

文章编号: 1000-4734(2018) 02-0152-14

义敦地体变质基底地球化学特征与地质意义

田振东^{1,2}, 冷成彪^{1*}, 张兴春¹, 尹崇军³, 张伟¹, 郭剑衡^{1,2}, 陈利红³

(1. 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, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 云南华西矿产资源有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要: 本文对义敦地体内出露的前寒武系绿泥石云母片岩和石榴子石云母片岩进行了矿物学、岩石学和地球化学研究, 明确了 2 类云母片岩主要由石榴子石、斜长石、黑云母、白云母、绿泥石和石英组成, 具有高 Al_2O_3 、低 TiO_2 , 富集 K、Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 富集轻稀土, 亏损重稀土的特点。原岩恢复结果显示: 2 类云母片岩的原岩为砂岩和泥质砂岩。利用地质温压计估算这些变质岩形成的条件为 460~480 °C 和 0.57~0.79 MPa, 结合矿物组合特征, 说明岩石经历了绿片岩相变质作用。由于中、晚三叠世金沙江洋和甘孜—理塘洋相继关闭, 区内经历了快速的抬升过程。结合前人岩石地球化学、火成岩中继承锆石年代学等方面的资料, 我们认为义敦地体南、北地壳厚度存在着明显的差异: 北段昌台地区地壳较薄, 地壳厚度约 23.7 km, 而南段中甸地区地壳较厚, 地壳厚度约 63.2 km。

关键词: 变质基底; 云母片岩; 温压条件; 恰斯群; 义敦地体; 川西

中图分类号: P578; P595 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.021

作者简介: 田振东, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: tianzhendong@mail.gyig.ac.cn

Mineralogical and Petrogeochemical Characteristics of the Metamorphic Basement of Yidun Terrane and Their Geological Implication

TIAN Zhen-dong^{1,2}, LENG Cheng-biao^{1*}, ZHANG Xing-chun¹, YIN Chong-jun³,
ZHANG Wei¹, GUO Jian-heng^{1,2}, CHEN Li-hong³

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Huaxi company (Ltd) of Mineral Resource of Yunnan, Kunming 650000, China)

Abstract: Yidun terrane, which is located in the eastern margin of the Tibetan Plateau, formed in the late Triassic due to the westward subduction of Ganzi-Litang Paleo-Tethyan Ocean. A series of arc-type igneous rocks were emplacement into Yidun terrane. During the last decade, previous researchers mainly focused on those igneous rocks and the related porphyry metallogenic system, but rare investigations have been undertaken to reveal the nature of Precambrian metamorphic rocks from Yidun terrane. This led to poor understanding of the origin of these arc igneous rocks, as well as the tectonic evolution of the terrane. Based on mineralogical, petrological and geochemical studies on two kinds of Precambrian mica schists in the terrane, we revealed that those mica schists were mainly composed of garnet, plagioclase, biotite, muscovite, chlorite and quartz. They are characterized by high contents of Al_2O_3 , low contents of TiO_2 , with enrichment in large-ion lithophile elements (e.g., K, Rb, Sr, and Ba) and LREE, and depletion in high-field-strength elements (Nb, Ta, and Ti) and HREE, respectively. Protolith restoration results indicate that possible original rocks of those mica-schists are sandstone and argillaceous sandstone. Based on the calculation of conventional geothermobarometries, it is suggested that those metamorphism rocks formed at P-T conditions of 5.7-7.9 kbar and 460-480 °C. This, combining with characteristics of their mineral assemblages, it

收稿日期: 2017-05-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDB18000000); 国家自然科学基金项目(编号: 41373051)

*通讯作者, 冷成彪, E-mail: lengchengbiao@vip.gyig.ac.cn

indicates that those rocks had experienced metamorphism of green schist facies. Due to the successive closure of Jinshanjia Ocean and Ganzi-Litang Ocean in the middle and late Triassic, a rapid process of crust uplift happened in Yidun terrane. With the combination of previous data of geochemistry and inherited zircon geochronology, we believe that the crustal depth of Yidun terrane exists distinct difference between southern part and northern part of Yidun terrane. The northern part of Yidun terrane (i.e. Changtai area) was constructed on a thin continental crust, with the thickness about 23.7 km. However, the southern part of Yidun terrane (i.e. Zhongdian area) was constructed on a thick rather than a thin continental crust, with the thickness about 63.2 km.

Keywords: metamorphic basement; mica-schist; temperature-pressure conditions; Qiasi Group; Yidun terrane; western Sichuan Province

义敦地体位于青藏高原东南缘,北起德格,南抵中甸,南北长约500 km,东西宽约90~160 km。它由甘孜—理塘古特提斯洋晚三叠世的西向俯冲形成,其上发育有三江地区规模最大、保存最完整的弧岩浆岩^[1],是三江构造—岩浆—成矿带的重要组成部分。以金沙江缝合线为界,其西为羌塘地块,以甘孜—理塘缝合线为界,其东为称为“地质百慕大”的松潘甘孜褶皱带^[2](图1a)。因其独特的地理位置对于研究青藏高原和古特提斯洋的演化具有十分重要的意义。自20世纪90年代以来,国内外学者针对区内火山—侵入(斑)岩及有关矿床陆续开展了岩石学^[3-7]、矿床学^[8-10]、年代学^[11-13]、成矿流体演化^[14-16]等方面的一系列研究,取得了丰硕的研究成果,但在区域构造—岩浆演化^[4,17,18]、洋盆的开闭时间及其动力学背景^[19-26]、中咱微陆块的来源^[21,26-28]、以及火山弧的属性等方面仍存在着较大的争议,尤其对于该地体的前寒武系基底岩石的研究还十分薄弱。郝子文和俞如龙^[29]认为义敦岩浆弧形成于洋壳之上,为典型的岛弧构造环境,而侯立玮等^[30]则认为该岩浆弧形成于陆壳之上,为大陆边缘弧环境。最近Leng等^[4]认为义敦地体北段的昌台弧发育于洋壳之上,而南段的中甸弧发育于陆壳之上。区内几乎全部被三叠纪火山—沉积岩所覆盖可能是造成上述不同认识的主要原因。前人通过对义敦地体晚三叠世砂岩中碎屑锆石、晚三叠世火山—侵入岩中继承锆石的研究发现,锆石年龄存在3个年龄谱峰(2.5~2.3 Ga、1.9~1.7 Ga及和0.9~0.7 Ga),可与扬子板块元古代多期岩浆活动相对应。花岗岩Nd同位素和锆石Hf同位素模式年龄也显示义敦地体存在晚古元古代—早中元古代的地壳物质^[1,4,5],但仍缺乏关于这些前寒武系变质基底的直接地质证据。

开展对义敦地体前寒武系变质岩的研究对于探讨该地体的基底属性以及岩浆弧的演化具有十

分重要的意义。恰斯群出露于义敦地体东南缘的“恰斯”断隆之上^[28,31],是义敦地体东带唯一出露的前寒武系地层,由一套浅变质的火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩组成^[32-34]。本文通过对该套变质岩中的石榴子石云母片岩、绿泥石云母片岩进行详细的岩相学研究,并结合全岩主微量和电子探针微区分析,对上述2类片岩进行了原岩恢复,使用传统地质温压计方法估算了石榴子石云母片岩形成的温压条件。

1 区域地质背景

义敦地体位于青藏高原东南缘,呈豆荚状夹持于羌塘地块和松潘甘孜褶皱带之间,是三江地区规模最大、保存最完整的古火山弧^[1,4,37]。以乡城—格咱断裂为界,该地体可分为东、西2个带。西带,又叫中咱微陆块,主要由古生代碳酸盐岩、碎屑岩和少量的基性火山岩组成,在巴塘等地出露新元古代变质基底^[32,37],因其古生代沉积地层和古生物化石与扬子板块西缘相似,从而被认为具有扬子板块的亲缘性,由于二叠纪峨眉山地幔柱活动使甘孜—理塘洋打开而与扬子板块西缘逐渐分离^[21,22]。义敦地体东带出露地层以三叠系为主,其下、中统为碎屑岩夹碳酸盐岩、硅质岩,上统为复理石砂板岩夹火山岩,仅在其南段木里县水洛乡、宁朗乡和稻城县各瓦乡恰斯等地零星出露前寒武系变质基底^[34],主要由一套浅变质火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩组成(图1b)。前人根据岩石组合、产出层位、古生物化石和同位素年代学等资料,认为恰斯群与扬子板块西缘的河口群相当^[33],但最新的年代学资料表明河口群不同层位变质凝灰岩和辉长岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄分别为1679~1708 Ma、(1657±12) Ma^[38],而恰斯群变火山岩中锆石的LA-ICP-MS U-Pb谱和年龄则为(822±2) Ma(课题组未发表资料)。因此,我们认为恰斯群与河口群并不相当,而应与扬

