

青藏高原东南缘‘三江’地区含角闪石变质岩石的地球化学特征

王 舫, 刘福来, 薛怀民, 刘平华

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 青藏高原东南缘‘三江’地区变质杂岩带中的岩石类型十分复杂, 斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩是本区常见的变质岩石类型。斜长角闪岩可进一步划分为由石榴辉石岩退变而成的和基性原岩经角闪岩相-麻粒岩相变质形成的两种类型。斜长角闪岩的 SiO_2 平均含量 50.0%, 具有高铝低钛的特点, 轻稀土元素相对富集, 钕无异常或略具负异常, Zr 含量较低, Zr/Y 比值较小, 其原岩的主微量元素组成具有岛弧玄武岩的特点, 反映其原岩形成于俯冲碰撞的构造环境。含角闪石斜长片麻岩的 SiO_2 平均含量 63.64%, MgO 和 TiO_2 含量低, 轻、重稀土元素分馏, 轻稀土元素明显富集而重稀土元素相对亏损, 具有中等负 Eu 异常, 大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Ba 、 Th 强烈富集, 高场强元素 Ti 、 Zr 、 Hf 、 Nb 和 Ta 含量较低, 其原岩具有安山质岩石或安山质/玄武质岩石的特点, 主要形成于板块聚敛边缘的构造环境。

关键词: 斜长角闪岩, 含角闪石斜长片麻岩, 地球化学, 原岩, 青藏高原东南缘

中图分类号: P595; P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0844-09

Geochemical characteristics of amphibole-bearing metamorphic rocks in Sanjiang region, southeastern Tibetan plateau

WANG Fang, LIU Fu-lai, XUE Huai-min and LIU Ping-hua

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Abundant and complex metamorphic rocks are widespread in Sanjiang region, southeastern Tibetan plateau. Amphibole-bearing metamorphic rocks, comprising amphibolite and amphibole-bearing plagioclase gneiss, occur as lenses or thin layers within metamorphic supracrustal rocks. Amphibolite could be subdivided into two types: one is a retrogressive product of garnet-pyroxenolite, and the other is a product of mafic protolith which experienced amphibolite- to granulite-facies metamorphism. The amphibolite has an average SiO_2 content of ~50.0%, with high-Al, low-Ti, Zr and Zr/Y ratio. The chondrite-normalized REE patterns show enrichment of LREE with slightly negative or no Eu anomalies. These geochemical characteristics are very similar to those of the island-arc basalt, indicating that the protolith of the amphibolites was formed in the subduction-collision tectonic setting. In contrast, the amphibole-bearing plagioclase gneiss has a higher average SiO_2 content of ~63.64% with low MgO and TiO_2 content, characterized by the enrichment of large ionic lithophile elements (LILE) such as K, Rb, Ba and Th, and the depletion of high field strength elements (HFSE) such as Ti, Zr, Hf, Nb and Ta. The REE patterns are characterized by relatively high fractionations of LREE and HREE with pronounced negative Eu anomalies. These geochemical features are inherited from those of andesitic

收稿日期: 2011-03-09; 修订日期: 2011-07-09

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011121276); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(40921001)

作者简介: 王 舫(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向: 变质地质学, E-mail: wangfang_mr@yahoo.cn.

or andesitic/basaltic rocks, indicating that the protolith of the amphibole-bearing plagioclase gneiss appeared in a plate convergence tectonic setting.

Key words: amphibolites; amphibole-bearing plagioclase gneiss; geochemistry; protolith; southeastern Tibetan plateau

众所周知,青藏高原东南缘“三江”地区有一条十分典型的变质杂岩带,变质岩石类型十分复杂,出露各类变质花岗质岩石、斜长角闪岩、各类副片岩-片麻岩、大理岩等。前人曾对该地区部分变质基性-中酸性岩石的地球化学性质、原岩恢复及其形成的构造环境进行了较系统的研究,并取得了许多进展(如季建清等,2000;沙绍礼等,2001;赖绍聪等,2010),但是对于以透镜体或呈薄层状赋存在变质表壳岩中的含角闪石变质岩石的地球化学性质及其形成的构造背景仍缺乏深入而系统的研究。本文在前人工作的基础上,以“三江”地区含角闪石的变质岩为重点研究对象,通过深入的野外勘查、岩石学及地球化学的分析研究,厘定了其原岩类型及其形成的构造背景。

1 区域地质概况

位于青藏高原东南缘的“三江”地区地处冈瓦纳大陆与欧亚大陆的接合地带,地质构造复杂,变质和变形作用强烈,岩浆喷发和侵入作用活动频繁,成为地质学研究的热点区之一。研究区的西部主要有发育古生代沉积组合(包括浅海相碳酸盐岩和陆源碎屑岩等)和早二叠世生物地层组合的腾冲地块和保山地块(钟大赉等,1998)。腾冲地块以西至国界主要出露了大面积的变质岩和不同时代的花岗岩。变质岩以早元古代高黎贡群的片岩、变粒岩和斜长角闪岩等为主。花岗岩包括晚元古代和三叠纪的(黑云母)二长花岗岩和花岗闪长岩以及部分新生代花岗岩。位于腾冲地块和保山地块之间的高黎贡山主要由经历了角闪岩相变质作用的高黎贡群和浅变质的潞西变质带组成(刘俊来等,2006)。向东穿过临沧花岗岩带、澜沧江断裂带和兰坪-思茅盆地即为点苍山-哀牢山变质带。点苍山-哀牢山变质带主要由元古宙变质岩、三叠纪未变质或浅变质岩石、各时期的花岗岩组成。基性-超基性岩在此变质带内沿变质带延伸方向呈NW-SE向零星出露。斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩呈透镜状或呈层状出露于元古宙变质岩体中(图1)。

