

澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩的 成因及变质演化

王 舫, 刘福来, 冀 磊, 刘平华, 蔡 佳, 田忠华, 刘利双

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 通过对澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩的岩相学、地球化学、成因矿物学以及相平衡模拟的综合研究, 阐述蓝片岩的原岩以及变质演化过程。地球化学分析结果显示, 蓝片岩具有一致的稀土元素配分模式, 具弱 Eu 正或负异常, 稀土元素和微量元素特征与 OIB 相似, 其原岩可能为 OIB 型玄武岩。详细矿物学研究表明, 本区蓝片岩记录了俯冲峰期蓝片岩相变质和峰期后绿片岩相变质两个变质阶段, 其矿物组合分别为蓝闪石 + 钠长石 + 多硅白云母 + 绿泥石 + 绿帘石和蓝闪石 + 钠长石 ± 阳起石 + 绿泥石 + 绿帘石。通过 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ 体系相平衡计算, 得到两个阶段的压力范围分别约为 0.95 GPa 和 0.40 GPa。

关键词: 蓝片岩; 变质演化; 澜沧江杂岩带

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)05-0804-17

Petrogenesis and metamorphic evolution of blueschist from Xiaohaijiang-Shangyun area in Lancangjiang metamorphic complex

WANG Fang, LIU Fu-lai, JI Lei, LIU Ping-hua, CAI Jia, TIAN Zhong-hua and LIU Li-shuang
(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Blueschist sporadically occurs as lenses within Lancangjiang metamorphic complex. The combined studies of petrography, geochemistry, genetic mineralogy and phase equilibrium modeling for blueschists within Xiaohaijiang-Shangyun area provide a significant insight into protoliths and metamorphic evolution. Geochemical features show that they have similar rare-earth elements (REE) patterns, with slight Eu anomalies. REE and trace elements compositions have an affinity to those of oceanic island basalts (OIB), suggesting that their protoliths were OIB-type basalts. Petrological studies show that blueschists contain two distinct mineral assemblages characterized by glaucophane + albite + phengite + chlorite + epidote + titanite and glaucophane + albite ± actinolite + chlorite + epidote + titanite which record a peak blueschist phase and a greenschist phase. Calculated pseudosection in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ yielded pressure conditions of around 0.95 GPa and 0.40 GPa, respectively.

Key words: blueschist; metamorphic evolution; Lancangjiang metamorphic complex

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41302039, 41372069)

收稿日期: 2016-04-25; 接受日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302039, 41372069)

作者简介: 王 舫(1981-), 女, 博士, 变质岩石学专业, E-mail: wangfang_mr@163.com。

滇西“三江”地区地处欧亚板块与印度板块的结合部位,岩性多样、构造复杂,尤其是中部澜沧江杂岩带,地理位置特殊,是特提斯构造域的重要单元。自从上世纪80年代彭兴阶等(1982)首次报道该区发现蓝片岩以来,研究者对澜沧江杂岩带的蓝片岩开展了大量研究,取得了一系列进展(彭兴阶等, 1982, 1983; 张儒瑗等, 1989, 1990; Zhang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2007; Fan *et al.*, 2015),但是有关其原岩性质、变质演化以及年代格架等方面目前还存在着争议。Zhang 等(2004)在双江构造混杂岩带中划分出3条蓝片岩带,即栗义蓝片岩带、南榔蓝片岩带和大芒光房蓝片岩带,其中栗义蓝片岩带的原岩为变质中基性(火山)岩和变质含火山质沉积岩;南榔蓝片岩带,包括绿帘蓝闪片岩和云母石英蓝闪片岩;大芒光房蓝片岩带的原岩类型主要为变质基性火山岩。从原岩类型上看,澜沧江杂岩带蓝片岩的原岩至少存在变质中基性(火山)岩型和变质含火山质沉积岩型两种类型,从矿物共生组合来看,其中部分蓝片岩含有石榴石、黑硬绿泥石、硬玉质辉石和迪尔闪石等特征变质矿物。有关蓝片岩及其围岩的变质温压条件的限定方面,前人通过矿物化学成分或者变质反应线进行过简单的限定,估算结果主要集中于 $p = 0.4 \sim 0.8$ GPa、 $t = 170 \sim 450^\circ\text{C}$ 、地温梯度 $10 \sim 16^\circ\text{C}/\text{km}$,缺乏完整的变质演化 p - T 轨迹(周维全等, 1982; 张儒瑗等, 1990; Fan *et al.*, 2015)。此外,有关蓝片岩的原岩形成时代和变质时代的限定尚存在争议(周维全等, 1982; 张儒瑗等, 1989, 1990; 翟明国等, 1990a, 1990b; 赵靖等, 1994; Fan *et al.*, 2015)。系统研究澜沧江杂岩带蓝片岩的原岩性质、变质演化及年代格架,可以为探讨古特提斯洋的消减-闭合的构造演化过程及形成的构造背景提供科学依据。本研究以澜沧江杂岩带双江-上允地区的蓝片岩为主要研究对象,通过研究其地球化学特征和变质温压条件,探讨其形成的构造背景及变质演化过程。

1 区域地质背景

澜沧江杂岩带位于青藏高原东南缘“三江”地区,由昌宁-孟连缝合带和澜沧江混杂带组成,属于怒江-澜沧江-金沙江构造杂岩带,是古特提斯缝合带的东部边界(Wang *et al.*, 2010)。该杂岩带近南北向展布于澜沧江断裂和崇山断裂之间,西邻昌宁-

孟连构造混杂带,东邻临沧花岗岩基。昌宁-孟连缝合带内发育大量古生代蛇绿混杂岩,是研究古特提斯构造演化过程的热点地区之一,有关该缝合带的性质问题长期以来一直存在着陆间海(杨嘉文等, 1990)、初始洋盆(朱勤文等, 1999)和主洋盆(刘本培等, 1993)几种争论。临沧花岗岩基为多期侵入的复式花岗岩基,岩性以黑云母二长花岗岩和钾长花岗岩为主,其次为二叠纪的花岗闪长岩和燕山晚期花岗岩(李兴林, 1996; 彭头平等, 2006, Peng *et al.*, 2013),还包括一定规模的碱长花岗岩(廖世勇等, 2014)。澜沧江杂岩带的主体岩性为微晶云母片岩、白云母石英片岩、二云母片岩及蓝闪白云母片岩、蓝片岩、绿片岩和透镜状大理岩。杂岩带中段由构造变形序列不同的小黑江-西定浅变质岩块和澜沧变质混杂岩带两个构造地层单元组成(赵靖等, 1994)。其中小黑江-西定岩块出露于澜沧变质混杂岩带西侧,主要由微晶白云母石英片岩、石英片岩及白云母片岩夹少许蓝闪白云母片岩组成;而澜沧变质混杂带东侧紧邻临沧花岗岩,由变质沉积碎屑岩、绿片岩夹蓝闪片岩组成(赵靖, 1993)。

澜沧江杂岩带主要由澜沧群、大勐龙群、崇山群和西盟群组成。澜沧群,主要出露于云县、双江、澜沧、勐海一带,为一套低级变质的火山-沉积岩系,主要岩石类型为云母石英片岩、微晶片岩、变质砂岩、变粒岩和绿岩(变质中基性熔岩和凝灰岩),有少量大理岩等。澜沧群的典型矿物组合为绢(白)云母-黑云母-石英-斜长石(钠长石)、阳起石(透闪石)-绿泥石-绿帘石-钠长石(-滑石、-方解石)和绿泥石-菱铁矿-鳞绿泥石-钠长石(-方解石、-白云母)等(卫管一等, 1984)。随着研究的不断深入,钟大赉等(1998)基于构造方面成果,将澜沧群从西向东解体,分为惠民组和澜沧群,惠民组以断层接触上覆于澜沧群之上;翟明国等(1990b)将澜沧群解体为惠民钙碱性火山-沉积岩建造和栗义碱性火山-沉积岩建造;而朱炳泉等(2001)将原澜沧群解体为惠民地区的绿片岩系、分布在西定-澜沧地区和云县-凤庆地区的变质复理石岩系和分布在双江上允-云县头道沟一带的变质碱性火山岩-沉积岩系3个岩石单位。蓝片岩在带内,呈近南北向,主要出露于澜沧群中。目前,澜沧江杂岩带内有报道的蓝片岩,仅有小黑江、南榔、栗义、惠民、石岩脚、蜜蜂岩、南龙河、酒井等有限的几处。根据蓝片岩分布规律和变质程度, Zhang 等(2004)将双江地区的蓝片岩划分为3个亚

带,从西向东分别为大芒光房、栗义、南榔。其中,大芒光房蓝片岩亚带的蓝闪石主要产于玄武岩中,为变质基性火山岩,蓝闪石含量一般小于 5%。而栗义和南榔蓝片岩亚带都赋存于澜沧群中,其中栗义蓝片岩亚带中含蓝闪石的岩石包括变质中基性(火山)岩型蓝闪片岩(即绿帘蓝闪片岩类)和变质含火山质沉积型蓝闪片岩(即云母石英蓝闪片岩);南榔蓝片岩亚带与栗义蓝片岩亚带相似,主要包括绿帘蓝闪片岩类和云母石英蓝闪片岩类,但是云母石英蓝闪片岩类的含量较高。本文重点研究样品为采自小黑江-上允地区栗义蓝片岩亚带的新鲜的、具有代表性的 11 件蓝片岩样品,具体采样位置见图 1。

2 实验方法

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; H_2O^+ 按 GB/T14506.2-1993 标准; CO_2 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 GB7730.51987; B 用等离子质谱(X-series)测试,执行 JY/T015-1996 标准。

矿物的电子探针化学成分分析在国土资源部大陆动力学重点实验室完成。使用的电子探针显微分析仪(EPMA)为日本电子 JEOL 公司的 JXA-8100。分析条件:加速电压 15 kV,束流 2×10^{-8} A,摄谱时间 10 s,修正方法 ZAF,标准样品为美国 SPI 组合标样。能谱仪(EDS)由英国 OXFORD 公司制造,加速电压 20 kV,束流 1.52×10^{-9} A。本研究选取代表性蓝片岩(BS01-1 和 BS02-5)样品详细阐述其矿物化学特征。

