

· 专题研究 ·

旁那石榴蓝闪片岩特征及其构造意义

刘鸿飞¹, 刘 焰²

(1. 西藏地质调查院, 西藏 拉萨 850000; 2. 中国地质科学院 地质研究所 大陆动力学实验室, 北京 100037)

摘要: 在拉萨市墨竹工卡县旁那村附近的二叠系(变质)玄武岩之下发现了石榴蓝闪片岩, 与二叠系海相灰岩、石英岩、白云母片岩共生。该片岩包括石榴石和角闪石变斑晶及由(多硅)白云母、斜黝帘石、石英、金红石、锆石、钠长石、绿泥石、榍石、钛铁矿组成的基质。角闪石变斑晶中可见两期蓝闪石, 早期蓝闪石富铁、贫钠, 晚期蓝闪石包裹早期蓝闪石, 其成分接近纯的蓝闪石端员, 并常具有冻蓝闪石或阳起石的冠状体。从核部至边部, 钾质白云母单位分子中的硅含量快速降低; 含有霓辉石、金红石和石英等包体的石榴石的锰含量急剧降低, 镁含量则升高。运用视剖面(pseudosection)方法模拟该片岩 $p-t$ 演化轨迹, 视剖面温压计算范围为 250~650°C 和 0.4~2.8 GPa。模拟结果表明该片岩的变质温压始于 450°C 和 2.5 GPa, 先经历近等压升温过程至 500°C, 再经历近等温降压过程至 0.6 GPa, 表明该片岩系冷洋壳快速俯冲与折返的产物。拉萨地块中部早三叠世查曲浦组安山岩和晚三叠世过铝质花岗岩的产出以及在该变质杂岩共生的碳酸盐岩中二叠纪化石的发现共同限定了冷洋壳的俯冲应发生在二叠、三叠纪之交。区域地质分析表明, 在中生代早期冈瓦纳大陆裂解之前, 其东北边缘的冷洋壳向冈瓦纳大陆之下俯冲, 随后冈瓦纳大陆向外增生, 然后再裂解, 形成现今的拉萨地块。

关键词: 石榴蓝闪片岩; 拉萨地块; 冷洋壳俯冲; 大陆增生

中图分类号: P588.34⁺4; P548

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)03-0199-16

Garnet glaucophane blueschist from Pana: implications to Tibetan tectonic evolution

LIU Hong-fei¹ and LIU Yan²

(1. Tibetan Geological Survey, Lhasa 850000, China; 2. Laboratory for Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Garnet glaucophane schist coexistent with Permian limestone, quartzite and muscovite schist was recognized below Permian (meta)basalts and altered gabbro in the vicinity of Pana Village within the southern central Lhasa terrain. The blueschist consists of corroded garnet and amphibole porphyroblasts situated in a matrix of fine-grained muscovite, epidote, chlorite, biotite, albite, quartz, and accessory rutile, titanite and apatite. Mn and Mg contents of the corroded garnet enclosing aegirine-rich clinopyroxene, rutile and quartz decrease and increase, respectively, from core to rim. Amphibole porphyroblasts grew in several stages, as evidenced by two different glaucophane components in the cores and Na-Ca amphibole and/or Ca amphibole in the rims. The glaucophane surrounded by late glaucophane is richer in Fe and poorer in Na than the late one that is close to the pure glaucophane end-member. The Si contents of phengite are high in the center but low along the rim. The $p-t$ path, starting above 2.5 GPa-450°C and showing subsequently first a temperature increase to 500°C and then a pressure release via

收稿日期: 2008-11-16; 修订日期: 2009-03-26

基金项目: 中国地调局项目(1212010818094); 科技部科技支撑项目(2006BAB01A04); 科技部公益性科研院所基本科研业务专项(J0816)

作者简介: 刘鸿飞(1963-), 男, 高级工程师, 从事青藏高原矿产勘查与成矿地质背景研究, E-mail: 760125951@qq.com; 通讯作者: 刘焰(1969-), 男, 研究员, 从事青藏高原岩石与构造地质研究, E-mail: yanliu0315@yahoo.com.cn。

blueschist conditions to 0.6 GPa, was reconstructed using a $p-t$ pseudosection calculated for the $p-t$ range 0.4 ~ 2.8 GPa and 250 ~ 650°C. Such a low gradient is typical for the subduction of a cold oceanic plate along a continental margin. In combination with early Triassic Chaqupu andesite, late Triassic-early Jurassic peraluminous granites and Permian fossils within the metamorphic complex, this finding has led to the conclusion that, prior to Gondwana dispersion in early Mesozoic, the subduction of an oceanic plate beneath the northeastern Gondwana margin took place during the Permo-Triassic period and that, subsequent outgrowth of NE-trending Gondwana triggered off the final formation of the Lhasa terrain.

Key words: garnet glaucophane blueschist; Lhasa terrain; cold oceanic subduction; continental outgrowth

一般认为,拉萨地块是冈瓦纳大陆东北部一个重要的地块,其北界为班公-怒江缝合带,南界为印度河-雅江缝合带(图1),大约在早侏罗世时从冈瓦纳东北边缘裂离出来,在白垩纪时与南羌塘地块拼贴(Allègre *et al.*, 1984; Chang *et al.*, 1986; Dewey *et al.*, 1988)。然而这个传统的模型却比较难于解释产出于拉萨地块内的镁铁质-超镁铁质岩块(Hsü *et al.*, 1995; 潘桂棠等, 2004; 潘桂棠等, 2006; 和钟铎等, 2006a)。潘桂棠等(2006)以最近完成的 1:25

万区域地质调查为基础,提出拉萨地块系以其中部的隆格尔-念青唐古拉为陆轴,向南、北两侧经历多次造弧增生作用而成。这个模型可以很好地解释拉萨地块内部镁铁质岩块的成因,但可能很难解释最近在拉萨地块中部发现的晚二叠世榴辉岩(杨经绥等, 2006; 2007; Yang *et al.*, 2009)以及本文报道的石榴蓝闪片岩,也可能很难解释拉萨地块内晚三叠世大规模花岗岩的成因。也有学者认为拉萨地块内可能存在多条古缝合带(Hsü *et al.*, 1995; 和钟铎

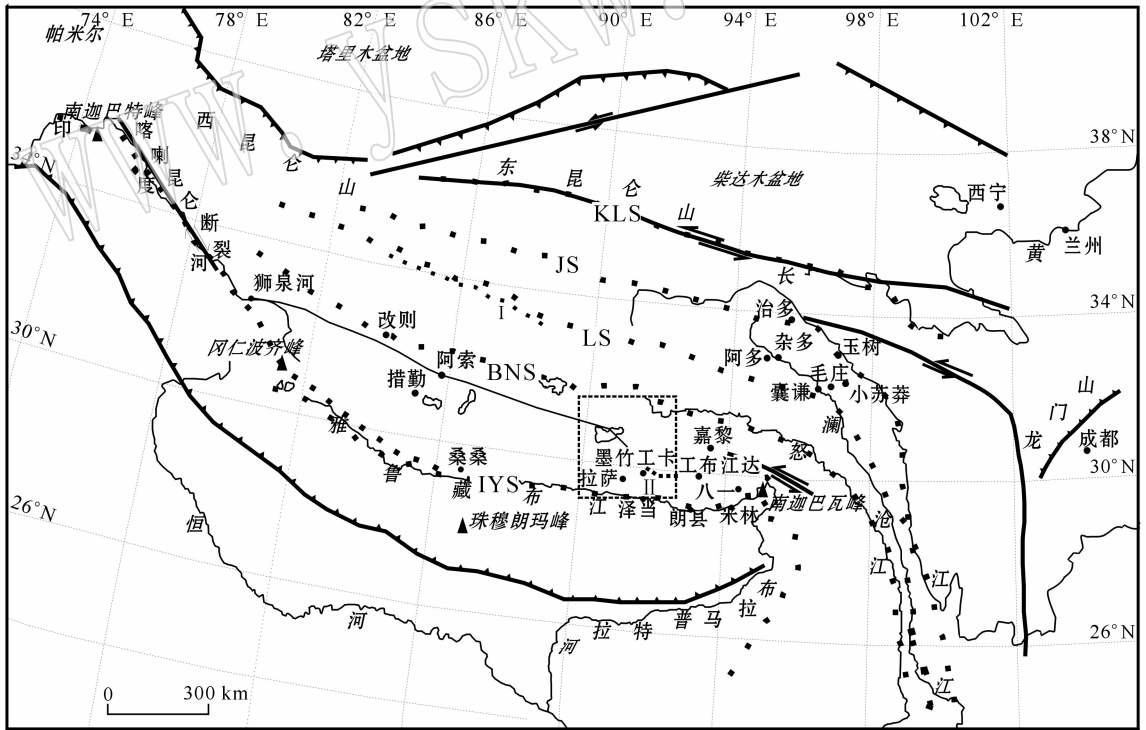


图1 青藏高原及研究区的大地构造背景示意图

Fig. 1 Geological sketch map of Tibetan plateau, showing tectonic setting of the working area