2 岩石野外产状及岩相学特征

“三江”地区斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩广泛分布于点苍山-哀牢山变质带和瑞丽-盈江变质带,产出形态不同,呈层状或透镜状(图2a),大小不一,从几十厘米的透镜体或薄层至几米、几百米不等。露头呈暗绿色-绿黑色,中粒-粗粒变晶结构,透镜状、片麻状、条纹状构造,有时因深熔作用可见与长英质白色条带互层产出。在断裂带附近,因受热液交代作用发生蚀变,可见绿泥石化等蚀变现象。详细野外观察表明,斜长角闪岩可能有两种成因:一种是由石榴辉石岩退变形成的;另一种呈透镜体或层状的斜长角闪岩,它们可能只遭受过角闪岩相-麻粒岩相变质作用。由石榴辉石岩退变而成的斜长角闪岩实例即出露于元江市西南的样品YJ01-3,其中包裹着石榴辉石岩残余团块,根据其野外产状,可以推测此斜长角闪岩为石榴辉石岩退变的产物。其他斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩均经历了角闪岩相甚至麻粒岩相变质作用,使其具有与其围岩一致的片麻理方向,而且深熔作用也比较普遍且明显(图2b)。

由石榴辉石岩退变形成的斜长角闪岩,具粒状变晶结构,片麻状构造(图3a),斜长石和角闪石具定向性,长轴沿片麻理方向排列。角闪石,柱面多色性为浅黄绿-深绿色,半自形-他形,含量50%~60%;斜长石,聚片双晶明显,半自形-他形,含量30%~40%;石英,他形,含量<5%。经角闪岩相-麻粒岩相变质作用形成的斜长角闪岩,具粒状变晶结构,片麻状构造。按照暗色矿物的组成,可进一步划分为黑云斜长角闪岩和含辉石斜长角闪岩。其中黑云斜长角闪岩中黑云母呈浅褐色-褐色,含量5%~10%不等,部分发生绿泥石化;角闪石,半自形-他形,含量40%~50%,部分样品可以高达60%±;斜长石,可见聚片双晶,含量30%~40%不等,部分斜长石中含有高Ca成分的残余(图3b)。通过电子探针微区成分分析,发现部分斜长石含有 A_n 值达85的高钙的残余核;另外含有少量的石英,副矿物有锆石、钛

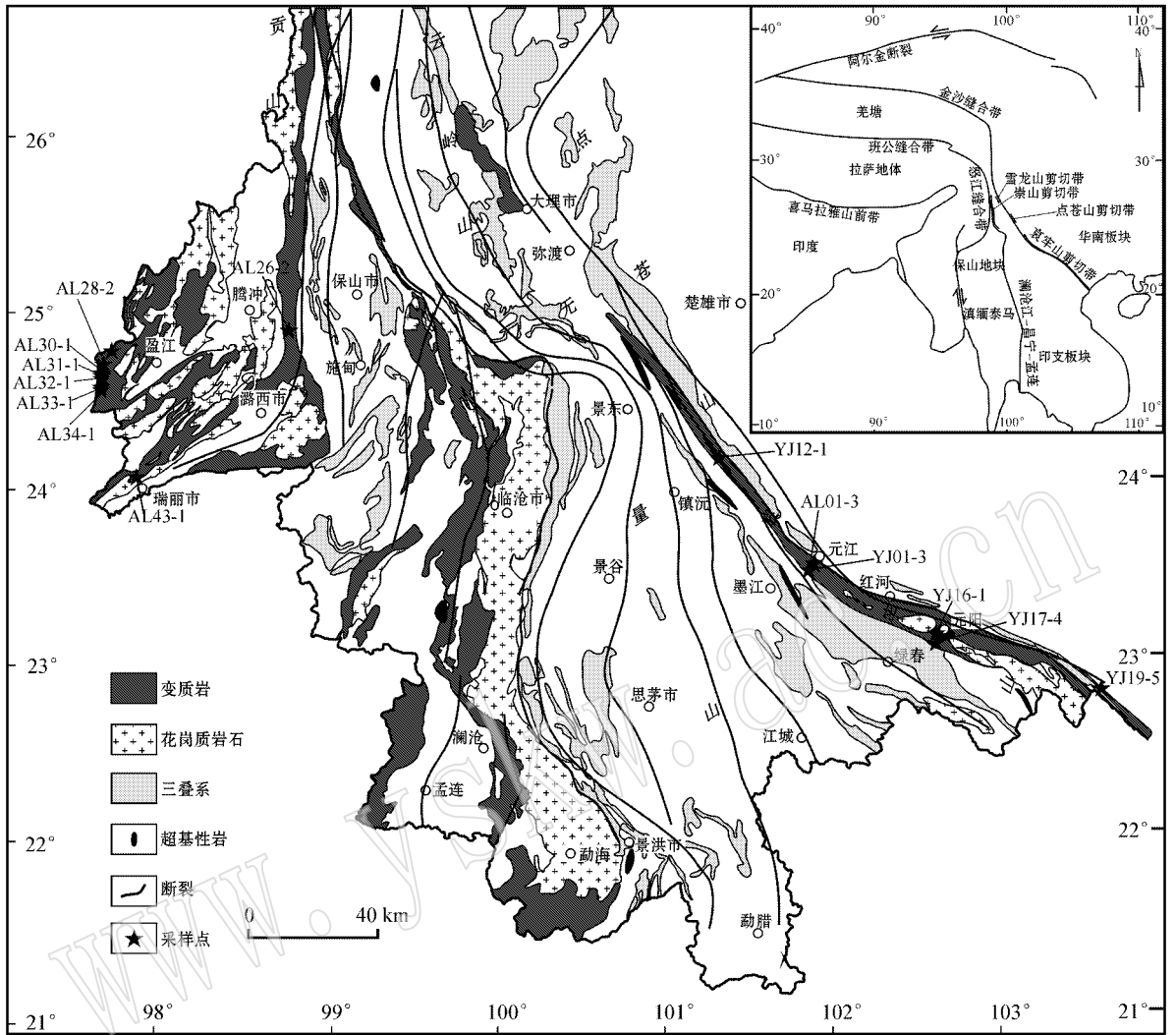


图1 青藏高原东南缘“三江”地区地质和构造简图及采样点位置(据 Sinan Akciz 等, 2008 修改)

