

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2019.01.005

苏门答腊岛苏利特河—苏里安铜成矿带埃达克质侵入岩 和矽卡岩地球化学特征及成因意义

吴秀荣,高小卫,向文帅,杨振强,程 湘

WU Xiu-Rong, GAO Xiao-Wei, XIANG Wen-Shuai, YANG Zhen-Qiang, CHENG Xiang

(中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205)

摘要: 本文旨在通过分析苏门答腊岛苏里安斑岩型铜矿至苏利特河矽卡岩型铜矿成矿带中埃达克质侵入岩及矽卡岩的岩石学和地球化学特征,探讨其成因意义。该成矿带是巴东地区辛卡拉克湖以东地球化学异常带的主体部分,其绝大多数侵入岩浆体皆为I-型花岗岩复合体,相当于印支晚期同碰撞火山弧和燕山早期碰撞后岩浆侵入活动的产物。该成矿带内的埃达克质花岗岩和闪长斑岩(早侏罗世和早白垩世)具有低的Y、Yb含量、高的 Σ REE含量和Eu正异常,在构造环境判别图上落在活动大陆边缘(ACM)火山弧环境中。埃达克质岩浆来源于俯冲洋壳板片部分熔融。然而,矽卡岩主量元素与岩浆岩侵入体相比,其CaO含量增多,SiO₂、Al₂O₃、K₂O以及Na₂O含量降,REE普遍表现为Eu负异常。该成矿带内矿化矽卡岩与侵入岩的微量元素模式在蛛网图上显示某些相似性,但是二者的REE配分模式却不尽相同。矽卡岩的微量元素和稀土元素具有低Rb、Ba含量和K、Sr、P、Ti低谷,主要继承了原始岩浆和母岩埃达克质岩的共同特征。矽卡岩化是引起Ti、Yb、Y和REE总量降低的主导控制作用。

关键词: 苏利特河—苏里安铜成矿带;埃达克质侵入岩;矽卡岩;岩石地球化学;苏门答腊岛

中图分类号:P534.46;P618.76

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2019)01-0049-12

Wu X R, Gao X W, Xiang W S, Yang Z Q and Cheng X. Geochemical Characteristics of Adakitic Intrusive Rocks and Skarns in Sulit Air—Surian Cu Metallogenic Zone, Sumatra Island. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(1): 49-60.

Abstract: The purpose of this paper is to study the petrological and geochemical characteristics of adakitic intrusive rocks and skarns in the metallogenic belt from Sulian porphyry copper deposit to Sulithe skarn copper deposit in Sumatra Island, and to explore their genetic significance. The metallogenic belt is the main part of the geochemical anomaly zone east of Lake Cincaraek in Badong area. Most of its intrusive magmas are I-type granite complexes, which are equivalent to the products of magmatic intrusion after collision with volcanic arc and early Yanshanian in late Indosinian. The adakitic granite and dioritic porphyry (Early Jurassic and Early Cretaceous) in the metallogenic belt have low Y, Yb, high-REE and positive Eu anomalies, which fall in the active continental margin (ACM) volcanic arc environment on the discriminant map of tectonic environment. The adakitic magma originated from partial melting of subducted oceanic crust of the mineralized skarn and intrusive rocks in the metallogenic belt show some similarities on the cobweb maps, but the REE distribution patterns of the two rocks are different. The trace elements and rare earth elements of skarn have

收稿日期:2018-9-15;修回日期:2018-12-2;责任编辑:庞迎春

基金项目:中国地质调查局项目“埃及及邻区矿产资源潜力评价”(DD20160109)

第一作者:吴秀荣(1970—),女,高级工程师,长期从事地质矿产勘查与研究,E-mail:493724940@qq.com

low Rb and Ba contents and K, Sr, P and Ti valleys, which mainly inherit the common characteristics of primitive magma and parent rock adakite. Skarnization is the dominant controlling factor for the reduction of total Ti, Yb, Y and REE.

Key words: Sulit Air–Surian copper metallogenic belt; adakitic intrusive rocks; skarn; petrogeochemistry; Sumatra Island

印度尼西亚作为与我国大陆周边距离较近、环境较好的国家之一,其矿产开发及投资前景良好。苏门答腊岛金属矿产资源丰富,已经发现了多个世界级的超大型铜、金等金属矿床,有悠久的矿产开发史,特别是金、银等贵金属以及铜、铅、锌、锡等有色金属。该岛金属矿床主要分布在印度洋板块与巽他陆块俯冲碰撞边缘的陆内过渡带,与埃达克质侵入岩及矽卡岩有着密切的成因关系。

埃达克岩是一种以较低的重稀土元素 Yb 含量($\leq 1.9 \times 10^{-6}$)和 Y 含量($\leq 18 \times 10^{-6}$)为特征的中-酸性($\text{SiO}_2 \geq 56\%$)岛弧型火山-侵入岩^[1-2],其产出的大地构造位置为大洋板块与大陆板块汇聚带,是由俯冲的大洋板片局部熔融所形成的一种岛弧火成岩,其成因与洋壳板片的部分熔融、下地壳底侵、地幔隆起和地幔热柱的活动有密切联系^[3-10]。埃达克岩与 Au、Ag、Cu 和 Mo 斑岩-矽卡岩和浅成低温热液矿床密切共生,是一种极好的找矿标志。

环太平洋带是埃达克岩发育区^[11-18],许多世界级斑岩型铜金矿床与埃达克岩浆活动有关。西南太平洋带和东太平洋带新生代埃达克岩的构造环境、成因和含矿性存在可对比性^[19-21]。但是,对巽他古陆核南西侧边缘的苏门答腊岛上埃达克岩与成矿作用知之甚少。因此,研究本地区埃达克岩具有巨大的经济意义。本文通过研究苏里安(Surian)和苏利特河(Sulit Air)铜矿成矿带的埃达克质花岗岩、变闪长斑岩和石英斑岩,以及矽卡岩的岩石地球化学特征,并将本区的埃达克质岩石与相邻的北苏门答腊岛马迪纳勒根西(Madina Regency)地区安山岩和 I-型花岗闪长岩^[22]进行对比,表明二者在成因、构造环境和岩浆岩源区方面具有相似性,这进一步表明埃达克质岩在该成矿带普遍存在,可以为该区斑岩矿床找矿工作提供借鉴。

1 区域地质背景

苏门答腊岛在构造上可以划分为两个地体:东

苏门答腊块体和西苏门答腊块体。根据岩石学特征及其所含化石证据,可以确定:东苏门答腊块体是在晚石炭-早二叠纪从冈瓦纳大陆分离出去的微陆块,构造性质与“暹罗马苏地体”^[23-28]或与“滇缅泰马地块”非常类似^[29-30],为该地体的南延部分;西苏门答腊块体是在三叠世时运移而来外来地体(亲华夏古地体),在印支晚期与东苏门答腊块体发生碰撞和拼合而成^[23, 25, 31]。

