

印度尼西亚塔里亚布岛花岗岩的 Rb-Sr 年代学、地球化学及地质意义

丁俊^{1,2}, 张术根^{1,2}, 韩世礼^{1,2}, 徐忠发³, 秦新龙³

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 有色金属华东地质勘查局, 南京 210007)

摘要: 印度尼西亚塔里亚布岛花岗岩位于东南亚陆缘壳体北缘。全岩 Rb-Sr 等时线测年结果表明, 该花岗岩形成于中晚三叠世((227±2) Ma), $I_{\text{sr}}=0.716\ 67\pm0.002\ 40$, 属印支期的壳源 S 型花岗岩。岩石类型以二长花岗岩为主, 富硅($w(\text{SiO}_2)=75.92\%\sim77.38\%$)、富碱($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})>7\%$)、富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>7$), 贫钙、镁和铁。稀土及微量元素方面富 Rb、K、Th、U、Ta 和 Nb, 贫 Ba、Sr、P、Ti 和 Cr, 具强烈的铕负异常($\delta(\text{Eu})=0.13\sim0.52$)及铈负异常($\delta(\text{Ce})=0.43\sim0.79$), 反映出其经历过彻底的岩浆演化分异和斜长石分离结晶过程。结合区域地质背景, 晚三叠世前塔里亚布岛位于新几内亚岛北缘, 尚未从冈瓦纳大陆分离。塔里亚布岛花岗岩形成于泛大洋壳对冈瓦纳大陆陆壳北东部边缘碰撞后的拉张-伸展环境, 与该岛铁多金属矿田同属本次构造-岩浆-成矿事件的产物。

关键词: 塔里亚布岛; Rb-Sr 年代学; 地球化学; 印支期; 花岗岩

中图分类号: P588.121; P597.3

文献标志码: A

Rb-Sr geochronology, geochemistry and geological implications of granite from Taliabu Island, Indonesia

DING Jun^{1,2}, ZHANG Shu-gen^{1,2}, HAN Shi-li^{1,2}, XU Zhong-fa³, QIN Xin-long³

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China)

Abstract: The granite from Taliabu Island of Indonesia is situated in the north margin of Southeast Asia continental margin crustobody. The data of the whole rock Rb-Sr isotopic isochron show that the granite was formed in Middle to Late Trassic ((227±2) Ma), $I_{\text{sr}}=0.716\ 67\pm0.002\ 40$. It belongs to Indo-Chinese epoch and S-type granite from crust source. The rock type is mainly monzogranite. Geochemically, the granite is rich in silica ($w(\text{SiO}_2)=75.92\%\sim77.38\%$), alkali ($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})>7\%$) and potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>7$), poor in calcium, magnesium and iron, and shows the enrichment of Rb, K, Th, U, Ta, Nb, and depletion of Ba, Sr, P, Ti and Cr, with an intensive negative Eu anomaly ($\delta(\text{Eu})=0.13\sim0.52$), and negative Ce anomaly ($\delta(\text{Ce})=0.43\sim0.79$). These geochemical characteristics indicate that the magma have gone through complete evolution and fractional crystallization of plagioclase. Combined with the regional geological setting, Taliabu Island is located in the north margin of New Guinea island which is not separated from Gondwana. The granite was formed in a post-collision extensional tectonic setting between the Panthalassa and the northeast margin of Gondwana. The granite is the same product with the Fe-polymetallic orefield in Taliabu island by the tectonism-magmatism-mineralization event.

Key words: Taliabu Island; Rb-Sr geochronology; geochemistry; Indo-Chinese epoch; granite

根据陈国达所创立的壳体构造理论^[1], 印度尼西亚苏拉群岛(Sula Islands)位于东南亚陆缘壳体北缘与东亚陆缘壳体南西缘、澳大利亚壳体和菲律宾海壳体的交接部位, 归属北伊利安地槽区南部边缘部分, 靠近该地槽区与班达海地槽区、苏拉威西海地槽区的交接过渡部位, 是环太平洋成矿带的组成部分, 同时也是东南亚锡铁成矿带的延伸, 成矿地质条件极为有利。地理范围约为东经 124°~126°30', 南纬 1°30'~2°30'。东南亚陆缘壳体的大地构造环境极其复杂, 古地磁资料及区域地质地球物理资料^[2-9]表明: 它的南端部分是由冈瓦纳大陆北部边缘在古生代至中生代分裂出一系列微陆块, 逐渐向北漂移, 经过从古生代到新生代的一系列构造活动, 分别发生碰撞和缝合而形成的。苏拉群岛则是在新生代由澳大利亚壳体中分离而来的小碎块, 该群岛地质工作程度低, 仅由国外地质调查机构完成 1:250 000 区域地质调查工作。塔里亚布岛是苏拉群岛的主要岛屿之一, 2007 年以来, 经有色华东地勘局的勘探, 确定存在大型铁多金属矿田, 伴生 Zn、

Bi、Sn 和 Cu 等矿产, 成因类型以矿浆贯入型和接触交代型为主。该岛西端大面积出露的花岗岩是该矿田主要的成矿物质来源和控矿因素, 矿化主要分布于花岗岩体与围岩接触带附近。因此, 该花岗岩的岩石成因、构造环境对研究印尼东部大地构造演化, 总结所属成矿区域的成矿事件和成矿规律具有重要意义。但该花岗岩的形成年代、地质地球化学特征尚无人研究。本文作者根据岩石学、Rb-Sr 年代学、岩石化学及稀土微量元素地球化学, 对塔里亚布岛花岗岩体的侵入时代、地球化学特征及地质意义进行详细探讨。

1 区域大地构造演化

图 1 所示为早石炭世、早二叠世、中-晚二叠世及晚三叠世的特提斯区域古地理恢复图。石炭纪(290 Ma)前, 新几内亚岛(New Guinea Island, 旧称伊里安岛)与澳大利亚东部同属塔斯曼造山带。早二叠世(280