Fig. 1 Geological map of Sanjiang region, southeast Tibetan plateau, showing sampling locations(modified after Sinan Akciz et al., 2008)

铁矿和磷灰石等。含辉石斜长角闪岩 细小的辉石颗粒呈他形残余状(图 3c),含量 10%± 角闪石,定向排列构成片麻理方向,含量 40%~50% 斜长石,可见聚片双晶,含量 30%~40% 石英,他形,含量<5%。

含角闪石斜长片麻岩类岩石,按矿物组合大致可以分为角闪斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩。角闪斜长片麻岩的代表性样品为 AL26-2(图 1),样品中角闪石集中分布,含量 20%~30%,斜长石颗粒大小不等,大者可达 1~1.5 cm,含量 50%~60%;石英,含量 10%~15%;副矿物主要有榍石或帘石等。黑云角闪斜长片麻岩,主要样品有 AL28-2、AL30-1、AL31-1、AL32-1、AL33-1、AL43-1(图 1)。样品中黑云母含量 10%~15%,角闪石,斑晶,含量 15%~20% 斜长石,斑晶(为火成岩经糜棱岩化作

用后的斜长石斑晶)部分样品中显微镜下可见到成分环带(图 3d),含量 60%~70% 石英,含量 10%~15%。

3 测试方法

在本区大量的变质岩样品中挑选出较新鲜且具有一定代表性的斜长角闪岩样品 5 件和含角闪石斜长片麻岩样品 7 件,作为此次研究的重点样品。其中,斜长角闪岩分别为点苍山-哀牢山变质带的 AL01-3、YJ01-3、YJ17-4、YJ19-5 和瑞丽-盈江变质带的 AL34-1,含角闪石斜长片麻岩分别为瑞丽-盈江变质带的 AL26-2、AL28-2、AL30-1、AL31-1、AL32-1、AL33-1、AL43-1。

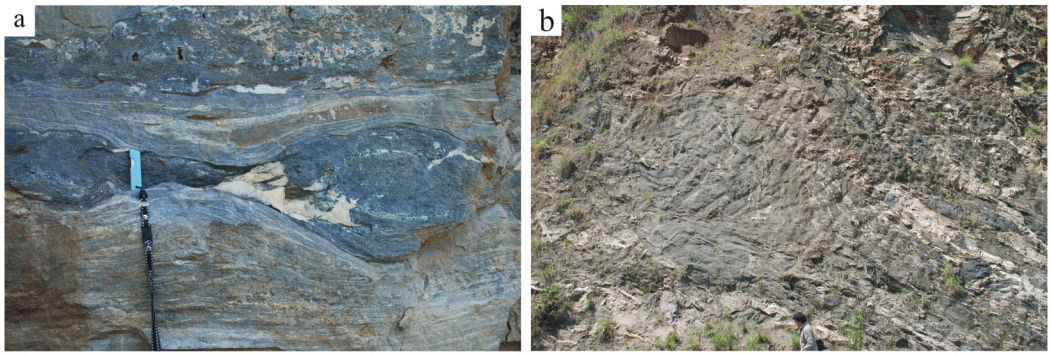


图 2 斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩野外照片

Fig. 2 Photographs of amphibolites and amphibole-bearing plagioclase gneiss outcrops in Sanjiang region

a—透镜状斜长角闪岩；b—层状角闪斜长片麻岩发生深熔

a—lenticular amphibolite; b—anatexis of amphibole-bearing plagioclase gneiss

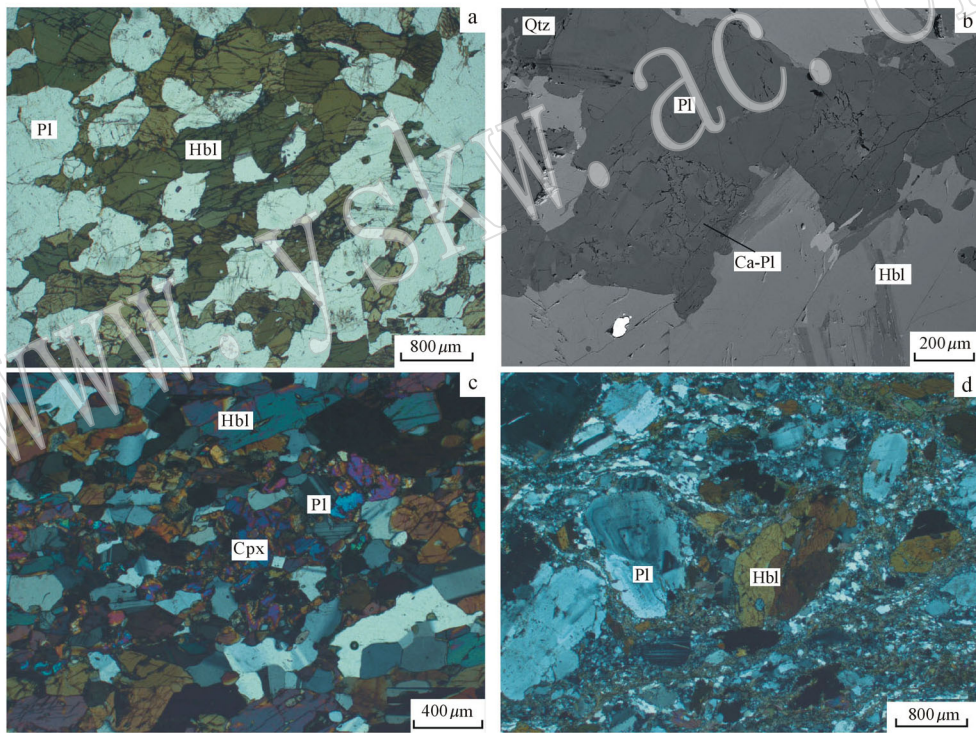


图 3 斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩的岩相学特征

Fig. 3 Petrographic characteristics of amphibolites and amphibole-bearing plagioclase gneiss from Sanjiang region

a—斜长角闪岩，单偏光；b—斜长角闪岩中斜长石含有高钙成分残余，背散射电子图像；c—斜长角闪岩中含有单斜辉石残余，正交偏光；

d—角闪斜长片麻岩中斜长石具有成分环带，正交偏光

a—amphibolite, PPL; b—high-Ca plagioclase in amphibolite, BSE; c—relict clinopyroxene in amphibolite, CPL; d—compositional zoning of plagioclase in amphibole-bearing plagioclase gneiss, CPL

