

谭洪旗,刘玉平.滇东南猛洞岩群斜长角闪岩成因及其构造意义.吉林大学学报(地球科学版),2017,47(6):1763-1783. doi: 10.13278/j.cnki.jjucsc.201706114.
Tan Hongqi,Liu Yuping. Genesis of Amphibolite in Mengdong Group-Complex in Southeastern Yunnan and Its Tectonic Significance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47 (6): 1763 - 1783. doi: 10.13278/j.cnki.jjucsc.201706114.

滇东南猛洞岩群斜长角闪岩成因及其构造意义

谭洪旗^{1,2},刘玉平³

1.中国地质科学院矿产综合利用研究所,成都 610041

2.成都理工大学地球科学学院,成都 610059

3.中国科学院地球化学研究所/矿床地球化学国家重点实验室,贵阳 550002

摘要:滇东南老君山地区发育猛洞岩群前寒武系斜长角闪岩,呈港湾状分布在片岩、片麻岩中,并为后期变质-变形作用叠加改造。斜长角闪岩 SiO_2 质量分数为 47.0%~50.4%,西蒙尼图解、DF 及 A-K 图解均显示其原岩为正变质岩,因此推测为一套变质基性岩。斜长角闪岩地球化学特征显示,稀土总量 $w(\Sigma\text{REE})=(214\sim 267)\times 10^{-6}$,高于洋岛玄武岩,其配分模式与洋岛玄武岩相似,为轻稀土富集的右倾曲线;蛛网图显示 Ba、Zr、Hf、Y 元素亏损,富集 Rb、Th、Ta、Nb、Ce、Sm 元素,与板内碱性玄武岩特征类似;Zr/TiO₂-Nb/Y、TiO₂-10MnO-10P₂O₅、La/10-Nb/8-Y/15、Th/Zr-Nb/Zr、Th/Hf-Ta/Hf 等判别图解显示,原岩为一套亚碱性-碱性玄武岩岩浆系列,其形成可能与大陆裂谷环境有关。角闪石及斜长石内部指示的(亚)显微结构较为发育,主要有自由位错、位错列,偶见位错环或位错偶极,与角闪石-斜长石矿物对获得的平均温度和压力(646 °C、0.88 GPa)一致,最高变质程度达低角闪岩相;同时,前人获得锆石 U-Pb 年代学及南温河片麻岩状花岗岩变质增生锆石均为 230 Ma 左右,代表印支期构造-热事件,此时老君山变质核杂岩雏形开始形成。

关键词:斜长角闪岩;地球化学;构造意义;滇东南;猛洞岩群

doi:10.13278/j.cnki.jjucsc.201706114

中图分类号:P588.3

文献标志码:A

Genesis of Amphibolite in Mengdong Group-Complex in Southeastern Yunnan and Its Tectonic Significance

Tan Hongqi^{1,2}, Liu Yuping³

1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, China

2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Institute of Geochemistry/State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

收稿日期:2017-03-06

作者简介:谭洪旗(1984—),男,工程师,主要从事区域地质调查方面的研究,E-mail:hongqitan@163.com

通信作者:刘玉平(1971—),男,研究员,博士,主要从事矿床学、同位素年代学方面的研究,E-mail:liuyuping@vip.gyig.ac.cn

基金项目:国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(G2007CB111408);国家自然科学基金项目(41603034,40972129)

Supported by National Key Basic Research Program of China (G2007CB111408) and National Natural Science Foundation of China(41603034,40972129)

Abstract: Existing in schist and gneiss in Mengdong Group-Complex, the amphibolite belongs to Precambrian Formation in Laojunshan area of southeastern Yunnan, on which metamorphism and deformation superposed. The content of SiO_2 ranges from 47.0% to 50.4%. In the discrimination diagrams of Simonen, DF and $A-K$, it falls in the series of orthometamorphite derived from meta-basite rock. Its geochemical characters show that the total REE contents of amphibolite ($w(\Sigma\text{REE}) = (214 - 267) \times 10^{-6}$) exceed those of oceanic island basalt, while its distribution pattern is similar to that of oceanic island basalt in steep right-dipping with light REE enrichment. The spider diagram shows that it is enriched in Rb, Th, Ta, Nb, Ce and Sm, while depleted of Ba, Zr, Hf and Y, similar to the characteristics of the alkaline basalts within plate. The discrimination diagrams of $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$, $\text{TiO}_2 - 10\text{MnO} - 10\text{P}_2\text{O}_5$, $\text{La}/10 - \text{Nb}/8 - \text{Y}/15$, $\text{Th}/\text{Zr} - \text{Nb}/\text{Zr}$, and $\text{Th}/\text{Hf} - \text{Ta}/\text{Hf}$ suggest that their protolith should be of alkaline basalt magma series in a continental rift environment. The microstructures of amphibole and plagioclase indicate that the microstructure is relatively free, with free dislocations and dislocation columns, occasionally dislocation rings or dislocation dipoles, which is in accordance with the average pressure and temperature of hornblende-plagioclase minerals of 0.88 GPa and 646 °C respectively, confirming that the highest metamorphic grade is of low amphibolite facies. According to the U - Pb dating of sphenes in plagiogneiss and metamorphic overgrowth zircon in Nanwenhe gneissic granite (230 Ma), the deformation conditions were related to the Indosinian tectono-thermal events, and during this period, the embryo of Laojunshan complex began to form.

Key words: amphibolite; geochemical; tectonic significances; southeastern Yunnan; Mengdong Group-Complex

0 引言

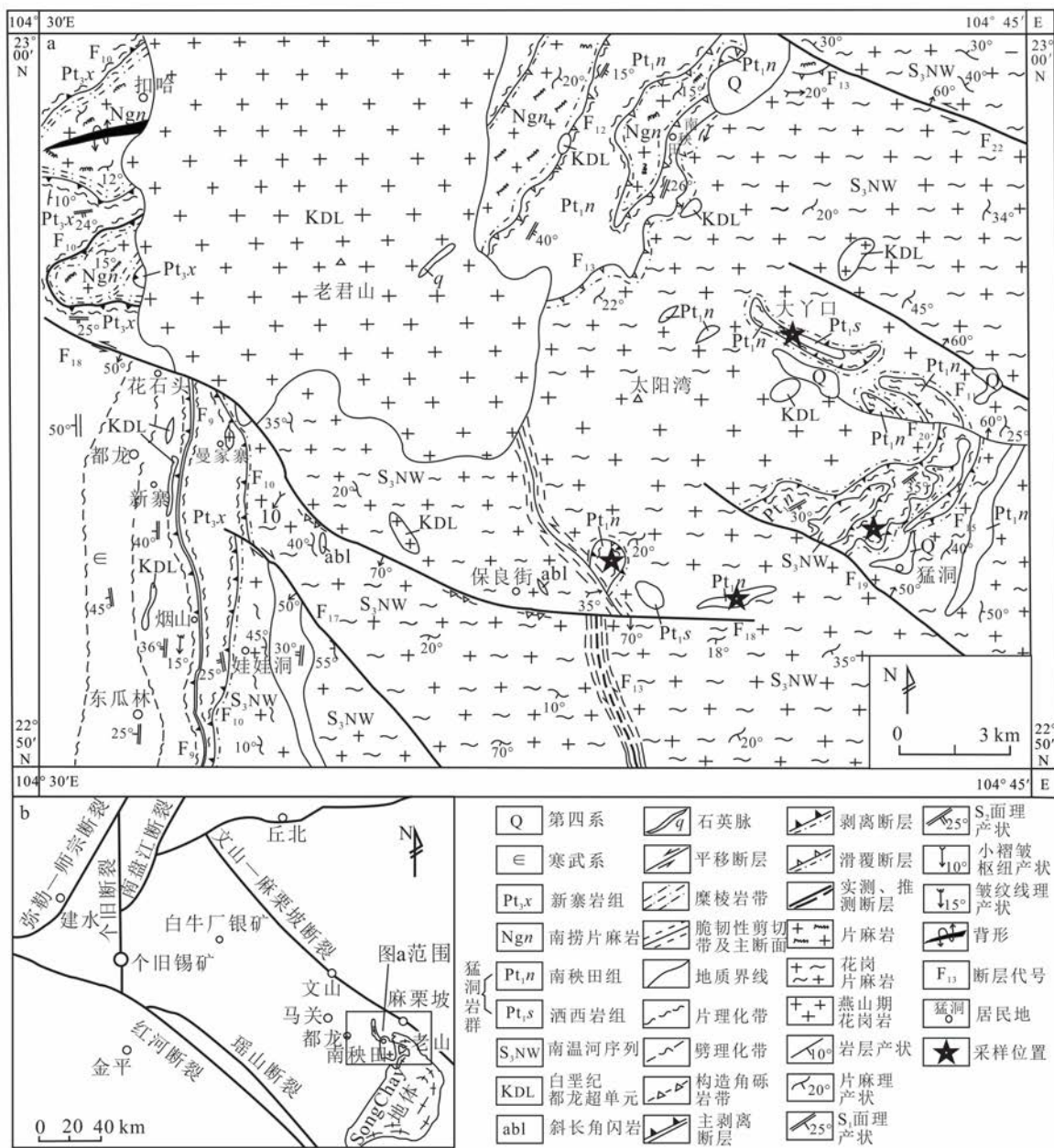
斜长角闪岩是中-下地壳岩石最重要的组成部分之一,对环境(如温度、压力)变化较敏感,能够全面记录原岩形成环境及变质-变形条件。因此,斜长角闪岩可用来追踪原岩形成环境、反演变质-变形的演化机制^[1-6]。斜长角闪岩经历的变质-变形作用,事实上转化为对角闪石、斜长石等矿物组构和温压条件的限定^[4-6]。同时,角闪石变形行为的研究,是了解中部地壳岩石力学与流变学表现的重要依据^[5-6],其变形受温度、压力、应力和流体等多种因素综合影响,可以记录地壳浅部和深部等不同构造层次的动力学过程^[6],当温度超过 450~500 °C 发生晶质塑性变形^[7]。长石的变形现象和主导的变形机制较为复杂,受温压环境控制,与变质条件密切相关,主要的变形机制有位错滑移、动态重结晶及扩散蠕变作用^[8-9]。

滇东南地区位于华南褶皱系西端与扬子地块、印支地块的接合部位,是研究华南大陆形成与演化及太平洋-特提斯构造转换域时空发展的关键地区。滇东南南温河地区位于云南省文山州马关县-麻栗坡县,以盛产钨、锡著称^[10-13],其与越南北部的 Song

Chay 地区具有基本一致的地质特征,黄汲清(1946)称之为越北古陆。越北古陆是以斋江(Song Chay)隆起为核心的变质核杂岩,国内称为老君山变质核杂岩^[14-16]、南温河变质核杂岩^[17]、老君山—Song Chay 变质核杂岩^[18]、都龙—Song Chay 变质穹隆体^[19-20],本文采用老君山变质核杂岩这一名称。老君山变质核杂岩核部猛洞岩群发现一套呈零星分布的斜长角闪岩,呈港湾状分布在片岩、片麻岩中,并遭受后期变质-变形作用叠加改造。该套斜长角闪岩为 20 世纪 90 年代末开展 1:5 万区调新识别出的变质岩类型^[21],研究程度较低。本文拟通过斜长角闪岩主量、微量和稀土元素地球化学研究,恢复其原岩类型,探讨形成的构造环境;同时借助显微、亚显微构造分析,结合角闪石和长石成分分析和配套的温压测算,阐述滇东南老君山变质核杂岩经历变质-变形环境及构造演化过程,为揭示华南西端的构造格局和演化历史提供新思路。

1 区域地质背景

老君山变质核杂岩位于文山—麻栗坡断裂、红河断裂带分支瑶山断裂、南盘江断裂及个旧断裂所围限区域的东南角,越北古陆的核心部位(图 1);总



据文献[21-22]修改。

图 1 滇东南老君山地区区域地质略图及采样位置

Fig.1 Sketch geological map and the sample location of the Laojunshan area, southeastern Yunnan

体上呈不规则穹窿状产出,长轴为北北西向,向南延入越南境内,国内出露面积约 1 000 km²。老君山变质核杂岩主要由变质内核和盖层两部分组成,二者间为剥离滑脱断层接触关系^[17]。其中,盖层为寒武系、泥盆系及石炭系,其地层依次环绕内核向外倾斜。变质内核的构成较为复杂,主要由南温河花岗岩片麻岩、南捞片麻岩、猛洞岩群和燕山期老君山酸性侵入岩组成(图 1a)。

