

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2015.02.002

爪哇和加里曼丹(印尼)新生代埃达克质岩的地球化学特征、成因及构造环境对比

胡 鹏, 朱章显, 杨振强

HU Peng, ZHU Zhang-Xian, YANG Zhen-Qiang

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

摘要: 本文根据文献上的新生代岩浆岩岩石化学数据, 确定印尼爪哇岛和加里曼丹岛中部等地存在埃达克质岩存在的证据和成因, 判别其地球化学-构造环境, 将其与印支板块东北侧的同时代埃达克质岩以及南苏门答腊楠榜省第四纪埃达克质岩的构造环境进行对比。本区新生代埃达克质岩形成于活动大陆边缘火山弧, 可以划分为两种类型: C-型(大陆型)和 O-型(岛弧型)埃达克岩, 其 La/Yb 比值变化于 3.47~28 之间, 比阿留申群岛的典型埃达克岩的 La/Yb 比值(>20)变化范围更大, 其成因是由俯冲板片部分熔融, 地幔楔混染和上地壳的结晶分离作用(AFC)而成。Zr/Nb-MgO 和 Zr/Nb-Zr 图解以及 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值证明了本区大多数火山岩的岩浆作用和岩浆岩源区与地幔楔混染有关。

关键词: 爪哇岛和加里曼丹岛; 新生代埃达克质岩; 构造环境; 岩浆成因和源区

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2015)02-125-11

Hu P, Zhu Z X and Yang Z Q. Geochemical characteristics and origin for the Cenozoic adakitic rocks in Java and Kalimantan (Indonesia), and comparison of tectonic setting to the nearby area. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(2):125-135.

Abstract: Based on the published magmatic lithogeochemical data, this paper conforms the evidence for the existing of Cenozoic adakitic rocks in Java island and Kalimantan island (Indonesia), presents a lots of geochemical-tectonic setting discrimination diagrams, and discusses their tectonic setting comparison to adakitic rocks of the same ages at the north-east part of the Indochina Plate as well as the Quaternary adakitic rocks in Lampung Province of Southern Sumatra. The Cenozoic adakitic rocks in this area, which formed in the volcanic arc at active continental margin, may be classified into two types of adakitic rocks: C-type(continental) and O-type (island arc), with La/Yb ratio widely varying in 3.47 ~ 28, compared to that of the typical adakites (>20) in Allusion Archipelago. The origin of these adakitic rocks may be resulted by partly melting of subducted oceanic plate, the assimilation of mantle wedge plus the fractional crystallization (AFC) within upper crust. The Zr/Nb-MgO and Zr/Nb-Zr diagrams as well as Zr/Hf and Nb/Ta ratios indicate that the magmatism and its provenances in this area were related to the assimilation of mantle wedge.

Key words: Cenozoic adakitic rocks; tectonic setting; magmatic origin and provenances Java island and Kalimantan island

收稿日期: 2014-12-31; 修回日期: 2015-02-04.

基金项目: 中国地质调查局“中印合作印度尼西亚苏门答腊岛优势资源矿产潜力评价”项目(编号: 12120115067201).

第一作者: 胡鹏(1984—), 男, 助理研究员, 从事境外地质矿产研究工作, E-mail: 157521303@qq.com.

埃达克岩是指一类具有独特地球化学特征的中-酸性火成岩($\text{SiO}_2 > 56\%$),以低的重稀土元素 Yb 和 Y 含量和高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值 ($> 20 \sim 40$)以及高的 Sr、Zr、Ni、Cr 含量和高 $\text{Mg}^\#$ 值为特征^[1-3],形成于主动大陆边缘构造环境中。由于环太平洋带埃达克岩的岩石类型、产状、地球化学特征和成因具有多样性和多变的特点^[3-8],Richards(2007)等更主张将具有上述地球化学特征的火成岩岩石类型(包括太古代埃达克质 TTD、TTG 岩类和片麻岩)统称为类埃达克岩(adakite-like)^[9]或埃达克质岩(adakitic)。因此,埃达克岩实际上是主动大陆边缘上包括安山岩-英安岩-流纹岩系列在内的中-酸性长英质火成岩套。

近年来,笔者等在东南亚地质和矿产研究中,针对西南太平洋带和东太平洋带的新生代埃达克岩的构造环境、成因和含矿性进行过初步研究和对比,认为主动大陆边缘的埃达克质岩的鉴定标志应以低的重稀土元素含量($\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$)为主,而 La/Yb 和 Sr/Y 比值以及 Sr、Zr、Ni 和 Cr 含量、 $\text{Mg}^\#$ 值等则是划分成因类型以及探讨其成因和构造环境的标志^[10-16]。

西南太平洋带的巽他古陆边缘是埃达克岩和埃达克质岩极其发育的地区。新生代埃达克质岩广泛分布于菲律宾群岛、苏拉威西岛弧、哈马黑拉岛弧、几内亚岛的欧文斯坦利褶皱带、新几内亚的俾斯麦岛弧、阿德默勒尔蒂群岛、布干维尔岛弧和所罗门群岛等岛弧带。但是,对爪哇岛、加里曼丹岛中部、苏门答腊岛(印度尼西亚)和中南半岛(印支地块)的埃达克岩和埃达克质岩的研究不足,文献记录也比较缺少。目前,尚未有爪哇埃达克质岩的文献报道,只在南苏门答腊楠榜省见有个别第四纪岛弧埃达克质岩的岩石化学分析数据^[17]。在加里曼丹岛中部的新塘地区曾见有 6 个新近纪埃达克质花岗闪长岩(18.3 ~ 19.2 Ma)和 2 个钙-碱性英安岩(16.5 ~ 16.7 Ma)报道^[18]。在印支地块(中南半岛)北东侧边缘的越南西北部 Phan Si Pan 地区也有古近纪(38 Ma)埃达克质花岗岩的文献^[19]。另外,在靠近中国边界的越南西北部 Pu Sam Cap 地区见有个别古近纪(32 ~ 36 Ma)埃达克质花岗岩^[20]。

本文作者在实施中-印尼国际合作研究项目的过程中,收集、分析已发表的爪哇和加里曼丹中部等地新生代岩浆岩岩石化学资料^[21-22]的基础上,

依据上述低 Yb 和 Y 含量主要的地球化学鉴别标志,识别出该区存在埃达克质岩(表 1)的事实,并籍助 PetroGraph 和 Minpet2.0 岩浆岩地球化学作图软件^[23-24]对这些岩石化学数据进行处理,编制其主量元素、微量元素图解以及各种地球化学-构造环境判别图解,对其形成构造环境进行判别;同时将其与中南半岛同时代埃达克质岩的构造环境相对比。

本研究的目的在于探索本区新生代埃达克质岩成因和岩浆岩源区。这将有助于解释爪哇和加里曼丹中部 Au 矿和爪哇斑岩型 Cu-Au 的成因和分布规律,具有科学理论研究和重要的经济意义。