实验前为保证地球化学数据的可靠性，尽量去除样品表面的风化面，选取大块、新鲜的样品。样品的全岩分析由国家地质实验测试中心完成，主元素

采用 X 荧光光谱法 (XRF)，测试仪器为 3080E 型 X-荧光光谱仪，执行标准分别为： Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 和 FeO 按

GB/T14506.28-1993 标准,其中 FeO 采用容量滴定法。H₂O⁺ 按 GB/T14506.2-1993 标准,CO₂ 按 GB9835-1988 标准,LOI 按 LY/T1253-1999 标准。稀土元素和微量元素采用等离子质谱法,检测仪器为等离子质谱(X-series),Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, In, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sc, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr 执行标准为 DZ/T0223-2001;Cl 用 X 荧光光谱仪 2100 测试,执行 JY/T016-1996 标准;S 用红外碳硫仪,执行标准为 GB7730.5-1987;B 用等离子质谱(X-series)测试,执行 JY/T015-1996 标准。矿物代号根据沈其韩(2009)的资料。

4 岩石的地球化学特征

样品的主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。

4.1 主量元素特征

斜长角闪岩主要元素成分 SiO₂ 含量变化于 46.52%~54.45% 之间,平均 50.00%。Al₂O₃ 含量为 14.52%~17.10%,TiO₂ 含量为 0.85%~3.94%,FeO 含量为 5.08%~6.68% (样品 YJ19-5 除外,由于发生矿化蚀变,其 FeO 含量高达 12.02%)。Fe₂O₃ 含量为 2.29%~5.37%,MgO 含量为 4.52%~7.76%,CaO 含量为 8.25%~14.28%,Na₂O 含量除 YJ19-5 含量较低外,其他范围为 2.64%~3.96%,K₂O 含量为 0.32%~2.42%。

含角闪石斜长片麻岩 SiO₂ 含量为 57.53%~68.54%,平均 63.64%。这些片麻岩的 Al₂O₃ 含量变化范围在 14.46%~17.74% 之间,FeO 含量 1.17%~3.79%,Fe₂O₃ 含量 0.59%~2.48%,MgO 含量 0.64%~2.41%,TiO₂ 含量 0.33%~0.94%,比斜长角闪岩 TiO₂ 含量低,CaO 含量为 2.72%~5.28%,比斜长角闪岩 CaO 含量低,K₂O 含量 2.28%~6.57%,明显比斜长角闪岩中 K₂O 含量高,而 MgO 和 TiO₂ 含量则较低。

4.2 稀土元素和微量元素特征

斜长角闪岩及含角闪石斜长片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图如图 4 所示。区内斜长角闪岩稀土元素总量(\sum REE)的变化范围较大,介于 59.64×10^{-6} ~ 216.49×10^{-6} 之间。(La/Yb)_N 变化范围为 1.40~8.06,其中发生矿化蚀变的角闪斜长片麻岩 YJ19-5

的 (La/Yb)_N = 8.06,稀土元素配分曲线右倾,轻稀土元素相对富集,Eu 略具负异常。其他斜长角闪岩稀土元素配分模式相对平缓,Eu 弱负异常或无 Eu 异常。在微量元素蛛网图上,YJ19-5 的 Ba、Th、Sr、Yb、Lu 相对亏损,而 Rb、U 相对富集;其他斜长角闪岩微量元素蛛网图右侧的形态相似,而左侧的变化较大,部分可能与这些元素在变质过程中属活泼元素有关。部分样品(AL01-3 和 AL34-1)表现出强烈亏损高场强元素 Nb 和 Ta,指示其成因过程中大陆岩石圈的影响。

研究区含角闪石斜长片麻岩的稀土元素配分模式和微量元素蛛网图如图 5 所示,表现为中等程度的轻、重稀土元素分馏(LREE/HREE = 5.48~9.84)较强的 Eu 负异常(Eu/Eu* = 0.42~0.73)。在原始地幔标准化蛛网图上,大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Th)表现出强烈富集的特点,高场强元素(Ti、Zr、Hf、Nb 和 Ta)含量皆较低,尤以强烈亏损 Nb 和 Ta 为特征,类似于典型岛弧火山岩的地球化学特征。

5 含角闪石变质岩石的原岩性质与构造环境探讨

由于 K、Ca、Rb、Sr 等元素在变质过程中的活泼性,对于大多变质火成岩而言,利用 Ti、Zr、Y、Nb、Ce、Ga、Sc 等稀土和微量元素判断其原岩类型判断原岩要更为合理和准确(Floyd and Winchester, 1975; Winchester and Floyd, 1977)。

在 Zr/TiO₂ - Nb/Y 图解(图 6)中,斜长角闪岩有 3 个样品(AL01-3、AL34-1、YJ17-4)落入亚碱性玄武岩区,1 个样品(YJ19-5)落入碱性玄武岩区,另 1 个样品(YJ01-3)落入安山岩/玄武岩区(图 6)。含角闪石的斜长片麻岩基本都落入安山岩或安山岩/玄武岩区。根据野外实际观察到的斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩都呈层状或透镜状产于片麻岩围岩中,推测斜长角闪岩的原岩应为玄武质火山岩,而含角闪石斜长片麻岩的原岩为安山质或安山质/玄武质火山岩。通常认为安山岩是板块聚敛边缘构造环境形成的岩浆岩,分布在活动大陆边缘、造山带及现代岛弧地区。玄武岩亦可发育于岛弧和活动大陆边缘,随着向大陆方向靠近,碱含量逐渐增高,形成于岛弧和造山活动最后阶段或者稳定以后。在 Ti/-100-Zr3Y 构造成因判别图解(图 7)中,AL01-3、