变质内核的地质信息较为丰富,研究区经历加里东期和晚白垩世岩浆活动。其中,都龙、曼家寨、新寨、南温河片麻状花岗岩与南捞片麻岩原岩形成时代确定为 408~440 Ma^[23-29],与处于越北地区 Song Chay 穹窿的花岗质片麻岩原岩年龄基本一致^[30-31],反映越北陆块加里东期发生大面积的岩浆活动;而老君山地区与周边薄竹山、个旧花岗岩体成岩年龄均为 80~90 Ma^[32-36],从而在一定程度上暗

示滇东南地区晚白垩世发生大规模岩浆活动。

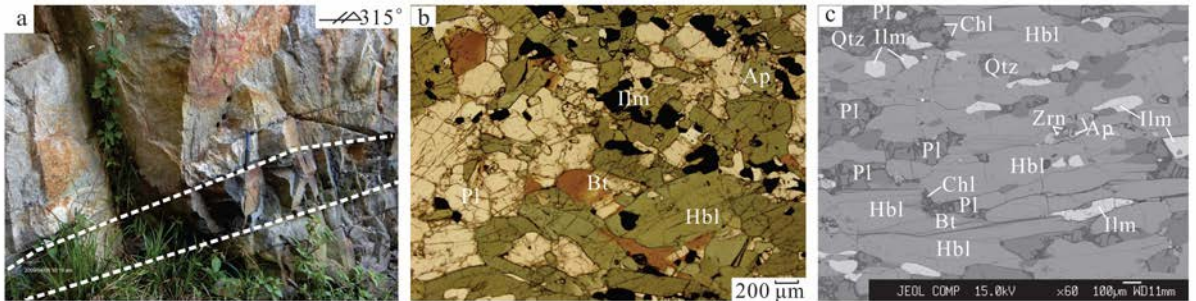
猛洞岩群在国内主要划分为南秧田组和洒西岩组。南秧田组(Pt_1n)主要出露在保良街以东、猛洞以北、南秧田、大丫口等地,面积约 8 km^2 ,岩石组合以二云片岩、二云石英片岩、石英片岩为主,夹少量斜长角闪岩、斜长片麻岩及斜长变粒岩等;洒西岩组(Pt_1s)出露在猛洞乡洒西村北西一带,出露面积约 1 km^2 ,岩石组合以黑云变粒岩、条带状变粒岩与石英岩为主,次为浅粒岩、斜长角闪岩以及少量钙硅酸盐岩。研究表明:猛洞岩群变质碎屑岩原岩为一套泥质岩-砂岩(杂砂岩),其经历过强风化作用,沉积于大陆岛弧环境^[37];且该套地层经历过多期次变质-变形作用,其老君山—Song Chay 穹隆南北向推覆挤压隆升和发生垮塌后的伸展剪切时限分别限定为 236 和 170 Ma,认为包括猛洞岩群在内的前印支期地层可能为一套从越南北部推覆而至的外来岩体^[38]。猛洞岩群石英角闪斜长片麻岩(原岩为碱性—亚碱性玄武安山质岩石)中获得 SHRIMP U—Pb 锆石年龄为 (761 ± 12) 和 $(829 \pm 10) \text{ Ma}$ ^[39],其中 $(761 \pm 12) \text{ Ma}$ 反映为原岩岩浆锆石的结晶年龄,而 $(829 \pm 10) \text{ Ma}$ 反映为岩浆源区的地壳组分中可能存在较早的一期岩浆活动,结合正片麻岩锆石 U—Pb 年龄为 799 Ma ^[19-20],确定该岩群为一套新元古代(变质)沉积-岩浆杂岩。同时,邻区哀牢山群和瑶山群相继发现新元古代基性岩浆岩^[40-41],从而认为新元古代华南西端与 Rodinia 超级大陆聚合和裂解具有密切关系。

2 样品采集和分析方法

本次样品采集于大丫口、保良街、猛洞等地区,

采集位置见图 1a。猛洞岩群斜长角闪岩呈宽窄不一的似层状、透镜体夹于云母石英片岩、变粒岩、石英岩、黑云二长片麻岩、大理岩、糜棱片麻岩中(图 1a、图 2a)。猛洞岩群原生沉积构造已完全被后生面理所置换,岩石中“顺层”剪切滑动特征明显,常见云母鱼、顺层剪切褶皱等组构;顺层韧性剪切作用强烈,固态流变构造发育,沿不同岩性界面常发育顺层韧性剪切带,剪切带内发育不同尺度的顺层掩卧褶皱、鞘褶皱、片内无根褶皱、S—C 组构、布丁构造及石香肠构造等。猛洞岩群内各种变形组构表现出强烈的一致性,尤其斜长角闪岩与区内片岩和片麻岩呈不规则状紧密接触关系。斜长角闪岩呈灰黑色透镜状产出,中—细粒结构,片麻状构造,矿物定向排列明显;显微镜下呈中粗粒柱状变晶结构,片柱状构造,主要矿物为角闪石(约 55%)和斜长石(35%),次要矿物为黑云母(2%~3%)和石英(2%),金属矿物为磁铁矿、钛铁矿等(2%),副矿物为磷灰石、锆石等(图 2b、c)。斜长石蠕虫纹发育,其与角闪石接触界线明显。镜下观察表明,斜长角闪岩具有两期矿物组合,其中:第一期矿物组合为角闪石+斜长石+黑云母+石英+钛铁矿等,代表进变质作用(M1)或峰期变质作用矿物组合(图 2b、c);第二期矿物组合为黑云母+绿泥石+斜长石+金属矿物(图 2c),可能代表退变质作用(M2)。上述野外和室内观察显示斜长角闪岩原岩可能为火成岩。

主量元素分析在广州澳实矿物实验室完成,将碎至 200 目的样品煅烧后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7-\text{LiBO}_2$ 助熔物,充分混和后,放置在自动熔炼仪中,使之在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 左右熔融;熔融物倒出后形成扁平玻璃片,再用 X 荧光光谱仪分析(Philips Pw2404)。微量元



a.斜长角闪岩侵入长英质片麻岩中;b.显微镜下图像;c.BSE 图像。Ilm.钛铁矿;Hbl.角闪石;Bt.黑云母;PL.斜长石;Qtz.石英;Ap.磷灰石;Zrn.锆石;Chl.绿泥石。

图 2 猛洞岩群斜长角闪岩野外照片及矿物组成

Fig.2 Field photographs and mineral composition of amphibolite of the Mengdong Group-Complex

素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,所用仪器为 ELAN DRC-e 型等离子质谱仪,分析精度优于 5%,分析方法参见文献[42]。本文主微量数据投图采用 Geokit 软件^[43]。

电子探针在国土资源部成矿作用及其动力学开放实验室完成,采用仪器为日本电子 JXA-8100 型电子探针(EPMA)。测试条件为加速电压 15 kV,束流 1.0×10^{-8} A,硅酸盐矿物电子探针定量分析方法采用文献[44],使用 ZAF 氧化物修正计算,其定量分析误差 $< \pm 2\%$ 。Mg、Al、Si、Ca、K、Na、Ti、Mn、P、Fe 和 Cr 的质量分数采用贵橄榄石、刚玉、硅灰石、钾长石、钠长石、锰钛矿、磷灰石、赤铁矿、铬铁矿等矿物标定。

透射电子显微镜分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,仪器为 JEM-2000FX II 型高分辨透射电子显微镜,并配备有 EM-ASID20 型扫描成像系统以及牛津 Oxford Link ISIS 能谱仪。加速电压 180 kV。

3 分析结果

3.1 地球化学特征及原岩恢复

本文在野外地质和室内岩相学观察的基础上,结合岩石地球化学特征对斜长角闪岩进行原岩恢复。由于该类岩石遭受变质-变形和一定蚀变作用,K、Na 等活泼元素可能会有一定程度的带出带人,因此利用不活泼元素含量或比值进行原岩恢复较为可靠。一般来说,不活动元素包括高场强元素(HFSE)、重稀土元素(HREE)以及过渡族元素(Cr、V、Ti)等。

斜长角闪岩化学成分分析结果见表 1。从表 1 中可以看出, $w(\text{SiO}_2)$ 为 47.0%~50.4%,符合原岩为基性岩 45%~52% 的范围; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 11.5%~16.1%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 2.76%~3.65%, $w(\text{MgO})$ 为 4.41%~5.46%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 13.8%~15.7%, $w(\text{CaO})$ 为 8.63%~8.97%; $\text{Mg}^\#$ 为 37~44,低于原生岩浆^[45],反映岩浆可能经历了一定程度的分异作用或同化混染了部分地壳物质。

目前,判断正副变质岩最为常用且较为有效的方法有 DF 判别式^[46]、A-K 图解^[47] 及西蒙尼图解^[48]。西蒙尼图解中,由于 K、Na 等活泼元素在变质作用过程中随流体活动迁移,因此易落于火山岩与钙质沉积岩附近;结合 DF 判别式及 A-K 图解

显示,本次研究样品全为正变质岩(表 2 和图 3),与野外观察基本一致。

斜长角闪岩的稀土总量 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(214 \sim 267) \times 10^{-6}$,高于洋岛玄武岩稀土总量 (198.96×10^{-6}) ;LREE/HREE 值为 4.69~7.55, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 7.58~17.20,其球粒陨石标准化配分模式明显向右陡倾(图 4a),与洋岛玄武岩的配分模式类似; δEu 为 0.84~0.93, δCe 为 0.99~1.04, Eu 具弱异常,反映原岩中斜长石等矿物可能经历分异程度不明显^[49]。

由于微量元素中大离子亲石元素地球化学活动性强,后期变质-变形过程容易丢失或加入而出现亏损或富集。而 Ta 型元素(Hf、Pt、Ta、Ti、Zr、Ba)在整个成岩-变质阶段保持稳定,F 型元素(Th、U、Zn、Cd 等)除麻粒岩相外也是一组不活动元素^[50]。蛛网图显示,Sr、Ba、Zr、Hf、Y、Yb 元素亏损,富集 Rb、Th、Ta、Nb、Ce、Sm 元素(图 4b),与板内碱性玄武岩特征相似^[52];微量元素分配模式总体与洋岛玄武岩接近,其中大丫口地区 Ti 呈明显的负异常,可能与铁钛氧化物的分离结晶有关,与薄片观察到钛铁矿矿物相吻合。高场强元素 Nb、Ta 负异常不明显;Zr、Hf 除猛洞地区外,均显示明显负异常,以保良街的 Zr、Hf 元素亏损状态明显,可能与锆石等矿物分离结晶作用有关。

3.2 角闪石和斜长石显微构造特征

3.2.1 角闪石(亚)显微构造特征

角闪石易沿解理面发生滑动而形成较强的形态优选方位(图 5a),并沿解理裂缝析出钛铁矿(图 5a),角闪石单晶或集合体内常出现退变质的黑云母,揭示了扩散蠕变机制及流体的参与^[7]。角闪石沿解理方向堆垛形成“书斜构造”排列,显示具右旋构造特征(图 5b),其解理最大错移距离约为 3 μm (图 5c)。光学显微镜和电子探针分析表明,普通角闪石边缘发育少量的绿泥石和黑云母等蚀变矿物,沿解理缝边部分布,推测矿物解理为变质流体提供了运输通道,从而角闪石边部呈现黑云母与绿泥石等蚀变矿物。

亚显微结构表明,角闪石中发育自由位错、位错列、偶见位错环或位错偶极等(图 5c-g),是晶质塑性变形的表现形式。上述证据显示,角闪石处于脆-韧性转变的过渡相,变质程度最高达低角闪岩相^[4-6,9],且在后期发生退变质作用。