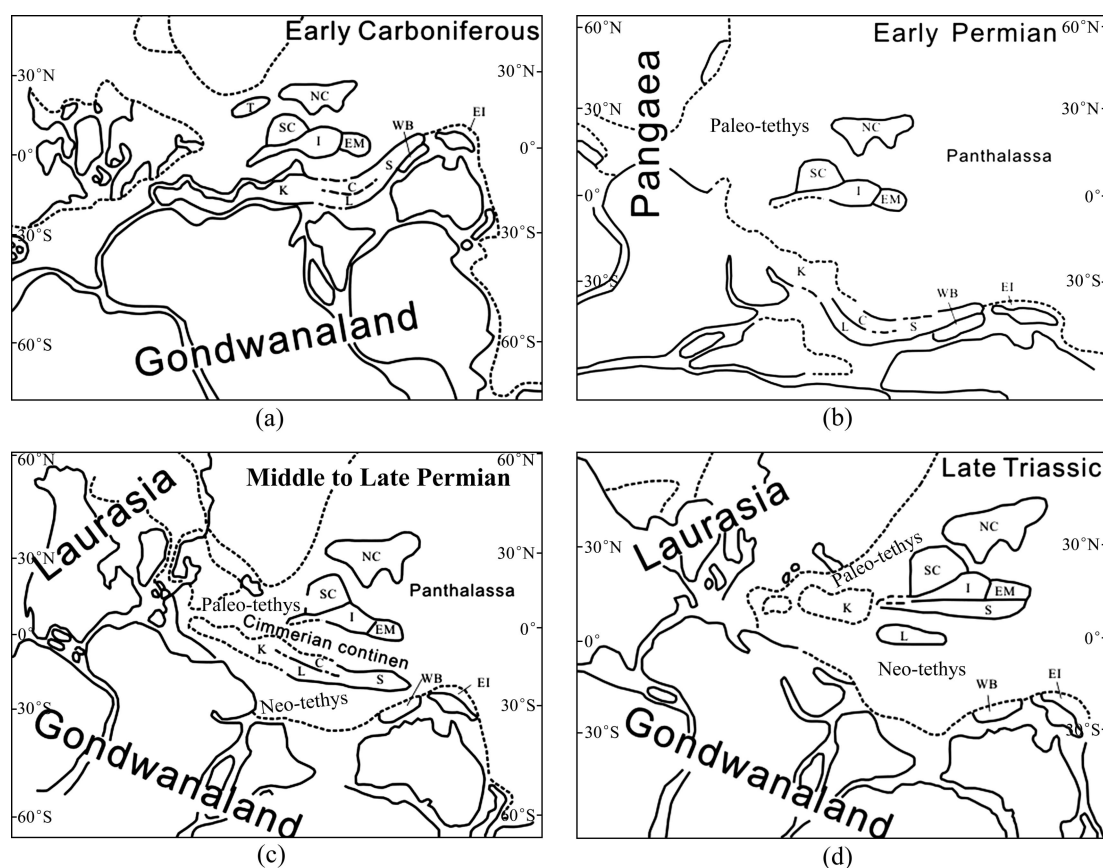


图 1 早石炭世(a)、早二叠世(b)、中晚二叠世(c)及晚三叠世(d)特提斯区域古地理恢复图(据文献[10], 部分修改): NC—华北; SC—华南; I—印度支那; T—塔里木; C—伊朗中部; EM—东马来西亚; S—滇缅马苏; L—拉萨; Q—羌塘; WB—西缅甸; K—外高加索; EI—新几内亚岛

Fig. 1 Paleogeographic reconstruction of Tethyan region of Early Carboniferous (a), Early Permian (b), Middle to Late Permian (c) and Late Trassic (d) (After Ref. [10], partly modified)

Ma)时, 澳大利亚大陆壳体位于冈瓦纳(Gondwana)大陆南东部, 新几内亚岛则处在澳大利亚大陆壳体的北东缘, 其地理位置在南纬 40°附近, 其北是基梅里(Cimmerian)次大陆(从西至东包括外高加索、伊朗中部、拉萨和滇缅马苏等壳块)。基梅里次大陆以北为古特提斯洋。中-晚二叠世(255 Ma)时, 基梅里次大陆从冈瓦纳大陆北缘裂解, 逐渐往北漂移, 古特提斯洋逐渐闭合, 而基梅里次大陆以南的新特提斯洋由东往西逐渐扩张, 此次裂解事件使新几内亚岛在印支期内一直处于拉张裂谷环境。侏罗纪时, 澳大利亚大陆壳体与冈瓦纳大陆裂解, 逐渐往北漂移, 一直处于海相的新几内亚岛逐渐隆起, 以沉降与隆升动荡交替运动为特色。至 50 Ma 时, 新几内亚岛完全成为陆地, 这是澳大利亚大陆壳体一次陆壳增生的过程。在整个晚第三纪, 由于喜马拉雅运动的缘故, 澳大利亚大陆壳体向北持续漂移, 逐渐靠近欧亚板块, 印尼东部和澳大利亚壳体北缘一直都在和继承性岛弧系碰撞, 白垩纪一早第三纪班达海海床张开, 使新几内亚岛北缘部分裂离形成多个微陆块。至 15 Ma 时, 苏朗断裂(Sorong fault)的产生使其中一部分微陆块往西漂移, 最终形成

现今的苏拉群岛、布鲁岛、布敦岛及米苏尔岛(见图 2), 成为现今东南亚陆缘壳体的组成部分。

2 岩体地质及岩石学特征

塔里亚布岛花岗岩呈岩基产出, 局部呈岩枝状, 出露面积约 330 km²。岩体主要沿北北西断裂侵入石炭系地层及石炭-二叠系火山岩, 局部沿北东向断裂侵入, 侏罗系、白垩系、第三系及第四系地层不整合覆盖于岩体上(见图 2)。接触带围岩受烘烤及热变质作用强烈, 出现重结晶和角岩化等现象。岩体与碳酸盐岩接触地段矽卡岩化强烈, 出现金云母化、透闪石化、硅灰石化、透辉石化、绿帘石化及石榴子石化等现象。岩体内部可见析离体及少量顶垂体和捕掳体。岩体内部及周边发育少量正长岩脉、石英闪长岩脉及辉绿岩脉等中基性岩脉。