1 岩浆岩的构造背景

爪哇岛和加里曼丹岛在大地构造上位于巽他古陆核边缘,属于该古陆核东南边缘上白垩纪加积楔(图 1)。在新生代时,该区侵入-火山岩产出于欧亚大陆板块与太平洋(菲律宾)板块和印度洋板块汇聚加积楔所形成的岛弧系统过渡带中。

爪哇岛古近纪(晚始新-早中新世)的岩浆岩为枕状熔岩,分布于东爪哇和中爪哇,属典型的岛弧拉斑玄武岩系列。分布于西爪哇南部相同的火山岩系(称为“老第三系”火山岩)的宽度只有 60 km。西爪哇的新近纪火山岩为钙-碱性玄武岩和安山岩,见有少量高钾的钙-碱性岩和橄榄玄粗岩系列。该岛新生代的火山岩可划分为南、北分布的两条 E-W 向展布的岩浆岩带:南带的成因与古近纪洋壳俯冲有关,而北带的形成时代较晚,其成因与新近纪俯冲有关。第四纪的火山锥则分布于新近纪岩浆岩带之内。

加里曼丹中部新生代岩浆岩带主要为晚渐-中新世(K-Ar 法年龄 51 ~ 16 Ma)火山岩,呈 NE-SW 向分布。古近纪早期板块俯冲导致形成晚始新-早渐新世的硅质火山碎屑岩;晚渐新世-更新世的岩浆作用与板块俯冲作用相关,其岩浆演化系列为钙-碱性至高钾钙-碱性。该岩浆岩带与该岛中部新塘地区新生代“金矿带”(即:新近纪浅成热泉金矿化的新塘至克莲成矿带)母岩的形成构造环境与古南海(中国)地体海底扩张产生的新生洋壳的早期俯冲有关(见文献[21]上图 6)。

表1 爪哇、楠榜、加里曼丹中部和越南西北部代表性的新生代埃达克质岩地球化学分析结果

Table 1 Geochemical analysis results of representative adakitic rocks in Java, Kalimantan, Lampung, central and northwestern Vietnam

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
地区	爪哇					加里曼丹中部			越南西北部				楠榜
SiO ₂	57.8	58.5	59.6	63.2	79.5	60.3	64.2	72.8	70.3	70.5	70.4	72.5	63.8
TiO ₂	0.75	0.77	0.58	0.42	0.14	0.5	0.41	0.03	0.2	0.21	0.24	0.18	0.57
Al ₂ O ₃	17.2	17.1	17.4	17.3	11.4	17.1	16.8	15.7	16.1	15.7	16.3	14.9	15.7
Fe ₂ O ₃	7.35	7.75	4.9	4.38	0.19	5.44	3.77	0.93	1.56	0.6	1.23	0.89	5.35
MgO	3.07	3.86	3.35	1.5	0.8	3.05	2.01	0.25	0.31	0.24	0.21	0.18	1.88
Na ₂ O	3.41	3.46	4.43	4.45	2.58	3.78	5.26	4.22	4.76	4.8	4.29	4.5	3.49
K ₂ O	0.84	0.77	1.23	2.58	4.18	0.85	1.08	2.21	5.02	4.97	5.63	5.73	1.98
P ₂ O ₅	0.08	0.15	0.19	0.2	0.04	0.1	0.19	0.04	0.07	0.04	0.02	0.06	0.13
Ba	142	131	264	365	625	247	274	589	2148	2335	2195	1858	331
Rb	19	18	36	109	158	27	22	90	134	153	165	200	74.9
Sr	320	307	427	615	89	492	1060	540	744	1336	1265	615	288
Zr	57	70	71	44	48	89	87	28	131	54	152	244	1185
Nb	1	1	5	4.5	7	3	3	4	12	9.6	9.26	9.1	3.9
Th									8.33	15.4	16.3	27.4	8.1
Y	18	17	11	18	10.5	13	11	10	6.93	7.82	8.08	15.8	16.7
La	5.2	5.3	18	34	28	10	12	2	19	37.8	29.3	46	18.1
Ta									0.63	0.51	0.85		0.3
Cr	22	24	65	10	3	71	22		0.93	1.4	0		47
Ni	16	15	53	5	2	24	19		0.99	0.12	0.85		170
Yb	1.5	1.4	0.8	1.6	1	1	0.73	0.17	0.53	0.52	0.71	0.52	1.9
Nb/Zr	0.02	0.01	0.07	0.10	0.15	0.03	0.03	0.14	0.09	0.17	0.06	0.04	0.03
La/Yb	3.47	3.78	22.5	21.25	28	10	16.4	11.7	35.8	72.6	41.3	88.5	9.53
Sr/Y	17.8	18.1	38.8	34.17	8.48	37.85	96.3	540	107.4	168	157	38.9	17.2
Mg [#]	0.62	0.66	0.74	0.58	0.94	0.70	0.69	0.52	0.45	0.42	0.40	0.44	0.60
Zr/Nb	57	70	14.2	7.78	6.68	29.67	29	7	10.92	5.96	16.4		30.3
Zr/Hf									38.08	46.6	48.7		37.03
Nb/Ta									19.05	17.8	27.2		13.0
类型	O-型		C-型			O-型	C-型	O-型	C-型				O-型
文献	[21]					[20]			[18]	[19]	[16]		

