

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2024.1.9

华南中生代陆内成矿作用

胡瑞忠^{1,2}, 高伟¹, 付山岭¹, 苏文超¹, 彭建堂¹, 毕献武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

HU Ruizhong^{1,2}, GAO Wei¹, FU Shanling¹, SU Wenchao¹, PENG Jiantang¹, BI Xianwu¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

HU Ruizhong, GAO Wei, FU Shanling, et al. Mesozoic intraplate metallogenesis in South China. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 226-238

Abstract: Intraplate metallogenesis is a significant global scientific issue. The South China block is renowned for its large-scale mineralization occurring far away from active continental margins during the Mesozoic. It formed a low-temperature metallogenic province of gold, antimony, lead, and zinc deposits in the west (Yangtze block) and a high-temperature metallogenic province of tungsten-tin polymetallic deposits in the east (Cathaysia block), making it an ideal natural laboratory for intraplate metallogenesis studies. The two metallogenic provinces of South China have long been considered distinct systems due to their spatial separation. However, our research revealed that the low-temperature mineralization in the west (230 – 200 Ma and 160 – 130 Ma) occurred simultaneously with the high-temperature mineralization in the east, and has similar geochemical fingerprints to the latter. Both types of mineralization were probably driven by the Indosinian intracontinental orogeny and Yanshanian asthenosphere upwelling beneath South China. Therefore, there is a genetic linkage between the two metallogenic provinces, and together they constitute a giant polymetallic domain spreading planarly under intraplate setting. The current distribution status of the low- and high-temperature mineralization types in the west and east is controlled by the eastward increase of denudation degree in South China after ore formation. It is predicted that there may exist high-temperature W-Sn polymetallic deposits beneath the eastern region of the low-temperature metallogenic province. A new intraplate metallogenesis model for South China was established. The significant features of the new model include metallogenesis occurring within preexisting weakness zones of lithosphere, continental crust serving as sources for metallogenic elements, and coexistence of high- and low-temperature mineralization exhibiting a distinct planar distribution. The model differs from the metallogenic mechanism in continental plate margins.

Keywords: South China block; high-temperature metallogenic province; low-temperature metallogenic province; intraplate metallogenesis

摘要: 陆内成矿机制是全球性科学难题。华南陆块中生代成矿大爆发,成矿作用远离活动大陆边缘,形成西部金锑铅锌低温成矿省和东部钨锡多金属高温成矿省,是研究陆内成矿的理想场所。因为空间上的分离,两个成矿省长期被认为是互为独立的体系。研究发现,西部低温成矿(230~200 Ma,160~130 Ma)与东部高温成矿时代一致并显示类似的地球化学指纹,印支期陆内造山和燕山期软流圈上涌是其共有成矿驱动机制,两个成矿省是具有成因联系的整体,共同构成面状展布的巨型多金属陆内成矿区;成矿后华南从西向东剥蚀

收稿日期:2023-12-30;修回日期:2024-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41830432, U1812402);国家重点基础研究发展计划“973”项目“华南大规模低温成矿作用(2014CB440900)”

作者简介:胡瑞忠(1958—),男,研究员,中国科学院院士,主要从事矿床学和矿床地球化学研究。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

<https://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2024,31(1)

程度的增强控制了目前近地表矿西部低温、东部高温的空间分布格局,低温成矿省东部区域的深部可能存在高温钨锡多金属矿床。在此基础上,建立了定位于陆内岩石圈先存薄弱区、陆壳供给矿源、高低温矿并重、成矿面状展布从而明显区别于板块边缘成矿机制的华南陆内成矿新理论。

关键词:华南陆块;高温成矿省;低温成矿省;陆内成矿机制

中图分类号:P611;P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2024)01-0226-13

0 引言

大陆板块内部的成矿简称陆内成矿(intraplate metallogeny, intracontinental metallogeny),是指发生在大陆板块内部、远离活动大陆边缘的成矿作用,包括陆内地幔柱成矿作用和无地幔柱参与的陆内成矿作用^[1]。20世纪60年代中后期以来,矿床学研究迈入以板块构造理论和地幔柱学说为基础的现代矿床学阶段。历经几十年的研究,人们对洋中脊、俯冲带和陆陆碰撞带等板块边缘成矿作用以及板块内部地幔柱成矿作用的认识已相对深入,其知识框架已基本建立,推动了矿床学和找矿勘查的大发展^[2-5]。

由于以往的大多数地球动力学理论均聚焦板块边缘,构造演化如何影响板块内部的地质作用目前还知之甚少^[6],无地幔柱参与的陆内成矿机制,是板块构造理论登陆后的重要科学难题之一,主要表现为陆内成矿的动力机制、过程和成矿多样性之间的关系等还很不明确。存在这些问题,主要是因为陆内通常发生大规模低温成矿,而低温矿床因为其固有特点往往难以精确定年和示踪物源,从而也难以将成矿事件与特定地质事件相联系^[7]。因此,陆内成矿尚缺乏较系统的理论体系,亟待深入研究。

华南陆块中生代成矿大爆发,在西部和东部分别形成了大面积分布的金锑铅锌低温成矿省和钨锡多金属高温成矿省(图1)^[7-8],是全球罕见的世界级多金属成矿区^[9-10]。华南中生代的成矿作用远离活动大陆边缘,显示典型的陆内成矿特征,是全球研究陆内成矿机制的理想地区^[7,11]。

1 地质背景

Greenville造山事件导致华夏地块沿江山-绍兴断裂向扬子地块的俯冲碰撞形成了中新元古代的华南陆块,并在扬子地块一侧形成江南造山带^[8,12](图1)。此后,Rodinia超大陆裂解,华南腹地沿江绍断裂两侧在新元古代(约820~725 Ma)形成了大

致呈NE走向的夭折裂谷系(南华裂谷),其中发育大量双峰式火成岩以及陆相和浅海相陆源碎屑沉积岩(板溪群和冷家溪群)。新元古代裂谷系中的沉积作用一直演化到下古生界,并与寒武系和奥陶系地层整合接触,直至古生代中期的加里东运动。加里东运动是华南重要的构造事件,影响东至政和-大浦断裂、西至安化-罗城断裂的广大范围,导致前奥陶系地层褶皱并与上覆志留系地层角度不整合接触,同时发育大面积分布的加里东期(约460~400 Ma)S型花岗岩^[12-13]。Greenville和加里东造山事件形成了华南陆内薄弱区,是华南陆块中生代陆内成矿的主要区域。

加里东运动后,华南还历经了早中生代的印支运动和晚中生代的燕山运动两期重要构造岩浆事件。三叠纪印支运动导致华南陆块通过秦岭-大别造山带和松马缝合带而分别与华北地块和印支地块相连接(图1),并在华南陆块腹地发育广泛分布的花岗岩,这些花岗岩的时代集中于约255~200 Ma,起源于古太平洋板块西向俯冲^[14]和/或响应于古特提斯洋关闭过程中华南陆块与印支地块、华北地块的相互作用^[13]。燕山运动主要导致在华夏地块和邻区形成大花岗岩省^[13-14],这些花岗岩形成于侏罗纪-早白垩世,峰值年龄约160~140 Ma^[10,13],与板内背景岩石圈伸展、软流圈上涌有关^[13],或起源于古太平洋板块向华夏地块的平板俯冲^[14]。虽然在扬子地块少见燕山期花岗岩露头,但地球物理探测资料和晚期岩浆岩中继承锆石的地球化学特征表明,其东部的湘中和右江地区的深部可能存在燕山期花岗岩^[7]。值得指出的是,政和-大浦断裂以西(图1)华南腹地的印支和燕山期花岗岩通常都缺乏弧岩浆的地球化学特征^[13-14]。

