

海南抱伦金矿成矿年代学研究

蔡霖¹, 许德如^{1,2,3*}, 单强², 苏伟政¹

1. 东华理工大学, 江西 南昌 330013;

2. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 东华理工大学铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013



摘要:抱伦金矿位于海南岛西南部的尖峰岩体外接触带,是目前海南岛储量最大的高品位金矿床。针对抱伦金矿成矿时代和成因机制尚不明确的问题,选取抱伦金矿床的辉钼矿样品进行Re-Os同位素定年研究。结果表明:辉钼矿Re-Os模式年龄为(223.8~227.4)Ma,¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os等时线年龄为(224.6±7.2)Ma,表明成矿作用发生在印支期,与海南岛印支期构造、岩浆和变质作用时限相符,确定抱伦金矿为典型造山型金矿;印支期区域变质作用和岩浆活动为抱伦金矿提供了成矿流体,而区域性挤压—伸展构造转换为成矿作用提供了重要的成矿通道和空间。研究结果深化了对海南岛金矿成矿地质背景的理解,并为类似复杂构造环境下的造山型金矿找矿提供了参考模型。

关键词:成矿时代;Re-Os同位素定年;辉钼矿;印支期;造山型金矿;抱伦金矿

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0683-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.061

引用格式:蔡霖,许德如,单强,等.海南抱伦金矿成矿年代学研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):683-695.CAI Lin, XU Deru, SHAN Qiang, et al. Geochronological Study on the Baolun Gold Deposit in Hainan Island[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4):683-695.

海南岛是我国重要的金多金属矿产地,代表性金矿床有抱伦、不磨、富文、抱板和王下等,金资源总量超过143 t(Xu et al, 2017; Yu et al, 2020a)。以往研究表明,海南岛金成矿作用可能形成于印支晚期(刘玉琳等, 2002; 舒斌等, 2004),与华南地区的多期构造—岩浆演化事件大地构造背景有关(Cai et al, 2017)。同时,前人对于海南岛金矿的成因提出了多种模式,包括岩浆热液型和造山型(陈柏林等, 2004; 李明艳等, 2006)。其中,造山型金矿主要形成于印支期,成矿作用与华南—印支板块早—中三叠世碰撞造山晚期应力场发生大规模转换的构造运动密切相关(Cai et al, 2009; 唐立梅等, 2013; Zhang et al, 2014)。岩浆热液型金矿形成于燕山

期,与尖峰岭岩体的侵入及其后续的岩浆活动、构造动力体制的转换和反复的应力集中—释放过程密切相关(刘玉琳等, 2002; 舒斌等, 2004; Mafra et al, 2024; 薛建玲等, 2025)。由此可知,精确限定金成矿年龄对于正确理解金成矿地球构造动力学背景和成矿类型至关重要。

抱伦金矿床位于海南岛西部,已探明金金属资源量在80 t以上,平均金品位达 10.3×10^{-6} ,是目前海南岛储量最大的高品位金矿床(Ding et al, 2005; Chang et al, 2019)。前人对矿区成岩成矿年代学的研究表明,区内岩体包括尖峰岩体(241~249 Ma)(谢才富等, 2006; 张小文等, 2009)和抱伦岩体(105 Ma)(内部资料),此外还有少量的基性岩脉,

收稿日期:2025-01-19; 修订日期:2025-04-19

基金项目:国家自然科学基金重点项目“江南古陆金(多金属)大规模成矿的机理研究”(编号:41930428)资助

作者简介:蔡霖(2000—),男,广东广州人,硕士研究生,从事矿物学、岩石学和矿床学专业研究工作。E-mail:cailin@outlook.cn

*通信作者:许德如(1966—),男,湖南汨罗人,教授,从事大陆边缘构造与成矿研究工作。E-mail:xuderu@gig.ac.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

包括辉绿岩和角闪片岩。前人采用K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr等时线和锆石Pb-Pb法研究发现,金成矿年龄为236~205 Ma;近矿岩浆岩中的热液锆石U-Pb定年结果表明,成矿年龄可能为119~107 Ma。由此可知,对于抱伦金矿床成矿年龄的认识仍存在分歧,制约了对该矿床成因的认识。

针对以上科学问题,在野外地质调查和岩(矿)相学分析的基础上,重点对抱伦金矿辉钼矿进行Re-Os定年,对矿区成岩成矿时代进行限定,并结合区域成岩成矿研究,剖析抱伦金矿的成因,为矿床进一步勘查工作提供参考。

1 区域地质背景

海南岛位于欧亚板块、太平洋板块与印度—澳大利亚板块的构造交会地带,其地质演化过程受特提斯构造域和环太平洋构造域的双重作用(图1)(Xu et al, 2013; Cai et al, 2017)。晚二叠世古特提斯洋闭合期间,印支板块与华南板块东南缘(海南—云开隆起)发生碰撞,形成NE-SW向挤压构造(Ma et al, 2024);而西南缘(哀牢山—南盘江地区)同期仍处于伸展背景(梁新权等, 2005),导致区域应力场由伸展状态向挤压状态递进转换(Lepvrier et al, 1997; Chung et al, 1998)。至早三叠世,印支板块北部及海南岛等地发育大规模的NNW向右行走滑剪切系统,以块体间沿巨型剪切带的水平相对运动为特征(Zhang et al, 2014)。在中—晚三叠世,区域应力场松弛,进入造山后的伸展环境(唐立梅等, 2013)。

在印支期,海南岛经历了强烈的构造—岩浆活动,形成了NE-NNE向构造体系。早期构造变形形成褶皱带、断裂带和韧性剪切带,其变形年龄小于230 Ma。其中,NE向格镇剪切带和冲催岭剪切带指示左行走滑主导的变形特征,其变形年龄介于227~230 Ma之间($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测年)(陈新跃, 2006)。伴随着构造活动,印支期岩浆侵入形成了广泛分布的花岗岩,主要为正长花岗岩和二长花岗岩,集中分布于海南岛中部及东南部(梁光河, 2018)。海南岛侵入岩出露面积占比达51%,除印支期花岗岩之外,还包括晋宁期花岗岩(1 450 Ma, 分布在岛西部)(俞受璽等, 1992; 马大铨等, 1997; Li et al, 2002; 许德如等, 2006)以及华力西—印支