样品编号:1.PC-1,2.PC-3,3.CJ-25,4.JT-10,5.CJ-23,6.69307,7.PR068B,8.PP001A,9.V0882,10.V0883,11.V0870,12.VN0826,

13.楠榜P13D; 主量元素单位为wt%,微量和稀土元素单位为 $\times 10^{-6}$ 。

2 岩浆岩地球化学背景

爪哇岛的新生代岩浆岩在区域上为低钾火山

岩,其地球化学特征是微量元素和稀土元素 Rb、Sr、Ba、La、Ce 含量较低,亏损高场强元素。高钾的钙-碱性或橄榄玄粗岩只见于新近纪火山岩中。随

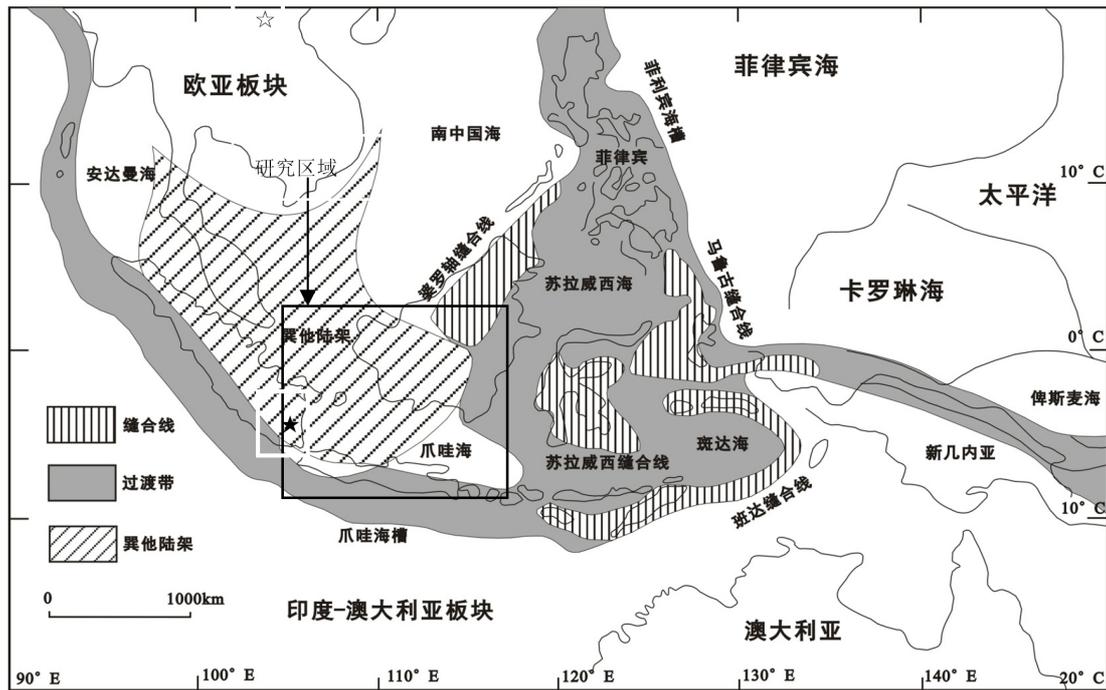


图1 研究区域的大地构造简图(据文献[25]修改)

Fig. 1 Tectonic map of study area

图例: ☆-越南西北部埃达克质岩对比区; ★-南苏门答腊楠榜省埃达克质岩对比区

着地质年代变新,其不相容元素逐渐增加,表明其成因与洋壳板块俯冲和沉积物质熔融增加有关。

加里曼丹岛中部的区域新生代岩浆岩以 SiO_2 含量与 K_2O 、 Na_2O 和 CaO 含量成正比,而与 MnO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 含量成反比为特征。古近纪火山岩普遍为活动大陆边缘岛弧型的钙-碱性岩浆岩;新近纪的高 K 钙-碱性岩和高镁系列为高 MgO 和高 Ti_2O 含量,显示其构造环境与大陆边缘的扩张和裂隙作用有关。其中,浅成热液金矿母岩为埃达克质岩。

3 埃达克岩的地球化学特征

根据近年来研究结果,笔者认为确定埃达克质岩的主要地球化学标志应为主量元素 SiO_2 含量 $> 56\%$ 、低的稀土元素 Yb 含量和 Y 含量^[9-16]。爪哇岛和加里曼丹岛中部(表 1)。新生代岩浆岩的 Y 含量 ($\leq 18 \times 10^{-6}$) 和 Yb 含量 ($\leq 1.9 \times 10^{-6}$) 低,符合埃达克质岩的鉴定标志。两地埃达克质岩主量元素 SiO_2 含量为 $57.8\% \sim 79.5\%$, TiO_2 、 Fe_2O_3 和 P_2O_5 含量 ($0.1\% \sim 0.75\%$) 偏低,多数样品的 Na_2O 含量 $\geq \text{K}_2\text{O}$

含量,属钙-碱性系列。而非埃达克质岩则为拉斑玄武岩系列(图略)。爪哇岛埃达克质岩占新生代中酸性火成岩样品的 36% ,而加里曼丹岛中部的埃达克质岩占 50% 。多数埃达克质岩在 ANK-ACNK 图上为准铝质岩,少数为过铝质岩类型(图 2b)。在元素蛛网图中,形成 Ta、Nb、K、P 和 Fe 的低谷区(图 2a)。微量元素强烈亏损 Ta 和 Nb 为岛弧环境的特征。

在埃达克质岩鉴别图 $\text{Sr/Y}-\text{Y}$ 和 $\text{La/Yb}-\text{Yb}$ 图上显示, Sr/Y 比值与 Y 含量以及 La/Yb 比值 Yb 含量都成反比关系,反映了本区埃达克质岩的成因与海洋板块俯冲具有明显的直接关系(图 2c、d)。

在 $\text{Sr/Y}-\text{SiO}_2$ 的哈克图上显示, Sr 含量和 Sr/Y 比值与 SiO_2 成正比关系。但是,当 SiO_2 含量大于 70% 是即转变为反比关系(图 3c、d)。在哈克图上还显示:当 SiO_2 含量小于 65% 时, Na_2O 含量与 SiO_2 为正比关系,而当 SiO_2 含量大于 65% 时,它们即转变为反比关系,直到 SiO_2 含量达到 80% 为止(图略)。 La/Yb 比值与 SiO_2 含量的变化关系也有类似情况出现(图 3a)。 Yb 含量与 SiO_2 含量呈反比关系