表 1 猛洞岩群斜长角闪岩的化学成分

Table 1 Chemical composition of amphibolite in the Mengdong Group-Complex

样品编号	地点	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	烧失量	总和	Cr
Md906	大丫口	47.0	16.1	14.0	8.64	4.86	2.07	0.92	2.76	0.24	0.78	2.32	99.7	90.5
DL1278 *	猛洞	50.3	11.5	15.7	8.97	4.90	2.50	1.14	3.40	0.28	0.80	1.10	100.6	53.7
DL1279 *		49.7	13.3	13.8	8.73	5.46	2.62	0.56	3.47	0.28	0.70	1.17	99.8	49.4
0288-A	保良街	50.4	13.7	14.6	8.68	4.56	3.32	0.96	3.65	0.20	0.48	0.39	100.9	42.7
0288-B		49.9	14.1	14.4	8.63	4.41	3.25	1.15	3.54	0.21	0.49	0.58	100.7	41.5
288		49.6	14.0	15.0	8.74	4.43	3.98	0.98	3.51	0.26	0.45	0.43	101.4	47.1
样品编号	地点	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Cs
Md906	大丫口	46.3	40.0	21.2	155	21.1	59.7	242	60.8	256	24.3	4.34	7.06	5.88
DL1278 *	猛洞	36.2	44.5	291.0	183	27.9	51.8	375	47.6	398	45.5	1.22	60.30	24.90
DL1279 *		40.0	49.5	227.0	187	27.0	25.3	388	42.7	321	42.3	1.36	41.70	8.59
0288-A	保良街	39.7	55.4	176.0	171	26.1	33.7	372	38.9	163	39.1	1.10	3.37	17.10
0288-B		37.6	45.6	259.0	186	25.5	45.2	414	38.0	91	39.9	1.33	6.17	24.80
288		37.4	46.3	224.0	162	25.0	32.1	415	35.6	98	37.5	1.39	6.86	17.10
样品编号	地点	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
Md906	大丫口	227	35.5	76.7	9.8	42.4	10.1	2.89	9.09	1.81	10.70	2.41	6.37	0.90
DL1278 *	猛洞	472	48.1	105.0	12.4	53.5	11.7	3.09	10.70	1.58	9.31	1.71	4.58	0.55
DL1279 *		255	44.4	96.4	11.9	49.8	10.4	3.03	9.57	1.44	8.04	1.52	3.95	0.50
0288-A	保良街	352	37.7	84.4	10.8	46.1	10.1	3.00	10.20	1.38	7.93	1.48	4.13	0.58
0288-B		395	38.6	83.8	11.2	48.3	10.1	3.05	10.70	1.47	8.18	1.55	4.12	0.53
288		312	36.8	81.3	10.7	44.2	9.6	2.96	9.73	1.31	7.88	1.40	3.85	0.54
样品编号	地点	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U	ΣREE	LREE/ HREE	La _N / Yb _N	δEu	δCe
Md906	大丫口	5.71	0.81	6.09	1.86	11.30	1.39	6.51	1.81	215	4.69	7.58	0.92	0.99
DL1278 *	猛洞	3.86	0.52	13.10	2.52	7.46	0.40	6.53	1.65	267	7.13	15.20	0.84	1.04
DL1279 *		3.15	0.42	19.10	2.37	14.50	0.50	5.97	1.49	245	7.55	17.20	0.93	1.02
288-A	保良街	3.40	0.46	4.24	2.48	42.50	1.20	5.24	1.35	222	6.51	13.50	0.90	1.01
288-B		3.55	0.47	2.67	2.54	6.56	0.57	5.83	1.58	226	6.38	13.30	0.89	0.98
288		3.17	0.45	2.93	2.49	7.12	0.44	5.27	1.14	214	6.55	14.20	0.93	0.99

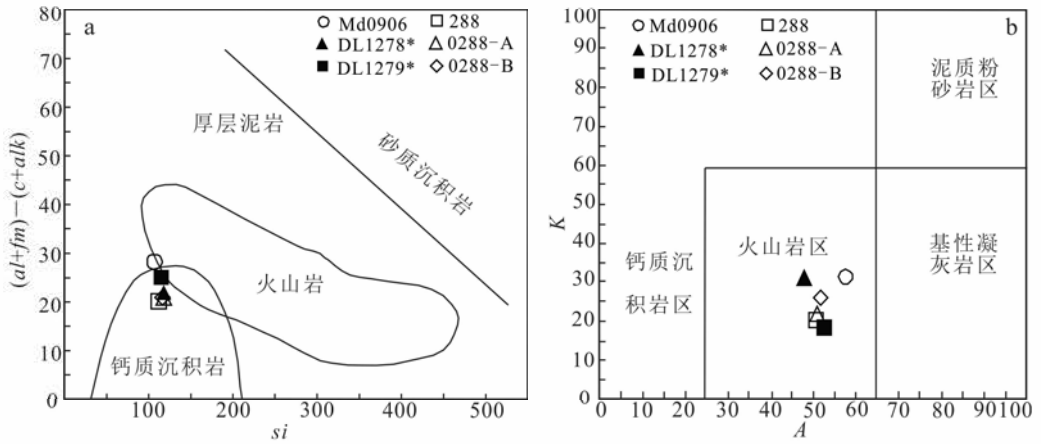
注: * 样品数据来源于文献[38],下同。主量元素质量分数单位为%;微量、稀土元素质量分数单位为 10^{-6} 。

表 2 滇东南猛洞岩群斜长角闪岩原岩恢复相关系数计算结果

Table 2 Indexes for recovering protoliths of amphibolite from Mengdong Group-Complex, southeastern Yunnan Province

样品编号	DF	al	fm	c	alk	si	al+fm-(c+alk)	A	K	原岩	
Md0906	-0.40	22	42	30	6	109		28	58	31	火成岩
288	2.05	19	41	30	10	113		20	51	20	火成岩
0288-A	0.88	19	42	30	9	118		21	51	22	火成岩
0288-B	1.16	19	41	30	9	117		21	52	26	火成岩
DL1278 *	-0.73	16	45	32	7	118		22	48	31	火成岩
DL1279 *	-0.83	18	44	31	7	117		25	53	18	火成岩

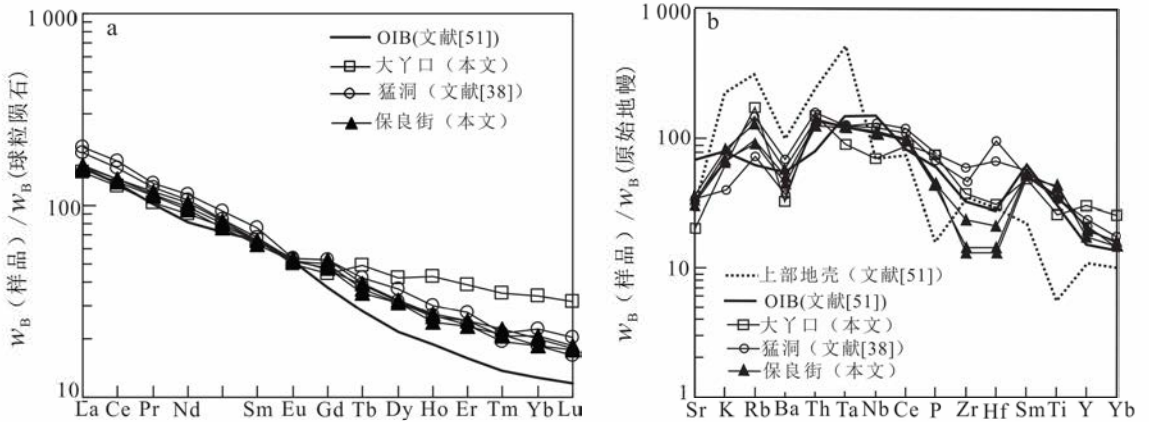
注:西蒙尼图解相关系数 si 、 al 、 fm 、 c 、 alk 及 DF 计算方法参见文献[45-47]。A-K 图解法中 $A = w(Al_2O_3)/w(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$, $K = 100w(K_2O)/w(Na_2O + K_2O)$; $DF = -0.21 w(SiO_2) - 0.32 w(Fe_2O_3) - 0.98 w(MgO) + 0.55 w(CaO) + 1.46w(Na_2O) + 0.54w(MgO) + 10.44$ 。



底图据文献[46-49]。

图 3 猛洞岩群西蒙尼图解(a)和 K-A 图解(b)

Fig.3 Simonen(a) and K-A(b) plots for metamorphic clastic sedimentary rocks of Mengdong Group-Complex



稀土元素球粒陨石和微量元素原始地幔标准值引自文献[51]。

图 4 猛洞岩群斜长角闪岩类球粒陨石标准化稀土配分图解(a)和原始地幔标准化微量元素配分图解(b)

Fig.4 Chondrite-normalized REE diagram (a) and chondrite-normalized trace element diagram (b) of amphibolite in the Mengdong Group-Complex

3.2.2 斜长石(亚)显微构造特征

斜长石的变形机制受变形环境制约,其中温度的变化是影响变形机制转变的主导因素^[5]。光学显微镜及背散射图像显示,本区斜长石大部分构成σ、δ和φ型组构的拖尾(图 5h,i),或围绕浑圆状颗粒(膨凸颗粒)聚集,颗粒内部裂纹发育(图 5i),长石颗粒内部发育亚晶粒旋转和动态重结晶^[9]。上述这些显微构造特征均表明变质程度达低角闪岩相。

3.3 矿物化学特征

本文在光学显微镜观察的基础上,借助电子探针开展不同视域原位微区的矿物化学特征研究,角闪石和长石电子探针分析数据见表 3、表 4。其中:

视域 A 选择新鲜、无蚀变角闪石和长石紧密接触部位(图 6a);视域 B 选择角闪石和长石紧密接触,但具显微变形部位(图 6b);视域 C 选择斜长石、角闪石与绿泥石等蚀变矿物紧密接触部位(图 6c)。

3.3.1 角闪石

角闪石族矿物是目前为止最为复杂的矿物固溶体,其一般化学式可写作 $A(M4)_2(M1)_2(M3)_1(M2)_2(T1)_4(T2)_4O_{22}(OH)_2$ 和晶体化学式为 $A_{0-1}B_2C_5^VI T_8^IV O_{22}(OH, F, Cl)$,式中上角注的罗马数字表示配位数,下角注的阿拉伯数字表示原子数,具体参考文献^[53-54]。其中一般化学式中 A 位置为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ , M1、M2、M3 位置为 Al^{VI} 、 Ti^{3+} 、

表 3 猛洞岩群代表性角闪石矿物化学成分
Table3 Representative chemical compositions of amphibole minerals in the Mengdong Group-Complex

