

海南抱伦金矿区辉绿岩脉的成因及其对金成矿的启示*

周岳强^{1,2,3} 许德如^{1,4**} 赵朝霞^{1,2} 单强¹ 董国军³ 宁钧陶³ 朱昱桦^{1,2}

ZHOU YueQiang^{1,2,3}, XU DeRu^{1,4**}, ZHAO ZhaoXia^{1,2}, SHAN Qiang¹, DONG GuoJun³, NING JunTao³ and ZHU YuHua^{1,2}

1. 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, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 湖南省地质矿产勘查开发局四〇二队, 长沙 410004

4. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Team 402, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Changsha 410004, China

4. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2019-01-04 收稿, 2019-10-04 改回.

Zhou YQ, Xu DR, Zhao ZX, Shan Q, Dong GJ, Ning JT and Zhu YH. 2020. Origin of the diabase dykes from the Baolun gold deposit in Hainan Province and their implications on gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2):541–559, doi:10.18654/1000-0569/2020.02.13

Abstract A large number of diabase dykes were observed spatially associated with the auriferous quartz veins in the Baolun gold deposit in Hainan Province. Based on systematic field investigation, an integrated study of petrographical and mineralogical work, whole-rock major and trace elements, Sm-Nd isotopes and Au abundance analysis, as well as zircon SHRIMP (sensitive high mass-resolution ion microprobe) U-Pb dating has been undertaken on these diabase dykes to provide primary insights into their magmatic sources, evolutionary processes and associated tectonic environment, and to evaluate the relations between the diabase dykes and gold mineralization in the Baolun deposit. Geochemically, these diabase dykes can be classified into tholeiitic magma series, which are characterized by left-deeping REE pattern. In addition, compared with N-MORB, the diabase dykes are rich in large ion lithophile elements (LILEs), such as Sr, K, Rb and Ba, and depleted in high field strength elements (HFSEs). Their $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (ranging between 0.3 and 5.6) suggest that these diabase dykes were likely derived from a depleted mantle source that had been metasomated by fluids from subduction zone and contaminated by the crust. The diabase dykes in the Baolun deposit have been dated at 231.6 ± 2.6 Ma through SHRIMP U-Pb zircon method, which is close to the crystallization age of the Jianfengling granite (236 ± 3.5 Ma ~ 249 ± 5 Ma). Combined with the adjacent occurrences, the diabase dykes and the Jianfengling granite show characteristics of bimodal magmatic rocks, and thus a post-collisional environment is probably suitable for the generation of the protolith of the diabase dykes, which is consistent with the bimodal intrusive rocks in the Shuanglong area, Hainan Island. The magma for the diabase dykes is enriched in CO_2 , H_2O , F, K, Rb and Ba as well as S, being a proper carrier for Au in the Baolun gold-only deposit. Au abundances also indicate that Au in the diabase dykes might have been reactivated and migrated. Further more, the diagenetic age of the diabase dykes is in agreement with the mineralization age of the Baolun deposit. Au in the Baolun gold deposit is thus considered to be sourced from these diabase dykes.

Key words Diabase dyke; Magmatic origin; Post collision; Carrier for Au; Baolun gold deposit; Hainan Province

摘要 海南抱伦金矿区的金矿脉与大量辉绿岩脉在空间上紧密相关。在详细的野外地质调查基础上, 本文对这些辉绿

* 本文受国家重点研发计划项目(2016YFC0600401)和国家自然科学基金项目(41930428)联合资助。

第一作者简介: 周岳强, 男, 1985年生, 博士生, 工程师, 构造地质学专业, E-mail: zyq10_01@163.com

** 通讯作者: 许德如, 男, 1966年生, 教授, 博导, 大陆边缘构造与成矿学专业, E-mail: xuderu@gig.ac.cn

岩脉开展了岩相学和矿相学观察、全岩主量和微量元素分析、Sm-Nd 同位素组成分析、金丰度分析以及 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,初步探讨了辉绿岩脉的成因、岩浆演化和构造背景以及与金成矿作用的关系。地球化学分析结果表明,辉绿岩脉形成于拉斑玄武质岩浆,主要为左倾型的稀土配分模式;相对 N-MORB,富集 Sr、K、Rb 和 Ba 等 LILE 和 Th,亏损 HFSE, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 0.3 ~ 5.6,说明岩浆源区为受到俯冲带含水流体影响和少量地壳混染的亏损地幔。辉绿岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 231.6 ± 2.6 Ma,与尖峰岭花岗岩体的年龄 (236 ± 3.5 Ma ~ 249 ± 5 Ma) 相近,产出位置相邻,类似于海南兴隆地区的双峰式侵入岩,表明它们产出于造山后伸展环境。辉绿岩脉对应的岩浆富含 CO_2 、 H_2O 、F、K、Rb、Ba 和适量的 S,为抱伦金矿等单金矿床中 Au 的合适载体。金丰度分析结果表明,辉绿岩脉中的 Au 曾被活化迁移。再结合辉绿岩脉成岩年龄与抱伦矿区的成矿年龄在误差范围内一致的特征,认为抱伦金矿的 Au 可能来源于辉绿岩脉。

关键词 辉绿岩脉;岩浆成因;后碰撞;Au 运移载体;抱伦金矿床;海南省

中图分类号 P588.124; P618.51

早在二十世纪七十年代,学者们就曾在普通二辉橄辉岩捕掇体中发现了 Au (Frey and Green, 1974)。近几十年来,在对世界各地金矿床的研究过程中,学者们更是发现众多的金矿床在时间和空间上与基性岩、超基性岩有着密切的关系,其中包括加拿大 Superior 绿岩带 (Kitney *et al.*, 2011; Simard *et al.*, 2013)、Red lake 绿岩带 (Gulson *et al.*, 1993)、西非加纳 Ashanti 带 (Berge, 2011)、芬兰北部 CLG 带 (Eilu *et al.*, 2003) 和澳大利亚东南部 Heathcote 绿岩带 (Bierlein *et al.*, 1998) 的部分金矿床,澳大利亚西部 Eastern Goldfields 绿岩带的超大型 Kalgoorlie 金矿床 (Berge, 2013)、North Caribou 绿岩带的 Musselwhite 金矿床 (Biczok *et al.*, 2012) 以及瑞典北部 Skellefte 地区的金矿床 (Berge, 2013) 等。在中国,云南墨江金厂金矿床、河北赤城金家庄金矿床、新疆托里县萨尔托海金矿床、吉林延吉后底洞金矿床和陕西略阳煎茶岭金矿床的金矿床均赋存于基性-超基性岩与围岩的接触带或直接产于基性-超基性岩中 (谢贵明, 1992)。从地球化学成分上来说,基性岩浆 (特别是煌斑质岩浆) 中含有所有火成岩中最高含量的 CO_2 、 H_2O 、F、K、Rb 和 Ba,且同时含有适量的 S,是 Au 运移的合适载体 (Rock and Groves, 1988)。近十多年来的研究进一步表明,基性岩浆确实可能在这类金矿床的成矿作用中提供了 Au (Rusinov *et al.*, 2005; Kamenov *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2012; Berge, 2013)。

抱伦金矿床位于海南岛的西南部,目前由海南省地质局和海南山金矿业有限公司共同勘查和开采。该矿床已探明金金属资源量 80 吨以上,平均品位达 10.3 g/t (Ding *et al.*, 2005; 陈颖民等, 2011),是海南省目前储量最大的高品位金矿床。抱伦金矿床的矿体赋存于下志留统陀烈组中,受 NNW 向断裂破碎带控制 (丁式江等, 2007)。自 1992 年被发现以来,许多单位和学者对其成矿时代、成矿流体和成矿物质来源进行了相关研究。前人通过白云母 K-Ar、Ar-Ar 同位素和伊利石 K-Ar 同位素测定的抱伦金矿床的成矿年龄分布于 205 ~ 221 Ma 之间 (陈柏林等, 2001; 刘玉琳等, 2002; 舒斌等, 2004)。最新测定的抱伦金矿床矿石中与 Au 共生的辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 224.6 ± 7.2 Ma (Xu *et al.*, 2017),与以前得到的成矿年龄值基本一致。然而,对于其成矿物质和成矿流体来源目前仍然存在着较大的争议。因矿区下志

留统陀烈组的金丰度平均值较高 (达到 5.58×10^{-9}),最初有观点认为陀烈组为抱伦金矿床提供了部分成矿物质 (丁式江等, 2001)。但近年来的研究表明,远离矿体处的陀烈组岩石金丰度值与地壳克拉克值接近,这表明陀烈组不是矿源层 (钟增球, 2010^①)。抱板群岩石的 Au、Bi 等元素含量高,因此,也有观点认为抱伦金矿床的成矿物质来源于抱板群 (谢才富等, 2006)。相比前两种观点,目前大多数学者认为该地区的侵入岩为抱伦金矿床提供了成矿物质和成矿流体 (丁式江等, 2001; 舒斌等, 2004, 2006; 钟增球, 2010)。其中,有人认为是尖峰岩体 (丁式江等, 2001; 舒斌等, 2004, 2006),也有人认为是隐伏的燕山期侵入岩 (钟增球, 2010)。

近年来,我们在对抱伦金矿进行研究的过程中,于矿井中发现了大量的辉绿岩脉,并发现其与金矿脉在空间上紧密伴生。为了探讨这些辉绿岩脉与金成矿的关系,为抱伦金矿床的成因提供进一步制约,我们通过野外观察和采样、薄片鉴定,结合全岩主量和微量元素分析、Sm-Nd 同位素分析、SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和全岩金丰度分析,对这些辉绿岩脉的岩浆源区特征、岩浆演化过程、岩浆侵位的大地构造背景及其提供金成矿物质的能力进行了较详细的研究。

1 区域地质与矿床地质特征

海南岛位于华南地块的西南缘,并通过琼州海峡与后者相连。大地构造位置上,海南岛处于太平洋板块、印度-澳大利亚板块和欧亚板块的交汇部位 (图 1a),因此有着复杂的地质演化历史,并形成了多种类型的金属矿床 (Xu *et al.*, 2016, 2017)。

海南岛地层出露较完全,除泥盆系和侏罗系外,中元古界长城系到第四系都有发育 (图 1b)。根据近年来同位素和地质年代学的研究成果,海南岛还可能存在着太古宙的基底 (许德如等, 2001, 2007; Li *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2007)。海南岛断裂和褶皱构造都较发育,主要构造方向为近东西向和北东向,局部地区为北西向和近南北向。岩浆岩在海南岛出

① 钟增球. 2010. 海南抱伦金矿扩大矿产规模可能性的地质研究 (内部资料). 1-104

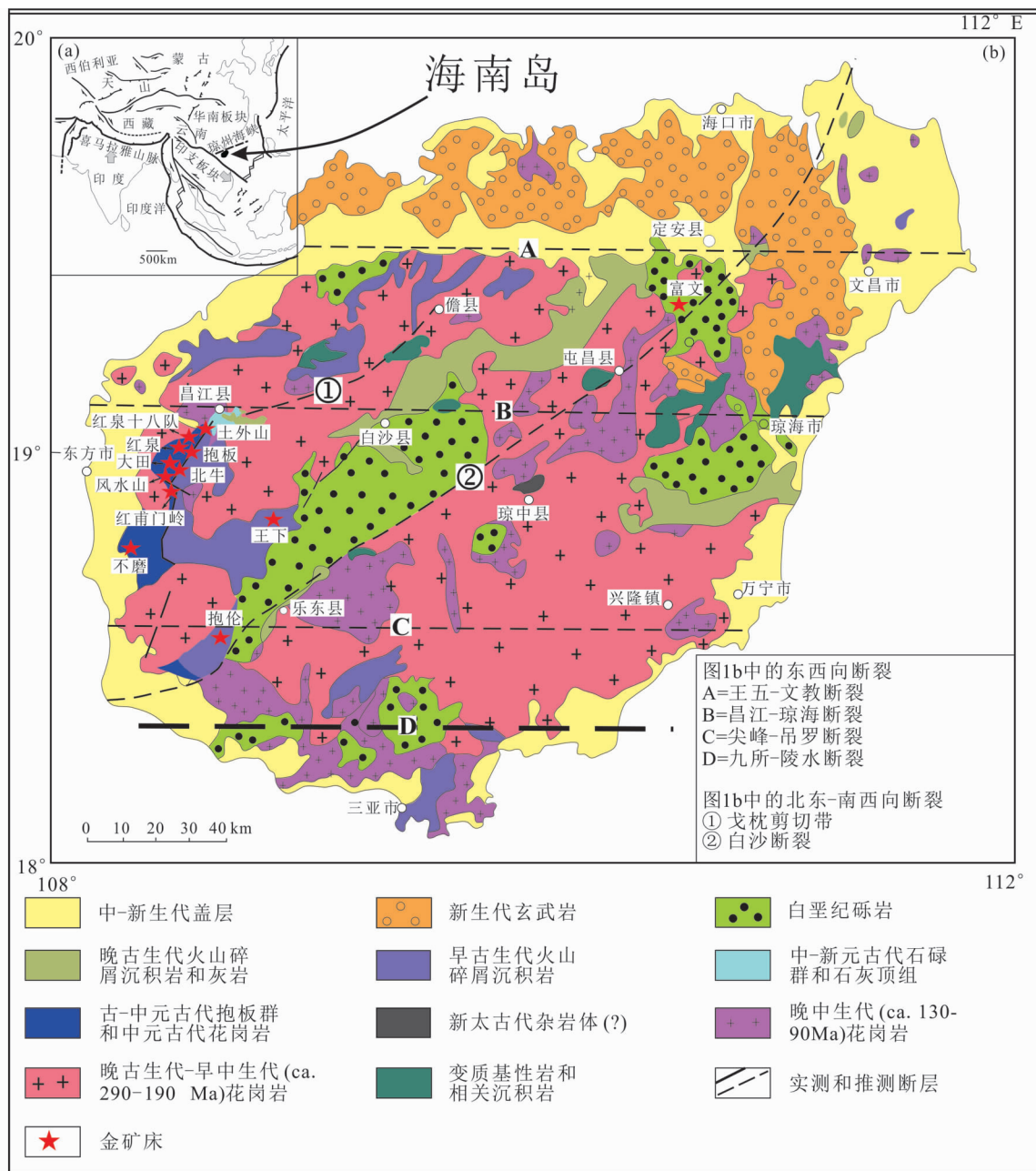


图1 海南省构造地质图(据 Xu *et al.*, 2013)