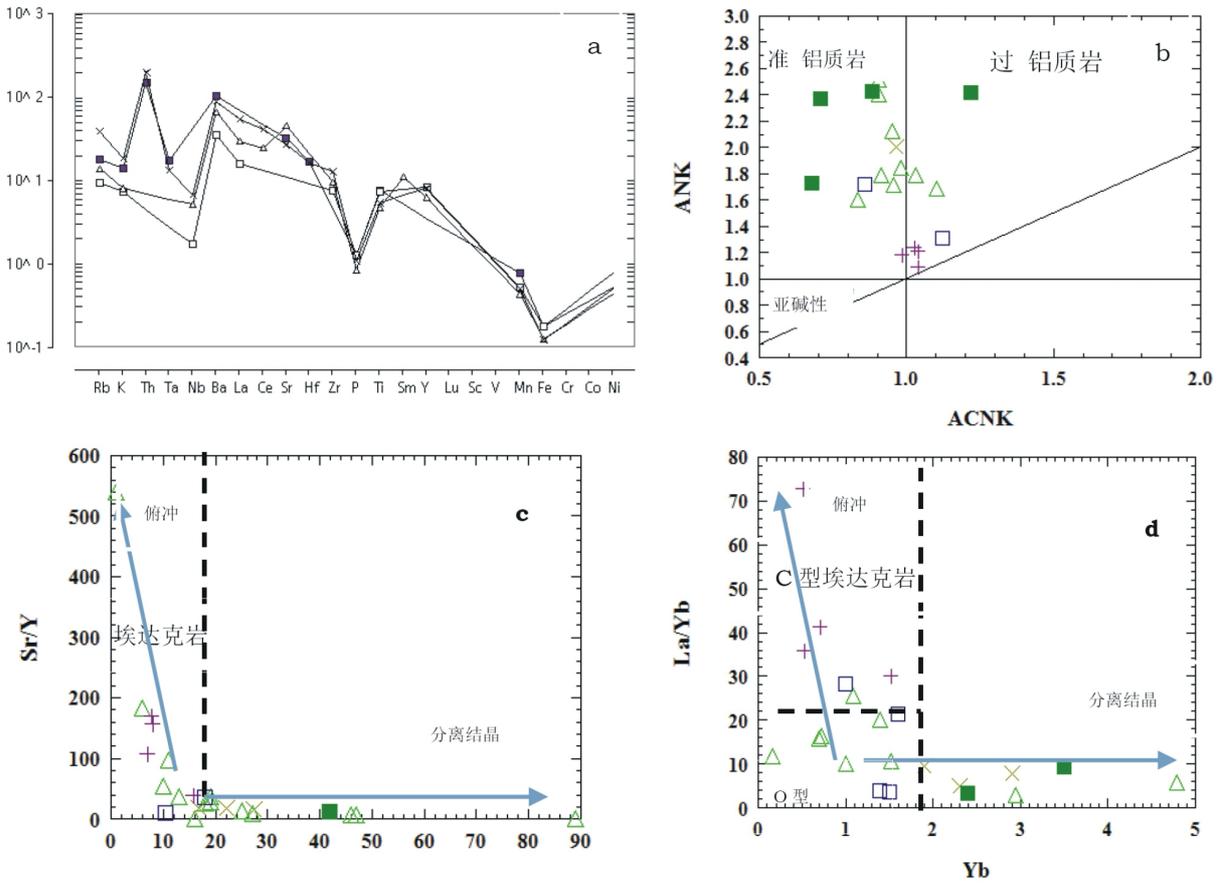


图 2 新生代埃达克质岩的地球化学图解

Fig. 2 Geochemical discriminative for Cenozoic adakitic rocks

a. 微量元素蛛网图; b. ANK-ACNK图; c. Sr/Y - Sr/Y 图: 左边部分为C-型埃达克质岩; 右边部分为非埃达克质岩; d. La/Yb-Yb图: 左上部分为C-型埃达克质岩, 左下部分为O-型埃达克质岩, 右边部分为非埃达克质岩。

图例: □. 爪哇埃达克质安山岩; △. 加里曼丹埃达克质岩; ■. 爪哇玄武-安山岩; +. 越南埃达克质岩; ×. 南苏门答腊第四纪埃达克质岩。

(图 3b), 有力地显示俯冲板片对形成埃达克质岩的影响作用很强烈。稀土元素 La/Yb 比值为 3.47 ~ 28, 表现为 LREE 富集右倾型的铲状曲线特征不甚明显 (图略)。另外, 各个样品的 Ce 和 La 含量在 Ce-La 图上 (图略) 呈正比关系 (呈一条直线排列) 证明本区埃达克质岩具有相同性质的成因、岩浆演化规律和岩浆源区。

本区埃达克质岩具有高的 $Mg^{\#}$ 值 (0.52 ~ 0.94), 与阿留申群岛 Adak 型埃达克岩相同。Cr 含量 (3 ~ 71) 和 Ni (2 ~ 53) 含量的变化值比较接近阿留申群岛 Piip 型埃达克岩的变化范围^[10]。

爪哇岛东部的帕芝坦地区的埃达克质岩样品 (PT-57A) Zr/Hf 比值为 40, 与两个高 Zr/Nb 比值 (50 ~ 70) 样品 (PC-1 和 PC-3) 互相对应 (表 1), 显示其物质来源成因可追溯到地幔, 说明爪哇岛岩浆岩源遭受过地幔楔交代作用十分强烈。

4 埃达克岩的成因类型和构造环境判别

4.1 成因类型的构造环境意义

资料显示本区内多数陆缘岛弧的埃达克质岩以 C-型为主, 并伴生少量的 O-型 (表 1), 与典型的阿留申群岛 Adak 型 (C-型) 埃达克岩和 Piip 型 (C-和 O-型混合) 埃达克岩相似^[10]。

爪哇和加里曼丹中部新生代埃达克质岩 La/Yb 比值 ($La/Yb=3.47 \sim 28$) 与阿留申群岛的埃达克岩 La/Yb 比值 ($La/Yb > 20$) 对比结果偏低 (表 1)。若以 $La/Yb=12$ 作为埃达克质岩两种成因类型的划分界线^[11,13,15], 则本区埃达克质岩多数为 C-型, 少数为 O-型 (表 1; 图 3c、d), 充分表明埃达克质岩的成因与俯冲洋壳板块引起的部分熔融和上地壳的结晶分离 AFC 作用有关。

与环太平洋带的 C-型和 O-型埃达克质岩的产状具有多样性的特征相似,本区埃达克质岩既可单独产出在一个岩浆岩带中,也可以 C-型和 O-型共同产出的形式出现在同一条岩浆岩带中。但是,本区以 C-型和 O-型共生在同一条岩浆岩带中的情况居多。随着 SiO_2 含量的增加,埃达克质岩可以由 O-型转变为 C-型,构成连续的变化系列^[9-14,16]。笔者认为:大陆边缘所形成的 O-型埃达克岩成因与岛弧构造环境的俯冲洋壳板片部分熔融作用有关,但是也可能与洋壳板片之上的地幔楔混染(MASH)或者与下地壳底部中-基性岩(包括埃达克质 TTG 和 TTD 片麻岩)的部分熔融有关。

4.2 大地构造环境判别

微量元素地球化学-构造环境图解是判别岩浆岩形成构造环境的重要依据。爪哇岛和加里曼丹岛中部大多数的埃达克质岩样品在 AFM 图解上落在陆缘岛弧与扩张岛中心分界线附近(图略)。在

Rb-(Y+Nb) 图解上,集中在火山弧的范围内,显然为活动大陆边缘火山活动的产物(图 4a)。

形成活动大陆边缘埃达克质岩的构造环境可以采用微量元素 Th-Nb-Zr、Th-Ta-Hf 和 La-Nb-Zr 地球化学图解来判别。这些图解是根据板块汇集边缘玄武-安山-英安岩系列的大量数据编汇而成的图件,对板块缝合线两侧的基性至中酸性火成岩的大地构造环境具有很好的判别效果^[26-28]。近年来笔者等的研究实践证明:这些图解不仅仅可用于主动大陆边缘中-基性(玄武岩-安山岩)岩类的构造环境鉴别,也可适用于中-酸性长英质(包括埃达克质岩)火成岩套的构造环境判别^[10-16,29],其效果与 Th-Ta-Yb 图解(图 4c、4d)相同,完全可以应用于大洋岛弧(海山)、陆缘岛弧、板内火山弧和陆-陆碰撞带附近的大陆板内次一级环境(例如板内裂谷及陆缘裂谷、初始裂谷和弧后扩张盆地等等)的判别^[29-31]。