3 岩相学

澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩呈透镜体状零星产出于围岩白云母石英片岩中。露头呈蓝色-深蓝色,主要矿物组合为蓝闪石+钠长石+绿帘石+绿泥石,次要矿物包括多硅白云母,副矿物包括榍石、金红石、锆石等。蓝闪石是蓝片岩中典型的特征变质矿物,单偏光下呈蓝色、紫色,具多色性(图 2a、2c),干涉色最高可达二级蓝(图 2b),纤维状,沿片理方向分布,局部发生褶皱变形,横截面呈菱形,晶体长轴 0.1~0.3 mm,粒度较大者可达 0.5 mm 左右,含量约为 30% 左右。显微镜下可见部分蓝闪石核部呈深天蓝色而边部颜色较浅,蓝片岩相变质反应后随着压力的降低,偶见蓝闪石边部转变为阳起石的现象(图 2c)。该区大部分蓝片岩中含一定量的钠长石(图 2),部分蓝片岩峰期钠长石含量较低,不规则粒状,粒度大小 0.1~0.5 mm,含量 30% 左右。绿帘石,不规则粒状或者浑圆状,粒度大小 0.1~0.2 mm,具有环带结构,含量 10% 左右。绿泥石,主要为蓝闪石退变产物,不规则状或纤维状,含量 20%~30%。蓝片岩中还含少量多硅白云母,鳞片状,沿片麻理方向分布(图 2d)。另外显微结构观察发现,本区蓝片岩中少量榍石(图 2a~2c)稳定存在于变质反应的各个阶段,是贯通矿物。

综合分析各特征变质矿物的岩相学特征及矿物之间的转变关系,可将蓝片岩中矿物大致分为俯冲峰期蓝片岩相变质和峰期后绿片岩相变质两个变质阶段,其中俯冲峰期蓝片岩相变质阶段压力较高,主要共生矿物组合为蓝闪石+钠长石+多硅白云母+绿泥石+绿帘石;峰期后绿片岩相变质阶段压力降低,主要矿物组合包括蓝闪石+钠长石±阳起石+绿泥石+绿帘石。

4 地球化学特征

在变质作用过程中,由于受变质条件和变质分异作用的影响,蓝片岩主量元素成分发生了不同程度的改变。全岩地球化学分析结果列入表 1 中。样品 SiO_2 含量变化于 42.61%~49.96% 之间,属基性岩; Al_2O_3 含量为 9.13%~14.91%; FeO 含量为 5.08%~7.58%; Fe_2O_3 含量为 4.07%~8.21%; MgO 含量变化范围为 4.68%~15.78%; CaO 含量

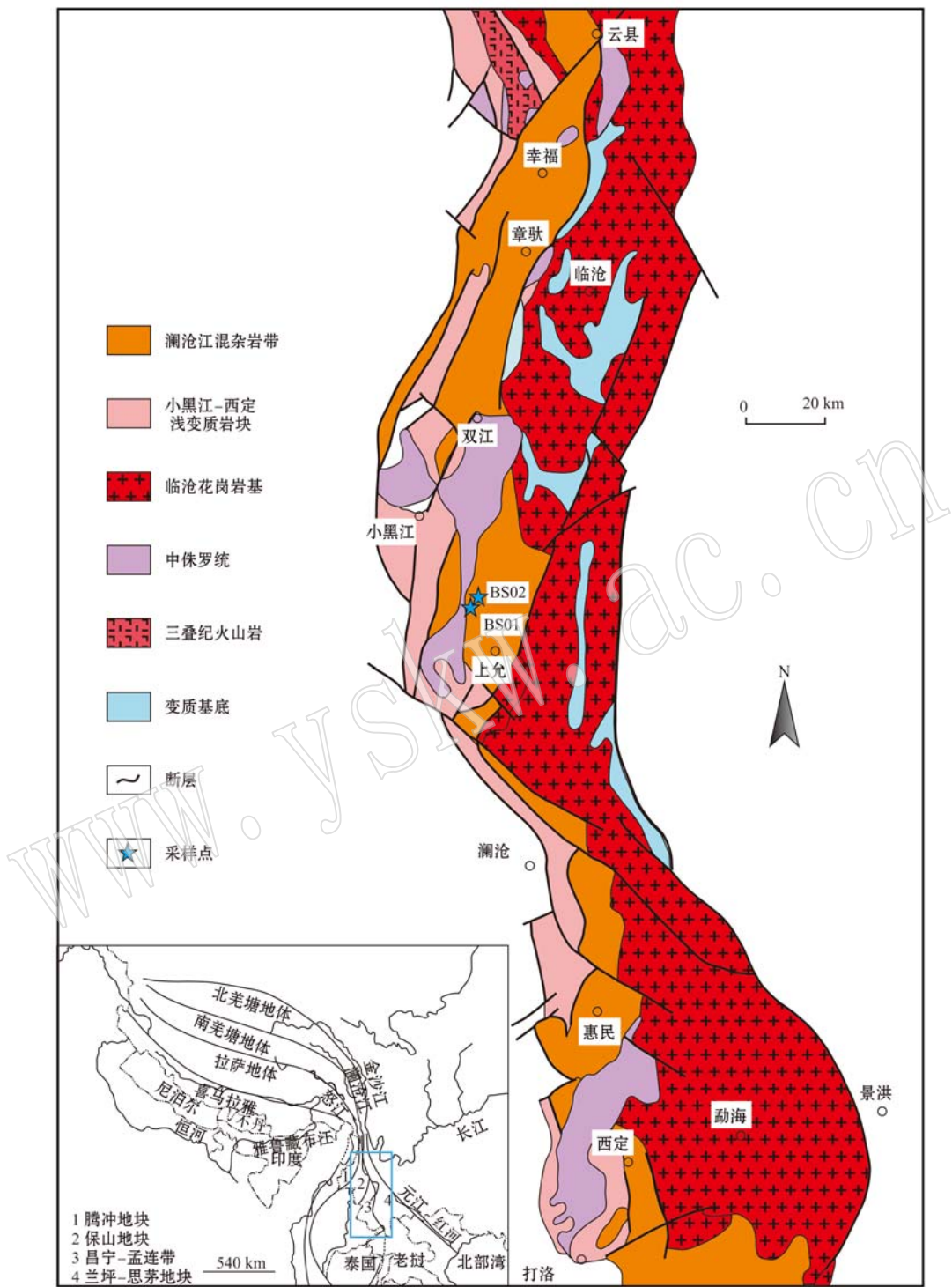


图 1 澜沧江杂岩带区域地质简图(据赵靖等, 1994)

Fig. 1 Geological sketch map of the Lancangjiang complex in Sangjiang area, western Yunnan (after Zhao Jing *et al.* , 1994)

为 6.79% ~ 8.83%; Na₂O 含量范围为 1.00% ~ 3.95%; K₂O 含量为 0.36% ~ 2.07%。

样品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 3 所示。从图中明显可以看出稀土元素和微量元素特征与 OIB 具有相似性。蓝片岩可能受变质分异以及后期退变质作用的影响, 稀土元素总量(∑REE)的变化范围较大, 介于 111.12 × 10⁻⁶ ~ 311.59 × 10⁻⁶ 之间。(La/Yb)_N 变化

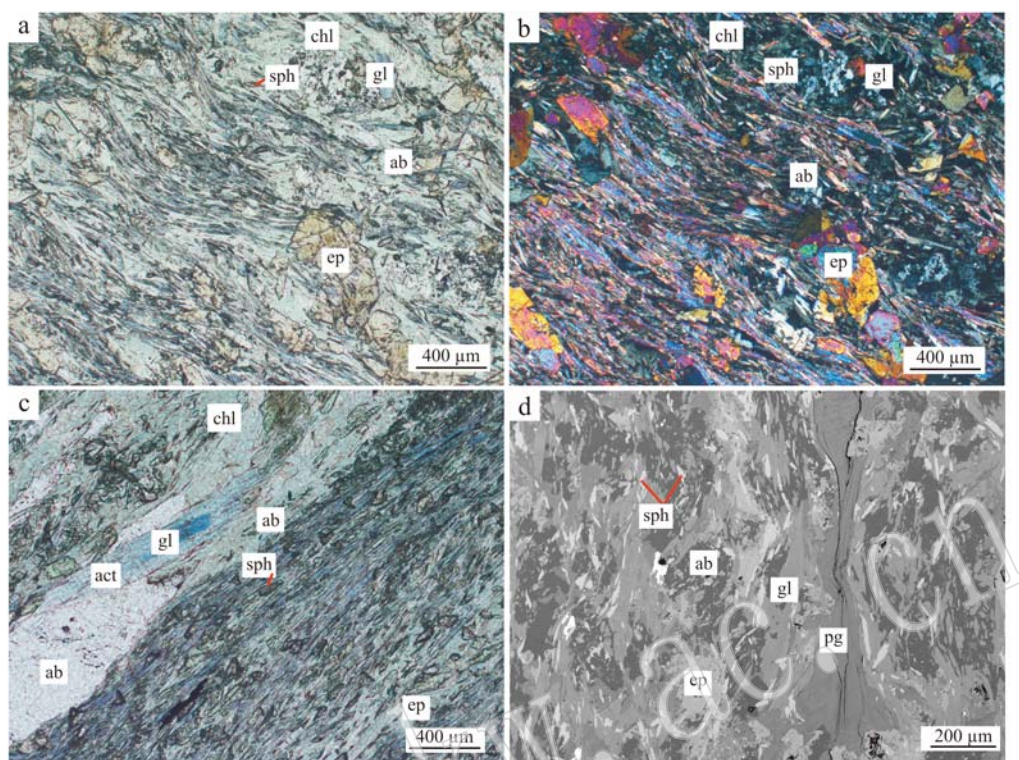


图 2 澜沧江杂岩带蓝片岩显微结构照片

Fig. 2 Representative microphotographs showing typical textures of blueschists from Lancangjiang complex