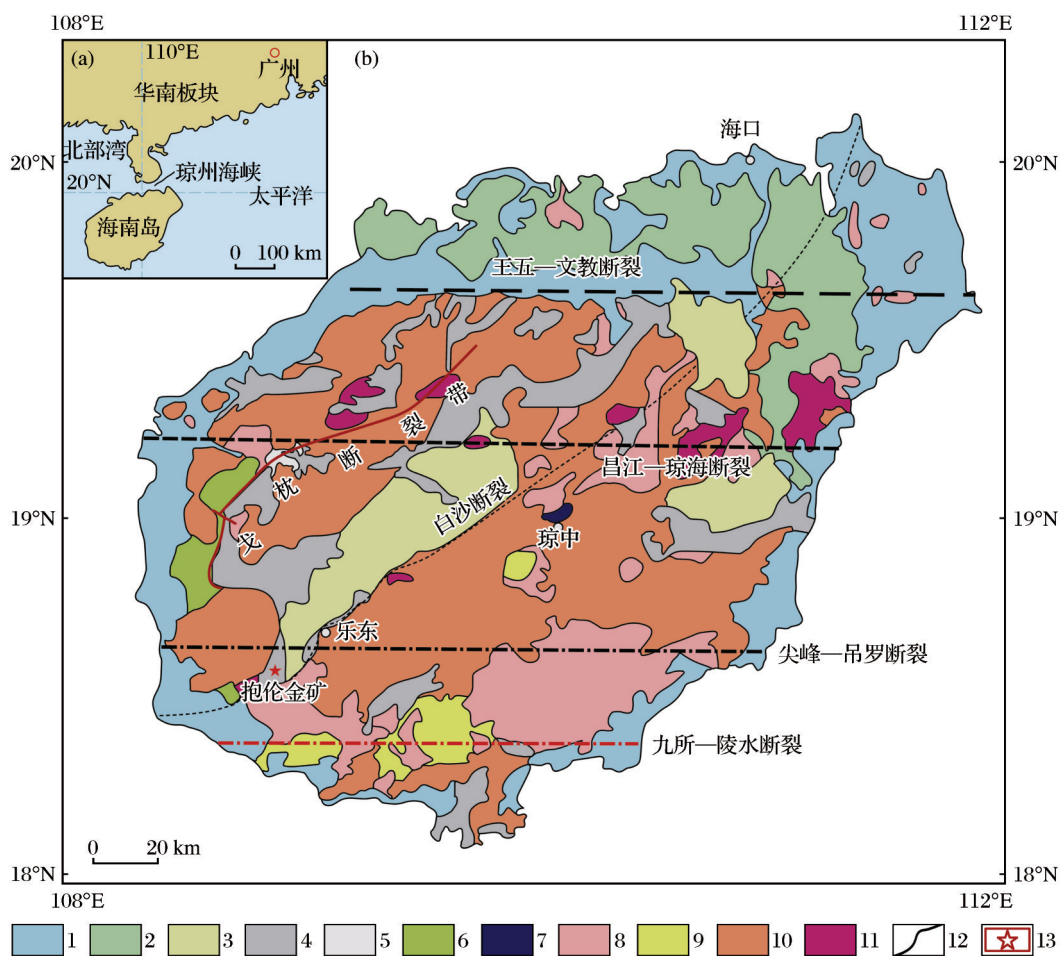
期和燕山期的岩浆活动产物。

海南岛构造模式以EW走向构造为主体,包括剪切带、断层、圆顶和盆地等地质构造,局部发育NE向和NW-NNW向构造。EW走向的断裂构造系统主体由4条大规模的地壳断裂构成,自北向南依次为王五一文教、昌江—琼海、尖峰—吊罗和九所—陵水断裂(Zhou et al, 2006; Cai, 2013)。NE走向的构造包括若干短轴圆顶和盆地或凹陷,例如琼中和儋县的花岗岩圆顶和白沙盆地。除琼北裂谷盆地被新生代沉积层覆盖之外,海南岛广泛出露二叠纪、三叠纪和白垩纪花岗岩[图1(b)],琼北裂谷盆地主要充填有新生代浅湖至碎屑岩和玄武岩浅海相(海南地质调查院区调队, 2004)。前新生代地层分布于3条独立的NE-SW向延伸带内(图1),包括前寒武纪变沉积片岩和片麻岩、上寒武—中奥陶统浅海碎屑岩和碳酸盐岩、下志留统深海复理石硅质碎屑岩和碳质层、二叠纪浅海碳酸盐岩夹碎屑岩以及白垩纪山内红层(海南地质调查院区调队, 2004, 2007)。

海南岛的火山活动从中元古代延续至新生代,呈现多旋回喷发特征。新生代火山岩主要分布于海南岛北部,中生代火山岩则广泛出露于早白垩世陆相火山—沉积盆地中,如琼南同安岭等地。而更古老时期的火山岩在岛上仅零星出露,并普遍经历不同程度的变质作用改造,包括印支期之前的火山活动。受后期构造—岩浆活动影响,地层多呈“岛状”展布(图1),其中,中新界出露最广,未遭受显著区域变质作用,而前中生界普遍发生变质。此外,海南岛东南部三亚至五指山一带还发育新太古—古元古代变质杂岩组合,主要岩性有紫苏花岗岩及伴生的斜长角闪片麻岩。该杂岩体具麻粒岩相变质特征,锆石U-Pb同位素测年为2 500 Ma,揭示海南岛可能拥有更古老的地质基底(许德如等, 2007)。

2 矿床地质特征

抱伦金矿床位于华夏地块与南海地台九所—陵水断裂拼合带北侧(丁式江等, 2001; 廖香俊等, 2005; Xu et al, 2013),其构造位置处于华南加里东褶皱系南缘五指山褶皱带内,受控于九所—陵水断裂与尖峰—吊罗深大断裂构成的构造夹持系统[图1(b)]。区内最古老地层为中元古界抱板群,由



1. 新生代覆盖层; 2. 新生代玄武岩; 3. 白垩纪盆地; 4. 古生代地层; 5. 新元古代石碌群; 6. 古—中元古代抱群; 7. 新太古代杂岩体; 8. 晚中生代花岗岩; 9. 白垩纪火山岩; 10. 晚古生代—早中生代花岗岩; 11. 变质基性岩及相关沉积物; 12. 地质界线; 13. 抱伦金矿床

图 1 海南岛构造地质图(修改自 Xu et al, 2013)

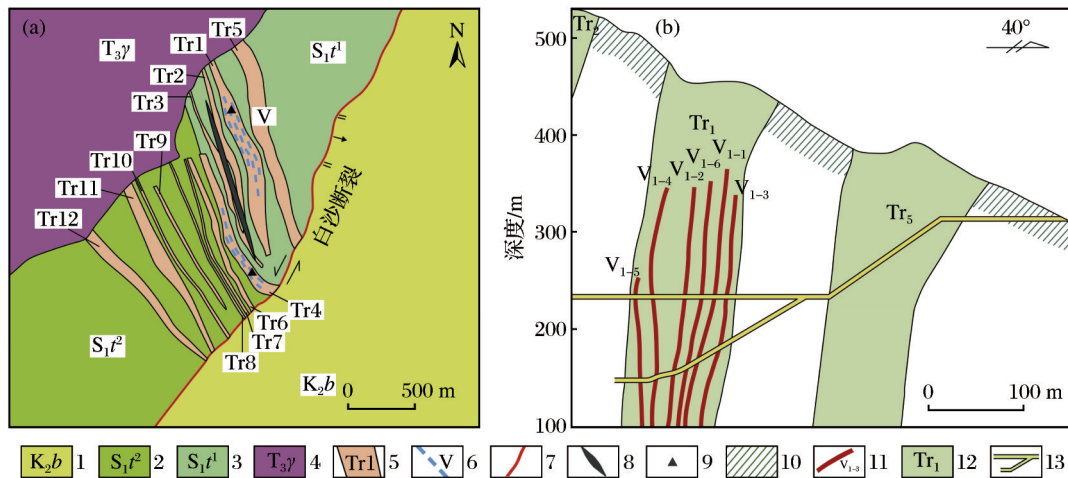
Fig. 1 Geological structure map of Hainan Island(modified after Xu et al, 2013)

中深变质相斜长片麻岩、混合岩和石英云母片岩构成,原岩为中酸性火山岩和陆源碎屑沉积岩,变质作用发生时间为 1.60~1.45 Ga(马大铨等, 1997; 许德如等, 2006; 欧阳海涛, 2013)。区内地层还包括下志留统陀烈组 and 上白垩统报万组[图 2(a)]。赋矿岩层为早志留世陀烈组[图 2(b)],主体为绿片岩相变质碎屑岩,岩性包括细石英砂岩、(碳质)伊利岩千枚岩和含几丁质昆虫和植物化石的粉砂岩。该组地层可划分为 3 个亚岩石地层段,其中中下段是抱伦金矿的主要赋矿层系。矿区地质构造复杂,发育印支期尖峰岭花岗岩类复式岩体和燕山晚期千家花岗岩类复式岩体,以及 NNE、NNW 向褶皱构造和 NE-NNE 走向断层,为含金石英脉和其他类型