岩石类型以肉红色-浅肉红色二长花岗岩为主。中-中粗粒花岗岩结构, 个别似斑状结构, 块状构造。矿物主要组成如下: 石英呈不规则状、浑圆状、破布

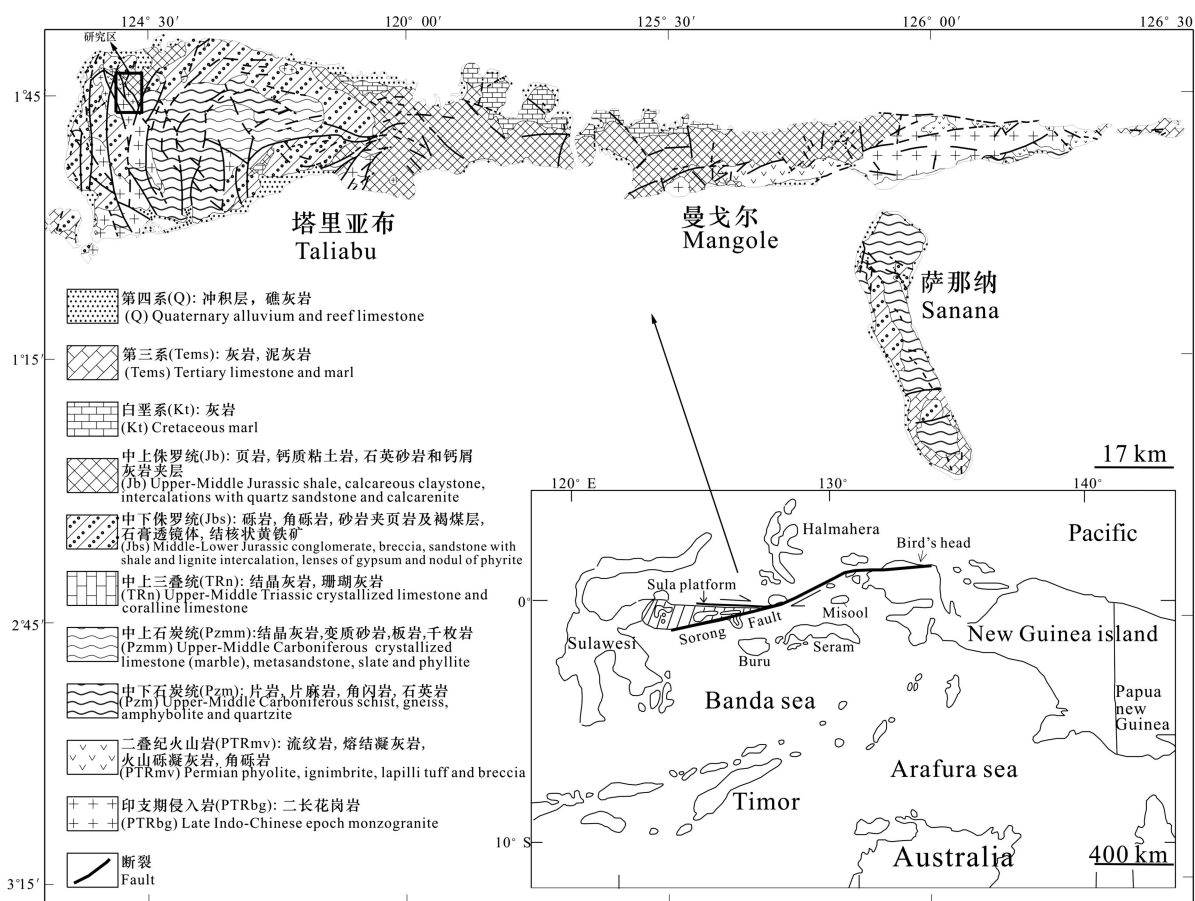


图 2 印度尼西亚苏拉群岛区域地质略图(右下图据文献[8])

Fig. 2 Regional geological sketch map of Sula islands, Indonesia (Lower right map after Ref. [8])

状、它形粒状及港湾状，粒径 0.6~2.2 mm，含量 22%~30%(质量分数)，个别含量超过 50%；正长石(钾长石)呈它形及半自形板柱状，长径 0.4~3.2 mm，含量 40%~47%。卡氏双晶，钠长石化多呈不规则短脉状发育；斜长石呈半自行柱状至它形，长径 0.4~3.4 mm，含量 20%~33%。多具聚片双晶及贯穿双晶；黑云母多呈叶片状、半自形及它形，边界参差不齐，长径 0.1~1.4 mm，含量 3%~5%，常交代斜长石或为石英及长石等矿物交代；白云母含量低，呈片状，常交代正长石，偶可见微斜长石。副矿物以锆石和磁铁矿为主。

3 分析方法

在塔里亚布岛西端的花岗岩体内部采集新鲜代表性样品。全岩样品研磨至 75 μm 后进行分析。Rb-Sr 等时线年龄测试由宜昌地质矿产研究所完成，仪器型号：MAT261 型固体质谱仪，检测依据：DZ/T0184.4—1997，采用的衰变常数为 $1.42\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$ 。主量元素分析由湖南建材非金属测试利用研究所完成，测试依据：GB/T14506.7—1993 硅酸盐岩石化学分析方法。稀土及微量元素地球化学分析由长沙核工业 230 研究所完成，检测依据：DZ/T0223—2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则。研究区全岩 Rb-Sr 等时线见图 3，花岗岩 Rb-Sr 同位素地球化学分析数据见表 1，主量元素、稀土及微量元素地球化学分析数据见表 2。

4 Rb-Sr 年代学

对表 1 所列数据进行等时线拟合发现，各样品数据具有较高的相关性，表明这些岩石在形成后未发生明显的改变，来源于相同的同位素体系。拟合所得全岩 Rb-Sr 等时线直线方程为 $y=0.003\ 23+0.716\ 67x$ ，