研究区域位于印尼苏门答腊岛中部巴东地区以东地球化学异常带(跨越 1:25 万地质图幅索洛克和派南幅的范围内),属于西苏门答腊块体中部。其分布范围北起自帕亚孔布,向南东经辛卡拉克湖-索洛克-南索洛克的双溪帕努(Padangaro),为一条呈北西-南东向展布的狭长地带,构造上位于苏门答腊大断裂带内^[31],呈现 NW-SE 向分布的构造格局(图 1)。本区自古生代以来的火山-侵入活动十分强烈,近代活火山也很发育,是印度-澳大利亚板块俯冲于巽他陆架之下的结果。

区域花岗岩分布广泛,可以划分为两个阶段。第一个阶段是石炭-二叠纪与锡相关的 S 型花岗岩,来源于下地壳,主要分布在巴厘散山脉附近及其北东部;第二个阶段为晚三叠至早白垩世花岗岩^[26-28],主要分布在巴厘散山脉西南部,岩石类型范围从闪长岩到二长花岗岩不等,为陆缘火山弧成因。

2 埃达克质岩和矽卡岩的分布和产状

苏里安和苏利特河铜矿床位于纳塔尔之东及其东南方向的地球化学异常带内。苏利特河矽卡岩型铜矿与其西侧的辛卡拉克湖岸相距 10 km,构造上处于巴厘散和苏门答腊断裂带的东南侧。苏里安铜-铅-锌矿点位于苏利特河铜金矿的南东方向,构成一条从索洛克幅向南东延伸至派南幅内的 Cu-Au(Ag)-Pb(Zn)-Cr-Co(Ni)金属地球化学异常带及其相应的岩浆带。该岩浆带包括辛卡拉克岩体(277 ~ 246 Ma ; 209 Ma)、苏利特河岩体(203 ~

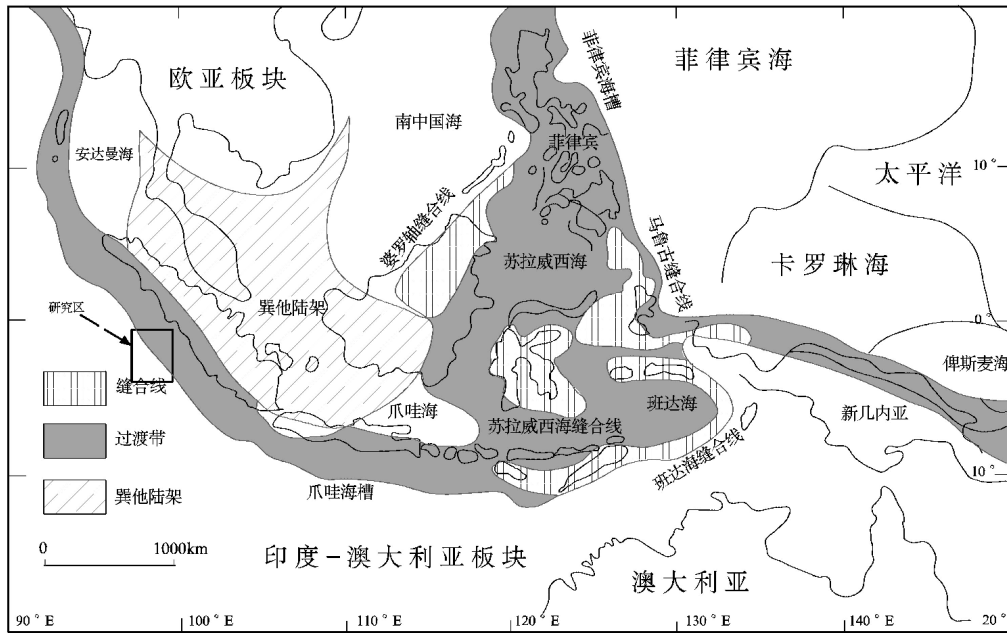


图1 印尼的板块构造格架示意图(据文献[23]修改)
Fig. 1 Simplified plate-tectonic features for Indonesia

183 Ma ; 149 ~ 138 Ma)、苏里安花岗岩和派南图幅内的邦科花岗岩(169 ~ 129 Ma; 54 Ma)南部一带,整体上是从小侵入岩体组成的埃达克质花岗岩带,延伸长度在 200 km 以上(图 2)。

苏利特河侵入岩体为 I-型花岗岩复合岩体,与实武牙花岗岩(264 ~ 257 Ma; 219 ~ 211 Ma)同属于一条晚海西—印支期侵入岩带上。该岩体与位于其北西方向的麻拉西邦基(197 Ma)等一些岩体相似,为多期次的酸性复合体,属于印支晚期和燕山早期两个不同岩浆-构造旋回的岩浆侵入活动的产物,可能与印支晚期陆-陆碰撞造山作用和碰撞后拉伸作用有关。

该成矿带出露的大多数晚古生代至中生代岩浆岩为埃达克质岩,其岩石类型有侵入岩主要为二长花岗岩、花岗闪长岩、石英斑岩和闪长岩岩体;火山岩为辉石粗安岩、安山岩、辉石玻基安山岩、火山角砾岩和凝灰岩。

实武牙—苏利特河岩体周边的矽卡岩型矿床和侵入岩有关的矿化作用发现于 1949 年 [2]。苏利特河矿体产于岩浆岩侵入体和三叠纪灰岩的接触带上。矿体以层状、透镜状发育于矽卡岩带中。矿体长 2 km,厚 2 ~ 3 m。原生金属矿物主要为斑铜矿,呈细脉浸染状分布。由于受研究区新生代碰撞造山

运动以来频繁的构造活动影响,导致矿体被强烈挤压破碎和改造。

3 岩石学特征

3.1 埃达克质岩

据野外实地考察所采集的本成矿带的岩浆岩石标本的室内镜下鉴定结果,本成矿带的埃达克质岩的岩石学特征如下:

苏里安—苏利特河成矿带 BT 剖面上的野外定名为钾长花岗岩的样品实际上为二长花岗岩,其主要矿物为条纹长石(40%)、奥长石(30%)和石英(25%)组成。副矿物黑云母基本上已脱铁退色化,偶见楣石和粒状绿帘石。

埃达克质花岗闪长岩的主要矿物为自形—半自形板状奥长石、它形粒状条纹长石和石英,并有少量基本上绿泥石化、绿帘石化和方解石化的角闪石及片状全绿泥石化黑云母,副矿物有磁铁矿和磷灰石。

闪长斑岩具有清晰可见的石英和被绿泥石化和绿帘石化的片状黑云母斑晶(斑晶粒径 0.09 ~ 0.40 mm);绿帘石多数为粒状并聚集成聚斑状;基质中的钠奥长石呈显微板条状嵌布于它形粒状石英之中。变嵌晶中有显微鳞片状绢云母分布;基质中有微

