding author:** Tao Zhang, male, born in 1989, Postdoc, primarily engaged in the study of metal mineral resources and the regularity of ore formation. Email: nanyangxinzhuang@126.com.

**Manuscript** received on: 2024-09-24; Accepted on: 2024-12-16; Published online on: 2025-01-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2025.01.055

**Edited by:** ZHANG Yuxu