IYS—印度河-雅鲁藏布缝合带; BNS—班公-怒江缝合带; LS—龙木错-双湖-澜沧江缝合带; JS—金沙江缝合带; KLS—昆仑-阿尼玛卿缝合带; I—龙木错-双湖-澜沧江高压变质杂岩带; II—旁那-松多石榴蓝闪片岩、榴辉岩带; 虚线框为研究区(图2)
IYS—Indus-Yarlung Zangbo suture zone; BNS—Bongong-Nujiang suture zone; LS—Longmuco-Shuanghu-Lancangjiang suture zone; JS—Jinshajiang suture zone; KLS—Kunlun suture zone; I—Longmuco-Shuanghu-Lancangjiang HP metamorphic rocks; II—Pana-Songduo HP metamorphic rocks; dash box showing the working area(Fig. 2)

等,2006a)。基于新发现的榴辉岩,杨经绥等(2007)将拉萨地块解体,论述了拉萨地块内部存在古特提斯洋壳,在二叠纪末期发生了洋壳的俯冲。许多学者从不同角度探讨了拉萨地块内的印支运动(李才等,2003;曲永贵等,2003;刘琦胜等,2006;张宏飞等,2007;李化启等,2008),然而,目前对包括拉萨地块在内的青藏高原晚古生代至早中生代演化过程的认识仍比较模糊,例如,尚不清楚拉萨地块何时形成。笔者拟在拉萨地区旁那村附近新发现石榴蓝闪片岩的详细岩石学研究基础之上,结合最近几年在青藏高原所取得的新发现、新进展,初步探讨青藏高原晚古生至早中生代的构造演化过程。

1 区域地质特征

青藏高原系不同块体在不同时期通过洋壳俯冲和随后的块体碰撞、增生等方式而形成的(Allègre *et al.*, 1984; Chang *et al.*, 1986; Dewey *et al.*, 1988)。从南(西)至北(东),青藏高原大体可分为喜马拉雅、拉萨、南羌塘-保山、北羌塘-思茅巴颜喀拉-松潘甘孜、昆仑-祁连-阿尔金块体,其间被印度河-雅鲁藏布缝合带、班公-怒江缝合带、龙木错-双湖-澜沧江缝合带、金沙江-玉树缝合带、阿尼玛卿-昆仑缝合带分隔开(图1)。很早就在高原腹地发现了代表洋壳俯冲的蓝片岩(Yin and Harrison, 2000),随后在该蓝片岩产地东、西两侧,大体沿龙木错-双湖缝合带发现了更多蓝片岩的产出(李才,1987;姚宗富,1988;胡克等,1995;鲍佩声等,1999;邓希光等,2000,2005)。最近,在红脊山附近发现了硬柱石蓝片岩(陆济璞等,2006),在片石山一带发现了低温榴辉岩(李才等,2006a),这充分说明了南、北羌塘地块之间发育了一条以硬柱石蓝片岩、低温榴辉岩为代表的由冷洋壳俯冲形成的高压变质杂岩带(图1)。同位素测年工作表明该带高压变质事件发生于二叠与三叠纪之间(李才,1997;李才等2002;邓希光等,2001;Kapp *et al.*, 2003;李才等,2006b)。

拉萨地块的变质基底出露较少,目前在该地块北部的安多地区、中部的念青唐古拉和东部的易贡错-东久一带有少量的出露(图2)。念青唐古拉和安多一带的变质基底主要形成于新元古代(胡道功等,2005;Guynn *et al.*, 2006),但尚不清楚拉萨地块东部变质基底的形成与演化。晚古生代沉积盖层也主要分布于该块体的中、北部,主要岩性为海相的碳

酸盐岩、黑色页岩、板岩、粉砂岩等(潘桂棠等,2004)。很早就在拉萨地块内部永珠-纳木错以西发现了镁铁质-超镁铁质岩带,认为是拉萨地块内部的另一条蛇绿岩带(梅厚钧等,1981;Hsü *et al.*, 1995)。根据中生代地层不整合于该区蛇绿岩套岩石之上,且在中生代地层底砾岩中发现超基性岩砾石、并夹含铬尖晶石砂岩的观测,梅厚钧等(1981)推断纳木错之西、班戈县境内的蛇绿岩活动时代为海西至印支期,早于其北侧的班公-怒江蛇绿岩的活动时间。这一认识得到了最近完成的1:25万区域地质调查(陈玉禄等,2005)的证实。

近年来1:25万区域地质填图进一步揭示出,大体沿拉萨地块中部,有一主要由(蚀变)辉长岩、辉绿岩、(变质)玄武岩组成的镁铁质岩带,东西断续延长达上千千米(图1、图2),宽3~35 km,被称为狮泉河-拉果错-阿索-永珠-纳木错蛇绿混杂岩(潘桂棠等,2004,2006)。根据硅质岩中产有中侏罗至早白垩世放射虫、辉长岩岩墙的锆石U-Pb年龄为 178 ± 10 Ma,认为该蛇绿混杂岩形成于晚三叠世与早白垩世

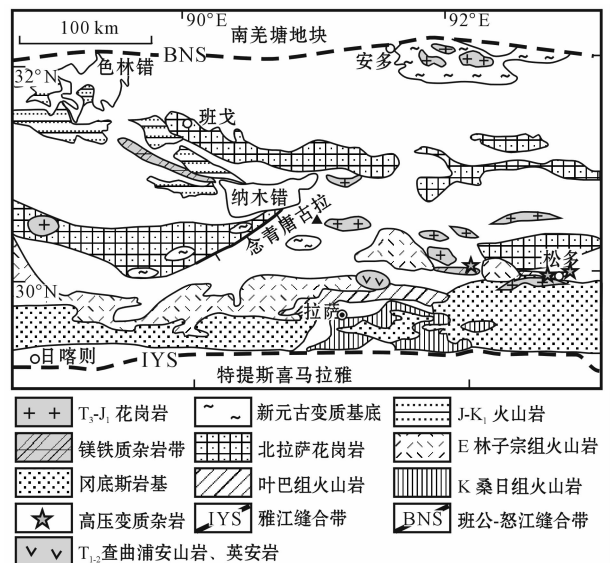


图2 拉萨地块中部构造岩浆变质岩简图[据李才等(2003)、杨德明等(2004)、潘桂棠等(2004)、Kapp等(2005)、Chu等(2006)、刘琦胜等(2006)、和钟铎等(2006)、杨经绥等(2007)以及笔者实测资料修编]

Fig. 2 Sketch map showing magmatic and metamorphic rocks within Lhasa terrain (modified after Li Cai *et al.*, 2003; Pan Guitang & Ding, 2004; Kapp *et al.*, 2005; Chu *et al.*, 2006; Liu Qisheng *et al.*, 2006; He Zhonghua *et al.*, 2006; Yang Jingsui *et al.*, 2007 and the authors' own observations)

