

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.11.39

右江盆地卡林型金矿成矿年代学研究进展

高伟¹, 胡瑞忠^{1,4,*}, 李秋立^{2,4}, 刘建中³, 李献华^{2,4}

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. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029
3. 贵州省地质矿产开发局, 贵州 贵阳 550081
4. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

GAO Wei¹, HU Ruizhong^{1,4,*}, LI Qiuli^{2,4}, LIU Jianzhong³, LI Xianhua^{2,4}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550018, China
4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

GAO Wei, HU Ruizhong, LI Qiuli, et al. Research advances on the geochronology of Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin, southwestern China. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 267-283

Abstract: The Youjiang Basin hosts the world's second largest Carlin-type gold province after Nevada, USA. However, due partly to the uncertainty of their mineralization age the geodynamic setting of the Carlin-type gold deposits remains unclear. During the past forty years significant efforts have been made to accurately constrain the timing of these gold deposits, ranging from the early dating methods (with low reliability) such as quartz fission track and fluid inclusion Rb-Sr isochron dating, to the midterm dissolution-based bulk analyses of mineral separates such as sulfide Re-Os, to the latest in-situ precise U-Pb dating of hydrothermal U-bearing minerals including rutile, monazite, and apatite. It has now been clearly considered that there existed two episodes of Carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin ca. 215 – 200 Ma and 155 – 140 Ma, probably in response, respectively, to the Indosinian post-collisional intracontinental orogeny and the Yanshanian asthenospheric upwelling and lithospheric extension in southern China.

Keywords: the Youjiang Basin; Carlin-type gold deposit; mineralization age; Indosinian and Yanshanian episodes of gold mineralization

摘要: 右江盆地是全球仅次于美国内华达地区的第二大卡林型金矿床集中分布区。由于成矿时代的不确定性,盆地内卡林型金矿床的成矿动力学背景一直不清。为准确确定这些金矿床的成矿时代,近四十年来国内外矿床学家进行了孜孜不倦的探索,从早期以石英裂变径迹和流体包裹体 Rb-Sr 等时线法为代表的定年,到中期以硫化物 Re-Os 等时线法为代表的单矿物溶样法定年,再到最新以热液金红石、独居石和磷灰石 U-Th-Pb 法为代表的微区原位定年,其定年对象和方法见证了同位素地质年代学的发展历程。现已基本明确,右江盆地主要发育两期卡林型金矿成矿作用,分别为 215~200 Ma 和 155~140 Ma,相当于印支期和燕山期,其动力学背景分别对应于印支-华南-华北地块碰撞后的印支期陆内造山过程以及燕山期软流圈上涌诱发的岩石圈伸展作用。

关键词: 右江盆地;卡林型金矿;成矿时代;印支期和燕山期成矿

中图分类号: P618.51;P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2024)01-0267-17

收稿日期:2023-07-25;修回日期:2023-10-13

基金项目:科学技术部国家重点研发计划项目“面向矿床学研究的变革性原位分析新技术(2018YFA0702605)”;国家自然科学基金项目(42103067, U1812402,41830432)

作者简介:高伟(1989—),男,副研究员,主要从事矿床学研究。E-mail: gaowei@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介:胡瑞忠(1958—),男,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@mail.gyig.ac.cn

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

0 引言

卡林型金矿也称微细浸染型金矿,因最初发现于美国内华达州的卡林镇而得名^[1],是全球最重要的热液金矿床类型之一^[2-4]。严格地说,卡林型金矿是一种描述性定义,一般指矿体主要产于钙质沉积岩建造的断裂构造中、围岩富含 Fe 碳酸盐矿物、成矿主要与脱碳酸盐化、硅化、泥化和硫化等低温热液蚀变相关、金呈微细粒不可见形式赋存于黄铁矿的含砷环带内、Au 通常与 As-Sb-Hg-Tl 等元素共/伴生、矿石贱金属含量较低且具有高 Au/Ag 比、形成于低温低盐度流体的热液交代矿床^[2-6]。目前,内华达州已探明卡林型金矿的金储量近 8 000 t,是世界上的第二大金矿集区,金年产量占全球总量的 6%^[4]。我国扬子地块西南缘的右江盆地内金矿床广泛分布,这些金矿床呈带状分布于盆地内的深大断裂带附近,具有与内华达卡林型金矿十分相似的成矿特征^[2-3,7-9],探明金储量近 1 000 t,并显示出巨大的找矿潜力^[10-11],使得右江盆地成为全球仅次于美国内华达地区的第二大卡林型金矿床集中分布区^[3,6-7]。近年来,虽然在全球其他地区也相继有卡林或类卡林型金矿床的报道,如加拿大 Yukon、伊朗 Takab 和马来西亚 Bau 等,但具有确定成因属性且能成规模产出的矿集区目前仅见于上述两个区域^[4,6,9]。因此,什么条件下才能形成具有规模的卡林型金矿集中区,是一个独具特色的全球性科学问题。

近年来,国内外学者对右江盆地的卡林型金矿床开展了详细的地层学、构造地质学、矿床地质特征、矿体蚀变特征、矿石结构构造、成矿元素组合、流体包裹体、成矿流体来源、Au 沉淀过程和机制等研究,已取得重大进展^[3,7,12]。然而,右江盆地卡林型金矿的成矿动力学背景却一直得不到很好解决,这严重制约了矿床成因模型的建立以及对这一关键区带成矿作用的深入认识。成矿时代的准确确定是成矿动力学背景研究的重要基础^[13],但卡林型金矿特殊的矿物学特点(下述)使得精确约束其成矿年龄比较困难^[3,5,14]。自 20 世纪 80 年代以来,研究者们采用了大量测试方法试图约束右江盆地卡林型金矿的成矿时代,其定年选取的对象和方法见证了同位素地质年代学的发展历程^[15]。本文回顾并梳理了近四十年来右江盆地卡林型金矿床成矿年代学研究取

得的长足进步,并简要剖析了定年对象和方法的可靠性,结果显示右江盆地主要发育 2 期卡林型金矿成矿作用,分别为 215~200 Ma 和 155~140 Ma,相当于印支期和燕山期。

1 地质背景

华南陆块由扬子地块和华夏地块在新元古代沿江南造山带碰撞拼贴而成^[16],在印支期分别通过秦岭—大别造山带和哀牢山—松马缝合带与华北地块和印支地块相连接。华南陆块以中生代成矿大爆发而闻名于世,主要形成了在华夏和扬子东侧与花岗质岩浆活动有关的高温 W-Sn 多金属成矿省,以及在扬子地块西南部的大面积低温成矿省(图 1a)^[3,17]。右江盆地卡林型金矿床集中分布区是华南大面积低温成矿省的主要组成部分之一^[3]。

右江盆地为在前寒武纪基底之上、于早古生代形成的菱形盆地,其北西和北东向分别被弥勒—师宗断裂和紫云—都安断裂围限,南西和南东向分别以红河断裂和凭祥断裂为界,南边则与越北板块相邻^[3](图 1b)。盆地的演化经历了华南被动大陆边缘裂谷盆地(D₁—P₁)、弧后盆地(P₂—T₁)和前陆盆地(T₂—T₃)3 个发展阶段,分别对应于其南边古特提斯洋的裂开、俯冲和闭合^[18-23]。中—晚三叠世的华南陆块和印支地块碰撞在盆地内形成一系列 NW 或 NWW 向的褶皱和相关断裂,其变形强度和卷入地层在空间上朝 NNE 向递进减弱和变年轻^[22,24]。中—晚侏罗世,古太平洋板块俯冲到华南板块之下所产生的挤压作用在盆地内形成一系列叠加到印支期 NWW 向构造之上的 NE 向逆断层和断层牵引褶皱^[22,24]。

盆地内覆盖有巨厚的显生宙海相沉积岩,主要出露二叠系和三叠系地层,岩性包括灰岩、粉砂岩、砂岩和泥岩。研究表明,这些地层仅在中三叠世经历非常低级的埋藏变质作用^[25-26]。盆地内的岩浆岩以与峨眉山幔柱有关的玄武岩和辉绿岩为主^[27-28]。此外,盆地西北缘的贞丰—镇宁一带和中部的凌云—巴马一带分别零星出露 84 Ma 的超基性岩脉和 100~94 Ma 的酸性岩脉^[29-30];盆地南缘的富宁—那坡一带和南宁地区分别出露 230~200 Ma 的基性岩和 159 Ma 的高镁安山岩^[31-32]。

右江盆地内部及东北边缘集中产出了大量主要

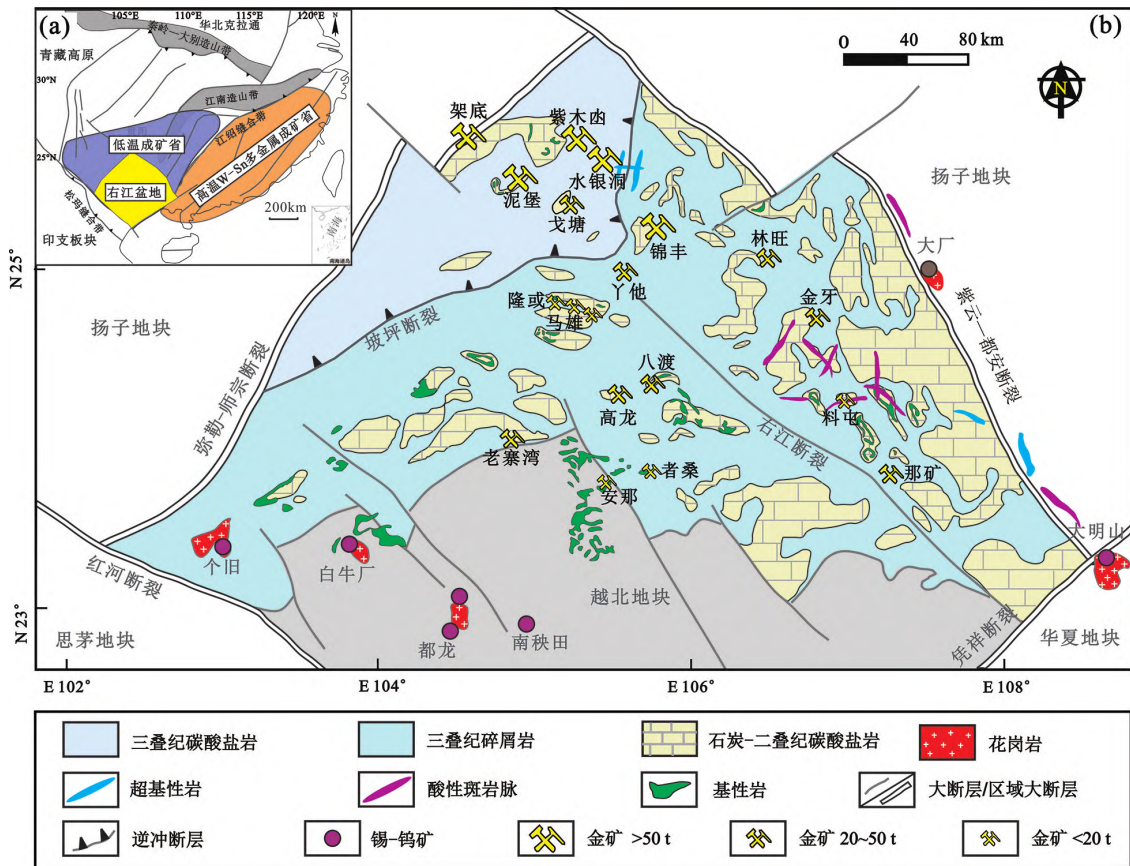


图1 华南板块及邻区地质简图(a)和右江盆地地质简图(b)
(据文献[3]修改)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the South China Block and adjacent regions (a) and geologic map of the Youjiang Basin (b). Modified from [3].