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

露尤其广泛,占全岛面积的51%,其中又以侵入岩为主(汪啸风等,1991)。侵入岩除震旦纪、早古生代和新生代外,各个时代都有产出,主要呈酸性和中酸性。晚古生代至早中生代(约290~190Ma)的花岗岩非常发育,且均分布于王五-文教深大断裂以南的地区,其中包括琼中岩体和尖峰岩体等大的岩基。火山岩主要分布于九所-陵水深大断裂以北地区,自中元古代至新生代都有发育。其中,古生代火山岩呈夹层状产出于奥陶系南碧沟组和石炭系南好组中。中生代火山岩在早白垩世陆相火山盆地和陆相火山-沉积盆地都有产出。新生代火山岩面积最广,主要分布于琼北地区,岩性主

要为基性火山熔岩,部分为火山碎屑岩(图1b)。海南岛发育有大小规模不等的金矿床、矿(化)点达50余个,其中最具有经济意义的有抱伦金矿床、戈枕金成矿带(含土外山、抱板、北牛、红泉十八队、红泉、大田、风水山、红甫门岭和不磨等)、富文金矿床和王下金矿床(图1b)。

抱伦金矿床位于海南岛的西南部。矿区出露的地层有白垩系鹿母湾组、报万组以及下志留统陀烈组的中段和下段(图2)。陀烈组为抱伦金矿的赋矿地层,其北西侧与尖峰岩体呈侵入接触,南东侧与白垩系报万组和鹿母湾组通过铁湾岭断裂呈断层接触,总体呈北东-南西向展布的楔形。陀烈

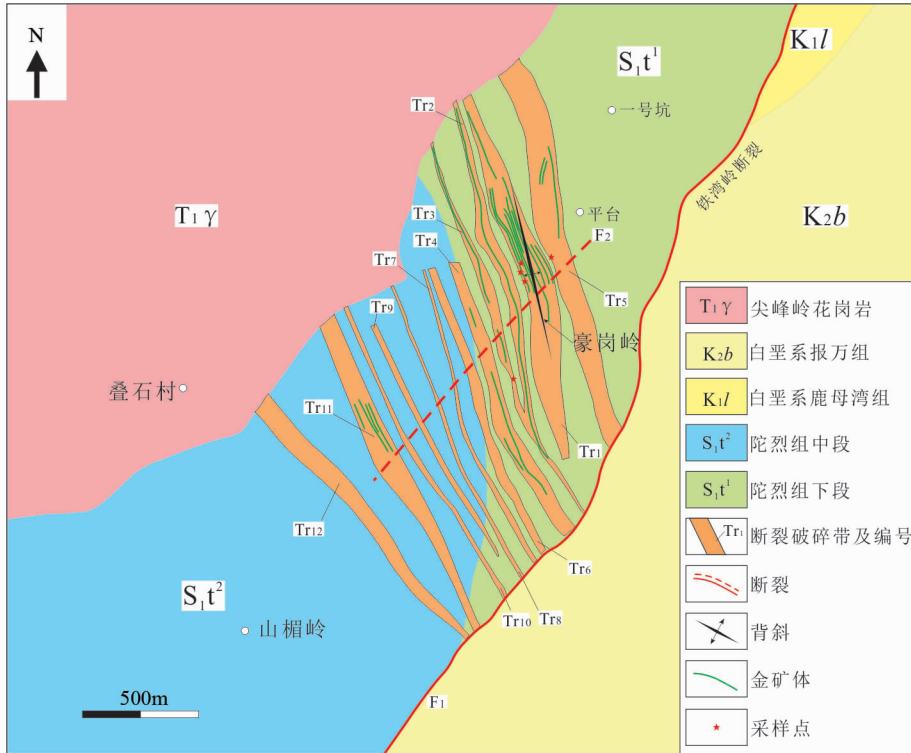


图2 抱伦金矿区地质简图(据 Xu *et al.*, 2017)及辉绿岩脉采样点分布

Fig.2 Geological map of the Baolun gold deposit (modified after Xu *et al.*, 2017) with sampling positions of the diabase dykes

组中段厚度 849m 左右,主要岩性为含碳千枚岩;下段厚度大于 560m,主要岩性为绢云母石英千枚岩和绢云母粉砂岩(符国祥和符策锐,1999)。鹿母湾组和报万组位于矿区的东南部,均为砾质砂岩和含砾砂岩,其中鹿母湾组内部夹有凝灰岩。报万组整合于鹿母湾组之上。矿区构造较发育,主要有豪岗岭背斜、发育于豪岗岭背斜核部的一系列断裂破碎带、铁湾岭断裂(F₁)以及矿区中部的 F₂ 断层(图2)。豪岗岭背斜发育于陀烈组中,核部为陀烈组下段的绢云母石英千枚岩,两翼为陀烈组中段的含碳千枚岩。断裂破碎带发育于豪岗岭背斜的转折端至核部,和陀烈组有一定的交角。矿区的侵入岩主要为尖峰复式岩体,主要岩性为中粗粒似斑状黑云母正长花岗岩,块状构造。沿矿区北北东向裂隙和局部层间裂隙还发育有细晶岩脉。

抱伦金矿区目前共发现 27 个矿体,主要赋存于一系列 NNW 向的断裂破碎带中(图2),其产状与后者基本一致。其中,断裂破碎带 Tr₁ 中的 V₁₋₃ 矿体和断裂破碎带 Tr₄ 中的 V₄₋₁ 矿体规模最大,两者金金属资源量之和占抱伦金矿总资源量的 44.34% (矿体 V₁₋₃ 占 32.36%,矿体 V₄₋₁ 占 11.98%)。矿体多成脉状、透镜状和似透镜状产出,有膨缩尖灭再现或尖灭侧现现象,尖灭再现的距离通常在几米之内,主要为右斜列尖灭再现(丁式江等,2007)。矿体局部被小断层错断。矿石类型可分为石英脉型和蚀变岩型,其中石英脉型的品位较高,是主要的矿石类型。矿石金属矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿,也有少量的方铅矿和闪锌矿,微量的黄铜矿、毒砂、

自然金、银金矿以及铋矿物(含自然铋、黑铋金矿、辉铋矿、硫铋矿等)。脉石矿物以石英最为常见,其次为方解石、白云母、绢云母和金红石,此外还有少量伊利石和高岭石等黏土矿物。矿石 Ag/Au 比值低,且富含铋矿物(Xu *et al.*, 2017)。

本次研究的辉绿岩脉主要在矿区 400m、130m 和 75m 中段被揭露。岩石呈灰黑色、灰绿色,一般为细粒,呈脉状、透镜状产出,整体走向为 340°,与围岩和矿体基本一致,但倾向变化大,表现出顺层或沿构造面理侵入的特征(表1)。辉绿岩脉脉宽 0.4~6m 不等,延伸较大者沿走向长达 1km 以上。辉绿岩脉局部见石英和围岩透镜体,但两者接触面平整,无冷凝边(图 3a-d)。

2 样品描述和分析方法

本文中的辉绿岩脉样品采于矿区的坑道内。为了排除和尽量减小矿化和蚀变作用对辉绿岩脉的影响,本次研究的样品均采自脉体宽大的辉绿岩脉。采样处离辉绿岩脉边部较远,且未观察到石英脉和地层的混染。根据矿区坑道平面图将采样位置投影到地面如图2所示。

辉绿岩脉由斜长石、角闪石、辉石和少量黑云母和碳酸盐组成(图 4a-c)。斜长石呈自形-半自形,板条状,发育卡纳复合双晶,部分发生绿帘石-黝帘石化(图 4c),构成三角形格架。辉石发生强烈蚀变,蚀变为角闪石和碳酸盐等,充填于较自形的斜长石构成的三角形空隙之中,呈辉绿结构(图 4b)。

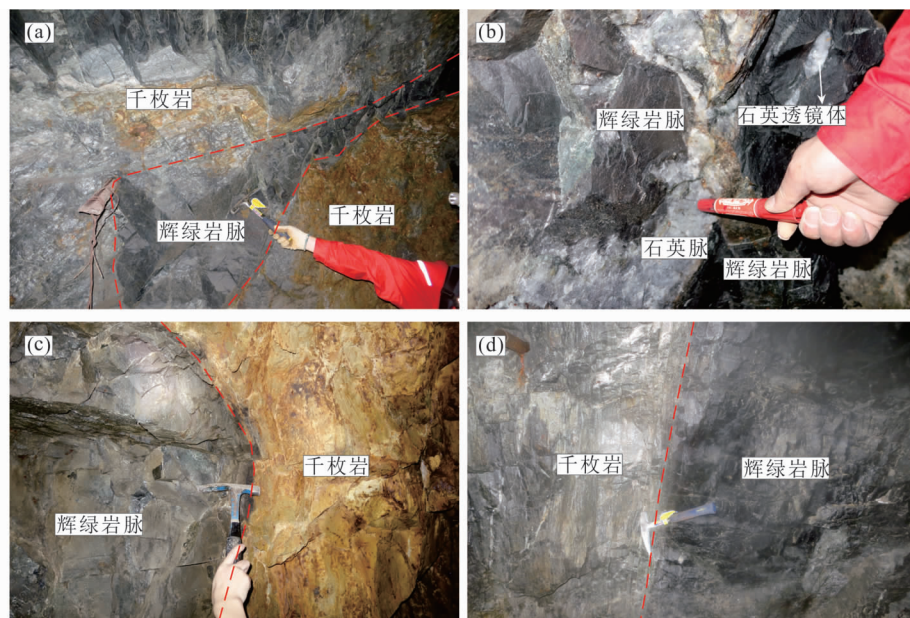


图3 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉野外照片

(a)窄的辉绿岩脉与千枚岩接触;(b)窄的辉绿岩脉与石英脉错杂在一起,脉中有石英透镜体;(c、d)宽的“干净”辉绿岩脉与千枚岩接触

Fig.3 Field photographs of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

表1 海南省抱伦金矿辉绿岩脉的产状特征

Table 1 Occurrences of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

观测地点	产状	脉宽	特征
1号洞北主巷,20°方向 H672m 处	走向 340°	1m	脉中有石英透镜体
1号洞北主巷测点,H7 南 10m	走向 340°	0.5 ~ 0.6m	脉中见地层捕掳体
1号洞北主巷测点,H7 南 22m	走向 340°	0.5m	
75 中段 117-119 主巷		0.5m	脉中见地层捕掳体和石英透镜体
1号洞北主巷错车道处南端		0.4 ~ 0.55m	脉中见石英透镜体,立方体黄铁矿
1号洞北主巷	走向 340°		
1号洞 V ₅₂ 矿体主巷口(H163 样对面)	走向 340°,倾角 70°	1.4m	脉中有含黄铁矿、磁黄铁矿石英细脉
400 中段 15 观测点		5m	
400 中段 Y13810 采场 110 线		4 ~ 6m	
24 队 130 中段北主巷 0 线	296° ∠ 50°	6m	
75 中段北主巷 109 穿口位置	310° ∠ 52°	6m	辉绿岩脉与地层平整接触,无冷凝边
400 中段,109 线西,V ₁₄ 矿体附近	13° ∠ 68°	5m	

金属矿物主要为磁铁矿,其次为黄铁矿和黄铜矿(图4d)。

将采集的5个辉绿岩脉样品洗净晾干,粉碎至200目,进行了主量元素、微量元素和Sm-Nd同位素分析,分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。样品的金丰度分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。

首先采用碱熔法将样品制成玻璃片,然后在X射线荧光光谱仪(XRF)上运用湿化学方法完成主量元素含量的测定,具体步骤参照李献华等(2005)。测定微量元素含量时,运用

酸溶液法制备样品,在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和全谱直读电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)上完成测定。通常,主量元素(H₂O⁺除外)分析结果的误差(相对标准偏差值)小于3%,稀土元素和Y小于4%,其它微量元素在3~7%之间,具体分析流程参考刘颖等(1996)。