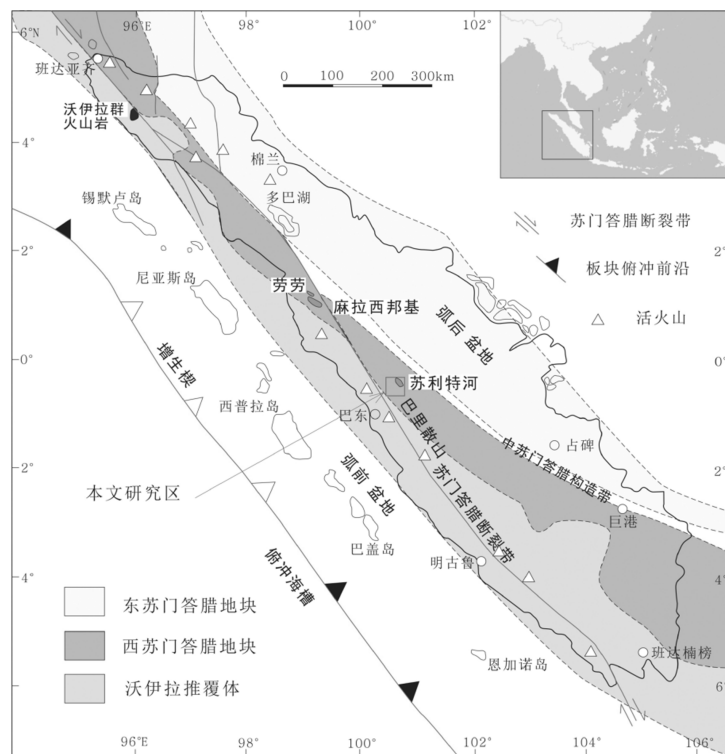


图2 苏门答腊岛构造简图

Fig. 2 Simplified tectonic map of Sumatra

量呈针柱状暗色绿帘石化的角闪石,钾长石少见。

另外,在索洛克幅的成矿带中广泛分布有埃达克质火山岩^[33],例如在成矿带 LT 剖面上所见的埃达克质火山岩皆为辉石粗安岩,其斑晶成分为中长石(55%~70%)和板状普通辉石(15%),基质由细小的板条状中长石、奥长石(3%)、粒状辉石(<1%)组成,散布于已脱玻的玻璃质中,见定向流动状构造。

3.2 矽卡岩

苏利特河矿的含矿围岩为大理岩、多孔状石榴石矽卡岩、石榴石化大理岩、硅灰石透辉石榴石矽卡岩以及斑铜矿化透辉硅灰钙铝石榴石矽卡岩等,矿石矿物为斑铜矿。大理岩为浅灰色,呈糖粒状,其中富含豆粒状浅褐色石榴石变斑晶,含量约占15%左右。矽卡岩主要为石榴石矽卡岩和硅灰石透辉石榴石矽卡岩。石榴石为钙铝榴石,成集合体成条带状产出,或单独被包于硅灰石和透辉石之中。

4 岩石地球化学特征

笔者采自苏利特河铜矿和苏里安铜矿的侵入岩和矽卡岩样品,通过比色法,氟盐取代-EDTA

容量法,火焰光度法等方法分别测试主量元素的各项氧化物百分比含量,通过电感耦合等离子体质谱法测定了样品中稀土元素的含量。经测试后岩石化学分析结果如表1所示。分析结果显示:该成矿带内的岩浆岩属于低镁、低钛、高钾、高硅的钙碱性中-酸性岩,具有低Yb含量($\leq 1.9 \times 10^{-6}$)和低Y含量($\leq 20 \times 10^{-6}$)的特点,符合埃达克质岩的条件^[14,16]。

4.1 埃达克质岩

苏利特河和苏里安铜矿的埃达克质岩花岗岩、闪长斑岩和石英斑岩主量元素SiO₂含量(77.49~77.925 wt%),MgO含量(0.19~0.72 wt%)变化很大,钛含量为0.15~0.23 wt%,K₂O含量1.62~4.36 wt%。埃达克质岩的K₂O含量大于Na₂O含量,与SiO₂含量略成反比关系。成矿带内没有出现钾玄岩系列。埃达克质花岗岩在A/NK-A/CNK图解上(图3d),落在过铝性花岗岩类。其岩石属性与马迪纳勒根西地区的安山岩和I-型闪长岩^[22](偏铝性)略有差别。变质闪长斑岩样品在FAM图解(图3c)与苏里安埃达克质岩花岗岩和邻区的麻拉西邦基闪长岩不同,落在拉斑玄武岩系列的范围内。在FeOt-MgO-Al₂O₃图解上,变质闪长斑岩的样品落

表1 苏里安和苏利特河铜矿埃达克质岩和矽卡岩主量和微量元素分析结果

Table 1 Geochemical analyses of major and trace elements contents of adakitic intrusive rocks and skarn in Surian and Sulit Air Cu deposit

苏里安铜矿					苏利特河铜矿							
岩性	花岗岩		矽卡岩		石英斑岩	闪长斑岩		矽卡岩				
送样号	01-a	01-c	01-d	02-a	DA021-1	DA021-2	06-a	06-b	DA022-1	DA023-1	DA023-2	
主量元素(wt%)												
SiO ₂	76.19	77.07	77.92	41.97	70.49	42.68	39.59	41.13	28.5	28.13	57.49	
TiO ₂	0.2	0.15	0.16	0.03	0.23	0.61	0.55	0.67	0.22	0.27	0.18	
Al ₂ O ₃	13.32	12.74	13.08	1.31	14.85	15.01	16.35	15.29	5.30	7.63	6.03	
Fe ₂ O ₃	0.35	0.24	0.19	19.30	0.71	17.41	6.75	5.42	33.05	6.40	1.41	
FeO	0.09	0.1	0.03	1.41	1.86	6.39	0.41	0.61	3.20	2.16	2.06	
CaO	1.02	0.96	0.26	26.16	1.57	0.92	31.61	32.8	21.26	33.04	27.45	
MgO	0.32	0.26	0.19	3.51	0.72	3.88	3.04	2.58	1.04	4.36	1.66	
K ₂ O	3.60	4.24	4.36	0.17	1.62	2.54	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	
Na ₂ O	3.54	3.02	2.44	0.08	0.3	0.11	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.01	0.03	0.06	0.09	0.15	0.14	0.08	1.0	0.07	
微量元素(×10 ⁻⁶)												
Rb	57.5	86.7	103	4.86	34.2	65.0	1.20	2.22	1.74	1.63	1.47	
Sr	55.6	83.6	44.4	35.8	269	127	138	244	17.3	697	184	
Ba	481	511	619	34.0	246	216	30.0	14.7	7.34	111	23.0	
Nb	6.04	5.48	6.68	0.72	6.74	4.08	4.84	5.37	5.75	5.07	4.05	
Ta	0.64	0.63	0.73	0.05	0.43	0.41	0.24	0.30	0.54	0.35	0.29	
Zr	94.7	79.0	75.8	6.00	128	93.7	77.6	96.1	104	58.0	48.4	
Hf	3.54	3.16	2.95	0.20	3.68	3.17	2.29	2.81	2.52	2.22	4.46	
Y	13.3	12.4	14.2	1.94	14.5	14.1	17.2	14.2	13	9.53	6.42	
Th	4.08	5.09	2.26	0.85	2.87	4.41	7.26	8.28	10.7	6.69	8.57	
Ni					47.0	140			30.4	55.2	24.5	
Cr					14.3	30.7			12.4	25.4	7.59	
Mg#	0.71	0.70	0.76	0.40	0.37	0.34	0.63	0.61	0.10	0.62	0.53	
Sr/Y	4.18	6.74	3.13	18.45	18.55	9.01	80.23	17.18	1.33	73.14	28.66	
La/Yb	10.21	14.58	12.51	33.95	5.84	5.89	15.63	15.00	15.41	12.62	34.58	
Nb/Zr	0.06	0.07	0.09	0.12	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08	
Nb/Ta	9.44	8.70	9.15	14.40	15.67	9.95	20.17	17.90	10.65	14.49	13.97	
Zr/Nb	15.68	14.42	11.35	8.33	18.99	22.97	16.03	17.90	18.09	11.44	11.95	
成因类型	O-型	C--型	C-型		O-型	O-型						