形成于 200~250 °C 以下的低温热液金、砷、锑、汞矿床^[3](图 1b), 并以卡林型金矿床最为重要。目前, 区内发现卡林型金矿床(点) 200 余处, 探明金储量近 1 000 t, 是世界第二大卡林型金矿床聚集区^[10-11]。这些金矿床成群、成簇沿区域断裂分布, 矿化受岩性和构造双重控制, 赋矿地层和容矿岩石具有多样性。其中, 盆地西北缘台地相碳酸盐岩中的金矿床主要赋存于上二叠统龙潭组生物碎屑灰岩地层以及龙潭组与下伏茅口组灰岩之间的构造蚀变体内, 如水银洞(295 t)、紫木函(75 t)和泥堡(70 t)金矿床等; 盆地东南缘盆地相碎屑岩中的金矿床主要赋存于中三叠统边阳组或百逢组钙质粉砂岩和泥岩地层中, 如锦丰(106 t)、金牙(>30 t)和高龙(>30 t)金矿床等; 盆地西北缘和南缘有一些金矿床赋存于蚀变玄武岩或辉绿岩内, 如架底(57 t)、八渡(35 t)和者桑(20 t)金矿床等。尽管这些金矿床在控矿构造和赋矿岩性上存在差异, 但其矿物组合、围岩蚀变、矿石结构、成矿条件等方面具有与美国内

华达卡林型金矿十分相似的特征^[3,7]。

2 卡林型金矿特殊的矿物学特征

卡林型金矿床通常赋存于生物碎屑灰岩或钙质细碎屑岩中, 围岩以富含铁碳酸盐矿物为特征(图 2a)。典型的金矿石具有星散浸染状构造, 强烈的流体-围岩相互作用是金矿化的主要机制^[5,7], 具体过程为:(1)成矿阶段的低温、低盐度酸性含金流体渗入地层, 溶解和交代含铁碳酸盐矿物(脱碳酸盐化, 图 2b); (2)碳酸盐矿物溶解释放的 Fe 使流体中的 Au-S 络合物失稳, 形成含金黄铁矿(硫化), 并伴随着碧玉石英沉淀(硅化, 图 2c), 碧玉石英中常包裹有残留的碳酸盐矿物包裹体(图 2c), 此外, 成矿流体中带入的 K 或围岩中的碎屑云母遭受蚀变, 形成热液伊利石或绢云母(泥化); (3)成矿晚阶段, 随着体系温度降低, 流体中的 As、Sb 和 Hg 等元素沉淀为雄黄、雌黄和辉锑矿等矿物充填于裂隙或开放

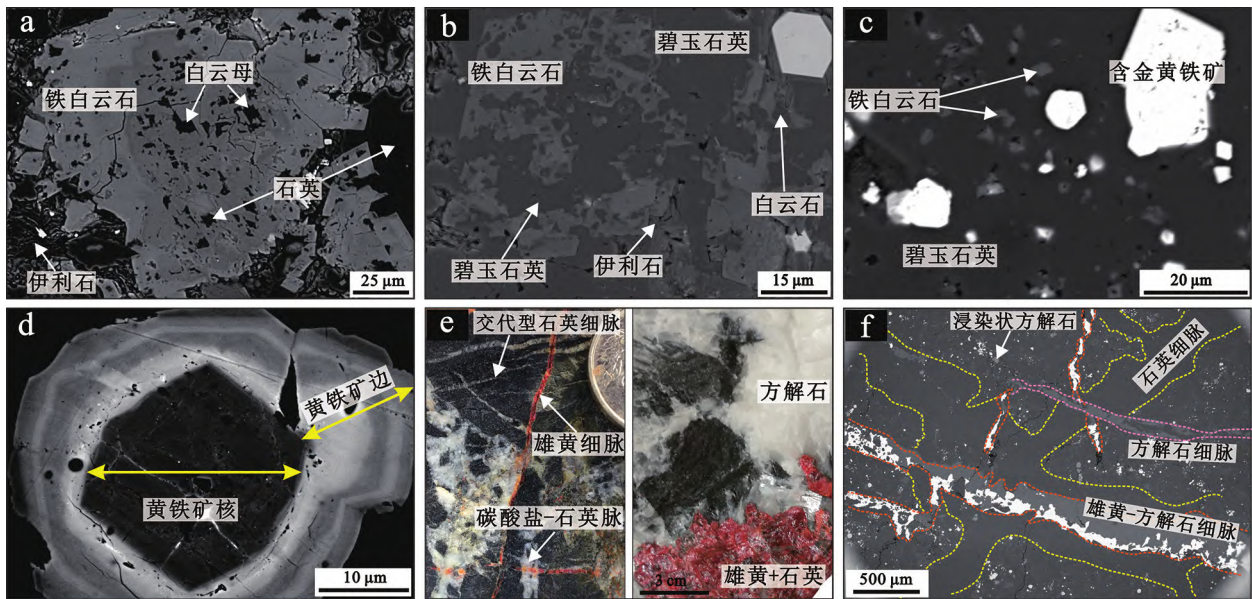


图2 右江盆地卡林型金矿床的矿物学特征

Fig. 2 Mineralogical characteristics of Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin

空间内(图 2e);(4)脱碳酸盐化释放进入流体中的 CaO 和 MgO 沉淀为最晚期的方解石或白云石脉(图 2f),标志着成矿作用的结束。

卡林型金矿具有特殊的矿物学特征,主要包括:(1)载金矿物黄铁矿颗粒细小,常为微米级且发育核-边结构(图 2d),核部黄铁矿常形成于金成矿前的成岩期或早期热液阶段,仅边部富 As 黄铁矿环带与热液金成矿有关,是金成矿期热液的产物^[33-36];(2)蚀变矿物细小且简单,难以高纯度挑选单矿物,不易排除成岩期相同矿物的影响,如绢云母或伊利石常为热液成因、碎屑成因和自生成因的混合物^[14,37](图 2a,b);(3)脉石矿物主要为石英和方解石,常具有多阶段成因^[38-39](图 2f),较难准确识别哪一期石英或方解石与金成矿真正相关^[9]。因此,卡林型金矿的矿石中通常缺少适合传统放射性同位素定年的矿物,给这些矿床的精确定年带来了极大难度^[3,5,14]。

3 内华达卡林型金矿成矿年代学研究进展

早期研究者曾用多种同位素定年方法来确定内华达卡林型金矿的成矿时代,但所获得的结果变化范围较大,为 152~35 Ma(图 3)^[40]。其中,绢云母或伊利石 K-Ar 或 Ar-Ar 法是最为普遍采用的测年方法。但由于很难分选出纯净的成矿期热液绢云母

或伊利石,而卡林型金矿成矿流体的温度和持续时间难以完全重置早期黏土矿物的 K-Ar 或 Ar-Ar 体系,因此所获得的年龄很难准确代表金的成矿时代,更可能记录的是 Au 成矿前的热事件或混合年龄^[14,37,41]。锆石、磷灰石裂变径迹和 U-Th/He 等热年代学方法也被用于间接确定成矿年龄,但获得的结果变化也较大^[37,41](图 3)。直到 1997 年,有学者发现一些卡林型金矿床中存在少量 Rb 含量较高并占据晶格位置的硫铈铀矿和 K 含量较高的冰长石,它们是金成矿阶段形成的热液成因矿物,分别适于 Rb-Sr 等时线法和⁴⁰Ar-³⁹Ar 法定年。研究者们主要采用这两种方法将内华达卡林型金矿的成矿时代较精确地约束到 42~36 Ma 的狭窄范围内^[14,37,42-45]。该年龄与内华达地区古近纪岩石圈伸展背景下形成的花岗岩浆活动时代一致^[5,46]。这些研究揭示,内华达卡林型金矿形成于区域构造由挤压向伸展转变阶段,是该时期的花岗岩浆活动驱动成矿流体循环而导致成矿的^[5,46-47]。

4 右江盆地卡林型金矿成矿年代学研究进展

与内华达卡林型金矿床相似,前人也尝试了很多方法以试图确定右江盆地卡林型金矿床的成矿时代。遗憾的是,右江盆地与美国内华达的卡林型金矿不同,其中一直未发现可用于 Rb-Sr 和⁴⁰Ar-³⁹Ar

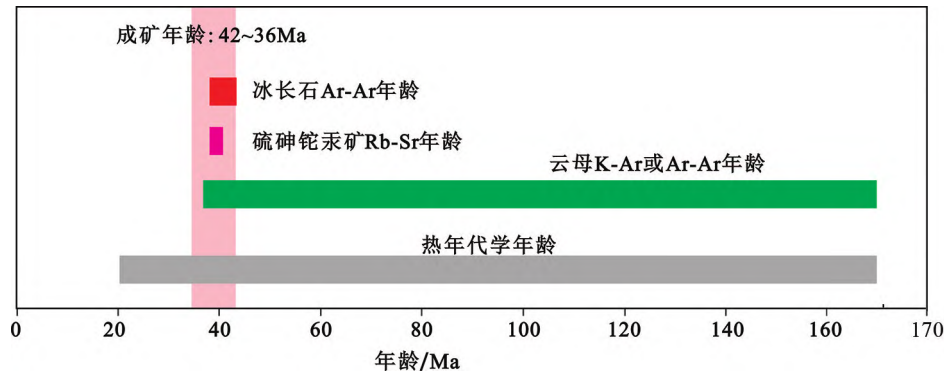


图3 美国内华达卡林型金矿床成矿时代研究结果
(据文献[40]修改)

Fig. 3 Summary of dating results for Carlin-type gold deposits in Nevada, USA. Modified from [40].