金矿的形成提供了赋存空间。

抱伦金矿的成矿过程可划分为 3 个主要阶段,即石英—硫化物阶段(I)、石英—金—硫化物阶段(II)和石英—碳酸盐阶段(III),其中第 II 阶段为主成矿阶段(Liu et al, 2024)。石英—硫化物阶段(I)在 NNW 向剪切带内形成黄铁矿—毒砂组合石英脉(丁式江等, 2005; Cai et al, 2017),成矿温度为 248~376 °C;主成矿阶段(第 II 阶段)发育金—铋矿物组合和少量辉钼矿,成矿温度为 213~320 °C;石英—碳酸盐阶段(III)中硫化物含量较少,成矿温度为 150~200 °C,指示成矿流体演化的晚期(Liu et al, 2024)。

抱伦金矿围岩蚀变类型复杂且整体较弱,以硅化、黄铁矿化、绢云母化、白云母化、绿泥石化、碳酸



1. 上白垩统报万组; 2. 志留系陀烈组中段; 3. 志留系陀烈组下段; 4. 尖峰花岗岩; 5. 破碎带和编号; 6. 隐伏矿体; 7. 白沙断裂; 8. 豪岗岭背斜; 9. 采样位置(位于井下); 10. 陀烈组下段; 11. 矿脉及编号; 12. 剪切构造带; 13. 巷道

图2 抱伦金矿地质简图(修改自丁式江等, 2001, 2005)

Fig. 2 Geological map of the Baolun gold deposit(modified after Ding et al, 2001, 2005)

岩化和角闪石化为特征,其中硅化与成矿关系最为密切,主要发生在含金石英脉的近矿围岩中。蚀变和矿化呈NNW向带状分布,微观上与不同阶段的矿化共生或伴生。抱伦金矿矿石类型主要包括含金蚀变岩型和含金石英脉型,以石英脉型为主。矿石矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿,含少量闪锌矿、方铅矿以及微量自然金、毒砂、黄铜矿、辉铋矿、辉钼矿和斜方辉铅铋矿等。脉石矿物以石英为主[图3(a)],常伴生方解石、白云母、绢云母和绿泥石等(丁式江等, 2005; 舒斌等, 2006)。辉钼矿在矿区发育较少,且历来未引起学者重视,但本次研究发现其与大量黄铁矿、磁黄铁矿、金红石、毒砂、黄铜矿及辉铋矿等金属硫化物密切共生[图3(b)],矿物颗粒细小,多为鳞片状,呈钢灰色[图3(c)]。

3 样品与分析方法

3.1 样品采集

本次研究在抱伦金矿 25 中段沿 V_{1-3} 矿体和 160 中段 V_{1-6} 矿体分别采集 3 件和 1 件含辉钼矿的含金石英脉样品,样品均为石英—金—硫化物阶段(II)的矿物[图3(d)],并制成光片或薄片用于岩相学观察。此外,将用于辉钼矿定年的样品原样破碎至 100 目,并经磁选和电磁选处理后,在双目镜下进行人工挑纯,挑纯后每个样品质量约为 2 g。

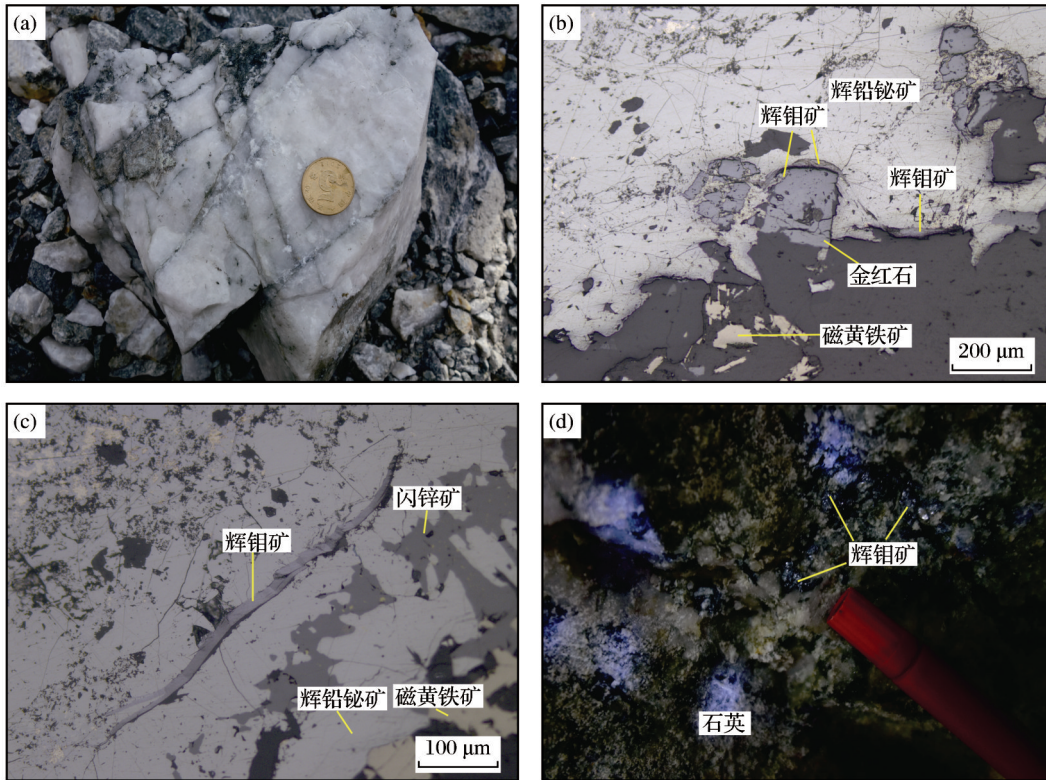
3.2 分析测试方法

辉钼矿 Re-Os 化学分离与质谱测定工作由中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学国家重点实验室完成,测试分析流程参照卡洛斯管酸溶法标准流程(杜安道等, 1994, 2001),并对核心步骤进行优化。

(1) 样品溶解。精密称量样品粉末,经长细颈漏斗转移至 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。配制乙醇—液氮低温浴($-50\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$),将样品管浸入浴槽后依次注入 $^{185}\text{Re}-^{190}\text{Os}$ 稀释剂、5 mL 的 HCl(浓度为 10 mol/L)、15 mL 的 HNO_3 (浓度为 16 mol/L)和 3 mL 的 H_2O_2 (体积浓度为 30%)。待溶液冰冻后,采用丙烷火焰密封管颈,当管底溶液冰冻后,置入不锈钢套管内并转移至烘箱。待温度回到室温后,程序升温至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温 24 h,冷却后以 40 mL 超纯水转移溶解液至蒸馏装置。

(2) Os 同位素蒸馏分离。控制蒸馏温度为 $105\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续蒸馏 50 min, OsO_4 蒸气经 10 mL 超纯水吸收后获得 Os 测试液。蒸馏残液转移至 150 mL 聚四氟乙烯烧杯中备用。

(3) Re 同位素萃取富集。蒸馏残液经电热板蒸干复溶 2 次以调节酸度,再加入 10 mL 浓度为 5 mol/L 的 NaOH 碱化体系。采用丙酮溶剂萃取法分离 Re,萃取液经离心和分相后采用浓度为 5 mol/L 的 NaOH 溶液洗涤,蒸除有机相后通过阳离子交换



(a)石英脉型矿石;(b)辉钼矿与金红石;(c)辉钼矿与闪锌矿和磁黄铁矿;(d)产于含金石英脉中的辉钼矿

图3 抱伦金矿矿石野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photographs of ore in the Baolun gold deposit

柱去除钠离子干扰,最终以2% HNO₃溶液定容供ICP-MS测试。

(4)质谱检测。使用Thermo Scientific X series 2型ICP-MS测定Re和Os同位素比值,并采用Ir和Os天然丰度对Re和Os进行在线监测和校正。同时,以GBW04436标样为外标,监控流程可靠性。