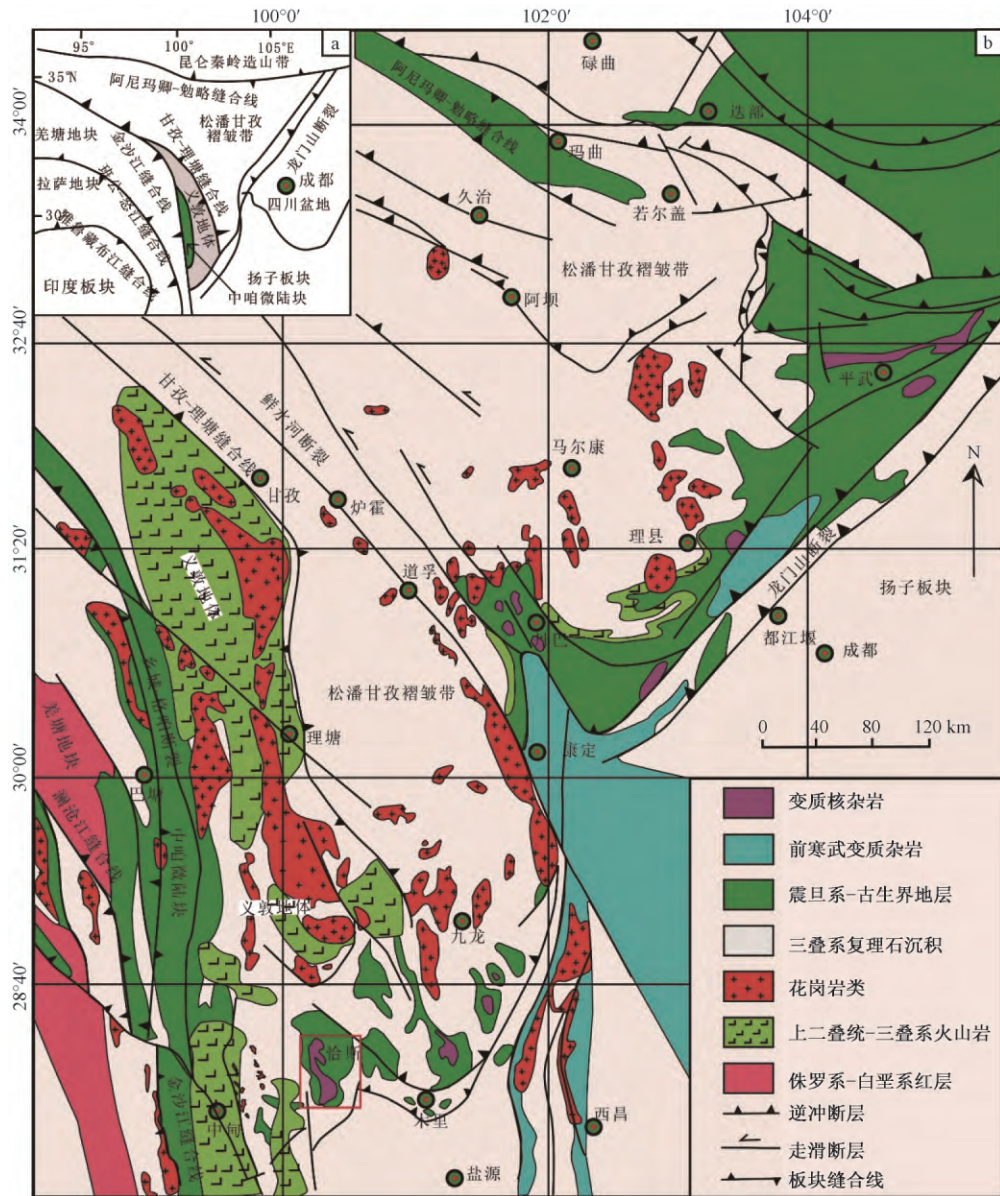


图 1 义敦地体及邻区地质简图(修改自文献[35-36])

Fig.1. Simplified geological map of Yidun terrane and adjacent regions.

子板块西缘新元古康定群(或苏雄组)对比^[39-41]。

义敦地体内岩浆活动强烈,经历了印支期的洋壳俯冲(237~207 Ma)、燕山早期弧陆碰撞(207~138 Ma)、燕山晚期板内伸展(135~75 Ma)和喜山期陆内汇聚(64~15 Ma)4个演化阶段^[3,18]。NW向断裂和NW向褶皱发育对地层和岩浆活动起着重要的控制作用^[12]。由金沙江洋和甘孜-理塘洋分别于早三叠世、晚三叠世相继闭合而发生弧陆碰撞以及喜山期印度板块和欧亚板块碰撞,使区内经历3次变形变质作用。其中,早、晚三叠世的2次弧陆碰撞,是造成区内变形变质的主要原因^[42-43]。2期变形均以发育直立褶皱为特

征,早期变形使区域普遍发生加厚和层间滑脱,第2期变形使区内发生压扭性的缩短^[42],喜山期印度和欧亚板块碰撞使区内形成一系列的走滑断裂^[43]。

2 样品和分析方法

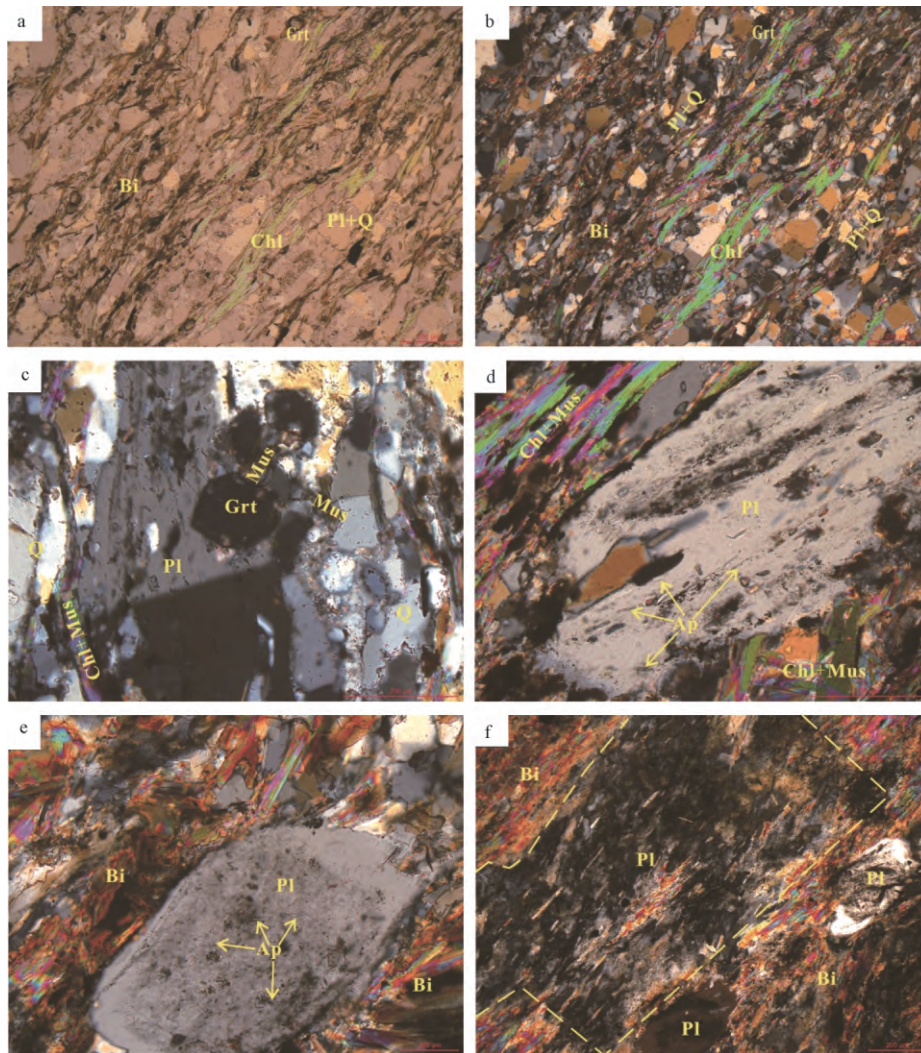
本次研究的代表性样品全部采自稻城县格瓦乡卡斯村附近,共计18件。所有测试样品均碎至200目以下,主量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司采用X射线荧光光谱分析仪(XRF)完成,微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用电感耦合等

离子体质谱(ICP-MS)完成,分析精度优于5%。通过详细的镜下鉴定工作,选取石榴子石云母片岩和绿泥石云母片岩中的石榴子石、斜长石、白云母、黑云母、绿泥石为研究对象,在中国冶金地质总局山东局分析测试中心进行电子探针分析,仪器型号为JXA8230,分析精度优于5%。斜长石分析的测试电压为15 kV,工作电流为 1×10^{-8} A,束斑大小为8 μm 或10 μm ;石榴子石分析测试电压为15 kV,测试电流为 2×10^{-8} A,束斑大小为2 μm ;黑云母、白云母分析的测试电压为15 kV,工作电流为 2×10^{-8} A,束斑大小为2 μm 或10 μm ;绿泥石分析的测试电压为15 kV,工作电流为 2×10^{-8} A,束斑大小为4 μm 或8 μm 。在样品分析过程中,对同种矿物不同颗粒、同一颗粒不同位置进行微区分析。

3 岩石学特征

选取石榴子石云母片岩(样品DC15-11、DC15-17)和绿泥石云母片岩(样品DC15-12、DC15-18)各2件进行描述。

石榴子石云母片岩为黄褐色、红褐色,主要由斜长石、石英、白云母或黑云母、石榴子石、绿泥石组成,见微量的钛铁矿、磷灰石、锆石,具变余砂状结构(图2a,b)、鳞片变晶结构(图2d),片状构造。石榴子石多数为六边形、少量为不规则状,颗粒普遍较小,粒径一般为50~70 μm ,大者可达120 μm 。石榴子石颗粒内部未见有其他矿物包裹体(图2c),边部矿物主要为石英、黑云母或白云母、斜长石。DC15-11样品中云母为黑云母,靠近石榴子石边部长石为更长石,远离石榴子石为



a、b-样品 DC15-11 岩相学特征; c、d-样品 DC15-17 岩相学特征; e、f-样品 DC15-18 岩相学特征

图2 恰斯群两类云母片岩显微岩相特征

Fig.2. Photomicrographs of two types of mica-schists from the Qiasi Group.