精确定年的硫砷铀矿和冰长石。根据定年所选取的矿物和测试方法的不同,右江盆地卡林型金矿成矿时代的研究历程,大致可划分为3个阶段。

4.1 第一阶段(2007年以前)

受限于分析技术,这一时期的研究者们使用的方法主要有石英裂变径迹法^[48-49]、石英电子自旋共振法^[50-52]、流体包裹体或单矿物 Rb-Sr 法^[53-58]、绢云母 K-Ar 法^[56,59]、硫化物 Pb 模式年龄法^[56,60-62]等,这些方法获得的年龄跨度极大,为 275~46 Ma (图 4)^[63]。例如,胡瑞忠等^[56]用 K-Ar 法测得桂西北世加金矿床新鲜辉绿岩脉的年龄为 140 Ma,该金矿床的矿体切穿辉绿岩脉,因此判断成矿年龄应小于 140 Ma。张峰等^[48]和罗孝桓等^[49]用石英裂变径迹法测得百地和丫他金矿床的年龄分别为(87.6±6.1)~(82.9±6.3) Ma 和 100 Ma。朱赖民等^[50]用石英电子自旋共振法获得烂泥沟和丫他金矿床的年龄分别为 55.4 Ma 和 63.4 Ma,但胡瑞忠等^[56]和苏文超等^[57]用石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线法测得烂泥沟金矿床的年龄分别为(259±27) Ma 和 106 Ma。王国田^[55]用含砷黄铁矿中的流体包裹体和热液蚀变绢云母进行 Rb-Sr 等时线定年,获得金牙金矿的年龄分别为(267±28) Ma 和(206±12) Ma,而李泽琴等^[62]根据黄铁矿的 Pb 模式年龄却获得金牙金矿床的年龄为 130~82 Ma。

从上述定年结果可以看出,同一方法在不同矿床或不同方法在同一矿床均可获得很不一致的年龄。对这些方法进行审视:(1)石英铀含量通常极低,所产生的自发裂变径迹密度很低,且其中大量流体包裹体的存在将导致石英中铀的分布极不均匀,对年龄的可靠性将产生较大影响,因而往往不适用

于裂变径迹分析^[64];(2)石英电子自旋共振法是一种第四纪定年方法,很难适于较老地质体的定年;(3)石英中常发育原生、假次生和次生流体包裹体,最近的研究表明原生和次生流体包裹体可能形成于完全独立的热液活动^[65],且流体包裹体中的 Rb、Sr 含量通常较低,通常较难给出有意义的定年结果^[33];(4)Pb 模式年龄法需要人为假定硫化物结晶时的初始 Pb 同位素组成,具有很大不确定性。因此,上述方法在后期研究中基本被剔除。

4.2 第二阶段(2007年以后的单矿物溶样法定年)

随着分析测试手段的进步,这一时期的研究者们采用新的测试方法获得了一批新的年龄数据(图 5)^[63,66-75],主要包括硫化物 Re-Os 法^[66-68]、绢云母或伊利石⁴⁰Ar-³⁹Ar 法^[69-71]、方解石 Sm-Nd 法^[63,72-74]等,分述如下。

含砷黄铁矿或毒砂是右江盆地卡林型金矿床中最重要的载金矿物,理论上其形成年龄能直接代表金成矿时代。陈懋弘等^[66]和 Chen 等^[67]获得烂泥沟金矿床中黄铁矿和毒砂的 Re-Os 等时线年龄分别为(193±13) Ma(MSWD=9.4)和(204±19) Ma(MSWD=24),对应的初始 Os 同位素组成值为 1.127 和 0.85,该年龄与绢云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄一致^[69];Chen 等^[67]获得水银洞和金牙金矿床中毒砂的 Re-Os 等时线年龄为(235±33) Ma 和(206±22) Ma,对应的初始 Os 同位素组成值为 0.51 和 0.83;Ge 等^[68]获得丫他金矿床黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为(233±42) Ma(MSWD=59),对应的初始 Os 同位素组成值为 0.59。

如果能够有效避免沉积岩中碎屑或自生黏土矿物的混染,挑选出与金矿化有关的纯净热液绢云母

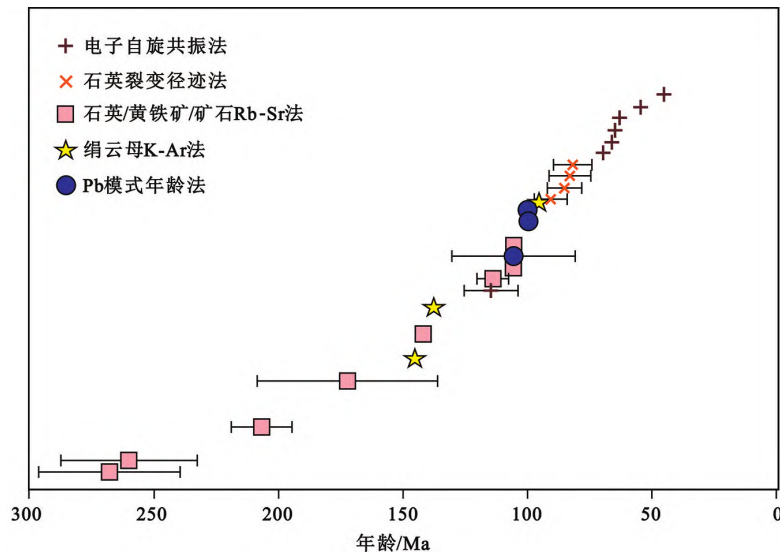


图4 右江盆地卡林型金矿床2007年以前的成矿时代研究结果 (据文献[63]修改)

Fig. 4 Summary of dating results before 2007 for the Youjiang Carlin-type gold deposits. Modified from [63].

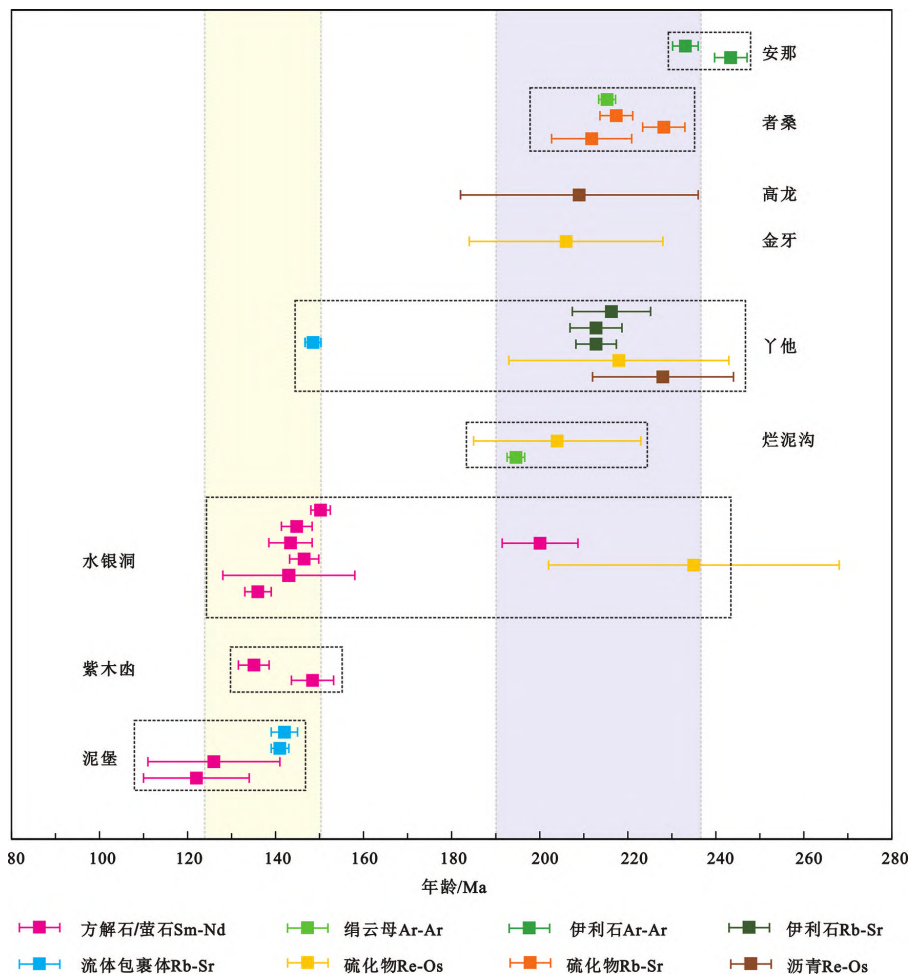


图5 右江盆地卡林型金矿床2007年以后采用单矿物溶样法获得的成矿时代 (据文献[63,66-75]总结)

Fig. 5 Age constraints obtained after 2007 on the Youjiang Carlin-type gold deposits by bulk analyses of mineral separates (data from [63,66-75])

或伊利石,理论上其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可以代表金成矿时代^[14]。右江盆地内有一些金矿床赋存于蚀变辉绿岩中,如者桑和安那等,规避了沉积成岩作用的影响,岩相学观察显示金成矿过程中岩浆成因斜长石受热液流体交代蚀变为绢云母或伊利石^[7],为确定金成矿时代提供了契机。基于此,皮桥辉等^[70]获得者桑金矿床热液绢云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (215.3 ± 1.9) Ma,董文斗^[71]获得安那金矿床伊利石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (243.4 ± 3.7) Ma和 (233.1 ± 2.9) Ma。