4 研究结果

4件辉钼矿样品Re含量测定数据显示,Re含量为0.1417~0.2545 μg/g,¹⁸⁷Re含量为0.0891~0.1600 μg/g,¹⁸⁷Os含量为0.3345~0.5975 μg/g。4个辉钼矿样品的Re和¹⁸⁷Re含量具有良好的相关关系,且测量值的不确定度均较低,测量准确性较高。采用ISOPLOT软件将测试数据进行回归计算,拟合所得Re-Os等时线年龄为(224.6±7.2)Ma,各数据点的线性关系较好,均方加权偏差(MSWD)为1.7,与加权平均年龄(225.6±2.9)Ma在误差范围内相一致[图4(a)、4(b)]。

通过以下方程进行模式年龄的回归分析:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{187}\text{Re}} \right) \quad (1)$$

式中:λ为¹⁸⁷Re的衰变常数1.666×10⁻¹¹a⁻¹; ¹⁸⁷Os为矿物中¹⁸⁷Os的摩尔浓度(mol/g); ¹⁸⁷Re为矿物中¹⁸⁷Re的摩尔浓度(mol/g)。实际应用中常采用质量浓度(10⁻⁹量级)进行归一化处理,以提升数据可比性。

得到4个点模式年龄值在误差范围内完全一致(表1),变化范围相对较小(223.8~227.4 Ma),且初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比值为(0.002±0.0003),该值远远低于地幔Os值(Stein et al, 2001),意味着样品的Re-Os系统封闭性好,说明通过辉钼矿中Re-Os法所测年龄结果可靠。综上所述,抱伦矿区辉钼矿Re-Os同位素年龄对应印支期,具体为晚三叠世。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

前人对海南岛岩浆岩和金成矿作用进行过大

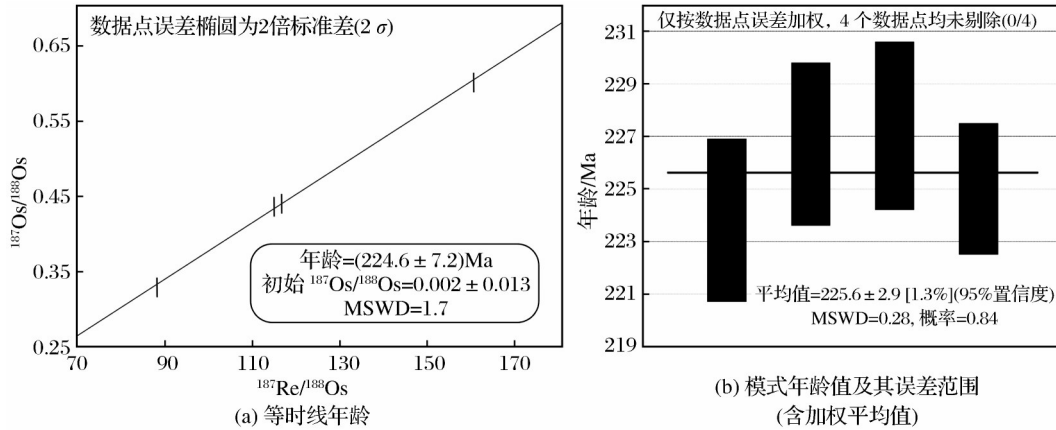


图4 抱伦金矿辉钼矿 Re-Os 同位素相关图解

Fig. 4 Re-Os isotopic correlation diagrams of molybdenite in the Baolun gold deposit

表1 抱伦金矿含金石英脉辉钼矿 Re-Os 模式年龄

Table 1 Re-Os model ages of gold-containing quartz vein molybdenite in the Baolun gold deposit

样品编号	样重/g	$\text{Re}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$^{187}\text{Re}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$^{187}\text{Os}/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$		年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	模式年龄	不确定度
BL-25-7-2	0.3641	0.2545	0.0006	0.1600	0.0004	0.5975	0.0083	223.8	3.1
BL-25-7-3	0.5971	0.1841	0.0002	0.1157	0.0002	0.4378	0.0059	226.7	3.1
BL-25-7-4	0.1752	0.1822	0.0004	0.1145	0.0003	0.4347	0.0061	227.4	3.2
BL-22	0.1196	0.1417	0.0004	0.0891	0.0002	0.3345	0.0036	225.0	2.5

量成岩成矿年代学研究,采用包括锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄、黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄、绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄和黑云母二长花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄在内的多种方法(表2)。通过综合分析这些研究成果并集成绘制图5,结果显示,海南岛岩浆作用集中于印支期和燕山期。其中,印支期岩浆作用年龄峰值位于 225~235 Ma 区间,而燕山期岩浆作用发生在 115~100 Ma。2 期构造—岩浆活动均与热液金成矿作用密切相关。印支期构造—岩浆活动引发了 245~224 Ma 的区域性变形/变质事件(Zhang et al, 2011; Liu et al, 2020),导致变质作用和岩浆岩的形成。燕山期岩浆作用与 110~100 Ma 岩浆热液型金矿形成相关(汪啸风, 1991; 付王伟等, 2014; 周岳强等, 2020)。海南岛金成矿作用表现出 2 期热液活动,印支期金成矿作用发生在 228~224 Ma,典型金矿床包括抱伦、戈枕和王下等,形成于变质岩中的脆—韧性剪切带内(Xu et al, 2017),成矿流体以 CO_2 富集、低盐度(周岳强等, 2020)和中温(Xu et al, 2017)

为标志。燕山期金成矿作用则与花岗质岩浆作用及层间滑脱断裂带的运动有关(吴传军等, 2011),典型矿床富文金矿显示出高温、高盐度流体特征(陈衍景等, 2007),兼具有岩浆水与大气降水混合来源(赵朝霞等, 2024),属典型岩浆热液型金矿。

根据前人研究,抱伦金矿的成矿时代归属存在较大争议,主要集中在印支期和燕山期。本文运用辉钼矿 Re-Os 同位素等时线定年法,确定抱伦金矿的金成矿年龄为 $(224.6 \pm 7.2)\text{Ma}$,与海南岛印支期岩浆作用及金成矿作用时限一致(图5)。结合区域地质背景,有学者认为抱伦金矿的形成与印支期(225~235 Ma)构造—岩浆活动存在密切联系,尤其是区域性的变形/变质事件(Zhang et al, 2011; Liu et al, 2020)。成矿流体特征显示其富含 CO_2 、低盐度,并具有中等温度(Xu et al, 2017; 周岳强等, 2020),进一步印证了抱伦金矿形成于变质岩中的脆—韧性剪切带。综合上述分析,认为抱伦金矿属于造山型金矿,其成矿过程与印支期岩浆活动和变形—变质作用密切相关,为区域构造—岩浆—成矿

表2 海南岛主要金矿床矿石及其伴生主岩和花岗岩类的年代学数据 (修改自 Xu et al, 2017)

Table 2 Geochronological data for the ore of the major gold deposits and associated host rocks and granitoids in Hainan Island (modified after Xu et al, 2017)