Sm-Nd同位素的分析方法参考Ma *et al.* (1998)。同位素组成在Mircomass Isoprobe型多接收器等离子体质谱仪(MC-ICPMS)上通过静态接受模式测定,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219校正。计算时运用的参数为:

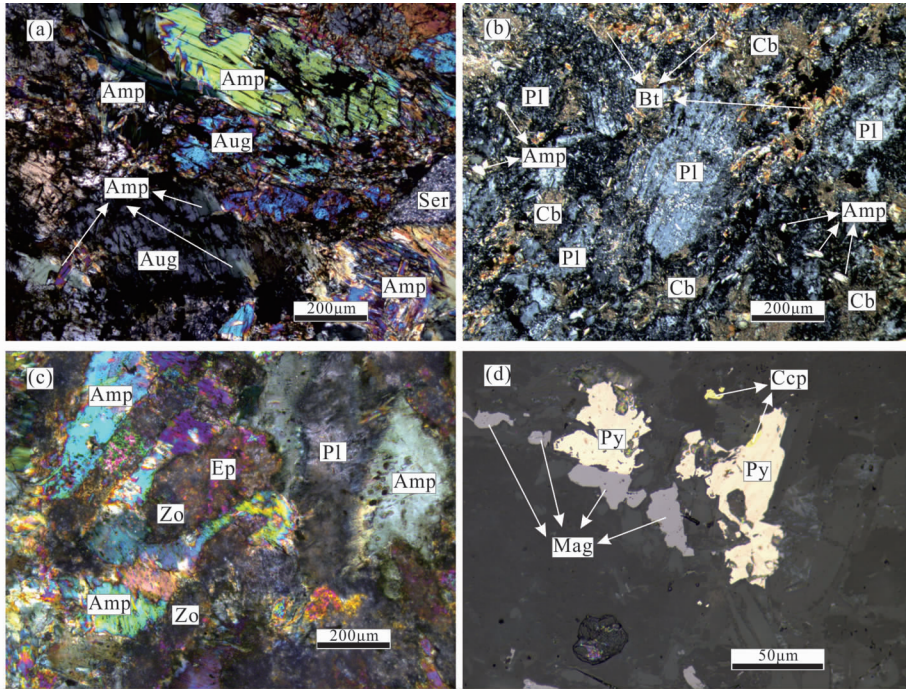


图4 海南省抱伦金矿辉绿岩脉薄片照片

(a) 解理良好的辉石被角闪石交代, 绢云母集合体形成“假晶”; (b) 斜长石、角闪石、黑云母和碳酸盐伴生; (c) 斜长石发生绿帘石-黝帘石化, 后者的集合体呈长柱状; (d) 黄铁矿、黄铜矿和磁铁矿共生。除(d)为反射光外, 其余均为正交偏光。Amp-角闪石; Aug-辉石; Bt-黑云母; Cb-碳酸盐矿物; Ccp-黄铜矿; Ep-绿帘石; Mag-磁铁矿; Pl-斜长石; Py-黄铁矿; Ser-绢云母; Zo-黝帘石

Fig. 4 Thin-section photos of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0 = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0 = 0.1967$,
 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}^0 = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}^0 = 0.2137$. 衰变
 常数为 $\lambda(^{147}\text{Sm}) = 0.00654\text{Ga}^{-1}$.

金丰度分析采用的方法为 AU-ICP21 等离子体光谱分析法, 检测范围: $0.001 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$.

本次进行锆石挑选和年龄测定的样品 13BL-173 采自抱伦矿区 400 中段 V_{1-4} 矿体附近(图 2), 为 50kg 辉绿岩脉大样。样品采集回来, 经洗净, 晾干后, 粉碎至 80 目, 先后经过清水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘后, 在实体显微镜下手工挑选出锆石。锆石分选工作由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。

将锆石、RSES 参考样 SL13 和 TEM 置于环氧树脂制靶, 随后抛光、洗净并镀金(Xu *et al.*, 2007)。通过反射光、透射光和阴极发光(CL)对锆石的内部结构进行研究, 并在测试前在锆石上标记好适宜的测试位置(图 5)。锆石 U-Pb 成分分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。采用参考锆石 TEM (417Ma) 进行同位素分馏校正(Black *et al.*, 2003a), 采用 SL13 (572Ma, U 含量: 238×10^{-6}) 标定锆石的 U、Th 和 Pb 的含量(Black *et al.*, 2003b)。为了保证分析的精确度, 待测锆石和参考锆石 TEM 交叉测定。数据通过 Ludwig 的 ISOPLOT 程序进行处理(Ludwig, 1999, 2001)。普通铅根据试验实测的 ^{204}Pb 含量校正。由于辉绿岩脉的形成时代为中生代, 较年轻, 年龄的计算采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值。

3 分析结果

3.1 辉绿岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

本次对从样品 13BL-173 中挑选出来的 22 颗锆石进行了测试分析, 分析结果如表 2 所示。锆石的阴极发光图像、测试点位以及相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄见图 5。从图中可看出, 锆石颗粒长 80 ~ 120 μm , 长宽比为 1 : 1 ~ 1 : 4。因为矿区流体易导致 ^{204}Pb 升高, 且年龄小于 1000Ma, 所以采用经 ^{204}Pb 校正的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来计算辉绿岩脉的结晶年龄。考虑到本次研究的辉绿岩脉产出在矿区, 不可避免地会受到流体的影响, 在数据处理时放宽对于不谐和度的要求, 对于绝对值小于 400% 的数据都视为可用。分析点 7.1 的不谐和度达到 1049%, 因此不参与年龄的计算。分析点 3.1 的普通铅校正值较高(10.25%), 分析点 9.1 和 14.1 的放射性成因铅含量分别高达 106.7×10^{-6} 和 123.1×10^{-6} , 不参与年龄的计算。分析点 1.1 和 4.1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对其它年龄显著偏高, 分别为 289.3Ma 和 632.3Ma, 可能是基性岩浆侵位时从围岩中捕获的锆石。分析点 2.1 和 8.1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可能因同位素体系被破坏而分别偏大和偏小(表 2)。其余 14 颗锆石在阴极发光图上大都表现出不规则外形, 不规则内部带等基性岩岩浆锆石的典型特征(李怀坤等, 2013), 个别发育

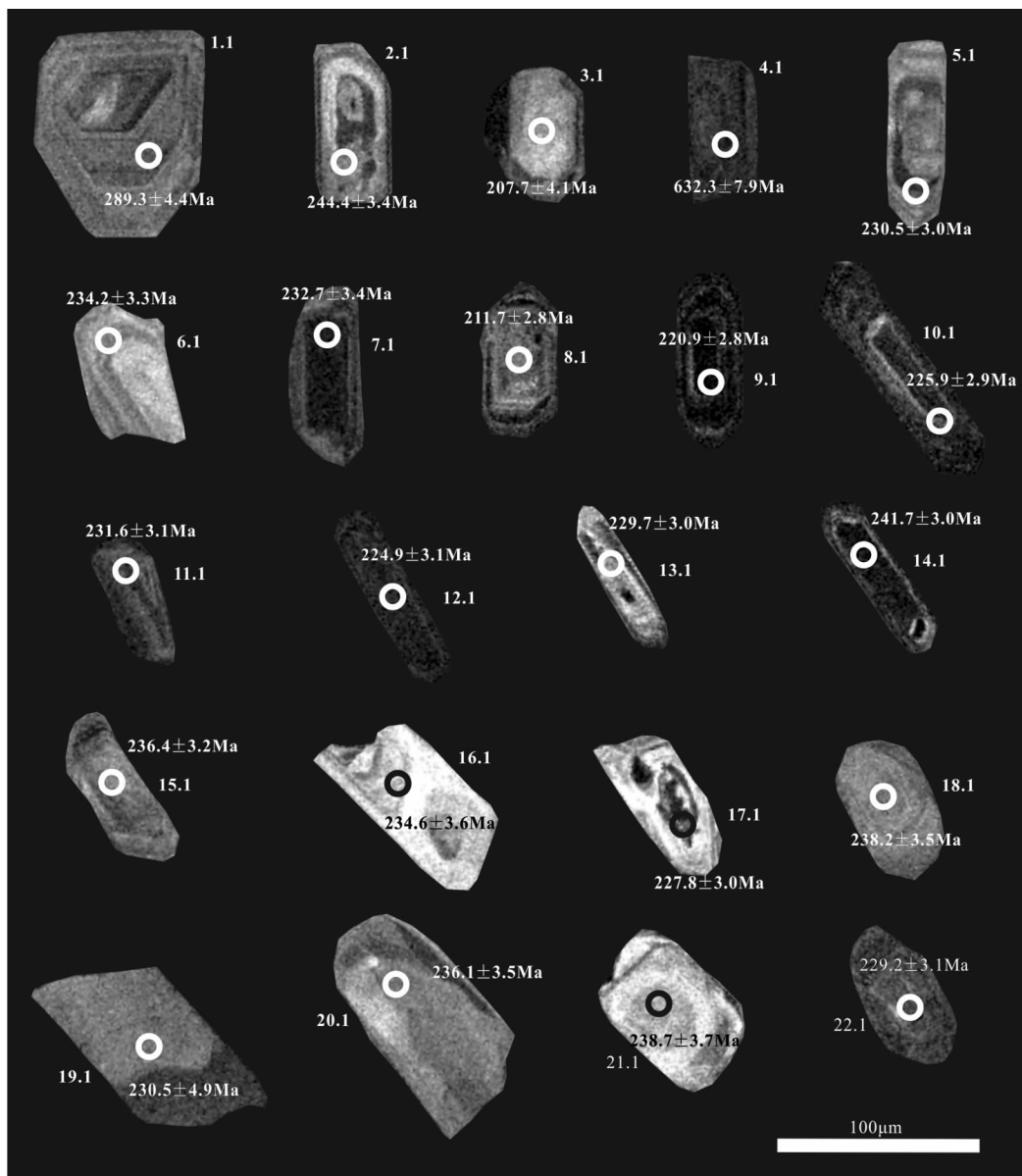


图5 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉锆石阴极发光图

Fig.5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from the diabase dykes in the Baolun gold deposit, Hainan Province

岩浆振荡环带,且它们的Th/U比值都大于0.1,符合岩浆锆石的特征(Chen *et al.*, 2005),表示在谐和图上如图6a所示。计算得到 231.6 ± 2.6 Ma的加权平均年龄(图6b),可解释为辉绿岩脉的成岩年龄。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

主量元素分析结果如表3。辉绿岩脉的 SiO_2 含量分布于49.91%~51.03%之间, Al_2O_3 含量分布于11.99%~14.59%之间, Fe_2O_3 含量分布于12.75%~15.82%之间, MgO 含量分布于6.78%~7.55%之间,全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量分布于2.76%~3.72%之间,在AFM图解上大多落在拉

斑系列的区域(图7)。

3.2.2 稀土和微量元素

微量元素分析结果显示(表3),辉绿岩脉的 ΣREE 含量较低,为 $41.88 \times 10^{-6} \sim 75.76 \times 10^{-6}$,是球粒陨石的14~40倍;LREE略亏损,为 $24.42 \times 10^{-6} \sim 54.18 \times 10^{-6}$,稀土配分曲线大多呈左倾模式;轻重稀土分异不明显($\text{LREE}/\text{HREE} = 1.40 \sim 2.51$);除样品13BL-71有轻微的Eu负异常外,其它都呈现出Eu正异常,其中样品13BL-44和13BL-173的Eu正异常尤其强烈($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.11, 1.44$),说明可能有斜长石的堆晶;所有样品均表现出一定程度的中稀土(Sm-Ho)富集,且都没有HREE强烈亏损的现象(图8)。

在经N-MORB标准化的蛛网图(图9a)中,辉绿岩脉样

表2 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉(样品 13BL-173) SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb isotopic dating results of the diabase dyke (Sample 13BL-173) from the Baolun gold deposit, Hainan Province