在扩张中心岛的范围內,具有弧后扩张的性质。

埃达克质岩的微量元素不富集亲石元素 Rb、Th 和 Sr。Sr 含量变化于 44.4×10⁻⁶ 至 269×10⁻⁶ 之间,比较阿留申群岛的 Adak 型(C-型)埃达克岩的 Sr 含量偏低(表 1)。Th 含量变化于 2.26×10⁻⁶ ~ 5.05×10⁻⁶ 之间。高场强元素 Ta、Nb、Hf 也不富集。

在微量元素蛛网图上显示为 Nb、Sr、P 和 Ti 低谷(图 3b),没有出现十分明显的 Th 高峰,表明其岩浆源区与洋壳板片俯冲的成因关系密切。岩石的 Sr/Y 比值较低,一般为 3.13 ~ 18.55,不超过阿留申群岛 C-型埃达克岩的 Sr/Y 比值(≥20)。在 Harker 图解上,Sr、TiO₂ 含量与 SiO₂ 含量略成反比关系(图 3a、

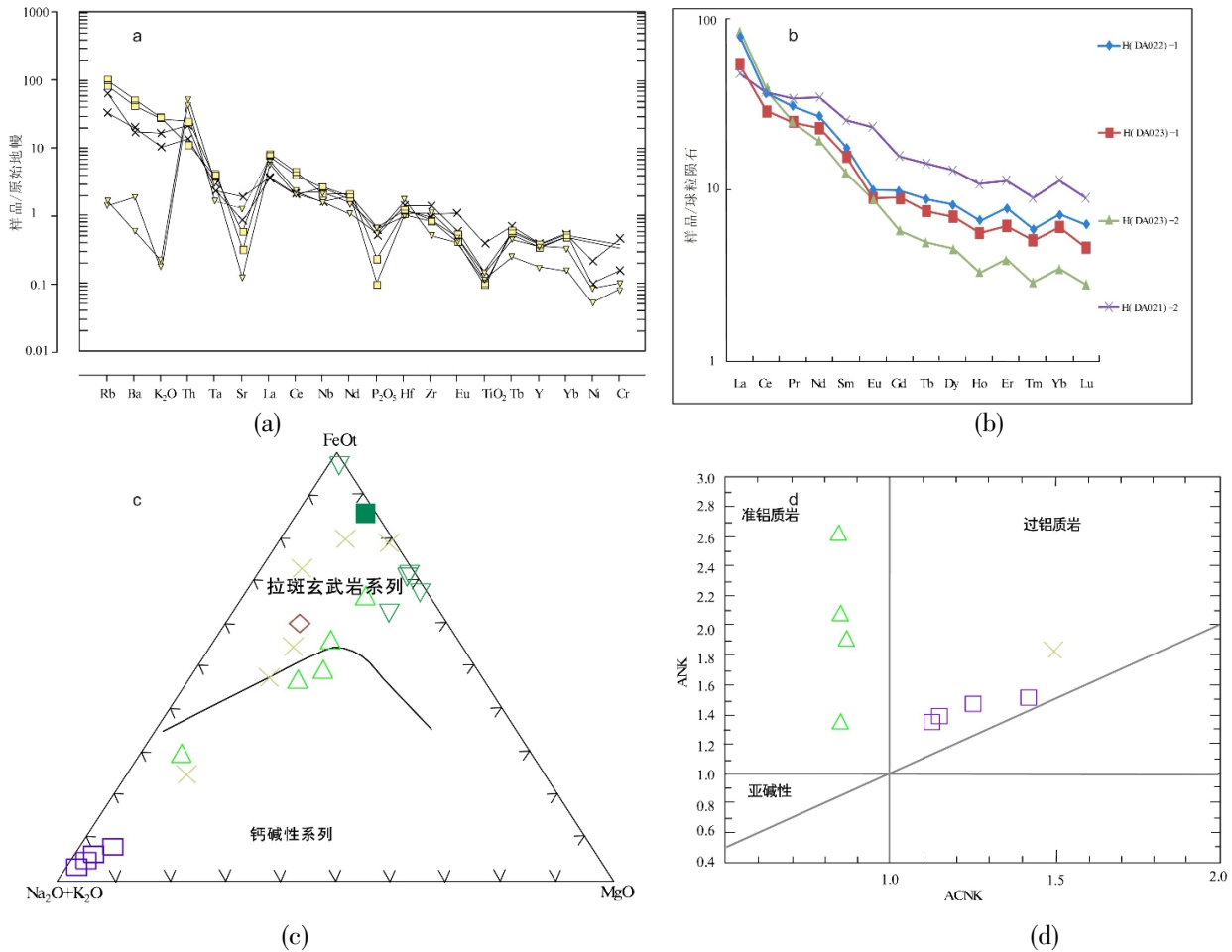


图3 侵入岩及矽卡岩石的地球化学图解

Fig. 3 Geochemical diagrams of intrusive rocks and skarn

a. 微量元素蛛网图; b. 稀土REE配分模式; c. $FeO/(Na_2O+K_2O)-MgO$ 图解: Tholeiite-拉斑玄武岩系列; Cal-Alkaline-钙碱性系列; d. ANK - ACNK 图解: metaluminous-准铝质, peraluminous-过铝质, peralkaline-亚碱性;
 □□ 苏里安埃达克质花岗岩, ■■ 苏里安矽卡岩; ×× 苏利特河矿埃达克质闪长斑岩和石英斑岩, △△ 马迪纳勒根西地区闪长岩和安山岩 [2], ◇◇. 埃达克质凝灰岩, ▽▽ 苏利特河矿矽卡岩。

b)。Cr 含量 ($14.3 \times 10^{-6} \sim 30.7 \times 10^{-6}$) 偏低, 而 Ni 含量 ($47 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$) 偏高。但是, 埃达克质花岗岩具有高的 Mg# 值 (0.71 ~ 0.75), 而闪长斑岩和石英斑岩的 Kg# 值偏低, 具备与阿留申群岛的 Piip 型埃达克质岩的相似特征 [14]。Nb/Ta 比值 (9.15 ~ 15.57) 小于地幔的 Nb/Ta 比值临界值 (17.5), 表明其岩浆源区并非来自地幔 (表 1)。

成矿带中岩体的稀土元素分布模式显然各有不同。埃达克质岩的 Y 含量 ($1.16 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$) 变化很大, Yb 含量 ($0.11 \times 10^{-6} \sim 2.02 \times 10^{-6}$) 也很低 (表 2), Y、Yb 含量也与 SiO_2 含量略成反比关系 (图 3b, c)。埃达克质岩 REE 配分曲线整体上为较为平缓的右倾曲线, 具轻微正铈异常的轻稀土富集型