中长石; DC15-17 样品中云母为白云母, 石榴子石边部长石主要为中长石, 远离石榴子石变斑晶的基质中长石为钠长石。根据岩石的矿物组合特征, 说明岩石经历了高绿片岩相变质作用^[44]。

绿泥石云母片岩为浅绿色、灰绿色, 主要由黑云母、白云母、绿泥石、斜长石、石英组成, 副矿物为锆石、钛铁矿、磷灰石; 具鳞片变晶结构, 片状构造。斑晶主要由斜长石组成, 斜长石中见有针状磷灰石(图 2e), 部分斜长石已发生蚀变, 形成筛

状结构(图 2f)。DC15-12 样品含两种斜长石, 分别为中长石和更长石; 而 DC15-18 样品中为钠长石, 钠长石斑晶中含有针状磷灰石包裹体;。根据矿物组合特征, 说明岩石可能经历了低绿片岩相变质作用^[44]。

4 岩石地球化学特征

恰斯群 2 类云母片岩的岩石化学成分见表 1。除了 1 件绿泥石云母片岩(DC15-12) 具有较

表 1 恰斯群云母片岩主量元素、微量元素、稀土元素分析结果

Table 1. Analytical results of major and trace elements for mica-schists from the Qiasi Group

样品	DC15-12	DC15-14	DC15-15	DC15-18	DC15-17	DC15-22
	绿泥石云母片岩	绿泥石云母片岩	绿泥石云母片岩	绿泥石云母片岩	石榴子石云母片岩	石榴子石云母片岩
$w_B / \%$						
SiO ₂	48.4	56.0	54.4	56.7	61.4	63.3
TiO ₂	0.85	0.69	0.69	0.80	0.79	0.75
Al ₂ O ₃	25.7	20.9	21.5	21.3	16.6	17.2
Fe ₂ O ₃	7.26	8.27	8.46	6.84	6.33	6.13
MnO	0.10	0.11	0.10	0.06	0.05	0.06
MgO	2.58	2.42	2.28	2.24	1.69	1.86
CaO	0.53	1.37	1.30	0.60	1.50	1.32
Na ₂ O	0.48	1.44	1.26	1.28	3.18	2.39
K ₂ O	7.70	4.14	4.63	6.41	3.40	4.12
P ₂ O ₅	0.19	0.15	0.19	0.15	0.18	0.20
LOI	5.37	3.42	4.18	2.96	3.76	1.92
Total	99.1	99.0	99.0	99.3	98.9	99.2
$w_B / 10^{-6}$						
Cs	9.04	6.51	6.79	11	16	8.49
Rb	234	150	184	215	151	165
Ba	810	622	631	1050	507	773
Th	24.80	23.1	23	23.3	16.8	21.50
U	2.61	3.92	3.89	4.04	3.95	4.91
Ta	1.64	1.20	1.28	1.47	1.33	1.33
Nb	18.33	15.9	16.8	18.2	16.5	17.3
Sr	110	217	139	144	208	203
Y	20.70	35.8	37.5	35.1	32.9	46
Zr	119	99.1	97.9	135	176	222
Hf	3.52	2.90	2.84	3.99	5.01	6.26
La	56.10	58.7	62.4	61.5	47.6	82.8
Ce	101	106	115	114	90.90	142
Pr	11.80	13.6	13.4	14.1	10.7	18.7
Nd	41.90	47.0	50	51.40	39.80	69.10
Sm	7.30	9.06	9.42	9.52	7.45	12.60
Eu	1.27	1.74	1.95	1.72	1.62	2.67
Gd	5.56	7.98	8.71	7.98	6.86	11.33
Tb	0.74	1.13	1.18	1.14	0.97	1.60
Dy	4.04	6.68	6.81	6.62	5.86	8.87
Ho	0.84	1.47	1.52	1.44	1.36	1.83
Er	2.37	3.95	4.18	3.94	3.83	4.83
Tm	0.30	0.53	0.53	0.50	0.50	0.62
Yb	2.25	3.70	3.70	3.63	3.59	4.13
Lu	0.29	0.46	0.49	0.47	0.48	0.54

低的 $w(\text{SiO}_2)$ (48.36%) 之外, 其他样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 集中在 54.36% ~ 56.66% (平均值为 55.68%, 下文同); 高的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 20.99% ~ 25.72% (22.39%); $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.69% ~ 0.85% (0.76%); $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 6.84% ~ 8.46% (7.71%); $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 5.58% ~ 8.18% (6.84%)。石榴子石云母片岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 61.36% ~ 63.28% (62.32%); $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 16.24% ~ 17.21% (16.73%); $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.75% ~ 0.79% (0.77%); $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 6.13% ~ 6.33% (6.23%); $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 6.51% ~ 6.58% (6.55%)。绿泥石云母片岩较石榴子石云母片岩, 具有相对较低的 $w(\text{SiO}_2)$ 和较高的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 和 MgO 质量分数, TiO_2 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 质量分数相近, 可能与绿泥石云母片岩中含有较多的绿泥石有关。总的来讲, 两类云母片岩均呈现出 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{MgO} > \text{CaO}$ 的地球化学特征, 显示其原岩可能为沉积岩。

在原始地幔标准化的蛛网图中(图 3 a) 2 类云母片岩具有相似的配分形式, 均富集 K、Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE), 显示出明显的“TNT”负异常。由于 Rb 和 Ba 主要赋存在含钾矿物(如黑云母)中, 与 K 发生类质同相替代, 而 Sr 主要赋存在含钙的矿物(如斜长石)中, 与 Ca 发生类质同相替代^[45]。因此, 样品中富集 Rb、Ba 而亏损 Sr 的地球化学特征与样品中含有较多的黑云母、白云母和少量的斜长石有关。

恰斯群 2 类云母片岩的稀土元素(REE) 质量分数见表 1。绿泥石云母片岩 ΣREE 质量分数为 $235.77 \times 10^{-6} \sim 279.30 \times 10^{-6}$ (263.76×10^{-6}),

LREE/HREE 为 9.12 ~ 13.38 (10.40), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 11.38 ~ 17.88 (13.38), δEu 为 0.59 ~ 0.65 (0.61)。石榴子石云母片岩 ΣREE 质量分数为 $221.52 \times 10^{-6} \sim 361.61 \times 10^{-6}$ (291.57×10^{-6}), LREE/HREE 为 8.45 ~ 9.72 (9.08), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 9.51 ~ 14.38 (11.95), δEu 为 0.67 ~ 0.68 (0.68)。在球粒陨石标准化的配分型式图中(图 3b) 2 类云母片岩具有相似的稀土配分形式, 均富集轻稀土, 亏损重稀土, 轻重稀土分馏显著, 具有明显的铕异常。与后太古宙澳大利亚页岩(PAAS) 具有相似的 REE 配分形式。

5 矿物化学成分特征

通过详细的岩相学和背散射图像观察, 确认石榴子石云母片岩的矿物组成主要为斜长石、石英、白云母或黑云母、石榴子石和绿泥石, 另还有微量的钛铁矿、磷灰石、锆石; 绿泥石云母片岩主要矿物组成为黑云母、白云母、绿泥石、斜长石和石英, 另含微量的钛铁矿、磷灰石。我们选取石榴子石、黑云母、白云母、斜长石、绿泥石进行了电子探针分析, 其具体分析结果见表 2。

5.1 石榴子石

石榴子石是变质岩中最重要的矿物之一, 广泛出现于绿帘-角闪岩相到高压榴辉岩相的变质岩中, 也是过铝质花岗岩和矽卡岩中常见的矿物^[44, 47]。在岩浆冷却过程中, 岩浆中 $w(\text{Mn}) / w(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比值逐渐升高, 导致石榴子石边部最富集 Mn, 所以花岗岩中石榴子石化学成分常呈现出反环带的特征, 即从核部向边部, 锰铝榴石质量分数增加, 铁铝榴石质量分数降低; 有时也呈现出振