测点号	含量($\times 10^{-6}$)				同位素比值				年龄(Ma)								
	Th	U	Th/U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	
1.1	119	157	0.78	0.05128	9.62730	0.32457	9.75465	0.04590	1.57110	0.01275	6.89723	254	221	256	18	289.3	4.4
2.1	1001	829	1.25	0.05064	2.71897	0.26978	3.07334	0.03863	1.43270	0.01194	1.78888	225	63	240	4	244.4	3.4
3.1	146	174	0.87	0.03761	31.42618	0.16977	31.49092	0.03274	2.01830	0.00704	19.16958	-513	839	142	27	207.7	4.1
4.1	313	791	0.41	0.09503	3.32805	1.35046	3.57995	0.10306	1.31912	0.01559	5.99317	1529	63	313	19	632.3	7.9
5.1	679	1157	0.61	0.04701	2.86743	0.23593	3.15316	0.03640	1.31158	0.01034	2.53124	50	68	208	5	230.5	3
6.1	207	329	0.65	0.04424	8.18490	0.22569	8.31200	0.03700	1.44803	0.00978	5.82665	-97	201	197	11	234.2	3.3
7.1	237	427	0.57	0.04558	6.73964	0.23100	6.90048	0.03676	1.48117	0.00958	5.62404	-25	163	193	11	232.7	3.4
8.1	470	577	0.84	0.04373	5.51499	0.20133	5.68098	0.03339	1.36323	0.00849	3.39696	-126	136	171	6	211.7	2.8
9.1	5063	3553	1.47	0.04950	1.02444	0.23791	1.64057	0.03486	1.28140	0.00838	5.81995	171	24	169	10	220.9	2.8
10.1	515	1307	0.41	0.04957	2.56261	0.24380	2.87776	0.03567	1.30939	0.00713	4.51400	175	60	144	6	225.9	2.9
11.1	1103	1668	0.68	0.05657	6.13646	0.28532	6.28280	0.03658	1.34811	0.00775	9.04295	475	136	156	14	231.6	3.1
12.1	957	1314	0.75	0.04932	2.88840	0.24146	3.20600	0.03551	1.39125	0.01034	2.66046	163	68	208	6	224.9	3.1
13.1	651	926	0.73	0.04795	3.47544	0.23983	3.72160	0.03627	1.33101	0.01034	3.59075	97	82	208	7	229.7	3
14.1	4757	3743	1.31	0.05039	0.99115	0.26541	1.62122	0.03820	1.28296	0.01106	3.60304	213	23	222	8	241.7	3
15.1	465	563	0.85	0.04707	4.51793	0.24240	4.71793	0.03735	1.35912	0.01005	4.72861	53	108	202	10	236.4	3.2
16.1	116	228	0.52	0.04803	10.41858	0.24547	10.53620	0.03707	1.56995	0.00951	8.70705	101	246	191	17	234.6	3.6
17.1	1784	1227	1.50	0.05040	5.00222	0.24991	5.17910	0.03596	1.34196	0.01085	2.63622	214	116	218	6	227.8	3
18.1	200	228	0.91	0.05043	6.22627	0.26176	6.40060	0.03764	1.48365	0.01091	3.76901	215	144	219	8	238.2	3.5
19.1	35	100	0.36	0.03179	38.21764	0.15961	38.27960	0.03641	2.17711			-984	1129			230.5	4.9
20.1	137	250	0.57	0.04980	8.40240	0.25615	8.53523	0.03731	1.49996	0.01058	6.97908	186	196	213	15	236.1	3.5
21.1	187	239	0.81	0.04997	10.85336	0.25989	10.96749	0.03772	1.57810	0.01037	6.63902	194	252	209	14	238.7	3.7
22.1	656	896	0.76	0.04893	3.20800	0.24414	3.49605	0.03619	1.38962	0.01048	2.39245	144	75	211	5	229.2	3.1

注: Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通铅和放射成因铅, 普通铅经实测的 ^{204}Pb 校正, 误差为 1σ

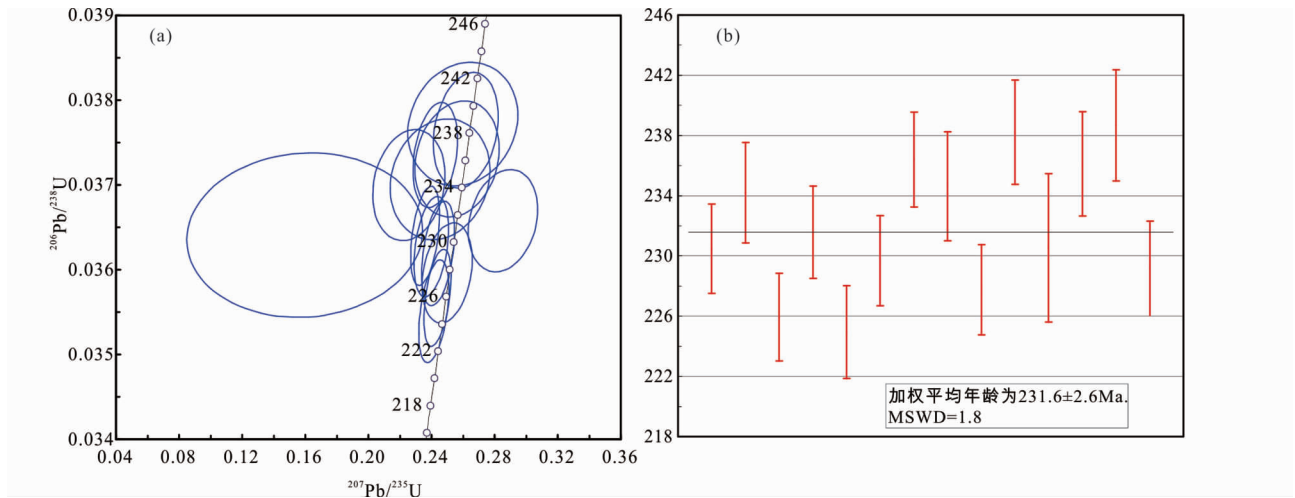


图6 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均图(b)

Fig.6 Zircon U-Pb concordia (a) and weighted average age (b) diagrams of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

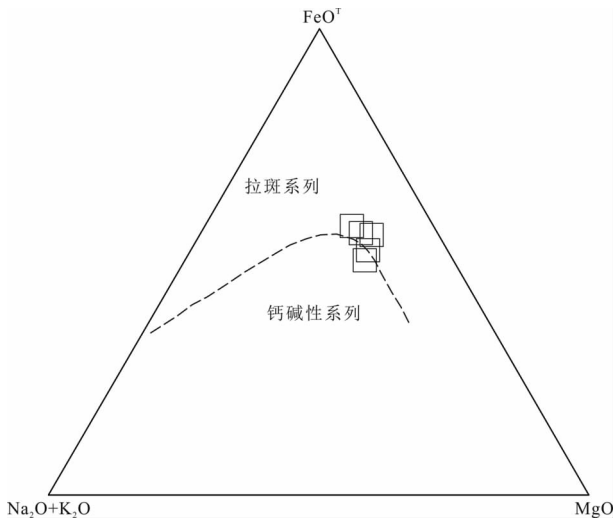


图7 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉 AFM 图解(据 Irvine and Baragar, 1971)

Fig.7 The AFM diagram for the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province (after Irvine and Baragar, 1971)

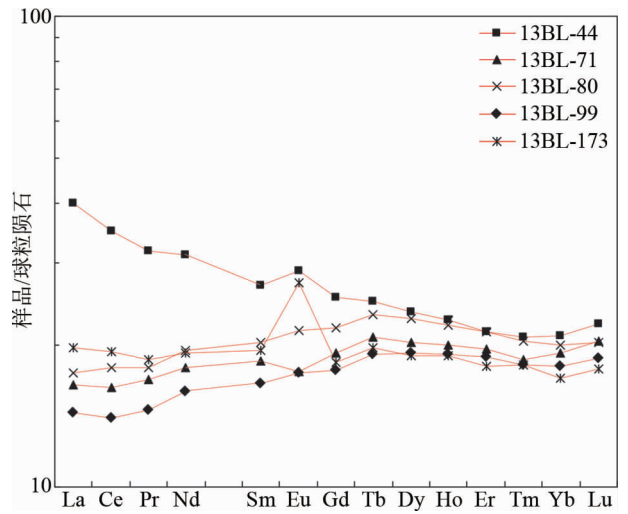


图8 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉球粒陨石标准化稀土元素分布型式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.8 Chondrited-normalized REE patterns of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

品相对 N-MORB 富集 Sr、K、Rb 和 Ba 等 LILE 和 Th, 而 Ta-Yb 的 HFSE 相对 N-MORB 并没有明显的富集(样品/MORB 接近 1), 或者说相对 LILE“亏损”, LILE/HFSE 比值高, 这些特征类似于岛弧岩浆岩。同时, 辉绿岩脉的 Cs、K 和 Pb 均相对 N-MORB 富集, 这被认为是岛弧岩浆岩特有的特征(图 9b)(Winter, 2010)。

3.2.3 Sm-Nd 同位素

Sm-Nd 同位素分析结果显示(表 4), 辉绿岩脉的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值分布于 0.17 ~ 0.21 之间, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分布

于 0.512665 ~ 0.512929 之间, 根据以上测定的辉绿岩脉成岩年龄(231.6Ma)计算 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分布于 0.3 ~ 5.6 之间, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值除样品 13BL-44 为 -0.13, 其它样品都处于 0.02 ~ 0.05 的范围内。

3.3 金丰度特征

分析结果表明, 样品的 Au 含量变化较大, 其中, 13BL-99 的 Au 含量小于 0.001g/t, 13BL-80 和 13BL-173 的 Au 含量分

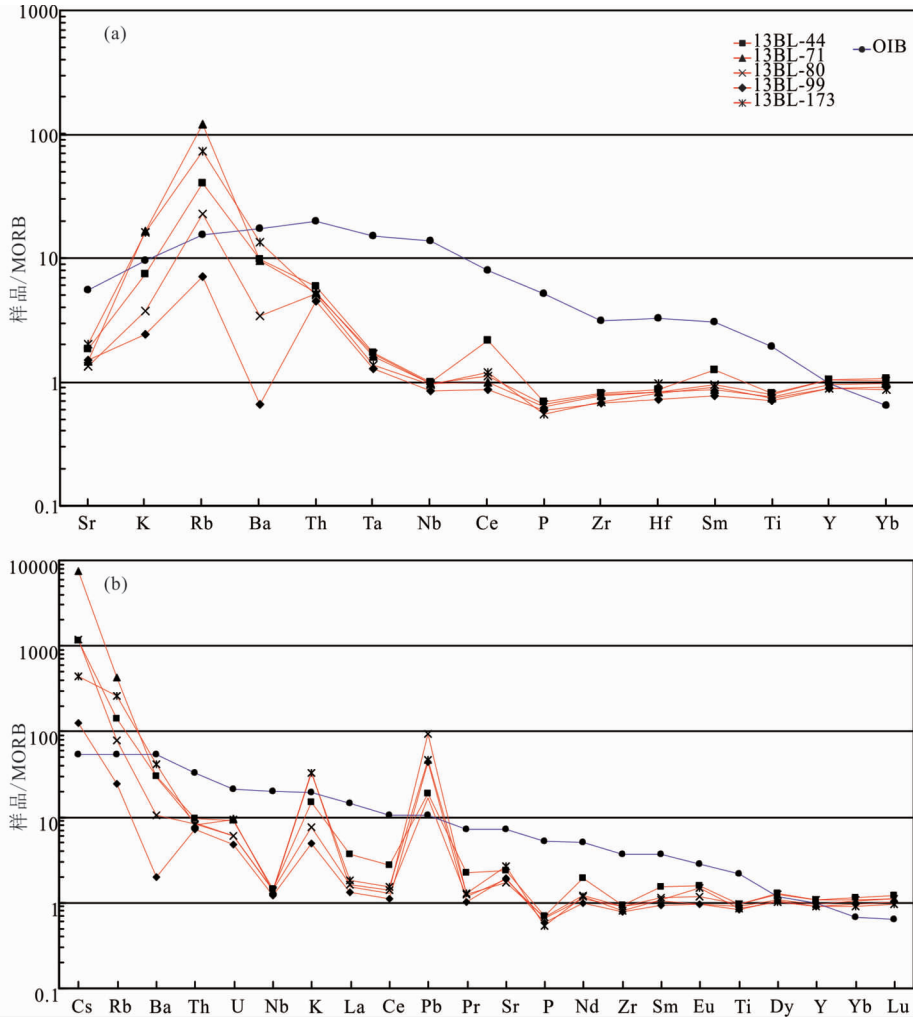


图9 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉 MORB 标准化微量元素蛛网图

(a) 横坐标元素排列顺序引自 Pearce (1983), 左侧是 LILE, 右侧是 HFSE, 从 Ba-Th 开始向外侧相容性增加, MORB 数据引自 Pearce *et al.* (1981); (b) 横坐标元素排列顺序引自 Sun and McDonough (1989), 从左至右元素相容性增加. 图 (b) 中的 MORB 数据以及两图中的 OIB 数据均引自 Sun and McDonough (1989)

Fig. 9 MORB-normalized trace element spidergrams of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

别为 0.003g/t 和 0.007g/t, 而样品 13BL-44 和 13BL-71 的 Au 含量较高, 分别达到了 0.187g/t 和 0.076g/t。

4 讨论

4.1 岩浆来源和岩石成因

Sm/Yb 比值对于源区是否有石榴石残留非常敏感, 可用来反演岩浆源区的深度 (Huang *et al.*, 2000)。本次辉绿岩脉样品的 Sm/Yb 比值都较低, 分布在 Northland 和 Mercury Island 区域的附近 (图 10), 表明它们的岩浆源区较浅, 且部分熔融时岩浆源区没有石榴石相残留。在稀土元素配分曲线上, 样品均未表现出 HREE 的强烈亏损 (图 8), 也说明岩浆形成时岩浆源区不存在石榴石相的残留。由于在俯冲洋壳板块大量熔融的深度 (110km), 玄武岩已转变成了榴辉