与上述重大地质事件相对应,华南中生代成矿大爆发,在扬子地块西南部形成金锑铅锌低温(约120~200 °C)成矿省,而在华夏地块则形成了与花岗岩浆活动有关的钨锡多金属高温(约300~450 °C)成矿省。在低温成矿省内,自西向东分别发育川滇黔铅锌矿集区、右江金锑汞砷矿集区和湘中锑金矿集区^[7](图1)。华南陆块探明的钨、锑储量占全球50%

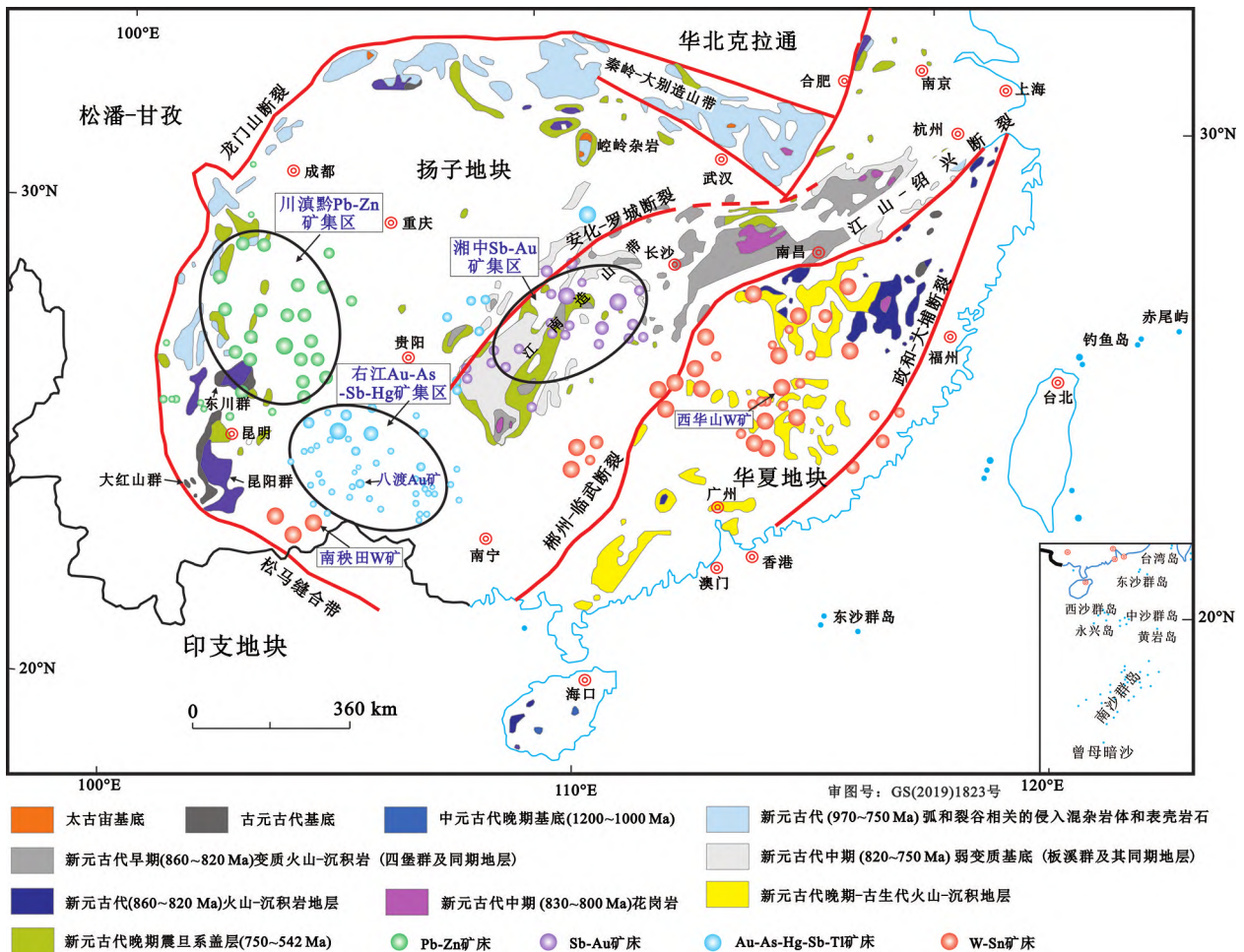


图1 华南陆块地质构造和中生代矿床分布简图
(据文献[7-8]修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the South China block and distribution of Mesozoic ore deposits. Modified from [7-8].

以上,也是全球金、铅、锌、汞、砷等矿产的重要产区,在全球矿产资源格局中占有重要地位^[7,9-11,15]。

2 华南低温和高温两个成矿省的成矿时代一致

华南高温成矿省的钨锡多金属矿床中多含可用 Re-Os 法精确定年的辉钼矿,其成矿时代已基本确定为约 230~200、160~130 和 120~80 Ma 三个时期^[9-10]。但是,低温矿床一般都缺少适合放射性同位素定年的矿物,给矿床定年带来了巨大难度。前人曾用多种方法试图确定这些矿床的年龄,但得到了很大的变化范围。例如,对右江矿集区的低温卡林型金矿床,前人用石英裂变径迹法、流体包裹体 Rb-Sr 等时线法、硫化物矿物 Pb 模式年龄法等确定的年龄值在约 270~50 Ma 的大范围内连续分布(图 2)^[16]。因成矿时代不确定,华南大规模低温成

矿究竟与什么地质事件有关,以往未形成清晰认识,制约了对成矿背景和成矿驱动机制的深入理解。

近年来,通过系统的微区观测研究,我们发现并证实一些低温矿床中存在与成矿同时、适合 U-Pb 定年的金红石、独居石、锆石、磷灰石等微米级热液成因矿物,运用现代微区原位精确定年技术,对其开展了低温成矿年代学的深入研究^[7,17-22],结合同行近年的研究成果,建立了华南低温成矿省的成矿年代格架^[7]。研究发现,低温成矿省存在两期成矿事件。第一期约为 230~200 Ma,相当于印支期;第二期约为 160~130 Ma,相当于燕山期。其中,印支期成矿涉及低温成矿省川滇黔、右江和湘中三个矿集区,而燕山期成矿则只发生在其中的右江和湘中两个矿集区(图 3)^[7,10,22]。极有意义的是,通过与华南高温成矿省成矿时代^[9-10]的对比研究发现,华南低温成矿省与高温成矿省的成矿时代高度一致(图 3)。