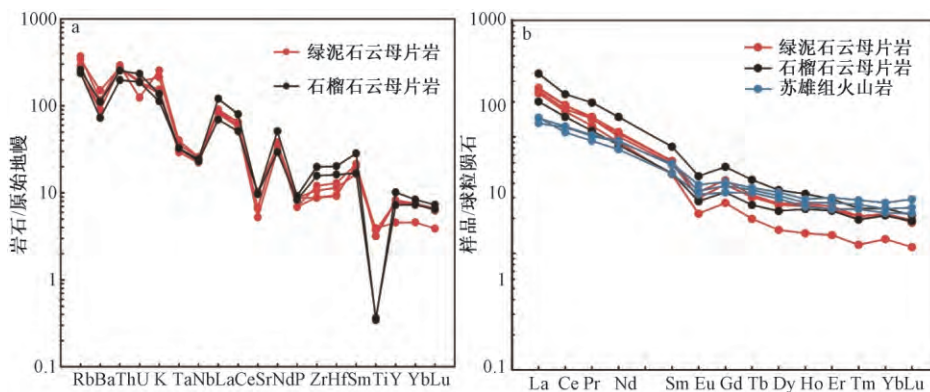


图 3 恰斯群 2 类云母片岩微量元素蛛网图(a) 和稀土元素配分图(b) (原始地幔、球粒陨石和 PAAS 数据转引自文献[46])

Fig.3. Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram(a) and Chondrite-normalized rare earth element diagram(b) for two types of mica-schists from the Qiasi Group

表 2 石榴子石云母片岩代表性矿物电子探针分析结果

Table 2. Electron microprobe analyses of compositions of representative minerals in garnet-bearing mica-schist

样品号		DC15-11(石榴子石云母片岩)											
矿物	Grt-C	Grt-M	Grt-M	Grt-R	Bi-R	Bi-R	Bi	Pl-R	Pl-R	Pl	Chl	Chl	
$w_B/\%$	SiO ₂	37.25	37.48	37.65	37.96	34.73	36.16	34.74	62.18	60.37	57.36	27.03	25.09
	TiO ₂	0.06	0.06	0.10	0.06	1.69	1.55	2.08	0.05	0.05	0.03	0.25	0.13
	Al ₂ O ₃	20.51	20.44	20.44	20.89	18.20	19.33	17.81	24.29	24.73	27.44	20.34	20.04
	FeO	23.99	23.49	24.96	26.86	21.64	21.74	21.23	0.04	0.13	0.16	26.61	31.36
	MnO	11.87	10.45	7.62	5.57	0.13	0.15	0.11	0.03	0.02	0.00	0.34	0.69
	MgO	0.59	0.44	0.45	0.64	7.80	8.08	7.42	0.00	0.00	0.00	11.25	10.12
	CaO	5.97	7.83	9.00	9.05	0.08	0.21	0.15	5.42	6.56	9.15	0.20	0.27
	Na ₂ O	0.03	0.09	0.05	0.00	0.06	0.13	0.10	8.36	7.45	6.08	0.11	0.02
	K ₂ O	0.00	0.03	0.00	0.00	9.36	8.26	8.54	0.06	0.07	0.04	1.41	0.01
	Total	100.27	100.31	100.27	101.03	93.69	95.61	92.18	100.43	99.38	100.26	87.54	87.23
n_B	O	12.00	12.00	12.00	12.00	11.00	11.00	11.00	8.00	8.00	8.00	14.00	14.00
	Si	3.01	3.02	3.03	3.02	2.73	2.75	2.76	2.74	2.70	2.56	2.86	2.74
	Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.09	0.12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
	Al	1.96	1.94	1.94	1.96	1.68	1.73	1.66	1.26	1.30	1.44	2.56	2.58
	Fe	1.62	1.58	1.68	1.79	1.42	1.38	1.41	0.00	0.00	0.01	2.35	2.86
	Mn	0.81	0.71	0.52	0.38	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06
	Mg	0.07	0.05	0.05	0.08	0.91	0.92	0.88	0.00	0.00	0.00	1.77	1.65
	Ca	0.52	0.68	0.78	0.77	0.01	0.02	0.01	0.26	0.31	0.44	0.02	0.03
	Na	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.71	0.65	0.53	0.05	0.01
	K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.80	0.86	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00
x_B	Sps	0.27	0.24	0.17	0.12								
	Prp	0.02	0.02	0.02	0.03								
	Grs	0.17	0.22	0.26	0.26								
	Alm	0.54	0.52	0.55	0.59								
样品号		DC15-17(石榴子石云母片岩)											
矿物	Grt-R	Grt-M	Grt-M	Grt-C	Grt-M	Grt-M	Grt-R	Mus-R	Mus-R	Pl-R	Pl-R	Pl	
w_B	SiO ₂	37.66	37.36	37.41	37.12	37.48	37.43	37.32	48.21	45.58	59.90	59.88	68.85
	TiO ₂	0.07	0.13	0.12	0.07	0.11	0.10	0.09	0.34	0.25	0.00	0.00	0.00
	Al ₂ O ₃	20.77	20.59	20.36	20.54	20.71	20.52	20.65	33.74	32.75	25.34	24.91	19.14
	FeO	28.37	27.85	24.96	25.24	25.26	25.48	26.83	1.70	1.63	0.14	0.17	0.01
	MnO	4.5	4.60	7.57	8.07	7.96	6.76	4.41	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00
	MgO	0.63	0.66	0.53	0.51	0.61	0.57	0.78	1.16	0.93	0.00	0.00	0.01
	CaO	8.53	8.61	8.38	8.10	7.67	8.88	8.92	0.05	0.00	6.90	6.73	0.09
	Na ₂ O	0.03	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00	0.04	0.68	0.65	7.35	7.64	11.39
	K ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	10.06	9.80	0.07	0.09	0.06
	Total	100.27	100.31	100.27	101.03	93.69	95.61	92.18	100.43	99.38	100.26	87.54	87.73
n_B	O	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12	12.00	11.00	11	8.00	8.00	8.00
	Si	3.02	3.01	3.03	3.01	3.02	3.02	3.02	3.18	3.15	2.67	2.68	3.01
	Ti	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
	Al	1.96	1.96	1.95	1.96	1.97	1.95	1.97	2.62	2.67	1.33	1.31	0.99
	Fe	1.90	1.88	1.69	1.71	1.70	1.72	1.82	0.09	0.09	0.01	0.01	0.00
	Mn	0.31	0.31	0.52	0.55	0.54	0.46	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mg	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00
	Ca	0.73	0.74	0.73	0.70	0.66	0.77	0.77	0.00	0.00	0.33	0.32	0.00
	Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.09	0.09	0.64	0.66	0.97
	K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.86	0.00	0.00	0.00
x_B	Sps	0.10	0.10	0.17	0.18	0.18	0.15	0.10					
	Prp	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03					
	Grs	0.24	0.25	0.24	0.23	0.22	0.25	0.26					
	Alm	0.63	0.62	0.56	0.56	0.57	0.57	0.61					

注: Grt-C-石榴子石核部; Grt-M-石榴子石幔部; Grt-R-石榴子石边部; Bi-R-石榴子石边部的黑云母; Mus-R-石榴子石边部的白云母; Pl-R-石榴子石边部的斜长石; Sps-锰铝榴石; Prp-镁铝榴石; Grs-钙铝榴石; Alm-铁铝榴石

荡环带的特征^[47-48]。与矿化有关的矽卡岩中石榴子石常出现振荡环带,且从靠近侵入体向远离侵入体的围岩中,石榴子石的颜色会逐渐变浅^[49]。变质成因的石榴子石化学成分首先受原岩类型的控制,在变质泥质岩中形成铁铝榴石,在钙硅酸盐岩石中形成钙铝-铁铝榴石,其化学成分环带可分为生长环带和扩散环带。生长环带往往形成于进变质反应阶段,从核部向边部,铁铝榴石质量分数升高,锰铝榴石质量分数降低,镁铝榴石质量分数增加,钙铝榴石质量分数增加^[50],而扩散环带往往在变质峰期后的退变质反应过程中发生离子交换反应形成^[50]。

DC15-11 样品中石榴子石成分主要为铁铝榴石 ($x(\text{Alm}) = 0.52 \sim 0.59$),其次为钙铝榴石 ($x(\text{Grs}) = 0.17 \sim 0.26$)、锰铝榴石 ($x(\text{Sps}) = 0.12 \sim 0.27$) 和少量的镁铝榴石 ($x(\text{Prp}) = 0.02 \sim 0.03$) 组成(图 4 表 2)。石榴子石具有微弱的化学成