表1 青藏高原东南缘“三江”地区斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩的地球化学成分
 Table 1 Chemical compositions of amphibolite and amphibole-bearing plagioclase gneiss from Sanjiang region, southeast Tibetan plateau

岩性 样品号	斜长角闪岩					含角闪石斜长片麻岩						
	AL01-3	YJ17-4	YJ19-5	AL34-1	YJ01-3	AL26-2	AL28-2	AL30-1	AL31-1	AL32-1	AL33-1	AL43-1
SiO ₂	54.45	48.72	46.52	48.94	51.39	68.54	62.95	62.43	57.53	63.20	62.75	68.08
TiO ₂	0.85	1.35	3.94	0.76	0.90	0.33	0.47	0.48	0.71	0.58	0.94	0.45
Al ₂ O ₃	17.10	14.88	14.52	15.52	15.81	15.01	15.56	17.33	17.47	16.28	14.46	14.69
Fe ₂ O ₃	3.06	5.37	2.29	3.59	3.51	0.59	2.22	2.31	2.48	2.36	2.43	1.00
FeO	5.08	5.37	12.02	6.68	6.20	1.17	3.05	2.82	3.56	3.00	3.79	2.23
MnO	0.16	0.16	0.24	0.2	0.30	0.06	0.11	0.09	0.11	0.10	0.10	0.07
MgO	4.52	5.63	5.72	7.76	5.66	0.64	2.37	1.89	2.41	2.22	2.33	1.48
CaO	8.05	14.28	8.25	9.96	9.07	2.72	4.79	4.96	5.28	4.94	4.44	3.44
Na ₂ O	3.73	2.99	0.8	2.64	3.96	2.93	3.00	4.13	3.93	3.66	2.96	3.05
K ₂ O	1.38	0.32	2.42	1.28	1.56	6.57	4.28	2.28	2.43	2.90	4.24	4.16
P ₂ O ₅	0.18	0.08	0.71	0.08	0.18	0.11	0.12	0.17	0.20	0.15	0.26	0.11
H ₂ O ⁺	0.94	0.40	1.52	1.56	0.92	0.58	1.16	0.44	2.02	0.82	0.50	0.66
CO ₂	0.26	0.05	0.38	0.35	0.13	0.17	0.17	0.09	1.74	0.17	0.69	0.09
F		0.03	0.16		0.15							
S	0.02	0.01	0.05	0.09	0.03	<0.005	0.02	0.03	0.09	0.04	0.02	0.02
烧失量	0.98	0.06	0.54	1.20	0.76	0.69	1.21	0.63	3.12	0.86	0.85	0.49
Total	100.76	99.69	100.08	100.61	100.53	100.11	101.48	100.08	103.08	101.28	100.76	100.02
La	9.34	7.16	34.7	12.4	11.1	49.2	41.7	14.8	24.5	25	32.7	29.5
Ce	20.7	17.1	81	31.2	27.6	90.4	82.2	30.9	50.1	50.7	69.2	56.5
Pr	2.7	2.54	10.8	4.07	4.04	10.2	9.04	3.88	5.99	5.77	8.15	5.92
Nd	11.9	12.5	47	17.1	18.3	35.6	32.9	15.8	23.7	21.6	32	20.8
Sm	2.91	3.61	10.9	3.96	5.73	6.36	6.22	3.43	4.91	4.17	6.36	3.93
Eu	1.01	1.41	2.87	0.96	1.42	1.02	0.83	0.73	1.18	0.95	1.1	0.8
Gd	3.33	4.39	9.68	4.1	7.11	5.46	5.75	3.54	4.74	4.09	6.04	3.77
Tb	0.54	0.76	1.56	0.64	1.39	0.89	0.95	0.55	0.69	0.63	0.87	0.68
Dy	3.25	4.33	8.12	4.14	9.11	5.05	5.84	3.31	4.22	3.67	5.22	4.24
Ho	0.7	0.9	1.63	0.87	2.11	1.03	1.17	0.68	0.88	0.78	1.07	0.94
Er	2	2.43	4.16	2.57	5.94	3.09	3.5	1.98	2.52	2.25	3.13	2.82
Tm	0.29	0.32	0.53	0.39	0.89	0.47	0.53	0.28	0.37	0.35	0.42	0.45
Yb	1.97	1.91	3.09	2.44	5.68	3.11	3.48	2.03	2.5	2.28	2.86	2.87
Lu	0.29	0.28	0.45	0.4	0.86	0.49	0.53	0.31	0.4	0.34	0.43	0.43
∑LREE	48.56	44.32	187.27	69.69	68.19	192.78	172.89	69.54	110.38	108.19	149.51	117.45
∑HREE	12.37	15.32	29.22	15.55	33.09	19.59	21.75	12.68	16.32	14.39	20.04	16.2
∑REE	60.93	59.64	216.49	85.24	101.28	212.37	194.64	82.22	126.7	122.58	169.55	133.65
Eu/Eu*	0.99	1.08	0.84	0.72	0.68	0.52	0.42	0.63	0.74	0.69	0.53	0.63
(La/Yb) _N	3.40	2.69	8.06	3.65	1.40	11.35	8.60	5.23	7.03	7.87	8.20	7.37
Nb	2.79	6.62	33.3	5.67	10.5	14.4	7.36	4.89	7.03	5.75	10.7	20.3
Rb	55.3	8.4	214	75.9	46.9	222	218	50.8	73.2	107	195	330
Sr	456	359	327	419	298	201	437	357	575	386	348	268
Ba	317	37.9	241	126	82.7	414	396	260	606	491	652	478
Zr	51.1	67.7	210	37	81.4	216	115	69.8	113	86.6	184	95.3
Cr	35.3	163	69.5	80.4	216	6.46	24.6	3.31	13.6	16.8	41	22
V	218	199	310	286	197	39.7	122	99.2	127	106	155	67.1
Ni	11	124	71	63.7	89.4	1.88	6.43	2.13	6.88	6.63	13.2	7.84
Y	19.1	24.1	43.3	24.2	59.8	28.7	34.5	20	24.5	22	30.4	25.6
Co	27.3	53.1	51.2	45	31.4	3.84	14	12.6	16.7	14.8	16.3	8.51
Th	2.38	0.77	3.36	5.33	3.01	37.8	16.6	11.9	21.4	14.3	16.1	30.5
Sc	33.7	43.5	32	40.3	38.9	8.4	20.3	11.4	17.1	14.9	18	9.7
Hf	1.85	1.96	5.37	1.73	2.56	6.57	3.87	2.26	3.42	2.89	5.21	3.28
Ta	0.17	0.38	1.86	0.39	1	0.86	0.33	0.38	0.41	0.32	0.53	1.41
U	0.63	0.21	1.91	2.09	2.93	3.99	2.47	2.19	6.94	2.3	3.18	11.4
Ba/Ba*	2.48	1.04	0.96	0.48	0.55	0.25	0.49	0.50	0.65	0.76	0.85	0.33