卡林型金矿成矿过程中强烈的脱碳酸盐化常在成矿晚阶段形成方解石或白云石脉,其形成年龄理论上也可代表金成矿时代。研究表明,这种与成矿有关的方解石常具有MREE富集的“帽子型”配分型式,明显区别于矿区外围与成矿无关的方解石^[72]。基于此,Su等^[72]和靳晓野^[63]获得水银洞金矿床中与雄黄共生方解石或白云石的Sm-Nd等时线年龄为 $(146.5 \pm 3.3) \sim (134 \pm 3)$ Ma,该年龄与紫木函 (148 ± 5) Ma^[73]和泥堡 $(126 \pm 15) \sim (122 \pm 12)$ Ma^[63]金矿床方解石或萤石Sm-Nd等时线年龄一致;Tan等^[74]获得水银洞金矿中与雄黄共生方解石以及与金成矿无明显空间关系的萤石的Sm-Nd等时线年龄分别为 (150.2 ± 2.2) Ma和 (200.1 ± 8.6) Ma,认为前者代表金成矿时代,后者记录了印支期的低温热液活动。

从上述年龄结果可以看出,硫化物Re-Os和黏土矿物 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄集中于240~200 Ma,方解石Sm-Nd年龄主要集中于150~120 Ma,似乎暗示右江盆地可能发育两期成矿作用。其中,印支期主要形成卡林型金矿,燕山期主要形成晚期的Sb-Hg矿化,这意味着Au和Sb-Hg矿化属于两个独立的成矿系统。然而,这与卡林型金矿床的成矿地质特征不符,流体包裹体和大量的元素-同位素数据也表明Au和Sb-Hg矿化形成于单一演化的热液流体系统^[76-78]。此外,上述年龄数据均采用单矿物溶样法获得,因存在一些固有问题,其可靠性受到质疑。以硫化物Re-Os定年为例:(1)黄铁矿常发育核-边结构,核部黄铁矿形成于金成矿前的成岩期或早期热液阶段,仅边部狭窄的含砷环带与卡林型金矿化有关,二者具有显著差异的元素和同位素组成^[9,35-36,79],基于单矿物溶样的测试方法很难排除核部黄铁矿对年龄结果影响;(2)低温矿床硫化物中的Re-Os含量常较低,如烂泥沟和金牙金矿床中毒

砂的Re含量仅为 $0.007 \times 10^{-9} \sim 0.2 \times 10^{-9}$ ^[67],较难获得精确可靠的等时线年龄^[14,37];(3)硫化物中常包裹有机质,其Re、Os含量远高于硫化物寄主,可能对硫化物定年结果产生严重影响^[80]。这些因素综合导致了前人所获得的Re-Os等时线年龄误差较大且具有差异的初始Os同位素组成。辉绿岩矿体中绢云母和伊利石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年情况如下:(1)岩相学观察显示,岩浆成因斜长石常具有较脏的表面,显示成矿前已遭受蚀变形成微细的黏土矿物^[81],需要评估其对定年结果的影响;(2)矿物颗粒较细小,形成后可能存在Ar丢失或测试过程中会存在反冲效应^[14];(3)伊利石未获得较好质量的坪年龄,其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄偏老^[71]。方解石Sm-Nd定年情况如下:(1)方解石与含金硫化物缺乏直接的共生关系;(2)研究表明手标本尺度上产状相同的方解石在显微尺度上可能会具有多阶段生长特征^[39,82],最新的原位U-Pb定年结果显示其结晶年龄差异较大(下述),很难准确判定哪一期方解石与金成矿真正相关。

因此,上述两组年龄中哪一期才能可靠地代表卡林型金矿的成矿时代,又或者两期成矿年龄在空间上的分布格架是什么^[7,83-84],尚未得到清晰认识。相较而言,者桑金矿床的绢云母获得很好的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄,可以较可靠地代表金成矿时代,表明该矿床形成于印支期^[70]。然而,右江盆地内的众多(>90%)卡林型金矿床主要赋存于沉积岩中,他们是否具有与者桑金矿床一致的成矿年龄需要更多的年代学工作揭示。

4.3 第三阶段(热液副矿物微区原位U-Th-Pb定年)

近年来,得益于微区原位分析技术的飞速发展,以二次离子质谱(SIMS)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)为代表的微区原位定年技术被广泛用于确定矿床形成时代^[15]。这些技术因具有较高的空间分辨率,可在薄片或单矿物靶尺度上精准定位所需定年的热液矿物或矿物生长环带,避免了以往基于单矿物溶样整体分析方法所带来的弊端。另一方面,研究者们通过系统的岩相学工作发现,右江盆地一些卡林型金矿床中实际上存在一些适合定年的微细(常为微米级)副矿物,如金红石^[81,85]、独居石^[81]、磷灰石^[86-89]和热液锆石^[90]等。通过对这些微细矿物的热液成因属性及其与金成矿关系的系统辨识,发现这些微细矿物具有如下特征

(图6)^[81,89-90]:(1)仅产于强烈热液蚀变的矿体中;(2)与成矿阶段的含金黄铁矿和热液蚀变矿物密切共生、相互包裹(图6a-d),然后被成矿晚阶段的雄黄、雌黄和辉锑矿等矿物穿切(图6e);(3)发育原生的两相流体包裹体(图6f),与成矿阶段碧玉石英或交代石英细脉中的流体包裹体特征一致;(4)具有热液成因属性的化学组成。例如,金红石富W、Fe、V、Cr和Nb,与全球报道的热液金红石一致^[81,85];磷灰石呈MREE富集的“帽子型”配分型式,与卡林型金矿床中成矿相关的热液方解石一致^[86-89];热液锆石具有较高的LREE含量和相对平坦的REE元素配分型式,明显区别于岩浆锆石,但与全球报道的热液锆石特征一致^[90]。

上述矿物学和矿物化学工作表明,这些微细副矿物为热液成因并与金矿同时形成,其结晶年龄可以代表金成矿时代(图7)。这些副矿物含有几个到几百mg/kg的晶格U和Th,适合开展微区原位U-Th-Pb定年,这为精确确定右江盆地卡林型金矿成矿时代提供了新的契机。Pi等^[85]和Gao等^[81]获得盆地内赋存于蚀变辉绿岩中的者桑和八渡金矿床中热液金红石的SIMS U-Pb年龄分别为(213.6±5.4)Ma和(141.8±5.7)Ma,且八渡金矿床热液金红石年龄与热液独居石和热液锆石的SIMS

U-Th-Pb年龄高度一致((143.5±1.4)Ma和(139.5±3.0)Ma)^[81,90];Chen等^[86]、Lin等^[87]、Ji等^[88]和Gao等^[89]等对盆地内赋存于沉积岩中的泥堡、高龙、明山、水银洞、紫木函、烂泥沟、林旺和金牙等金矿床中的热液磷灰石开展LA-ICP-MS或SIMS定年,发现其U-Th-Pb年龄集中于155~140Ma。

除上述热液含U副矿物外,Jin等^[39]采用最新发展起来的LA-ICP-MS碳酸盐矿物微区原位U-Pb定年技术对水银洞金矿床不同产状的方解石开展了定年研究,获得(204.3±2.0)~(202.6±2.5)Ma、(191.9±2.2)Ma、(139.3±5.7)~(137.1±9.7)Ma 3期年龄,认为水银洞金矿化形成于晚三叠世,并受晚侏罗到早白垩世与Sb-Hg矿化有关的热事件叠加。黄勇^[91]获得水银洞金矿床中与雄黄和辉锑矿共生方解石的U-Pb年龄为(144±19)Ma和(45.5±0.8)Ma,烂泥沟矿床中与雄黄共生方解石的U-Pb年龄为(128.1±4.6)Ma;Ge等^[82]对其矿区不同产状的方解石LA-ICP-MS原位U-Pb定年结果也揭示了多期流体活动事件,分别为(253±27)Ma、(236.6±5.6)Ma、(229.1±6.7)Ma、(121.0±1.0)Ma、(113.7±3.0)Ma和(107.5±3.3)Ma。这些结果表明,右江盆地卡林

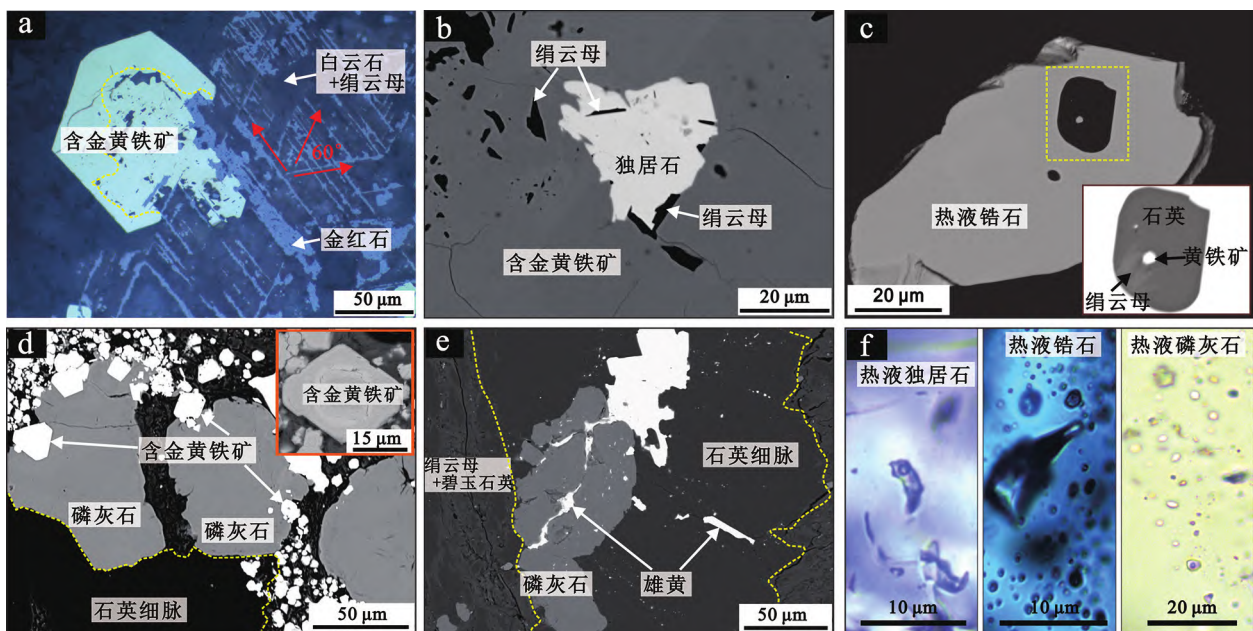


图6 右江盆地卡林型金矿床中的热液金红石(a)、独居石(b)、锆石(c)和磷灰石(d,e)
(据文献[81,89-90]修改)

Fig. 6 Hydrothermal rutile (a), monazite (b), zircon (c), and apatite (d, e) from the Youjiang Carlin-type gold deposits. Modified from [81,89-90].