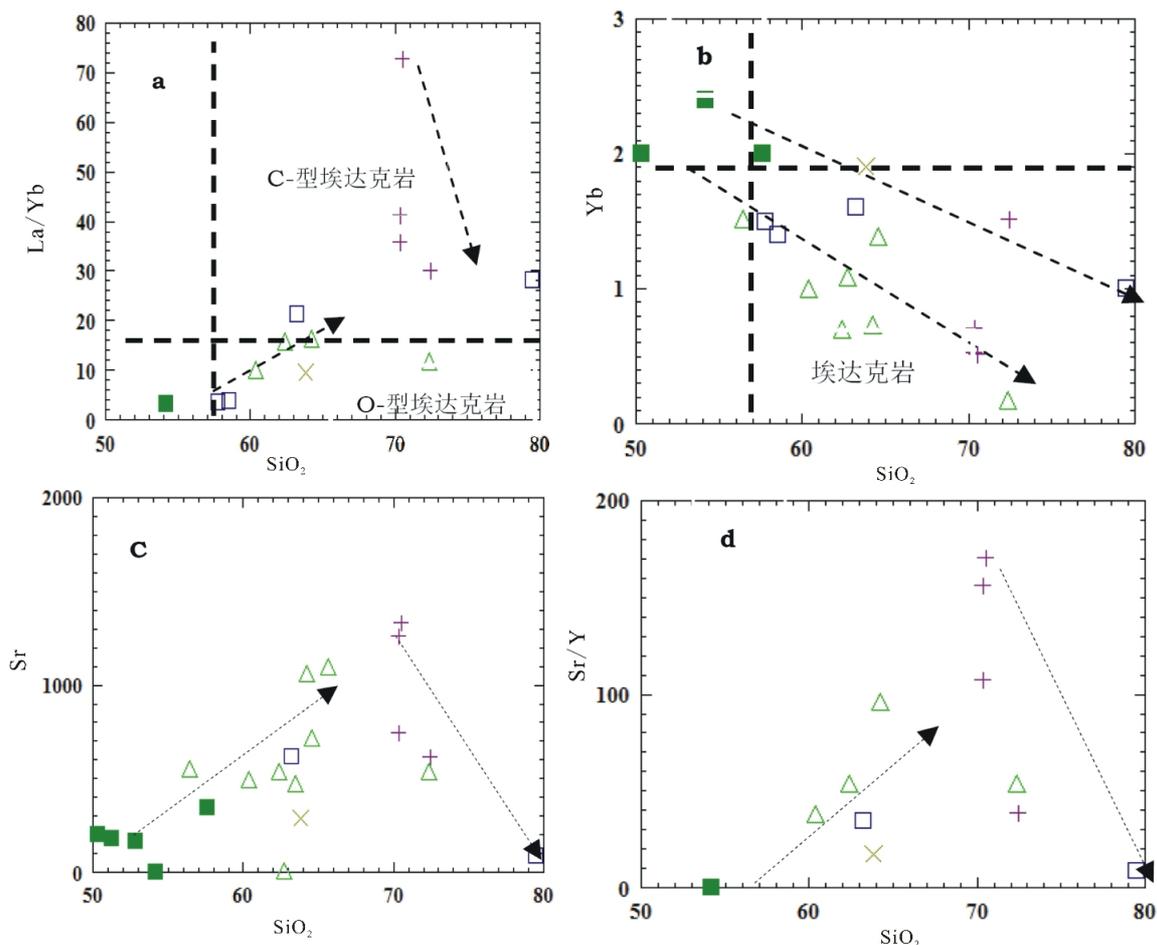


图3 火成岩的微量元素与 SiO_2 变异图

Fig. 3 Variation between Trace elements and SiO_2 contents in adakitic rocks

a. La/Yb - SiO_2 图解; b. Yb - SiO_2 图解; c. Sr - SiO_2 图解; d. Sr/Y - SiO_2 图解; 图中氧化物含量为%,微量元素含量为($\times 10^{-6}$);图例同图2.