岩相 (单斜辉石-石榴石)。所以, 形成抱伦辉绿岩脉的岩浆不是由俯冲洋壳板片熔融形成的。

微量元素蛛网图显示 (图 9a), 抱伦辉绿岩脉具有较高的 LILE/HFSE 比值, 表明岩浆源区受到过俯冲带含水流体的影响。富集岩石圈地幔的混染会引起 Th 和 Ta 的同步富集 (Pearce, 1983), 而抱伦辉绿岩脉富集 Th 但亏损 Ta, 这表明其未受到过富集岩石圈地幔的混染。由于不活泼的 HFSE 含量可能反映地幔源区的特征 (McCulloch and Gamble, 1991), 抱伦辉绿岩脉和 MORB 相似的 HFSE 含量说明其岩浆可能来源于亏损地幔源区。除 13BL-44 外, 抱伦辉绿岩脉左倾型的稀土元素配分曲线 (图 8) 也支持这一推测。而 13BL-44 的右倾型稀土配分曲线可能是亏损地幔源区通过低程度的部分熔融演化而来的 (Tatsumi and Eggins, 1995; Winter, 2010)。

表3 海南省抱伦金矿辉绿岩脉主量 (wt%) 和微量 ($\times 10^{-6}$) 元素含量Table 3 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

样品号	13BL-44	13BL-71	13BL-80	13BL-99	13BL-173
SiO ₂	50.23	50.17	51.03	49.91	50.59
TiO ₂	1.22	1.21	1.22	1.08	1.13
Al ₂ O ₃	13.80	13.85	14.59	13.29	11.99
Fe ₂ O ₃	13.21	14.96	12.75	13.89	15.82
MnO	0.24	0.23	0.21	0.22	0.30
MgO	7.28	7.15	7.55	7.18	6.78
CaO	10.81	8.96	9.06	11.59	9.60
Na ₂ O	2.03	0.90	2.96	2.40	1.31
K ₂ O	1.11	2.49	0.56	0.36	2.41
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06
LOI	1.07	6.45	2.60	1.18	1.38
Total	99.53	99.89	99.59	99.53	99.51
La	9.48	3.91	4.15	3.40	4.69
Ce	21.35	9.99	10.97	8.60	11.84
Pr	3.01	1.61	1.71	1.39	1.77
Nd	14.56	8.39	9.10	7.47	8.99
Sm	4.11	2.83	3.10	2.54	2.98
Eu	1.67	1.02	1.25	1.01	1.58
Gd	5.19	3.95	4.46	3.65	3.79
Tb	0.93	0.78	0.87	0.72	0.74
Dy	5.99	5.15	5.81	4.89	4.83
Ho	1.28	1.14	1.25	1.08	1.07
Er	3.53	3.25	3.54	3.12	2.99
Tm	0.53	0.48	0.52	0.46	0.46
Yb	3.57	3.28	3.41	3.07	2.90
Lu	0.56	0.52	0.52	0.48	0.45
Y	30.93	28.17	31.25	26.3	26.4
ΣREE	75.76	46.27	50.64	41.88	49.09
LREE/HREE (La/Yb) _N	2.51	1.50	1.49	1.40	1.85
δEu	1.11	0.93	1.02	1.01	1.44
δCe	0.97	0.98	1.01	0.97	1.01
Sc	55.46	54.60	61.06	51.62	48.17
Ti	7539	7191	7589	6477	6648
V	378	368	388	342	324
Cr	205	108	271	218	241
Mn	1941	1862	1645	1795	2303
Co	36.32	63.08	42.73	51.01	42.95
Ni	71.58	56.01	67.76	88.50	108.30
Cu	20.39	17.9	51.58	86.35	15.98
Zn	141.7	144.1	112.7	99.62	206.1
Ga	19.75	18.1	17.52	16.43	16.74
Ge	3.83	3.06	2.79	2.54	4.91
Rb	81.2	243.9	45.1	14.2	146.4
Sr	220.1	175.3	158.8	179.8	244.1
Zr	72	70	70	60	61
Nb	3.43	3.35	3.42	2.92	3.29
Ta	0.31	0.29	0.30	0.23	0.24
Cs	8.03	52.42	8.49	0.91	3.12
Ba	195.5	190.0	68.30	13.08	268.6
Hf	2.05	2.00	1.98	1.73	1.95
Pb	5.77	5.18	28.89	13.48	14.22
Th	1.18	1.05	1.04	0.89	1.00
U	0.44	0.29	0.29	0.23	0.45

注:主量元素已换算成干体系,LOI 代表烧失量,Fe₂O₃ 含量为全铁含量

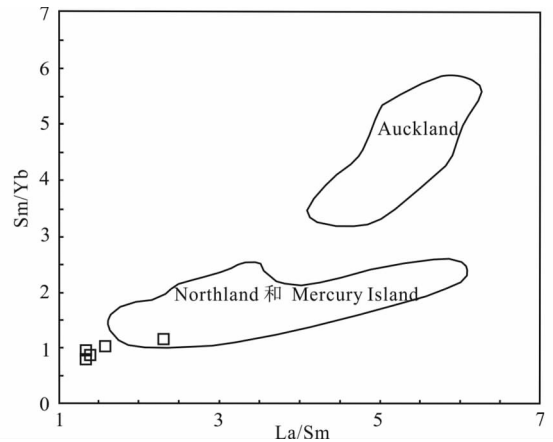


图10 海南省抱伦金矿辉绿岩脉 La/Sm-Sm/Yb 图解

图中 Auckland、Northland 和 Mercury Island 的区域分别代表新西兰这两个地区玄武岩的数据分布范围。其中, Auckland 玄武岩的 Sm/Yb 比值较高,表明源区部分熔融时残留有石榴石,另一个区域表明源区没有石榴石残留,因此深度也较浅 (Huang *et al.*, 2000) 底图以及 Auckland、Northland 和 Mercury Island 的范围引自 (Huang *et al.*, 2000)

Fig. 10 La/Sm vs. Sm/Yb diagram for the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

抱伦辉绿岩脉样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 皆为正值,显示出亏损地幔源区的特征。样品 13BL-71 的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 仅为 0.33, 相对本组其它几个样品明显降低。由于样品从源区分离时同位素 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的值和源区相同 (李献华, 1996), 因此, 样品 13BL-71 对应的岩浆有其它源区成分的加入, 这种源区可能是地壳和/或富集岩石圈地幔。但由于其 $f_{Sm/Nd}$ 、蛛网图和稀土配分模式的形态相对其它样品没有明显的差异, 说明其它源区混入的程度有限。样品 13BL-44 的 $f_{Sm/Nd}$ 为 -0.13, 明显偏离其它样品, 而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 未出现明显偏离, 因此导致这种结果的主要原因是其发生了低程度的部分熔融, 而不是不同源区的混合。根据 3.2.2 节的分析, 样品的岩浆源区应为岛弧岩浆性质, 然而, 洋内岛弧玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 通常很高 (+9) (钱青和王焰, 1999), 而本次样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 位于 0.3 ~ 5.6 之间, 可能是地壳混染的缘故。

在 La/Sm-La 图解 (图 11) 中, 辉绿岩脉样品的 La/Sm 比值和 La 含量呈现出良好的正相关关系。在图 12a 中, 样品的 Rb/Nb 和 Rb/Zr 明显地呈现出正相关的关系, 且大致沿部分熔融的方向变化; 在图 12b 中, 样品基本分布于代表部分熔融的水平方向上。这说明, 抱伦辉绿岩脉是岩浆源区部分熔融的产物。

综上所述, 抱伦辉绿岩脉的岩浆源区为受到过俯冲带含水流体影响的亏损地幔源区, 具有岛弧岩浆的性质, 几乎未受到过富集岩石圈地幔的混染, 但可能受到过少量地壳物质的混染。所有样品的岩浆源区均较浅, 源区没有石榴石相的残余。抱伦辉绿岩脉是岩浆源区部分熔融的产物。

表4 海南省抱伦金矿辉绿岩脉 Sm-Nd 同位素组成

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions of the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province

样品号	年龄 (Ma)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	2σ	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
13BL-44		4.11	14.56	0.17	0.512888	0.000010	-0.13	0.512631	5.6	927	544
13BL-71		2.83	8.39	0.20	0.512665	0.000005	0.04	0.512359	0.3	7240	977
13BL-80	231.6	3.10	9.10	0.21	0.512929	0.000006	0.05	0.512618	5.4	4416	565
13BL-99		2.54	7.47	0.21	0.512918	0.000006	0.05	0.512608	5.2	4445	581
13BL-173		2.98	8.99	0.20	0.512878	0.000005	0.02	0.512576	4.6	3090	632

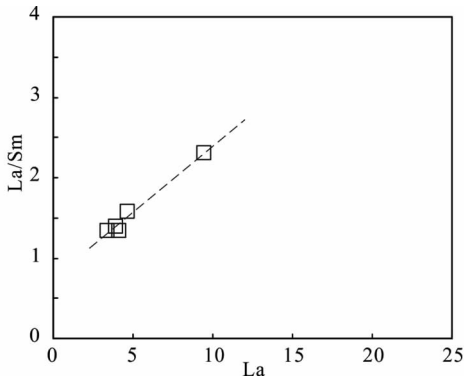


图11 海南省抱伦金矿区辉绿岩脉 La/Sm-La 图解(据 Treuil and Joron, 1975)

Fig. 11 La/Sm vs. La diagram for the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province (after Treuil and Joron, 1975)

4.2 构造背景

前人在尖峰花岗岩体的不同部位采样,测得其成岩年龄分布于 $236 \pm 3.5 \text{ Ma} \sim 249 \pm 5 \text{ Ma}$ 之间(舒斌等,2004;谢才富等,2006;张小文等,2009),这与本次抱伦辉绿岩脉的 $231.6 \pm 2.6 \text{ Ma}$ 的年龄在误差范围内一致,抱伦辉绿岩脉的成岩年龄稍晚,且两者的出露位置相邻(图2)。主量元素分析结果

表明,抱伦辉绿岩脉的 SiO_2 含量分布于 $49.91\% \sim 51.03\%$ 的狭窄范围之内(表3),而尖峰花岗岩的 SiO_2 含量分布于 $70.90\% \sim 76.31\%$ 之间(谢才富等,2006),缺失 SiO_2 含量为 $52\% \sim 70\%$ 的岩石类型,呈现出双峰式的特征。上述尖峰岩体和抱伦辉绿岩脉的特征与唐立梅等(2013)在海南兴隆地区识别的双峰式侵入岩类似。

抱伦辉绿岩脉在 AFM 图解上大多分布于拉斑系列的区域(图7)。在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图13)上落于岛弧玄武岩的范围。微量元素特征表明,抱伦辉绿岩脉富集 Sr、K、Rb 和 Ba 等 LIL 元素,亏损 Ta、Ti 等 HFSE,且具有岛弧岩浆岩的 Cs、K 和 Pb 特征峰值(图9b)。这些特征与造山后伸展构造环境形成的基性岩一致(Gans *et al.*, 1989; Turner *et al.*, 1992; 李晓勇等,2002),指示抱伦辉绿岩脉形成于造山后伸展的构造环境。在 Maniar and Piccoli (1989)的构造环境判别图上尖峰花岗岩几乎全部落入造山后的区域(谢才富等,2006)也印证了这一点。

关于华南早中生代的构造演化,目前主要存在着两种观点:第一种观点认为,此时的华南主要受特提斯构造域的控制,以近东西向古特提斯洋的闭合和南北向的陆陆碰撞为特征(周新民,2003;Zhou *et al.*, 2006; 董树文等,2007)。第二种观点认为主要受太平洋构造域的控制,以垂直于古太平洋板块俯冲方向发育的岩浆岩带为特征(陈迪云等,1997; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Li and Li, 2007; 王丽娟

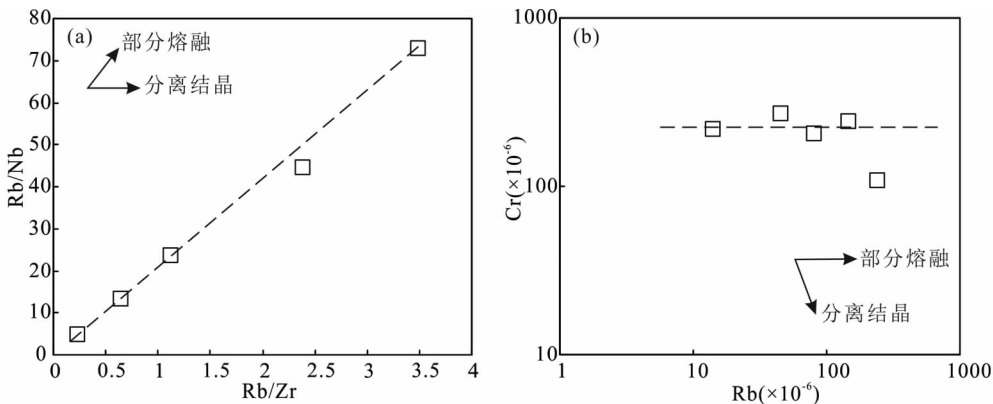


图12 抱伦金矿区辉绿岩脉部分熔融判别图(据张贵山等,2009)

Fig. 12 Discrimination diagrams of partial melting for the diabase dykes from the Baolun gold deposit (after Zhang *et al.*, 2009)