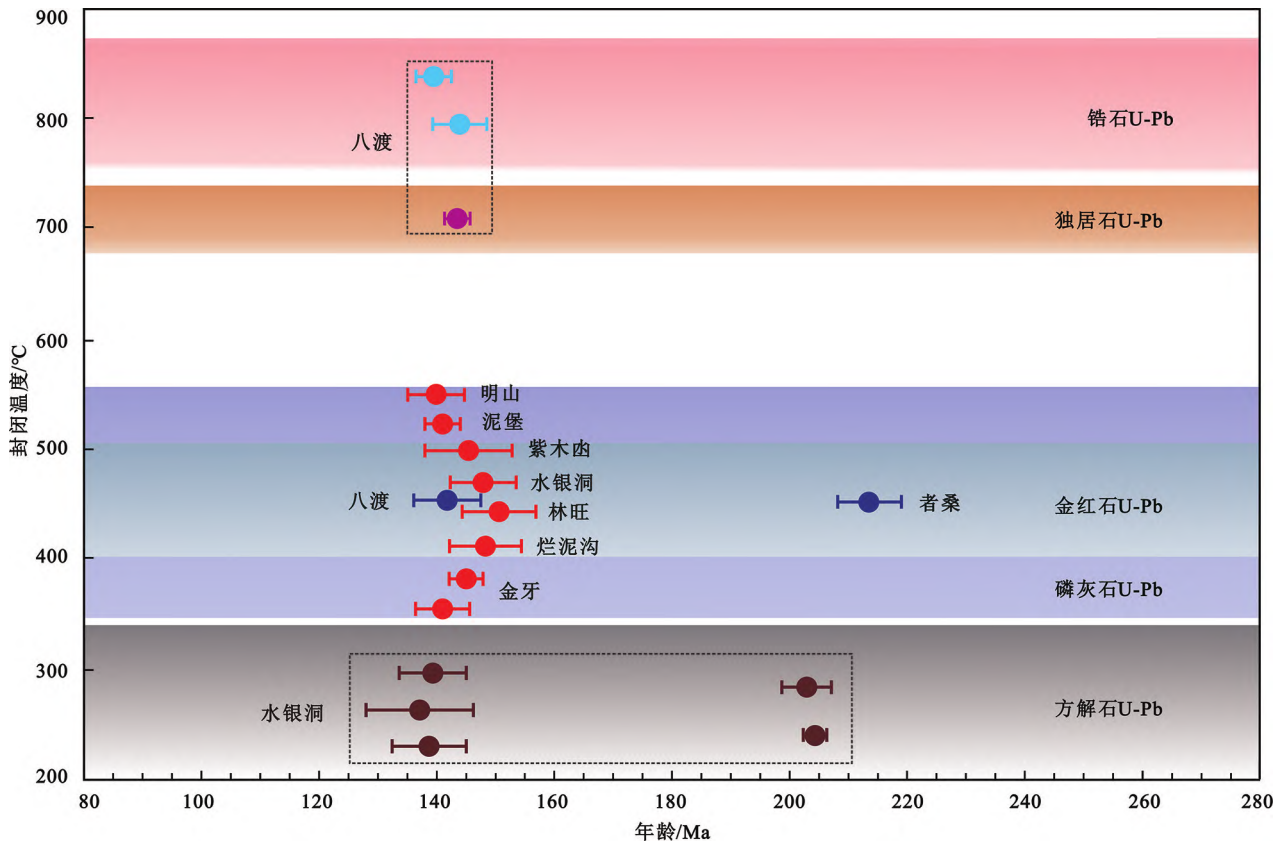


图7 右江盆地卡林型金矿床中热液副矿物微区原位定年结果
(据文献[39,81,85-90]总结)

Fig. 7 Summary of in-situ dating results for hydrothermal accessory minerals from Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin (data from [39,81,85-90])

型金矿床中生代以来经历了多期热液活动,由此衍生出一个质疑:尽管 U-Th-Pb 年龄集中于 150~140 Ma 的热液副矿物与含金黄铁矿密切共生,但它们的年龄是否能记录原始金成矿事件?

Cherniak^[92] 和 Millonig 等^[93] 等对比了不同副矿物在后期热液改造过程中的响应,发现这些副矿物 U-Pb 体系的封闭性按照锆石→金红石→磷灰石→榍石→钛锆钽矿→独居石→烧绿石的顺序逐渐降低。Zhao 等^[94] 和 Li 等^[95-96] 对具有复杂热液活动历史的 REE 矿床研究显示,即使矿石遭受多期次强烈的后期改造,热液锆石仍可以很好地记录原始成矿年龄,是最可靠的地质时钟。因此,八渡金矿床热液锆石的年龄强烈表明该矿床形成于早白垩世。上述所定年的热液金红石、独居石和磷灰石情况如下:(1)岩相学观察显示它们保存了很好的原生结构,未经历过后期热液流体的改造和蚀变^[81,89];(2)低温热年代学数据表明,金矿体的赋矿围岩自晚三叠世以来已冷却到 150 °C 以下^[22],矿体形成后未经历温

度高于 300 °C 的热事件^[81,97];(3)单颗粒的普通 Pb 校正年龄为同一年龄组,未显示出同位素体系受扰动或重置而呈现年龄杂乱或连续分布的特征^[96,98];(4)具有不同 U-Pb 封闭温度的体系产生高度一致的年龄(图 7)。这些证据表明,金红石、磷灰石和独居石的 U-Th-Pb 体系未经历后期热液改造或热扩散而发生扰动,它们的年龄也可以真实记录原始的金成矿时代。

综上所述,热液锆石、金红石、独居石和磷灰石的原位 U-Th-Pb 定年结果确切表明,右江盆地主要发育两期卡林型金矿成矿作用(图 7):(1)以者桑为代表的金矿床形成于晚三叠世;(2)以水银洞、烂泥沟、紫木凶、泥堡、金牙和八渡等为代表的金矿床形成于晚侏罗世到早白垩世。考虑到后者贡献了右江盆地超过 80% 的 Au 资源量,其可能代表了右江盆地卡林型金矿的主成矿期。同时,上述年代学工作表明,热液磷灰石很可能是卡林型金矿床中潜在的普适性定年时钟^[89]。

5 讨论

5.1 右江盆地卡林型金矿床的成矿时空格架

对右江盆地卡林型金矿床成矿年代学研究进展的梳理结果显示,盆地内发育两期卡林型金矿床,分别为 215~200 Ma 和 155~140 Ma,相当于印支期和燕山期。然而,这两期成矿作用在空间上的分布格架是什么? 基于硫化物 Re-Os、绢云母或伊利石⁴⁰Ar-³⁹Ar 和方解石 Sm-Nd 年龄结果,并结合控矿构造型式, Yang 等^[83] 和 Wang^[84] 等以坡坪断裂为界,认为产于盆地西北部台地碳酸盐岩中的金矿床(如水银洞、紫木垌和泥堡等矿床)属于燕山期卡林型金矿,而产于盆地东南部碎屑岩中的金矿床(锦丰、金牙和高龙等矿床)属于印支期造山型金矿。然而如图 8a 所示:(1)盆地西北部水银洞等金矿床的燕山期年龄主要采用方解石 Sm-Nd 法获得,但该方法并未运用于盆地东南部的金矿床中,难以排除这些金矿床不存在燕山期的方解石 Sm-Nd 年龄;(2)水银洞金矿床中黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄与锦丰和金牙矿床一致,均为印支期。另一方面, Su 等^[7] 认为相比于硫化物 Re-Os 法,方解石的 Sm-Nd 年龄和辉绿岩矿体中热液绢云母或伊利石的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄更能代表真实的成矿时代。基于此, Su 等^[7] 以右江断裂带为界,将盆地内的金矿床划分为南北两个独立的成矿系统,北面形成于燕山期,南面形成于印支期。

考虑到单矿物溶样法的固有问题,热液副矿物的微区原位定年方法可以更好地揭示盆地内卡林型金矿床的成矿时空格架。如图 8b 所示,热液金红石、独居石、锆石和磷灰石的 U-Th-Pb 年龄结果显示,燕山期的成矿年龄几乎遍布整个盆地,仅少数矿床(如者桑)形成于印支期。因此,右江盆地内的卡林型金矿床可能主要形成于燕山期,且未显示出明显的空间分带。

5.2 两期成矿作用的叠加?

另一个需要回答的问题是单个矿床内是否发育两期成矿作用的叠加,其对矿床金储量和品位的贡献是什么? 以水银洞金矿床为例, LA-ICP-MS 方解石微区原位 U-Pb 定年结果揭示该矿床经历了约 200 Ma、约 190 Ma、约 140 Ma、约 45 Ma 等多期次热液活动叠加^[39,91]。基于定年方解石的产状, Jin 等^[39] 认为水银洞的 Au 和 Sb-Hg 成矿作用分别形

成于晚三叠世和早白垩世的两期独立热液流体,为揭示两期成矿作用叠加提供了范例。相反, Tan 等^[74] 获得该矿床中与金成矿无明显空间关系的萤石的 Sm-Nd 等时线年龄为 (200.1 ± 8.6) Ma, 认为印支期年龄仅代表一幕与 Au 成矿无关的低温热液活动,而与含金黄铁矿紧密共生的热液磷灰石的 Th-Pb 年龄约为 148 Ma^[89], 表明 Au 成矿形成于早白垩世。基于如下地质事实,水银洞金矿床的 Au 和 Sb-Hg 成矿作用可能属于同一成矿系统:(1)含金黄铁矿环带从内边到外边具有一致的元素和同位素组成,未显示出多期次金成矿作用的叠加^[7,9,35-36,79]; (2)流体包裹体和元素-同位素数据表明 Au 和 Sb-Hg 矿化形成于单一、演化的热液流体^[77-78]; (3)成矿晚期的雄黄和方解石与主成矿期的硫化物和碧玉石英呈整合接触,暗示它们是连续生长的,没有显著的时间差^[89]; (4)晚期与辉锑矿或雄黄共生的方解石脉是脱碳酸盐化的产物,与 Au 成矿密切相关,是指示 Au 成矿作用的有效指标^[71,74]。