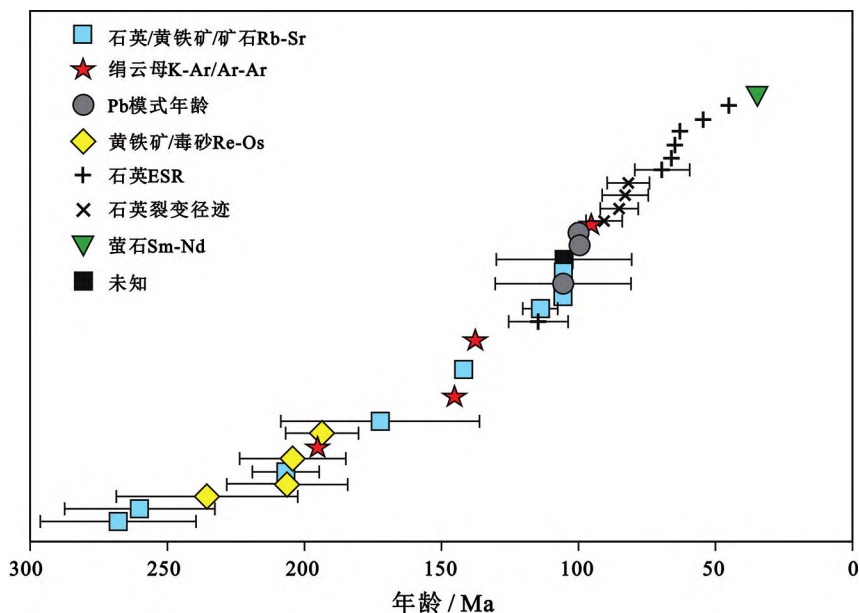


图2 以往确定的华南低温成矿省右江矿集区卡林型金矿床的成矿年龄
(据文献[16]修改)

Fig. 2 Previous dating results for Carlin-type gold deposits of low-temperature metallogenic province in South China. Modified from [16].

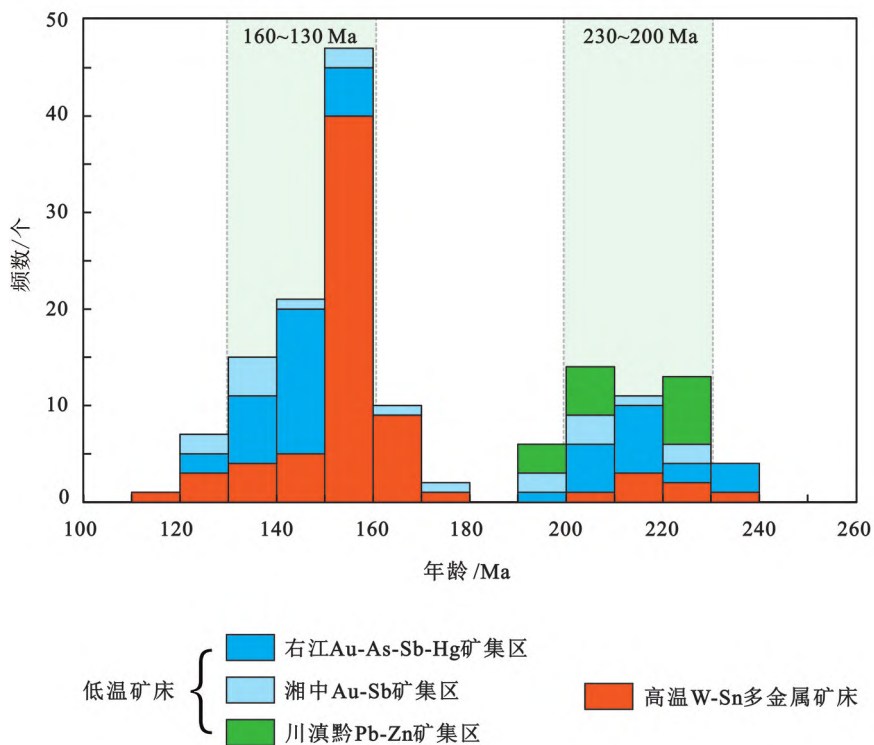


图3 华南陆块中生代大规模低温和高温成矿时代对比
(据文献[7, 10, 22]修改)

Fig. 3 Comparison of mineralization ages of the Mesozoic low- and high-temperature metallogenic provinces in South China. Modified from [7, 10, 22].

3 华南低温和高温矿床具有类似的地球化学指纹

对华南高温成矿省钨锡多金属矿床的成因研究由来已久,国内外学者已揭示它们主要与S型花岗岩或高分异花岗岩有密切的时空和成因联系,其成矿流体为这些花岗岩成岩过程中分异出溶的岩浆流体,而晚期大气降水的加入改变了岩浆流体的物理化学性质,对促进其中钨锡多金属元素的沉淀形成矿床发挥了重要作用^[15,23-27]。但是,低温矿床尤其是卡林型金矿床的矿物颗粒非常微细且多具环带结构,这给精确测定矿物或成矿流体的元素-同位素组成带来了巨大难度。由于不能获得成矿流体较可靠的元素-同位素组成,这些主要产在沉积岩断裂构造中、周围一般无火成岩分布的低温热液矿床的大规模成矿是否与岩浆活动有关,一直存在争议。

在以往研究的基础上,近年我们运用稀有气体同位素、非传统稳定同位素、微区原位硫同位素和单个流体包裹体组成等先进示踪方法,对矿床成因进行了深入研究。研究表明:(1)右江金锑汞砷和湘中锑金矿集区的成矿流体主要为岩浆流体-大气降水混合成因,深部岩浆活动的热和少量流体驱动大气成因流体循环并主要浸取出前寒武纪基底地层中的成矿元素,然后迁移到合适的构造部位沉淀富集形

成了低温金锑汞砷矿床;(2)川滇黔铅锌矿集区的成矿流体为低温高盐度的盆地流体,这些流体沿断裂大规模循环并主要浸取出前寒武纪基底地层中的成矿元素并运移至相对开放的断裂空间成矿,形成了MVT型铅锌矿床。下面以右江矿集区的卡林型金矿床为例做一简要说明。

3.1 硫同位素

卡林型金矿床为低温矿床,其中的载金矿物——含砷黄铁矿具有明显的核-环结构,核部为同沉积黄铁矿,环带才是成矿阶段形成的热液黄铁矿,核部和环带在化学组成上存在很大差异^[28-29]。因此,传统的黄铁矿溶样法测定的S同位素组成,不能反映成矿流体的真实特点。

为克服以往研究的局限性,我们采用SIMS、NanoSIMS、LA-ICP-MS等多种微区原位分析方法,对右江盆地内赋存于两种沉积相(台地相、盆地相)地层中的7个金矿床的载金含砷黄铁矿环带和核部的硫同位素组成开展了系统研究。测试结果表明,3个台地相矿床中成矿阶段黄铁矿环带的S同位素组成集中在-5‰~5‰,明显不同于沉积成岩期形成的核部黄铁矿,表明成矿流体中的硫主要为岩浆硫;但4个盆地相矿床的含砷黄铁矿环带则具有较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,反映有大量地层硫的加入^[30-33]。