分布模式 (图 3b)。苏利特河矿闪长斑岩稀土总量较高, 其 ΣREE 为 70.76×10^{-6} , 具有弱铈异常 (铈异常指数 $\delta Eu = 1.13$)。这种配分模式为活动大陆边缘火山弧常见的中-基性岩的 REE 配分模式。La/Yb 比值 (10.2 ~ 14.58) 比阿留申群岛 Adak 型的埃达克岩 La/Yb 比值 ($La/Yb > 20$) 低 (表 1)。在 La/Yb-Yb 的图解上显示, 埃达克质岩落在 C-型和 O-型埃达克质岩的分界线 ($La/Yb = 12$) 附近范围内。

4.2 矽卡岩

成矿带内矽卡岩相比岩浆侵入岩的 CaO 含量 (26.16 ~ 33.04 wt%) 明显增多, SiO_2 (28.13 ~ 57.49 wt%) Al_2O_3 和 K_2O 以及 Na_2O 含量则相对降低。其中矿化矽卡岩的 SiO_2 含量 (57.49%) 与区域

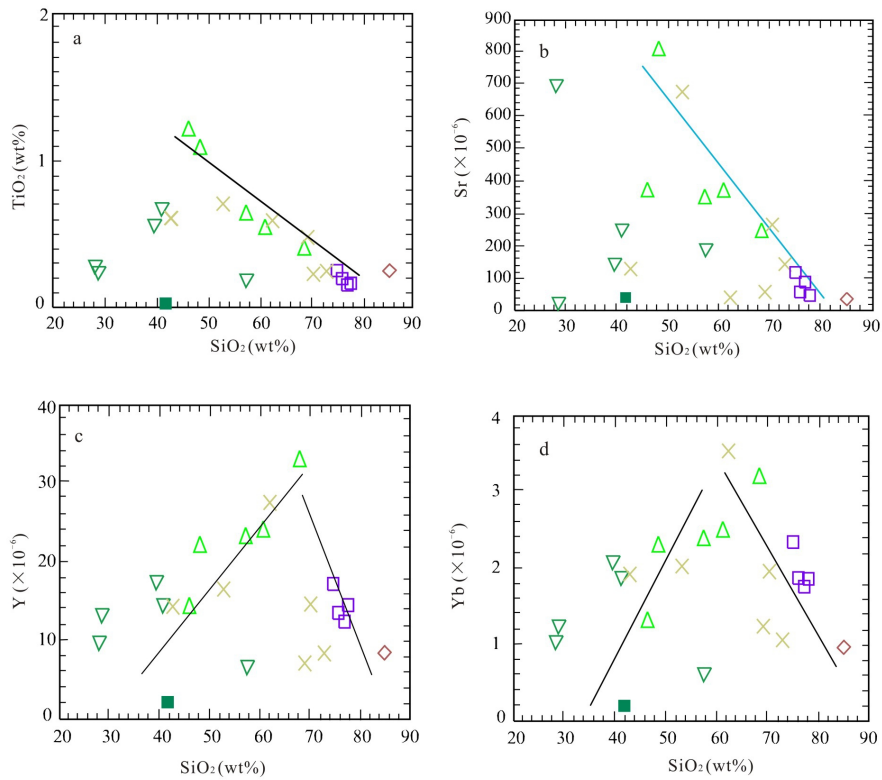


图4 侵入岩及矽卡岩石的Harker图解

Fig. 4 Harker diagrams for intrusive rocks and skarn

(a)TiO₂-SiO₂图解; (b)Sr - SiO₂图解; (c) Sr /Y-SiO₂图解; (d)Yb-SiO₂图解; (e)Yb-SiO₂图解; (f)La/Yb-Yb图解. 图例同图2.

表2 苏里安和苏利特河铜矿埃达克质岩和矽卡岩稀土元素分析结果

Table 2 Rare earth elements contents of adakitic intrusive rocks and skarn in Surian and Sulit Air Cu deposit

	苏里安铜矿				苏利特河铜矿				
	花岗岩		矽卡岩		石英斑岩	闪长斑岩		矽卡岩	
样号	01-a	01-c	01-d	02-a	DA021-1	DA021-2	06-a	06-b	DA022-1
La	19.2	25.8	23.4	6.45	11.5	11.3	32.2	27.9	18.8
Ce	36.7	47.1	41.5	10.3	21.4	22.8	50.5	49.3	22.4
Pr	3.92	4.98	4.79	0.95	2.84	3.26	6.11	5.52	2.92
Nd	13.9	17.1	16.9	2.70	13	16.2	23.4	21.4	12.5
Sm	2.50	2.92	3.09	0.36	3.22	3.9	4.49	4.20	2.71
Eu	0.57	0.51	0.67	0.12	0.73	1.35	1.19	1.02	0.587
Gd	2.34	2.63	2.78	0.42	2.312	3.24	3.97	3.60	2.016
Tb	0.39	0.40	0.45	0.053	0.413	0.53	0.61	0.57	0.33
Dy	2.49	2.38	2.79	0.32	2.85	3.31	3.50	3.18	2.09
Ho	0.52	0.49	0.57	0.063	0.515	0.61	0.70	0.62	0.376
Er	1.54	1.43	1.62	0.19	1.76	1.88	1.93	1.73	1.3
Tm	0.26	0.25	0.27	0.028	0.227	0.231	0.31	0.27	0.15
Yb	1.88	1.77	1.87	0.19	1.97	1.92	2.06	1.86	1.22
Lu	0.26	0.25	0.26	0.026	0.264	0.227	0.29	0.26	0.159

上的闪长岩和细碧岩^[22,34]的含量相似。具有低 Rb、Ba 含量,在微量元素蛛网图上显示 Rb、K、Sr、P 和 Ti 低谷(图 3a),主要继承了原始玄武质岩浆和埃达克质母岩的共同特征。

由于基性岩浆侵入岩处于演化晚期,随着挥发分的增加,以及冷凝和压力减小等作用,导致岩浆和围岩接触带发生交代作用,而这种 CaO 和 Al₂O₃ 含量的反向趋势变化,代表了接触交代作用为双交代模式。这种基性岩浆可能以苏利特河铜矿变质的闪长斑岩为代表,其 SiO₂ 含量(42.68 wt%)低,富集 Fe₂O₃(17.41 wt%)、FeO 和 K₂O,与其北东方向的麻拉西邦基闪长岩体比较, SiO₂ 含量明显偏低。因此,区内的原始岩浆可能偏向于基性至超基性(铁镁质)性质。

各个矽卡岩样品的配分模式大致相同,均为轻稀土元素段曲线较陡,而重稀土元素段较缓的轻稀土富集右倾式曲线,具有负铕异常的特点。其稀土总量 ΣREE 与埃达克质岩相比略低(为 $53.05 \times 10^{-6} \sim 67.56 \times 10^{-6}$),铕异常指数普遍小于 1(δEu 变化在 0.735 ~ 0.959 之间),为弱铕负异常。这种配分模式可能继承了母岩(埃达克质岩)的配分模式,为活动大陆边缘常见的 REE 配分模式。