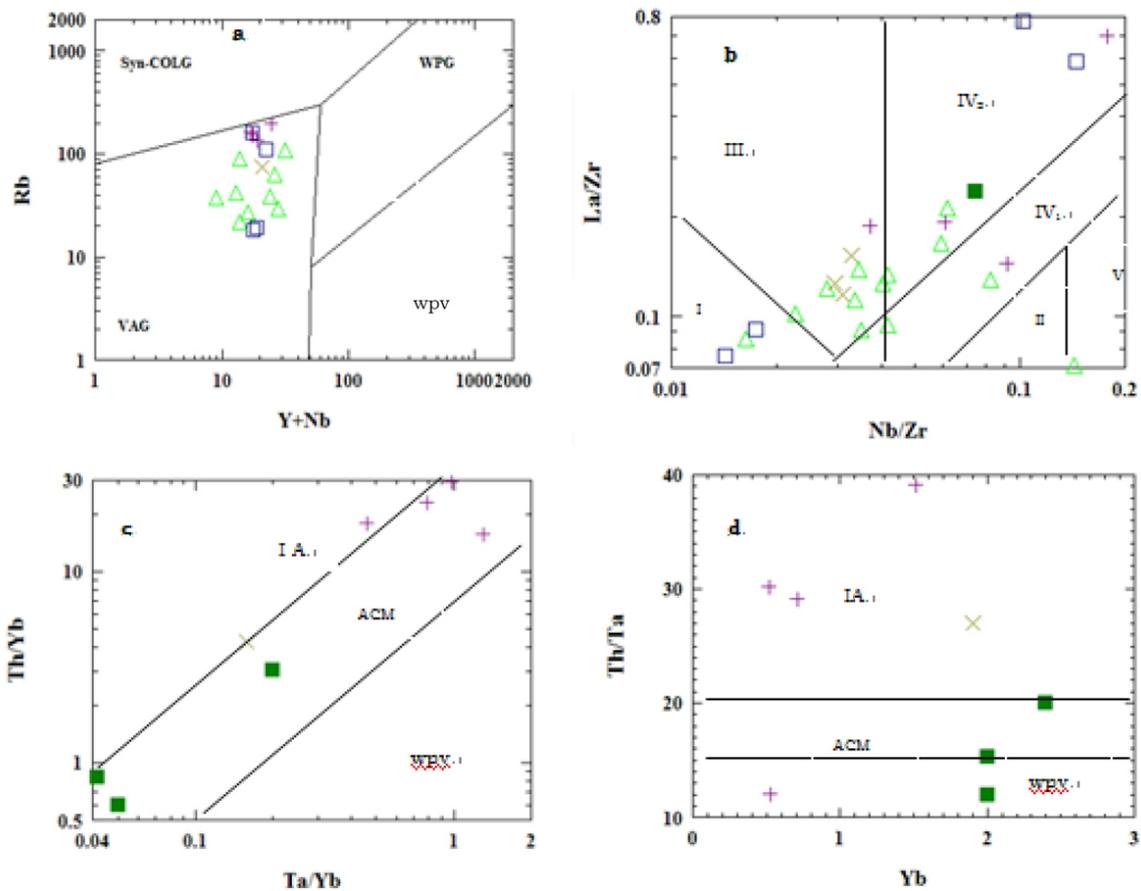


图4 火成岩的微量元素地球化学-构造环境判别图

Fig. 4 Tectonic environment discrimination by trace elements of adakitic rocks

a. Rb-(Y + Nb) 图解:syn-COLG-同碰撞花岗岩, VAG-火山弧花岗岩, WPG-板内花岗岩; b. La/Zr -Nb/Zr 判别图(图式仿武莉娜等,2003.)^[28]; I -大洋板块离散边界N-MORB, II -大洋板内(大洋岛弧) III-板块汇聚边缘(陆缘岛弧及陆缘火山弧), IV-大陆板内[IV₁-板内裂谷及陆缘裂谷扩张; IV₂-陆-陆碰撞带玄武岩区], V 地幔热柱.; c. Th/Yb - Ta/Yb 图解:IA-岛弧, ACM-活动大陆边缘, WPVZ-大陆板内火山带(图式仿Gorton,等,2000)^[30]; d. Th/Ta- Yb 图解:IA-岛弧, ACM-活动大陆边缘, WPVZ-大陆板内火山带(图式仿Gorton,等,2000)^[30]. 图例同图2.

爪哇岛和加里曼丹中部的埃达克质岩样品的 Nb/Zr 比值 > 0.04, 少数样品 Nb/Zr 比值 < 0.04, 在 La/Zr-Nb/Zr 判别图(图 4b)上分布于 N-MORB 范围内, 部分爪哇样品的 Nb/Zr 比值 > 0.1, 落在陆-陆碰撞带的范围内。而加里曼丹中部大多数埃达克质岩样品则分布于陆缘岛弧、火山弧和陆-陆碰撞带的范围内。在微量元素 Th/Yb-Ta/Yb 图解和 Th/Ta-Yb 图解上, 爪哇非埃达克质玄武-安山岩和埃达克质玄武-安山岩对比地区(越南西北部和南苏门答腊楠榜)形成于活动大陆边缘(ACM)和岛弧(IA)范围内(图 4c、d), 而埃达克质岩因为缺乏 Th 和 Ta 的数据, 无法表示。

简言之, 爪哇和加里曼丹中部埃达克质岩形成的构造环境略有不同。前者以洋中脊(N-MORB)、

陆缘岛弧、陆-陆碰撞带为主, 而后者以陆缘岛弧和陆-陆碰撞带为主(图 4b)。

5 大地构造环境对比

5.1 与越南新生代陆缘岛弧和活动大陆边缘(ACM)埃达克岩对比

越南新生代埃达克质岩出露于欧亚板块的印支地块与华南板块结合处(缝合线)西南侧。其中 Phan Si Pam 地区的岩浆岩以埃达克质岩花岗岩为主, 其主量元素以高 Si、Al、K、Na 和低 Mg、Ca 地球化学性质为特征。在 ANK-ACNK 图上, 样品落在偏铝质花岗岩和过铝质花岗岩的过渡带, 其 $K_2O/Na_2O=1.02 \sim 1.31$, 属于高钾高硅埃达克质花岗岩

岩。该埃达克质花岗岩的 K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 含量在 Harker 图解上的变化趋势不明显(图略)。富集大离子亲石元素 LILE 元素和稀土元素 LREE, 以高 Sr 含量($744 \sim 1316$) $\times 10^{-6}$ 和贫 Y 含量($6.93 \sim 15.8$) $\times 10^{-6}$, 低 Yb 含量为($0.52 \sim 0.71$) $\times 10^{-6}$ 为特征。Sr 含量、Sr/Y 比值和 La/Yb 比值在 SiO_2 变异图上似乎显示与 SiO_2 含量呈反比关系(图 4a、4c、4d)。在微量元素蛛网图上显示强烈的 Ta、Nb 和 Ti 谷, 为岛弧环境的性质。该地区埃达克质岩具有低的 $Mg^\#$ 值($0.40 \sim 0.52$), 比阿留申群岛 Adak 型埃达克岩的 $Mg^\#$ 值低, 而 Cr 含量($0.93 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$), Ni 含量($0.12 \times 10^{-6} \sim 0.99 \times 10^{-6}$) 相对于阿留申群岛 Piip 型埃达克岩的 Cr、Ni 含量也低^[10]。

然而, 位于哀牢山剪切带南段西侧的越南 Pu Sam Cap 高钾碱性岩, 其主量元素以低 Ti、P、Fe 和高 K、Na 为特征, 属于高钾钙-碱性至超高钾碱性系列。富集大离子亲石元素 LILE 和轻稀土元素 LREE。埃达克质岩在微量元素蛛网图上显示强烈的 Ta、Nb 和 Ti 低谷。在 Rb-(Y+Nb) 图解上, 落在靠近同碰撞带的火山弧花岗岩范围内, 为活动大陆边缘陆-陆碰撞的产物。

越南新生代埃达克质岩具有高的 Zr/Hf 比值($38.08 \sim 48.7$), 比地幔比值(36.27)高得多。其 Nb/Ta 比值($17.8 \sim 27.8$)也高于地幔比值(17.5)^[32-35]。有充分证据证明该埃达克质岩来源于地幔岩石圈部分熔融或下地壳底侵的结果。

5.2 与南苏门答腊第四纪岛弧型埃达克质岩对比

南苏门答腊楠榜省位于西爪哇的西北, 隔巽他海峡与爪哇岛相望, 在构造上属于暹罗马苏(Sibumasu)地体的南东向延伸部分。第四纪火山岩十分发育。其中, 埃达克质岩占中酸性火成岩样品的 50% 以上, 以 $Na_2O > K_2O$ 和低 MgO 含量(1.88%) 以及高 Ba、Sr、Th 和 K 元素为特征, 属于低硅埃达克质岩。并且具有低高场强元素 Ta、Nb、P、Zr、Hf 和 Ti, 以及低的 Ce、Sm、Y 和 Yb 含量为特点。但是, Ti 和 Ce 元素含量比 MORB 高些。埃达克质岩具有高的 $Kg^\#$ 值(0.58), 和高的 Cr(47×10^{-6}) 和 Ni 含量(170×10^{-6}), 与阿留申群岛 Adak 型埃达克质岩的特征相同。南苏门答腊楠榜以西的大多数火山岩样品 Zr/Hf 比值变化于 $35.94 \sim 44.04$ 之间, 显示其岩浆来源与岩石圈地幔($Zr/Hf > 36.27$) 的部分熔融有关, 是壳-幔交代的结果。