Hu等^[17]总结了右江矿集区卡林型金矿床的S同位素组成(图4),包括成矿阶段无环带结构辉锑

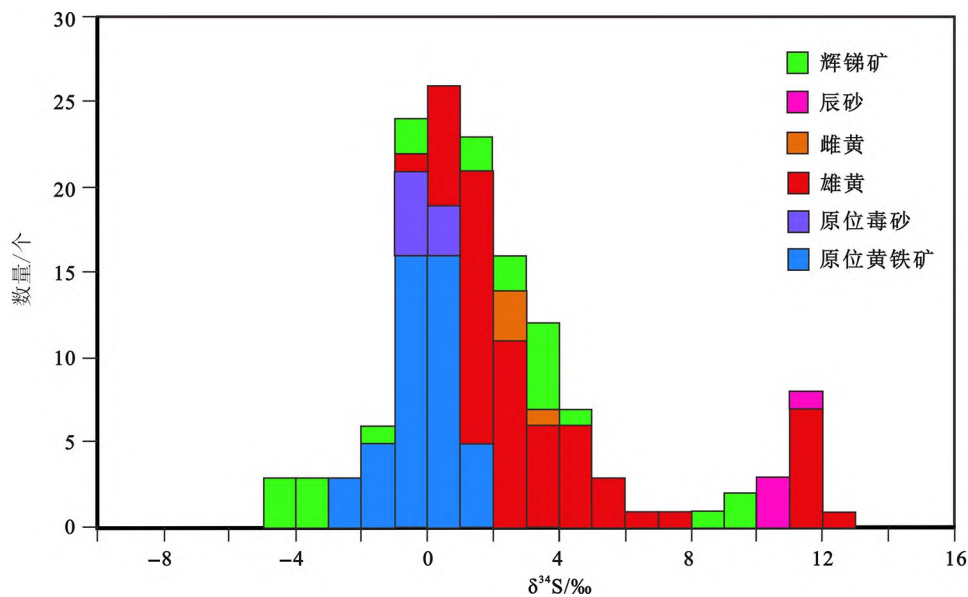


图4 右江矿集区卡林型金矿床硫化物矿物硫同位素组成 (据文献[17])

Fig. 4 Sulfur isotopic compositions of sulfide minerals from Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin. Adapted from [17].

矿、雄黄、雌黄、辰砂的溶样法测定值(可代表成矿流体特征)和成矿阶段黄铁矿和毒砂环带的原位测定值。结果表明,成矿流体的 S 同位素组成具有两个峰值:一个在(0±5)%左右,显示岩浆硫特点;另一个在 12%左右,表明成矿流体中的硫应具有岩浆硫与地层中海相硫酸盐硫的混合成因。

3.2 稀有气体同位素

近年来,稀有气体同位素地球化学研究最令人瞩目的进展之一是,把示踪地球现代流体的研究拓展到了作为流体包裹体保存的成矿古流体的研究^[34-40]。稀有气体尤其是氦同位素组成在地壳与地幔中的差异极大,即使地壳流体中有少量幔源或岩浆氦的加入,用氦同位素也易于判别^[36-39]。Jin 等^[40]分析了右江矿集区泥堡、水银洞和丫他 3 个卡林型金矿床中黄铁矿、石英、方解石、雄黄和萤石样品中流体包裹体的稀有气体同位素组成,构建了³He/²⁰Ne-⁴He/²⁰Ne 关系图(图 5)。由此可见,矿物流体包裹体的稀有气体同位素组成,反映了这些卡林型金矿床的成矿流体具有岩浆来源、地壳浅部层间孔隙流体和大气成因地下水的混合特征。

3.3 汞同位素

大洋板块俯冲过程可较好地解释活动大陆边缘

斑岩-浅成低温热液型铜金矿床的成因。一般认为,这些矿床的成矿金属主要来自俯冲大洋板片及其海底沉积物中的流体交代改造过的下伏地幔楔^[35,41]。相反,远离活动大陆边缘的低温热液矿床中的成矿金属究竟来自何处,以往则很不确定。华南右江低温金锑汞砷矿集区远离活动大陆边缘,是全球第二大卡林型金矿床的集中分布区,矿床中成矿金属的来源众说纷纭,来自上地壳沉积岩、前寒武纪基底地层、幔源堆晶岩、酸性岩浆等多种观点并存^[1,17,29,42-43],急需新示踪体系的开发和运用。

近年的研究发现,汞(Hg)同位素具有非质量分馏(用 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 表示)的显著特点,这种非质量分馏主要受地表光致还原反应控制^[44]。光致还原反应的结果将导致陆相(如土壤)汞具有负的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$,海相(如海洋沉积物)汞具有正的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$,而未经地表光致还原反应的深部地幔或岩浆的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 则约为零值^[44-46]。这些非质量分馏特征一旦形成,可成为永久“印记”得到保存,不再受其后沉积作用、变质作用、岩浆作用和热液活动等的影响^[46-49]。因此, $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 是示踪汞行为的独特“基因”和区

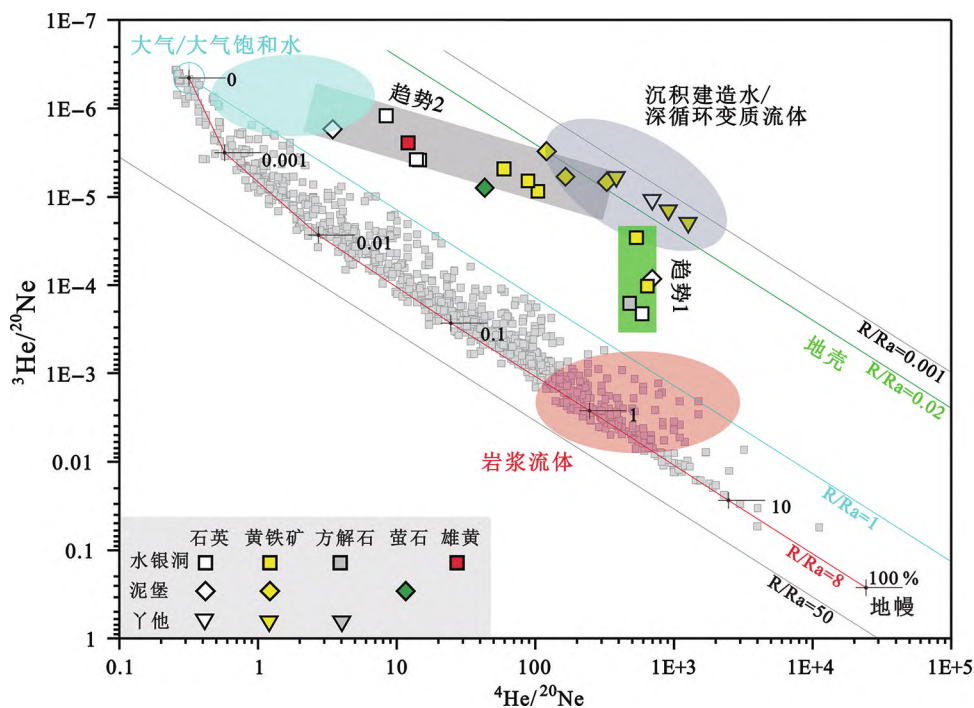


图 5 卡林型金矿成矿流体³He/²⁰Ne-⁴He/²⁰Ne 混合模型示意图 (据文献[40])

Fig. 4 ³He/²⁰Ne-⁴He/²⁰Ne mixing model for ore-forming fluids of Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin. Adapted from [40].