矿床名称	地质事件	方法	矿物/岩石类型	年龄/Ma	资料来源
戈枕矿床	岩浆作用	SHRIMP U-Pb	黑云母单斜长花岗岩中的锆石	251±7	海南省地质调查院区调队, 2007
抱伦矿床	岩浆作用	SHRIMP U-Pb	锆石	249±5	Xie et al, 2006
戈枕矿床	岩浆作用	SHRIMP U-Pb	黑云母单斜长花岗岩中的锆石	250±4	海南省地质局, 2017
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	戈枕剪切带内花岗岩质糜棱岩中的白云母	241.8±1.4 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	戈枕剪切带内花岗岩质糜棱岩中的白云母	245.0±2.0 (等时线)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	琼中地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	242.6±1.7 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	琼中地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	243.2±3.9 (等时线)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	琼中地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	242.0±1.7 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	琼中地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	240.3±4.8 (等时线)	Zhang et al, 2011
王下矿床	岩浆作用	常规 U-Pb	角闪石黑云母单斜长花岗岩中的锆石	ca 236~245	海南省地质局, 2017
抱伦矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	240±2.1	张小文等, 2009
抱伦矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	236±2	未发表数据
抱伦矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	238±5	未发表数据
抱伦矿床	岩浆作用	SHRIMP U-Pb	锆石	238.7±1.7	未发表数据
抱伦矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	黑云母	236.6±3.5	舒斌等, 2004
王下矿床	岩浆作用	Rb-Sr 等时线	黑云母单斜长花岗岩	238±6	海南省地质局, 2017
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	戈枕剪切带内糜棱岩化云母片岩中的白云母	230.4±1.1 (等时线)	Zhang et al, 2011
王下矿床	成矿作用	K/Ar	含金石英脉中的绢云母	231.5±3.6	覃海灿等, 2005
戈枕矿床	成矿作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	二家矿床糜棱岩型矿石中的绢云母	228±5 (坪年龄)	叶伯丹等, 1990
戈枕矿床	成矿作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	二家矿床糜棱岩型矿石中的绢云母	226±2 (等时线)	叶伯丹等, 1990
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	戈枕剪切带内糜棱岩化云母片岩中的白云母	229.6±0.3 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	戈枕剪切带内长英质糜棱岩中的白云母	227.4±0.2 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
王下矿床	成矿作用	K/Ar	含金石英脉中的绢云母	228.7±3.0	覃海灿等, 2005
抱伦矿床	成矿作用	Re-Os 等时线	金矿脉中的辉钼矿	224.6±7.2 (MSMD=1.7)	本文数据
戈枕矿床	岩浆作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	白沙地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	220.7±1.5 (坪年龄)	Zhang et al, 2011
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	白沙地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	223.9±4.5 (等时线)	Zhang et al, 2011
王下矿床	成矿作用	K/Ar	含金石英脉中的绢云母	221.9±2.8	覃海灿等, 2005
抱伦矿床	成矿作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	金矿脉中的白云母	219.4±0.6 (坪年龄)	舒斌等, 2004
抱伦矿床	成矿作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	金矿脉中的白云母	218.9±2.5 (等时线)	舒斌等, 2004
王下矿床	成矿作用	K/Ar	含金石英脉中的绢云母	212.8±3.0	覃海灿等, 2005
富文矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	黑云母花岗岩中的锆石	107.3±2.4	Wang et al, 2012b
富文矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	黑云母花岗岩中的锆石	108.1±1.7	Wang et al, 2012b
富文矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	花岗闪长岩中的锆石	100.8±2.4	付王伟等, 2014
富文矿床	岩浆作用	LA-ICP-MS U-Pb	花岗闪长岩中的锆石	100.2±1.7	付王伟等, 2014
戈枕矿床	变质/变形作用	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	白沙地区糜棱岩化花岗岩中的白云母	243.4±2.3	Liu et al, 2020

耦合的典型产物。

5.2 与区域动力学事件的关系

海南岛自中元古代以来经历了多期构造、岩浆、变质和成矿作用(Yan et al, 2017; Zhang et al, 2018; Liu et al, 2020; Dilek et al, 2021)。其中,印支期大地构造演化受特提斯构造域与环太平洋构造

域共同影响,形成了特征性的造山带地质背景,为大规模金成矿作用提供了有利条件(陈柏林等, 2004; Zhou et al, 2006; Cai et al, 2017; Yan et al, 2017)。

在印支期,海南岛存在大规模的造山型金成矿作用(Zhang et al, 2011; Xu et al, 2017; He et al,

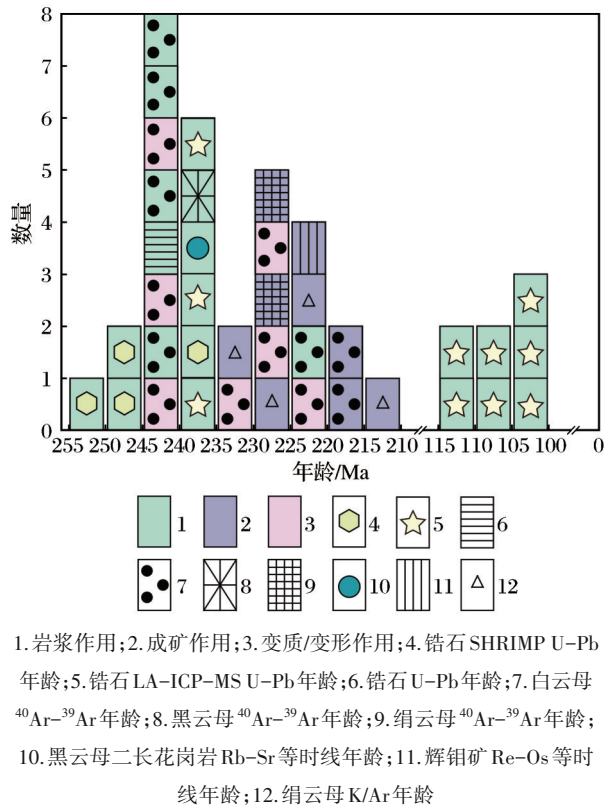


图5 海南岛主要地质事件时间图(数据来源于表2)

Fig. 5 Timing diagram of major geological events in Hainan Island (data sourced from Table 2)

2018)。在印支期构造背景下,古特提斯洋闭合导致华南板块与印支板块发生碰撞,引发了强烈的挤压—伸展构造转换(Jiang et al, 2015; Liu et al, 2020),形成大规模的剪切带和伸展构造,为金矿化提供了地质背景和成矿流体通道(Xu et al, 2017),而抱伦金矿床及其他主要金矿床主要分布于与戈

枕剪切带相关的变质岩中(图6)。抱伦金矿的成矿流体可能来源于变质水和岩浆水,同时混合了大气降水(舒斌等,2006; Wang et al, 2006),并萃取交代岩石圈地幔和变质基底中的金等成矿物质(舒斌等,2006;杨念等,2009)。在构造和岩浆作用的驱动下,成矿流体沿着NNW向空旷构造带向上运移(胡国成等,2016; Cai et al, 2017)。在次级断裂等沉淀场所中,成矿流体受减压沸腾作用(Xu et al, 2017; Yu et al, 2020b)、水岩反应诱发的硫化作用(Phillips et al, 1983; Xiong et al, 2020)和流体混合引起的降温作用等机制的综合作用,沉淀成矿。

在燕山晚期,海南岛的构造演化和岩浆活动呈现出如下特征:侏罗纪岩浆活动微弱,白垩纪岩浆活动则集中于110~100 Ma(图5)(Wang et al, 2012b; Xu et al, 2016; Sun et al, 2018; Dilek et al, 2021),与古太平洋板块俯冲后的板片回撤密切相关(Dilek et al, 2021; Guo et al, 2021),为已形成的金矿床注入热液流体,进一步促进了Au元素再富集和矿床成熟化,驱动了热液流体循环(唐立梅等, 2010; Wang et al, 2012a),为金矿成矿提供了有利条件。海南岛地处欧亚板块、太平洋板块与印度—澳大利亚板块的交汇地带,三者叠加的复合动力学背景有效推动了成矿流体的生成与迁移。

6 结论

(1)抱伦金矿床中与载金硫化物同期的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(224.6±7.2)Ma,由此可精确限定该金矿床成矿时代为晚三叠世,与印支期岩浆—