主量元素单位为 $w_B/\%$ 稀土和微量元素单位为 $w_B/10^{-6}$ 。

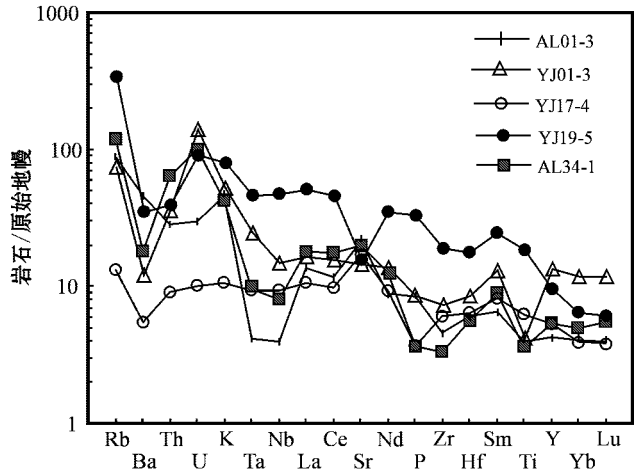
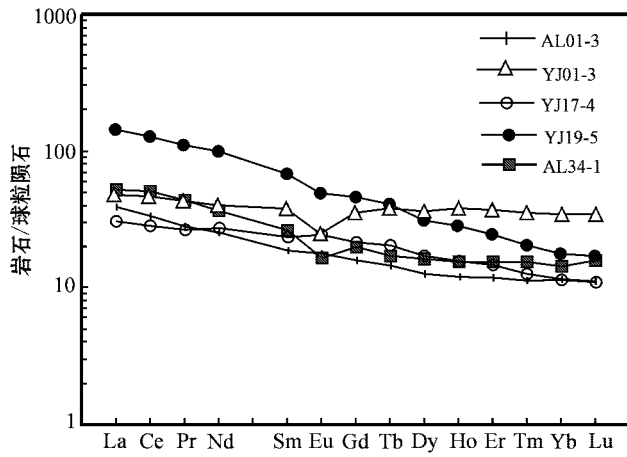


图 4 斜长角闪岩稀土配分模式图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace earth element spidergram of amphibolites from Sanjiang region (data of chondrite and primitive mantle after Sun and McDonough, 1989)

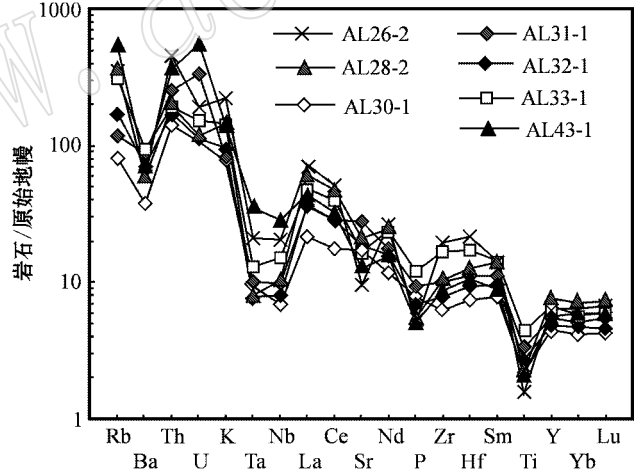
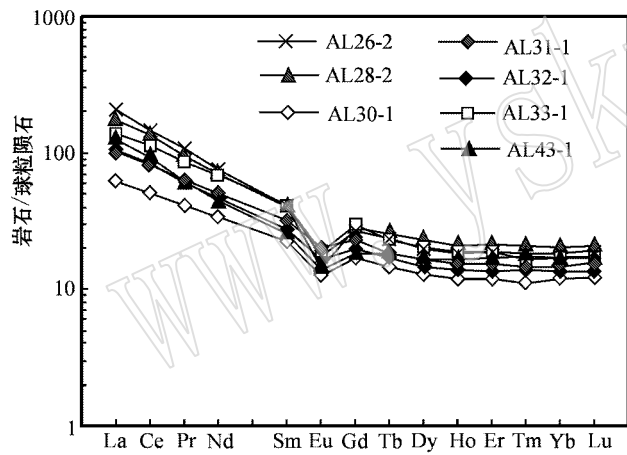


图 5 含角闪石斜长片麻岩稀土配分模式图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace earth element spidergram of amphibole-bearing plagioclase gneiss from Sanjiang region (data of chondrite and primitive mantle after Sun and McDonough, 1989)