分汞来源的理想手段。由于汞是热液金矿床的重要共生元素,在卡林型金矿床中更是与金、锑、砷等具有相同成因^[48,50-51],所以汞同位素可以很好地指示低温矿床中金、锑、汞、砷的来源。

研究表明,活动大陆边缘与大洋板块俯冲有关的斑岩-浅成低温热液型铜金矿床的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 为正值,指示海洋储库汞的加入,这与其成矿金属主要来自受俯冲大洋板片及其海底沉积物中的流体交代过的地幔楔一致^[48]。相反,我们的研究表明,华南低温金锑汞矿床的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 主要显示为负值,与区域上前寒武纪基底陆源物质为主的板溪群和冷家溪群等地层的值基本一致(图6)^[52-54],表明这些低温矿床的成矿金属主要由成矿流体从这些基底地层中浸取而来,显示陆壳来源的显著特征^[52]。

3.4 单个流体包裹体组成

我们采用 LA-ICP-MS 技术,分析了广西八渡低温卡林型金矿床和华南与花岗岩有关的高温钨多金属矿床(赣南西华山、云南南秧田)成矿阶段石英中单个流体包裹体的组成。结果显示:(1)低温金矿床成矿流体富含 Na、K、As、B、Mg、Sb、Ba 等元素,同时流体中也富含高温成矿元素 W ($3 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$)(图7)^[7]。通常认为 W 等元素的富集是有岩浆热液参与的典型标志^[55],因此低温矿床中 W 的富集暗示其成矿流体应受过岩浆活动影响,W 主要来源于深部花岗岩浆^[7]。(2)八渡金矿床与华南

高温钨多金属矿床成矿流体组成的对比研究(图7)发现,低温金矿床成矿流体的 W 含量和 W/Na 比值与高温钨矿床相近,也暗示低温成矿流体中的 W 是来自深部花岗岩浆流体。但与高温钨矿床相比,低温金矿床特征成矿元素 As 和 Sb 在成矿流体中的含量明显偏高,这表明这些元素主要是由岩浆以外的其他源区提供的,这与汞同位素指示卡林型金矿床的 As 和 Sb 等成矿元素主要来自前寒武纪基底地层的结论一致。

3.5 二元结构成矿模式

根据以上证据,我们初步建立了华南低温成矿省湘中和右江两个矿集区上部低温矿、下部高温矿的垂向二元结构成矿模式(图8)。该模式认为,在印支和燕山期该区发育了大量地壳重熔成因的 S 型或高分异花岗岩,深部壳源花岗岩浆分异出的岩浆流体在下部形成了高温钨锡多金属矿床,而花岗岩的热和形成高温钨锡矿后的残余岩浆流体驱动大气成因地下水循环、浸取出前寒武纪基底地层中的成矿元素,则形成了上部的金、锑等低温矿床。

4 华南低温与高温两个成矿省是具有成因联系的整体

长期以来,由于空间上的分离,华南西部低温与东部高温两个成矿省通常被认为是相互独立的成矿体系。我们的研究显示,两者是具有密切成因联系

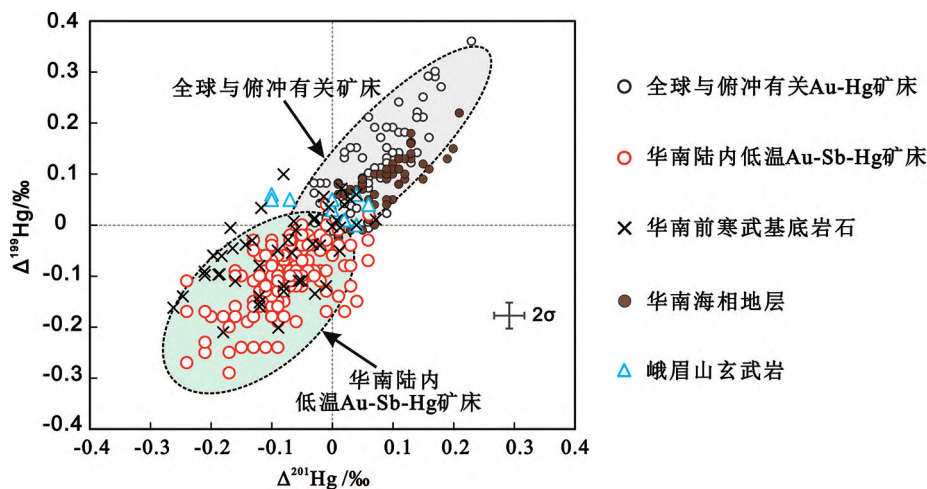


图6 华南低温成矿省金锑汞矿床 $\Delta^{201}\text{Hg} - \Delta^{199}\text{Hg}$ 关系图
(据文献^[48,52-54]修改)

Fig. 6 Plot of $\Delta^{201}\text{Hg}$ vs. $\Delta^{199}\text{Hg}$ for gold, antimony, and mercury deposits of low-temperature metallogenic province in South China. Modified from ^[48, 52-54].

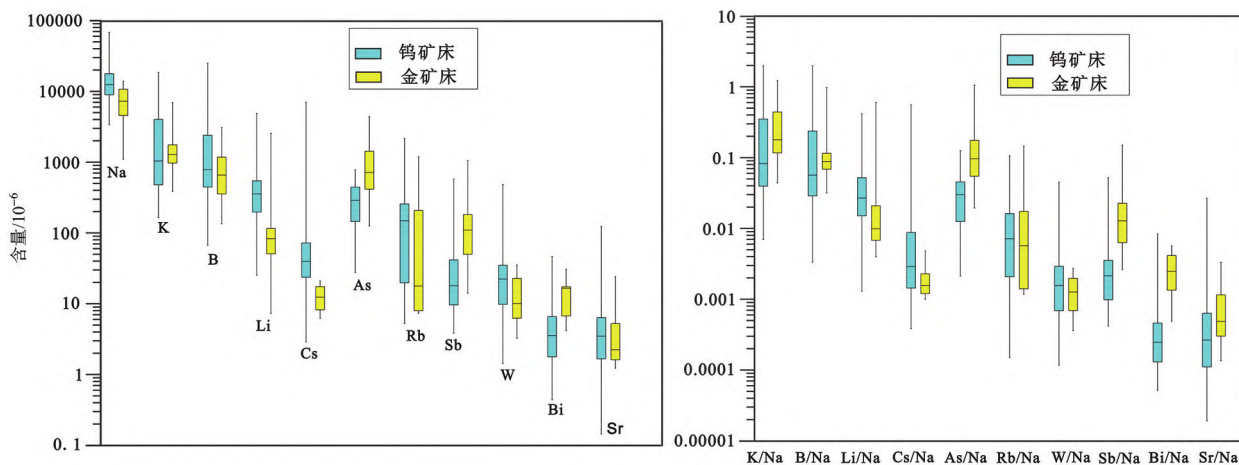


图7 低温金矿床与高温钨矿床成矿流体元素含量和元素/Na 比值对比图 (据文献[7])

Fig. 7 Comparison of elemental concentration and element/Na ratio in ore-forming fluids between low-temperature gold deposit and high-temperature tungsten deposit. Adapted from [7].