之间,为燕山期的蛇绿岩(潘桂棠等,2006),该结论与梅厚钧等(1981)的观测相左。曲永贵等(2003)则发现该区上三叠统多布日组不整合于晚二叠统海相碳酸盐岩之上,表明早期的洋盆曾经闭合,印支运动对拉萨地块影响比较大,这一观测与梅厚钧等(1981)的观点一致,但曲永贵等(2003)强调该区在晚三叠世之后又有新一轮的地壳伸展,与潘桂棠等(2006)的结论相似。这是否意味着该区存在两条不同时代的蛇绿岩套?值得今后研究工作的证实或证伪。此外,在拉萨地块中部,还零星产出一套被称为松多群的浅变质杂岩,主要包括石英岩、白云母石英片岩、变质杂砂岩等,大体平行于前述蛇绿岩套产出,目前对它的认识程度还比较低(杨经绥等,2007)。

拉萨地块以强烈的多期岩浆活动为特征。早在上个世纪90年代初,1:20万区域地质调查(拉萨幅)就在却桑温泉南侧山坡一带发现了早、中三叠世的查曲浦组的安山岩、英安岩等岩石(图2)。1:20万区域地质调查(沃卡幅)则在松多一带发现了晚三叠世的花岗岩(图2)。近年来的1:25万区域地质调查与专题研究则进一步揭示出在拉萨地块内部广泛发育晚三叠至早侏罗世的花岗岩类岩石(李才等,2003;杨德明等,2004;Kapp *et al.*, 2005;刘琦胜等,2006;Chu *et al.*, 2006;Gynn *et al.*, 2006;和钟铨等,2006b;张宏飞等,2007),其中大部分岩石为过铝质花岗岩,多集中产于拉萨地块中部(图2),认为是拉萨地块地壳曾发生大规模重熔的产物(Kapp *et al.*, 2005;刘琦胜等,2006;Chu *et al.*, 2006;Gynn *et al.*, 2006;张宏飞等,2007)。前述的镁铁质-超镁铁质岩片和松多群浅变质杂岩常被这些晚三叠世的花岗岩类岩石所侵位(潘桂棠等,2004;李化启等,2008;Yang *et al.*, 2009)。向南,拉萨市附近有早、中侏罗世的叶巴组火山岩产出,以玄武岩质和英安质火山岩为主,仅有少量安山岩。这两类岩石在微量元素地球化学、锶、钕同位素组成等方面均相似(潘桂棠等,2006),表明两者来自相同的源区。区域上,这些火山岩被中、晚侏罗世多底沟组的海相碳酸盐岩不整合覆盖(拉萨幅1:20万区域地质报告)。再向南,至雅江北岸,则为著名的冈底斯花岗岩基,成岩时代主要为白垩纪至新生代早期,此外,沿雅江北岸,有白垩纪桑日组的安山岩产出,现在多认为冈底斯花岗岩基和桑日组火山岩是新特提斯洋向拉萨地块之下俯冲的产物,形成于岛弧增生的环境之下(潘桂棠等,2006;朱弟成等,2006)。

从念青唐古拉主峰向北,即为拉萨地块北部区域,岩浆活动同样强烈(图2)。早年的科学考察与专题研究已揭示出这一带花岗岩多为过铝质的二云母花岗岩、白云母花岗岩,呈岩基产出,主要形成于中生代晚期(金成伟,1981a;Xu *et al.*, 1985;王富宝等,1990;许荣华,1990)。此外,侏罗至白垩的中酸性火山岩同样发育(金成伟,1981b)。最近完成的1:25万区域地质调查进一步证实了早期科考的结论(潘桂棠等,2006;朱弟成等,2006)。上述研究成果充分阐明了从拉萨地块中部向南、北两侧,岩浆活动趋于年轻,从早三叠世逐渐变至白垩纪。

最近有关拉萨地块研究的一个重要进展是在其内部(松多地区)发现了榴辉岩(杨经绥等,2006,2007;Yang *et al.*, 2009)。该处榴辉岩呈大小不一的岩片,常与(蚀变)辉长岩共生,并逆冲于松多群白云母石英片岩之上。这些岩石常被后期的晚三叠世花岗岩所侵位(杨经绥等,2007;李化启等,2008)。初步的锆石 SHRIMP 年代学研究和岩石地球化学研究表明其系古特提斯残余洋壳于晚二叠世俯冲的产物(杨经绥等,2007;Yang *et al.*, 2009)。本文所介绍的石榴蓝闪片岩即产于松多榴辉岩西约80 km处的墨竹工卡县北旁那村附近(图3)。该片岩与海相灰岩、石英岩、白云母片岩、变质玄武岩与蚀变辉长岩等岩石共生。早期的1:20万区域地质调查(拉萨幅)还在海相灰岩中发现了二叠纪化石,如 *Neoschwangerina* sp.、*Verbeekina* sp. 和 *Wentzelela* sp.。

2 石榴蓝闪片岩特征

利用德国斯图加特大学光学显微镜、电子探针开展石榴蓝闪片岩观察与测试工作。电子探针为配备五道波谱仪的 CAMECA SX100。Ti、Cr、Mn 三元素波峰和背景的测量时间各为 60 s,其他元素峰与背景的测量时间各为 20 s。运用天然和人工合成的标样校正波谱仪。采用电子束逐步扫描方式获取矿物的面成分图,扫描时间为每步 100 ms,扫描步长为 1 μm 。代表性的矿物成分见表 1。

该石榴蓝闪片岩由两部分组成,石榴石和角闪石变斑晶和由(多硅)白云母、角闪石、斜黝帘石、石英、金红石、锆石、钠长石、绿泥石、榍石和钛铁矿所组成的基质。偏光显微镜下,角闪石变斑晶具典型的蓝色多色性,多具环带结构。电子探针显示角闪石变斑晶的成分环带明显:核部包含两期蓝闪石,边

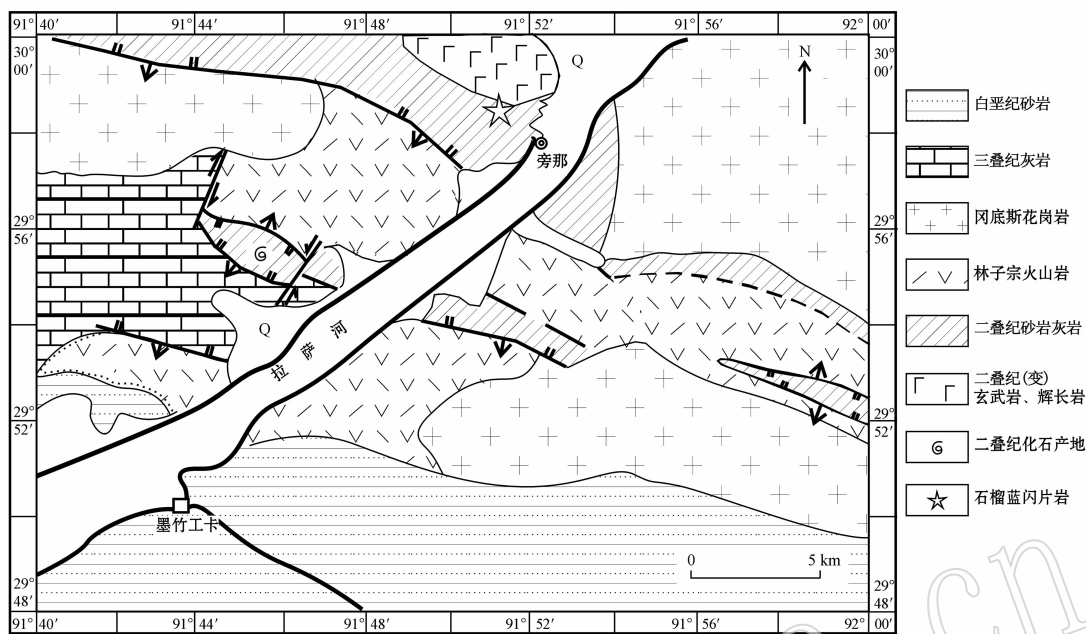


图3 旁那蓝片岩地质简图(据1:20万拉萨幅地质图修编)^①

Fig. 3 Geological map of an area around Pana Village, showing the location of blueschists in central Lhasa terrain (modified after 1:200 000 Geological Map of Lhasa Area and the authors' own observations)