样品测点	视域 1 (A)																								
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25
SiO ₂	40.1	41.1	40.1	40.1	40.9	41.2	40.1	40.3	40.4	40.5	39.6	41.2	40.5	40.9	41.0	41.1	40.4	41.0	40.7	41.6	40.9	41.7	41.2	40.8	41.2
TiO ₂	0.72	0.51	0.72	0.69	0.45	0.44	0.75	0.81	0.77	0.67	0.69	0.57	0.77	0.74	0.72	0.65	0.63	0.73	0.74	0.56	0.69	0.48	0.49	0.56	0.61
Al ₂ O ₃	13.2	13.1	13.3	13.9	13.5	14.0	13.8	13.8	13.3	13.2	13.5	12.7	13.5	13.4	13.0	13.6	14.1	13.2	13.9	13.8	13.2	13.4	14.0	13.5	12.9
FeO	17.9	17.4	17.7	17.5	17.4	17.4	17.4	17.6	17.4	17.1	17.3	17.4	17.8	17.9	17.6	17.8	18.3	17.6	17.6	17.7	17.7	17.5	17.5	17.2	18.0
MgO	6.63	6.92	6.55	6.57	6.76	6.57	6.49	6.63	6.64	6.68	6.54	7.19	6.73	6.87	7.00	7.03	6.38	6.83	6.84	6.87	6.99	6.94	6.91	6.77	7.21
MnO	0.16	0.16	0.22	0.27	0.19	0.12	0.28	0.17	0.35	0.10	0.24	0.26	0.16	0.20	0.14	0.16	0.30	0.05	0.28	0.25	0.30	0.32	0.14	0.31	0.16
CaO	11.4	11.2	11.1	11.1	11.4	11.3	11.1	11.3	11.3	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.2	11.4	11.5	11.3	11.1	11.4	11.3	11.4
Na ₂ O	1.29	1.43	1.30	1.38	1.39	1.44	1.42	1.31	1.32	1.41	1.40	1.27	1.29	1.23	1.31	1.37	1.46	1.20	1.26	1.37	1.33	1.43	1.33	1.50	1.25
K ₂ O	0.32	0.27	0.38	0.34	0.26	0.31	0.47	0.44	0.39	0.35	0.46	0.36	0.40	0.42	0.41	0.40	0.38	0.32	0.38	0.32	0.33	0.30	0.34	0.31	0.31
总量	91.8	92.0	91.3	91.8	92.2	92.8	91.8	92.4	91.8	91.3	91.1	92.4	92.5	93.0	92.6	93.5	93.3	92.1	93.1	94.0	92.8	93.1	93.3	92.2	93.0
A 位置																									
Na	0.39	0.37	0.36	0.38	0.38	0.34	0.36	0.36	0.36	0.36	0.40	0.37	0.37	0.35	0.36	0.38	0.42	0.31	0.37	0.36	0.38	0.35	0.36	0.39	0.38
K	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05	0.06	0.10	0.09	0.08	0.07	0.10	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.08	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06
M4 位置																									
Fe ²⁺	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0	0.03	0.03	0.02	0	0	0.03	0.03	0.05	0.02	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.05	0.04	0.04	0	0.07
Ca	1.96	1.91	1.92	1.89	1.93	1.90	1.90	1.93	1.93	1.92	1.96	1.94	1.95	1.92	1.94	1.91	1.94	1.91	1.93	1.92	1.92	1.87	1.91	1.93	1.93
Na	0.01	0.07	0.05	0.05	0.05	0.10	0.08	0.04	0.05	0.08	0.04	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	0.02	0.06	0.03	0.09	0.05	0.07	0
M1, 2, 3 位置																									
Al ^{VI}	0.94	0.99	0.98	1.03	1.02	1.09	1.02	0.99	0.97	0.99	0.97	0.92	0.96	0.95	0.93	0.97	1.00	0.99	0.99	1.02	0.94	1.02	1.05	1.01	0.91
Ti	0.09	0.06	0.09	0.08	0.05	0.05	0.09	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.07	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07
Mg	1.58	1.64	1.57	1.57	1.60	1.54	1.55	1.57	1.58	1.60	1.57	1.70	1.59	1.62	1.65	1.64	1.50	1.62	1.61	1.60	1.65	1.62	1.61	1.60	1.70
Mn	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.05	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.02
Fe ²⁺	2.37	2.28	2.34	2.28	2.30	2.29	2.30	2.32	2.31	2.29	2.34	2.28	2.33	2.31	2.31	2.29	2.38	2.30	2.27	2.29	2.29	2.26	2.26	2.28	2.30
T 位置																									
Si	6.44	6.53	6.46	6.41	6.49	6.49	6.42	6.41	6.46	6.49	6.4	6.53	6.43	6.46	6.50	6.46	6.38	6.51	6.41	6.49	6.48	6.54	6.46	6.48	6.50
Al ^{IV}	1.56	1.47	1.54	1.59	1.51	1.51	1.58	1.59	1.54	1.51	1.6	1.47	1.57	1.54	1.50	1.54	1.62	1.49	1.59	1.51	1.52	1.46	1.54	1.52	1.50
OH 位置																									
OH	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Al (Al ^{VI} +Al ^{IV})	2.50	2.46	2.52	2.62	2.53	2.60	2.61	2.59	2.51	2.50	2.57	2.38	2.53	2.50	2.43	2.51	2.62	2.47	2.58	2.53	2.46	2.48	2.59	2.52	2.41
总数	15.5	15.4	15.4	15.5	15.4	15.4	15.5	15.5	15.4	15.4	15.5	15.4	15.5	15.4	15.4	15.5	15.5	15.4	15.4	15.5	15.4	15.5	15.4	15.5	15.5
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.40	0.42	0.40	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.40	0.43	0.41	0.41	0.42	0.42	0.39	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.41	0.42
Na ₂ O+K ₂ O	1.61	1.69	1.68	1.72	1.65	1.75	1.89	1.75	1.71	1.75	1.86	1.63	1.69	1.65	1.73	1.76	1.84	1.51	1.64	1.69	1.66	1.73	1.67	1.81	1.56
A	0.39	0.38	0.39	0.41	0.39	0.40	0.41	0.40	0.39	0.40	0.39	0.36	0.39	0.39	0.37	0.39	0.41	0.38	0.40	0.39	0.38	0.38	0.40	0.39	0.37
M	0.48	0.50	0.47	0.47	0.48	0.46	0.47	0.48	0.48	0.49	0.48	0.53	0.48	0.50	0.51	0.50	0.44	0.49	0.49	0.48	0.51	0.50	0.49	0.49	0.53

续表 3

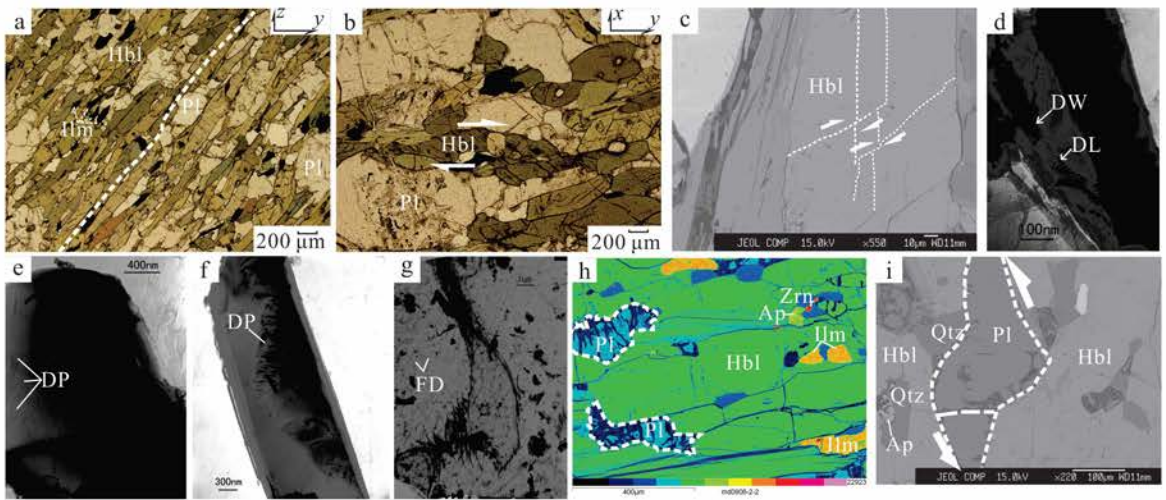
样品测点	视域 2 (B)										视域 3 (C)												
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
SiO ₂	41.5	40.9	40.2	41.2	41.5	41.3	41.3	41.4	42.9	44.4	44.2	43.6	42.1	43.8	43.6	43.8	43.6	43.6	44.1	43.5	44.0	43.3	44.0
TiO ₂	0.69	0.72	0.68	0.50	0.64	0.60	0.71	0.15	0.15	0.18	0.19	0.27	0.28	0.24	0.20	0.21	0.12	0.15	0.28	0.22	0.21	0.27	0.27
Al ₂ O ₃	13.2	13.8	13.9	13.2	13.4	12.9	13.7	13.4	13.7	13.9	14.3	13.4	14.4	14.1	14.4	14.3	15.3	14.9	13.8	14.1	14.0	14.7	13.7
FeO	17.7	18.0	17.8	17.7	17.8	17.6	17.9	17.6	17.4	18.5	19.0	18.9	18.3	18.8	18.9	18.6	18.9	18.9	19.0	18.9	18.7	18.7	18.9
MgO	6.95	6.75	6.58	7.14	6.97	7.05	6.89	7.74	7.53	7.76	7.82	7.82	7.35	7.42	7.63	7.70	7.16	7.50	7.95	7.45	7.73	7.19	7.85
MnO	0.07	0.22	0.23	0.25	0.22	0.12	0.19	0.02	0	0.03	0.19	0	0.10	0	0.01	0.06	0	0	0.02	0.14	0	0.12	0.07
CaO	11.5	11.4	11.5	11.4	11.5	11.5	11.4	11.4	11.4	11.6	11.6	11.6	11.2	11.2	11.5	11.5	11.4	11.6	11.4	11.4	11.5	11.5	11.5
Na ₂ O	1.34	1.37	1.49	1.28	1.40	1.27	1.40	1.52	1.29	1.32	1.35	1.24	1.29	1.20	1.22	1.20	1.38	1.36	1.20	1.40	1.37	1.40	1.12
K ₂ O	0.38	0.35	0.37	0.30	0.31	0.29	0.29	0.47	0.47	0.47	0.55	0.63	0.69	0.73	0.61	0.64	0.60	0.54	0.63	0.58	0.58	0.76	0.64
总和	93.4	93.5	92.9	93	93.6	92.7	94.0	95.4	94.9	98.2	99.0	97.6	95.6	97.4	98.0	98.0	98.5	98.5	98.3	97.8	98.0	98.0	98.0
A 位置																							
Na	0.35	0.38	0.43	0.38	0.35	0.38	0.40	0.30	0.31	0.31	0.32	0.34	0.32	0.27	0.31	0.32	0.32	0.35	0.31	0.35	0.32	0.32	0.29
K	0.08	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.12	0.11	0.11	0.14	0.12
M4 位置																							
Fe ²⁺	0	0.05	0.01	0.06	0.04	0	0.02	0.06	0.04	0.07	0.13	0.1	0.12	0.12	0.13	0.11	0.10	0.11	0.15	0.10	0.10	0.07	0.13
Ca	1.94	1.92	1.96	1.93	1.92	1.95	1.92	1.86	1.88	1.85	1.83	1.87	1.85	1.79	1.84	1.84	1.82	1.85	1.81	1.84	1.83	1.84	1.83
Na	0.06	0.03	0.03	0.01	0.04	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.03	0.03	0.04	0.09	0.03	0.05	0.08	0.04	0.04	0.06	0.07	0.09	0.03
M1, 2, 3 位置																							
Al ^{VI}	0.96	0.98	0.98	0.96	0.98	0.93	0.97	1.03	1.06	1.03	1.02	0.94	1.05	1.07	1.04	1.04	1.16	1.09	0.98	1.02	1.03	1.08	0.99
Ti	0.08	0.09	0.08	0.06	0.08	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
Mg	1.63	1.58	1.55	1.68	1.63	1.66	1.60	1.76	1.72	1.72	1.72	1.75	1.68	1.66	1.70	1.71	1.58	1.66	1.76	1.67	1.72	1.60	1.75
Mn	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0	0	0	0.02	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0.02	0.01
Fe ²⁺	2.32	2.32	2.35	2.27	2.29	2.32	2.32	2.19	2.20	2.23	2.21	2.28	2.22	2.24	2.24	2.21	2.25	2.24	2.22	2.27	2.23	2.27	2.23
T 位置																							
Si	6.51	6.43	6.38	6.50	6.50	6.54	6.46	6.63	6.59	6.60	6.53	6.56	6.46	6.58	6.51	6.53	6.47	6.48	6.56	6.53	6.57	6.48	6.58
Al ^{IV}	1.49	1.57	1.62	1.50	1.50	1.46	1.54	1.37	1.41	1.40	1.47	1.44	1.54	1.42	1.49	1.47	1.53	1.52	1.44	1.47	1.43	1.52	1.42
OH 位置																							
OH	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Al (Al ^{VI} +Al ^{IV})	2.45	2.55	2.60	2.46	2.48	2.40	2.52	2.40	2.47	2.43	2.49	2.38	2.59	2.49	2.53	2.51	2.68	2.60	2.42	2.49	2.46	2.60	2.41
总数	15.4	15.5	15.5	15.4	15.4	15.4	15.5	15.4	15.4	15.4	15.4	15.5	15.5	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.5	15.4	15.5	15.4
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.41	0.40	0.40	0.42	0.42	0.42	0.41	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.41	0.43	0.44	0.42	0.43	0.41	0.44
Na ₂ O+K ₂ O	1.72	1.72	1.86	1.57	1.58	1.70	1.82	1.76	1.79	1.90	1.87	1.98	1.93	1.84	1.83	1.87	1.93	1.85	1.83	1.99	1.95	2.16	1.76
A	0.38	0.40	0.41	0.38	0.38	0.37	0.39	0.36	0.38	0.37	0.38	0.36	0.40	0.38	0.39	0.39	0.41	0.40	0.37	0.38	0.37	0.40	0.37
M	0.50	0.48	0.47	0.52	0.50	0.51	0.49	0.55	0.53	0.53	0.53	0.55	0.51	0.50	0.52	0.53	0.47	0.50	0.55	0.51	0.53	0.48	0.50

表 4 猛洞岩群代表性长石矿物化学成分

Table 4 Representative chemical compositions of feldspar minerals in the Mengdong Group-Complex