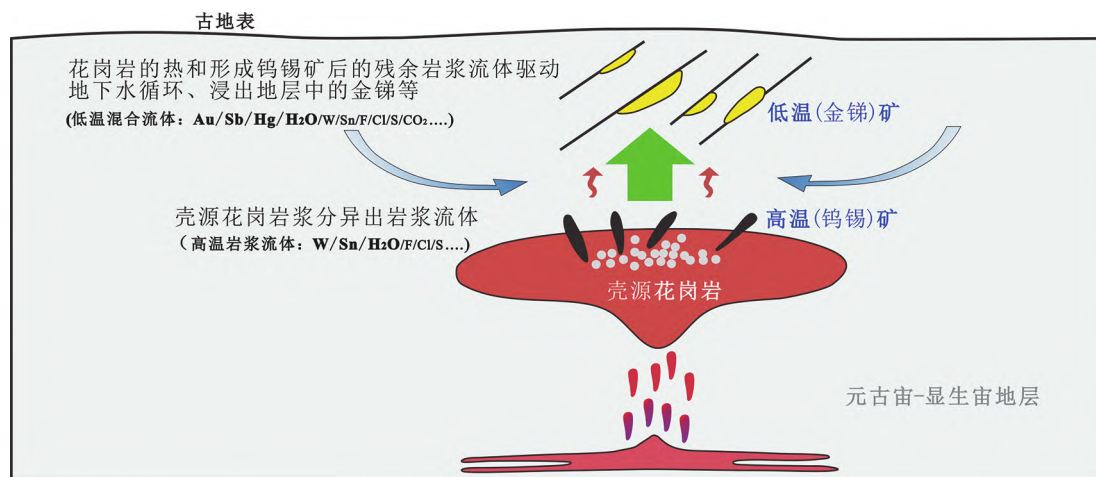


图8 低温成矿省右江和湘中矿集区上低温矿、下高温矿的垂向二元结构成矿模式

Fig. 8 Vertical binary model for upper low-temperature, lower high-temperature mineralization in the Youjiang and Xiangzhong ore clusters of low-temperature metallogenic province

的整体^[7,9,17]。

华南中生代以来的构造演化和岩浆活动,主要有与太平洋板块西向俯冲有关和与华北克拉通-华南陆块-印支地块碰撞有关两种模式^[13-14]。近年的研究显示,中生代以来华南构造格局的总体特点是挤压与伸展作用交替发生,230~200 Ma 的印支期以挤压为主,而 160~130 Ma 的燕山期则以岩石圈伸展减薄为主,可能分别反映了华南印支期后碰撞的陆内造山及其后软流圈上涌诱导的裂解作用^[13]。考虑到:(1)华南中生代尤其早中生代最强烈的构造变形、变质与岩浆活动发育区均不在华南大陆边缘,而与受 Greenville 和加里东造山事件影

响的先存岩石圈薄弱区范围^[12]大致一致,正是在这些区域发育了华南中生代低温成矿省(除川滇黔铅锌矿集区外)和高温成矿省;(2)这些区域远离活动大陆边缘,印支期和燕山期的相关花岗岩也通常缺乏弧岩浆的地球化学特征^[13-14]。因此,我们认为华南陆块中生代主要是受周缘远程应力作用影响,在陆内先存岩石圈薄弱区或“疤痕”区,发生了强烈的变形变质、岩浆活动和成矿作用。将前述华南中生代两期成矿事件置于华南大陆动力学演化格架中,分别对应于印支期陆内造山和燕山期软流圈上涌(图9)^[9]。

综上所述,华南西部低温成矿(230~200 Ma、

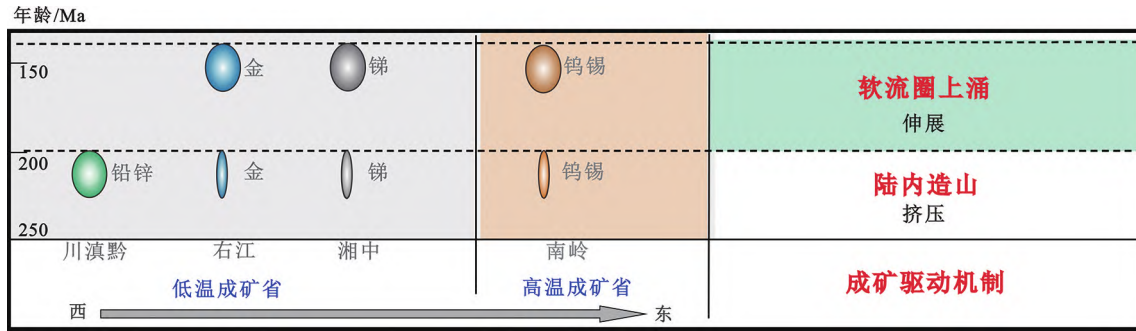


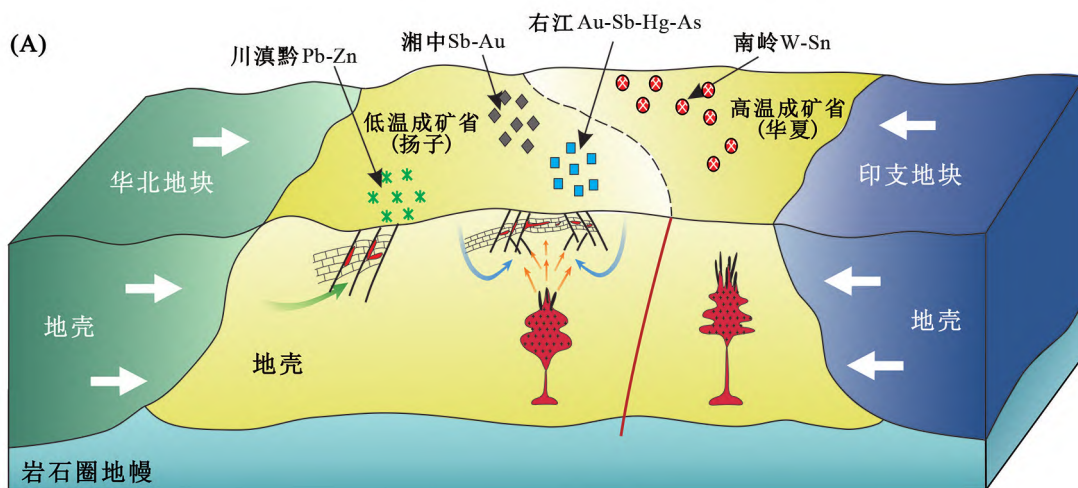
图9 华南中生代低温和高温成矿省成矿时代和动力学背景 (据文献[9]修改)

Fig. 9 Mineralization ages and dynamic setting of the Mesozoic low- and high-temperature metallogenetic provinces in South China. Modified after [9].