考虑到方解石 U-Pb 年龄的多期性及其同位素体系封闭温度的不确定性,未来可能仍需要进行深入的年代学和矿物学研究来准确确定是否真实发育两期成矿作用叠加。这不仅依赖于定年矿物的产状、穿插关系、与含金硫化物的成因联系的系统论证,同时还取决于定年方法的完善、同位素定年体系封闭性的深入认识、以及同一样品中不同定年方法的相互佐证。

5.3 右江盆地卡林型金矿床的动力学背景

中生代时期,右江盆地远离华南活动大陆边缘,由于成矿时代的不确定性,盆地内的卡林型金矿成矿作用究竟与哪一期构造事件有关,以往还未形成清晰认识。以右江盆地卡林型金矿为代表的大规模低温成矿作用与华南东部高温 W-Sn 多金属成矿省是否具有成因联系、二者是否受控于统一的动力学背景尚不清楚。通过国内外矿床学家近四十年孜孜不倦的探索,现已基本明确右江盆地发育两期卡林型金矿成矿作用,分别为 215~200 Ma 和 155~140 Ma,这就可以将其置于华南整体的成矿系统和构造演化中探讨其成矿动力学背景。

国内外研究学者采用辉钼矿 Re-Os、云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 和锡石、白钨矿和黑钨矿 U-Pb 等定年技术,可靠地限定了华南陆块东部高温 W-Sn 多金属矿床的成矿时代。结果显示,这些矿床主要形成

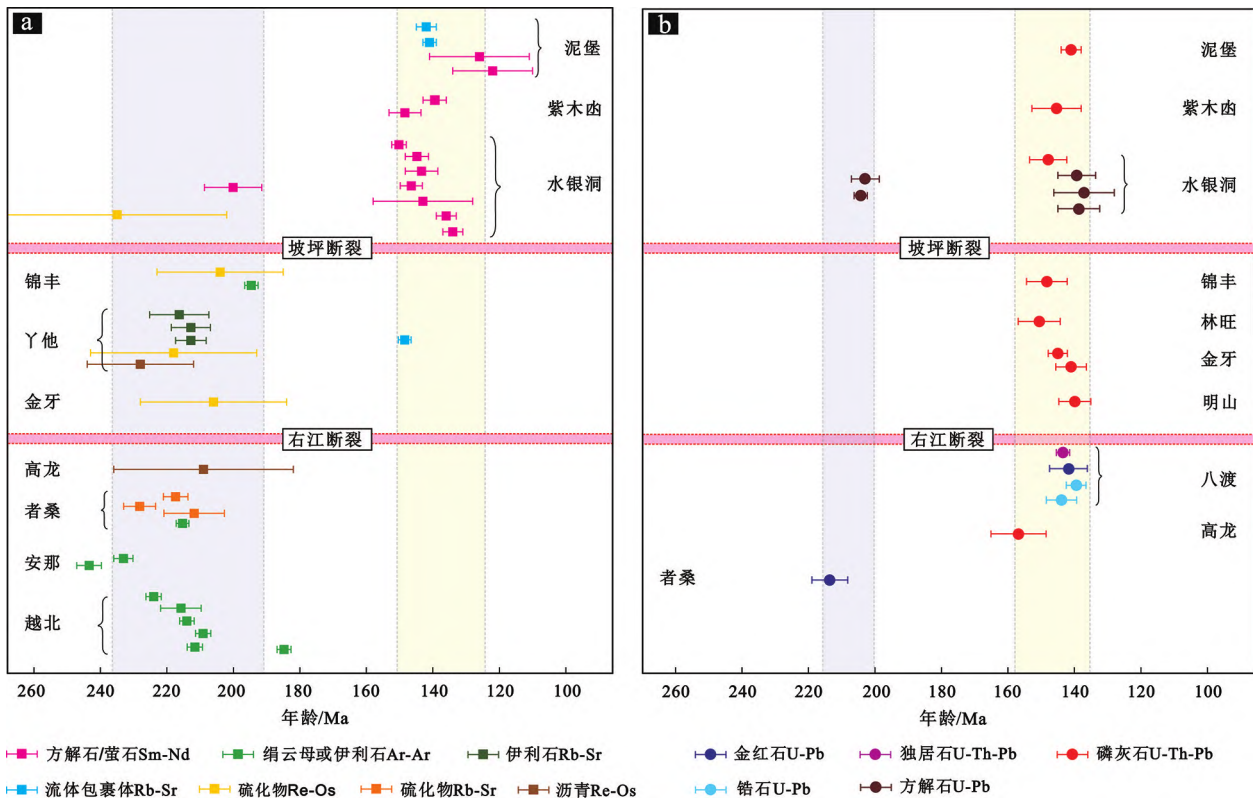


图8 右江盆地卡林型金矿床成矿年龄谱系:(a)单矿物溶样法;(b)微区原位法
Fig. 8 Age spectra of the Youjiang Carlin-type gold deposits by bulk analyses
of mineral separates (a) and in-situ precise dating (b)

于230~200 Ma、160~130 Ma和100~80 Ma 3个时期^[17,99]。右江盆地两期卡林型金矿在时代上与盆地东侧印支期和燕山期大规模W-Sn多金属成矿作用高度吻合,暗示它们可能受控于相同的动力学背景^[3,12]。其中,晚三叠世成矿作用主要受控于华南陆块与周缘多陆块碰撞后的陆内造山过程(图9a)^[12,100];晚侏罗世到白垩世的成矿作用主要受控于古太平洋板块俯冲-后撤^[101]、俯冲板片撕裂形成板片窗^[99]、岩石圈拆沉^[102]等机制诱发软流圈上涌以及后续的大规模岩石圈伸展(图9b)^[12,17]。

同时,目前的年代学数据似乎表明华南陆块印支期和燕山期成矿作用的空间分布特征具有差异(图10)^[3,12,99-114]:(1)最西侧的川滇黔Pb-Zn矿集区形成于235~200 Ma^[3,12],目前尚无燕山期年龄报道。(2)中部的湘中Sb-Au-W矿集区和南岭W-Sn成

矿省印支和燕山期年龄兼而有之。然而,尽管湘中Sb-Au-W矿集区的较多矿床形成于印支期(227~200 Ma)^[12,103],但以锡矿山Sb矿床、沃溪Au-Sb-W矿床和黄金洞Au矿床为代表的大型-超大型矿床主要形成于燕山期(155~140 Ma)^[104]。南岭W-Sn成矿省也主要形成于160~138 Ma,其次为230~200 Ma^[99,105-107]。(3)江南造山带东段的江南古陆W矿带成矿年龄集中于150~137 Ma^[108-109],其北侧的长江中下游成矿带也主要形成于148~135 Ma^[110-111],目前尚无印支期年龄报道。(4)最东侧的东南沿海成矿带也主要形成于燕山期(171~135 Ma)^[112-114]。这样的时空分布特征可能受控于华南陆块自西向东或自东向西对印支运动和燕山运动的响应程度不同,或许可以解释右江盆地卡林型金矿床的微区原位定年结果也主要集中于燕山期。

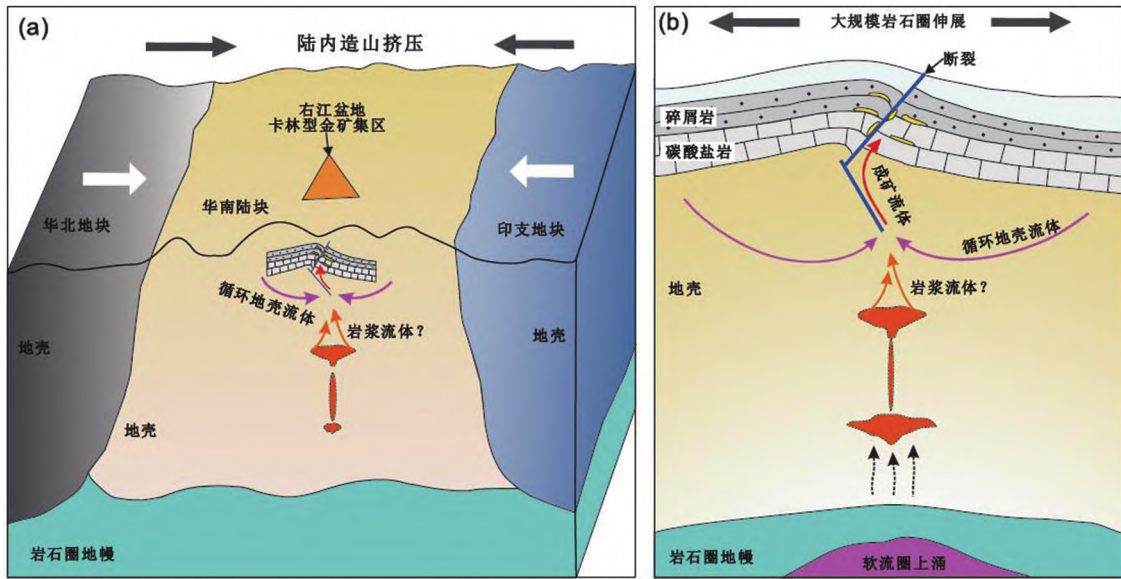


图9 右江盆地卡林型金矿床印支期(a)和燕山期(b)成矿动力学模型
(据文献[12]修改)

Fig. 9 Metallogenic dynamic models for the Indosinian (a) and Yanshanian (b) Carlin-type gold mineralization in the Youjiang Basin. Modified from [12].