分环带(图 5),从核部到边部 $x(\text{Alm})$ 升高(0.54 → 0.59) $x(\text{Grs})$ 升高(0.17 → 0.24) $x(\text{Prp})$ 略微升高(0.02 → 0.03) 而 $x(\text{Sps})$ 降低(0.27 → 0.12),显示生长环带特征。DC15-17 样品中石榴子石化学成分主要为铁铝榴石 ($\text{Alm} = 0.56 \sim 0.63$),其次为钙铝榴石 ($\text{Grs} = 0.22 \sim 0.26$)、锰铝榴石 ($\text{Sps} = 0.10 \sim 0.18$) 和少量的镁铝榴石 ($\text{Prp} = 0.02 \sim 0.03$) 组成(表 2)。石榴子石具有微弱的化学成分环带(图 5) 从核部到边部 $x(\text{Alm})$ 升高(0.56 → 0.63) $x(\text{Grs})$ 先升高后(0.22 → 0.25) 在边部又略微降低(0.25 ~ 0.24) $x(\text{Prp})$ 略微升高而 $x(\text{Sps})$ 降低(0.18 → 0.09)。其中锰铝榴石组分呈现出“钟型”的特点,代表了进变质生长环带特征^[50,51]。

5.2 斜长石

斜长石具体化学成分见表 2。在 DC15-11 样品中,斜长石可分为中长石和更长石(图 6),石榴子石边部斜长石主要为更长石 ($\text{An} = 0.26 \sim 0.30$),少数为中长石 ($\text{An} = 0.30 \sim 0.33$);而远离石榴子石的基质中斜长石为中长石 ($\text{An} = 0.45$),相比石榴子石边部的斜长石具有较低的 SiO_2 质量分数和较高的 CaO 质量分数。DC15-12 样品中,斜长石成分为中长石和拉长石(图 6),DC15-17 样品中,石榴子石边部斜长石为中长石,远离石榴子石的基质中为钠长石 ($\text{Ab} = 99$),且基质中长石具有十分相似的化学成分特征(图 6),表明基质中矿物组合已达到热力学平衡,DC15-18 样品中斜长石为钠长石(图 6)。DC15-11 中,石榴子石边部的斜长石相对于基质中斜长石更贫钙富钠,这与石榴子石从核部到边部钙铝榴石质量分数升高相呼应。在温度和成分一定的情况下,钙在共生的石榴子石-斜长石矿物对之间的分配主要受压力影响,压力越大,钙越倾向于分配到石榴

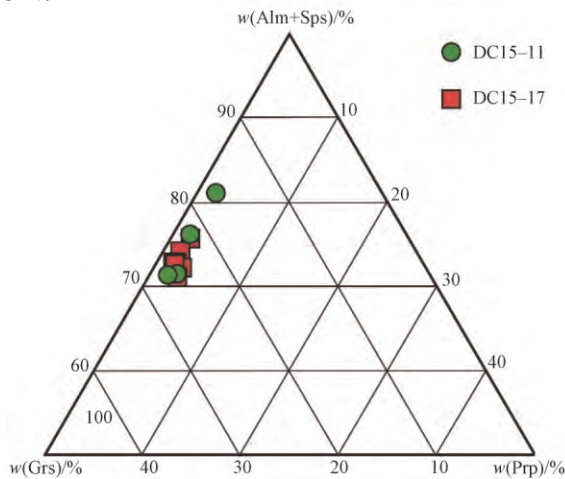


图 4 石榴子石云母片岩中石榴子石成分特征

Fig.4. Compositional features of garnets in garnet-bearing mica schist.

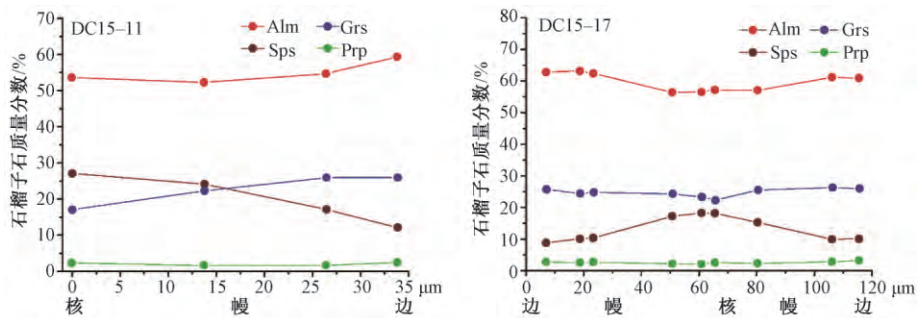


图 5 石榴子石云母片岩中石榴子石成分剖面

Fig.5. Profiles of compositional variation across garnet grains in garnet-bearing mica schist

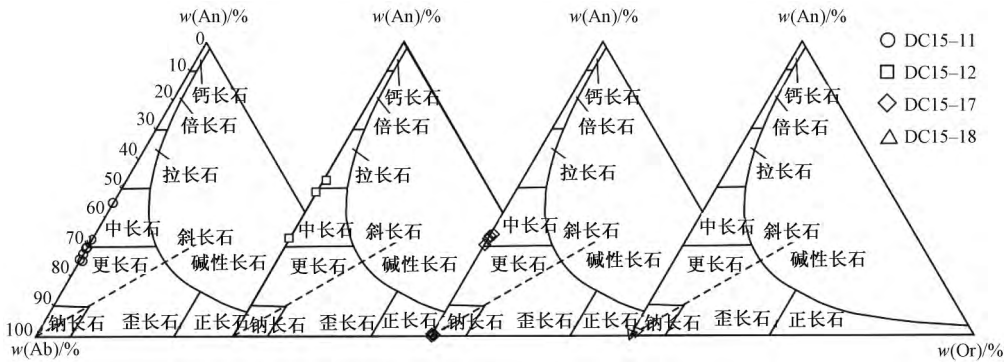


图6 恰斯群2类云母片岩中斜长石化学成分特征

Fig.6. Chemical compositions of plagioclases in two types of mica-schists from the Qiasi Group.

子石中,说明变质峰期压力较高,钙从斜长石逐渐迁移到石榴子石中^[52]。DC15-17样品中,石榴子石边部斜长石相对于基质中斜长石更富钙贫钠,说明石榴子石边部分解过程中,钙从石榴子石边部迁移到斜长石中^[52,53]。

5.3 云母

在DC15-11样品中,云母主要为黑云母。石榴子石边部的黑云母具有较低的 $w(\text{TiO}_2)$ 和较高的 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{MnO})$,而远离石榴子石的基质中黑云母则具有质量分数较高的 $w(\text{TiO}_2)$ 和较低的 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{MnO})$,表明基质中黑云母的形成较石榴子石边部的黑云母具有更高的温度^[54]。在DC15-17样品中,云母主要为白云母,其电子探针分析结果列于表2。其 SiO_2 质量分数介于45.58%~48.21%,以11个氧原子标准化后的Si原子数介于3.13~3.18,平均值为3.15,为多硅白云母。多硅白云母可以分为低硅($n(\text{Si}) < 3.3$)、中硅($3.3 < n(\text{Si}) < 3.5$)和高硅($n(\text{Si}) > 3.5$)3种类型^[55]。其中高压变质岩中多硅白云母Si原子数大于3.3,超高压榴辉岩中多硅白云母Si原子数常大于3.4^[55-57]。DC15-12和DC15-18样品中白云母 $w(\text{SiO}_2)$ 介于48.23%~51.91%,以11个氧原子标准化后的Si原子数介于3.24~3.33,平均值为3.28,属于低硅的多硅白云母。绿泥石云母片岩较石榴子石云母片岩具有较高的Si原子数(图7),且二者属于低硅的多硅白云母,说明其形成于中低压的变质环境。

5.4 绿泥石

绿泥石是低级变质标志性矿物之一,广泛分布于低级变质岩石当中^[58]。绿泥石云母片岩中绿泥石 $w(\text{SiO}_2)$ 为24.26%~25.16%, Al_2O_3 质量

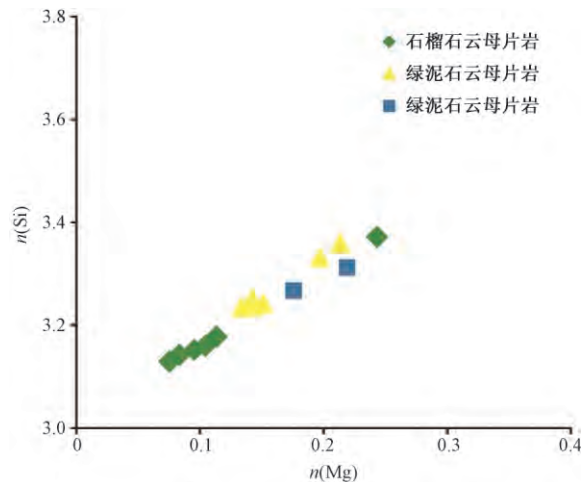


图7 恰斯群2类云母片岩中白云母Si-Mg图解

Fig.7. A plot of Si-Mg values for muscovite in two types of mica-schists from the Qiasi Group.