矿物缩写: ab—钠长石; act—阳起石; chl—绿泥石; ep—绿帘石; gl—蓝闪石; pg—多硅白云母; sph—榍石

Mineral abbreviation: ab—albite; act—actinolite; chl—chlorite; ep—epidote; gl—glaucophane; pg—phengite; sph—titanite

范围为 6.69~14.90。具有一致的稀土元素配分模式,配分曲线右倾,轻稀土元素相对富集,具弱 Eu 正或负异常($Eu/Eu^* = 0.94 \sim 1.08$)。在微量元素蛛网图上,除 Rb、Ba 等左侧元素的变化较大表现出不一致的趨勢外,右侧元素变化趨勢一致,具有相似形态的曲线;无明显的 Nb、Ta、Sr 负异常。复杂或者不一致的微量元素蛛网图特征可能与这些元素在变质分异和退变质过程中体系开放有关。

5 蓝片岩矿物化学特征

5.1 闪石类矿物

颗粒较粗大的闪石类明显可见核边结构(图 4),样品 BS01-1 闪石类矿物的电子探针化学成分分析结果见表 2 和图 5,化学分子式由 Ax 软件计算得出,角闪石分子模型根据 Holland 和 Blundy (1994)。从核部到边部 Al_2O_3 含量从 6.36%~2.05%,呈明显的降低趋势,相对应地 Al^{IV} 和 Al^{VI} 从核部到边部亦大致呈降低趋势,其含量变化范围分别为 0.138~

0.010 p.f.u 和 1.036~0.270 p.f.u,核部 Al^{VI} 相对 Al^{IV} 较边部高,表明核部形成的压力相对较高。 FeO^T 、MgO 和 CaO 的含量从核部到边部呈升高趋势,其含量变化范围分别为 16.80%~21.07%、9.01%~13.35% 和 0.42%~6.00%。而 Na_2O 含量从核部到边部大致呈降低趋势,其含量变化范围为 6.56%~3.74%,对应的 Na_B 的含量变化范围为 1.801~1.036 p.f.u。当 $(Ca + Na_B) \geq 1.00$ 、 $0.50 < Na_B < 1.50$ 时,属于钠钙角闪石,在 Na_B -Si 分类图解中落入蓝透闪石区域内(图 5a);当 $Na_B \geq 1.50$ 时,属于钠角闪石(图 5a)。 X_{Mg} 值 $[Mg/(Fe^{2+} + Mg)]$ 从核部到边部呈逐渐升高的趋势,其比值变化范围为 0.52~0.66。 $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al^{VI})$ 值从核部到边部亦呈升高的趋势,其比值变化范围为 0.20~0.75,在钠角闪石 $Fe^{2+}/(Mg + Fe^{2+}) - Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al^{VI})$ 分类图解(图 5b)中,核部成分主要落入蓝闪石范围内,而边部成分则属钠闪石和镁钠闪石。

样品 BS02-5 角闪石的电子探针化学成分分析结果显示(表 3、图 6),角闪石矿物化学成分明显具

表 1 澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩地球化学成分

Table 1 Chemical compositions of blueschist from Xiaohaijiang-Shangyun area in Lancangjiang complex, southeastern Tibetan Plateau

	BS01-1	BS01-2	BS01-3	BS01-4	BS02-1	BS02-2	BS02-3	BS02-4	BS02-5	BS02-6	BS02-7
SiO ₂	44.71	45.88	45.49	46.00	47.80	46.30	49.96	46.68	42.61	47.17	46.74
TiO ₂	3.30	2.92	3.10	2.94	2.68	2.72	2.97	2.82	2.08	3.41	3.45
Al ₂ O ₃	13.34	12.14	13.71	12.73	12.05	12.40	12.41	12.26	9.13	14.07	14.91
Fe ₂ O ₃	7.64	8.02	5.13	8.21	6.32	5.18	6.73	7.50	4.07	6.87	6.30
FeO	5.59	5.48	5.08	5.30	5.71	6.43	5.21	6.50	7.58	5.28	7.44
MnO	0.15	0.14	0.14	0.17	0.13	0.14	0.10	0.18	0.17	0.13	0.20
MgO	7.68	9.64	9.62	8.82	9.24	9.41	6.96	9.25	15.78	6.11	4.68
CaO	8.83	8.62	8.18	6.79	6.48	6.99	7.17	6.88	8.39	8.57	6.83
Na ₂ O	3.48	1.95	1.93	3.06	3.43	4.22	3.95	2.59	1.00	3.50	3.37
K ₂ O	0.36	0.50	2.07	1.52	1.75	0.42	1.31	0.42	0.04	0.64	1.89
P ₂ O ₅	0.31	0.34	0.33	0.29	0.31	0.34	0.34	0.27	0.23	0.43	0.57
H ₂ O ⁺	2.76	3.36	3.48	3.34	3.22	3.84	1.68	3.86	5.88	2.78	2.66
CO ₂	0.51	0.17	0.34	0.51	0.36	1.07	0.54	0.18	2.41	0.36	0.36
Los	3.55	3.73	3.84	3.39	3.33	4.27	2.50	3.91	7.63	2.94	2.96
La	30.8	28.5	23.5	23.5	22.6	22.8	28.4	21	17.8	29.9	59.4
Ce	67.5	61.5	54.7	54.0	49.1	50.6	61.1	47.7	40.8	66.1	126.0
Pr	8.66	7.89	7.29	7.20	6.84	7.05	8.28	6.55	5.62	9.03	15.50
Nd	36.4	33.6	32.0	30.8	29.2	32.2	36.9	29.5	25.0	40.5	64.2
Sm	8.30	7.57	7.80	7.15	6.92	7.39	8.46	7.10	5.66	9.44	13.30
Eu	2.57	2.36	2.62	2.33	2.33	2.43	2.68	2.41	1.78	3.06	4.07
Gd	8.22	7.74	8.15	7.40	6.26	6.45	7.55	6.96	4.97	8.43	10.70
Tb	1.29	1.15	1.25	1.12	0.91	0.92	1.10	0.99	0.75	1.25	1.47
Dy	6.31	5.69	6.26	5.63	5.17	5.33	6.20	5.47	4.08	7.02	8.05
Ho	1.11	1.05	1.16	1.04	0.90	0.98	1.16	0.99	0.75	1.28	1.51
Er	3.16	2.96	3.32	2.89	2.34	2.41	2.97	2.54	1.89	2.94	3.57
Tm	0.36	0.32	0.38	0.32	0.33	0.37	0.44	0.38	0.29	0.44	0.55
Yb	2.27	2.08	2.52	2.20	1.80	1.95	2.40	1.98	1.52	2.14	2.86
Lu	0.33	0.29	0.35	0.29	0.25	0.27	0.33	0.27	0.21	0.32	0.41
Nb	28.4	23.6	23.8	22.0	26.2	25.4	26.2	24.8	18.0	37.3	69.1
Rb	6.67	8.64	37.00	28.90	37.50	8.14	31.90	8.11	0.47	10.40	35.40
Sr	630	567	774	475	466	535	474	334	298	559	565
Ba	131	177	636	572	354	90.9	146	122	7.19	192	763
Zr	217	205	07	206	176	184	225	187	128	230	361
Cr	214	614	183	449	457	272	466	800	1 198	170	3.09
V	356	337	338	324	341	333	336	339	257	434	247
Ni	152	360	180	266	206	184	228	406	671	130	4
Y	27.8	26.5	30.1	25.6	25.2	27.1	31.4	27.7	19.6	34.4	40.0
Co	49.9	56.8	44.5	52.2	55.3	55.1	52.5	68.9	77.3	50.1	29.3
Th	3.15	2.67	2.82	2.65	2.12	2.04	2.37	1.93	1.58	2.92	5.66
Sc	31.0	32.4	33.5	34.3	31.5	30.3	31.5	36.0	26.7	29.2	16.3
Hf	5.99	5.45	5.57	5.50	4.78	4.70	5.73	4.82	3.47	5.75	8.94
Ta	1.91	1.60	1.63	1.47	1.58	1.46	1.53	1.49	1.12	2.16	3.91
U	0.73	0.64	0.62	0.44	0.51	0.47	0.44	0.38	0.23	0.76	1.19
ΣREE	177.28	162.70	151.30	145.87	134.95	141.15	167.97	133.84	111.12	181.85	311.59
ΣLREE	154.23	141.42	127.91	124.98	116.99	122.47	145.82	114.26	96.66	158.03	282.47
ΣHREE	23.05	21.28	23.39	20.89	17.96	18.68	22.15	19.58	14.46	23.82	29.12
(La/Yb) _N	9.73	9.83	6.69	7.66	9.01	8.39	8.49	7.61	8.40	10.02	14.90
Eu/Eu*	0.95	0.94	1.00	0.98	1.08	1.08	1.03	1.05	1.03	1.05	1.04