测试点	$w_B/\%$					x_B/NA					An	Ab	Or
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Na	K	Al	Ca	Si			
A1	55.70	24.90	7.54	0.02	7.35	0.67	0	1.38	0.38	2.61	0.36	0.65	0
A2	55.90	24.50	7.43	0.04	7.40	0.67	0	1.35	0.37	2.62	0.36	0.65	0
A3	55.80	25.10	7.82	0.05	7.31	0.66	0	1.38	0.39	2.60	0.37	0.64	0
A4	55.70	24.60	7.60	0.05	6.68	0.61	0	1.37	0.38	2.63	0.38	0.61	0
A5	58.00	23.60	5.95	0.04	8.36	0.75	0	1.29	0.30	2.69	0.28	0.73	0
A6	57.60	23.80	6.03	0.05	8.06	0.73	0	1.31	0.30	2.68	0.29	0.71	0
A7	57.40	24.80	7.02	0.06	7.68	0.69	0	1.34	0.35	2.64	0.33	0.67	0
A8	55.70	25.00	7.81	0.04	7.16	0.65	0	1.38	0.39	2.60	0.38	0.63	0
A9	55.40	25.10	8.05	0.05	7.09	0.64	0	1.38	0.40	2.60	0.38	0.62	0
A10	54.60	25.50	8.73	0.04	6.61	0.60	0	1.41	0.44	2.56	0.42	0.59	0
A11	55.00	25.30	8.20	0.04	6.76	0.62	0	1.41	0.42	2.58	0.40	0.61	0
A12	57.50	23.60	6.00	0.02	8.28	0.75	0	1.30	0.30	2.68	0.29	0.72	0
A13	63.10	18.90	0.11	10.30	3.44	0.31	0.61	1.04	0.01	2.98	0.01	0.34	0.66
A14	55.30	26.40	8.90	0.05	6.35	0.57	0	1.44	0.44	2.55	0.44	0.57	0
A15	58.50	24.30	6.39	0.07	8.17	0.72	0	1.31	0.31	2.68	0.30	0.70	0
A16	55.70	26.20	8.43	0.03	6.94	0.62	0	1.42	0.42	2.57	0.40	0.61	0
A17	54.60	23.60	6.77	0.05	7.38	0.68	0	1.32	0.34	2.59	0.34	0.67	0
A18	55.60	26.50	9.01	0.01	6.58	0.59	0	1.43	0.44	2.55	0.43	0.58	0
A19	56.50	25.50	7.85	0.03	7.27	0.65	0	1.39	0.39	2.60	0.37	0.63	0
A20	56.40	25.50	7.96	0.05	6.96	0.62	0	1.38	0.39	2.59	0.39	0.61	0
A21	57.10	24.90	7.53	0.06	7.44	0.67	0	1.35	0.37	2.63	0.36	0.65	0
A22	58.50	24.00	6.25	0.05	8.42	0.75	0	1.30	0.31	2.68	0.29	0.72	0
A23	58.30	24.50	6.61	0.05	7.95	0.71	0	1.32	0.32	2.67	0.31	0.69	0
A24	59.20	23.80	6.01	0.07	8.44	0.75	0	1.28	0.29	2.70	0.28	0.72	0
A25	58.10	24.00	6.34	0.03	8.02	0.72	0	1.30	0.31	2.68	0.30	0.70	0
B1	58.70	23.10	5.12	0.07	8.66	0.78	0	1.26	0.26	2.73	0.25	0.76	0
B2	58.10	24.40	6.51	0.04	8.26	0.73	0	1.32	0.32	2.66	0.30	0.71	0
B3	55.20	26.30	8.91	0.02	6.63	0.59	0	1.43	0.44	2.55	0.43	0.58	0
B4	57.20	24.60	6.87	0.04	8.00	0.72	0	1.34	0.34	2.64	0.32	0.69	0
B5	56.80	24.90	7.30	0.04	7.56	0.68	0	1.36	0.36	2.63	0.35	0.66	0
B6	58.20	23.70	6.28	0.06	8.01	0.72	0	1.29	0.31	2.69	0.30	0.70	0
B7	57.70	24.20	6.79	0.03	8.03	0.72	0	1.31	0.34	2.66	0.32	0.69	0
B8	60.10	24.50	6.51	0.07	7.63	0.67	0	1.30	0.31	2.70	0.32	0.67	0
B9	58.90	24.50	7.34	0.12	7.00	0.62	0.01	1.31	0.36	2.68	0.36	0.62	0.01
B10	61.10	25.30	7.00	0.08	7.78	0.66	0	1.31	0.33	2.68	0.33	0.66	0
C1	58.80	26.00	8.24	0.08	7.21	0.62	0	1.36	0.39	2.62	0.39	0.61	0
C2	61.50	25.90	7.17	0.07	7.23	0.61	0	1.33	0.34	2.68	0.35	0.63	0
C3	60.20	25.20	7.19	0.07	7.61	0.66	0	1.32	0.34	2.67	0.34	0.65	0
C4	59.90	25.70	7.65	0.07	7.24	0.62	0	1.34	0.36	2.65	0.37	0.63	0
C5	57.50	25.60	8.52	0.08	6.55	0.58	0	1.37	0.42	2.61	0.42	0.58	0
C6	60.80	24.80	7.20	0.08	7.56	0.65	0	1.29	0.34	2.69	0.34	0.65	0
C7	58.80	26.50	8.79	0.07	6.38	0.55	0	1.38	0.42	2.61	0.43	0.56	0
C8	61.10	25.30	7.37	0.06	7.60	0.65	0	1.31	0.35	2.68	0.35	0.65	0
C9	58.20	26.80	8.82	0.07	6.66	0.57	0	1.40	0.42	2.59	0.42	0.57	0
C10	58.90	26.70	8.88	0.06	6.49	0.56	0	1.39	0.42	2.60	0.43	0.56	0
C11	62.00	24.00	5.65	0.28	7.50	0.64	0.02	1.25	0.27	2.74	0.29	0.68	0.02
C12	59.90	26.20	8.13	0.06	6.95	0.59	0	1.36	0.38	2.64	0.39	0.60	0
C13	58.80	26.40	8.75	0.04	6.46	0.56	0	1.38	0.42	2.61	0.43	0.56	0

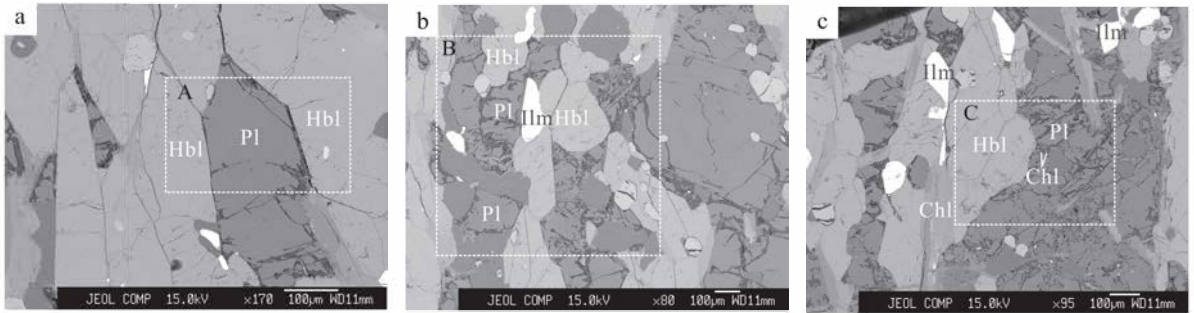
注:长石阳离子以 8 个氧原子为基础计算,A13 为碱性长石(不合乎要求数据),其余为斜长石。 w_B 为利用电子探针测试的氧化物质量分数; x_B 为对应氧化物质量分数换算的对应元素的原子数,NA 为阿伏伽德罗常数。An、Ab、Or 分别为钙长石、钠长石和钾长石所占比率。



a.斜长角闪岩优选方位;b.角闪石书斜构造;c.角闪石矿物显微位移(3 μm);d-g.角闪石变形亚显微构造(TEM);h.斜长石的 δ 型结构; i.斜长石的拖尾构造。DL.位错列;FD.自由位错;DW.位错壁;DP.位错偶极;Ap.磷灰石;Hbl.角闪石;Ilm.钛铁矿;Qtz.石英;Zrn.锆石; Pl.斜长石。

图 5 猛洞岩群斜长角闪岩微观构造和角闪石变形亚显微构造

Fig.5 Microstructures and sub-microstructures of amphibole grains in the Mengdong Group-Complex



Ilm.钛铁矿;Hbl.角闪石;Pl.斜长石;Chl.绿泥石。

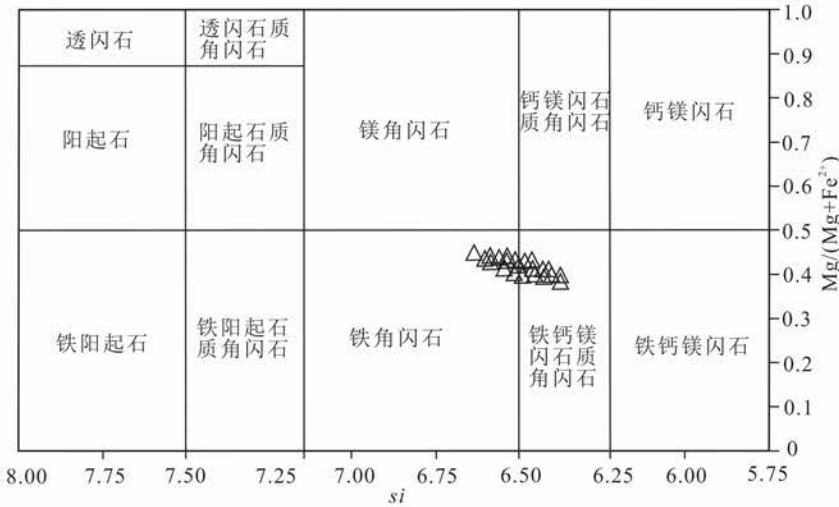
图 6 猛洞岩群斜长角闪岩电子探针微区分析

Fig.6 Electronic probe micro-analyzer of amphibolites of Mengdong Group-Complex

Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} ，M4 位置为 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} ，T1、T2 位置为 Si^{4+} 、 Al^{VI} ；晶体化学式中 A 位置为 Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 $(H_3O)^{+}$ ，B 位置为 Na^{+} 、 Li^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ，C 位置为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} ，T 位置为 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 。本文角闪石矿物以 23 个氧原子为准计算化学式，计算方法参见文献 [55-61]，结果见表 3。对比普通角闪石矿物化学组成，猛洞岩群角闪石矿物具有以下特征：化学成分以富钙($w(CaO) > 11\%$)、富镁($w(MgO) > 6\%$)、贫钛($w(TiO_2) < 1\%$)和贫钾($w(K_2O) < 0.5\%$)为特征；阳离子特征： $(Mg, Fe, Mn, Li)_B$ 原子总和 \leq

0.5， $(Ca+Na)_B$ 原子总和 ≥ 1.5 及 Na_B 原子总和 < 0.5 ，显示为钙质角闪石系列^[53-54]，其中 Ca_B 原子总和 ≥ 1.5 、 $(Na+K)_A$ 原子总和 < 0.5 和 Ca_A 原子总和 < 0.50 ，显示为镁角闪石-铁角闪石混合系列化学组分(图 7)。不同视域内的角闪石矿物化学成分基本一致，反映其基本不受蚀变影响，因此可以近似代表峰期变质的化学组分。

角闪石元素原子数比值 A 和 M 具有重要的成因意义，利用 A (Al/Si) 值和 M ($Mg/(Fe^{3+} + Fe^{2+} + Al^{VI})$) 值可以区分不同成因的角闪石^[62-63]，其中 Al^{VI} 表示 Al 离子为 VI 的配位数。中-基性岩浆成因角闪石(即正变质成因的角闪石)的 A、M 值分别



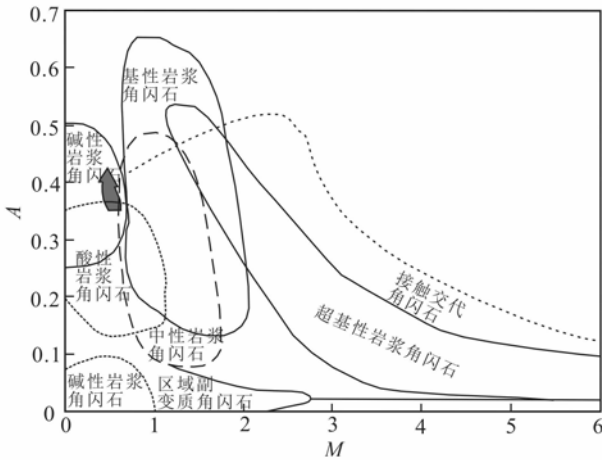
底图据文献[53-54]。

图 7 猛洞岩群角闪石分类图解

Fig.7 Classification diagram of amphiboles of amphibolites of Mengdong Group-Complex

为 0.67~0.10、1.50~2.04, 区域副变质成因的 A、M 值分别为 0.09~0.01、0.08~1.70。猛洞岩群斜长角闪岩中角闪石 A 值为 0.37~0.45, M 值为 0.44~0.51, 为正变质成因, 落于碱性岩浆角闪石区域(图 8)。