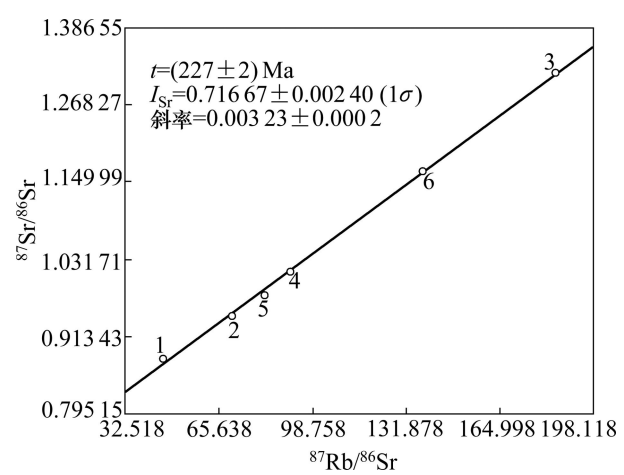


图 3 塔里亚布岛花岗岩全岩 Rb-Sr 等时线
Fig. 3 Whole rock Rb-Sr isotopic isochron of Taliabu granite

计算结晶年龄为 $(227\pm 2)\text{ Ma}$ ，属印支期的中晚三叠世。该花岗岩侵入的最新地层为石炭系，因此，其 Rb-Sr 全岩等时线年龄与实际地质情况吻合。塔里亚布岛花岗岩的 I_{Sr} 值 $(0.716\ 67\pm 0.002\ 40)$ 显著高于幔源花岗岩 $(0.706)^{[1]}$ ，为高初始比值的花岗岩，由硅铝质地壳的局部熔融而形成，属壳源(大陆壳古老硅铝质岩石)S 型花岗岩。

5 地球化学

5.1 主量元素

主量元素中 SiO_2 含量较高，达 75.92%~77.38%， Al_2O_3 含量为 12.66%~77.38%。全碱含量 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})>7\%$ ， K_2O 含量 $>\text{Na}_2\text{O}$ 含量，相对富钾贫钠。基性组分 MnO 、 MgO 、 FeO 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 P_2O_5 等含量较低，其中， TiO_2 和 P_2O_5 的含量非常低。 SiO_2 除与 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 相关性不好外，与其他组分呈负相关。里特曼指数 $\sigma<3.3$ ，属中等钙碱性系列，

表 1 塔里亚布岛花岗岩 Rb-Sr 同位素地球化学分析数据
Table 1 Rb-Sr isotopic geochemical analysis data of Taliabu granite

样品编号	样品名称	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(1\sigma)$
YY10	花岗岩	372.9	23.58	46.3180	0.869 08±0.000 04
YY11	花岗岩	382.3	16.12	69.938	0.942 57±0.000 04
YY12	花岗岩	385.5	6.382	184.316	1.312 66±0.000 01
YY13	花岗岩	393.8	12.85	90.982	1.010 38±0.000 02
YY14	花岗岩	382.5	13.87	81.582	0.976 41±0.000 04
YY16	花岗岩	406.4	8.89	137.675	1.162 33±0.000 04

表 2 塔里亚布岛花岗岩主量元素、稀土及微量元素地球化学分析数据

Table 2 Major, rare-earth and trace elements data for Taliabu granite

样品 编号	w/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	LOI	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	CaO	
YY10	75.94	12.66	2.18	0.48	4.492	2.627	0.050	0.161	0.00	0.91	
YY11	75.92	13.58	1.15	0.50	4.576	2.679	0.038	0.086	0.05	0.84	
YY12	77.06	13.57	0.59	0.45	4.236	2.715	0.025	0.079	0.00	0.84	
YY13	76.88	13.61	0.87	0.57	4.444	2.556	0.050	0.079	0.05	0.70	
YY14	77.08	13.19	0.92	0.67	4.412	2.627	0.050	0.074	0.10	0.70	
YY16	77.38	13.42	0.68	0.88	4.768	2.462	0.025	0.071	0.00	0.91	
样品 编号	w/%			σ	DI	A/CNK	CaO/Na ₂ O	w/10 ⁻⁶			
	MgO	SO ₃	FeO					La	Ce	Pr	
YY10	0.05	0.100	1.22	1.53	90.39	1.168	0.35	94.9	139	25.2	
YY11	0.05	0.069	0.22	1.6	91.39	1.247	0.31	93.3	166	26.9	
YY13	0.03	0.143	0.20	1.44	91.89	1.321	0.27	60.6	85.8	17.1	
YY14	0.02	0.099	0.48	1.45	92.32	1.271	0.27	37.2	48.7	9.9	
YY16	0.04	0.025	0.29	1.52	91.85	1.235	0.37	27.8	42.8	7.14	
样品 编号	w/10 ⁻⁶										
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
YY10	96.6	26.1	0.445	24.4	3.7	19.1	3.63	9.83	1.38	9.62	
YY11	108	32.3	0.52	28.5	4.15	20	3.31	8.8	1.17	7.47	
YY12	86.7	22.9	0.318	22.1	3.29	18.8	3.69	11.4	1.7	10.8	
YY13	67.4	17	0.322	14.5	1.93	10.2	1.87	5.52	0.797	5.51	
YY14	37.6	9.75	0.236	9.12	1.5	8.78	1.81	5.81	0.849	5.59	
YY16	26.7	6.77	0.15	6.64	1.16	7.52	1.59	5.12	0.809	5.64	
样品 编号	w/10 ⁻⁶			LREE/ HREE	w/10 ⁻⁶						
	Lu	Y	Σ REE		Rb	Sr	Hf	Zr	V	Ta	
YY10	1.39	114	569.30	2.04	366	25.9	5.86	160	7.03	3.99	
YY11	1.07	94.8	596.29	2.52	380	17	6.76	162	5.69	4.51	
YY12	1.69	126	489.99	1.46	364	6.44	6.79	321	6.69	3.77	
YY13	0.787	56.8	346.14	2.54	386	12.8	13	161	5.44	3.96	
YY14	0.832	56	233.68	1.59	371	13.5	6.03	147	5.53	4.27	
YY16	0.841	47.7	188.38	1.45	366	25.9	5.86	160	7.03	3.99	
样品 编号	w/10 ⁻⁶								Rb/Sr	δ (Eu)	δ (Ce)
	Nb	Cr	Ga	Ge	Ba	Sc	Th	U			
YY10	28.1	9.44	20.2	2.41	105	8.09	48.7	13.2	14.13	0.05	0.67
YY11	35.5	3.21	19.2	2.57	89.7	5.8	45.2	12.8	22.35	0.05	0.79
YY12	49.6	4.29	18.6	2.40	86.8	5.89	62.5	16.4	56.52	0.04	0.43
YY13	29.7	4.52	17.8	2.02	90.9	5.37	47.7	12.5	30.16	0.06	0.63
YY14	36.5	9.15	17.7	2.15	173	7.53	38.9	13.8	27.48	0.08	0.60
YY16	28.1	9.44	20.2	2.41	105	8.09	48.7	13.2	45.51	0.07	0.72