表1 石榴蓝闪片岩代表性矿物成分

$w_B/\%$

Table 1 Representative composition of minerals in the studied blueschist

点号	角闪石		白云母				绿泥石		石榴石		绿帘石		单斜辉石	
	钠质闪石	钙质闪石	核	边	核	边	核	边	核	边				
	#1	#2	#3	#4	#5	#6								
SiO ₂	54.85	56.84	55.49	50.36	47.61	54.18	51.15	49.73	28.98	36.66	36.79	37.81	37.15	54.56
TiO ₂	0.04	0.03	0.02	0.12	0.08	0.00	0.18	0.25	0.01	0.08	0.06	0.12	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	6.56	10.82	6.52	8.21	7.08	1.89	23.55	29.33	18.64	20.44	21.11	27.73	23.62	5.84
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00
FeO	15.20	11.32	13.62	12.82	20.29	10.36	3.71	3.29	24.74	29.13	33.28	7.02	12.96	14.69
MnO	0.20	0.03	0.12	0.16	0.23	0.22	0.01	0.01	0.71	8.36	1.53	0.08	0.11	0.01
MgO	11.52	9.69	11.60	12.88	8.85	17.51	3.88	2.75	15.32	1.23	2.40	0.06	0.02	5.93
CaO	1.23	0.81	3.52	8.78	9.69	11.24	0.03	0.01		4.92	5.09	23.98	23.22	9.86
Na ₂ O	5.44	7.11	5.41	2.91	2.20	0.99	0.20	0.49		0.03	0.02	0.00	0.02	8.31
K ₂ O	0.06	0.02	0.03	0.18	0.16	0.03	9.75	10.02						0.01
Total	95.08	96.68	96.33	96.42	96.22	96.43	92.47	95.88	88.40	100.91	100.28	96.81	97.20	99.25
Si	7.684	7.899	7.843	7.256	7.164	7.705	7.015	6.582	6.008	5.843	5.834	2.980	2.979	1.995
Al	1.083	1.771	1.086	1.394	1.256	0.317	3.807	4.576	4.554	3.839	3.945	2.575	2.232	0.252
Ti	0.004	0.003	0.002	0.013	0.009	0.000	0.019	0.025	0.002	0.010	0.007	0.007	0.003	0.001
Cr	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.004	0.000
Fe ³⁺	1.688	0.265	0.672	0.511	0.599	0.568	0.000	0.009		0.153	0.055	0.416	0.782	0.347
Fe ²⁺	0.113	1.051	0.938	1.041	1.954	0.671	0.426	0.364	4.289	3.730	4.358			0.107
Mn	0.023	0.004	0.015	0.019	0.030	0.026	0.001	0.001	0.125	1.129	0.205	0.005	0.007	0.000
Mg	2.406	2.007	2.444	2.766	1.985	3.713	0.793	0.543	4.734	0.292	0.567	0.008	0.002	0.323
Ca	0.184	0.120	0.533	1.356	1.562	1.713	0.004	0.001		0.839	0.865	2.024	1.995	0.386
Na	1.676	1.915	1.482	0.812	0.641	0.272	0.053	0.126		0.010	0.005	0.000	0.003	0.589
K	0.010	0.004	0.005	0.033	0.031	0.006	1.706	1.692						0.000

注:绿泥石阳离子数按28个氧原子计算,其余矿物阳离子数计算据 Massonne 和 Kopp (2005);#1:早期蓝闪石,#2:晚期蓝闪石,#3:石榴石中的冻蓝闪石,#4:晚期蓝闪石边部的冻蓝闪石,#5:石榴石边部的阳起石,#6:早期蓝闪石内部的阳起石。

① 西藏区域地质调查大队.1992.拉萨市幅1:20万区域地质调查报告(内部资料).

部则为冻蓝闪石甚至阳起石(图4、图5)。早期蓝闪石被晚期蓝闪石所包裹,成分上前者比后者富铁、贫钠(图4),晚期蓝闪石成分接近纯的蓝闪石端员,并常具有冻蓝闪石甚至阳起石的冠状体(图4)。在早期蓝闪石内部还发现有石英、磷灰石和阳起石的包体(图4)。基质中的(多硅)白云母也具环带结构(图6):单位分子(pfu)中的硅含量从核部的3.50~3.51向边部渐变为3.25,而铝的含量则升高,硅与铝的含量呈反相关关系(图7a)。从白云母核部至边部,硅与 $Mg/(Mg + Fe + Mn)$ 比值,则没有明显的线性关系(图7b)。石榴石变斑晶粒径一般为1 mm

左右,常被镁值 $[Mg/(Mg + Fe)]$ 为0.52 的绿泥石所穿插与交代(图8),其中常含有较多的包体,经在电子探针下仔细检查,识别出霓辉石、金红石、石英、冻蓝闪石、绿帘石等包体,但没有发现蓝闪石与多硅白云母的包体,表明石榴石形成于蓝闪石与多硅白云母之前,并且其中的冻蓝闪石、斜黝帘石包体常沿石榴石中的裂纹产出(图8),因此认为这些冻蓝闪石与斜黝帘石的包体很可能系后期交代或变质的产物。需要指出的是,霓辉石(表1、图9)只作为包体产出于石榴石之中,未在基质和角闪石内部发现该矿物,表明该矿物为早期的矿物相,只被早

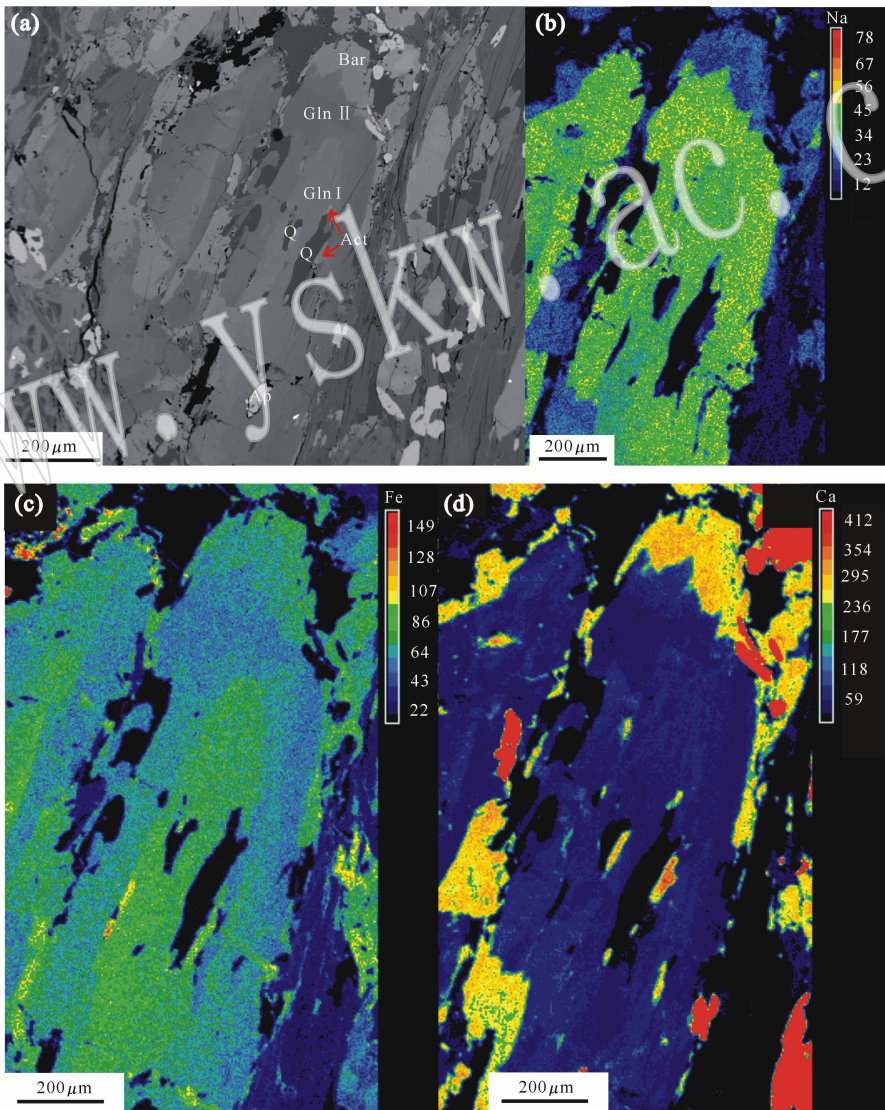


图4 石榴蓝闪片岩中角闪石变斑晶背散射(a)和面成分图像(b,c,d)