62.00%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 23.10%~26.80%, $w(\text{CaO})$ 为 5.12%~9.01%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 6.35%~8.66% (仅 A13 为 3.44%), $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.01%~0.28%。斜长石 A_n 为 0.25~0.44, A_b 为 0.56~0.76, 反映以中长石为主, 含少量奥长石。与角闪石矿物学特征一致, 不同视域内长石矿物化学成分基本不受后期变质-变形和流体的影响。



底图据文献[55-56]。

图 8 猛洞岩群角闪石的成因判别

Fig.8 Genesis discrimination diagram of amphibolite in the Mengdong Group-Complex

4 讨论

4.1 构造环境判别

与原岩恢复基本一致, 斜长角闪岩构造环境依靠不活动元素判别较为妥当。猛洞岩群斜长角闪岩的 Nb/Y 值为 0.71~0.78, 类似于碱性玄武岩系列; Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(图 9)^[64], 样品落于亚碱性-碱性玄武岩区域内。前人认为 Zr/Nb 是非常有效的指示标志, 对 N-MORB(>30)、P-MORB 和板内玄武岩(约 10)^[45] 有较好区分; 而猛洞岩群中 Zr/Nb 值为 7.59~10.53(平均 9.70), 显示为板内玄武岩的产物。Hf/Th 值 < 1, 类似于板内玄武岩(Hf/Th < 8)^[65-66]。 $w(\text{Zr})$ -Zr/Y 图(图略)^[52] 上, 均投于板内玄武岩中; TiO₂-10MnO-10P₂O₅ 图解^[67] (图 10a), 显示该类岩石投于洋岛碱性玄武岩区域; La/10-Nb/8-Y/15 图解(图 10b)^[68], 其投于大陆玄武岩区域。Th/Zr-Nb/Zr 图解^[69] (图 11a) 及 Th/Hf-Ta/Hf 图解^[70] (图 11b) 能有效区分玄武岩的构造环境, 结果显示斜长角闪岩类原岩形成于

3.3.2 长石

与角闪石紧密接触的代表性长石矿物化学成分见表 4。长石种属绝大部分为斜长石, 仅个别为碱性长石(表 4)。斜长石 $w(\text{SiO}_2)$ 为 54.60%~

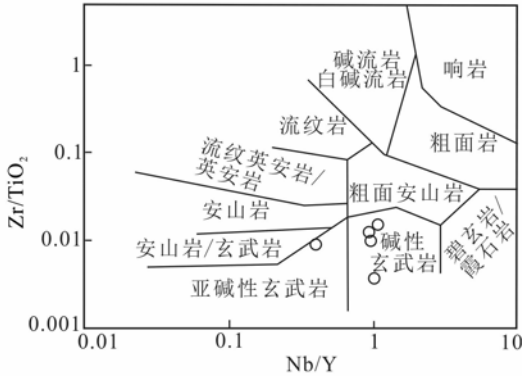
陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩环境。

约 760 Ma,滇东南老君山地区及其所在的越北地块,可能位于南华裂谷之西延与康滇裂谷之南延的交汇部位。本文报道的猛洞岩群玄武质岩石填补了桂西到滇南之间尚未有新元古代岩浆岩报道的空白,从而表明扬子地块周缘两大裂谷带经历了相似的岩浆过程^[38]。结合岩石学与地球化学特征,本文所获斜长角闪岩原岩可能形成于与大陆裂谷有关的玄武质岩浆系列环境。

4.2 斜长角闪岩温压条件及其指示意义

常用温压计计算模型有角闪石-斜长石 Na-Ca 交换温度计及斜长石-角闪石-石英矿物对温度计^[55-61]。角闪石-斜长石 Na-Ca 交换温度计^[55]是基于纯转换反应标定的温度计,几乎不受后期铁镁矿物之间的 $Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 离子再交换反应影响,因此可以给出可靠的温度条件,是目前使用较为广泛的温度计之一。猛洞岩群斜长角闪岩的原岩确定为亚碱性-碱性玄武岩,形成于新元古代^[38],经历了加里东期和晚白垩世岩浆活动、印支期构造-热事件的影响,保存了丰富的地质信息。亚碱性-碱性玄武岩的主要矿物组成为辉石和基性斜长石,因此可以确定角闪石主体是由辉石等矿物变质而成。

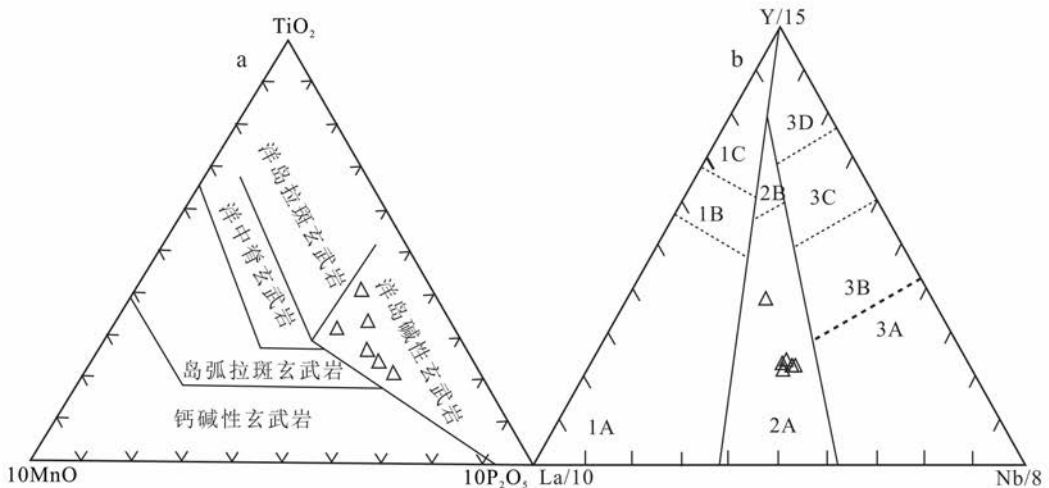
根据上述计算模型获得的温压计代表斜长角闪岩不同阶段的变质条件,结果显示猛洞岩群斜长角闪岩温度限制为 596~685 °C,压力限制为 0.80~0.98 GPa(表 5)。视域 1(A)平均温度和压力分别为 649 °C 和 0.89 GPa;视域 2(B)平均温压条件为 636 °C 和 0.86 GPa;视域 3(C)平均温压条件为 648 °C 和 0.88 GPa。上述不同视域内温压条件在误差范围内基本一致(图 12),其平均温度和压力分别为 646 °C、0.88 GPa。



底图据文献[64]。

图 9 猛洞岩群斜长角闪岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解

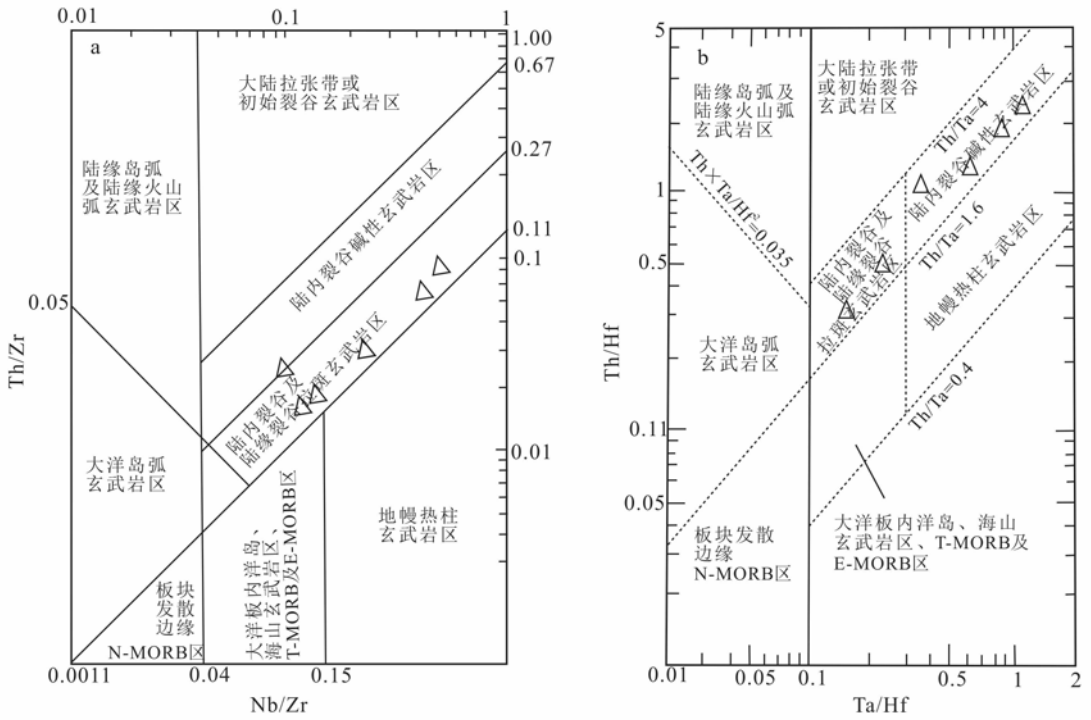
Fig.9 Zr/TiO₂ vs Nb/Y diagram for amphibolite in the Mengdong Group-Complex



1 区为火山弧玄武岩;2 区为大陆玄武岩;3 区为大洋玄武岩。1A. 钙碱性玄武岩;1C. 火山弧拉斑玄武岩;1B. 1A 区和 1B 区间的重叠区域;2A. 大陆玄武岩;2B. 弧后盆地大陆玄武岩;3A. 大陆内裂谷区的碱性玄武岩;3B 及 3C 区为富集型洋脊玄武岩(3B 区为富集区,3C 区为弱富集区);3D. 正常洋脊玄武岩。底图据文献[67-68]。

图 10 猛洞岩群 TiO₂-10MnO-10P₂O₅ 及 Y/15-La/10-Nb/8 构造环境判别图解

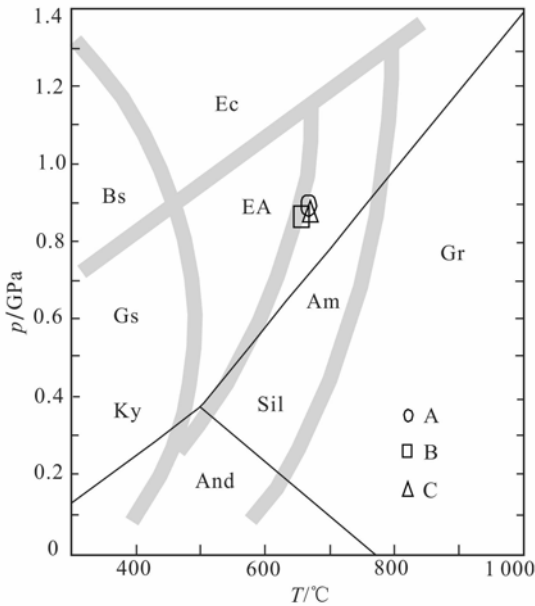
Fig.10 TiO₂ vs 10MnO vs 10P₂O₅ and Y/15 vs La/10 vs Nb/8 tectonic setting discrimination diagrams for amphibolite in the Mengdong Group-Complex



底图据文献[69-70]。

图 11 猛洞岩群 Th/Zr - Nb/Zr 和 Th/Hf - Ta/Hf 构造环境判别图解

Fig.11 Th/Zr vs Nb/Zr and Th/Hf vs Ta/Hf tectonic setting discrimination diagrams for amphibolite in the Mengdong Group-Complex



Bs. 蓝片岩相; Gs. 绿片岩相; EA. 绿帘角闪岩相; Am. 角闪岩相; Ec. 榴辉岩相; Gr. 麻粒岩; Ky. 蓝晶石; Sil. 夕线石; And. 红柱石。底图据文献[61]。