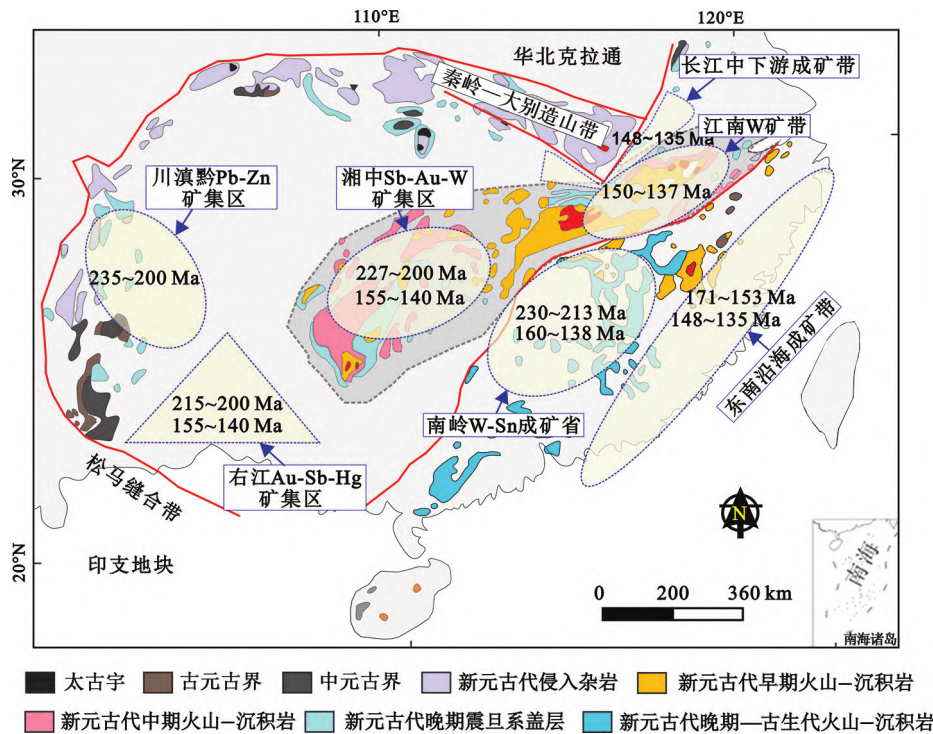


图10 华南陆块印支期(230~200 Ma)和燕山期(160~130 Ma)成矿年龄的空间分布特征
(据文献[3, 12, 99-114]总结)

Fig. 10 Spatial distribution characteristics of Indosinian (230 – 200 Ma) and Yanshanian (160 – 130 Ma) metallogenic ages in the South China Block (age data from [3, 12, 99-114])

6 结论

右江盆地是全球仅有的2个卡林型金矿床集中分布区之一,因缺少合适的定年矿物,其成矿时代的精确确定是国际矿床学研究的热点和难点。通过研究者们近四十年来的探索,右江盆地卡林型金矿床成矿年代学研究取得长足进步,尤其是以热液金红石、独居石和磷灰石等副矿物的微区原位 U-Th-Pb 定年技术为解决该问题提供了新的契机。现已基本明确,右江盆地内发育两期卡林型金矿成矿作用,分别为 215~200 Ma 和 155~140 Ma,其动力学背景对应华南板块印支期碰撞后的陆内造山过程和燕山期软流圈上涌诱发的岩石圈伸展。

感谢匿名审稿人在审阅文章时给出的宝贵意见!

参考文献

- [1] WELLS J D, STROISER L R, ELLIOTT J E. Geology and geochemistry of Cortez gold deposit, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1969, 64(5): 526-537.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] MUNTEAN J L, CLINE J S. Diversity of Carlin-type gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 1-5.
- [5] 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.
- [6] CLINE J S. Nevada's Carlin-type gold deposits, what we've learned during the past 10 to 15 years[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 7-37.
- [7] SU W C, DONG W D, ZHANG X C, et al. Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of Southwest China[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 157-185.
- [8] WANG Q F, GROVES D. Carlin-style gold deposits, Youjiang Basin, China: tectono-thermal and structural analogues of the Carlin-type gold deposits, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(7): 909-918.
- [9] XIE Z J, XIA Y, CLINE H S, et al. Are there Carlin-type gold deposits in China? A comparison of the Guizhou, China, deposits with Nevada, USA, deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 187-233.
- [10] 刘建中. 贵州贞丰-普安金矿整装勘查发现隐伏金矿体 [EB/OL]. (2016-06-30)[2023-06-20]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201607/t20160702_336920.html.
- [11] 胡瑞忠,温汉捷,叶霖,等. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用[J]. *科学通报*, 65(33): 3700-3714.
- [12] 胡瑞忠. 华南大规模低温成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [13] RASMUSSEN B, SHEPPARD S, FLETCHER I R. Testing ore deposit models using *in situ* U-Pb geochronology of hydrothermal monazite, Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia[J]. *Geology*, 2006, 34(2): 77-80.
- [14] AREHART G B, CHAKURIAN A M, TREBAR D R, et al. Evaluation of radioisotope dating of Carlin-type deposits in the Great Basin, western North America, and implications for deposit genesis[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(2): 235-248.
- [15] 李献华,李扬,李秋立,等. 同位素地质年代学新进展与发展趋势[J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 104-122.
- [16] ZHAO J H, ZHOU M F, YAN D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 2011, 39(4): 299-302.
- [17] 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.
- [18] 曾允孚,刘文均,陈洪德,等. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. *地质学报*, 1995, 69(2): 113-124.
- [19] 杜远生,黄宏伟,黄志强,等. 右江盆地晚古生代—三叠纪盆地转换及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(6): 10-15.
- [20] 杜远生,黄虎,杨江海,等. 晚古生代—中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 1-11.
- [21] CAI J X, ZHANG K J. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic[J]. *Tectonophysics*, 2009, 467(1/2/3/4): 35-43.
- [22] QIU L, YAN D P, TANG S L, et al. Mesozoic geology of southwestern China: Indosinian foreland overthrusting and subsequent deformation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 122: 91-105.
- [23] QIU L, YAN D P, YANG W X, et al. Early to Middle Triassic sedimentary records in the Youjiang Basin, South China: implications for Indosinian orogenesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 141(A): 125-139.
- [24] YANG W X, YAN D P, QIU L, et al. Formation and forward propagation of the Indosinian foreland fold-thrust belt and Nanpanjiang foreland basin in SW China[J]. *Tectonics*, 2021, 40(4): e2020TC006552.
- [25] 庄新国. 桂西北地区古地热场特征及其在微细粒浸染型金矿

- 床形成中的作用[J]. 矿床地质, 1995, 14(1): 82-88.
- [26] 索书田, 毕先梅, 赵文霞, 等. 右江盆地三叠纪岩层极低级变质作用及地球动力学意义[J]. 地质科学, 1998, 33(4): 396-405.
- [27] ZHOU M F, ZHAO J H, QI L. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(1): 1-19.
- [28] FAN W M, ZHANG C H, WANG Y J, et al. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi Province, Southwest China: evidence for plume-lithosphere interaction[J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 218-236.
- [29] LIU S, SU W C, HU R Z, et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from Southwest Guizhou Province, SW China [J]. *Lithos*, 2010, 114(1/2): 253-264.
- [30] ZHU J J, HU R Z, RICHARDS J P, et al. No genetic link between Late Cretaceous felsic dikes and Carlin-type Au deposits in the Youjiang Basin, Southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 328-337.
- [31] 向忠金. 桂西南晚古生代—早中生代岩浆岩成因和构造属性 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2018.
- [32] GAN C S, WANG Y J, BARRY T L, et al. Late Jurassic high-Mg andesites in the Youjiang Basin and their significance for the southward continuation of the Jiangnan Orogen, South China [J]. *Gondwana Research*, 2020, 77: 260-273.
- [33] KESLER S E, RICIPUTI L C, YE Z J. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits, isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer deposit, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40: 127-136.
- [34] BARKER S L, HICKEY K A, CLINE J S, et al. Uncovering invisible gold: use of Nano SIMS to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from Carlin-type gold deposits[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(7): 897-904.
- [35] SU W C, ZHANG H T, HU R Z, et al. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 653-662.
- [36] 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.
- [37] HOFSTRA A H, SNEE L W, RYE R O, et al. Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the western United States: relationship to Mid-Tertiary extension and magmatism[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(6): 769-802.
- [38] ZHUO Y Z, HU R Z, XIAO J F, et al. Trace elements and C-O isotopes of calcite from Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin, SW China: constraints on ore-forming fluid compositions and sources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103067.
- [39] JIN X Y, ZHAO J X, FENG Y X, et al. Calcite U-Pb dating unravels the age and hydrothermal history of the giant Shuiyindong Carlin-type gold deposits in the golden triangle, South China [J]. *Economic Geology*, 2021, 116(6): 1253-1265.
- [40] AREHART G B. Characteristics and origin of sediment-hosted disseminated gold deposits: a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 1: 383-403.
- [41] AREHART G B, FOLAND K A, NAESER C W, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K/Ar, and fission track geochronology of sediment-hosted disseminated gold deposits at Post-Betze, Carlin trend, northeastern Nevada[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(3): 622-646.
- [42] GROFF J A, HEIZLER M T, MCINTOSH W C, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and mineral paragenesis for Carlin-type gold deposits along the Getchell trend, Nevada: evidence for Cretaceous and Tertiary gold mineralization[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(5): 601-622.
- [43] TRETBAR D, AREHART G B, CHRISTENSEN J N. Dating gold deposition in a Carlin-type gold deposit using Rb/Sr methods on the mineral galkhaite[J]. *Geology*, 2000, 28(10): 947-950.
- [44] HALL C M, KESLER S E, SIMON G et al. Overlapping Cretaceous and Eocene alteration, Twin Creeks Carlin-type deposit, Nevada [J]. *Economic Geology*, 2000, 95(8): 1739-1752.
- [45] CHAKURIAN A M, AREHART G B, DONELICK R A, et al. Timing constraints of gold mineralization along the Carlin trend utilizing apatite fission track, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and apatite (U-Th)/He methods[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(6): 1159-1171.
- [46] RESSEL M W, HENRY C D. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada, development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin-type gold deposits[J]. *Economic Geology*, 2006, 101(2): 347-383.
- [47] MUNTEAN J L, CLINE J S, SIMON A C, et al. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 122-127.
- [48] 张峰, 杨科佑. 黔西南微细浸染型金矿裂变径迹成矿时代研究[J]. *科学通报*, 1992, 37(17): 1593-1595.
- [49] 罗孝桓. 黔西南右江区金矿床控矿构造样式及成矿作用分析 [J]. *贵州地质*, 1997, 14(4): 312-320.
- [50] 朱赖民, 刘显凡, 金景福, 等. 滇黔桂微细浸染型金矿床时空分布于成矿流体来源研究[J]. *地质科学*, 1998, 33(4): 463-474.
- [51] 李红阳, 高振敏, 杨竹森, 等. 贵州丹寨卡林型金矿床地球化学特征[J]. *地质科学*, 2002, 37(1): 4-7.