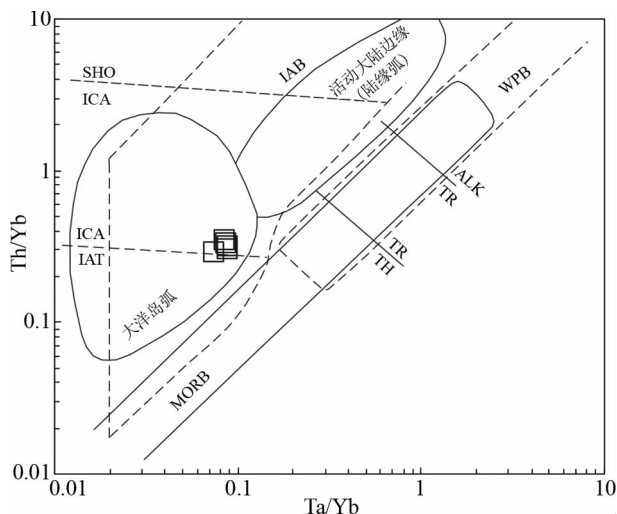


图 13 海南省抱伦金矿辉绿岩脉构造环境判别图(据 Pearce, 1983)

IAB-岛弧玄武岩; IAT-岛弧拉斑系列; ICA-岛弧钙碱系列; SHO-岛弧橄辉玄武岩系列; WPB-板内玄武岩; MORB-洋中脊玄武岩; TH-拉斑玄武岩; TR-过渡玄武岩; ALK-碱性玄武岩

Fig. 13 Th/Yb vs. Ta/Yb diagram for the diabase dykes from the Baolun gold deposit, Hainan Province (after Pearce, 1983)

等,2007)。根据 Zhang *et al.* (2011) 的研究,海南岛公爱地区发育的韧性剪切带与印支北部的韧性剪切带有着相似的变形时序和变形样式,且本次识别的双峰式侵入岩与唐立梅等(2013)在万宁市兴隆镇识别的双峰式侵入岩分别位于尖峰-吊罗深大断裂的西部和东部,两者的连线呈东西向,两者的形成年龄分布于 250 ~ 230Ma。这表明,早中生代时期海南岛主要受古特提斯构造域控制。

目前大多学者都认同海南岛在三叠纪发生了碰撞拼合,但对于海南岛各个块体间的缝合线位置仍然存在分歧。杨树锋等(1989)和张业明等(1997)均认为,海南岛南北两个块体沿九所-陵水断裂带碰撞拼合。李献华等(2000a, b)认为海南岛沿昌江-琼海断裂拼合,刘海龄等(2004, 2006)认为王五-文教断裂和九所-陵水断裂将海南岛分割为琼南、琼中、琼北三个块体,两者均为块体碰撞拼合的缝合线。

李献华等(2000a, b)在邦溪、晨星两地发现了古特提斯洋壳的残片,其全岩 Sm-Nd 年龄为 333Ma,认为海南岛可能沿昌江-琼海断裂拼合。然而,随后 Xu *et al.* (2007) 和王智琳等(2013)又在邦溪发现了产出于弧后盆地的变质基性岩,其成岩年龄为 269Ma。这表明,李献华等(2000a, b)在邦溪、晨星地区发现的洋壳残片可能产出于弧后盆地扩张而形成的小洋盆。再者,邦溪、晨星两地均分布于昌江-琼海断裂以北。而在海南省构造地质图(图 1b)上,可发现晚古生代-早中生代(290 ~ 190Ma)产出的花岗岩无一例外地分布于王五-文教断裂以南。因此,华南板块和印支板块在海南岛的缝合带可能位于王五-文教断裂的位置,而不是昌江-琼海断裂的

位置,沿昌江-琼海断裂可能在 333 ~ 269Ma 发育弧后盆地。因此,若以王五-文教断裂和昌江-琼海断裂为界将海南岛自北向南依次分为琼北、琼中和琼南三个块体,则琼北块体属于华南板块,琼中、琼南块体属于印支板块。王五-文教断裂以北完全不发育晚古生代-早古生代(290 ~ 190Ma)花岗岩,且王五-文教断裂以南的抱伦辉绿岩脉、尖峰花岗岩、兴隆辉绿岩、三亚霓辉石正长岩均受到俯冲带含水流体的影响。这说明,琼北块体一侧为被动大陆边缘,琼南块体一侧为主动大陆边缘,两者之间的古特提斯洋壳向南俯冲到了琼南块体之下,从而触发了一系列的岩浆活动。

发育于琼东乐来地区的 255Ma 的同造山巨斑状花岗岩(谢才富等,1999)以及发育于石碌、邦溪一带的 257.5Ma 同造山花岗岩(李孙雄,2005)表明,255Ma 左右海南岛已进入同造山期。249 ~ 231Ma 尖峰岩体和抱伦辉绿岩脉构成的双峰式侵入岩以及 238 ~ 234Ma 兴隆双峰式侵入岩(唐立梅等,2013)构成了造山后伸展构造环境下的双峰式侵入岩组合。三亚地区发育的 244Ma 的三亚石榴霓辉石正长岩(谢才富等,2005)和乐东县 233Ma 的 A 型花岗岩(王大英和云平,1999)、袁水地区 230 ~ 215Ma 的 A 型花岗岩(谢才富等,1999)一起,构成了后碰撞时期的特征岩石组合(Turner *et al.*, 1992; Bonin *et al.*, 1998; Bonin, 2004),标志着造山作用的结束。

4.3 辉绿岩脉和金成矿关系

针对基性岩、超基性岩在时间和空间上和金矿的产出密切相关现象,前人曾通过岩石学、矿物学、全岩地球化学、原位微区、Pb 同位素和 Sm-Nd 同位素等手段研究了金的成矿作用和基性/超基性岩的成因联系。研究表明,基性岩可能起源于上升的地幔柱(Kamenov *et al.*, 2007; Berge, 2013)、裂谷(Kamenov *et al.*, 2007)和深大断裂(Bierlein *et al.*, 2001; Tan *et al.*, 2012)等伸展构造环境。与基性岩产出密切相关的金矿床中的 Au 可能来自于基性岩浆(Rusinov *et al.*, 2005; Kamenov *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2012; Berge, 2013),但也可能与基性岩浆没有任何成因关系,只是含金成矿流体和基性岩浆在不同时间通过相同的断裂构造上升而形成某种空间上紧密共生的关系(Bierlein *et al.*, 2001)。

通常认为,地核是地球上最富 Au 的部位(Rock and Groves, 1988)。Frey and Green(1974)和 Mitchell and Keays(1981)的研究发现,普通二辉橄辉岩捕掳体中也存在着来源于交代流体的富 Au 的硫化物成分和晶间物质。基性岩浆,特别是煌斑质岩浆中含有所有火成岩中最高含量的 CO₂、H₂O、F、K、Rb 和 Ba,且同时含有适量的 S,因此被认为是 Au 运移的合适载体(Rock and Groves, 1988)。但岩浆中 S 的含量亦不可过高,因为只有当 S 处于不饱和状态时,岩浆才能把 Au 及其它许多亲铜元素(如 Pd、Pt、Ag、Cu 和 Zn)从地幔携带到地表(Keays, 1984, 1987)。随着岩浆的演化,Au 可随着从岩浆中分离出来的挥发分继续运移(Hedenquist and

Lowenstern, 1994; Heinrich *et al.*, 1999)。

关于抱伦金矿床成矿物质和成矿流体的来源,目前主要有志留系陀烈组、尖峰岩体和燕山期岩体几种观点(丁式江等, 2001; 舒斌等, 2004, 2006; 谢才富等, 2006; 钟增球, 2010)。然而,元素分布特征的研究表明,尽管近矿带的志留系浅变质岩系金含量高,但未受矿化影响的岩系中金含量与地壳丰度值接近(钟增球, 2010)。因此,志留系浅变质岩系中金的高含量可能只是成矿热液叠加的结果,陀烈组是抱伦金矿床矿源层的说法值得商榷。在矿床的矿物学研究中,前人(丁式江等, 2001; 王朝文等, 2011)发现金的共生矿物中存在大量的砷、碲、铋矿物,这是岩浆热液成因矿床的特征(Thompson *et al.*, 1999; Baker, 2002; Mao *et al.*, 2003)。此外,成矿阶段流体包裹体的盐度和密度也处于岩浆热液矿床的范围内(王婧等, 2013)。矿石中黄铁矿的硫同位素分析结果表明硫主要来源于岩浆(舒斌等, 2006);而成矿流体的氢氧同位素表明成矿流体主要由岩浆水和大气降水混合而成(舒斌等, 2006),且从早到晚,大气降水的比例逐渐升高(王婧等, 2013)。以上这些都表明,成矿物质和成矿流体主要来源于岩浆。舒斌等(2006)认为其主要来源是印支期的花岗质岩浆。丁式江等(2001)认为成矿热液即为尖峰岩体的岩浆期后热液。

然而,在对成矿流体中的 CO_2 进行碳同位素分析时,发现其中的 C 主要来源于地幔,少量来源于地层(舒斌等, 2006; 王朝文等, 2011)。矿石中黄铁矿包裹体的 He-Ar 同位素数据(中国科学院广州地球化学研究所许德如课题组,未发表数据)也表明成矿过程中有地幔物质的参与。而舒斌等(2006)提出的印支期花岗质岩浆和丁式江等(2001)提出的尖峰岩体提供成矿物质和成矿流体的观点都不能很好地解释地幔物质的参与。钟增球(2010)和王朝文等(2011)提出,成矿物质和成矿流体可能来自于燕山期的千家岩体,其显示出来的深源浅侵位特征(王朝文等, 2011)也表明能为成矿过程带来地幔物质。但矿石定年结果表明,抱伦金矿床的成矿年龄为 $224.6 \pm 7.2\text{Ma}$ (矿石中与 Au 共生的辉钼矿的 Re-Os 定年; Xu *et al.*, 2017),不支持燕山期岩浆提供成矿物质的观点。

辉绿岩脉的侵位年龄为 $231.6 \pm 2.6\text{Ma}$,与成矿年龄在误差范围内一致,且来源于地幔。从辉绿岩脉的金丰度分析结果可以看出,辉绿岩脉样品 13BL-44 和 13BL-71 的金丰度达到 187×10^{-9} 和 76×10^{-9} ,远远高于地壳克拉克值,而其它 3 个样品的金丰度仅 $3 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-9}$ 或在检测线以下,数据离散度大。这表明辉绿岩脉中的 Au 可能在成矿过程中被活化、迁移。样品 13BL-80、99、173 的金丰度低可能是其中的 Au 已被活化迁移而在断裂破碎带中成矿的结果。

研究表明,低盐度、富 CO_2 、含适量 S 的流体能运移 Au,但不能运移贱金属,单金矿床的成矿物质是通过这种流体迁移的(Phillips and Groves, 1983)。而拥有适当含量的 S 以及高含量的 CO_2 、 H_2O 、F、K、Rb 和 Ba 的岩浆和上述这种流体

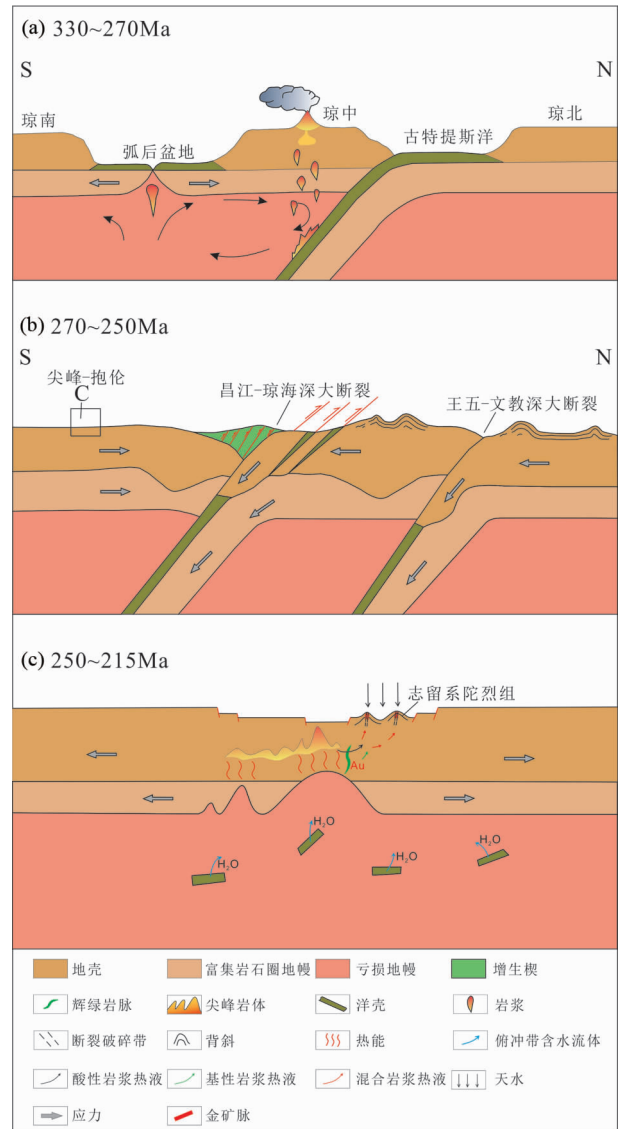


图 14 海南岛晚石炭世-晚三叠世大地构造发展史及抱伦金矿成矿模式

Fig. 14 Schematic diagrams showing the possible tectonic evolution of Hainan Island from Late Carboniferous to Late Triassic and the mineralization of the Baolun gold deposit