分数为20.78%~21.51%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为26.16%~28.85%, $w(\text{MgO})$ 为11.96%~14.00%,在Si-Fe/(Fe+Mg)图解中落入蠕绿泥石范围(图8)。石榴子石云母片岩中绿泥石 $w(\text{SiO}_2)$ 为25.09%~27.03%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为20.04%~20.34%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为26.62%~31.36%, $w(\text{MgO})$ 为11.25%~10.12%,Si-Fe/(Fe+Mg)图解中,样品落入蠕绿泥石和密绿泥石范围(图8)。

6 讨论

6.1 原岩恢复

变质岩原岩恢复主要通过地质产状、岩石共生组合、结构构造、岩石地球化学特征和岩石中的副矿物进行^[44,46]。其中,变余结构和变余构造是恢复原岩性质最可靠的标志,但在变质过程中原岩的组构经常难以保留下来。岩石地球化学方法是判别变质岩原岩性质最实用且行之有效的

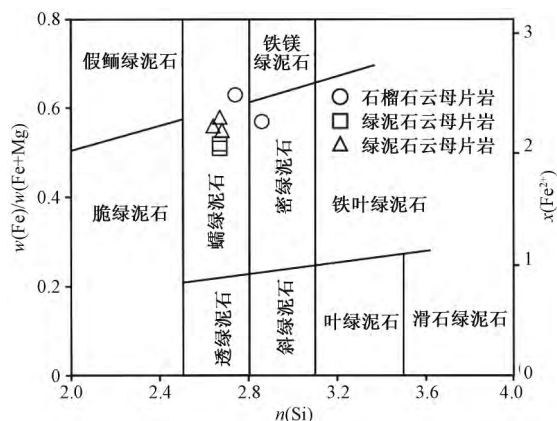


图 8 恰斯群 2 类云母片岩绿泥石分类图解
Fig.8. Classification of chlorites in two types of mica-schists from the Qiasi Group.

方法之一^[46]。Shaw^[59]针对 $w(\text{SiO}_2)$ 大于 53.5% 的变质岩建立了原岩恢复判别函数, 其中正变质岩 I_{DF} 值大于零, 副变质岩 I_{DF} 值小于零。绿泥石云母片岩 I_{DF} 值变化于 -0.18 ~ -1.25 之间, 平均值为 -0.76; 石榴子石云母片岩 I_{DF} 值变化于 -0.18 ~ 1.18 之间, 平均值为 0.5。西蒙南图解可以有效的区分正、负变质岩, 如图 9 所示 2 类云母片岩均落入泥岩附近, 说明两类云母片岩的原岩为沉积岩。稀土元素在变质过程中性质较稳定, 不易受到后期地质作用的影响, 因而能保留原岩的地球化学特征。在 $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 图解(图 10)中, 两类云母片岩也落入砂质岩、杂砂岩、页岩和粘土岩区域, 指示其原岩为沉积岩。此外 2 类云母片岩发育变余砂状结构和鳞片变晶结构, 说明其原岩可能为砂岩或泥质砂岩。

6.2 $p-t$ 条件估算

石榴子石-黑云母温度计是泥质变质岩和长英质变质岩中常用的温度计, 经过了多次经验标定和 3 次实验的标定, 可用于高绿片岩相至麻粒岩相变质作用, 适用温度范围较宽, 可与石榴子石-黑云母-斜长石-石英(GBPQ)压力计构成内洽的温度计-压力计组合^[61]。恰斯群石榴子石云母片岩中石榴子石以铁铝榴石为主, 从核部到边部, 镁铝榴石质量分数增加, 锰铝榴石质量分数降低, 钙铝榴石质量分数升高, 为典型的生长环带, 说明石榴子石在生长过程中温度、压力逐渐升高。因此, 石榴子石边部的温压条件可近似代表变质峰期的温-压条件。本文选取石榴子石-黑云母温度计^[62]和 GBPQ 压力计^[63]对样品 DC15-11 进行温

度、压力估算, 计算得到的变质峰期 $p-t$ 条件为 480 °C / 0.65 ~ 0.79 MPa。由于 DC15-17 样品中石榴子石边部受到退变质扩散的影响, 我们选择略微远离石榴子石边部的成分进行温压计算。采用石榴子石-白云母温度计^[64]和石榴子石-白云母-斜长石-石英(GMPQ)压力计^[64]得到的变质峰期 $p-t$ 条件为 460 ~ 470 °C / 0.57 ~ 0.60 MPa。2 个样品记录的变质峰期 $p-t$ 条件略有差异, 可能由于: 1) 使用不同温压计计算所带来的误差^[53, 65]; 2) DC15-17 样品中石榴子石边部受到后期退变质扩散的影响, 虽然选取远离石榴子石边部的成分进行了温压条件的估算, 但仍不能真实的代表石榴子石变质高峰期边部的成分^[65]。但总的来说, 2 种温压计变质峰期 $p-t$ 条件的估算均说明岩石经历了绿片岩相变质作用。

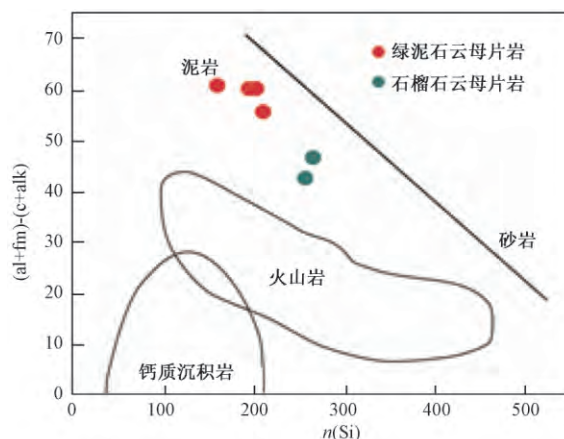


图 9 恰斯群 2 类云母片岩西蒙南图解(转引自文献[60])
Fig.9. Simonen diagram for two types of mica-schists from the Qiasi Group.

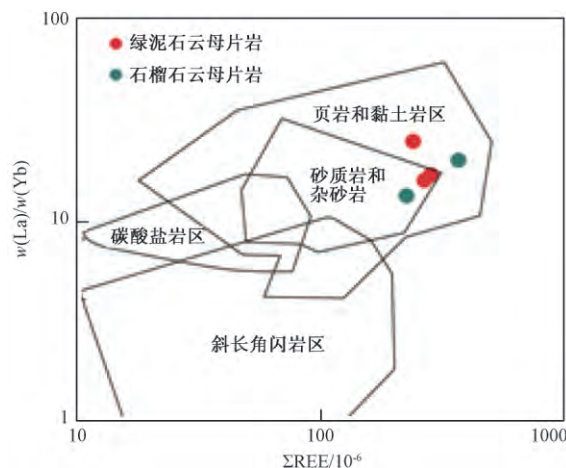


图 10 恰斯群 2 类云母片岩的 $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 图解(转引自文献[60])

Fig.10. A plot of $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ for two types of mica-schists from the Qiasi Group.

青藏高原东缘分布着数十个大小不等的穹状变质体,如丹巴、恰斯、江浪、长枪、雪隆包、彭灌、格宗、公差等^[33,36,66,67]。多数变质体的核部由前寒武系结晶基底组成,前人对丹巴、格宗、公差、雪隆包进行了地球化学、年代学、变质岩石学的研究,其中以丹巴的研究最为显著^[33,66-70]。Huang等^[67]认为丹巴穹状变质体发生了典型的巴罗式变质作用,并根据矿物组合划分出绢云母-绿泥石带、黑云母带、石榴子石带、十字带、蓝晶石带和夕线石带6个变质带,通过传统的地质温压计和平衡模拟的方法构筑了顺时针的 $P-T-t$ 演化轨迹^[67-69,71],认为在晚三叠世,青藏高原东缘由于羌塘、扬子和华北三大板块的相互作用,使区内经历了重要的地壳加厚过程,发生巴罗式变质作用^[66]。但是,恰斯一带的变质程度明显低于丹巴、公差等地区,游振东等^[66]认为这一差异是由陆壳加厚过程中区域热流不均一所造成的。中生代侵入体热年代学的研究资料表明,义敦地体与松潘甘孜褶皱带在中生代具有不同的热年代学历史。与松潘甘孜褶皱带相比,义敦地体在中生代(240~218 Ma)经历了快速的冷却过程,其西带冷却速率至少为近20 °C/Ma,东带冷却速率为20~40 °C/Ma^[43]。在早侏罗世,整个义敦地体温度已普遍低于300 °C^[43]。杜其良^[34]通过全岩K-Ar法测得恰斯群变质岩经历了253 Ma、191 Ma和111 Ma三期变质作用。我们认为前2期变质作用可分别与早中三叠世羌塘地块与中咱微陆块碰撞、晚三叠世-早侏罗世义敦地体与松潘甘孜褶皱带碰撞相对应,第3期变质作用可能与燕山晚期的板内伸展作用所导致的热事件有关。结合热年代学的资料^[43],我们认为在晚三叠世华北板块与扬子板块碰撞过程中,主要使松潘甘孜褶皱带发生变形变质作用,由于义敦地体位于松潘甘孜褶皱带西南缘,三叠纪巨厚的复理石沉积使区域的挤压应力得以缓冲,并未对义敦地体造成明显的变质作用,义敦地体内的变质作用则可能主要与羌塘地块、义敦地体和松潘甘孜褶皱带相互作用有关。由于金沙江洋早中三叠世闭合,羌塘地块与中咱微陆块发生碰撞,使义敦地体西带发生明显的变形变质作用^[1,42,43,72]。由于甘孜-理塘洋于三叠纪末闭合,松潘甘孜褶皱带与义敦地体东带发生碰撞,从而导致东带发生绿片岩相变质作用^[43]。相比松潘甘孜褶皱带,义敦地体在中生代经历了快速的冷却过程^[43],说明由于义敦地体与

羌塘地块和松潘甘孜褶皱带相继发生碰撞,使该地体地壳加厚并经历了快速的抬升过程,区内侏罗系和白垩系地层的缺失^[33],说明在三叠纪末期该地体可能已经抬升至地表。

6.3 义敦地体发育于薄陆壳之上?