A/CNK 值较高, $1.168 \sim 1.321 > 1.0$, 属过铝花岗岩, 分异指数 DI 较高, 为 $90.39 \sim 92.32$, 表明演化分异充分。因此, 塔里亚布岛花岗岩具多硅过铝富碱、贫镁铁、贫基性组分的特点, 经历了高度的演化分异过程, 具地壳重熔型岩浆特征。

5.2 稀土及微量元素

稀土元素总量 $\sum \text{REE}$ 较高, 为 $188.38 \times 10^{-6} \sim 596.29 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 为 $1.45 \sim 2.52$, 属轻稀土富集、重稀土弱亏损的中等分馏型。各样品的稀土元素配分模式(见图 4)非常相似, 总体为右倾斜曲线, 倾斜程度不高。在轻稀土一侧为向右缓倾斜的曲线, 重稀土一侧为近乎平行的曲线, 表现出轻稀土分馏明显、重稀土分馏不明显的特征。稀土元素配分曲线中铕谷十分明显, $\delta(\text{Eu})$ 低至 $0.04 \sim 0.07$, 具壳源花岗岩的负铕异常特征, 表明其源区以斜长石为残留相, 在岩浆演化过程中经历明显的斜长石分离结晶作用。Ce 负异常也较明显, 表明在结晶分异过程中, 氧化作用较强。根据稀土元素地球化学性质, 地幔本身不存在 Ce 亏损, 幔源岩石在岩浆过程中难以产生 Ce 负异常, 因此, 这种 Ce 亏损只能源于地壳。

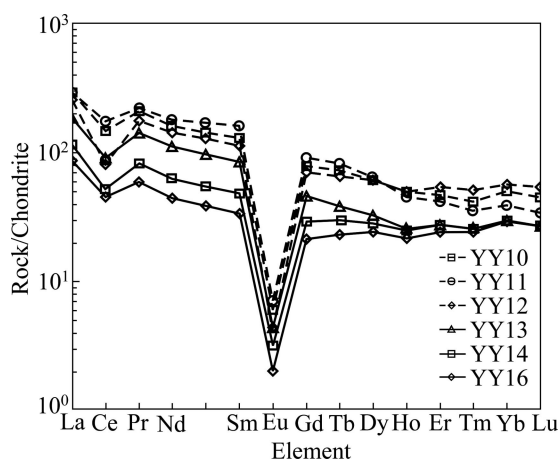


图 4 塔里亚布岛花岗岩稀土元素配分曲线(球粒陨石平均值来自文献[12])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE diagrams of Taliabu granite (Chondrite REE values from Ref. [12])

在微量元素蛛网图(见图 5)中, 各样品的微量元素分布型式基本相似, 属右倾曲线。表现为 Ba、Sr、Ti 和 P 等元素强烈负异常, 大离子亲石元素 Rb 和 K 及高场强元素 Th、U、Ta 和 Nb 等出现一定程度的富集。Sr 的强烈负异常可能与岩浆分异或岩浆中钙含量偏低有关, 表明岩浆发生了明显的长石分离结晶。强不容元素 Rb 强烈富集表明, 岩浆分异作用进行得很彻底,

花岗岩在形成过程中经历高度演化。Rb/Sr 比值变化于 $14.13 \sim 56.52$, 远高于全球上地壳平均值(0.32)^[14], 富铷贫锶的特征十分明显。Ti 负异常则可能是钛铁氧化物分离结晶的结果, 表明分离结晶完全。Ba 的强烈亏损具有非造山花岗岩的特征, 也反映有强烈分异的分离结晶作用存在。Al/Ga 比值($3\ 318 \sim 4\ 048$)低于花岗岩平均值($2\ 000 \sim 8\ 000$)^[15]。相对于 Ga, Al 更易进入钙长石的结构中, 因此, Al/Ga 比值低也进一步指示富钙斜长石可能是塔里亚布花岗岩的源区残留相。

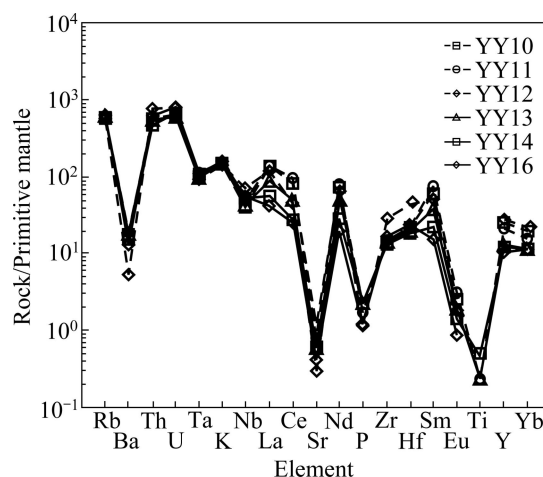


图 5 塔里亚布岛花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准值据文献[13])

Fig. 5 Primitive mantle normalized trace elements spider diagram of Taliabu granite (Primitive mantle values from Ref. [13])