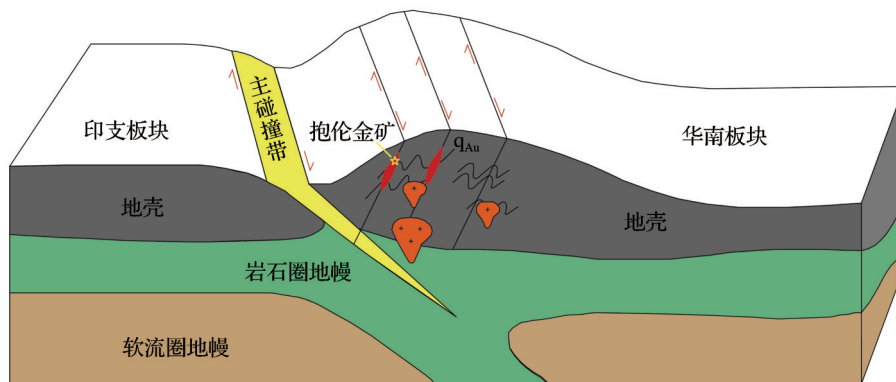


图6 海南岛成矿构造演化模式

Fig. 6 Metallogenic tectonic evolution model of Hainan Island

变质—构造变形作用同期,与古特提斯洋壳俯冲闭合及华南板块与印支板块在印支期的碰撞造山作用密切相关。

(2)海南岛在中生代存在2期金成矿作用。其中,印支期金成矿作用形成了包括抱伦在内的多个典型造山型金矿,区域挤压—伸展构造的转换为矿体提供了成矿通道和空间。在构造—岩浆活动驱动下,流体通过减压沸腾、水—岩反应等机制在次级断裂中沉淀成矿。燕山期的金成矿作用与古太平洋板块俯冲和回撤有关,为岩浆热液叠加成矿。

参考文献 (References):

- Cai J X, 2013. An Early Jurassic dextral strike-slip system in southern South China and its tectonic significance [J]. *Journal of Geodynamics*, 63: 27-44.
- Cai J X, Wu C J, Xu D R, et al, 2017. Structural analysis of the Baolun gold deposit, Hainan Island, South China: implications for metallogeny [J]. *Ore Geology Reviews*, 89: 253-269.
- Cai J X, Zhang K J, 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic [J]. *Tectonophysics*, 467(1/2/3/4): 35-43.
- Chang Z, Goldfarb R J, 2019. Mineral deposits of China [M]// Special publications of the Society of Economic Geologists. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists.
- Chung S L, Lan C Y, Lo C H, 1998. The Indosinian Orogeny and closure of eastern Paleo-Tethys: amalgamation between the Indochina and South China blocks in the Triassic [J]. *GEOSEA*, 98: 17.
- Dilek Y, Tang L M, 2021. Magmatic record of the Mesozoic geology of Hainan Island and its implications for the Mesozoic tectonomagmatic evolution of SE China: effects of slab geometry and dynamics in continental tectonics [J]. *Geological Magazine*, 158(1): 118-142.
- Ding S J, Hu J M, Song B, et al, 2005. U-Pb dating of zircon from the bed parallel anatectic granitic intrusion in the Baoban group in Hainan Island and the tectonic implication [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(12): 2092-2103.
- Guo F, Wu Y M, Zhang B, et al, 2021. Magmatic responses to Cretaceous subduction and tearing of the Paleo-Pacific Plate in SE China: an overview [J]. *Earth-Science Reviews*, 212: 103448.
- He H Y, Wang Y J, Qian X, et al, 2018. The Bangxi-Chenxing tectonic zone in Hainan Island (South China) as the eastern extension of the Song Ma-Ailaoshan zone: evidence of Late Paleozoic and Triassic igneous rocks [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 274-291.
- Jiang Y H, Wang G C, Liu Z, et al, 2015. Repeated slab advance-retreat of the Palaeo-Pacific plate underneath SE China [J]. *International Geology Review*, 57(4): 472-491.
- Lepvrier C, Maluski H, Van Vuong N, et al, 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) ⁴⁰Ar-³⁹Ar Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints [J]. *Tectonophysics*, 283(1/2/3/4): 105-127.
- Li X H, Zhou H W, Chung S L, et al, 2002. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance [J]. *Island Arc*, 11(3): 193-205.
- Liu H C, Zi J W, Cawood P A, et al, 2020. Reconstructing South China in the Mesoproterozoic and its role in the Nuna and Rodinia supercontinents [J]. *Precambrian Research*, 337: 105558.
- Liu J C, Wang Y T, Mao J W, et al, 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 [J]. *Ore Geology Reviews*, 168: 106052.
- Ma S Y, He B, Xia X P, et al, 2024. The development of a pull-apart basin in response to collision of the irregular South China continental margin with Indochina [J]. *GSA Bulletin*, 137(3/4): 1687-1702.
- Mafra C, Loucks R, Fiorentini M, 2024. Distinctive source and hydration state of gold-ore-forming arc magmas [J]. *Geology*, 53(3): 195-200.
- Phillips G N, Groves D I, 1983. The nature of Archaean gold-bearing fluids as deduced from gold deposits of Western Australia [J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 30(1/2): 25-39.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works [J]. *Terra Nova*, 13: 479-486.
- Sun S J, Zhang L P, Zhang R Q, et al, 2018. Mid-Late Cretaceous igneous activity in South China: the Qianjia example, Hainan Island [J]. *International Geology Review*, 60(11/12/13/14): 1665-1683.
- Wang K X, Chen P R, Chen W F, et al, 2012a. Magma mingling and chemical diffusion in the Taojiang granitoids in the Hunan Province, China: evidences from petrography, geo-

- chronology and geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 106(3): 243-264.
- Wang P A, Kaneda H, Ding S J, et al, 2006. Geology and mineralogy of the Baolun hydrothermal gold deposit in the Hainan Island, South China [J]. *Resource Geology*, 56 (2) : 157-166.
- Wang Q, Li X H, Jia X H, et al, 2012b. Late Early Cretaceous adakitic granitoids and associated magnesian and potassium-rich mafic enclaves and dikes in the Tunchang-Fengmu area, Hainan Province (South China) : partial melting of lower crust and mantle, and magma hybridization [J]. *Chemical Geology*, 328: 222-243.
- Xie C F, Zhu J C, Ding S J, et al, 2006. Identification of Hercynian shoshonitic intrusive rocks in central Hainan Island and its geotectonic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(20): 2507-2519.
- Xiong Y Q, Shao Y J, Jiang S Y, et al, 2020. Distal relationship of the Taihexian Pb-Zn-(Au) deposit to the Dengfuxian magmatic-hydrothermal system, South China: constraints from mineralogy, fluid inclusion, H-O-Pb and in situ S isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 127: 103826.
- Xu D R, Wang Z L, Cai J X, et al, 2013. Geological characteristics and metallogenesis of the Shilu Fe-ore deposit in Hainan Province, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 318-342.
- Xu D R, Wang Z L, Wu C J, et al, 2017. Mesozoic gold mineralization in Hainan Province of South China: genetic types, geological characteristics and geodynamic settings [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 80-108.
- Xu D R, Wu C J, Hu G C, et al, 2016. Late Mesozoic molybdenum mineralization on Hainan Island, South China: geochemistry, geochronology and geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 402-433.
- Yan Q S, Metcalfe I, Shi X F, 2017. U-Pb isotope geochronology and geochemistry of granites from Hainan Island (northern South China Sea margin) : constraints on Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 49: 333-349.
- Yu L L, Tian L H, Xu D R, et al, 2020a. H-O, S, He-Ar isotopes constrain on the genesis of the Baolun gold deposit in Hainan Island, South China [J]. *Geochemical Journal*, 54 (1) : 13-27.
- Yu L L, Xu D R, Chen W X, et al, 2020b. Geology and inclusion studies on the genesis of the Baolun gold deposit in Hainan Province, South China [J]. *Resource Geology*, 70 (4) : 336-347.
- Zhang F F, Wang Y J, Chen X Y, et al, 2011. Triassic high-strain shear zones in Hainan Island (South China) and their implications on the amalgamation of the Indochina and South China Blocks: Kinematic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. *Gondwana Research*, 19(4) : 910-925.
- Zhang L M, Wang Y J, Qian X, et al, 2018. Petrogenesis of Mesoproterozoic mafic rocks in Hainan (South China) and its implication on the southwest Hainan-Laurentia-Australia connection [J]. *Precambrian Research*, 313: 119-133.
- Zhang R Y, Lo C H, Li X H, et al, 2014. U-Pb dating and tectonic implication of ophiolite and metabasite from the Song Ma suture zone, northern Vietnam [J]. *American Journal of Science*, 314(2) : 649-678.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al, 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 29(1) : 26-33.
- 陈柏林, 李中坚, 董诚, 等, 2004. 海南抱伦金矿床控矿构造特征及其对金矿化的控制作用 [J]. *中国地质*, 31(2) : 139-146.
- Chen Bailin, Li Zhongjian, Dong Cheng, et al, 2004. Ore-controlling structure and its control over gold mineralization in the Baolun gold deposit, Hainan [J]. *Geology in China*, 31(2) : 139-146.
- 陈新跃, 2006. 海南海西、印支期构造变形及其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- Chen Xinyue, 2006. Hercynian and Indosinian Structural Overprinting and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Hainan Island-South China [D]. Guangzhou: Graduate School of The Chinese Academy of Sciences.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等, 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征 [J]. *岩石学报*, 23(9) : 2085-2108.
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al, 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9) : 2085-2108.
- 丁式江, 胡健民, 宋彪, 等, 2005. 海南岛抱板群内顺层侵位深熔花岗岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义 [J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 35(10) : 937-948.
- Ding Shijiang, Hu Jianmin, Song Biao, et al, 2005. U-Pb dating and its tectonic significance of bedding intrusive anatectic granite zircons in Baoban Group, Hainan Island [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 35(10) : 937-948.
- 丁式江, 黄香定, 李中坚, 等, 2001. 海南抱伦金矿地质特征及其成矿作用 [J]. *中国地质*, 28(5) : 28-34, 18.
- Ding Shijiang, Huang Xiangding, Li Zhongjian, et al, 2001. Geological characteristics and metallogenesis of the Baolun gold