AL34-1 和 YJ17-4 明显具有岛弧钙碱性玄武岩的特点,属于与俯冲作用有关的玄武岩。3 个样品中 Zr 含量均比 YJ19-5 中 Zr 含量低,而 Zr/Y 比值较低,这与岛弧玄武岩的特点相符合[岛弧玄武岩总体上是以具有较低的 Zr 含量($< 130 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(< 4)为特征,相反,大陆玄武岩,不管是否遭受地壳或岩石圈混染,都具有较高的 Zr 含量($> 70 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(> 3)(夏林圻等, 2007)]。而含角闪石斜长片麻岩原岩大部分属于板内玄武岩。孙书勤等(2007)根据微量元素含量对大陆板内玄武岩

的构造环境的判别[即 $Th/Nb > 0.11$, $Nb/Zr > 0.04$ 为大陆板内玄武岩,而 $Th/Nb > 0.11 \sim 0.27$ 为大陆裂谷区玄武岩, $Th/Nb > 0.27$ (一般 $0.27 \sim 0.67$) 为大陆拉张带玄武岩, $Th/Nb > 0.67$ 为陆-陆碰撞带玄武岩]。本区含角闪石斜长片麻岩 $Nb/Zr = 0.06 \sim 0.21$, $Th/Nb = 1.50 \sim 3.04$, 属陆-陆碰撞带玄武岩。对斜长角闪岩进一步进行 La/Nb-La 构造环境图解投图,发现除由石榴辉石岩退变而成的斜长角闪岩落入洋岛玄武岩区外,其他大部分岩石均具有高 La 低 Nb 的特点,均落入岛弧玄武岩区(图 8)。

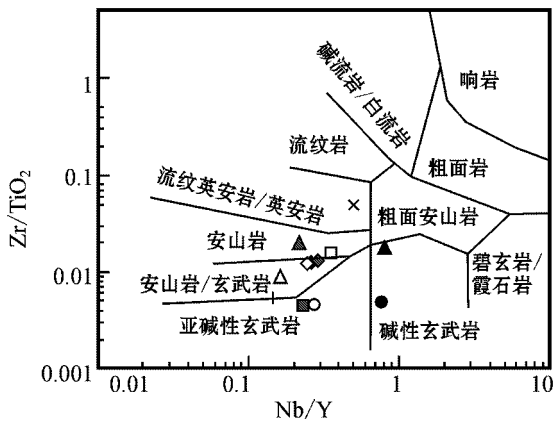


图 6 斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩的 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解 据 Winchester 和 Floyd, 1977; 图例同图 4 和 5)
Fig. 6 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ diagram of amphibolite and amphibole-bearing plagioclase gneiss from Sanjiang region (after Winchester and Floyd, 1977; legends as for Fig. 4 and 5)

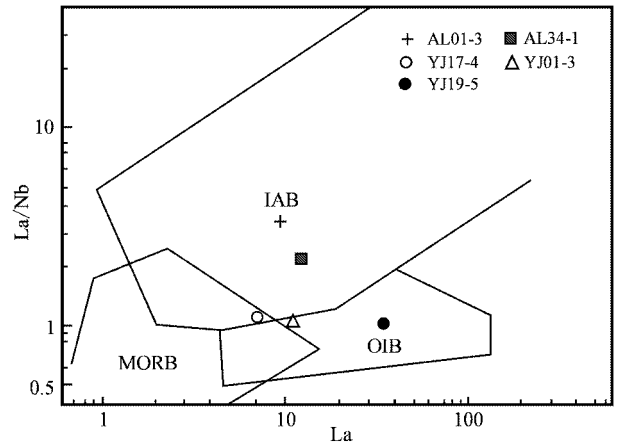


图 8 斜长角闪岩 $La/Nb - La$ 图解(据李曙光, 1993)
Fig. 8 $La/Nb - La$ diagram of amphibolites from Sanjiang region (after Li Shuguang, 1993)
MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; IAB—岛弧玄武岩
MORB—mid-ocean ridge basalt; OIB—oceanic island basalt; IAB—island-arc basalt

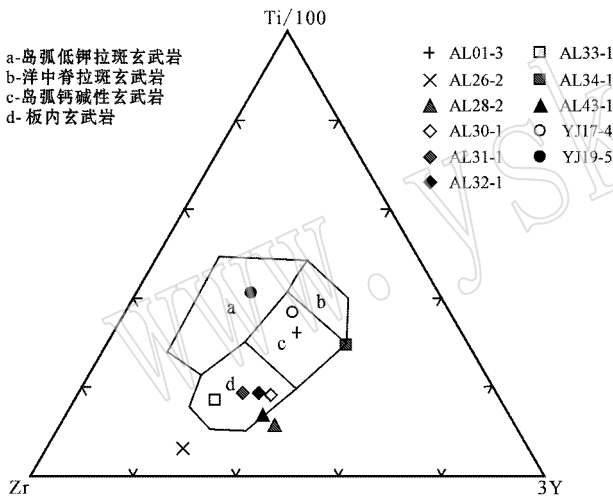


图 7 斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩 $Ti/100 - Zr - 3Y$ 图解(据 Meschede, 1986)
Fig. 7 $Ti/100 - Zr - 3Y$ diagram of amphibolites and amphibole-bearing plagioclase gneiss from Sanjiang region (after Meschede, 1986)

6 讨论与结论

青藏高原东南缘“三江”地区斜长角闪岩原岩为岛弧玄武岩, 总体具有高铝低钛的特点, 轻稀土元素相对富集, Eu 无异常或略具负异常; Zr 含量较低, Zr/Y 比值较小, 形成于俯冲碰撞的构造环境。含角闪石斜长片麻岩, 具有低 MgO 和 TiO_2 , 轻、重稀土元素分馏, Eu 负异常, 强烈富集大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Ba 、 Th , 而高场强元素 Ti 、 Zr 、 Hf 、 Nb 和 Ta 含量较低的特点, 主要形成于活动大陆边缘、造山带及现