图 12 斜长角闪岩变质温度和压力条件

Fig.12 Metamorphic temperature and pressure conditions of amphibolite

本文斜长角闪岩温压计记录的是加里东期构造-岩浆事件还是印支期构造-热事件, 一直以来尚存争议。华南板块加里东期岩浆-构造事件表现为强烈的构造变形事件、广泛发育的花岗岩及区域角度不整合^[71], 这种强烈的构造变形表现为紧闭褶皱变形、韧滑流变, 但滇东南老君山地区野外多见到宽缓褶皱、肠状褶皱等。猛洞岩群周边发育的南温河花岗岩质片麻岩锆石边缘有 10 μm 左右变质增生边, 利用 TIMS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得变质年龄为 230 Ma 左右^[24], 与斜长角闪片麻岩榍石 TIMS U-Pb 同位素年龄 236 Ma^[37,72] 在误差范围内基本一致; 另外, 区内变质锆石 U-Pb 同位素年龄和角闪石 Ar-Ar 年龄均限制在 228 ~ 237 Ma^[20,24,29,72-73]。因此, 年代学上也不支持加里东期为主期变质的证据。矿物/矿物对温压计所记录的是矿物封闭温度之下保存的温度与压力; 对于较低级至中级变质作用, 可以获得变质高峰期间的温度、压力^[74]。斜长角闪岩不同视域内也未观察到进变质矿物组合, 且显微结构、构造观察表明角闪石矿物缝隙中仅有绿泥石等蚀变矿物, 仅代表弱退变质作用, 可能与燕山期花岗岩岩浆作用有关, 因此这

表 5 猛洞岩群斜长角闪岩温压计计算结果

Table 5 $p-T$ computation results of amphibolite in the Mengdong Group-Complex

视域	测点	$T/^\circ\text{C}$			p/GPa			视域	测点	$T/^\circ\text{C}$			p/GPa		
		T_a	T_b	平均	p_a	p_b	平均			T_a	T_b	平均	p_a	p_b	平均
视域 1 (A)	A1	674	633		0.89	0.87		视域 2 (B)	B1	635	596		0.86	0.84	
	A2	654	635		0.87	0.85			B2	661	630		0.91	0.89	
	A3	667	646		0.90	0.87			B3	690	660		0.94	0.92	
	A4	680	660		0.95	0.93			B4	656	620		0.87	0.84	
	A5	644	607		0.90	0.88			B5	659	629	636	0.88	0.85	0.86
	A6	640	612		0.94	0.92			B6	645	612		0.84	0.81	
	A7	661	646		0.94	0.92			B7	658	634	0.90	0.87		
	A8	675	650		0.93	0.91			B8	621	611	0.84	0.82		
	A9	669	646		0.90	0.87			B9	636	624	0.88	0.85		
	A10	666	647		0.89	0.87			B10	627	621	0.85	0.83		
	A11	679	649		0.92	0.90		视域 3 (C)	C1	647	650		0.88	0.86	
	A12	644	605		0.83	0.81			C2	647	642		0.83	0.80	
	A13	759	440	649	0.90	0.88	0.89		C3	647	644		0.93	0.91	
	A14	685	660		0.89	0.86			C4	621	639		0.89	0.86	
	A15	649	617		0.86	0.83			C5	653	658		0.90	0.88	
	A16	676	657		0.90	0.87			C6	639	635		0.90	0.87	
	A17	672	642		0.95	0.93			C7	664	664	648	0.98	0.96	0.88
	A18	670	652		0.88	0.85			C8	653	640		0.94	0.92	
	A19	676	644		0.93	0.91			C9	647	663		0.85	0.83	
	A20	665	642		0.90	0.88			C10	664	666		0.88	0.86	
	A21	669	641		0.87	0.85			C11	631	621		0.87	0.85	
	A22	637	617		0.88	0.85			C12	651	656		0.93	0.91	
	A23	654	623		0.93	0.91			C13	644	657		0.85	0.82	
	A24	643	616		0.90	0.88									
	A25	659	620		0.84	0.82									

注: T_a 据文献[57]; T_b 据文献[58]; p_a 据文献[55]; p_b 据文献[60]; A13 为不合乎要求的数据,与表 3、表 4 相对应。

些现象也不支持加里东期变质程度强于印支期的观点。综上所述,基于野外地质事实和变质年代学研究,本文斜长角闪岩最高变质程度达低角闪岩相,平均温度和压力分别为 646 °C 和 0.88 GPa,可能代表印支期发生大规模构造-热事件,不排除继承加里东期构造-岩浆活动事件的影响,但尚需更多证据予以支持。

印支期,滇东南地区表现为近东西向宽缓褶皱、冲断-推覆构造以及 NE - NNE 向左旋走滑韧性剪切。在 SongChay-老君山地区,大致沿南温河片麻状花岗岩与猛洞岩群之间岩性界面为主界面,发生由南而北的逆冲推覆,地壳快速增厚-岩石增温而

发生变质-变形作用^[75],使猛洞岩群内岩石遭受变形-变质作用,其最高变质程度达角闪岩相(约 646 °C, 0.88 GPa),约 230 Ma 达到印支期变质-变形峰期阶段,暗示老君山变质核杂岩的雏形基本形成,推测其动力来源可能与华南-华北板块沿秦岭-大别造山带的陆陆碰撞和华南地块南缘古特提斯的俯冲增生作用有关^[76-77]。

5 结论

1) 斜长角闪岩原岩为一套亚碱性-碱性玄武岩,可能形成于大陆裂谷环境下与地幔柱有关的玄武质岩浆系列。

2) 猛洞岩群斜长角闪岩中的角闪石化学成分为铁角闪石-铁钙镁闪石混合系列;角闪石矿物发育自由位错、位错列、位错环或位错偶极等;斜长石以中长石为主,大部分构成 σ 、 δ 和 φ 型组构的拖尾,膨凸颗粒聚集。上述特征表明斜长角闪岩处于脆-韧性转变的过渡形式,最高变质程度为低角闪岩相。

3) 斜长角闪岩峰期变质温度和压力分别为 646 °C 和 0.88 GPa,最可能代表印支期构造-热事件,暗示南温河花岗岩与猛洞岩群之间岩性界面为主界面,地壳快速增厚-岩石增温的变质-变形峰期阶段,标志南温河变质核杂岩雏形基本形成。

致谢:主、微量元素分别在广州澳实测试公司和中国科学院地球化学研究所完成,电子探针和透射电镜得到长安大学刘明武教授和中国科学院地球化学研究所刘世荣研究员的指导和帮助,唐德强清绘部分图件,在此对上述单位和个人一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 肖玲玲,卢俊生,王国栋,等. 赞皇变质杂岩区西南部斜长角闪岩的地球化学、变质演化研究及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2807-2818.
Xiao Lingling, Lu Junsheng, Wang Guodong, et al. Geochemistry, Metamorphic Evolution and Its Tectonic Implications of Amphibolites in the Southwest Area of the Zanzhuang Complex[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9): 2807-2818.
- [2] 王金荣,王廷印,高军平,等. 甘肃金塔南山斜长角闪岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 231-237.
Wang Jinrong, Wang Tingyin, Gao Junping, et al. Geochemistry of the Amphibolites from Jinta Nanshan, Gansu Province: Implications for the Tectonic Setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 231-237.
- [3] 王忠梅,肖文交,韩春明,等. 甘肃敦煌红柳峡地区石榴石斜长角闪岩的变质特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1685-1697.
Wang Zhongmei, Xiao Wenjiao, Han Chunming, et al. Metamorphism, Zircon U-Pb Dating and Tectonic Implications of Garnet Amphibolites from Hongliuxia, Dunhuang, Gansu Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1685-1697.
- [4] Cao S Y, Liu J L, Leiss B. Orientation-Related Deformation Mechanisms of Naturally Deformed Amphibole in Amphibolite Mylonites from the Diancang Shan, SW Yunnan, China[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32: 606-622.
- [5] 曹淑云,刘俊来,胡玲. 角闪石高温脆-韧性转变变形的显微与亚微构造证据:以滇西点苍山深变质剪切糜棱岩为例[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(8): 1004-1013.
Cao Shuyun, Liu Junlai, Hu Ling. Micro-and Submicrostructural Evidence for High-Temperature Brittle-Ductile Transition Deformation of Hornblende: Case Study of High-Grade Mylonites from Diancangshan, Western Yunnan[J]. Science in China: Series D, 2007, 50(10): 1459-1470.
- [6] 关会梅,刘俊来,赵胜金. 变形角闪质岩石流动变形及其意义:以辽东古元古宙褶皱带变形斜长角闪岩为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5): 777-783.
Guan Huimei, Liu Junlai, Zhao Shengjin. Flow and Deformation Mechanisms of Hornblende Rocks: Example of Deformed Amphibolites from the Paleoproterozoic Fold Belt in Liaodong Peninsula[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5): 777-783.
- [7] 胡玲. 显微构造地质学概论[M]. 北京:地质出版社, 1998: 1-158.
Hu Ling. An Introduction to Microstructural Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-158.
- [8] Tullis J. Deformation of Feldspars [J]. Mineral Soc Am Rev Mineral, 1983, 2: 297-323.
- [9] 纪沫,胡玲,刘俊来,等. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 226-233.
Ji Mo, Hu Ling, Liu Junlai, et al. Dynamic Recrystallization and Metamorphic Conditions of Main Rock-Forming Minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 226-233.
- [10] 丁星好,戴塔根,刘晓玮. 滇东南南部多金属成矿带找矿潜力分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1730-1739.
Ding Xingyu, Dai Tagen, Liu Xiaowei. Ore Prospecting Potential of the Polymetallic Metallogenic Belt in the South of SE Yunnan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1730-1739.
- [11] 贾福聚,燕永锋,伍伟,等. 云南老君山锡多金属成矿区硫、铅、氢、氧同位素地球化学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 105-118.
Jia Fujun, Yan Yongfeng, Wu Wei, et al. S, Pb, H and O Isotopic Geochemistry of Laojunshan Tin-

- Metallic Metallogenic Region, Southeastern Yunnan Province, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(1):105-118.
- [12] 刘玉平,李正祥,叶霖,等.滇东南老君山矿集区钨成矿作用 Ar-Ar 年代学[J]. 矿物学报,2011,33(增刊1):617-618.
Liu Yuping, Li Zhengxiang, Ye Lin, et al. Ar-Ar Geochronology of Tungsten Mineralization in the Laojunshan Ore Concentration Area, Yunnan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(Sup. 1):617-618.
- [13] 谭洪旗,刘玉平,叶霖,等.滇东南南秧田钨锡矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及意义[J]. 矿物学报,2011,31(增刊1):639-640.
Tan Hongqi, Liu Yuping, Ye Lin, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating of Phlogopite from W-Sn Deposits in the Nanyangtian, Southeastern Yunnan, and Its Implication[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(Sup. 1):639-640.
- [14] 刘玉平,李朝阳,叶霖,等.滇东南老君山变质核杂岩成矿特征及找矿方向[J]. 矿物岩石地球化学通报,2004,25(增刊1):130.
Liu Yuping, Li Chaoyang, Ye Lin, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Direction of Laojunshan Metamorphic Core Complex in Southeastern Yunnan Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 25(Sup. 1):130.
- [15] 李东旭,许顺山.变质核杂岩的旋扭成因:滇东南老君山变质岩的构造解析[J]. 地质论评,2000,46(2):113-119.
Li Dongxu, Xu Shunshan. Rotation-Shearing Genesis of Metamorphic Core Complex;Structural Analysis of Metamorphic Core Complex in Laojunshan, Southeastern Yunnan Province [J]. Geological Review, 2000, 46(2):113-119.
- [16] 郭利果.滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2006:1-120.
Guo Ligu. Primary Research on Geochemistry and Geochronology of the Laojunshan Metamorphic Core Complex, Southeastern Yunnan [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006:1-120.
- [17] 张世涛,冯明刚,吕伟.滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质,1998,17(4):390-397.
Zhang Shitao, Feng Minggang, Lü Wei. Analysis of the Nanwenhe Metamorphic Core Complex in Southeastern Yunnan[J]. Regional Geology of China, 1998, 17(4):390-397.
- [18] Liu Y P, Ye L, Li C Y, et al. Laojunshan-Song Chay Metamorphic Core Complex and Its Structure Significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(18):A259.
- [19] 颜丹平,周美夫,王焰,等.都龙—Song Chay 变质穹窿体变形与构造年代:南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2005,30(4):402-411.
Yan Danping, Zhou Meifu, Wang Yan, et al. Structural Styles and Chronological Evidences from Dulong-Song Chay Tectonic Dome: Earlier Spreading of South China Sea Basin Due to Late Mesozoic to Early Cenozoic Extension of South China Block[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2005,30(4):402-411.
- [20] Yan D P, Zhou M F, Wan Y C, et al. Structural and Geochronological Constraints on the Dulong-Song Chay Tectonic Dome in SE Yunnan(SW China) and Northern Vietnam [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 28(4):332-353.
- [21] 吕伟,冯明刚,胡长寿.滇东南南温河地区猛洞岩群变质作用特征[J]. 云南地质,2001,20(1):25-33.
Lü Wei, Feng Minggang, Hu Changshou. Metamorphism of Mengdong Lithological Group in Nanwenhe Area of Southeast Yunnan [J]. Yunnan Geological, 2001, 20(1):25-33.
- [22] 陈学明,林棕,谢福昌.云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地化特征[J]. 地质科学,1998,33(1):115-124.
Chen Xueming, Lin Zong, Xie Fuchang. Geological and Geochemical Characteristic of the Bainiuchang Superlarge Silver Polymetallic Deposit of Superimposed[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(1):115-124.
- [23] 徐伟.滇东南南温河花岗岩年代学和地球化学初步研究[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2007:1-72.
Xu Wei. Primary Research on Geochronology and Geochemistry of Nanwenhe Granite, Southeast Yunnan [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007:1-72.
- [24] Guo L G, Liu Y P, Li C Y, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Lithogeochemistry of Caledonian Granites from the Laojunshan Area,