160~130 Ma)与东部高温成矿时代一致并显示类似的地球化学指纹,西部低温成矿省内紧邻东部高温成矿省的湘中和右江两个矿集区可能具有上部低温矿、下部高温矿的垂向二元结构成矿特征(图8)。研究发现,印支期由印支地块-华南陆块-华北地块碰撞后的陆内造山诱导,形成了3组矿床:一是花岗岩浆分异流体在南岭地区形成的高温钨锡多金属矿床;二是深部花岗岩浆活动在深部形成高温钨锡多金属矿床的同时,其热和残余岩浆流体驱动雨水循环、浸取出前寒武纪基底地层中的成矿元素在湘中和右江地区的近地表形成的低温金锑汞砷矿床;三是低温高盐度的盆地流体循环在川滇黔接壤区形成的低温铅锌矿床(图10A)。燕山期华南岩石圈拆沉减薄和软流圈上涌诱导的陆内深部花岗岩浆活动及其流体循环,则形成了华南高温钨锡和低温金锑等

的第二期大规模成矿(图10B)。显而易见,华南低温和高温两个成矿省是具有成因联系的整体,两者共同构成了长宽均大于1 000 km、呈面状展布的多金属巨型陆内成矿区,明显不同于板缘成矿体系矿床主要呈带状分布的特征。

低温热年代学研究表明,矿床形成后的中生代以来,华南由西向东抬升剥蚀强度显著增强,西部右江、中部湘中和东部南岭地区被剥蚀掉的盖层厚度分别约为1.5、3.5和5 km^[7],这种剥蚀程度的不同决定了华南近地表在西部分布低温矿床、东部分布高温矿床的空间格局(图11)。据此预测,低温成矿省东部靠近高温成矿省的右江金锑和湘中锑金两个低温矿集区的深部,极可能存在与花岗岩浆活动有关的高温钨锡多金属矿床,是未来深部找矿的新方向。



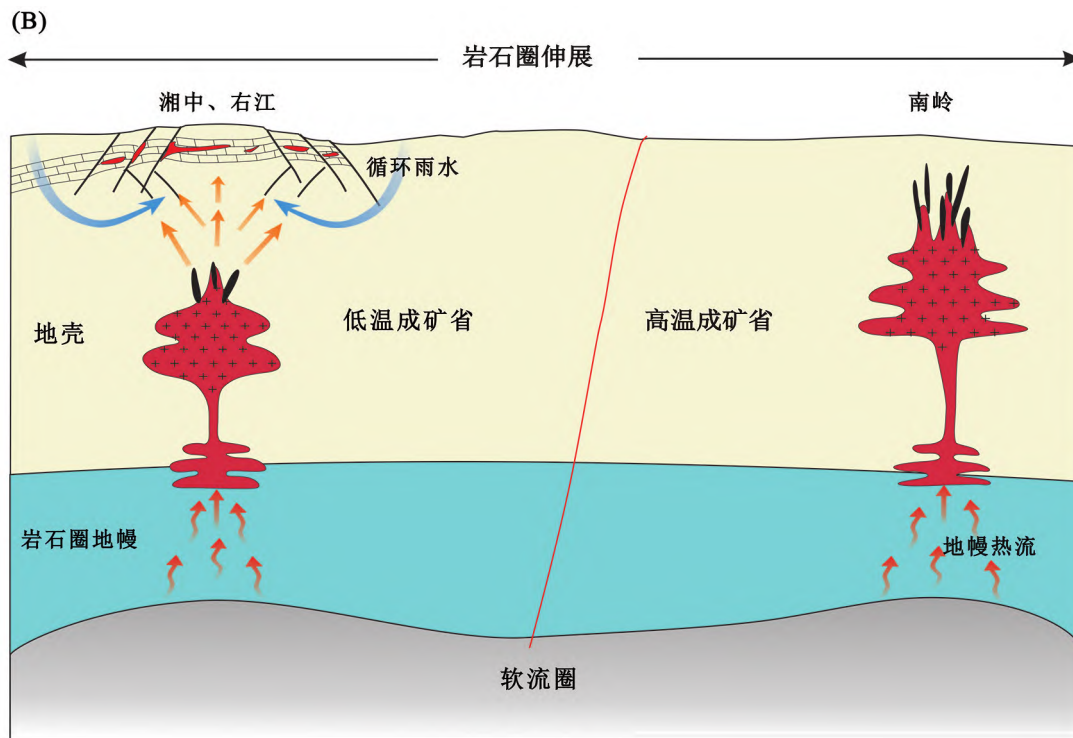


图 10 华南印支期(A)和燕山期(B)大规模成矿动力学模型 (据文献[7]修改)

Fig. 10 Metallogenic dynamic models for large-scale mineralization during the Indosinian (A) and Yanshanian (B) in South China. Modified after [7].

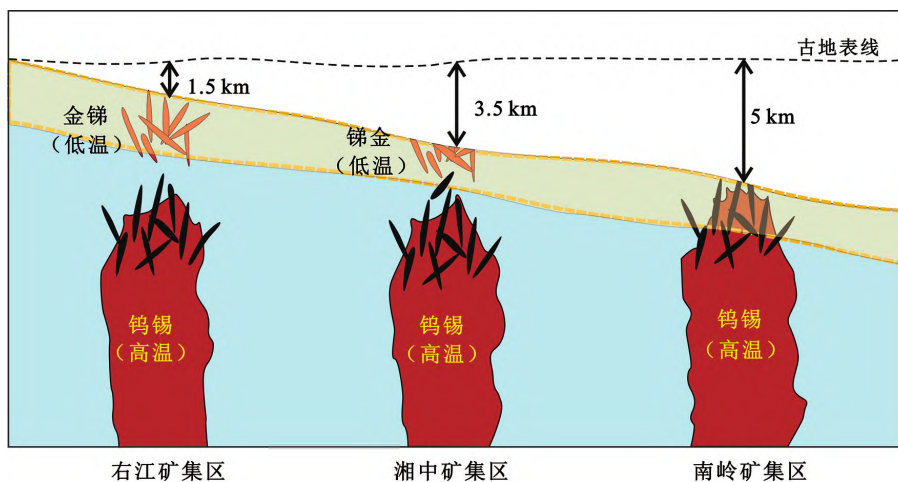


图 11 华南低温与高温成矿省的相互关系及其深部找矿预测图 (据文献[7]修改)

Fig. 11 Genetic relationship between the low- and high-temperature metallogenic provinces in South China and deep prospecting prediction. Modified after [7].

5 结论

(1) 由扬子和华夏地块组成的华南陆块中生代

成矿大爆发, 成矿作用远离活动大陆边缘, 形成西部金锑等的低温成矿省和东部钨锡多金属高温成矿省, 是全球研究陆内成矿的理想场所。

(2) 西部低温成矿 (230 ~ 200 Ma、160 ~

130 Ma)与东部高温成矿时代一致并显示类似的地球化学指纹,印支期陆内造山和燕山期软流圈上涌是其共有成矿驱动机制,两个成矿省是具有成因联系的整体,共同构成面状展布的巨型多金属陆内成矿区。

(3)成矿后华南自西向东逐渐增强的剥蚀程度,形成了目前近地表矿西部低温、东部高温的空间分布格局,低温成矿省东部右江和湘中两个矿集区的深部,极可能存在与花岗岩浆活动有关的高温钨锡多金属矿床,是未来深部找矿的新方向。

(4)华南陆内成矿体系定位于陆内岩石圈先存薄弱区、陆壳供给矿源、高低温矿床并重、成矿面状展布,明显不同于板块边缘成矿体系定位于板块边缘、地幔供给矿源、高温矿床主导、成矿带状展布的典型特征。