- deposit in Hainan[J]. *Geology in China*, 28(5):28-34, 18.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,等,1994.辉钼矿的铼—钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4):339-347.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al, 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites [J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4):339-347.
- 杜安道,赵敦敏,王淑贤,等,2001. Carius管溶样—负离子热表面电质谱准确测定辉钼矿铼—钨同位素地质年龄[J]. *岩矿测试*, 20(4):247-252.
- Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al, 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4):247-252.
- 付王伟,许德如,吴传军,等,2014.海南省高通岭钼矿床赋矿岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义[J]. *矿床地质*, 33(2):419-427.
- Fu Wangwei, Xu Deru, Wu Chuanjun, et al, 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syenogranites hosting Gaotongling Mo deposit in Hainan Province: implications for metallogenesis [J]. *Mineral Deposits*, 33(2):419-427.
- 海南省地质调查院区调队,2004.1:25万琼海县幅区调报告[R].海口:海南地质调查院. Regional Survey Team, Hainan Institute of Geological Survey, 2004.1:250 000 Qionghai County regional geological survey report [R]. Haikou: Hainan Institute of Geological Survey.
- 海南省地质调查院区调队,2007.1:25万东方幅区调报告[R].海口:海南地质调查院. Regional Survey Team, Hainan Institute of Geological Survey, 2007.1:250 000 Dongfang regional geological survey report [R]. Haikou: Hainan Institute of Geological Survey.
- 海南省地质局,2017.海南志[M].北京:地质出版社. Hainan Bureau of Geology, 2017. *Geology of Hainan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 胡国成,吴传军,许德如,等,2016.海南抱伦矿区构造变形、成矿时代与金矿化关系研究[J]. *大地构造与成矿学*, 40(2):367-376.
- Hu Guocheng, Wu Chuanjun, Xu Deru, et al, 2016. Structural deformation, age of ore-formation and origin of Baolun gold deposit in Hainan Island, South China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2):367-376.
- 李明艳,刘玉琳,李相波,2006.海南抱伦造山型金矿的确认[J]. *矿床地质*, 25(增1):23-26.
- Li Mingyan, Liu Yulin, Li Xiangbo, 2006. The determination of the Baolun orogenic gold deposits in Hainan Province [J]. *Mineral Deposits*, 25 (Suppl.1):23-26.
- 梁光河,2018.海南岛的成因机制研究[J]. *中国地质*, 45(4):693-705.
- Liang Guanghe, 2018. A study of the genesis of Hainan Island [J]. *Geology in China*, 45(4):693-705.
- 梁新权,李献华,丘元禧,等,2005.华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 29(1):99-112.
- Liang Xinquan, Li Xianhua, Qiu Yuanxi, et al, 2005. Indosinian collisional orogeny: evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1):99-112.
- 廖香俊,王平安,丁式江,等,2005.海南岛主要成矿系列与矿床成矿规律研究[J]. *地质力学学报*, 11(2):187-194.
- Liao Xiangjun, Wang Ping'an, Ding Shijiang, et al, 2005. Main minerogenetic series and metallogenic characteristics on Hainan Island [J]. *Journal of Geomechanics*, 11(2):187-194.
- 刘玉琳,丁式江,张小文,等,2002.海南乐东抱伦金矿床成矿时代研究[J]. *地质论评*, 48(增刊1):84-87.
- Liu Yulin, Ding Shijiang, Zhang Xiaowen, et al, 2002. Ore-forming age of the Baolun gold deposit, Ledong County, Hainan [J]. *Geological Review*, 48(Suppl.1):84-87.
- 马大铨,黄香定,陈哲培,等,1997.海南省抱板群研究的新进展[J]. *中国区域地质*, 16(2):19-25, 81.
- Ma Daquan, Huang Xiangding, Chen Zhepei, et al, 1997. New advanced in the study of the Baoban group in Hainan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 16(2):19-25, 81.
- 欧阳海涛,2013.海南抱伦金矿成矿地质特征与条件分析[J]. *矿业装备*, (1):92-94.
- Ouyang Haitao, 2013. Analysis of metallogenic geological characteristics and conditions of Baolun gold deposit in Hainan [J]. *Mining Equipment*, (1):92-94.
- 舒斌,王平安,董法先,等,2006.海南乐东地区抱伦金矿矿石特征及其成因矿物学意义[J]. *地质通报*, 25(6):745-755.
- Shu Bin, Wang Ping'an, Dong Faxian, et al, 2006. Ore characteristics and minerageny of the Baolun gold deposit in the Ledong area, Hainan Island, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(6):745-755.
- 舒斌,王平安,李中坚,等,2004.海南抱伦金矿的成矿时代研究及其意义[J]. *现代地质*, 18(3):316-320.
- Shu Bin, Wang Ping'an, Li Zhongjian, et al, 2004. Research on mineralizing age of Baolun gold deposit in Hainan Province and its significance [J]. *Geoscience*, 18(3):316-320.
- 覃海灿,傅杨荣,张小文,等,2005.海南王下牙老金矿地质特征及找矿方向[J]. *矿产与地质*, (2):144-149.
- Qin Haican, Fu Yangrong, Zhang Xiaowen, et al, 2005. Geological feature and ore-prospecting direction for Yalao gold mining district in Wangxia, Hainan Province [J]. *Mineral*