6 讨论

6.1 岩石成因与构造环境

塔里亚布岛花岗岩 $I_{\text{Sr}} = 0.716\ 6 > 0.710\ 0$, 是典型的 S 型花岗岩, 其岩浆源于地壳, 源岩应是沉积岩或变质岩^[16]。在花岗岩锶同位素演化图解中(见图 6), 样品数据点十分接近大陆壳增长线, 因此, 该花岗岩体的岩浆基本源于上部大陆壳。花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 在 $0.27 \sim 0.37$ 之间, 集中在 0.30 左右, 表明源岩中泥质成分和砂质成分同时存在^[17]。Rb/Sr—Rb/Ba 图解(见图 7)中, 样品数据点均分布在富黏土源岩区, 因此, 本区花岗岩的源岩应以泥质岩为主, 砂质成分处于次要地位。泥质源岩或砂质源岩占优势的花岗岩反映了增生地壳块体的成熟度^[18], 区内以泥质源岩为主的花岗岩表明它是成熟地块经深熔作用和岩浆分离结晶作用的结果。

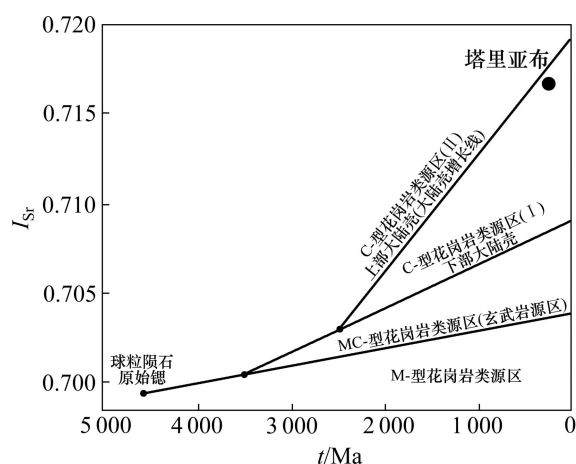


图6 塔里亚布岛花岗岩锶同位素演化图解(底图据文献[11], 部分修改)

Fig. 6 Diagram of Sr isotope evolution of Taliabu granite (Base diagram partly modified from Ref. [11])

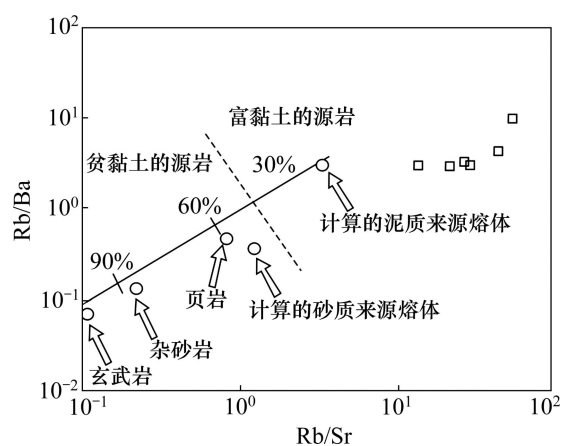


图7 塔里亚布岛花岗岩 Rb/Ba—Rb/Sr 图(底图据文献[17])

Fig. 7 Rb/Ba—Rb/Sr diagram of Taliabu granite (Base diagram modified from Ref. [17])

综上所述, 印支期内基梅里次大陆已开始从冈瓦纳大陆裂解, 古特提斯洋逐渐闭合, 新特提斯洋逐渐扩张, 该区域岩石圈的拉张—伸展刚刚开始。塔里亚布岛花岗岩正是在这一构造运动时期内的岩浆活动产物((227±2) Ma)。在图8中, 样品数据点集中分布在挤压区与伸展区的界线附近, 暗示该花岗岩岩浆形成于挤压向伸展转变的动力学环境。在图9中, 样品点主要落在大陆碰撞花岗岩区域, 但均偏向板内花岗岩, 表明岩体形成于后碰撞向板内环境的地壳伸展转换阶段。塔里亚布岛花岗岩属高钾钙碱性系列岩浆岩, 这种岩浆岩是后碰撞岩浆活动的主要特征之一^[21], 指示大陆会聚向离散转折的构造体制变化^[22]。但单纯通过地壳熔融作用产生高钾钙碱性岩浆作用的可能性不

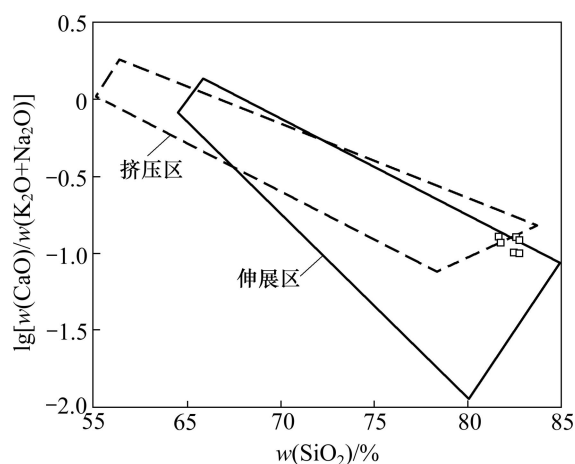


图8 $\lg[w(\text{CaO})/w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ — $w(\text{SiO}_2)$ 图解(底图据文献[19])

Fig. 8 $\lg[w(\text{CaO})/w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ — $w(\text{SiO}_2)$ diagram (Base diagram modified from Ref. [19])