很接近(Rock and Groves, 1988)。抱伦金矿床属于单金矿床。抱伦辉绿岩脉主微量元素分析数据(表 3、图 9)显示,辉绿岩脉富含 K、Rb、Ba 等元素,且曾受到过来自俯冲板片的含 H_2O 流体的交代。而 F^- 的离子半径和 OH^- 相近, F 能部分替代含水矿物(如角闪石和金云母)中的 (OH) (Tatsumi and Eggins, 1995)。从而可推测,源区受到过含水流体交代的抱伦辉绿岩脉的岩浆也含有 F 的成分。因此,抱伦辉绿岩脉的岩浆是 Au 合适的运移载体,具备将 Au 从深部携带到浅部的能力。综上所述,抱伦金矿床的 Au 很可能来源于产出在抱伦金矿区的辉绿岩脉。

根据上文的论述,构建海南岛晚石炭世-晚三叠世大地

构造发展史及抱伦金矿成矿模式:

330 ~ 270Ma, 华南板块往南向印支板块俯冲, 在海南岛表现为琼北块体向南俯冲。古特提斯洋洋壳的俯冲在昌江-琼海断裂一带产生拉张的应力, 从而将南部块体分为琼中和琼南两个块体, 形成弧后盆地(图 14a)。

270 ~ 250Ma, 古特提斯洋以及弧后盆地闭合, 在海南岛表现为琼北、琼中、琼南块体的碰撞, 分别在古特提斯洋和弧后盆地闭合的位置形成现在的王五-文教断裂和昌江-琼海断裂。洋壳残片逆冲就位位于邦溪、屯昌、晨星等地(图 14b)。

250 ~ 215Ma, 造山作用进入后碰撞时期, 伴随着富集岩石圈地幔的拆沉, 应力机制由原来的挤压为主逐渐向伸展为主的机制转换。地壳中的杂砂岩或变砂屑岩因升温减压而发生大规模的部分熔融, 形成尖峰岩体。受到过俯冲带含水流体影响但未被富集岩石圈地幔混染的亏损地幔源区减压熔融, 在以部分熔融为主导的岩浆演化过程中沿裂隙上升, 并将 Au 从地球深部携带到近地表处。基性岩浆热液携带着 Au 等成矿元素和尖峰岩体的酸性岩浆热液混合, 随后沿着裂隙运移上升。当遇到志留系陀烈组的含碳千枚岩时, 成矿流体的化学性质发生改变, 导致 Au 在陀烈组中的断裂破碎带中富集成矿。从地表下渗的天水和成矿流体混合也改变了成矿流体的物质化学性质, 促进了矿化作用的进行(图 14c)。

5 结论

(1) 抱伦金矿区的辉绿岩脉形成于拉斑玄武质岩浆, 岩浆源区为受到俯冲带含水流交代和少量地壳混染的亏损地幔。

(2) 辉绿岩脉形成于 231.6 ± 2.6 Ma, 与尖峰岭花岗岩质岩体构成双峰式侵入岩, 产出于造山后伸展环境。

(3) 抱伦金矿床的 Au 可能来源于辉绿岩脉。

致谢 在野外地质工作中, 海南省山金矿业有限公司刘永堂副总经理、高鹏工程师、王立国工程师, 海南省资源环境调查院张小文院长、海南省地质调查院林弟工程师等给予了极大的帮助和支持。于学元研究员和张湖研究员及二位审稿人对本文的初稿提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心感谢!

References

Baker T. 2002. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. *Economic Geology*, 97 (5): 1111 - 1117

Berge J. 2011. Paleoproterozoic, turbidite-hosted, gold deposits of the Ashanti gold belt (Ghana, West Africa): Comparative analysis of turbidite-hosted gold deposits and an updated genetic model. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 91 - 100

Berge J. 2013. Likely "mantle plume" activity in the Skellefte district, northern Sweden. A reexamination of mafic/ultramafic magmatic activity: Its possible association with VMS and gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 55: 64 - 79

Biczok J, Hollings P, Klipfel P, Heaman L, Maas R, Hamilton M, Kamo S and Friedman R. 2012. Geochronology of the North Caribou greenstone belt, Superior Province Canada; Implications for tectonic history and gold mineralization at the Musselwhite mine. *Precambrian Research*, 192 - 95: 209 - 230

Bierlein FP, Arne DC, Broome JMN and Ramsay WRH. 1998. Metatholeiites and interflow sediments from the Cambrian Heathcote greenstone belt, Australia: Sources for gold mineralization in Victoria? *Economic Geology*, 93(1): 84 - 101

Bierlein FP, Hughes M, Dunphy J, McKnight S, Reynolds P and Waldron H. 2001. Tectonic and economic implications of trace element, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Sm-Nd data from mafic dykes associated with orogenic gold mineralization in central Victoria, Australia. *Lithos*, 58(1-2): 1 - 31

Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003a. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155 - 170

Black LP, Kamo SL, Williams IS, Mundil R, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003b. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards. *Chemical Geology*, 200(1-2): 171 - 188

Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2): 1 - 24

Bonin BL, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1-4): 45 - 70

Chen BL, Ding SJ, Li ZJ, Dong FX, Liao XJ, Su B, Fu F, Fu YR and Dong C. 2001. Metallogenic age of Baolun gold deposit, Hainan Province. *Geochimica*, 30(6): 525 - 532 (in Chinese with English abstract)

Chen DY, Zhang BT, Sun DZ and Yang DS. 1997. Geochemistry and relation to uranium mineralization of Gaoxi and Fucheng granites in Wuyi Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 71 - 84 (in Chinese with English abstract)

Chen YL, Luo ZH, Zhao JX, Li ZH, Zhang HF and Song B. 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province. *Science in China (Series D)*, 48(5): 622 - 634

Chen YM, Fu YR, Zhou YC, Zhou HW and Xue KW. 2011. Study on ore-controlling structure and main metallogenic age of Ledong Baolun gold deposit, Hainan. *Gold*, 32(3): 16 - 23 (in Chinese with English abstract)

Ding SJ, Huang XD, Li ZJ, Fu YR, Dong FX, Shu B and Zhang XW. 2001. Geological features and mineralization of the Baolun gold deposit, Hainan. *Geology in China*, 28(5): 28 - 34, 18 (in Chinese with English abstract)

Ding SJ, Fu YR, Zhou TH and Dong GY. 2005. The high-grade Baolun gold deposit, Hainan Island, China. In: Mao JW and Bierlein FP (eds.). *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting*, Beijing, China, 18 - 21 August 2005. Berlin, Heidelberg: Springer, 1521 - 1522

Ding SJ, Fu YR, Yang LQ, Deng J, Liao XJ, Wu GA and Fu F. 2007. *Geology and Mineral Resources Prediction of Baolun Gold Deposit in Ledong, Hainan*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Wang T, Hu JM and Chen XH. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449 - 1461 (in Chinese with English abstract)

- Eilu P, Sorjonen-Ward P, Nurmi P and Niiranen T. 2003. A review of gold mineralization styles in Finland. *Economic Geology*, 98(7): 1329 – 1353
- Frey FA and Green DH. 1974. The mineralogy, geochemistry and origin of ilmenite inclusions in Victorian Basanites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(7): 1023 – 1059
- Fu GX and Fu CR. 1999. Micropaleontologic fossils are found in Baolun gold deposit, Hainan. *Regional Geology of China*, 18(1): 110 – 111 (in Chinese)
- Gans PB, Mahood GA and Schermer E. 1989. Synextensional Magmatism in the Basin and Range Province: A Case Study from the Eastern Great Basin. Boulder, Colo: Geological Society of America
- Gulson BL, Mizon KJ and Atkinson BT. 1993. Source and timing of gold and other mineralization in the Red Lake Area, northwestern Ontario, based on lead-isotope investigations. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30(12): 2366 – 2379
- Hedenquist JW and Lowenstern JB. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490): 519 – 527
- Heinrich CA, Günther D, Audéat A, Ulrich T and Frischknecht R. 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27(8): 755 – 758
- Huang YM, Hawkesworth C, Smith I, van Calsteren P and Black P. 2000. Geochemistry of Late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: Implications for mantle enrichment processes. *Chemical Geology*, 164(3–4): 219 – 238
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523 – 548
- Kamenov GD, Saunders JA, Hames WE and Unger DL. 2007. Mafic magmas as sources for gold in Middle Miocene epithermal deposits of the Northern Great Basin, United States: Evidence from Pb isotope compositions of native gold. *Economic Geology*, 102(7): 1191 – 1195
- Keays RR. 1984. Archaean gold deposits and their source rocks: The upper mantle connection. In: Foster RP (ed.). *Gold '82: The Geology, Geochemistry, and Genesis of Gold Deposits; Proceedings of the Symposium Gold' 82*, University of Zimbabwe, 24 – 28 May 1982. Rotterdam; Balkema
- Keays RR. 1987. Principles of mobilization (dissolution) of metals in mafic and ultramafic rocks: The role of immiscible magmatic sulphides in the generation of hydrothermal gold and volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Review*, 2(1–3): 47 – 63
- Kitney KE, Olivo GF, Davis DW, Desrochers JP and Tessier A. 2011. The Barry gold deposit, Abitibi Subprovince, Canada: A greenstone belt-hosted gold deposit coeval with Late Archean deformation and magmatism. *Economic Geology*, 106(7): 1129 – 1154
- Li HK, Zhang CL, Xiang ZQ, Lu SN, Zhang J, Geng JZ, Qu LS and Wang ZX. 2013. Zircon and baddeleyite U-Pb geochronology of the Shennongjia Group in the Yangtze Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 673 – 697 (in Chinese with English abstract)
- Li SX, Yun P, Fan Y and Zhou JB. 2005. Zircon U-Pb age and its geological significance for Qiongzong pluton in Qiongzong area, Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 227 – 233, 241 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics: Suitability and limitation. *Sientia Geologica Sinica*, 31(1): 97 – 104 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Ding SJ, Li JY, Zhang RJ, Zhang YM and Ge WC. 2000a. Sm-Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi-Chenxing ophiolite in Hainan Island: Implications for the tectonic evolution of eastern Paleo-Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 425 – 432 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Ding SJ, Lee CY, Zhang RJ, Zhang YM and Ge WC. 2000b. Metamorphosed mafic rocks with N-type MORE geochemical features in Hainan Island: Remnants of the Paleo-Tethys Oceanic Crust? *Chinese Science Bulletin*, 45(10): 956 – 960
- Li XH, Zhou HW, Chung SL, Ding SJ, Liu Y, Lee CY, Ge WC, Zhang YM and Zhang RJ. 2002. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance. *Island Arc*, 11(3): 193 – 205
- Li XH, Qi CS, Liu Y, Liang XR, Tu XL, Xie LW and Yang YH. 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2481 – 2486
- Li XH, Li ZX, Li WX and Wang YJ. 2006. Initiation of the indosinian orogeny in South China: Evidence for a permian magmatic arc on Hainan Island. *Journal of Geology*, 114(3): 341 – 353
- Li XY, Guo F and Wang YJ. 2002. Post-orogenic tectono-magmatism and its implications for evolution of orogenic belts. *Geological Journal of China Universities*, 8(1): 68 – 78 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179 – 182
- Liu HL, Yan P, Zhang BY, Qiu XL and Xia B. 2004. Pre-Cenozoic basements of the South China Sea and Eastern Tethyan realm. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(1): 15 – 28 (in Chinese English abstract)
- Liu HL, Yan P, Liu YC and Deng H. 2006. Existing of the Qiongnan suture zone in the northern area of the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51(Suppl. II): 92 – 100 (in Chinese)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552 – 558 (in Chinese with English abstract)
- Liu YL, Ding SJ, Zhang XW and Fu YR. 2002. Ore-forming age of the Baolun gold deposit, Ledong County, Hainan. *Geological Review*, 48(Suppl. 1): 84 – 87 (in Chinese)
- Ludwig KR. 1999. User's Manual for Isoplot/EX, Version 2.05: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1 – 47
- Ludwig KR. 2001. Squid 1.02: A User Manual. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1 – 19
- Ma CQ, Li ZC, Ehlers C, Yang KG and Wang RJ. 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 45(1–4): 431 – 456
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101(5): 635 – 643
- Mao JW, Li YQ, Goldfarb R, He Y and Zaw K. 2003. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization? *Economic Geology*, 98(3): 517 – 534
- McCulloch MT and Gamble JA. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3–4): 358 – 374
- Mitchell RH and Keays RR. 1981. Abundance and distribution of gold, palladium and iridium in some spinel and garnet ilmenites: Implications for the nature and origin of precious metal-rich intergranular components in the upper mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(12): 2425 – 2433, 2435 – 2442
- Pearce JA, Alabaster T, Shelton AW and Searle MP. 1981. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: Evidence and implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*:

- Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 300(1454): 299 – 317
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva, 230 – 249
- Phillips GN and Groves DI. 1983. The nature of Archaean gold-bearing fluids as deduced from gold deposits of western Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, 30(1 – 2): 25 – 39
- Qian Q and Wang Y. 1999. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings. *Geology-Geochemistry*, 27(4): 29 – 32 (in Chinese with English abstract)
- Rock NMS and Groves DI. 1988. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds? *Nature*, 332(6161): 253 – 255
- Rusinov VL, Rusinova OV, Borisovskii SE and Alysheva EI. 2005. Metasomatic mineral composition at the Sukhoi Log Gold Deposit: Evidence for its genetic relation with mafic-ultramafic magmatism. *Doklady Earth Sciences*, 405(9): 1368 – 1373
- Shu B, Wang PA, Li ZJ, Chen BL and Dong FX. 2004. Research on mineralizing age of Baolun gold deposit in Hainan province and its significance. *Geoscience*, 18(3): 316 – 320 (in Chinese with English abstract)
- Shu B, Wang PA, Dong FX and Li ZJ. 2006. Ore characteristics and minerageny of the Baolun gold deposit in the Ledong area, Hainan Island, China. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 745 – 755 (in Chinese with English abstract)
- Simard M, Gaboury D, Daigneault R and Mercier-Langevin P. 2013. Multistage gold mineralization at the Lapa mine, Abitibi Subprovince; Insights into auriferous hydrothermal and metasomatic processes in the Cadillac-Larder Lake Fault Zone. *Mineralium Deposita*, 48(7): 883 – 905
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Tan J, Wei JH, Audétat A and Pettke T. 2012. Source of metals in the Guocheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, North China Craton: Link to Early Cretaceous mafic magmatism originating from Paleoproterozoic metasomatized lithospheric mantle. *Ore Geology Reviews*, 48: 70 – 87
- Tang LM, Chen HL, Dong WC, Yang SF, Shen ZY, Cheng XG and Fu LL. 2013. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: Chronology and geochemistry constraints of bimodal intrusive rocks. *Science China (Earth Sciences)*, 56(5): 783 – 793
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Oxford: Blackwell
- Thompson JFH, Sillitoe RH, Baker T, Lang JR and Mortensen JK. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34(4): 323 – 334
- Treuil M and Joron JL. 1975. Utilization des ~16ments hygromagmatophiles pour la simplification de la modelisation quantitative des processus magmatiques, exemples de l'Afar et de la dorsale m~dio-atlantique. *Rendiconti Societa Italiana Mineralogia Petrografia*, 31: 125 – 174
- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism. *Geology*, 20(10): 931 – 934
- Wang CW, Hong HL, Zhong ZQ, Zhang XW, Wang J, Li FL and Xu YJ. 2011. The characteristics of fluid inclusions in gold-bearing quartzes and their source indicator of Baolun gold deposit, Hainan. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 36(6): 1009 – 1020 (in Chinese with English abstract)
- Wang DY and Yun P. 1999. Basic characteristics of Late Triassic A-type granite in Ledong area, Hainan. *Guangdong Geology*, 14(4): 19 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Zhou HW, Zhong ZQ, Zhang XW and Xiang H. 2013. Evolution of fluid inclusions in the Baolun gold deposit, Hainan and its metallogenesis. *China Mining Magazine*, 22(1): 76 – 82 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Yu JH, Xu XS, Xie L, Qiu JS and Sun T. 2007. Formation age and origin of the Gutian-Xiaotao granitic complex in the southwestern Fujian Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1470 – 1484 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Li JW, Jian P, Zhao ZH, Xiong XL, Bao ZW, Xu JF, Li CF and Ma JL. 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3 – 4): 339 – 354
- Wang XF, Ma DQ and Jiang DH. 1991. *Geology of Hainan Island*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang ZL, Xu DR, Wu CJ, Fu WW, Wang L and Wu J. 2013. Discovery of the Late Paleozoic ocean island basalts (OIB) in Hainan Island and their geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 875 – 886 (in Chinese with English abstract)
- Winter JD. 2010. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. 2nd Edition. New York: Prentice Hall
- Xie CF, Zhang KM, Huang ZX, Duan QF, Yao HZ and Duan WJ. 1999. Geological characteristics and isotopic chronology of the lithodemic units of intrusive rocks in Lelai Region, eastern Hainan Island. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 26 – 37 (in Chinese with English abstract)
- Xie CF, Zhu JC, Zhao ZJ, Ding SJ, Fu TA, Li ZH, Zhang YM and Xu DM. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age dating of garnet-acmite syenite: Constraints on the Hercynian-Indosinian tectonic evolution of Hainan Island. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 47 – 57 (in Chinese with English abstract)
- Xie CF, Zhu JC, Ding SJ, Zhang YM, Chen ML, Fu YR, Fu TA and Li ZH. 2006. Age and petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2493 – 2508 (in Chinese with English abstract)
- Xie GM. 1992. Discussion on metallization of basic-ultrabasic rock type gold deposit. *Mineral Resources and Geology*, 6(3): 177 – 182 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Fan WM, Liang XQ and Tang HF. 2001. Characteristics of Proterozoic metamorphic basement in Hainan Island and its implications for crustal growth: Nd and Pb isotope constraints. *Geological Journal of China Universities*, 7(2): 146 – 157 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Xia B, Li PC, Chen GH, Ma C and Zhang YQ. 2007. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metabasites in Hainan Island, South China; Implications for geodynamic evolution since the Late Precambrian. *Island Arc*, 16(4): 575 – 597
- Xu DR, Ma C, Li PC, Xia B and Zhang YQ. 2007. U-Pb SHRIMP-dating of zircon domains from metaclastic sedimentary rocks in Hainan Island, South China, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 381 – 393 (in Chinese with English abstract)
- Xu DR, Wang ZL, Cai JX, Wu CJ, Bakun-Czubarow N, Wang L, Chen HY, Baker MJ and Kusiak MA. 2013. Geological characteristics and metallogenesis of the Shilu Fe-ore deposit in Hainan Province, South China. *Ore Geology Review*, 53: 318 – 342
- Xu DR, Wu CJ, Hu GC, Chen ML, Fu YR, Wang ZL, Chen HY and Hollings P. 2016. Late Mesozoic molybdenum mineralization on Hainan Island, South China: Geochemistry, geochronology and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72: 402 – 433
- Xu DR, Wang ZL, Wu CJ, Zhou YQ, Shan Q, Hou MZ, Fu YR and

- Zhang XW. 2017. Mesozoic gold mineralization in Hainan Province of South China: Genetic types, geological characteristics and geodynamic settings. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 80 – 108
- Yang SF, Yu ZY, Guo LZ and Shi YS. 1989. Terrane division of Hainan Island and tectonic significance of Paleomagnetic study. *Journal of Nanjing University (Earth Science edition)*, 1(1–2): 38–46 (in Chinese)
- Zhang FF, Wang YJ, Chen XY, Fan WM, Zhang YH, Zhang GW and Zhang AM. 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. *Gondwana Research*, 19(4): 910 – 925
- Zhang GS, Wen HJ, Li SL, Hu RZ and Qiu YZ. 2009. Geochemical characteristics of bojiite in northern Fujian Province and their geodynamic significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(2): 243 – 252 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XW, Xiang H, Zhong ZQ, Zhou HW, Zhang L, Yang N and Wang J. 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. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 34(6): 921 – 930 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YM, Zhang RJ, Yao HZ and Ma GG. 1997. The Precambrian crustal evolution of Hainan Island. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 22(4): 395–400 (in Chinese)
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556 – 565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33
- ### 附中文参考文献
- 陈柏林, 丁式江, 李中坚, 董法先, 廖香俊, 舒斌, 符峰, 傅杨荣, 董诚. 2001. 海南抱伦金矿床成矿时代研究. *地球化学*, 30(6): 525–532
- 陈迪云, 章邦桐, 孙大中, 杨东生. 1997. 武夷山高溪和富城花岗岩体地球化学及其与铀成矿的关系. *岩石学报*, 13(1): 71–84
- 陈颖民, 傅杨荣, 周迎春, 周慧文, 薛开文. 2011. 海南乐东抱伦金矿床控矿构造特征及主成矿期年代学研究. *黄金*, 32(3): 16–23
- 丁式江, 黄香定, 李中坚, 傅杨荣, 董法先, 舒斌, 张小文. 2001. 海南抱伦金矿地质特征及其成矿作用. *中国地质*, 28(5): 28–34, 18
- 丁式江, 傅杨荣, 杨立强, 邓军, 廖香俊, 吴国爱, 符峰. 2007. 海南乐东抱伦金矿地质及矿产预测. 北京: 地质出版社
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81(11): 1449–1461
- 符国祥, 符策锐. 1999. 海南岛抱伦金矿区发现微古植物化石. *中国区域地质*, 18(1): 110–111
- 李怀坤, 张传林, 相振群, 陆松年, 张健, 耿建珍, 瞿乐生, 王志先. 2013. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. *岩石学报*, 29(2): 673–697
- 李孙雄, 云平, 范渊, 周进波. 2005. 海南岛琼中地区琼中岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 29(2): 227–233, 241
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. *地质科学*, 31(1): 97–104
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 李寄岬, 张仁杰, 张业明, 葛文春. 2000a. 海南岛“邦溪-晨星蛇绿岩片”的时代及其构造意义: Sm-Nd 同位素制约. *岩石学报*, 16(3): 425–432
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 李寄岬, 张仁杰, 张业明, 葛文春. 2000b. 海南岛洋中脊型变质基性岩: 古特提斯洋壳的残片? *科学通报*, 45(1): 84–89
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 梁细荣, 涂湘林, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约. *科学通报*, 50(19): 2155–2160
- 李晓勇, 郭峰, 王岳军. 2002. 造山后构造岩浆作用研究评述. *高校地质学报*, 8(1): 68–78
- 刘海龄, 阎贫, 张伯友, 丘学林, 夏斌. 2004. 南海前新生代基底与东特提斯构造域. *海洋地质与第四纪地质*, 24(1): 15–28
- 刘海龄, 阎贫, 刘迎春, 邓辉. 2006. 南海北缘琼南缝合带的存在. *科学通报*, 51(增 II): 92–100
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552–558
- 刘玉琳, 丁式江, 张小文, 傅杨荣. 2002. 海南乐东抱伦金矿床成矿时代研究. *地质评论*, 48(增 1): 84–87
- 钱青, 王焰. 1999. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征. *地质地球化学*, 27(4): 29–32
- 舒斌, 王平安, 李中坚, 陈柏林, 董法先. 2004. 海南抱伦金矿的成矿时代研究及其意义. *现代地质*, 18(3): 316–320
- 舒斌, 王平安, 董法先, 李中坚. 2006. 海南乐东地区抱伦金矿矿石特征及其成因矿物学意义. *地质通报*, 25(6): 745–755
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 杨树锋, 沈忠悦, 程晓敏, 付璐露. 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. *中国科学(地球科学)*, 43(3): 433–445
- 王朝文, 洪汉烈, 钟增球, 张小文, 王婧, 李方林, 徐亚军. 2011. 海南抱伦金矿含金石英脉流体包裹体特征及其意义. *地球科学(中国地质大学学报)*, 36(6): 1009–1020
- 王大英, 云平. 1999. 海南乐东地区晚三叠世 A 型花岗岩基本特征. *广东地质*, 14(4): 19–21
- 王婧, 周汉文, 钟增球, 张小文, 向华. 2013. 海南抱伦金矿床流体演化与成矿作用. *中国矿业*, 22(1): 76–82
- 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 谢磊, 邱检生, 孙涛. 2007. 闽西南古田-小陶花岗岩杂岩体的形成时代和成因. *岩石学报*, 23(6): 1470–1484
- 王智琳, 许德如, 吴传军, 付王伟, 王力, 吴俊. 2013. 海南岛晚古生代洋岛玄武岩(OIB型)的发现及地球动力学暗示. *岩石学报*, 29(3): 875–886
- 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991. 海南岛地质: 二岩浆岩. 北京: 地质出版社
- 谢才富, 张开明, 黄照先, 段其发, 姚舟舟, 段万军. 1999. 琼东乐来地区侵入岩岩石谱系单位的地质特征及同位素年代学研究. *华南地质与矿产*, (1): 26–37

- 谢才富,朱金初,赵子杰,丁式江,付太安,李志宏,张业明,徐德明. 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:对海南岛海西-印支期构造演化的制约. 高校地质学报, 11(1): 47-57
- 谢才富,朱金初,丁式江,张业明,陈沐龙,付杨荣,付太安,李志宏. 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. 岩石学报, 22(10): 2493-2508
- 谢贵明. 1992. 基性超基性岩型金矿床的成矿作用讨论. 矿产与地质, 6(3): 177-182
- 许德如,范蔚茗,梁新权,唐红峰. 2001. 海南岛元古宙变质基底性质和地壳增生的 Nd、Pb 同位素制约. 高校地质学报, 7(2): 146-157
- 许德如,马驰,李鹏春,夏斌,张玉泉. 2007. 海南岛变碎屑沉积岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 地质学报, 81(3): 381-393
- 杨树锋,虞子冶,郭令智,施央申. 1989. 海南岛的地体划分、古地磁研究及其板块构造意义. 南京大学学报(地球科学版), 1(1-2): 38-46
- 张贵山,温汉捷,李石磊,胡瑞忠,裘愉卓. 2009. 闽北角闪辉长岩的地球化学特征及其地球动力学意义. 矿物学报, 29(2): 243-252
- 张小文,向华,钟增球,周汉文,张利,杨念,王婧. 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. 地球科学(中国地质大学学报), 34(6): 921-930
- 张业明,张仁杰,姚华舟,马国干. 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. 地球科学(中国地质大学学报), 22(4): 395-400
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565