楠榜以西的火山岩为岛弧型的玄武-英安岩, 而楠榜以东以弧后盆地型玄武-安山岩为主, 分别属于岛弧(IA)型和活动大陆边缘(ACM)构造环境^[7]。其中所见的埃达克质岩(表 1)属于 O-型埃达克质岩, 在 Nb/Zr-La/Zr 判别图(图 4b)上落在陆缘岛弧的范围内; 在微量元素 Th/Yb-Ta/Yb 和 Th/Ta-Yb 图解上落在岛弧(IA)的附近(图 4c、d)。从而也证明了 Nb/Zr-La/Zr 判别图与 Th/Ta-Yb 图解的构造环境判别效果相同, 完全适合于活动大陆边缘长英质火成岩的构造环境判别。

6 成因及源区探讨

上述两种埃达克岩的成因类型反映了两种不同深度的岩浆源区。O-型埃达克岩是由俯冲的年輕大洋板片和沉积物质消减作用以及玄武质下地壳发生部分熔融形成, 岩浆来源区应该为受污染的地幔楔或下地壳(埃达克质 TTD 和 TTG 岩类或片麻岩), 或者被解释为地幔楔交代和下地壳底部混染 MASH(熔融-混染-储存-均一化)作用^[9]。研究表明, 海洋板块较平缓俯冲环境可能是形成 O-型埃达克岩最有利的构造条件。俯冲板片的部分熔融或板片拆沉作用是产生 O-型埃达克岩的主要物质来源, 其理想的形成构造环境是属于地壳厚度不大于 90 km 的大陆边缘火山弧和大洋岛弧带^[9, 13, 15]。而 C-型埃达克岩是由加厚的地壳底部的底侵的玄武质下地壳部分熔融叠加上地壳重熔和分离结晶而成。由于 C-型埃达克岩具有高的 La/Yb 比值, 可断定它的形成与上地壳的重熔和结晶分离 AFC(混染-分异-结晶)作用密切相关。即使是由俯冲板片局部熔融所产生的埃达克岩也与其上覆板块的岩石圈地幔楔发生岩浆混染的过程 MASH(熔融-混染-储存-均一化)和 AFC(混染-分异-结晶)有关。

从图 3b 所示可知, 本区埃达克岩的 Yb 含量与 SiO_2 含量呈反比关系, 暗示俯冲板片的残留相是属于高压来源的矿物(含石榴石、辉石、榴石、角闪石的榴辉岩相)。然而, Na_2O (图略)和 Sr 含量(图 3c)与 SiO_2 含量在 65% 以后转变为反比关系则反映了上地壳的结晶分离(AFC)过程。其构造环境模式如文献^[21]上图 6 所示, 加里曼丹中部的埃达克岩可能与俯冲的洋壳发生部分熔融和加厚的下地壳底侵作用有关。

爪哇岛具有高 Zr/Hf 比值和高 Zr/Nb 比值以及南苏门答腊楠榜以西的大多数火山岩样品高 Zr/Hf 比值的事实证明,本区埃达克质岩的岩浆岩源遭受过强烈的地幔楔交代作用。

在 Zr/Nb-MgO 图解(图 5a)上可以看出,爪哇岛东部的帕芝坦(Pacitan)地区的两个 O- 型埃达克岩(PC-1 和 PC-3)(K-Ar 法年龄 15.3Ma),具有较高的 Zr/Nb 比值(57 ~ 70)和 MgO 含量(3.07% ~ 3.86%),与样品(PT-57A)的 Zr/Hf 比值(40)相对

应,其物质源区显然是来源于地幔楔的交代和混染作用的结果,而那些 Zr/Nb 比值相当于 N-MORB (20 ~ 40) 的样品则表现俯冲岩层对地幔楔的稀释作用,或者是表示洋壳(N-MORB)的局部熔融。

在 Zr/Nb-Zr 图解(图 5b)上,爪哇、加里曼丹中部和南苏门答腊楠榜的埃达克质岩明显地显示出形成于俯冲的洋壳板片局部熔融的演化趋势(左箭头),以及加里曼丹部分样品和越南西北部新生代埃达克岩来源于上地壳分离结晶(右箭头)的两种

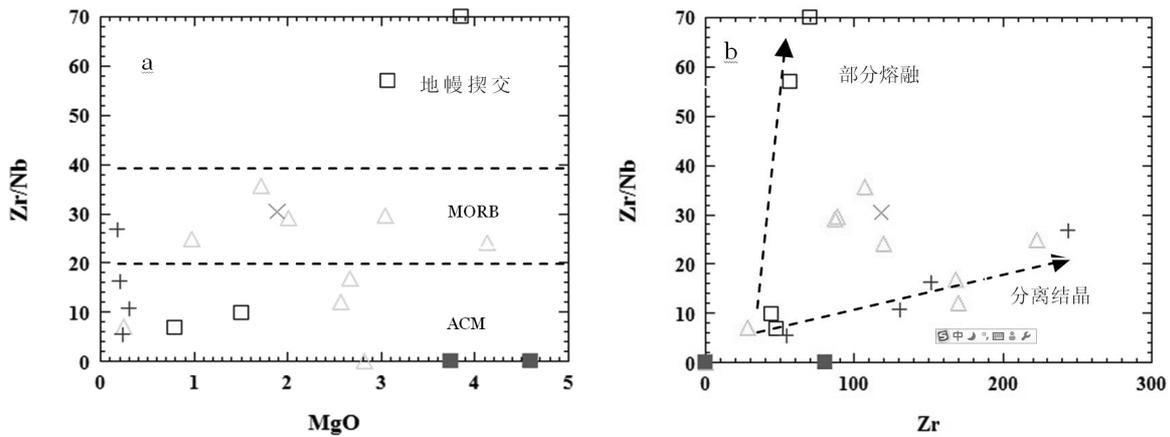


图5 埃达克岩的Zr/Nb-MgO(a)(图式仿Macpherson & Hall,1999)^[36]和 Zr/Nb-Zr图解(b)(图式仿Maulana,2009)^[37]

图例同图2

Fig. 5 Zr/Nb-MgO (a) and Zr/Nb-Zr diagrams (b) for Adakite

不同演化趋势,分别代表两种不同的岩浆岩源区。由此可见,爪哇、加里曼丹中部和南苏门答腊楠榜省的埃达克质岩与越南西北部新生代埃达克质岩是两种不同源区和岩浆作用的结果:前三者为洋壳板片(N-MORB)局部熔融叠加地幔楔(Zr/Nb 比值大于 40)交代和混染作用成因,后者则为碰撞后的来源于下地壳的岩浆在上地壳发生强烈分离结晶作用结果。