5 讨论

5.1 埃达克岩成因类型、构造环境和源区

5.1.1 成因类型

笔者等认为,新生代环太平洋的埃达克质岩判别以低 Yb 含量($\leq 1.9 \times 10^{-6}$)、低 Y 含量($\leq 20 \times 10^{-6}$)和中-酸性岩($\text{SiO}_2 \geq 56\%$)为主要标志,而 Sr 含量、Zr 含量、La/Yb 比值和 Sr/Y 比值则是划分成因类型和探讨成因和构造环境的辅助标志。根据西南太平洋和东太平洋沿岸的埃达克质岩 REE 配分曲线类型特点和微量元素比值特征对比结果,可将其划分为大陆型(C-型)和岛弧型(O-型)两种成因类型^[14-21]。划分的标志为:大陆型(C-型)埃达克岩的微量元素地球化学表现为 La/Yb 比值 >12 , Sr/Y 比值 >20 , Nb/Zr 比值 >0.04 (或 Ta/Hf >0.1),强烈富集稀土元素 La 和 Ce,其 REE 配分型式为铲形右倾斜式;岛弧型(O-型)埃达克岩以 La/Yb 比值 <12 , Sr/Y 比值 <20 , Nb/Zr 比值 <0.04 (或 Ta/Hf <0.1)为特征,REE 配分型式为平缓右倾式。本成矿带为 O-型和 C-型埃达

克质岩共存,符合活动大陆边缘火山弧和陆缘岛弧形成的埃达克质岩的特点。

5.1.2 构造环境判别

微量元素 Th-Nb-Zr 和 Th-Ta-Yb 图解及其比值是区分板块汇聚带(即陆缘岛弧和陆缘火山弧)和板内火成岩之间的有效证据。实践证明, Th-Nb-Zr 图解不仅仅可用于岛弧型中-基性玄武-安山岩类的构造环境鉴别,也适用于主动大陆边缘形成的中酸性长英质火成岩套(包括埃达克质花岗岩)构造环境判别,其判别效果与 Th-Ta-Yb 图解相同^[32]。一般地说,洋岛、陆缘岛弧和 N-MORB 的 Nb/Zr 比值 <0.04 和 Ta/Yb <0.1 ,而大陆边缘火山弧和陆裂谷内的 Nb/Zr 比值 >0.04 和 Ta/Hf >0.1 ^[17-19]。在微量元素 Th/Zr-Nb/Zr 图解(图 5a)上,本成矿带内埃达克质岩样品落在大陆板内碰撞带和拉张带初始裂谷范围内(Nb/Zr = 0.05 ~ 0.09),个别为陆裂谷缘环境(弧后盆地)。相比之下,相邻的马迪纳勒根西的中基性至中酸性岩石系列则为陆缘岛弧的产物,其产出位置更加靠近海沟碰撞带;而在 Th/Yb-Ta/Yb 图解和 Th-Ta-Yb 图解上,本区几乎所有的埃达克质岩样品都落在活动大陆边缘(ACM)范围内(Ta/Yb >0.1),为大陆边缘火山弧构造环境(图 5b)。

5.1.3 岩浆岩源区探讨

从 Harker 图解上可以看出,侵入岩样品的 TiO₂ 和 Sr 含量与 SiO₂ 含量呈反比关系(图 5a,b),反映了本成矿带中岩浆侵入成因主要与俯冲的洋壳板块部分熔融作用有关。Yb、Y 含量与 SiO₂ 含量在 62 wt% 以下呈正比关系,但是当 SiO₂ 含量达到 62 wt% 以上时,则呈反比关系,证明了埃达克质花岗岩岩浆源区的在板块俯冲的早期有大量的长石沉淀,直到俯冲晚期,源区的残留相才有高压矿物(榴辉岩相)出现,从而造成 Yb、Y 含量与 SiO₂ 含量呈反比的现象(即由洋壳俯冲达到地幔楔以下,深度为 30 ~ 80 km)。与此相似, Sr/Y 比值和 K₂O 含量也与 SiO₂ 含量呈正比关系,暗示岩浆源区,除了俯冲板块部分熔融作用以外,还有强烈的上地壳长石的结晶分离作用。深部洋壳板块部分熔融作用以及上地壳的结晶分离作用(AFC)和矽卡岩化是造成 Sr 含量与 SiO₂ 含量成反比的根本原因。因此推测,斜长石的结晶分离过程的源区位置深度可能处于莫霍面至角闪石相的范围内,不超过 80 km。

另一方面,从 Zr/Nb-MgO 图解上可以看出,样

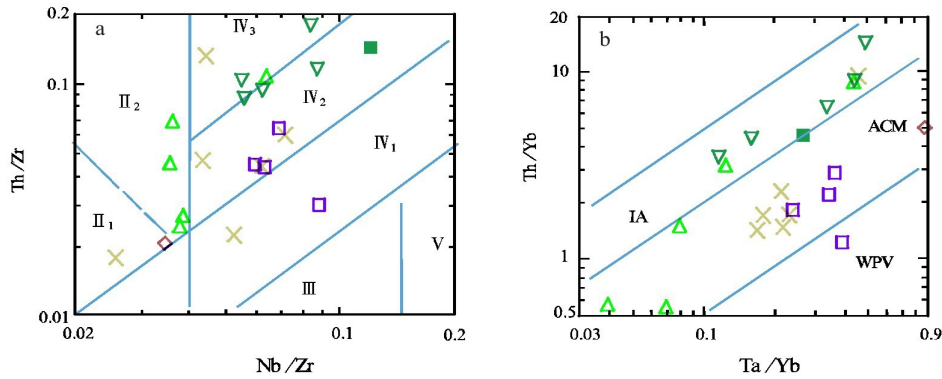


图5 Th/Zr - Nb/Zr(a) 和 Th/Yb- Ta/Yb(b)构造环境判别图解

Fig.5 Th/Zr - Nb/Zr(a) and Th/Yb- Ta/Yb (b) discrimination diagrams of tectonic setting

(a) Th/Zr - Nb/Zr^[14]: I-大洋板块离散边界MORB(图外), II-板块汇聚边缘(II₁-大洋岛弧, II₂-陆缘岛弧及陆缘火山弧), III-大洋板内, IV-大陆板内[IV₁-板内裂谷及陆缘裂谷玄武岩区; IV₂大陆拉张带(初始裂谷)玄武岩区; IV₁-陆-陆碰撞玄武岩区, V 地幔热柱]. (b). Th/Yb- Ta/Yb图解^[65]: IA-岛弧 ACM-,大陆陆缘 WPV- 板内火山带.