- Resources and Geology, (2): 144-149.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 2010. 中国东南部晚中生代构造伸展作用: 来自海南岛基性岩墙群的证据[J]. 岩石学报, 26(4): 1204-1216. Tang Limei, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, et al, 2010. Late Mesozoic tectonic extension in SE China: evidence from the basic dike swarms in Hainan Island, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1204-1216.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 2013. 海南岛中三叠世造山后伸展作用: 双峰式侵入岩的年代学及地球化学制约[J]. 中国科学: 地球科学, 43(3): 433-445. Tang Limei, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, et al, 2013. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: chronology and geochemistry constraints of bimodal intrusive rocks[J]. Scientia Sinica(Terrae), 43(3): 433-445.
- 汪啸风, 1991. 海南岛地质(三)构造地质[M]. 北京: 地质出版社. Wang Xiaofeng, 1991. Geology of Hainan Island (Part 3): structural geology[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 吴传军, 许德如, 傅杨荣, 等, 2011. 海南岛重要类型金矿床成矿规律与成矿机制研究[J]. 矿物学报, 31(增刊1): 873-874. Wu Chuanjun, Xu Deru, Fu Yangrong, et al, 2011. Metallogenic regularity and mechanism of important types of gold deposits in Hainan Island[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(Suppl.1): 873-874.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等, 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系[J]. 岩石学报, 22(10): 2493-2508. Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, et al, 2006. Age and petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hainan Island[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2493-2508.
- 许德如, 马驰, 李鹏春, 等, 2007. 海南岛变碎屑沉积岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(3): 381-393. Xu Deru, Ma Chi, Li Pengchun, et al, 2007. U-Pb SHRIMP-dating of zircon domains from metaclastic sedimentary rocks in Hainan Island, South China, and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 81(3): 381-393.
- 许德如, 夏斌, 李鹏春, 等, 2006. 海南岛北西部前寒武纪花岗岩质 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 30(4): 510-518. Xu Deru, Xia Bin, Li Pengchun, et al, 2006. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Precambrian granitoids in northwest Hainan Island and its geological implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 30(4): 510-518.
- 薛建玲, 庞振山, 程志中, 等, 2025. 中低温岩浆热液型金矿床找矿预测地质模型[J]. 岩石学报, 41(1): 4-30. Xue Jianling, Pang Zhenshan, Cheng Zhizhong, et al, 2025. Geological model for prospecting and prediction of medium to low temperature magmatic-hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 41(1): 4-30.
- 杨念, 洪汉烈, 张小文, 等, 2009. 海南乐东抱伦金矿金矿物的特征研究[J]. 矿物岩石, 29(2): 31-37. Yang Nian, Hong Hanlie, Zhang Xiaowen, et al, 2009. Study of gold-bearing minerals in the Baolun gold deposit, Ledong, Hainan Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 29(2): 31-37.
- 叶伯丹, 朱家平, 1990. 海南东方二甲抱板群和金矿的时代[J]. 地质找矿论丛, 5(1): 12-17. Ye Bodan, Zhu Jiaping, 1990. The time of the Baoban Group and gold ore at Erjia, Dongfang, Hainan Province, China [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 5(1): 12-17.
- 俞受望, 夏萍, 邓铁殷, 等, 1992. 海南抱板地区中元古代花岗岩副矿物锆石的特征及 U-Pb 同位素年龄测定[J]. 地球化学, 21(3): 213-220, 313. Yu Shouwang, Xia Ping, Deng Tieyin, et al, 1992. Characteristics and U-Pb isotopic ages of zircons in the middle Proterozoic granitoids from Baoban area, Hainan Province [J]. Geochimica, 21(3): 213-220, 313.
- 张小文, 向华, 钟增球, 等, 2009. 海南尖峰岭岩体热液锆石 U-Pb 定年及微量元素研究: 对热液作用及抱伦金矿成矿时代的限定[J]. 地球科学, 34(6): 921-930. Zhang Xiaowen, Xiang Hua, Zhong Zengqiu, et al, 2009. U-Pb dating and trace elements composition of hydrothermal zircons from Jianfengling granite, Hainan: restriction on the age of hydrothermal event and mineralization of Baolun gold deposit [J]. Earth Science, 34(6): 921-930.
- 赵朝霞, 许德如, 官军, 等, 2024. 海南岛富文金银多金属矿床成矿流体演化: 来自流体包裹体和 H-O 同位素证据[J]. 地球化学, 53(4): 564-576. Zhao Zhaoxia, Xu Deru, Guan Jun, et al, 2024. Evolution of ore-forming fluids in the Fuwen gold-silver polymetallic deposit in Hainan Island: fluid inclusion and H-O isotope evidence [J]. Geochemistry, 53(4): 564-576.
- 周岳强, 许德如, 赵朝霞, 等, 2020. 海南抱伦金矿区辉绿岩脉的成因及其对金成矿的启示[J]. 岩石学报, 36(2): 541-559. Zhou Yueqiang, Xu Deru, Zhao Zhaoxia, et al, 2020. Origin of the diabase dykes from the Baolun gold deposit in Hainan Province and their implications on gold mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 36(2): 541-559.

Geochronological Study on the Baolun Gold Deposit in Hainan Island

CAI Lin¹, XU Deru^{1,2,3}, SHAN Qiang², SU Weizheng¹

1. East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

3. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

Abstract: Hainan Island, located in the southern region of the South China Block, has experienced a complex tectonic evolution, notably influenced by the Triassic Indosinian orogeny, characterized by terrane collisions, magmatism, and metamorphism. Within this geological context, the Baolun gold deposit, situated in the exocontact zone of the Jianfeng granitic intrusion in southwestern Hainan and recognized as the island's largest high-grade gold resource, has presented longstanding questions concerning its metallogenic age and genesis. To resolve these uncertainties, Re-Os isotopic dating of molybdenite extracted from auriferous quartz veins has been conducted, yielding model ages ranging from 223.8 to 227.4 Ma and an isochron age of (224.6 ± 7.2) Ma. These results definitively constrain the mineralization to the Late Triassic Indosinian epoch, aligning it temporally with regional tectonic, magmatic, and metamorphic activities. The deposit exhibits characteristics typical of orogenic gold systems, including a compressional tectonic setting, control by crustal-scale faults, and quartz-sulfide vein mineralization. Fluid generation is attributed to devolatilization processes during Indosinian metamorphism, with additional magmatic contributions from the Jianfeng intrusion. Structural transitions from compression to extension facilitated fluid migration along shear zones and faults, ultimately leading to ore deposition. These findings not only confirm Baolun as a definitive orogenic gold deposit but also underscore the exploration potential in similar tectonic settings across Hainan. This study provides a genetic model that integrates metamorphic, magmatic, and structural controls, offering a framework for targeting such deposits in complex orogenic terranes.

Key words: mineralization ages; Re-Os isotopic dating; molybdenite; Indosinian period; orogenic gold deposit; Baolun gold deposit

新疆南疆发现一条近千公里“硒腰带”

历时9年,新疆维吾尔自治区自然资源厅、中国地质调查局西安地调中心在南疆完成近 $21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 土壤地球化学调查,首次全面摸清了南疆土壤的54种元素和指标数据,发现一条沿天山南麓横跨千公里的“硒腰带”。

自治区地质勘查管理中心主任王卫江介绍,这条“硒腰带”东起焉耆盆地、经阿克苏地区、西至克孜勒苏柯尔克孜自治州,富硒土地近4900万亩,其中富硒耕地1130万亩,占南疆耕地面积的27%。

这次调查数据基于土壤养分丰缺程度,划定优质耕地90.81万亩、绿色食品产地土壤适宜区210.27万亩,主要分布在焉耆盆地、库拜盆地、阿克苏河沿线和喀什西部等地区。

王卫江说,全面摸清南疆土壤的“元素家底”,为耕地保护、高标准基本农田建设,以及发展特色农业、健康食品产业奠定了坚实基础。此次调查也形成了南疆迄今为止最为系统、空间精度最高、指标最全的土壤地球化学填图国情实测数据。

(来源:中国矿业网)