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

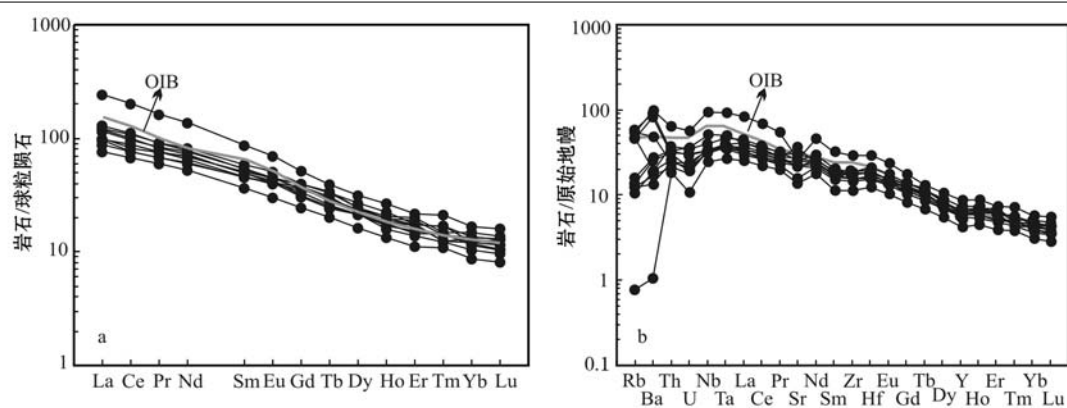


图 3 澜沧江杂岩带蓝片岩稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图(球粒陨石、原始地幔和 OIB 据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergram of blueschists from Lancangjiang complex (data of chondrite, primitive mantle and OIB after Sun and McDonough, 1989)

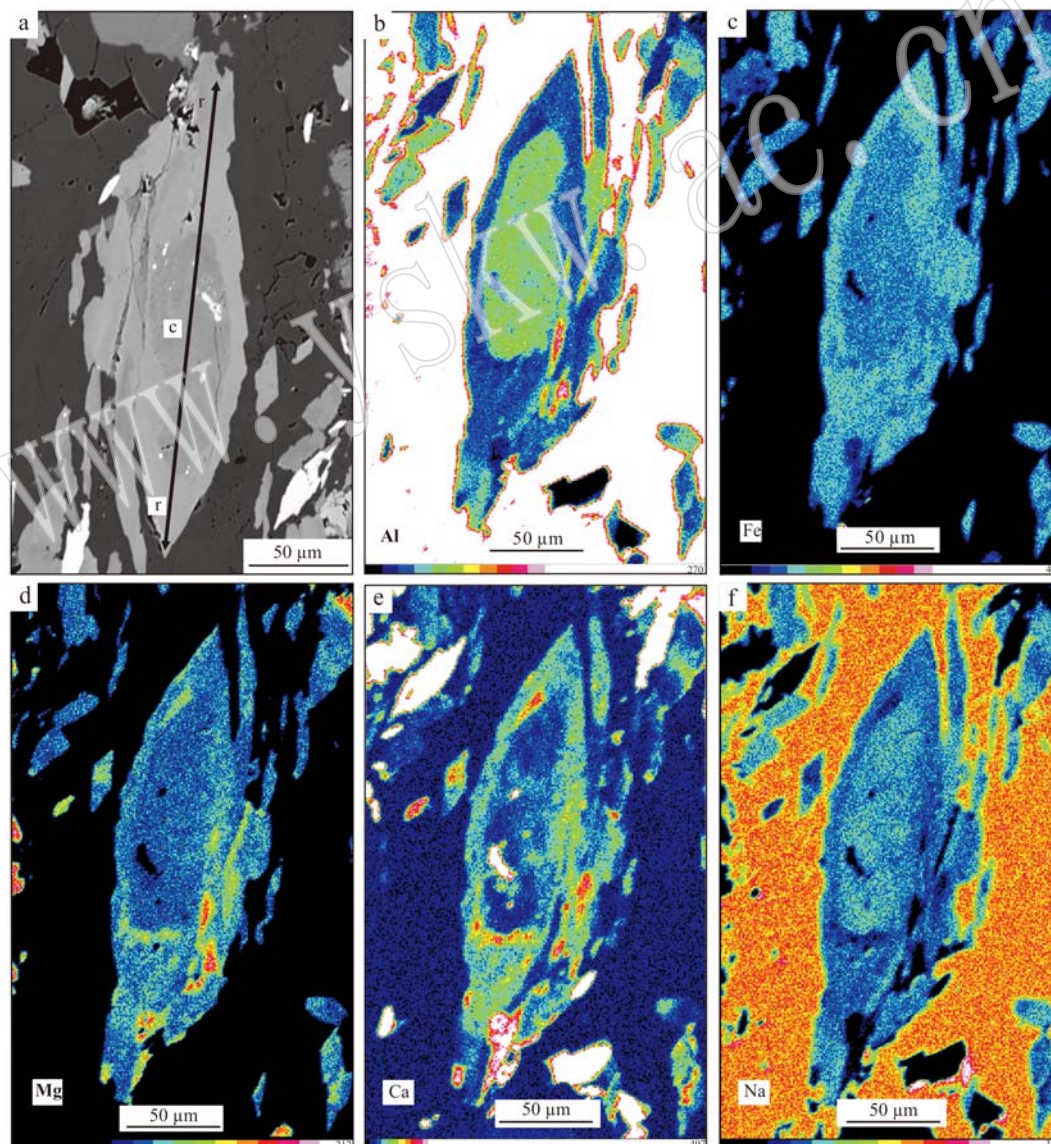


图 4 澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩中蓝闪石成分环带

Fig. 4 Compositional zoning of glaucophane from Lancangjiang complex

表 2 澜沧江杂岩带蓝片岩(BS01-1)中闪石电子探针化学成分

Table 2 Representative mineral composition of amphibole in blueschist (BS01-1), Lancangjiang complex												
序号	w _B /%											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
边部→核部												
SiO ₂	55.59	55.62	56.31	55.47	55.51	55.24	55.54	55.67	56.44	56.26	54.98	56.53
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.04	0.03	0.00	0.05	0.02	0.02	0.73	2.27	0.13
Al ₂ O ₃	2.11	3.90	3.82	2.64	2.31	2.41	1.86	2.05	6.30	6.11	5.92	6.29
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01
FeO ^T	16.80	19.05	19.45	19.35	19.97	20.24	17.21	17.03	17.77	17.67	16.80	17.38
MnO	0.10	0.11	0.14	0.29	0.30	0.30	0.32	0.33	0.13	0.16	0.19	0.17
MgO	13.18	10.34	10.73	11.43	11.10	10.50	13.17	13.35	9.55	9.41	9.01	9.75
CaO	6.00	1.37	1.24	2.92	3.18	2.29	5.50	5.46	0.42	1.17	2.42	0.61
Na ₂ O	3.82	6.00	6.10	5.20	4.92	5.52	3.79	3.74	6.56	6.33	6.12	6.39
K ₂ O	0.05	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.04	0.02	0.00	0.01	0.08	0.01
Total	97.71	96.43	97.81	97.39	97.37	96.54	97.50	97.75	97.21	97.85	97.81	97.26
以 23 个氧为标准计算的阳离子系数												
Si	7.944	7.981	7.971	7.951	7.976	7.979	7.956	7.953	7.983	7.963	7.862	7.988
Ti	0.000	0.003	0.000	0.004	0.003	0.000	0.005	0.002	0.002	0.078	0.244	0.014
Al	0.355	0.660	0.638	0.446	0.391	0.410	0.314	0.345	1.051	1.020	0.998	1.048
Al ^{IV}	0.056	0.019	0.029	0.049	0.024	0.021	0.044	0.047	0.017	0.037	0.138	0.012
Al ^{VI}	0.299	0.641	0.609	0.397	0.367	0.389	0.270	0.298	1.034	0.983	0.860	1.036
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.002	0.000	0.003	0.001
Fe ³⁺	0.593	0.970	0.984	0.898	0.924	1.094	0.641	0.598	0.712	0.494	0.212	0.652
Fe ²⁺	1.415	1.316	1.319	1.422	1.476	1.351	1.421	1.436	1.390	1.598	1.798	1.402
Mn	0.012	0.013	0.017	0.035	0.037	0.037	0.039	0.040	0.016	0.019	0.023	0.020
Mg	2.807	2.211	2.264	2.442	2.377	2.260	2.812	2.842	2.013	1.985	1.920	2.053
Ca	0.919	0.211	0.188	0.448	0.490	0.354	0.844	0.836	0.064	0.177	0.371	0.092
Na _B	1.059	1.671	1.674	1.445	1.371	1.548	1.053	1.036	1.801	1.737	1.697	1.751
K _A	0.009	0.000	0.002	0.005	0.007	0.000	0.007	0.004	0.000	0.002	0.015	0.002
(Na+K) _A	0.009	0.000	0.002	0.005	0.007	0.000	0.007	0.004	0.000	0.002	0.015	0.002
Mg+Fe ²⁺ +Mn ²⁺	4.234	3.540	3.600	3.899	3.890	3.648	4.272	4.318	3.419	3.602	3.741	3.475
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Al ^{VI})	0.665	0.602	0.618	0.693	0.716	0.738	0.704	0.667	0.408	0.334	0.198	0.386
Mg/(Fe ²⁺ +Mg)	0.665	0.627	0.632	0.632	0.617	0.626	0.664	0.664	0.592	0.554	0.516	0.594