- [52] 刘建中, 邓一明, 刘川勤, 等. 水银洞金矿床包裹体和同位素地球化学研究[J]. 贵州地质, 2006, 23(1): 51-56.
- [53] 刘东升, 耿文辉. 我国卡林型金矿物特征及成矿条件探讨[J]. 地球化学, 1985, 3: 277-282.
- [54] 陈庆年. 丹寨汞、金与油气成矿模式的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1992, 11(1): 11-14.
- [55] 王国田. 桂西北地区三条铷-锶等时线年龄[J]. 广西地质, 1992, 5(1): 29-35.
- [56] 胡瑞忠, 苏文超, 毕献武, 等. 滇黔桂三角区微细浸染型金矿床成矿热液一种可能的演化途径: 年代学证据[J]. 矿物学报, 1995, 15(2): 144-149.
- [57] 苏文超, 杨科佑, 胡瑞忠, 等. 中国西南部卡林型金矿床流体包裹体年代学研究: 以贵州烂泥沟大型卡林型金矿床为例[J]. 矿物学报, 1998, 18(3): 359-362.
- [58] 刘平, 李沛刚, 马荣, 等. 一个与火山碎屑岩和热液喷发有关的金矿床: 贵州泥堡金矿[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 101-110.
- [59] 俸月星, 陈民扬, 徐文焯. 独山梯矿稳定同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 1993, 7(2): 119-126.
- [60] 陶长贵, 刘觉生, 戴国厚. 册亨丫他金矿床地质特征及成因初探[J]. 贵州地质, 1987, 4(2): 135-150.
- [61] 李文亢, 姜信顺, 具然弘, 等. 黔西南微细粒金矿床地质特征及成矿作用[G]//沈阳地质矿产研究所. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集(黔西南地区). 北京: 地质出版社, 1998: 1-85.
- [62] 李泽琴, 陈尚迪, 王奖臻, 等. 桂西金牙微细浸染型金矿床同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 1995, 15(2): 66-72.
- [63] 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.
- [64] TAGAMI T, O'SULLIVAN P B. Fundamentals of fission-track thermochronology[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58: 19-47.
- [65] HU R G, PANG B C, BAI X J, et al. Progressive crushing $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of a gold-bearing quartz vein from the Li-aotun Carlin-type gold deposit, Guangxi, southern China [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 12793.
- [66] 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 等. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 371-382.
- [67] CHEN M H, MAO J W, LI C, et al. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle", southwestern China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 316-327.
- [68] GE X, SELBY D, LIU J J, et al. Genetic relationship between hydrocarbon system evolution and Carlin-type gold mineralization: insights from Re-Os pyrobitumen and pyrite geochronology in the Nanpanjiang Basin, South China[J]. Chemical Geology, 2021, 559: 119953.
- [69] 陈懋弘, 黄庆文, 胡瑛, 等. 贵州烂泥沟金矿层状硅酸盐矿物及其 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代学研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(3): 353-362.
- [70] 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 等. 云南富宁者桑金矿床与基性岩年代测定: 兼论滇黔桂地区卡林型金矿成矿构造背景[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3331-3342.
- [71] 董文斗. 右江盆地南缘辉绿岩容矿金矿床地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院大学(中国科学院地球化学研究所), 2017.
- [72] SU W C, HU R Z, XIA B, et al. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. Chemical Geology, 2009, 258(3/4): 269-274.
- [73] WANG Z P, TAN Q P, XIA Y, et al. Sm-Nd isochron age constraints of Au and Sb mineralization in southwestern Guizhou Province, China[J]. Minerals, 2021, 11: 100.
- [74] TAN Q P, XIA Y, XIE Z J, et al. Two hydrothermal events at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit in southwestern China: insight from Sm-Nd dating of fluorite and calcite[J]. Minerals, 2019, 9: 230.
- [75] ZHENG L L, YANG R D, GAO J B, et al. Quartz Rb-Sr isochron ages of two type orebodies from the Nibao Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. Minerals, 2019, 9: 399-413.
- [76] CLINE J S. Timing of gold and arsenic sulfide mineral deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, North-Central Nevada[J]. Economic Geology, 2001, 96(1): 75-89.
- [77] SU W C, HENRICH 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.
- [78] GU X X, ZHANG Y M, LI B H, et al. Hydrocarbon and ore-bearing basinal fluids: a possible link between gold mineralization and hydrocarbon accumulation in the Youjiang Basin, South China[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(6): 663-682.
- [79] YAN J, HU R Z, LIU S, et al. Nano-SIMS 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.
- [80] HUANG S Q, SONG Y C, ZHOU L M, et al. Influence of organic matter on Re-Os dating of sulfides: insight from the giant Jinding sedimentary-hosted Zn-Pb deposit, China[J]. Economic Geology, 2022, 117(4): 737-745.
- [81] 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.
- [82] GE X, SHEN C B, ZHOU R J, et al. Tracing fluid evolution in sedimentary basins with calcite geochemical, isotopic and U-Pb geochronological data: implications for petroleum and mineral resource accumulation in the Nanpanjiang Basin, South China [J]. GSA Bulletin, 2022, 134 (7/8):

- 2097-2114.
- [83] YANG L, DENG J, GROVES D I, et al. Recognition of two contrasting structural- and mineralogical-gold mineral systems in the Youjiang Basin, China-Vietnam: orogenic gold in the south and Carlin-type in the north[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(5): 1477-1494.
- [84] WANG Q F, YANG L, XUE X J, et al. Multi-stage tectonics and metallogeny associated with Phanerozoic evolution of the South China Block: a holistic perspective from the Youjiang Basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 211: 103405.
- [85] 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.
- [86] CHEN M H, BAGAS L, LIAO X, et al. Hydrothermal apatite SIMS Th-Pb dating: constraints on the timing of low temperature hydrothermal Au deposit in Nibao, SW China [J]. *Lithos*, 2019, 324/325: 418-428.
- [87] LIN S R, HU K, CAO J, et al. Geochemistry and origin of hydrothermal apatite in Carlin-type Au deposits, southwestern China (Gaolong deposit) [J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 157: 105312.
- [88] JI X Z, CHEN M H, YANG L Q, et al. The relationship between Carlin-type Au mineralization and magmatism in the Youjiang Basin: a case study from the Mingshan gold deposit in Northwest Guangxi, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 157: 105400.
- [89] 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*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01196-6>.
- [90] 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.
- [91] 黄勇. 黔西南地区卡林型金矿成矿时代及成矿物质来源研究[D]. 贵阳: 中国科学院大学(中国科学院地球化学研究所), 2019.
- [92] CHERNIAK D J. Diffusion in accessory minerals: zircon, titanite, apatite, monazite and xenotime[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2010, 72: 827-869.
- [93] MILLONIG L J, GERDES A, GROAT L A. The effect of amphibolite facies metamorphism on the U-Th-Pb geochronology of accessory minerals from meta-carbonatites and associated meta-alkaline rocks[J]. *Chemical Geology*, 2013, 353: 199-209.
- [94] ZHAO X F, ZHOU M F, SU Z K, et al. Geology, geochronology, and geochemistry of the Dahongshan Fe-Cu-(Au-Ag) deposit, Southwest China: implications for the formation of iron oxide copper-gold deposits in intracratonic rift settings[J]. *Economic Geology*, 2017, 112: 603-628.
- [95] LI X C, ZHOU M F, CHEN W T, et al. Uranium-lead dating of hydrothermal zircon and monazite from the Sin Quyen Fe-Cu-REE-Au-(U) deposit, northwestern Vietnam[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53: 399-416.
- [96] LI X C, FAN H R, ZENG X, et al. Identification of ~1.3 Ga hydrothermal zircon from the giant Bayan Obo REE deposit (China): implication for dating geologically-complicated REE ore system [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 138: 104405.
- [97] HUANG Y, HU R Z, BI X W, et al. Low-temperature thermochronology of the Carlin-type gold deposits in southwestern Guizhou, China: implications for mineralization age and geological thermal events[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103178.
- [98] LI X C, YANG K F, SPANDLER C, et al. The effect of fluid-aided modification on the Sm-Nd and Th-Pb geochronology of monazite and bastnäsité: implication for resolving complex isotopic age data in REE ore systems[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2021, 300: 1-24.
- [99] 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.
- [100] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1273-1305.
- [101] LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 134: 98-136.
- [102] ZHANG H J, LV Q T, WANG X L, et al. Seismically imaged lithospheric delamination and its controls on the Mesozoic magmatic province in South China[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2718.
- [103] 谢桂青, 毛景文, 张长青, 等. 华南地区三叠纪矿床地质特征、成矿规律和矿床模型[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 252-270.
- [104] LI W, XIE G Q, MAO J W, et al. Precise age constraints for the Woxi Au-Sb-W deposit, South China[J]. *Economic Geology*, 2023, 118(2): 509-518.
- [105] 毛景文, 谢桂清, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2329-2338.
- [106] BAI X J, LIU M, YU R G, et al. Well-constrained mineralization ages by integrated $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb dating techniques for the Xitian W-Sn polymetallic deposit, South China[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(4): 833-852.
- [107] NI P, PAN J Y, HAN L, et al. Tungsten and tin deposits in South China: temporal and spatial distribution, metallogenic

- models and prospecting directions [J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 157: 105453.
- [108] 毛景文, 吴胜华, 宋世伟, 等. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型 [J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3746-3762.
- [109] SONG S W, MAO J W, XIE G Q, et al. The world-class Mid-Mesozoic Jiangnan tungsten belt, South China: coeval large reduced and small oxidized tungsten systems controlled by different magmatic petrogenesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104543.
- [110] 周涛发, 聂立青, 王世伟, 等. 长江中下游带钨矿床 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(12): 3592-3608.
- [111] 毛景文, 周涛发, 谢桂青, 等. 长江中下游地区成矿作用研究新进展和存在问题的思考 [J]. *矿床地质*, 2020, 39(4): 547-558.
- [112] LIU P, MAO J W, PIRAJNO F, et al. Ore genesis and geodynamic setting of the Lianhuashan porphyry tungsten deposit, eastern Guangdong Province, SE China: constraints from muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar and zircon U-Pb dating and Hf isotopes [J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(5): 1-18.
- [113] LIU P, MAO J W, SANTOSH M, et al. The Xiling Sn deposit, eastern Guangdong Province, Southeast China: a new genetic model from ^{40}Ar - ^{39}Ar muscovite and U-Pb cassiterite and zircon geochronology [J]. *Economic Geology*, 2018, 113(2): 511-530.
- [114] MAO J W, ZHENG W, XIE G Q, et al. Recognition of a Middle-Late Jurassic arc-related porphyry copper belt along the Southeast China coast: geological characteristics and metallogenic implications [J]. *Geology*, 2021, 49(5): 592-596.