- Southeastern Yunnan Province, China: Implications for the Collision Between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43:101-122.
- [25] 谭洪旗, 刘玉平, 徐伟, 等. 中-浅正变质岩锆石 SHRIMP 法与 TIMS 法测年结果不一致处理: 以滇东南南温河花岗岩为例[J]. *矿物学报*, 2011, 31(1): 62-69.
- Tan Hongqi, Liu Yuping, Xu Wei, et al. A Study on SHRIMP and TIMS Zircon Dating on Low to Medium Grade Ortho-Metamorphic Rocks: Example on the Nanwenhe Granites, Southeastern Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(1):62-69.
- [26] 张斌辉, 丁俊, 任光明, 等. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(4):587-601.
- Zhang Binhui, Ding Jun, Ren Guangming, et al. Geochronology and Geochemical Characteristics of the Laojunshan Granites in Maguan County, Yunnan Province, and Its Geological Implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4):587-601.
- [27] 王丹丹, 李宝龙, 朱德全, 等. 滇东南老君山地区变质岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(10):1718-1734.
- Wang Dandan, Li Baolong, Zhu Dequan, et al. Zircon U-Pb Geochronology of Metamorphic Complex in the Laojunshan District, Southeastern Yunnan Province and Its Tectonic Implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(10):1718-1734.
- [28] Peng T P, Fan W M, Zhao G C, et al. Petrogenesis of the Early Palaeozoic Strongly Peraluminous Granites in the Western South China Block and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98:399-420.
- [29] Xu B, Jiang S Y, Hofmann A W, et al. Geochronology and Geochemical Constraints on Petrogenesis of Early Palaeozoic Granites from the Laojunshan District in Yunnan Province of South China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29:248-263.
- [30] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, et al. Long and Complex Thermal History of the Song Chay Metamorphic Dome (Northern Vietnam) by Multi-System Geochronology [J]. *Tectonophysics*, 2000, 321:449-466.
- [31] Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam[J]. *Geology*, 2001, 29:211-214.
- [32] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5):967-976.
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Li Huimin, et al. U-Pb Geochronology of Cassiterite and Zircon from Dulong Sn-Zn Deposit: Evidence for Cretaceous Large-Scale Granitic Magmatism and Mineralization Events in Southeastern Yunnan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5):967-976.
- [33] 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. *地质学报*, 2008, 82(11):1478-1493.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, et al. Petrogenesis of the Laochang-Kafang Granite in the Gejiu Area, Yunnan Province: Constraints from Geochemistry and Zircon U-Pb Dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(11):1478-1493.
- [34] 程彦博, 毛景文, 陈小林, 等. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4):869-878.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Chen Xiaolin, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Bozhushan Granite in Southeastern Yunnan Province and Its Significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(4):869-878.
- [35] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 云南瓦渣沟矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3):845-857.
- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Laojunshan Granite Intrusion from the Wazha Tungsten Deposit, Yunnan Province and Their Implications for Petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3):845-857.
- [36] 刘艳宾, 莫宣学, 张达, 等. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11):3271-3286.
- Liu Yanbin, Mo Xuanxue, Zhang Da, et al. Petrogenesis of the Late Cretaceous Granite Discovered in the Laojunshan Region, Southeastern Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11):3271-3286.
- [37] 谭洪旗, 刘玉平. 滇东南猛洞岩群构造环境: 变质碎屑岩地球化学约束[J]. *地质学报*, 2017, 91(7):1416-1432.

- Tan Hongqi, Liu Yuping. Tectonic Setting of the Mengdong Group-Complex, Southeast Yunnan Province: Constraints from Geochemical of Metasedimentary Rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(7):1416-1432.
- [38] 谭洪旗,刘玉平. 滇东南猛洞岩群变质-变形研究及构造意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(1):15-42.
- Tan Hongqi, Liu Yuping. Metamorphic-Deformation of Mengdong Group-Complex and Their Tectonic Implication, Southeastern Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1):15-42.
- [39] 刘玉平,叶霖,李朝阳,等. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4):916-926.
- Liu Yuping, Ye Lin, Li Chaoyang, et al. Discovery of the Neoproterozoic Magmatics in Southeastern Yunnan: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Lithogeochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4):916-926.
- [40] 蔡永丰,王岳军,刘汇川,等. 哀牢山新元古代斜长角闪岩的形成时代、地球化学特征及其大地构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(1):168-180.
- Cai Yongfeng, Wang Yuejun, Liu Huichuan, et al. Geochronological and Geochemical Characteristics of the Neoproterozoic Amphibolite from Ailaoshan Zone, Western Yunnan and Its Tectonic Implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(1):168-180.
- [41] 王冬兵,唐渊,廖世勇,等. 滇西哀牢山变质岩系锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4):1261-1278.
- Wang Dongbing, Tang Yuan, Liao Shiyong, et al. Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of the Metamorphic Rock Series in Ailao Shan Ranges, Western Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(4):1261-1278.
- [42] Qi L, Gregoire D C. Determination of Trace Elements in Twenty Six Chinese Geochemistry Reference Materials by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. *Geostandards Newslett*, 2000, 24: 51-63.
- [43] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5):459-464.
- Lu Yuanfa. Geokit: A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5):459-464.
- [44] GB/T 15617-2002 硅酸盐矿物的电子探针定量分析方法[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003.
- GB/T 15617-2002 A quantitative Analysis Method for the Electron Probe of Silicate Minerals [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2003.
- [45] Wilson M. Igneous Petrogenesis [M]. London: Unwin Hyman, 1989:1-466.
- [46] Shaw D M. The Origin of the Apsley Gneiss, Ontario [J]. *Can J Earth Sci*, 1972, 9(1):18-35.
- [47] 周世泰. 对 17 种恢复变质岩原岩的岩石化学方法的检验结果[J]. *地质论评*, 1984, 30(1):81-84.
- Zhou Shitai. Examination of 17 Petrochemical Methods of Restoring Protoliths of Metamorphic Rocks[J]. *Geological Review*, 1984, 30(1):81-84.
- [48] 王仁民,贺高品,陈珍珍,等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京:地质出版社, 1987:1-199.
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. Using Diagrams Discriminate Metamorphic Rock of the Original Rock[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1-199.
- [49] 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, 1989:1-535.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989:1-535.
- [50] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997:1-238.
- Zhao Zhenhua. The Principle of Trace Element Geochemical [M]. Beijing: Science Press, 1997:1-238.
- [51] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Ocean Basalts: Implications for Mantle Composition and Process [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in Ocean Basins. London: Geological Society, Special Publications, 1989:313-345.
- [52] Pearce J A. Trace Elements Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries [C]//Thorpe R S. Andesites. New York: John Wiley and Sons, 1982: 525-548.
- [53] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. *Can Mineral*, 1997, 35: 219-246.

- [54] Leake B E, Woolley A R, Birch W D, et al. Nomenclature of Amphiboles: Additions and Revisions to the International Mineralogical Association's Amphibole Nomenclature [J]. *Can Mineral*, 2003, 41:1355-1370.
- [55] Holland T, Blundy J. Non-Ideal Interactions in Calcic Amphiboles and Their Bearing on Amphibole-Plagioclase Thermometry [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 116:433-447.
- [56] Blundy J D, Holland T J. Calcic Amphibole Equilibria and a New Amphibole-Plagioclase Geothermometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 104:208-224.
- [57] Schmidt M W. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al in Hornblende Barometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110:304-310.
- [58] Anderson J L, Smith D R. The Effect of Temperature and Oxygen Fugacity on Al-in-Hornblende Barometry [J]. *American Mineralogist*, 1995, 80:549-559.
- [59] Bhadra S, Bhattacharya A. The Barometer Tremolite + Tschermakite + 2 Albite = 2 Pargasite + 8 Quartz: Constraints from Experimental Data at Unit Silica Activity, with Application to Garnet-Free Natural Assemblages [J]. *American Mineralogist*, 2007, 92:491-502.
- [60] Hammarstrom, Zenk. Aluminum in Hornblende: An Empirical Igneous Geobarometer [J]. *American Mineralogist*, 1986, 71:1297-1313.
- [61] Holdaway M J, Mukhopadhyay B. A Reevaluation of the Stability Relations of Andalusite: Thermochemical Data and Phase Diagram for the Aluminum Silicates [J]. *American Mineralogist*, 1993, 78:298-315.
- [62] 薛治君, 白学让, 陈武. 成因矿物学 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986: 1-179.
Xue Zhijun, Bai Xuerang, Chen Wu. *Genetic Mineralogy* [M]. Wuhan: Wuhan College of Geosciences Press, 1986: 1-179.
- [63] 章邦桐, 凌洪飞, 陈培荣, 等. 正、副角闪岩判别标志的新认识: 赣中前寒武纪正、副角闪岩的矿物-岩石地球化学特征对比研究 [J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(4): 223-232.
Zhang Bangtong, Ling Hongfei, Chen Peirong, et al. New Recognition Criteria for Ortho and Para Amphibolites: The Comparative Study on Mineral Petrochemical from Xiangshan, Central Jiangxi Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(4): 223-232.
- [64] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20:325-343.
- [65] Condie K C. Geochemical Changes in Basalts and Andesites Across the Archaean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance [J]. *Lithos*, 1989, 23:1-18.
- [66] 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 等. 滇东师宗-弥勒带北段基性火山岩地球化学及其对华南大陆构造格局的制约 [J]. *岩石学报*, 2002, 18(1): 37-46.
Dong Yunpeng, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Geochemistry of Basalts from North of the Shizong-Mile Belt, Eastern Yunnan Province: Constraints on the Tectonic Framework of the South China Continent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(1): 37-46.
- [67] Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A Minor Element Discriminant for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and Its Implication for Petrogenesis [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 62:53-63.
- [68] Campbell I H, Griffiths R W. Implication of Mantle Plume Structure for the Evolution of Flood Basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 99: 79-93.
- [69] 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别 [J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 40-47.
Sun Shuqin, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang. Discrimination of the Tectonic Setting of Basalts by Th, Nb and Zr [J]. *Geological Review*, 2003, 49(1): 40-47.
- [70] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩形成的大地构造背景的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413-421.
Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413-421.
- [71] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 418-431.
Shu Liangshu. Predevonian Tectonic Evolution of South China: From Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(4): 418-431.
- [72] 谭洪旗. 滇东南猛洞岩群变质-变形与地球化学研究

- [D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2010:1-86.
- Tan Hongqi. Metamorphism-Deformation and Geochemistry of the Mengdong Group-Complex, Southeastern Yunnan, China[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2010:1-86.
- [73] Maluskia H, Lepvrier C, Jolivet L, et al. Ar-Ar and Fission-Track Ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic Tectonics in Northern Vietnam [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2001, 19:233-248.
- [74] 符巩固,陈广浩,吴春明. 变质作用高峰期后的离子再交换与纯转换反应及对温度压力计算的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报,2004,23(4):362-367.
- Fu Gonggu, Chen Guanghao, Wu Chunming. The Effects of Post-Peak Retrograde Ion-Exchange and Net Transfer Reactions on the Calculated Temperatures and Pressures [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(4):362-367.
- [75] 刘玉平,徐伟,廖震,等. 老君山变质核杂岩隆升的热历史解析与动力学机制探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,26(增刊1):87-88.
- Liu Yuping, Xu Wei, Liao Zhen, et al. Thermal History Analytical and Dynamics Mechanism Discussed of the Laojunshan Metamorphic Core Complex Uplift[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(Sup. 1):87-88.
- [76] 徐先兵,张岳桥,贾东,等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质,2009,36(3):573-593.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China [J]. Geology in China, 2009, 36(3):573-593.
- [77] 张岳桥,徐先兵,贾东,等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘,2009,16(1):234-246.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, et al. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China During the Early Mesozoic [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1):234-246.