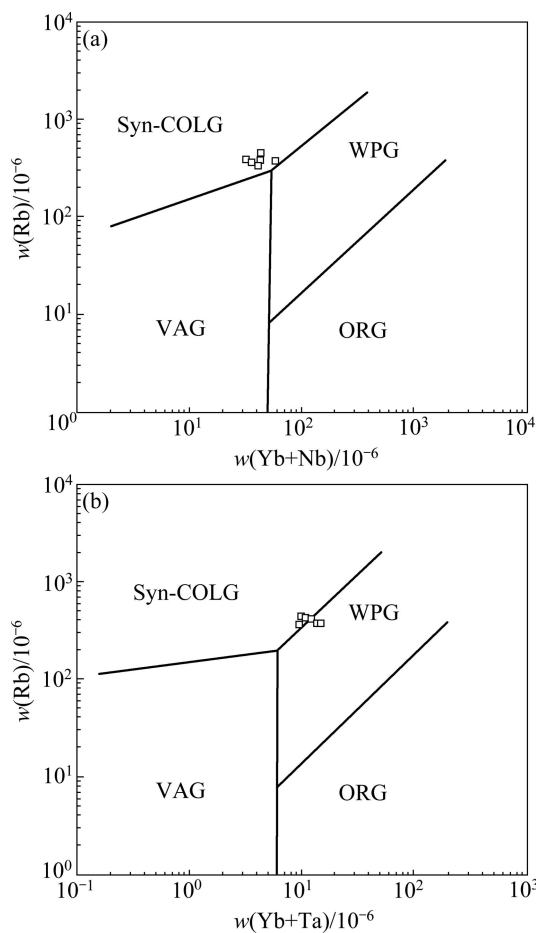


图9 塔里亚布岛花岗岩 $w(\text{Rb})$ — $w(\text{Yb}+\text{Nb})$ (a)和 $w(\text{Rb})$ — $w(\text{Yb}+\text{Ta})$ (b)构造环境判别图(底图据文献[20])

Fig. 9 $w(\text{Rb})$ — $w(\text{Yb}+\text{Nb})$ (a) and $w(\text{Rb})$ — $w(\text{Yb}+\text{Ta})$ (b) diagrams for structural setting discrimination of Taliabu granite (Base diagram modified from Ref. [20])

大,因此,该区域应存在地幔物质的上涌,为上部地壳熔融作用形成高钾钙碱性岩浆提供热源,由于镁铁质岩浆的底侵作用或内侵作用,使地温梯度进一步升高,导致地壳内部的广泛重熔形成花岗岩浆。基性岩脉通常被作为大洋和大陆伸展构造的标志^[23],塔里亚布岛及苏拉群岛西侧岛屿存在小规模辉长岩脉、辉绿玢岩脉及辉绿岩等铁镁质岩浆的活动产物,这种基性活动也表明该时期区域存在幔源岩浆底侵或内侵至上部地壳,但由于岩石圈刚刚开始,这种地幔物质上涌、基性岩浆底侵的拉张-伸展是十分局部和有限的。

6.2 构造运动与成矿的关系

苏拉群岛是从处于澳大利亚壳体边缘的新几内亚岛经构造运动分离而来,而澳大利亚壳体成分多为深变质岩,这些深变质岩一般严重贫 H_2O ,只有在某些特殊的地质环境中(如高热流的拉张环境)才可能重熔形成花岗岩浆。二叠-三叠纪之前,苏拉群岛所属新几内亚岛与东澳大利亚、西缅甸、滇缅马苏等均为尚未分离的冈瓦纳大陆北东缘地槽的组成部分,靠近泛大洋边缘。而在二叠-三叠纪期间,因为泛大洋洋壳型壳体向西运动,与冈瓦纳大陆陆壳型壳体北东边缘碰撞,俯冲至冈瓦纳陆壳之下,并使冈瓦纳陆壳向东相对运动。这次汇聚式碰撞事件导致基梅里次大陆与冈瓦纳大陆壳体的裂解,冈瓦纳大陆北东缘地槽全面褶皱回返,冈瓦纳陆壳边缘内部出现拉张环境,断裂特别是沿新特提斯洋、泛大洋边界的断裂发育,地幔上升提供热能,导致上部地壳部分熔融形成岩浆,出现强烈的陆壳重熔型花岗岩类岩浆侵入活动,从而沿构造通道上侵分离结晶成岩,在现今澳大利亚东部、新几内亚岛中西部及苏拉群岛发育北西向展布的岩浆岩带^[24],而滇缅马苏壳块虽然已漂移至新特提斯洋北侧与印支半岛、东马来西亚等壳块拼贴,但也出现了大量印支期花岗岩岩基。

根据塔里亚布岛花岗岩的形成年代((227±2) Ma),参考邻区澳大利亚东部及巴布亚新几内亚晚三叠世花岗岩^[24]、马来西亚花岗岩((250±4)~(225±5) Ma)、泰国西部花岗岩((201±22)~(244±28) Ma)、老挝桑怒及万象一带花岗岩(240~220 Ma)等的形成年代^[25],证明这些地区花岗岩的形成时间大致相同,都与印支期构造-岩浆热事件密切相关。这些岩体在形成时均处于冈瓦纳大陆靠近新特提斯洋或泛大洋的边缘,区域位置接近,与塔里亚布岛花岗岩具有类似的源区特征与构造环境,因此,岩石学及地球化学特征也较一致,大多数都经历了强烈的岩浆演化分异过程,这种特点使其携带大量的成矿物质(Sn、W、Fe、Pb、Zn、Bi、Cu、

Au 等)能够在岩浆演化晚期富集成矿,因此形成大量与印支期岩浆活动相关的金属矿床,属同一古大陆边缘成矿体系。由于原生锡矿化趋向于和地球化学特征上表现出与高度演化的花岗岩相伴出现,因此,这些矿床多以锡矿为主或存在锡矿化^[24-25]。因此,此次碰撞造山作用是东南亚-澳大利亚东部铁钨锡多金属成矿带形成的重要构造-岩浆-成矿事件,尤其是印支期花岗岩类,为该成矿带的重要母岩。但由于强烈的喜马拉雅地壳构造运动,使得几大壳块在东南亚区域内的大范围分裂、碰撞,研究区的区域大地构造格局变得非常复杂,这条成矿带在现今构造格局中的分布并不连续,东段成为澳大利亚东部钨锡多金属成矿带,而包括塔里亚布岛铁多金属矿田在内的西段则与东南亚铁钨锡多金属成矿带相接。