Fig. 4 BSE image (a) and X-ray diagrams (b, c, d) and inclusions from the studied blueschist

Gln I—第1期蓝闪石; Gln II—第2期蓝闪石; Q—石英; Bar—冻蓝闪石; Act—阳起石; Ap—磷灰石

Gln I—early glaucophane; Gln II—late glaucophane; Q—quartz; Bar—barroisite; Act—actinolite; Ap—apatite

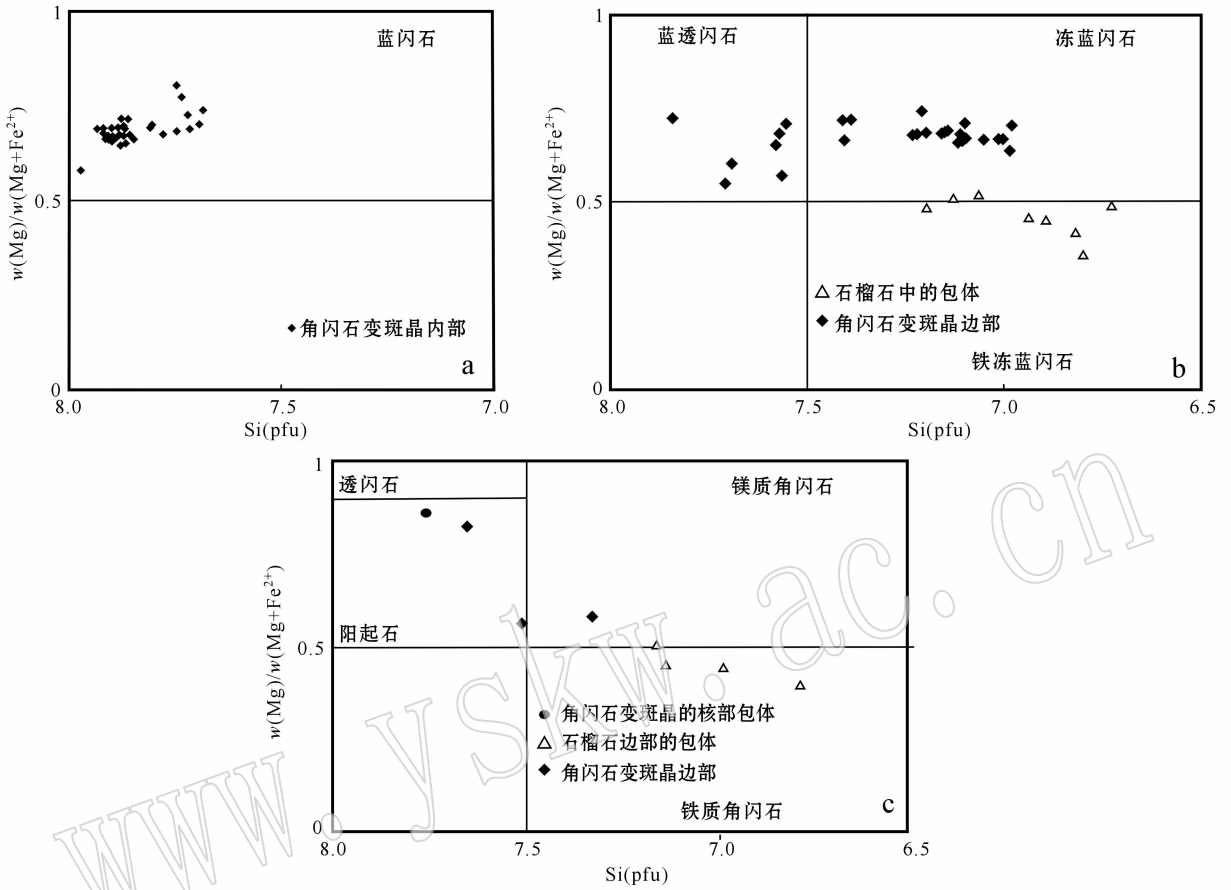


图5 角闪石的 $Mg/(Mg + Fe^{2+}) - Si$ 图解(据 Leake 等,1997)

Fig. 5 $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ versus Si diagram of amphibole (after Leake *et al.* , 1997)

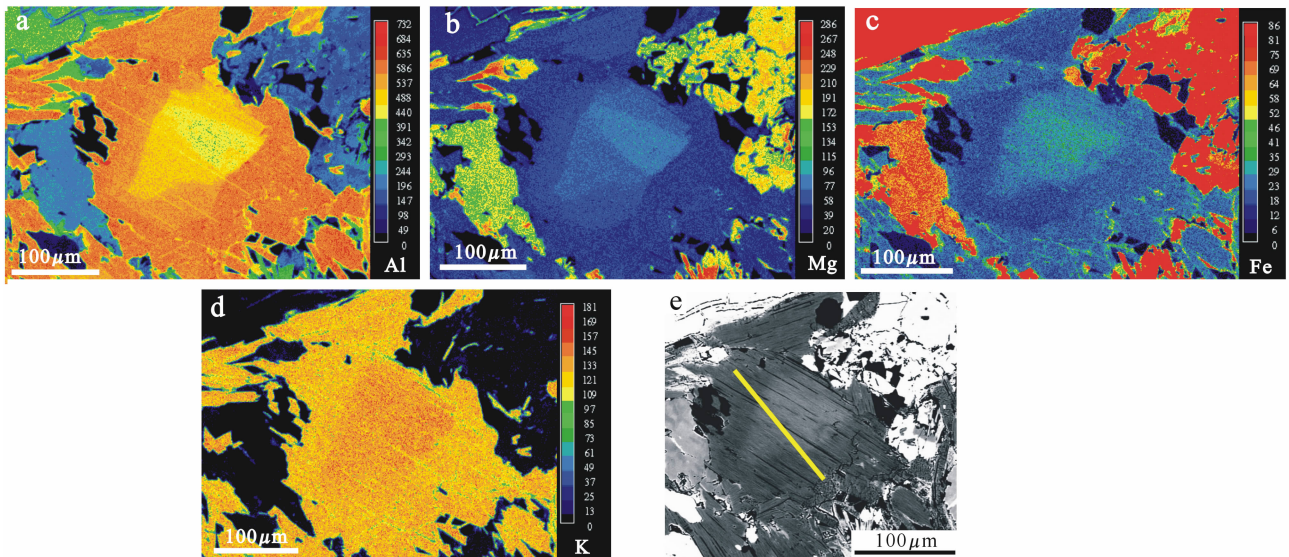


图6 石榴蓝闪片岩中白云母面成分图像(a、b、c、d)和背散射图像(e,黄线为电子探针线分析的位置,代表性成分见表1)

Fig. 6 X-ray diagrams(a,b,c,d) and BSE image(e, the yellow line shows positions of EMP analyses, representative EMP analyses are listed in Table 1)

期生长的石榴石所捕获。成分上,石榴石也具清晰的环带结构:石榴石核部由富锰铝榴石组分、贫镁铝与铁铝榴石组分,变为边部的富镁铝与铁铝榴石组分、贫锰铝榴石组分(表1、图8)。斜黝帘石核部的 Fe^{3+} (pfu)一般为0.42;而边部的斜黝帘石的 Fe^{3+} (pfu)则升为0.76(表1、图10)。基质中的钠长石(几乎为纯的钠长石,其 An 介于0~2之间)和绿泥石、绿帘石常构成细小的后成合晶,产出于角闪石、(多硅)白云母等矿物的边缘。钛铁矿则产出于金红

石边缘。根据这些观察,笔者认为石榴石、霓辉石、金红石、石英为第1期变质矿物组合,而基质中的富钠闪石(蓝闪石)、多硅白云母、绿帘石、金红石、绿泥石和石英则为第2期矿物组合,第3期矿物组合为后期生成的钙质闪石(常产出于晚期蓝闪石边部或基质之中)、钠长石、钛铁矿、榍石、石英、绿泥石、白云母、高铁的绿帘石(表2),即岩相学观察表明旁那附近的高压变质杂岩原为榴辉岩相变质杂岩,随后遭受了蓝片岩相变质作用的叠加。