代岛弧等地区。前人研究表明, 哀牢山群的斜长角闪岩的 $Sm-Nd$ 同位素年龄为 $1367.1 \pm 46.1 Ma$, 并且具有 $\epsilon Nd(t) = 8$ 的强亏损地幔源区, 判断其代表斜长角闪岩的成岩年龄, 斜长角闪岩的模式年龄集中于两个范围: $1300 \sim 1200 Ma$ 和 $1100 \sim 1600 Ma$; 中酸性片麻岩具有同样的模式年龄(翟明国等, 1990)。高黎贡群的斜长角闪岩具有 $900 \sim 1100 Ma$ 的模式年龄值(朱炳泉等, 2001)。推断“三江”地区含角闪石变质岩类, 形成于元古宙大洋岩石圈向大陆岩石圈俯冲碰撞的环境中, 并与围岩共同经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用。本文通过对青藏高原东南缘“三江”地区含角闪石变质岩类详细的岩相学和全岩化学成分的分析, 得到以下 4 点结论:

(1) 青藏高原东南缘“三江”地区含角闪石变质岩类可分为斜长角闪岩和含角闪石斜长片麻岩两种类型。斜长角闪岩根据其原岩可划分为: 由石榴辉石岩退变而成的和基性原岩经角闪岩相-麻粒岩相变质作用形成的。含角闪石斜长片麻岩可根据特征变质矿物进一步划分为: 角闪斜长片麻岩和黑云角闪斜长片麻岩。

(2) 青藏高原东南缘“三江”地区含角闪石变质岩呈层状或透镜体状出露于元古界变质岩体(哀牢山岩群的片岩、混合岩和大理岩以及高黎贡山岩群的片岩和变粒岩等)中, 含角闪石变质岩类与其围岩一样均经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用。

(3) 斜长角闪岩 SiO_2 平均含量 50.0% , 具有高铝低钛的特点, 轻稀土元素相对富集, Eu 无异常或

略具负异常, Zr 含量较低, Zr/Y 比值较小。通过主元素、稀土、微量元素成因研究, 确定斜长角闪岩的原岩具有岛弧玄武岩的特点, 反映其原岩形成于俯冲碰撞的构造环境。

(4) 含角闪石斜长片麻岩 SiO_2 平均含量 63.64%, MgO 和 TiO_2 含量低, 轻、重稀土元素分馏, 具有 Eu 负异常, 大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Ba 、 Th 强烈富集, 而高场强元素 Ti 、 Zr 、 Hf 、 Nb 和 Ta 含量较低, 其原岩具有安山质岩石或安山质岩石/玄武质岩石的特点, 属陆-陆碰撞带玄武岩, 是板块聚敛边缘的典型岩石, 主要分布在活动大陆边缘、造山带及现代岛弧等地区。

致谢 本文全岩分析由国家地质实验测试中心韩慧明老师等完成, 扫描电镜和能谱实验在国土资源部大陆动力学重点实验室完成, 陈方远老师在实验中给予指导, 在此一并致谢。

适逢沈其韩院士九十华诞暨从事地质事业和科研教育工作七十周年, 谨以此文敬贺, 衷心祝愿先生健康长寿。

References

- Akciz S, Burchfiel B C and Crowley J L. 2008. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China [J]. *Geosphere*, 4(1): 292~314.
- Floyd P A and Winchester J A. 1975. Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 27: 211~218.
- Ji Jianqing, Zhong Dalai and Chen Changyong. 2000. Geochemistry and genesis of Nabang metamorphic basalt, southwest Yunnan, China: implications for the subducted slab break-off [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 433~442 (in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Qin Jiangfeng, Li Xuejun, et al. 2010. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic features of Ganlongtang-Nongba ophiolite from the Changning-Menglian suture zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3195~3205 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1993. Ba-Th-Nb-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146~157 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Song Zhijie, Cao Shuyun, et al. 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 775~786 (in Chinese with English abstract).
- Meschede. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chemical Geology*, 5(3-4): 207~218.
- Sha Shaoli and Liu Yuchun. 2001. A preliminary study on the orthogneiss of Diancang Mountain, Dal [J]. *Yunnan Geology*, 20(3):

260~269 (in Chinese with English abstract).

- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shuqin, Zhang Chengjiang and Zhao Songjiang. 2007. Identification of the tectonic settings for continental intraplate by trace elements [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 104~109 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical methods [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77~89 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Cong Bolin, Qiao Guangsheng, et al. 1990. Sm-Nd and Rb-Sr geochronology of metamorphic rocks from SW Yunnan orogenic zones, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai, et al. 1998. Paleotethysides in Western Yunnan and Sichuan, China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Qiu Huaning, et al. 2001. Geochronological study on formation and metamorphism of Precambrian basement and their mineralization in Yunnan, China [J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(2): 75~82 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李建清, 钟大赉, 陈昌勇. 2000. 滇西南那邦变质基性岩地球化学与俯冲板片裂离 [J]. *岩石学报*, 16(3): 433~442.
- 赖绍聪, 秦江峰, 李学军, 等. 2010. 昌宁-孟连缝合带干龙塘-弄巴蛇绿岩地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素组成研究 [J]. *岩石学报*, 26(11): 3195~3205.
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图 [J]. *岩石学报*, 9(2): 146~157.
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程-以藏东三江地区构造演化为例 [J]. *岩石学报*, 22(4): 775~786.
- 沙绍礼, 刘宇淳. 2001. 大理点苍山正片麻岩初步研究 [J]. *云南地质*, 20(3): 260~269.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 孙书勤, 张成江, 赵松江. 2007. 大陆板内构造环境的微量元素判别 [J]. *大地构造与成矿学*, 31(1): 104~109.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77~89.
- 翟明国, 从柏林, 乔广生, 等. 1990. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年代学 [J]. *岩石学报*, 4: 1~11.
- 钟大赉, 等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京: 科学出版社.
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等. 2001. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究 [J]. *前寒武纪研究进展*, 24(2): 75~82.