侯增谦^[73]根据岩浆密度与地壳厚度的关系,提出义敦地体北段昌台地区形成于薄陆壳之上,地壳厚度与地层累计厚度相一致,大约为20~25 km^[28,31,74]。由于义敦地体几乎全部被晚三叠世复理石沉积所覆盖,限制了对区内前寒武系变质基底岩石的研究,因此在之后的研究当中认为义敦地体整体发育于薄陆壳之上^[1,7,28,31,75]。义敦地体内发育大量的中酸性侵入体,在南段中甸地区的印支期侵入体多具有高 $w(\text{Sr})$ 低 $w(\text{Y})$ 、高 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 和 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 比的埃达克质地球化学特征^[6,76,77]。Wang等^[6]将该地区的埃达克质侵入体划分为高 $w(\text{Si})$ 埃达克岩和低 $w(\text{Si})$ 埃达克岩2种类型。张旗等^[78]提出埃达克岩形成的压力应大于1.5 GPa,相应的地壳厚度应大于50 km。在义敦地体北段的中酸性侵入体则不具有高 $w(\text{Si})$ 低 $w(\text{Y})$ 的埃达克质地球化学特征^[1,5],其地壳厚度应小于该地体南段中甸地区^[78]。弧岩浆岩的 $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$ 比与地壳厚度存在着一定的相关性^[79,80]。根据Leng^[4]和Wang^[17]的实验数据,采用Chapman^[80]提出的计算方法(地壳厚度 $H = 1.11 \times w(\text{Sr})/w(\text{Y}) + 8.05$),我们对义敦地体南北的地壳厚度进行了估算,结果显示义敦地体南段中甸地区地壳厚度为63.2 km,而义敦地体北段昌台地区的地壳厚度为23.7 km,这与侯增谦等^[73]根据岩浆密度估算的地壳厚度相一致。Chiaradia^[81]统计了全球40000多个数据发现,厚的岛弧地壳更容易形成斑岩铜矿。而义敦地体南段中甸地区是我国重要的斑岩铜矿产地,发育一系列斑岩矿床,如普朗、雪鸡坪、烂泥塘和春都^[6,7,9,75],也说明义敦岛弧南段中甸地区具有厚的岛弧地壳。义敦地体晚三叠世中酸性侵入体和火山岩中继承锆石含有2.3~2.5 Ga、1.7~1.9 Ga和0.7~0.9 Ga三组年龄信息^[1,4,13],这些在岩浆侵位或喷发过程中捕获的古老锆石充分说明义敦地体存在新元古代、中元古代和太古代的地壳物质^[13]。我们测定了义敦地体南段恰斯群变质火山岩中锆石的LA-ICP-MS U-Pb年龄为(822±2) Ma(课题组未发表资料),

地质压力计估算恰斯群石榴石云母片岩形成的压力条件为 0.65~0.79 MPa, 其对应的地壳深度大约为 20~25 km。但是, 由于恰斯群的形成时代为新元古代, 而义敦地体除存在新元古代地壳物质外, 还存在大量的中元古代和太古代的的地壳物质^[1,4], 所以该深度并不能代表义敦地体南段真实的地壳深度, 其地壳深度应远大于 25 km。

综上所述, 我们认为义敦岩浆弧并非完全发育于薄陆壳之上, 其南北地壳厚度存在着明显的差异, 在其北段的昌台地区具有薄的地壳厚度, 地壳厚度约为 23.7 km, 而在其南段的中甸地区则具有厚的地壳厚度, 其地壳厚度约为 63.2 km。

7 结 论

1) 岩相学和岩石地球化学研究表明, 恰斯群 2 类云母片岩主要由石榴子石、斜长石、黑云母、白云母、绿泥石、石英组成, 其原岩为砂岩或泥质砂岩。

2) 2 类云母片岩经历了绿片岩相的变质作用, 变质峰期 $p-t$ 估算结果为 460~480 °C 和 0.57~0.79 MPa。

3) 义敦岩浆弧并非完全发育于薄陆壳之上, 其南、北地壳厚度存在着明显的差异, 北段昌台地区地壳较薄(约 23.7 km), 南段中甸地区地壳较厚(约 63.2 km)。由于岩石变质程度较浅, 变质锆石增生边较窄, 很难使用锆石精确测定变质年龄, 应借助于石榴子石、独居石、金红石、榍石等其他副矿物进行定年。由于缺乏多个阶段的变质矿物组合, 使用矿物温度计和压力计方法较难构筑岩石的 $p-T-t$ 演化轨迹, 在今后的研究当中应使用相平衡模拟的方法来构筑 $p-T-t$ 演化轨迹。

致谢: 在电子探针分析测试方面得到了中国冶金地质总局山东局分析测试中心李增胜工程师和林培军工程师的帮助; 在地质温压计计算方面得到了中国科学院大学地球科学学院张慧同学和中国地质科学院地质所彭银彪同学的帮助; 感谢两名审稿人对本文提出宝贵的修改意见, 在此一并向他(她)们表示衷心的感谢。

参 考 文 献:

- [1] Reid A, Wilson C J L, Shun L, et al. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 88-106.
- [2] 许志琴, 候立玮, 王宗秀. 松潘-甘孜造山带构造研究新进展 [J]. *中国地质*, 1991(12): 14-16.
- [3] 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等. 三江地区义敦岛弧碰撞造山

过程: 花岗岩记录 [J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 484-497.

- [4] Leng C B, Huang Q Y, Zhang X C, et al. Petrogenesis of the Late Triassic volcanic rocks in the Southern Yidun arc, SW China: Constraints from the geochronology, geochemistry, and Sr - Nd - Pb - Hf isotopes [J]. *Lithos*, 2014, 190-191: 363-382.
- [5] He D F, Zhu W G, Zhong H, et al. Zircon U - Pb geochronology and elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of the Daocheng granitic pluton from the Yidun Arc, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 67-68: 1-17.
- [6] Wang B Q, Zhou M F, Li J W, et al. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic magmatism and porphyry copper mineralization [J]. *Lithos*, 2011, 127(1-2): 24-38.
- [7] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 等. 云南格咱岛弧普朗斑岩型铜矿年代学、岩石矿物学及地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3049-3064.
- [8] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿 S, Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪 [J]. *矿物岩石*, 2008, 28(4): 80-88.
- [9] Leng C B, Zhang X C, Hu R Z, et al. Zircon U - Pb and molybdenite Re - Os geochronology and Sr - Nd - Pb - Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 31-48.
- [10] Kong D X, Xu J F, Chen J L. Oxygen isotope and trace element geochemistry of zircons from porphyry copper system: Implications for Late Triassic metallogenesis within the Yidun Terrane, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Chemical Geology*, 2016, 441: 148-161.
- [11] 张兴春, 冷成彪, 杨朝志, 等. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 359-360.
- [12] 任江波, 许继峰, 陈建林. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2591-2599.
- [13] Peng T P, Zhao G C, Fan W M, et al. Zircon geochronology and Hf isotopes of Mesozoic intrusive rocks from the Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and their bearings with Cu mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 80: 18-33.
- [14] 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 等. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究 [J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 467-478.
- [15] 冷成彪, 张兴春, 秦朝建, 等. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿流体包裹体初步研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(9): 2017-2028.
- [16] 张兴春, 秦朝建. 云南中甸浪都铜金矿床流体包裹体中发现石墨 [J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 267-268.
- [17] Wang B Q, Zhou M F, Chen W T, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the Triassic volcanic rocks in the northern Yidun Terrane, Eastern Tibet [J]. *Lithos*, 2013, 175-176: 285-301.
- [18] 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统 [J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 109-120.