品的 Zr/Nb 比值小于 40, 大多数落在 N-MORB 及以下的范围内(40 ~ 20), 说明其物质来源区主要为俯冲的洋壳板片局部熔融的作用和下地壳的重熔和结晶分异(图 6a)。区内没有 Zr/Nb 比值大于 40 的样品, 并且 MgO 含量较低(小于 2 wt%), 有力地证明了地幔楔源区的交代作用十分微弱。相比之下, 马迪纳勒根西地区的岛弧型火山-侵入岩样品的高 MgO 含量(3.07 ~ 3.86 wt%), 其岩浆岩源区受玄武质岩浆的影响较大, 显然与本成矿带主要受安山质岩浆影响的情况略有不同。

另一方面, 在 Zr/Nb-Zr 图解上也明显地显示出一种强烈的俯冲洋壳板片局部熔融的演化趋势(左箭头) 和另一种相对较弱的来源于上地壳分离

结晶(右箭头)演化趋势, 分别代表两种不同的岩浆演化趋势(图 6b)。由于 Zr/Nb 比值不大于 40, 推测其岩浆源区缺乏来自地幔楔的物质成分, 多数来自 N-MORB 和下地壳, 与上述观点吻合。Nb/Ta 比值小于地幔(17.5)或球粒陨石 Nb/Ta 比值(17.1)^[38]的事实, 证明了本成矿带不存在地幔岩浆源区。由此可见, 本带埃达克质岩是这两种不同岩浆作用结果: 一种为洋壳板片和海沟深海沉积物局部熔融, 叠加上较弱的地幔楔混染作用成因(MASH); 另一种则为上地壳分离结晶作用(AFC)和矽卡岩化。

5.2 矽卡岩成因和构造环境

5.2.1 矽卡岩化对 Ti、Yb、Y 和 REE 总量降低的控制

由图 4a、图 4c 和图 4d 所示, 矽卡岩中的 Ti、

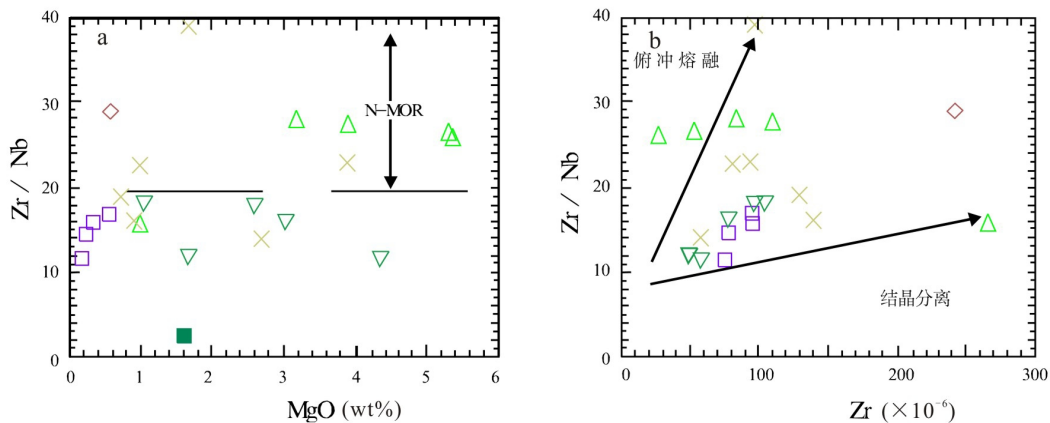


图 6 Zr / Nb - MgO图解(a)^[36]和Zr / Nb - Zr图解(b)^[37]

Figure 6 Zr / Nb - MgO(a) and Zr / Nb - Zr discrimination diagrams(b) for igneous rocks for adakitic rocks and skarns

Yb、Y含量与其SiO₂含量略呈反比关系。矽卡岩中含有的石榴石、辉石、角闪石、硅灰石等矿物是导致这些元素锐减的重要原因。

上述矽卡岩与埃达克质岩的稀土元素特征表明,二者具有相似的REE配分模式,但埃达克质岩具有更高 Σ REE。据马生明等研究^[39],随着岩石中亲铜成矿元素的增加,稀土元素含量将表现出特有而一致的变化:一般为轻稀土较岩浆岩贫化而重稀土较为富集,且随Cu的含量增加,稀土总量将降低。他提出Cu矿化越强,稀土元素越贫化。而本次研究的测试结果显示,而矽卡岩(DA022-1)中Cu含量则高达3.45 wt%,显然比埃达克质花岗岩和闪长岩(标本号DA021-2,Cu含量为2.37 wt%)的REE总量减少。

矽卡岩REE分布模式虽然受多方面影响,例如岩浆岩、碳酸盐岩和流体作用的控制,但是,总体来看,其分布模式也继承了岩浆岩的轻稀土富集特点。由于双交代作用和结晶分异作用,使本区矽卡岩与埃达克质岩相比,其REE总量降低,具有Eu的负异常特点。这可能是由于流体中的Ca²⁺与原岩中斜长石的Eu²⁺进行类质同象交代作用,导致铕亏损。

5.2.2 矿化矽卡岩构造环境

岩石主量元素结果表明,矽卡岩与岩浆岩相比,CaO含量增多,Al₂O₃和K₂O以及Na₂O含量降低,有可能发生了双交代作用。矿区内的石榴石矽卡岩和变质闪长斑岩特别富集Fe₂O₃。变质闪长斑岩和矿化矽卡岩,属于拉斑玄武岩系列(图3c)。其原岩应该相当于大陆板内裂陷盆地中常见的变质的浅成基性-铁镁质超基性侵入岩,与纳塔尔地区燕山早期沃伊拉群中-基性火山岩相似^[26],形成于陆-陆碰撞带(图5a)和岛弧构造环境(图5b)。

由图6a可知,矽卡岩样品中的Nb/Zr比值小于20,显示其MgO的主要来源不由俯冲的洋壳板块提供,而是来源于上地壳的结晶分异,与5b所示的结果十分吻合。

综合主量元素地球化学和年代学的证据,笔者认为该矿床时代可能为早侏罗世以后的产物,属于印支期碰撞和碰撞后阶段。这一特殊的构造环境为岩浆侵位以及成岩成矿都提供了非常好的条件。同时根据岩相古地理的恢复重建,苏利特河地区在晚三叠末至早白垩时期是属于Tuhur盆地的范围内。这种大陆裂陷盆地环境有利于下地壳或上地幔基

性-超基性岩浆侵入和岩浆演化末期流体的加入。随着岩浆不断上侵,温压降低,岩浆末期的岩浆-气液混合体沿着接触带的薄弱位置就位,冷凝释放的热量促使围岩与岩体接触带间发生双交代作用形成矽卡岩。

6 结论

(1)本成矿带埃达克质岩主量元素以高硅、高钾、低镁、低钛、低Y和低Yb含量为特征。微量元素中的亲石元素和高场强元素不太富集。REE配分曲线可划分为右倾型和平缓型两种类型。样品在La/Yb-Yb的图解上落在C-型和O-型埃达克质岩分界线附近的范围内。

(2)本成矿带埃达克质岩样品主要落在活动大陆边缘(ACM)范围内的火山弧构造环境的产物。

(3)Zr/Nb-Zr图解显示,本成矿带区埃达克质岩来源于强烈的俯冲洋壳板片部分熔融和微弱的地幔交代作用的岩浆岩源区(MASH),以及碰撞后上地壳分离结晶作用(AFC),而MgO的主要来源是由俯冲的洋壳板块部分熔融和上地壳的结晶分异提供。