续表 2
Continued Table 2

序号	核部→边部											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SiO ₂	56.45	55.70	55.62	55.50	55.70	56.21	56.43	56.41	55.34	55.71	55.35	55.58
TiO ₂	0.12	0.02	0.05	0.05	0.01	0.05	0.04	0.03	0.03	0.10	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	5.97	5.74	5.06	6.36	5.89	6.09	5.96	6.24	4.40	2.59	2.46	2.26
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.03	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03
FeO ^T	17.95	18.16	18.39	17.63	17.92	18.23	18.11	17.81	20.04	21.07	20.46	20.89
MnO	0.16	0.22	0.14	0.21	0.27	0.20	0.23	0.16	0.14	0.26	0.21	0.20
MgO	9.75	9.60	10.23	9.82	10.04	9.80	9.35	9.79	9.75	10.35	10.25	10.85
CaO	0.96	1.38	1.55	1.19	1.56	0.84	0.79	0.82	0.81	1.82	2.02	2.42
Na ₂ O	6.23	6.25	6.11	6.08	6.01	6.43	6.40	6.42	6.35	5.69	5.77	5.45
K ₂ O	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02
Total	97.60	97.14	97.18	96.87	97.43	97.89	97.38	97.73	96.96	97.61	96.60	97.79
以 23 个氧为标准计算的阳离子系数												
Si	7.980	7.949	7.940	7.939	7.935	7.946	7.990	7.963	7.947	7.976	7.984	7.960
Ti	0.013	0.002	0.005	0.005	0.001	0.005	0.004	0.003	0.003	0.011	0.004	0.002
Al	0.995	0.966	0.852	1.073	0.989	1.015	0.995	1.038	0.745	0.437	0.418	0.382
Al ^{IV}	0.020	0.051	0.060	0.061	0.065	0.054	0.010	0.037	0.053	0.024	0.016	0.040
Al ^{VI}	0.975	0.915	0.792	1.012	0.924	0.961	0.985	1.001	0.692	0.413	0.402	0.342
Cr	0.001	0.002	0.000	0.002	0.002	0.003	0.007	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003
Fe ³⁺	0.649	0.659	0.719	0.487	0.545	0.634	0.726	0.646	0.915	1.071	1.155	1.050
Fe ²⁺	1.473	1.509	1.477	1.622	1.590	1.521	1.418	1.457	1.492	1.452	1.313	1.452
Mn	0.019	0.027	0.017	0.025	0.033	0.024	0.028	0.019	0.017	0.032	0.026	0.024
Mg	2.054	2.042	2.176	2.093	2.132	2.065	1.973	2.060	2.087	2.208	2.203	2.316
Ca	0.145	0.211	0.237	0.182	0.238	0.127	0.120	0.124	0.125	0.279	0.312	0.371
Na _B	1.708	1.730	1.691	1.686	1.660	1.762	1.757	1.759	1.768	1.580	1.614	1.514
K _A	0.002	0.007	0.002	0.004	0.004	0.002	0.004	0.000	0.006	0.005	0.004	0.004
(Na+K) _A	0.002	0.007	0.002	0.004	0.004	0.002	0.004	0.000	0.006	0.005	0.004	0.004
Mg+Fe ²⁺ +Mn ²⁺	3.546	3.578	3.670	3.740	3.755	3.610	3.419	3.536	3.596	3.692	3.542	3.792
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Al ^{VI})	0.400	0.419	0.476	0.325	0.371	0.397	0.424	0.392	0.569	0.722	0.742	0.754
Mg/(Fe ²⁺ +Mg)	0.582	0.575	0.596	0.563	0.573	0.576	0.582	0.586	0.583	0.603	0.627	0.615

表 3 澜沧江杂岩带蓝片岩(BS02-5)中闪石电子探针化学成分

Table 3 Representative mineral composition of amphibole in blueschist (BS02-5), Lancangjiang complex

	核部										ω _B /%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	55.70	55.58	55.82	55.68	55.98	54.92	55.61	55.53	56.74	55.33	55.41
TiO ₂	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04
Al ₂ O ₃	2.39	2.49	2.70	2.84	0.60	0.89	0.78	1.15	0.47	1.13	0.99
Cr ₂ O ₃	0.22	0.05	0.09	0.16	0.05	0.04	0.24	0.32	0.00	0.14	0.16
FeO ^T	19.84	20.43	19.59	19.17	8.56	11.45	9.62	10.59	8.48	11.76	11.03
MnO	0.22	0.26	0.14	0.15	0.14	0.21	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
MgO	10.81	10.41	10.84	11.16	18.84	16.75	17.87	17.50	18.76	16.53	16.99
CaO	1.74	1.44	1.48	1.69	11.00	9.59	10.74	9.39	11.38	9.01	9.58
Na ₂ O	5.85	5.92	6.08	5.75	1.17	1.64	1.25	2.04	0.92	2.10	1.88
K ₂ O	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.04	0.04	0.13	0.03	0.05	0.02
Total	96.77	96.67	96.82	96.64	96.43	95.57	96.31	96.85	96.98	96.27	96.34
以 23 个氧为标准计算的阳离子系数											
Si	7.987	7.993	7.982	7.980	7.945	7.948	7.940	7.895	7.996	7.946	7.938
Ti	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004
Al	0.404	0.422	0.455	0.480	0.100	0.152	0.131	0.193	0.078	0.191	0.167
Al ^{IV}	0.013	0.007	0.018	0.020	0.055	0.052	0.060	0.105	0.004	0.054	0.062
Al ^{VI}	0.391	0.415	0.437	0.460	0.045	0.100	0.071	0.088	0.074	0.137	0.105
Cr	0.025	0.006	0.010	0.018	0.006	0.005	0.027	0.036	0.000	0.016	0.018
Fe ³⁺	1.172	1.207	1.180	1.061	0.194	0.238	0.181	0.313	0.155	0.287	0.271
Fe ²⁺	1.207	1.250	1.163	1.237	0.822	1.147	0.968	0.946	0.845	1.125	1.051
Mn	0.027	0.032	0.017	0.018	0.017	0.026	0.021	0.020	0.020	0.021	0.021
Mg	2.310	2.231	2.310	2.384	3.985	3.613	3.803	3.708	3.940	3.538	3.627
Ca	0.267	0.222	0.227	0.260	1.673	1.487	1.643	1.430	1.718	1.386	1.470
Na _B	1.626	1.651	1.686	1.598	0.322	0.460	0.346	0.562	0.251	0.585	0.522
K _A	0.002	0.004	0.000	0.002	0.004	0.007	0.007	0.024	0.005	0.009	0.004
(Na+K) _A	0.002	0.004	0.000	0.002	0.004	0.007	0.007	0.024	0.005	0.009	0.004
Mg+Fe ²⁺ +Mn ²⁺	3.544	3.513	3.490	3.639	4.824	4.786	4.792	4.674	4.805	4.684	4.699
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Al ^{VI})	0.750	0.744	0.730	0.698	0.812	0.704	0.718	0.781	0.677	0.677	0.721
Mg/(Fe ²⁺ +Mg)	0.657	0.641	0.665	0.658	0.829	0.759	0.797	0.797	0.823	0.759	0.775

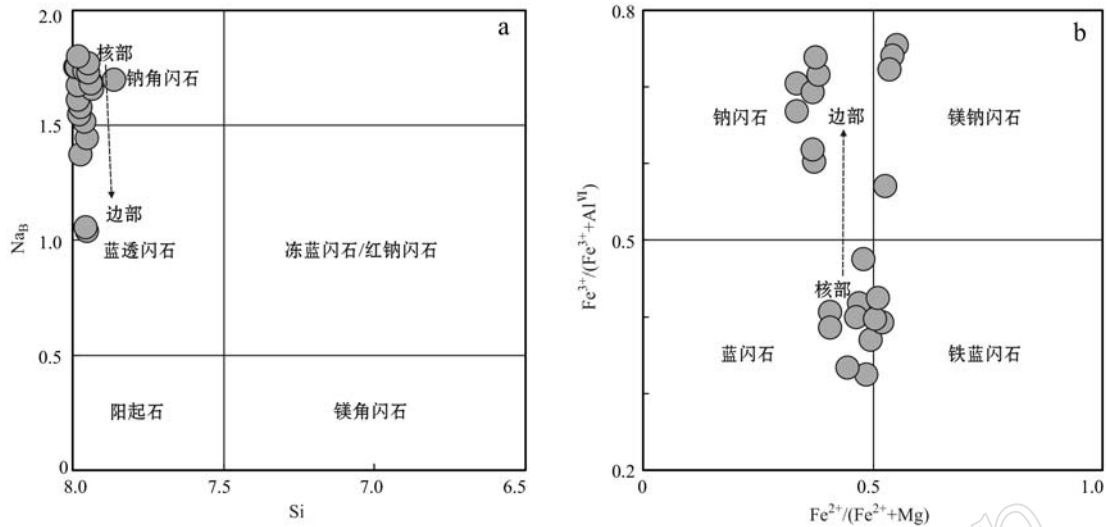


图 5 澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩(BS01-1)中蓝闪石成分图解(根据 Leake *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2015)

Fig. 5 Chemical composition of glaucophane (BS01-1) from Xiaoheijiang-Shangyun area in Lancangjiang complex (after Leake *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2015)

有成分环带,其核部 Na_2O 含量变化范围为 5.75% ~ 6.28%,对应 Na_B 含量变化范围为 1.598 ~ 1.746 p. f. u, 属钠角闪石(图 6a),其 Al_2O_3 和 FeO^{I} 的含量分别为 2.39% ~ 2.84% 和 13.00% ~ 20.43%,对应 Al^{IV} 、 Al^{VI} 、 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的含量分别为 0.007 ~ 0.410 p. f. u、0.068 ~ 0.460 p. f. u、1.061 ~ 1.559 p. f. u 和 1.163 ~ 1.250 p. f. u, 在钠角闪石 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) - \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}})$ 分类图解中属钠闪石端员(图 6b)。边部成分 Na_2O 含量较低,变化范围为 0.92% ~ 4.65%,对应 Na_B 含量变化范围为 0.251 ~

0.585 p. f. u; Ca_B 含量变化范围为 1.386 ~ 1.718 p. f. u, 属钠钙角闪石或钙角闪石;当 $\text{Ca}_B \geq 1.50$, $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.50$, $\text{Ca}_A < 0.50$ 时属钙角闪石;而当 $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.50$, $(\text{Ca} + \text{Na}_B) \geq 1.50$, $0.05 < \text{Na}_B < 1.50$ 时属钠钙角闪石;在 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) - \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}})$ 分类图解主要落入阳起石和蓝透闪石区内(图 6a)。