本文的前期研究得到众多前辈和同行的支持和帮助,不能一一列出,谨表谢忱和歉意。

参考文献

- [1] PIRAJNO F, ERNST R E, BORISENKO A S, et al. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35(2): 114-136.
- [2] NALDRETT A J. World-class Ni-Cu-(PGE) deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 227-240.
- [3] RICHARDS J P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere[J]. *Geology*, 2009, 37(3): 247-250.
- [4] SILLITOE R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3-41.
- [5] HOU Z Q, YANG Z M, LU Y J, et al. A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 2015, 43(3): 247-250.
- [6] GORCZYK W, VOGT K. Tectonics and melting in intracontinental settings[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(1): 196-208.
- [7] 胡瑞忠等. 华南大规模低温成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [8] ZHAO G C, CAWOOD P A. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 2015, 222/223: 1-12.
- [9] HU R Z, ZHOU M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: an introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 579-588.
- [10] MAO J W, CHENG Y B, CHEN M H, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267-294.
- [11] 胡瑞忠,毛景文,华仁民,等. 华南陆块陆内成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [12] XU Y J, CAWOOD P A, DU Y S. Intraplate orogenesis in response to Gondwana assembly: Kwangsi Orogeny, South China[J]. *American Journal of Science*, 2016, 316(4): 329-362.
- [13] WANG Y J, FAN W M, ZANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1273-1305.
- [14] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinent orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [15] NI P, WANG G G, LI W S, et al. A review of the Yanshanian ore-related felsic magmatism and tectonic settings in the Nanling W-Sn and Wuyi Au-Cu metallogenic belts, Cathaysia Block, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 133: 104088.
- [16] 靳晓野. 黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.
- [17] HU R Z, FU S L, HUANG Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: reviews and a new geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137: 9-34.
- [18] PI Q H, HU R Z, XIONG B, et al. In situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(8): 1179-1190.
- [19] GAO W, HU R Z, HOFSTRA A H, et al. Dating on hydrothermal rutile and monazite from the Badu gold deposit supports an Early Cretaceous age for Carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin, southwestern China[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(6): 1355-1385.
- [20] GAO W, HU R Z, HUANG Y, et al. Hydrothermal apatite as a robust U-Th-Pb chronometer for the Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2024, 59. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01196-6>.
- [21] GAO W, MEI L, HU R Z, et al. Age of Carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin, South China: constraint from hydrothermal zircon geochronology in the Badu dolerite-hosted gold deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 163: 105771.
- [22] 高伟,胡瑞忠,李秋立,等. 右江盆地卡林型金矿成矿年代学研究进展[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 267-283.
- [23] 中国科学院地球化学研究所. 华南花岗岩类地球化学及其成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [24] 南京大学地质系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系

- [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [25] HU R Z, BI X W, JIANG G H, et al. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, southeastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 623-632.
- [26] WEI W F, HU R Z, BI X W, et al. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi Province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 589-605.
- [27] ROMER R F, KRONER U. Phanerozoic tin and tungsten mineralization: tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. *Gondwana Research*, 2017, 31: 60-95.
- [28] SU W C, XIA B, ZHANG H T, et al. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(3/4): 667-679.
- [29] SU W C, HEINRICH C A, PETTKE T, et al. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(1): 73-93.
- [30] YAN J, HU R Z, LIU S, et al. NanoSIMS element mapping and sulfur isotope analysis of Au-bearing pyrite from Lannigou Carlin-type Au deposit in SW China: new insights into the origin and evolution of Au-bearing fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 29-41.
- [31] XIE Z J, XIA Y, CLINE J, et al. Magmatic origin for sediment-hosted Au deposits, Guizhou province, China: *in situ* chemistry and sulfur isotope composition of pyrites, Shuiyindong and Jinfeng deposits[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(7): 1625-1652.
- [32] LL J X, HU R Z, ZHAO C H, et al. Sulfur isotope and trace element compositions of pyrite determined by NanoSIMS and LA-ICP-MS: new constraints on the genesis of the Shuiyindong Carlin-like gold deposit in SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55: 1279-1298.
- [33] GAO W, HU R Z, MEI L, et al. Monitoring the evolution of sulfur isotope and metal concentrations across gold-bearing pyrite of Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 147: 104990.
- [34] TURNER G, BURNARD P G, FORD J L. Tracing fluid sources and interaction: discussion[J]. *Physical Sciences and Engineering*, 1993, 344(1670): 127-140.
- [35] 胡瑞忠, 毕献武, TURNER G, 等. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29(4): 321-330.
- [36] HU R Z, BURNARD P G, et al. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River – Jinshajiang fault belt, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 203(3/4): 305-317.
- [37] STUART F M, BURNARD P G, TAYLOR R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(22): 4663-4673.
- [38] BURNARD P G, HU R Z, TURNER G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10): 1595-1604.
- [39] HU R Z, BURNARD P G, BI X W, et al. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: evidence from He, Ar and C isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(1/2): 86-95.
- [40] JIN X Y, HOFSTRA A H, ANDREW G H, et al. Noble gases fingerprint the source and evolution of ore-forming fluids of Carlin-type gold deposits in the Golden Triangle, South China [J]. *Economic Geology*, 2020, 115(2): 455-469.
- [41] GROVES D I, ZHANG L, SANTOSH M. Subduction, mantle metasomatism, and gold: a dynamic and genetic conjunction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2020, 132(7/8): 1419-1426.
- [42] 胡瑞忠, 陈伟, 毕献武, 等. 扬子克拉通前寒武纪基底对中生代大面积低温成矿的制约[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 137-150.
- [43] ZHU J, ZHANG Z C, SANTOSH M, et al. Carlin-style gold province linked to the extinct E' meishan Plume[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115940.
- [44] BLUM J D, SHERMAN L S, JOHNSON M W. Mercury isotopes in earth and environmental sciences[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, 42: 249-269.
- [45] SHERMAN L S, BLUM J D, NORDSTROM D K, et al. Mercury isotopic composition of hydrothermal systems in the Yellowstone Plateau volcanic field and Guaymas Basin seafloor rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279(1/2): 86-96.
- [46] MOYNIER F, JACKSON M, ZHANG K, et al. The mercury isotopic composition of earth's mantle and the use of mass independently fractionated Hg to test for recycled crust[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 48(17): e2021GL094301.
- [47] GRASBY S E, THEM T R, CHEN Z H, et al. Mercury as a proxy for volcanic emissions in the geologic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 196: 102880.
- [48] DENG C Z, SUN G Y, RONG Y M, et al. Recycling of mercury from the atmosphere-ocean system into volcanic-arc-associated epithermal gold systems[J]. *Geology*, 2021, 49(3): 309-313.
- [49] YIN R S, CHEN D, PAN X, et al. Mantle Hg isotopic heterogeneity and evidence of oceanic Hg recycling into the mantle[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 948.

- [50] HU R Z, SU W C, BI X W, et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3/4): 378-392.
- [51] CLINE J S, HOFSTRA A H, MUNTEAN J L, et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models [M]//HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005: 451-484.
- [52] GAO W, HU R Z, WANF X Y, et al. Large-scale basement mobilization endows the giant Carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin, South China: insights from mercury isotopes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2023, 135(11/12): 3163-3172.
- [53] FU S L, HU R Z, YIN R S, et al. Mercury and *in situ* sulfur isotopes as constraints on the metal and sulfur sources for the world's largest Sb deposit at Xikuangshan, southern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55: 1353-1364.
- [54] DENG C Z, ZHANG J W, HU R Z, et al. Mercury isotope constraints on the genesis of Late Mesozoic Sb deposits in South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 65(2): 269-281.
- [55] 胡凯. 右江盆地卡林型金矿成矿流体性质与成矿模式研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.