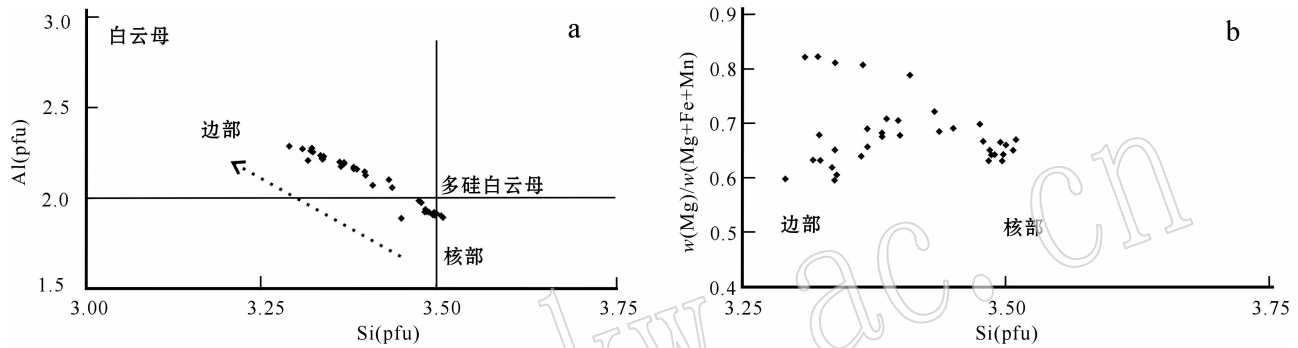


图7 石榴蓝闪片岩白云母的Al-Si图解(a)和Mg/(Mg+Fe+Mn)-Si图解(b)

Fig. 7 Al versus Si (a) and Mg/(Mg + Fe + Mn) versus Si (b) diagrams

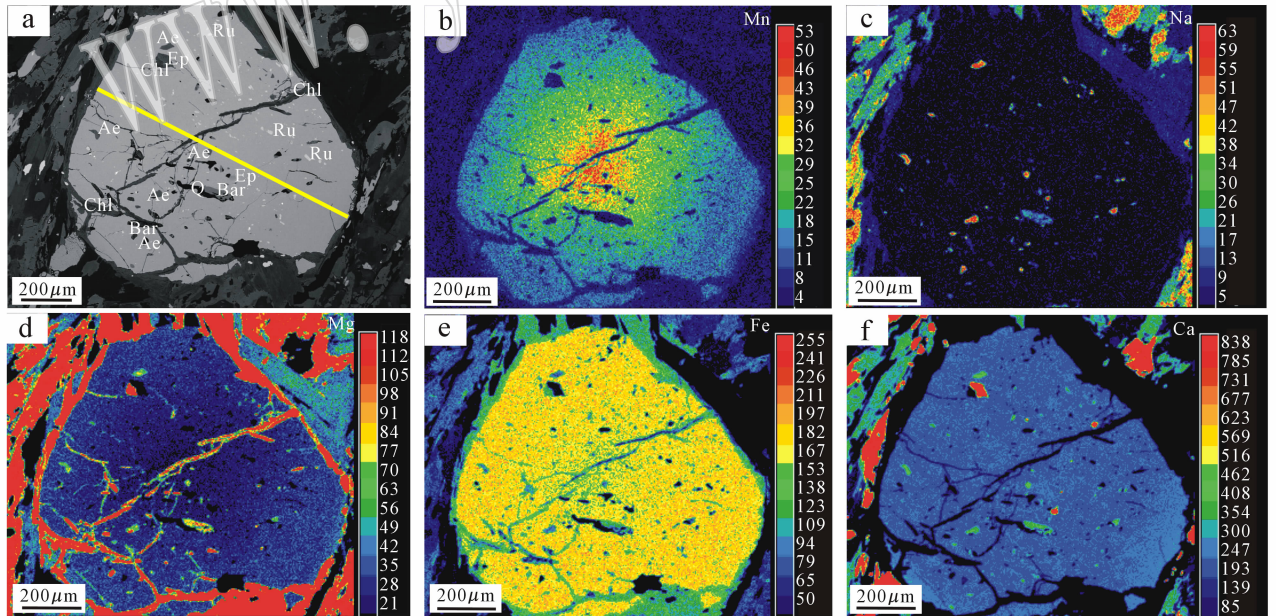


图8 石榴蓝闪片岩中石榴石背散射(a,黄线为电子探针线分析位置,代表性成分数据见表1)和矿物的面成分图(b、c、d、e、f)

Fig. 8 BSE image (a, the yellow line shows the position of the EMP analyses, representative EMP analyses are listed in Table 1)

and X-ray diagrams (b, c, d, e, f)

Ae—霓辉石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Q—石英; Bar—冻蓝闪石; Ru—金红石

Ae—aerigine-rich clinopyroxene; Ep—epidote; Chl—chlorite; Q—quartz; Bar—barroisite; Ru—rutile

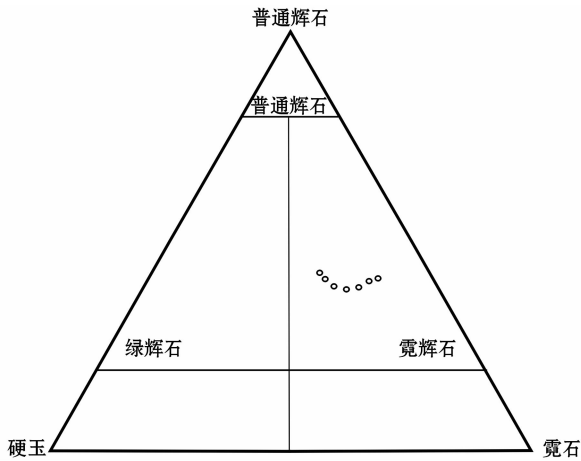


图9 石榴蓝闪片岩中单斜辉石成分图解(据 Morimoto 等,1988)
Fig. 9 Diagram of clinopyroxene(after Morimoto *et al.* , 1988)

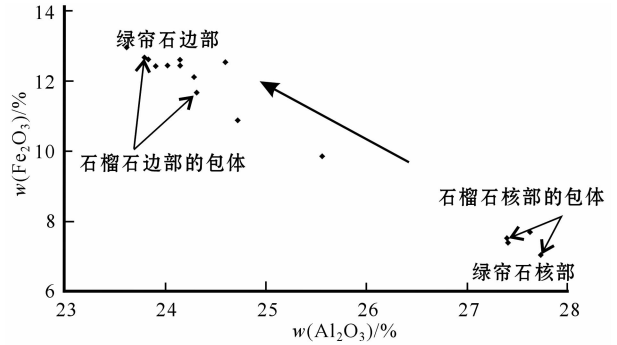


图10 石榴蓝闪片岩中绿帘石 $Fe_2O_3 - Al_2O_3$ 图解
Fig. 10 Fe_2O_3 versus Al_2O_3 diagram showing chemical variability of epidote in the studied blueschist

表2 石榴石蓝闪片岩变质阶段划分与矿物特征

Table 2 Summary of metamorphic stages related to the studied blueschist

矿物	阶段 Ia	阶段 Ib	阶段 II	阶段 III
单斜辉石	霓辉石	?		
角闪石	(铁)质冻蓝闪石?	(铁)质冻蓝闪石?	蓝闪石-冻蓝闪石	角闪石/阳起石
石榴石	$Alm_{62}Gro_{14}Py_5Spe_{19}$	$Alm_{73}Gro_{15}Py_9Spe_3$		
白云母			$Ms_{42}MgAlCcl_{33}, FeAlCcl_{18}Par_3MC_4$	$Ms_{57}MgAlCcl_{17}, FeAlCcl_{12}Par_7MC_7$
石英	+	+	+	+
绿帘石	?	?	0.42 Fe^{3+} (pfu)	0.76 Fe^{3+} (pfu)
钛矿物	金红石	金红石	金红石	榍石/钛铁矿
钠长石				An(0~2)
绿泥石			$X_{Mg} = 0.60$	$X_{Mg} = 0.52$
黑云母			+	+