5.2 钠长石

样品 BS02-5 中基本不含长石类矿物,而样品 BS01-1 中长石为钠长石(表 4),其电子探针化学成

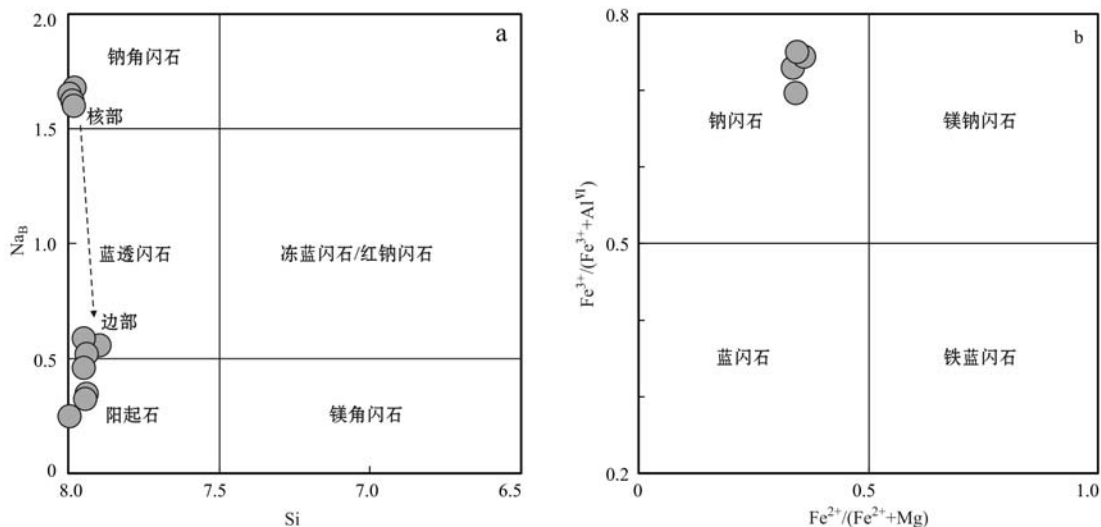


图 6 澜沧江杂岩带小黑江-上允地区蓝片岩(BS02-5)中闪石族矿物成分图解(根据 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 6 Chemical composition of amphibole (BS02-5) from Xiaoheijiang-Shangyun area in Lancangjiang complex (after Leake *et al.*, 1997)

表 4 澜沧江杂岩带蓝片岩(BS01-1)中钠长石化学成分

Table 4 Representative mineral composition of albite in blueschist (BS01-1), Lancangjiang complex

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	68.52	68.73	68.51	68.78	68.40	68.21	69.07	68.74	69.30	68.57	68.43
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	19.27	19.33	19.29	19.27	19.37	18.99	18.55	19.14	18.67	19.18	19.26
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
FeO ^T	0.05	0.10	0.11	0.22	0.18	0.18	0.24	0.17	0.16	0.18	0.20
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
CaO	0.05	0.05	0.07	0.02	0.21	0.06	0.11	0.09	0.00	0.04	0.09
Na ₂ O	12.02	11.71	11.80	11.86	11.68	11.92	11.15	11.83	11.41	11.86	12.04
K ₂ O	0.15	0.07	0.04	0.03	0.20	0.02	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02
Total	100.08	100.04	99.85	100.26	100.11	99.96	99.22	99.98	99.58	99.92	100.08
以 8 个氧为标准计算的阳离子系数											
Si	2.996	3.000	2.998	2.998	2.989	2.989	3.032	3.003	3.031	2.999	2.992
Ti	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	0.993	0.995	0.995	0.990	0.998	0.981	0.960	0.986	0.963	0.989	0.993
Cr	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ³⁺	0.002	0.004	0.004	0.008	0.007	0.007	0.009	0.006	0.006	0.007	0.007
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
Ca	0.002	0.002	0.003	0.001	0.010	0.003	0.005	0.004	0.000	0.002	0.004
Na	1.019	0.991	1.001	1.002	0.990	1.013	0.949	1.002	0.968	1.006	1.021
K	0.008	0.004	0.002	0.002	0.011	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001
Ab	99.03	99.40	99.50	99.70	97.92	99.61	99.27	99.50	99.90	99.60	99.51

分结果显示其 Na₂O 含量变化范围为 11.15%~12.04%，对应的 Ab 值为 97.92~99.70，属低钠长石，通常形成温度较低，产于低级变质岩中。

5.3 多硅白云母

区内蓝片岩中含有一定量的多硅白云母，其电子探针化学成分见表 5，SiO₂ 含量变化范围为 51.14%~52.43%，对应四面体位置 Si 变化范围为 3.559~3.594 p. f. u；Al₂O₃ 的含量为 19.26%~19.80%，对应四面体位置 Al 为 0.406~0.441 p. f. u，而八面体位置 Al 为 1.184~1.196 p. f. u。

5.4 其他矿物

此外，区内蓝片岩中还含有一定量的榍石和绿帘石，其化学成分见表 5。榍石，CaO 含量 29.12%~29.30%，对应的 Ca 含量为 0.821~0.822 p. f. u；TiO₂ 含量为 38.66%~39.16%，对应的 Ti 含量为 0.765~0.771 p. f. u。绿帘石中 FeO^T 含量为 12.72%~14.32%，Fe³⁺/(Fe³⁺+Al)值为 0.20~0.27。

6 变质反应温压计算

如前文所述，根据本区蓝片岩的岩相学和矿物化学特征以及矿物之间的相互转变关系，可将其经

历的变质反应阶段大致分为俯冲峰期蓝片岩相变质和峰期后绿片岩相变质两个变质阶段，两个阶段的主要共生矿物组合分别为蓝闪石+钠长石+多硅白云母+绿泥石+绿帘石和蓝闪石+钠长石±阳起石+绿泥石+绿帘石。现以蓝片岩 BS01-1 样品为例，利用相平衡模拟的方法计算温压条件。所采用温压计算程序为 THERMOCALC 3.33，考虑到 Fe³⁺ 的影响，选取 Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-O(NCFMASHO)体系计算其变质反应温压条件，又考虑到体系中绿泥石、榍石的存在，假设体系中榍石和水过量；由于体系中未考虑钾元素的影响，为此相图中多硅白云母不予考虑。根据样品 BS01-1 的全岩成分(表 1)，重新计算得到全岩 NCFMASHO 体系中的摩尔分数为 SiO₂ 49.56%、Al₂O₃ 8.56%、CaO 8.33%、MgO 13.66%、FeO 12.44%、Na₂O 4.02%、O 2.77%。计算结果为温度 380~580℃、压力 0.3~1.2 GPa(图 7)。图 7a 显示，蓝片岩中蓝闪石在 $p=0.3\sim1.2$ GPa 时稳定存在于温度较低(温度低于 530℃)的范围内，并且蓝闪石+钠长石+绿泥石+绿帘石+石英矿物组合中钠长石的消失以及阳起石的出现，主要受控于压力的变化。结合本区蓝片岩显微结构观察结果，峰期蓝片岩相变质的矿物组合为落入 gl+chl+ep+ab 的四变域中，

表 5 澜沧江杂岩带蓝片岩中多硅白云母、榍石和绿帘石电子探针化学成分

$w_B/\%$

Table 5 Representative mineral composition of phengite, sphene and epidote in blueschist, Lancangjiang complex

序号	多硅白云母(BS01-1)		多硅白云母 (BS02-5)			榍石 (01-1)		绿帘石 (BS01-1)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	52.43	52.38	51.30	51.14	51.72	30.46	30.33	36.89	36.61
TiO ₂	0.10	0.15	0.04	0.05	0.10	38.66	39.16	0.06	0.03
Al ₂ O ₃	19.78	19.80	19.73	19.26	19.58	0.61	0.63	21.58	20.56
Cr ₂ O ₃	0.12	0.09	1.06	1.80	0.79	0.00	0.02	0.00	0.03
FeO ^T	6.45	6.21	5.90	5.94	5.68	0.81	0.72	12.72	14.32
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.06	0.25	0.32
MgO	4.76	4.50	4.30	4.26	4.46	0.01	0.04	0.00	0.00
CaO	0.01	0.01	0.00	0.04	0.02	29.12	29.30	24.30	23.59
Na ₂ O	0.06	0.09	0.07	0.09	0.03	0.02	0.00	0.02	0.04
K ₂ O	11.38	12.83	12.93	12.64	12.98	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	95.11	96.05	95.36	95.20	95.37	99.70	100.28	95.83	95.51
多硅白云母、榍石和绿帘石分别以 11 个、4 个和 12.5 个氧为标准计算的阳离子系数									
Si	3.588	3.594	3.561	3.559	3.581	0.801	0.794	3.033	3.016
Ti	0.005	0.008	0.002	0.003	0.005	0.765	0.771	0.004	0.002
Al	1.596	1.602	1.614	1.580	1.598	0.019	0.019	2.092	1.997
Al ^{IV}	0.412	0.406	0.439	0.441	0.419	—	—	—	—
Al ^{VI}	1.184	1.196	1.175	1.139	1.179	—	—	—	—
Cr	0.006	0.005	0.058	0.099	0.043	0.000	0.000	0.000	0.002
Fe ³⁺	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.507	0.741
Fe ²⁺	0.261	0.356	0.342	0.346	0.329	0.018	0.016	0.368	0.246
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.017	0.022
Mg	0.485	0.460	0.445	0.442	0.460	0.000	0.002	0.000	0.000
Ca	0.001	0.001	0.000	0.003	0.001	0.821	0.822	2.141	2.083
Na	0.008	0.012	0.009	0.012	0.004	0.001	0.000	0.003	0.006
K	0.994	1.124	1.145	1.122	1.146	0.000	0.000	0.000	0.000
Si/Al ^{VI}	3.030	3.005	3.031	3.125	3.037	—	—	—	—