- [19] 张世涛,冯庆来,王义昭. 甘孜-理塘构造带泥盆系的深水沉积[J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 17-20.
- [20] Yan Q R, Wang Z Q, Liu S W, et al. Opening of the Tethys in southwest China and its significance to the breakup of East Gondwanaland in late Paleozoic: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon analyses for the Garzê ophiolite block [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 256-264.
- [21] Xiao L, Xu Y G, Xu J F, et al. Chemostratigraphy of Flood Basalts in the Garzê-Litang Region and Zongza Block: Implications for Western Extension of the Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 61-67.
- [22] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? [J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(5): 773-781.
- [23] Roger F, Jolivet M, Malavieille J. The tectonic evolution of the Songpan - Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 254-269.
- [24] Liu B, Ma C Q, Guo Y H, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Triassic mafic complexes with MORB/OIB affinities from the western Garzê-Litang ophiolitic mélange, central Tibetan Plateau [J]. *Lithos*, 2016, 260: 253-267.
- [25] Xie L, Yang W Q, Liu G C, et al. Late Paleozoic Radiolaria from the Upper Triassic sedimentary mélange in Shangrila, Southwest China and its geological significance [J]. *Palaeoworld*, 2011, 20(2-3): 203-217.
- [26] Ding L, Yang D, Cai F L, et al. Provenance analysis of the Mesozoic Hoh Xil Songpan Ganzi turbidites in northern Tibet: Implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo Tethys Ocean [J]. *Tectonics*, 2013, 32(1): 34-48.
- [27] Zhang L Y, Ding L, Pullen A, et al. Age and geochemistry of western Hoh-Xil - Songpan-Ganzi granitoids, northern Tibet: Implications for the Mesozoic closure of the Paleo-Tethys ocean [J]. *Lithos*, 2014, 190-191: 328-348.
- [28] 侯增谦,杨岳清,王海平,等. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-345.
- [29] 郝子文,俞如龙. 论昆仑——巴颜喀拉海及其与特提斯洋演化关系 [A]. 青藏高原地质文集(13)——“三江”构造地质 [C]. 北京: 地质出版社, 1982: 25-41.
- [30] 侯立玮,付德明,戴丙春,等. 藏东川西地区岩浆活动的主要特征及其与板块构造、内生矿产的关系 [A]. 青藏高原地质文集(13)——“三江”岩石 [C]. 北京: 地质出版社, 1982: 69-105.
- [31] 侯增谦,侯立玮,叶庆同,等. 三江地区义敦岛弧构造-岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床 [M]. 北京: 地震出版社, 1995: 1-218.
- [32] Chang E Z. Geology and tectonics of the Songpan-Ganzi fold belt, southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2000, 42(9): 813-831.
- [33] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-730.
- [34] 杜其良. 四川木里水洛地区前寒武纪地层的发现及其初步划分 [J]. 成都地质学院学报, 1986, 13(1): 34-49.
- [35] Cai H M, Zhang H F, Xu W C. U - Pb zircon ages, geochemical and sr-nd-hf isotopic compositions of granitoids in western Songpan-Garze fold belt: petrogenesis and implication for tectonic evolution [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(4): 681-698.
- [36] Yan D P, Zhou M F, Wei G Q, et al. Collapse of Songpan-Garze Orogenic Belt resulted from mesozoic middle-crustal ductile channel flow: evidences from deformation and metamorphism within sinian-paleozoic strata in Hinterland of Longmenshan Foreland thrust belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 186-198.
- [37] 侯增谦,莫宣学. 义敦岛弧的形成演化及其对“三江”地区块状硫化物矿床的控制作用 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1991, 16(2): 153-164.
- [38] Chen W T, Zhou M F, Zhao X F. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia [J]. *Precambrian Research*, 2013, 231: 61-77.
- [39] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U - Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1-2): 51-67.
- [40] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. U - Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2002, 113(1-2): 135-154.
- [41] 李献华,周汉文,李正祥,等. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征 [J]. 地球化学, 2001, 30(4): 315-322.
- [42] Reid A J, Wilson C J L, Liu S. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(1): 119-137.
- [43] Reid A J, Wilson C J L, Phillips D, et al. Mesozoic cooling across the Yidun Arc, central-eastern Tibetan Plateau: A reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study [J]. *Tectonophysics*, 2005, 398(1-2): 45-66.
- [44] 陈曼云,金巍,郑常青. 变质岩鉴定手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-238.
- [45] 李曙光,林树道,李彬贤,等. 弓长岭太古代条带状硅铁建造中长英质变质岩的原岩恢复及地层学意义 [J]. 岩石学报, 1989, 5(3): 66-75.
- [46] Hugh R. Rollison 著 杨学明 杨晓勇 陈双喜译,等. 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2000: 1-275.
- [47] 夏琼霞,郑永飞. 高压-超高压变质岩石中石榴石的环带和成因 [J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 433-450.
- [48] Day R A, Green T H, Smith I E M. The origin and significance of garnet phenocrysts and garnet-bearing xenoliths in Miocene Calc-alkaline volcanics from Northland, New Zealand [J]. *Journal of Petrology*, 1992, 33(1): 125-161.
- [49] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits

- [A]. Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. *Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume* (1905–2005) [M]. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, Inc., 2005: 299–336.
- [50] Spear F S. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure–Temperature–Time Paths* [M]. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1995: 1–799.
- [51] 陈梅, 田作林, 张聪, 等. 拉萨地块松多超高压变质带含石榴石云母石英片岩的变质演化相平衡模拟[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1572–1587.
- [52] Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria [J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(3): 427–459.
- [53] 蒋宗胜, 王国栋, 肖玲玲, 等. 河南洛宁太华变质杂岩区早元古代变质作用 $P-T-t$ 轨迹及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3701–3717.
- [54] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(2–3): 316–328.
- [55] Grimmer J C, Ratschbacher L, McWilliams M, et al. When did the ultrahigh-pressure rocks reach the surface? A $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ white mica, Si-in-white mica, single-grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 197(1–4): 87–110.
- [56] 黄文涛, 于俊杰, 郑碧海, 等. 新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩中多硅白云母的研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(3): 338–344.
- [57] Federico L, Capponi G, Crispini L, et al. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating of high-pressure rocks from the Ligurian Alps: Evidence for a continuous subduction – exhumation cycle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(3–4): 668–680.
- [58] 赵珊蓁, 边秋娟, 王勤燕. 结晶学及矿物学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 1–441.
- [59] Shaw D M. The origin of the Apsley Gneiss, Ontario [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1972, 9(1): 18–35.
- [60] 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.
- [61] 吴春明, 肖玲玲, 倪善芹. 泥质变质岩系主要的矿物温度计与压力计 [J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 144–150.
- [62] Holdaway M J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet – biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85(7–8): 881–892.
- [63] Wu C M, Zhang J, Ren L D. Empirical Garnet – Biotite – Plagioclase – Quartz (GBPQ) geobarometry in Medium-to high-grade metapelites [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(9): 1907–1721.
- [64] Wu C M, Zhao G C. Recalibration of the Garnet–Muscovite (GM) Geothermometer and the Garnet–Muscovite–Plagioclase–Quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(12): 2357–2368.
- [65] 卢俊生, 王国栋, 王浩, 等. 河南鲁山太华变质杂岩前寒武纪变质作用 [J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 3062–3074.
- [66] 游振东, 程素华, 赖兴运. 四川丹巴穹状变质地体 [J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 148–159.
- [67] Huang M H, Buick I S, Hou L W. Tectonometamorphic evolution of the eastern Tibet Plateau: evidence from the central Songpan – Garzê Orogenic Belt, Western China [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(2): 255–278.
- [68] 程素华, 赖兴运. 四川丹巴地区中低压变质作用及 $P-T$ 轨迹 [J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 819–828.
- [69] Weller O M, St-Onge M R, Waters D J, et al. Quantifying Barrovian metamorphism in the Danba Structural Culmination of eastern Tibet [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2013, 31(9): 909–935.
- [70] Billerot A, Duchene S, Vanderhaeghe O, et al. Gneiss domes of the Danba Metamorphic Complex, Songpan Ganze, eastern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 140: 48–74.
- [71] Hua C S, Lai X Y, You Z D. $P-T$ paths derived from garnet growth zoning in Danba domal metamorphic terrain, Sichuan Province, West China [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2): 219–240.
- [72] Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang – Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(6): 675–690.
- [73] 侯增谦. 岩浆密度及其重要意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(4): 309–319.
- [74] 侯增谦, 莫宣学. “三江”地区义敦岛弧的构造-岩浆演化特征 [A]. 青藏高原地质文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1991: 153–165.
- [75] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 等. 云南省格咱岛弧印支期岩浆演化及普朗斑岩型铜矿成矿作用 [J]. 地质学报, 2012, 86(12): 1933–1945.
- [76] 黄肖潇, 许继峰, 陈建林, 等. 中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因 [J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1493–1506.
- [77] 曾普胜, 李文昌, 王海平, 等. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征 [J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 989–1000.
- [78] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 花岗岩与地壳厚度关系探讨 [J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 259–269.
- [79] Chiaradia M. Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: an Earth scale perspective [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8115.
- [80] Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, et al. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera [J]. *Geology*, 2015, 43(10): 919–922.
- [81] Chiaradia M. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(1): 43–46.