注:石榴石、白云母、斜黝帘石、钠长石的成分用端员的摩尔分数表示。Alm: 铁铝榴石, Gro: 钙铝榴石, Py: 镁铝榴石, Spe: 锰铝榴石, Ms: 白云母, MgAlCcl: Mg-Al 绿磷石, FeAlCcl: Fe-Al 绿磷石, Par: 钠云母, MC: 微量组分, An: 钙长石, “+”表示该矿物产出, $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$ 。

3 变质温压估计

由于该石榴蓝片岩中各变质阶段的矿物组合不全(表2),难以运用当前传统的变质温压计估计该岩石形成的温压条件,因此采用视剖面(pseudosection)方法模拟该石榴蓝片岩的 $p-t$ 轨迹。采用湿法分析获得岩石的全岩常量元素组成。由于该岩石含有大量含水和含三价铁的矿物,如霓辉石、绿帘石等,故在全岩成分上另配上较高水含量(具体全岩成分见图11的说明),同时选取高氧逸度,使之在模拟过程中保证有自由水和三价铁的存在。模拟体系为 $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-O_2-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-H_2O$,使用 PERPLE_X (Connolly, 1990) 软件,采用 Holland 和 Powell (1998 及其2002年更新版)的热力学数据库,模拟所采用的固溶体活度模型见图11的

说明。模拟计算结果显示,温压范围为 250 ~ 650°C、0.4 ~ 2.8 GPa。模拟结果为原始结果,再据 Connolly (2005)的方法进行平滑处理得到视剖面、多硅白云母硅等值线、石榴石端员组分等值线、石榴石、单斜辉石含量等图件(图11)。

图11d显示了第一变质阶段石榴石核部形成的变质温压为 450°C、2.2 GPa 或之上,越过石榴石出现的曲线(图12),但由于没有在该岩石中发现柯石英或其假像,故石榴石核部形成的温压推测为 450°C、2.7 ~ 2.2 GPa。在这温压之下,钠质单斜辉石,如霓辉石、金红石、石英和硬柱石是稳定的矿物相,故应该被生长的石榴石所包裹,笔者在石榴石内找到了硬柱石之外所有其他矿物的包体,即岩相学观察与模拟结果相似(硬柱石除外)。在此温、压下,不应出现绿帘石,但却在石榴石中发现了绿帘石包体,而没有发现硬柱石或其假像。笔者认为有两种

压升温的过程(图12)。第2阶段为蓝片岩相叠加变质作用,导致了早期榴辉岩相变质矿物组合,如钠质单斜辉石、滑石、硬柱石等矿物完全消失,同时形成典型的蓝闪石。模拟结果表明该阶段的温度为500℃左右,而压力则大幅下降,根据多硅白云母中硅的含量估计此时的压力为1.6 GPa左右(图12)。此阶段,模拟结果表明石榴石可被绿泥石、绿帘石交代,这与岩相学观察吻合。多硅白云母中硅含量下降,并有钠-钙质闪石的形成,表明蓝片岩的叠加变质作用一直持续至压力回落到1.2 GPa左右,该阶段的温压轨迹为近等温降压的轨迹(图12)。目前还难以估计第3阶段的温、压条件,模拟结果表明,低于0.8 GPa时,钙质闪石是稳定的矿物相,推测是降温降压的过程(图12)。

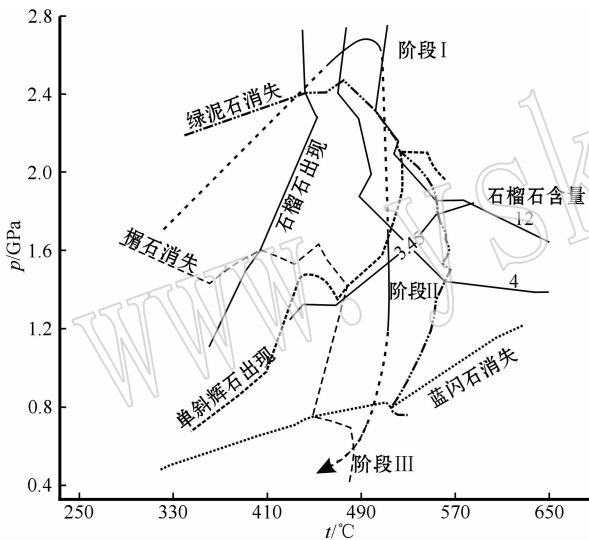


图12 石榴蓝闪片岩温压轨迹图(阶段I和II的矿物组成及其成分与图11相同)

Fig. 12 p - t evolution of the studied blueschist (solid portions of the corresponding path (stages I and II) constrained by curves selected from Fig. 11)

4 构造意义讨论

上述结果充分说明了旁那村附近的高压变质杂岩早期经历了榴辉岩相变质作用,随后遭受了蓝片岩相变质作用的叠加(图12)。早期榴辉岩相变质阶段的地温梯度很低,仅介于5~6℃/km之间(图12),表明其系大陆边缘典型的冷洋壳俯冲的产物。拉萨地块中部晚三叠世过铝质花岗岩以及与石榴蓝闪片岩共生海相灰岩中的化石限定了该冷洋壳的俯

冲时间不早于二叠纪,不晚于晚三叠世。在本文研究区之西南的却桑温泉处发育的被称为查曲甫组的安山岩、英安岩等岩石,与岛弧环境下所形成的岩石组合相似,其时代为早三叠世,进一步佐证了冷洋壳的俯冲应介于二叠、三叠纪之交,表明旁那石榴蓝闪片岩的峰期变质时限应与东侧80 km处的松多榴辉岩形成时间(Yang *et al.*, 2009)大体相同,这两地的高压变质杂岩应属同一构造变质带,本文称其为旁那-松多高压变质杂岩带。

李才等(2006a, 2006b)认为羌塘中部龙木错-双湖高压变质杂岩的峰期变质时间可能有两期:早期为二叠纪中期,晚期为晚三叠世(220 Ma左右)。但笔者认为晚三叠世的测年结果很可能代表了后期构造事件的年龄,而不是其峰期变质年龄,因为:①测试对象多为钠钙质闪石和白云母,测试方法为Ar-Ar法,易受晚期构造热事件之影响,因此,这些测试结果更应该是最后一次构造热事件的记录。事实上,这些结果与区域变质杂岩白云母石英片岩中的白云母Ar-Ar年龄相似(王根厚等, 2006; 李才等, 2007a),均为晚三叠世,也佐证了笔者的这一推断。②羌塘中部龙木错-双湖一带,晚三叠世构造-岩浆热事件发育,如花岗岩的侵位(黄小鹏等, 2007)、酸性火山岩的喷发(翟庆国等, 2007)等,因此在这一地区,Ar-Ar法年龄测试结果应该反映了这些构造热事件,而不是变质岩的峰期变质年龄,即该区高压变质杂岩峰期变质时间的上限应为晚三叠世(220 Ma左右),而下限则为原岩年龄(李才等, 2002)。邓希光等(2000)报道的270~280 Ma左右的蓝闪石Ar-Ar年龄应该比较接近峰期变质年龄,表明旁那-松多高压变质杂岩带与龙木错-双湖变质杂岩带形成时间应该大体相当,均形成于二叠、三叠纪之间,即青藏高原腹地两条高压变质杂岩带的形成时间大体相当。

虽然龙木错-双湖带与旁那-松多带现今相距约400 km,但两者的地质特征却非常相似(表3),如在二叠、三叠纪期间均发生了冷洋壳的俯冲、晚三叠世大规模花岗岩的侵位等等。这充分说明,这两地晚古生代以来的演化过程似乎受同一构造体系的控制。地质上,这两变质带被中生代的班公-怒江洋(王玉净等, 2002; 王建平等, 2003)所分隔开(图1),暗示了班公-怒江洋的打开很可能导致拉萨地块内与羌塘地块内古特提斯洋闭合。Hi-Climb宽频长地震剖面的观测结果似乎也更进一步证实了这一想法。该地震观测剖面北止于改则北约100 km的鲁

谷,南起于喜马拉雅山前,清楚地显示出 3 条俯冲带(钱辉等,2007)。南为一向北俯冲的高速体,一般解释为向北俯冲的新特提斯洋壳(钱辉等,2007),北部则有两南向俯冲的高速体,北侧的高速体可解释为