综上所述,爪哇、加里曼丹中部和南苏门答腊的埃达克质岩浆岩都是起源于板块俯冲,具有十分相似的成因、岩浆源区和演化规律。不过爪哇岛显示更多的地幔楔交代和混染作用(图 5),而加里曼丹中部和南苏门答腊显示更多的为俯冲洋壳板片局部熔融的作用。

7 结论

(1)依据以 La/Yb 比值(=12)为划分两类埃达克岩的临界值的准则,本区埃达克岩多数为 C- 型,

少数为 O- 型。O- 型埃达克质岩成因是由典型的俯冲板片部分熔融和地幔楔交代和混染作用为主,C- 型埃达克质岩由加厚的下地壳底侵作用叠加上地壳分离结晶作用而成的。

(2)通过对本区新生代埃达克质岩的地球化学图解和构造环境判别,爪哇岛、加里曼丹岛中部新生代埃达克质岩和南苏门答腊第四纪埃达克质岩产出的构造环境与越南西北部新生代埃达克质岩略有不同。前者以岛弧型为主,形成于近海沟的火山弧,后者则比较分散,位于大陆板内(陆-陆碰撞带或弧后扩张盆地)为主。

(3)微量元素 Th-Nb-Zr, Th-Ta-Hf, La-Nb-Zr 和 Th/Yb-Ta/Yb 图解是主动大陆边缘形成的埃达克质岩有效的地球化学-构造环境判别工具,而 Zr/Nb-Zr 和 Zr/Nb-MgO 图解及高场强元素(Zr, Hf, Nb, U, Nb, Ta)比值则有助于源区和岩浆作用的分析。在 Zr/Nb-Zr 图解上和 Zr/Hf 比值显示爪哇岛和南苏门答腊楠榜以西的大多数火山岩的埃达克质

岩浆岩源区为俯冲洋壳板片和地幔楔局部熔融,加里曼丹岛中部也显示出俯冲洋壳板片局部熔融和地壳分离结晶作用。越南西北部新生代埃达克质岩主要为陆-陆碰撞后上地壳分离结晶作用的结果。

(4) 本区及对比区的各个岩浆岩样品的 Ce 和 La 含量在 Ce/La 图上成正比关系,证明本研究区内岩浆来源、成因和演化规律的一致性。

(5) 埃达克岩与铜、金、铅、锌等金属矿产成矿作用有密切的成因联系,在加里曼丹岛中部是浅成热液金矿(新塘至柯莲金成矿带)的母岩;在爪哇岛是斑岩型铜-金矿的母岩。因此,加强研究区埃达克质岩研究,对本区找矿工作有一定的指导意义和经济价值。

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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Richards J P, Kerrich R. Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 2007, 102(4): 537-576.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姚华舟,朱章显,韦延光,杨振强,等.巽他群岛一新几内亚岛地区地质与矿产 [M]. 北京:地质出版社, 2011: 1-277.
- [16] 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.
- [17] Zulkarnain I. Geochemical evidence of island-arc origin for Sumatra Island: a new perspective based on volcanic rocks in Lampung Province, Indonesia [J]. *Jurnal Geologi Indonesia*, 2011, 6(4): 213-225.
- [18] Prouteau G, Maury R C, Rangin C, Suparka E, Bellon H, Pubellier M, Cotten J. Miocene adakites from northwest Borneo and their relation to the subduction of the Proto South China Sea[J]. *C. R. Acad. Sci., S é rie II A*, 1996, 323(11): 925-932.
- [19] HIEU Pham Trung, 王涛,童英.越南西北部Phan Si Pan地区新生代埃达克质侵入岩时代、成因及构造意义——U-Pb锆石年龄、元素地球化学和Hf同位素证据[J].*岩石学报*, 2012, 28(9): 3031-3041.
- [20] Tran MyDung, 刘俊来, Nguyen QuangLuat. 越南西北部Pu Sam Cap高钾碱性岩LA-ICPMS锆石U-Pb年龄与Hf同位素组成及其区域构造意义[J].*岩石学报* 2010, 26(6): 1902-1914.
- [21] Soeria-Atmadja R, Noeradi D, Priadi B. Cenozoic magmatism in Kalimantan and its related geodynamic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17(1): 25-45.
- [22] Soeria-Atmadja R, Maury R C, Bellon H, Pringgoprawiro H, Polve M, Priadi B. Tertiary magmatic belts in Java [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 9(1-2): 13-27.
- [23] Petrelli M, Poli G, Perugini D, Peccerillo A. PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2005, 6(7): 115.
- [24] Richard L R. Minpet: Mineralogical and petrological data processing system, version 2.02. Quebec (Canada): MinPet Geological Software, 1995.

- [25] Hall R et Wilson M E J Neogene sutures in Eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18:781–808.
- [26] 汪云亮,张成江,修淑芝.玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf – Ta/Hf图解判别 [J]. *岩石学报*,2001,17(3):413–421.
- [27] 孙书勤,张成江,黄润秋.板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的Th、Nb、Zr判别[J]. *地球科学进展*,2006,21(6):593–598.
- [28] 武莉娜,王志畅,汪云亮.微量元素La,Nb,Zr在判别大地构造环境方面的应用[J].*华东地质学院学报*,2003,26(4):343–348.
- [29] 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.
- [30] 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]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5):1065–1073.
- [31] 高小卫,杨振强,吴秀荣.海南岛晚海西-印支期埃达克质岩的构造环境判别及与邻区对比 [J]. *华南地质与矿产*,2014,30(3):206–217.
- [32] Stolz A J, Jochun K P, Spettel B, Hofmann A W. Fluid and melt-related enrichment in the subarc mantle: evidence from Nb/Ta variations in island arc [J]. *Geology*, 1997, 24(7):587–590.
- [33] 葛文春,李献华,李正祥,周汉文.桂北龙胜丹洲群火山岩的地幔源区及大地构造环境 [J]. *长春科技大学学报*,2001,31(1):20–24.
- [34] 徐德明,谢才富,付太安,张业明,李志宏.琼中古-中元古代变质基性火山岩地球化学特征[J].*成都理工大学学报(自然科学版)*,2005,32(5):453–459.
- [35] Huang H, Niu Y L, Zhao Z D, Hei H X, Zhu D C. On the enigma of Nb-Ta and Zr-Hf fractionation— A critical review [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(1):52–66.
- [36] Crow M J, Tertiary volcanicity [A]//In: Barker A J, J, Crow M J, and Milson J S (eds), *Sumatra: Geology, Resources and Tectonics*[C]. London: Geological Society Memoir, 2005, 31:98–119.
- [37] Maulana A. Petrology, Geochemistry and Metamorphic Evolution of South Sulawesi Basement Rock Complexes, Indonesia [D]. Canberra: The Australian National University, 2009:1–89.