7 结论

1) 塔里亚布岛花岗岩形成于中晚三叠世((227±2) Ma),属印支期的壳源 S 型花岗岩,其源岩为上部地壳古老硅铝质岩石。由于泛大洋洋壳对冈瓦纳大陆陆壳北东缘的俯冲碰撞后所带来的初始拉张-伸展动力学环境,冈瓦纳陆壳北东缘中以泥质为主的源岩受上地幔上涌所带来的热能影响重熔,从而出现起强烈的花岗质岩浆活动。

2) 塔里亚布岛花岗岩以二长花岗岩为主,富硅、碱和钾,贫钙、镁和铁。稀土及微量元素方面富 Rb、K、Th、U、Ta 和 Nb,贫 Ba、Sr、P、Ti 和 Cr,具强烈的铕负异常及铈负异常,经历过彻底的岩浆演化分异和斜长石分离结晶过程,有利于成矿物质在岩浆演化晚期的富集。

3) 塔里亚布岛花岗岩体与该岛大型铁多金属矿田是本次印支期构造-岩浆-成矿事件的共同产物。塔里亚布岛所属苏拉群岛与东澳大利亚、新几内亚岛、滇缅马苏在印支期属同一古大陆边缘成矿系统,构成了东南亚-澳大利亚东部铁钨锡多金属成矿带,但由于喜马拉雅地壳构造运动的影响在现今构造格局中中断分布。

REFERENCES

- [1] 陈国达. 亚洲陆海壳体大地构造[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1998: 288-300.
CHEN Guo-da. Crustobody geotectonics of Asian continent and adjacent seas [M]. Changsha: Hunan Education Press, 1998:

- 288–300.
- [2] HALL R. The plate tectonics of Cenozoic SE Asia and the distribution of land and sea [C]// Biogeography and Geological Evolution of SE Asia. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 99–131.
- [3] CHARLTON T R. Tertiary evolution of the eastern Indonesia collision complex [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(5): 603–631.
- [4] HILL K C, HALL R. Mesozoic-Cainozoic evolution of Australia's New Guinea margin in a west Pacific context [C]// Evolution and Dynamics of the Australian Plate. Boulder: The Geological Society of America, 2003: 265–290.
- [5] PIGRAM C J, PANGGABEAN H. Rifting of the northern margin of the Australian continent and the origin of some microcontinents in eastern Indonesia [J]. *Tectonophysics*, 1984, 107(3/4): 331–353.
- [6] CARTER A, ROQUES D, BRISTOW C, KINNY P. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam [J]. *Geology*, 2001, 29(3): 211–214.
- [7] CHARLTON T R. Permo-Triassic evolution of Gondwanan eastern Indonesia, and the final Mesozoic separation of SE Asia from Australia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19(5): 595–617.
- [8] PIGRAM C J, SURONO, SUPANDJONO J B. Origin of the Sula Platform, eastern Indonesia [J]. *Geology*, 1985, 13(4): 246–248.
- [9] ALI J R, HALL R. Evolution of the boundary between the Philippine Sea Plate and Australia: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 251–275.
- [10] METCALFE I. Gondwanaland origin, dispersion, and accretion of East and Southeast Asian continental terranes [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1994, 7(3/4): 333–347.
- [11] 吴利仁. 中国东部中生代花岗岩类[J]. *岩石学报*, 1985, 1(1): 1–10.
- WU Li-ren. Mesozoic granitoids in East China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1985, 1(1): 1–10.
- [12] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 93.
- WANG Zhong-gang, YU Xue-yuan, ZHAO Zhen-hua. Rare earth element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989: 93.
- [13] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 221.
- ZHAO Zhen-hua. Principles of trace element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1997: 221.
- [14] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241–265.
- [15] ČERNÝ, MEINTZER R E, ANDERSON A J. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: Selected examples of data and mechanisms [J]. *Canadian Mineralogist*, 1985, 23(3): 381–421.
- [16] YU Jin-sheng, GUI Xun-tang, HUANG Lin, LI Xian-hua, HU Rui-zhong. Sr-O isotope system of some granitoids in China [J]. *Science in China: Series B—Chemistry*, 1991, 34(1): 118–128.
- [17] SYLVESTER P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45(1/4): 29–44.
- [18] 童劲松, 钟华明, 夏军, 鲁如魁, 杨世学. 藏南洛扎地区过铝质花岗岩的地球化学特征及构造背景[J]. *地质通报*, 2003, 22(5): 308–318.
- TONG Jin-song, ZHONG Hua-ming, XIA Jun, LU Ru-kui, YANG Shi-xue. Geochemical features and tectonic setting of peraluminous granite in the Lhozag area, southern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(5): 308–318.
- [19] BROWN G C. Calc-alkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs [C]// Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley & Sons, 1982: 437–461.
- [20] PEARCE J A, LIPPARD S J, ROBERTS S. Characteristics and tectonic significance of supar-subduction zone ophiolites [C]// Marginal Basin Geology. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1984: 77–94.
- [21] 赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1847–1860.
- ZHAO Ze-hui, GUO Zhao-jie, WANG Yi. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu province, northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1847–1860.
- [22] 林广春. 扬子西缘瓦斯沟花岗岩的元素-Nd 同位素地球化学—岩石成因与构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(5): 398–404.
- LIN Guang-chun. Petrochemical characteristics of Wasigou complex in western Yangtze block: Petrogenetic and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(5): 398–404.
- [23] WALKER G P L, EYRE P R. Dike complexes in American Samoa [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69(3/4): 241–254.
- [24] AMIRUDDIN. A review on Permian to Triassic active or convergent margin in southeasternmost Gondwanaland: Possibility of exploration target for tin and hydrocarbon deposits in the eastern Indonesia [J]. *Jurnal Geologi Indonesia (Indonesian Journal of Geology)*, 2009, 4(1): 31–41.
- [25] 吴振寰, 郭统旦, 唐昌韩, 程恩华, 张晶. 中国周边国家地质与矿产[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 145–163.
- WU Zhen-huan, WU Tong-dan, TANG Chang-han, CHENG En-hua, ZHANG Jing. Geology and mineral resources of China's neighboring countries [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 145–163.

(编辑 陈卫萍)