(4)矽卡岩的微量元素和稀土元素具有低Rb、Ba含量和K、Sr、P、Ti低谷,主要继承了原始岩浆和母岩埃达克质岩的共同特征。矽卡岩化是引起Ti、Yb、Y和REE总量降低的主导控制作用。

感谢湖北省地球物理勘查院和湖北省第四地质大队的专家们给予野外工作和室内研究的帮助和指导。

参考文献:

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347(18): 662-665.
- [2] Kay R W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1978, 4: 117-132.
- [3] 王强,许继峰,赵振华.一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J].地球科学进展,2001,16(2):201-208.
- [4] 罗照华,柯珊,谌宏伟.埃达克岩的特征、成因及构造意义[J].地质通报,2002,21(7):436-440.
- [5] 王焰,张旗,钱青.埃达克岩(adakite)的地球化学特征

- 及其构造意义[J].地质科学,2000,35(2):251-256.
- [6] 董申保,田伟.埃达克岩的原义、特征与成因[J].地学前缘,2004,11(4):585-594.
- [7] 朱弟成,潘桂棠,段丽萍,夏林,廖忠礼,王立全.埃达克岩研究的几个问题[J].西北地质,2003,36(2):13-19.
- [8] 张旗,许继峰,王焰,肖龙,刘红涛,王元龙.埃达克岩的多样性[J].地质通报,2004,23(9-10):959-965.
- [9] 张旗,王焰,钱青,杨进辉,王元龙,赵太平,郭光军.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J].岩石学报,2001,17(2):236-244.
- [10] 朱弟成,段丽萍,廖忠礼,潘桂棠.两类埃达克岩(Adakite)的判别[J].矿物岩石,2002,22(3):5-9.
- [11] Smith TEM, Taylor S R, Johnson R W. REE-fractionated trachytes and dacites from Papua New Guinea and their relationship to andesite petrogenesis [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1979, 69:227-233.
- [12] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotten J, Defant M J, Pubellier M. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western Mindanao, Philippines [J]. Geology, 1993,21:1007-1010.
- [13] Sajona F G, Bellon H, Maury R C, Pubellier M, Cotten J, Rangin C. Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline lavas and Nb-enriched basalts Leyte and Mindanao (Philippines) [J]. Tectonophysics, 1994, 237:47-72.
- [14] 朱章显,杨振强,姚华舟巴布亚新几内亚新生代两类埃达克岩的构造环境意义 [J]. 华南地质与矿产, 2007, (2):1-6,13.
- [15] 朱章显,杨振强.东南亚新生代两类埃达克岩的分布、成因和含矿性[J].地质力学学报,2008,14(4):338-344.
- [16] 朱章显,杨振强.巴布亚新几内亚新生代埃达克岩及成矿意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(4):618-623.
- [17] 朱章显,赵财胜,杨振强.苏拉威西埃达克岩、类埃达克岩分布和特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(1):80-88.
- [18] 朱章显,杨振强,梁约翰,彭练红,湛建国,姚华舟.巽他群岛埃达克岩的分布及斑岩型铜(金)矿成矿预测的地质准则[J].地质通报,2009,28(2-3):333-342.
- [19] 杨振强,朱章显.新生代埃达克岩两种成因类型埃达克岩的含矿性和源区:西南太平洋带与东太平洋带对比[J].华南地质与矿产,2010,(3):1-11.
- [20] 姚华舟,朱章显,韦延光,杨振强,等.巽他群岛—新几内亚岛地区地质与矿产 [M]. 北京:地质出版社,2011:1-277.
- [21] 朱章显,杨振强,向文帅,胡鹏.两类埃达克岩的含矿性和成因:东南亚地区与东太平洋带对比[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(增1):237-246.
- [22] Zulkarnain I. Geochemical Signature of Mesozoic Volcanic and Granitic Rocks in Madina Regency Area, North Sumatra, Indonesia, and its Tectonic Implication [J]. Journal Geologi Indonesia, 2009, 4(2):117-131.
- [23] Crow M J. Tertiary volcanicity [C]. // In: Barker A J, Crow M J, and Milson J S, (eds). Sumatra - Geology, Resources and Tectonics. Geological Society, London, Memoir, 2005, 31:98-119.
- [24] Hutchison C S. Geological Evolution South-East Asia[M]. New York: Oxford University Press Oxford, Monographs on Geology and Geophysics 13, 1989: 1-368.
- [25] Barber A J, Crow M J, De Smet M E M. Tectonic evolution [C].//Barber A J, Crow M J and Milsom J S (eds.), Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution. Geological Society, London, Memoir, 2005, 31: 234-259.
- [26] 高小卫,吴秀荣,杨振强.苏门答腊(印度尼西亚)火山岩及其地球化学-构造环境判别 [J]. 华南地质与矿产, 2012,28(2):107-113.
- [27] 高小卫,吴秀荣,杨振强.初论苏门答腊(印尼)的岩浆-构造旋回及其板块构造背景 [J]. 华南地质与矿产, 2013,29(4):259-270.
- [28] 高小卫,吴秀荣,杨振强.苏门答腊岛(印尼)两类地体划分及其区域成矿背景 [J]. 地质通报,2015,34(4):792-801.
- [29] Metcalfe I. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes [C].// Hall R, Blundell D J (Eds.), Tectonic Evolution of Southeast Asia . Geological Society of London Special Publication, 1996, 106: 97-122.
- [30] van Leeuwen T M. 25 years of mineral exploration et discovery in Indonesia [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 50 (1-3):63.
- [31] 高小卫,杨振强,吴秀荣.苏门答腊岛岩浆旋回中的成矿作用[J].华南地质与矿产,2013,29(4):299-307.
- [32] van Bemmelen R W. The Geology of Indonesia, Vol. 1A, General Geology of Indonesia and adjacent archipelago [M]. The Hague: Government Printing Office, 1949: 4-732.
- [33] 朱章显,杨振强,胡鹏.印尼苏门答腊岛巴东地区埃达克质岩地球化学特征和构造环境意义 [J]. 中国矿业, 2014,23(8):92-99,109.
- [34] Rock N M S, Aldiss D T, Aspden J A. The Geology of the

- Lubusikaping Quadrangle (0716), Sumatra, Scale 1:250 000 [R]. Geological Survey of Indonesia, Directorate of Mineral Resources, Geological Research and Development Centre, Bandung, 1983.
- [35] Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5): 1065-1073.
- [36] Macpherson C G, Hall R. Tectonic controls of geochemical evolution in arc magmatism in SE Asia (C). // In: *Proceedings PACRIM 99 congress*, Australian Institute of mining and metallurgy Publications, Series, 1999, 4 (99): 359-368.
- [37] Maulana A. Petrology, Geochemistry and Metamorphic Evolution of South Sulawesi Basement Rock Complexes, Indonesia [D]. Canberra: The Australian National University, 2009: 1-189.
- [38] Stolz A J, Jochum K P, Spettel B. (阴翠珍, 闫志军译). 弧下地幔流体和熔体的富集——来自岛弧玄武岩Nb/Ta变化方面的证据[J]. *世界地质*, 1997, 16(2): 6-10, 15.
- [39] 马生明, 朱立新, 刘海良, 王会强, 徐明钻. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化学异常结构研究[J]. *地球学报*, 2011, 32(4): 405-412.