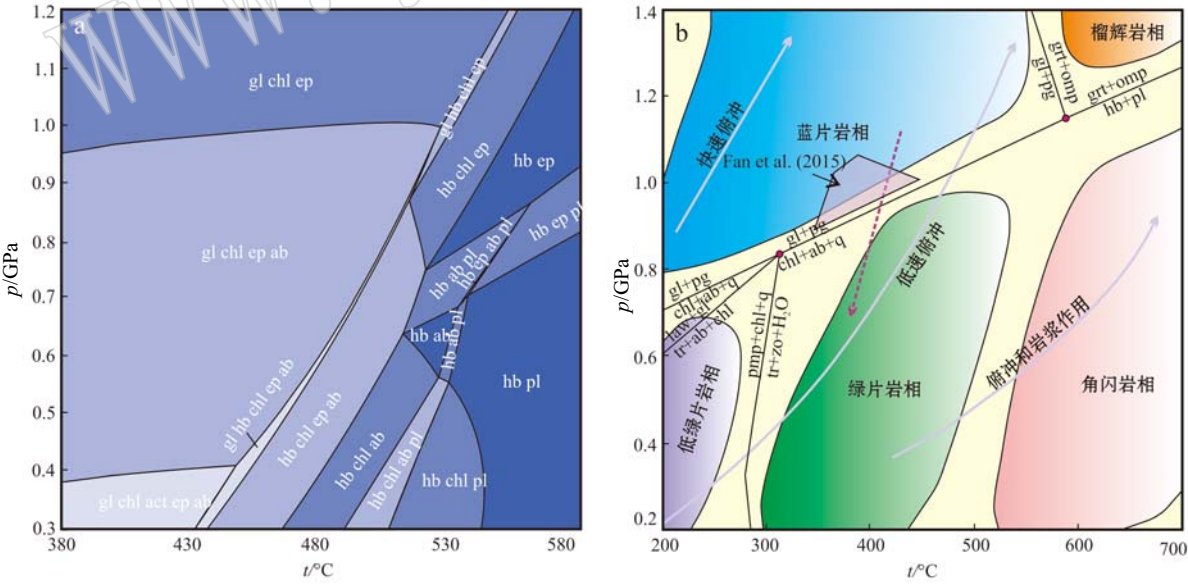


图 7 蓝片岩变质温压图解(BS01-1)

Fig. 7 Diagram of metamorphic p - T condition for blueschist (sample BS01-1)

a—NCFMASHO(+q + sph + H₂O)体系中的 p - T 视剖面图; b—蓝片岩温压范围图解(根据 Kurt and Martin, 2002); 矿物缩写: grt—石榴石; hb—普通角闪石; law—硬柱石; omp—绿辉石; pl—斜长石; pmp—绿纤石; tr—透闪石; q—石英; zo—黝帘石
a— p - T pseudosection for blueschist in NCFMASHO system (+q + sph + H₂O); b—diagram of p - T condition for blueschist (after Kurt and Martin, 2002); Mineral abbreviation: grt—garnet; hb—hornblende; pl—plagioclase; law—lawsonite; omp—omphacite; pl—plagioclase; pmp—pumpellyite; tr—tremolite; q—quartz; zo—zoisite

部分蓝片岩峰期钠长石含量降低表明其压力范围可能为 $gl + chl + ep + ab$ 四变域与 $gl + chl + ep$ 五变域交界附近, 即 0.95 GPa 左右; 而峰后阶段随着压力的降低蓝片岩中出现阳起石, 即压力降低至 $act + gl + chl + ep + ab$ 三变域内, 即 0.40 GPa 左右。Kurt 和 Martin (2002) 在图 7b 中根据矿物之间的转变关系进行了变质相的划分, 由于蓝片岩样品 BS01-1 变质峰期含有一定量的多硅白云母, 即峰期蓝片岩温压范围应该位于 $gl + pg - chl + ab + q$ 反应线之上的蓝片岩相范围之内, 峰期后随着温度压力的降低进入绿片岩相范围。Fan 等 (2015) 根据变质反应关系以及多硅白云母中 Si 含量等值线限定蓝片岩的温压范围如图 7b 所示。

7 讨论与结论

7.1 原岩性质与构造环境

综合考虑不同元素在变质过程中的活泼性, 利用 Ti、Zr、Y、Nb、Yb、Th 等稀土和微量元素对蓝片岩进行原岩类型和构造环境等判断较为合理和准确。前人研究认为板内环境形成的大部分玄武岩具有高的 Zr/Y 值 (Pearce and Cann, 1973; Floyd and Winchester, 1975; Pearce and Flower, 1977), 在 Zr/Y - Zr 图解中, 本区蓝片岩全部都落入板内玄武岩区内 (图 8a)。在 Ti - Zr - Y 图解中所有蓝片岩亦显示一致性, 均落入板内玄武岩区内 (图 8b), 表明其原

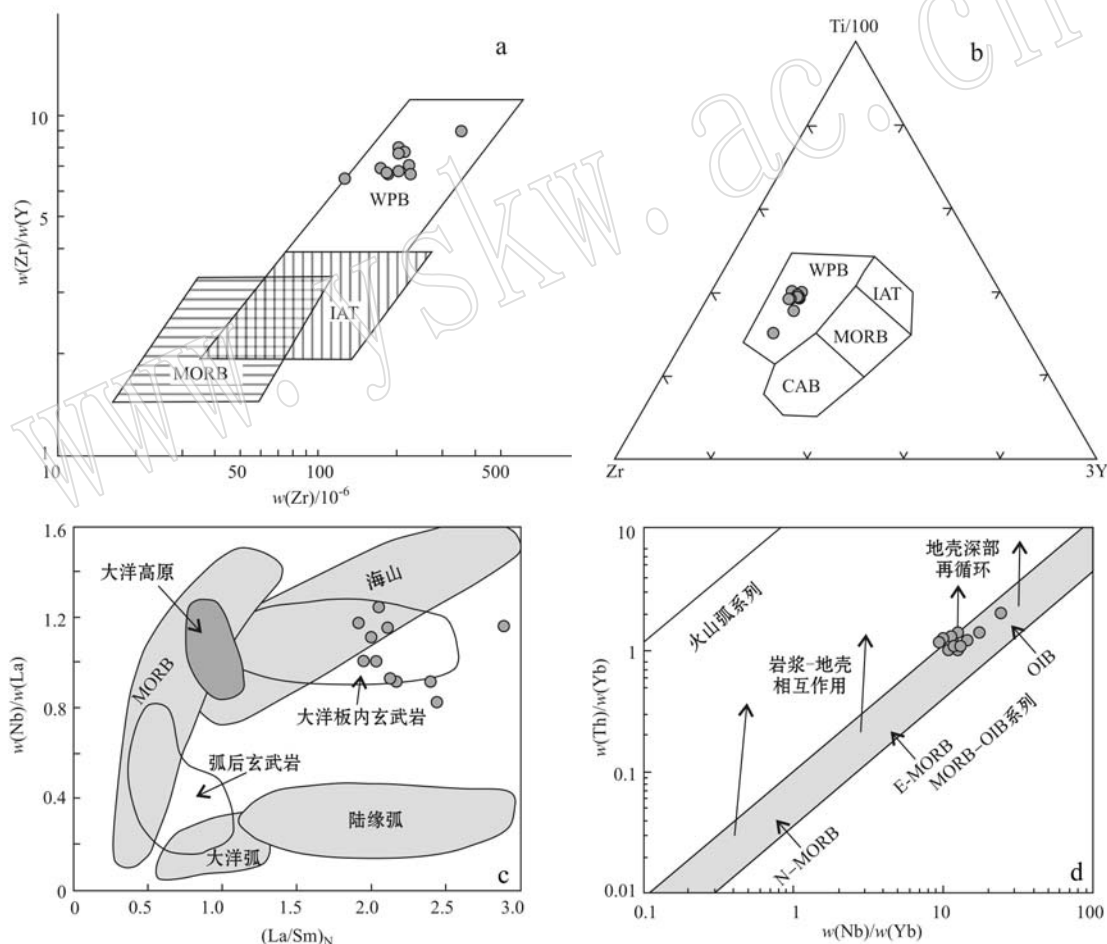


图 8 澜沧江杂岩带蓝片岩构造图解

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for blueschists from Lancangjiang complex

a—Zr/Y - Zr 分类图解 (Pearce and Norrory, 1979); b—Ti - Zr - Y 三角图解 (Pearce and Cann, 1973); c—Nb/La - (La/Sm)_N 图解 (John *et al.*, 2010); d—Th/Yb - Nb/Yb 图解 (Pearce, 2008); WPB—板内玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; OFB—洋底玄武岩; LKT—低钾钙碱性玄武岩

a—Zr/Y - Zr classification diagram (after Pearce and Norrory, 1979); b—Ti - Zr - Y triangular diagram (after Pearce and Cann, 1973); c—Nb/La - (La/Sm)_N diagram (after John *et al.*, 2010); d—Th/Yb - Nb/Yb diagram of blueschists (after Pearce, 2008); WPB—within-plate basalt; IAT— island-arc tholeiitic; MORB—mid-oceanic ridge basalt; CAB—calc-alkali basalt; OFB—ocean-floor basalts; LKT—low-potassium tholeiites

岩具有板内玄武岩的特征。

Th 和 Nb 在风化作用和低角闪岩相变质作用下属不活泼元素,且两者在大多数成岩过程中具有相似的行为,所以可以用来判别地壳混染程度(Pearce, 2008)。在 Pearce(2008)的 Th/Yb-Nb/Yb 图解(图 8d)中,本区蓝片岩落入 OIB 附近,并且稀土元素和微量元素特征与 OIB 的相似,表明其原岩为 OIB 型玄武岩。前人研究表明,OIB 型玄武岩主要形成于板内环境,是地幔柱活动的产物(Winchester and Floyd, 1976; Niu *et al.*, 2002)。本区蓝片岩具有较高的 Nb/La 值(>0.8),在 Nb/La-(La/Sm)_N 图解中大部分蓝片岩落入大洋板内玄武岩的范围内,大洋板内玄武岩常常分布于洋岛和海山链,构成洋岛、海山和海底高原,部分蓝片岩落入海山构造环境区内(图 8c),即本区蓝片岩的原岩可能为形成于海山环境的 OIB 型玄武岩。

7.2 变质演化

青藏高原东南缘“三江”杂岩带属特提斯构造域的东段,记录了特提斯演化和青藏高原形成、隆升的复杂的构造演化过程,尤其是中部澜沧江杂岩带被认为是古特提斯洋主洋盆闭合的位置,也备受国内外地质学家的关注。本文通过对澜沧江杂岩带小黑江-上允地区出露的蓝片岩进行详细的岩相学和矿物化学研究,结合变质温压条件计算,反演蓝片岩及其围岩的构造演化过程,对探讨澜沧江杂岩带古特提斯洋的消减-闭合的构造演化过程及形成的构造背景具有重要科学意义。

虽然,俯冲进变质过程蓝片岩缺乏相应的矿物学记录,即本区蓝片岩只记录了俯冲峰期蓝片岩相变质和峰期后绿片岩相变质两个变质反应阶段,但是,有关蓝片岩的俯冲的时限,前人进行了大量有益研究,例如,张儒瑗等(1990)对南榔、栗义地区的蓝片岩中青铝闪石进行 K-Ar 同位素年龄测试,得到 193 Ma 的变质年龄;赵靖(1993)对多硅白云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测试,得到 238 Ma 的变质年龄;赵靖等(1994)通过对蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素进行分析,认为蓝片岩的形成年龄为 279 Ma,经历了 214 Ma 的蓝片岩相变质;Fan 等(2015)通过蓝片岩中锆石年龄获得蓝片岩的原岩年龄为 260 ± 4 Ma,通过蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析,得到 242 ± 5 Ma 的蓝片岩相变质年龄。综合前人研究资料表明,澜沧江杂岩带蓝片岩原岩形成于二叠纪,经历了三叠纪蓝片岩相变质作用的改造。

综上所述,澜沧江杂岩带蓝片岩原岩可能为保山地块和思茅地块之间的二叠纪洋岛玄武岩(OIB),三叠纪时,OIB 俯冲至 30 多公里的深度(压力可达 0.95 GPa),发生蓝片岩相变质;随后折返至 15~18 km 左右的深度,压力降低至约 0.40 GPa,蓝片岩遭受绿片岩相退变质的作用改造。

致谢 全岩分析由国家地质实验测试中心完成,电子探针分析由国土资源部大陆动力学重点实验室戎合老师协助完成,匿名审稿人对本文提出了许多宝贵的修改意见,在此一并致谢。

References

- Fan Weiming, Wang Yuejun, Zhang Yanhua, *et al.* 2015. Paleotethyan subduction process revealed from Triassic blueschists in the Lancang tectonic belt of Southwest China[J]. *Tectonophysics*, 662 (1): 95~108.
- 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.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~447.
- John T, Scherer E E, Schenk V, *et al.* 2010. Subducted seamounts in an eclogite-facies ophiolite sequence: the Andean Raspas Complex, SW Ecuador[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159: 265~284.
- Kurt B and Martin F. 2002. *Petrogenesis of Metamorphic Rock*. 7th Completely Revised and Updated Edition[M]. PRO EDIT GmbH, Heidelberg, Germany, 312.
- Leake B E, Woolley A R, Charles E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li Xinglin. 1996. Basic characteristics and formation structural environment of Lincang composite granite batholiths[J]. *Yunnan Geology*, 15: 1~18(in Chinese with English abstract).
- Liao Shiyong, Yin Fuguang, Wang Dongbing, *et al.* 2014. The discovery of Middle Triassic alkali feldspar granite from the giant Lincang batholith in southern Three River region and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 1~12(in Chi-

- nese with English abstract).
- Liu Benpei, Feng Qinglai and Fang Nianqiao. 1993. Tectonic evolution of Palaeo-Tethys poly-island-ocean in Changning-Mengliain and Lancangjiang belts, Southwestern Yunnan[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 18(5): 529~539(in Chinese).
- Niu Yaoling, Regelous M, Wendt I J, *et al.* 2002. Geochemistry of near-EPR seamounts: importance of source vs. process and the origin of enriched mantle component[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3~4): 327~345.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 100(1): 14~48.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.
- Pearce J A and Flower M F J. 1977. The relative importance of petrogenetic variables in magma genesis at accreting plate margins: a preliminary investigation[J]. *Journal of the Geological Society*, 134: 103~127.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33~47.
- Peng Toupeng, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2006. Zircon U-Pb dating of Early Mesozoic acidity volcanic rock in southern Lancangjiang and its tectonic significance[J]. *Science in China (Series D)*, 36(2): 123~132 (in Chinese).
- Peng Toupeng, Wilde S A, Wang Yuejun, *et al.* 2013. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang Zone, SW China: Petrogenesis and implications for the evolution of Paleo-Tethys [J]. *Lithos*, 168~169: 15~32.
- Peng Xingjie and Luo Wanlin. 1982. The discovery of glaucophane schist zone in the southern Lancangjiang in the Western Yunnan Province, China and its tectonic implication[J]. *Regional Geology of China*, 2: 69~75(in Chinese).
- Peng Xingjie and Luo Wanlin. 1983. A preliminary identification of the paired metamorphic zones in the southern segment of Lancang Jiang [A]. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau*[C]. 2: 21~30 (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.
- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Fan Weiming, *et al.* 2010. Petrogenesis of late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys: Geochronological and geochemical constraints[J]. *Lithos*, 120: 529~546.
- Wei Guanyi, Feng Guorong, Luo Zaiwen, *et al.* 1984. Stratigraphic sequences of the Lancang and Chongshan Groups in western Yunnan and their volcanism and metamorphism[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2: 12~20 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28: 459~469.
- Yang Jiawen and Yan Pingxing. 1990. South Tethys tectonic and palaeogeographic framework during Permian-Carboniferous in Western Yunnan[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 15(4): 379~406 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Cong Bolin, Qiao Guangsheng, *et al.* 1990a. 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).
- Zhai Mingguo, Cong Bolin and Zhang Ruyuan. 1990b. Identification of the Lancang Group of two types of volcanic rocks in western Yunnan and its geological significance[J]. *Science China (Series B)*, 1: 77~85(in Chinese).
- Zhang Jinrui, Wei Chunjing and Chu Hang. 2015. Blueschist metamorphism and its tectonic implication of Late Paleozoic-Early Mesozoic metabasites in the mélange zones, central Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 352~364.
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin and Han Xiuling. 1990. Amphiboles of blueschist in west Yunnan region[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 43~53(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin and Li Yonggang. 1989. Blueschists and their tectonic significance in western of Yunnan Province[J]. *Science China (Series B)*, 12: 1 317~1 329(in Chinese).
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin, Maruyama Shige, *et al.* 2007. Metamorphism and tectonic evolution of the Lancang paired metamorphic belts, south-western China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 605~619.
- Zhang Zhibin, Li Jing, Lü Guxian, *et al.* 2004. Characteristics of blueschist in Shuangjiang tectonic mélange zone, West Yunnan province[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 15(2):

224~231.

Zhao Jing. 1993. A study of muscovites from the Lancang metamorphic belt in western Yunnan and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 251~260(in Chinese with English abstract).

Zhao Jing, Zhong Dalai and Wang Yi. 1994. Metamorphism of Lancang metamorphic belt, the western Yunnan and its relation to deformation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(1): 27~40(in Chinese with English abstract).

Zhong Dalai, *et al.* 1998. Paleo-Tethys Orogenic Belt in Western Yunnan-Sichuan[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

Zhou Weiquan and Lin Wenxin. 1982. The features of the glaucophane schist in the southern part of the Lancang Jang metamorphic belt [J]. *Regional Geology of China*, 2: 76~85(in Chinese with English abstract).

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).

Zhu Qinwen, Mo Xuanxue and Zhang Shuangquan. 1999. The evolution of the Palaeo-Tethys in the South Lancangjiang zone, Western Yunnan: Evidences from magmatic rocks[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23: 16~30(in Chinese).

附中文参考文献

廖世勇, 尹福光, 王冬兵, 等. 2014. 滇西“三江”地区临沧花岗岩基中三叠世碱长花岗岩的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(1): 1~12.

李兴林. 1996. 临沧复式花岗岩基的基本特征及形成构造环境的研究[J]. *云南地质*, 15: 1~18.

刘本培, 冯庆来, 方念乔. 1993. 滇西南昌宁-孟连和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 18

(5): 529~539.

彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 36: 123~132.

彭兴阶, 罗万林. 1982. 滇西澜沧江南段蓝闪片岩带的发现及其大地构造意义[J]. *中国区域地质*, 2: 69~75.

彭兴阶, 罗万林. 1983. 澜沧江南段双变质带的初步确定[A]. *青藏高原地质文集[C]*, 2: 21~30.

卫管一, 冯国荣, 罗再文, 等. 1984. 滇西澜沧群、崇山群地层层序及其火山作用和变质作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2: 12~20.

杨嘉文, 严平兴. 1990. 南特提斯滇西带石炭-二叠纪构造古地理格局[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 15(4): 379~406.

翟明国, 从柏林, 乔广生, 等. 1990a. 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.

翟明国, 从柏林, 张儒瑗. 1990b. 滇西澜沧群两类火山岩系的识别及其地质意义[J]. *中国科学(B辑)*, 1: 77~85.

张儒瑗, 从柏林, 韩秀伶. 1990. 滇西蓝片岩中的角闪石[J]. *地质科学*, 1: 43~53.

张儒瑗, 从柏林, 李永刚. 1989. 滇西蓝片岩及其构造意义[J]. *中国科学(B辑)*, 12: 1317~1329.

赵靖. 1993. 滇西澜沧变质带中白云母的研究及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 12(3): 251~260.

赵靖, 钟大赉, 王毅. 1994. 滇西澜沧变质带变质作用和变形作用的关系[J]. *岩石学报*, 10(1): 27~40.

钟大赉, 等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社.

周维全, 林文信. 1982. 澜沧江变质带南段蓝闪石片岩特征[J]. *中国区域地质*, 2: 76~85.

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.

朱勤文, 莫宣学, 张双全. 1999. 南澜沧江古特提斯演化的岩浆岩证据[J]. *特提斯地质*, 23: 16~30.