向南俯冲的班公-怒江洋壳(钱辉等,2007),但前人未解释介于这两俯冲体之间高速体的地质含义。根据本文的研究,这个高速体很可能代表了拉萨地块内古特提斯俯冲洋壳的残余。

表 3 拉萨地块中部与羌塘地块中部区域地质对比

Table 3 Geological comparison between central Lhasa and central Qiangtang

地质事件	拉萨地块中部		羌塘地块中部	
	地质记录	数据来源	地质记录	数据来源
古特提斯洋壳俯冲的变质岩记录	石榴蓝闪片岩、榴辉岩,反映冷洋壳在二叠、三叠期间俯冲。	杨经绥等(2007) 本文	蓝片岩、榴辉岩,反映冷洋壳在二叠、三叠期间俯冲。	正文及参考文献
古特提斯洋盆闭合的沉积响应	上三叠统确哈拉磨拉石不整合于蛇绿岩套岩石组合之上、上三叠统多布日组沉积岩,指示古特提斯洋盆闭合。	梅厚钧等(1981) 陈玉禄等(2005) 曲永贵等(2003)	上三叠统望湖岭组沉积岩,指示古特提斯洋盆闭合。	李才等(2007a,2007b)
区域变质热事件	白云母石英片岩中白云母 Ar-Ar 年龄为 220Ma 左右。	李化启等(2008)	白云母石英片岩中白云母 Ar-Ar 年龄为 220Ma 左右。	王根厚等(2006) 李才等(2007)
区域岩浆侵位	晚三叠世花岗岩浆活动强烈。	正文及参考文献	晚三叠世花岗岩浆活动强烈。	黄小鹏等(2007) 熊兴国等(2006)

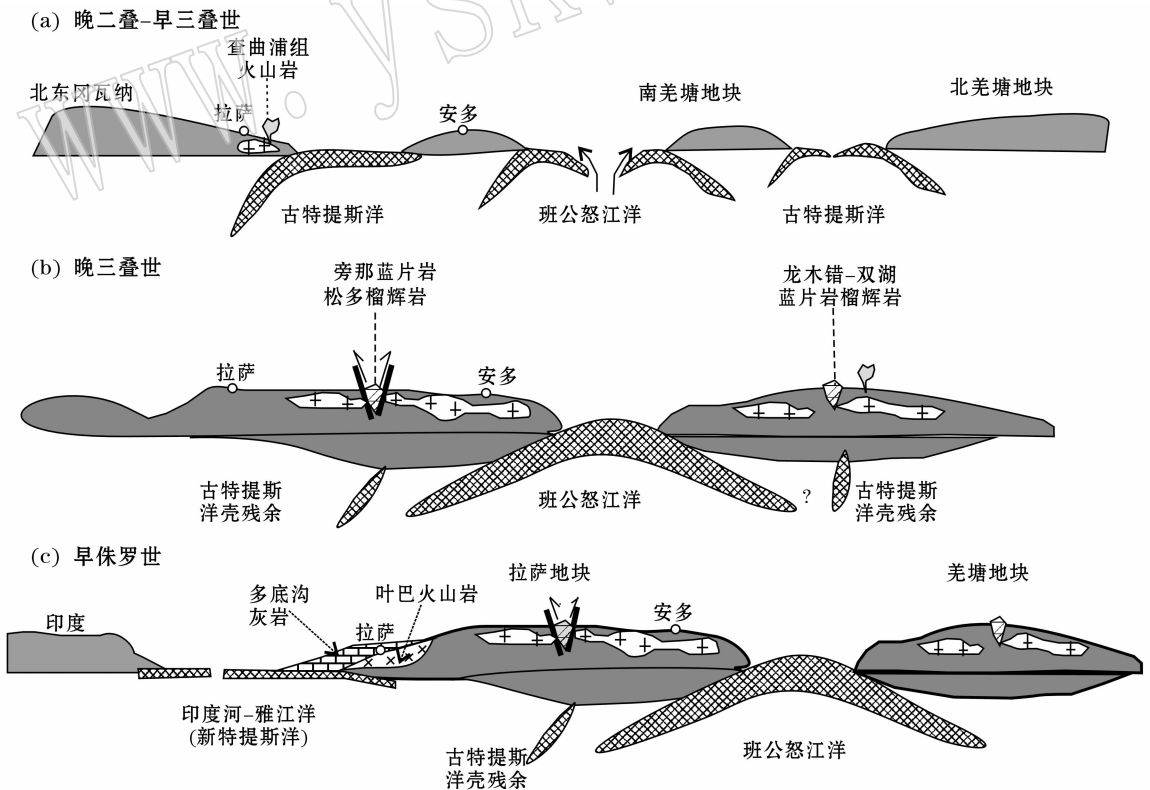


图 13 青藏高原晚二叠世至早侏罗世构造演化模式图[据 Hsü 等(1995)、Yang 等(2009)修改]

Fig. 13 A model for tectonic evolution of Lhasa terrain during late Palaeozoic to early Mesozoic periods(modified from Hsü *et al.*, 1995; Yang *et al.*, 2009)

一些学者曾采用新特提斯洋壳低角度(平板)俯冲的模型来解释拉萨地块内晚三叠世大规模花岗岩浆活动的成因(Kapp *et al.*, 2005; Chu *et al.*, 2006; 和钟铎等, 2006b)。这种模型不能解释区内松多晚二叠世榴辉岩的成因,更不能解释本文报道的冷洋壳俯冲所形成的石榴蓝闪片岩的产出,并且也不能解释从拉萨地块中部向南、北两侧,岩浆活动从早三叠世逐渐变为侏罗、白垩纪,年龄变新的观测(图2)。显然,完全有必要根据新的发现重新审视拉萨地块前新生代的演化过程。许多学者强调印支运动也波及到冈瓦纳大陆东北缘,在拉萨地块内形成了晚三叠世花岗岩(李才等, 2003; 曲永贵等, 2003; 刘琦胜等, 2006; 张宏飞等, 2007; 李化启等, 2008),但对拉萨地块内印支运动事件的认识还不深入(张宏飞等, 2007)。旁那石榴蓝闪片岩、松多榴辉岩的发现正可以为深入探讨这些问题提供新的依据。此外,一些学者认为拉萨附近早侏罗世的叶巴组可能为岛弧成因,系新特提斯洋向北俯冲的产物(潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2006),但该火山岩的岩性却为双峰式组合,且被中侏罗统海相碳酸盐岩所覆盖,表明其很可能形成于被动大陆边缘,而不可能是活动大陆边缘。即它们很可能反映了新特提斯洋张开过程的产物,而不是其俯冲阶段的产物。

基于上述分析,笔者提出一个新模型试图阐述青藏高原晚古生代至早中生代演化的过程(图13):晚二叠世至早、中三叠世时期,班公-怒江洋的张开导致古特提斯洋壳发生俯冲、洋盆缩小,在冈瓦纳大陆和欧亚大陆边缘分别形成了两条以石榴蓝闪片岩、硬柱石蓝片岩、低温榴辉岩为代表的高压变质杂岩带。漂浮于古特提斯洋中的微地块,如安多小地块、南羌塘-保山块体则分别向冈瓦纳大陆东北部、欧亚大陆之北羌塘-昌都块体会聚(图13)。此时在冈瓦纳大陆东北缘,由于古洋壳的冷俯冲,在现今拉萨附近还发育有晚二叠世至早三叠世的岛弧型岩浆活动,形成早三叠世查曲浦组火山岩等岩石(图13)。

晚三叠世时期,古特提斯洋基本闭合,此时期两条高压变质杂岩带折返至地表附近,残余洋壳也发生了仰冲,陆-陆碰撞,这可能导致地壳的增厚,并诱发大规模的地壳重熔,形成大规模的花岗岩基。这个过程非常类似现今喜马拉雅造山的过程。此时期冈瓦纳大陆东北部和北羌塘-昌都等陆块均向外增生。

早侏罗世时期,冈瓦纳大陆东北部又发生了大陆裂解,新特提斯洋壳形成,拉萨地块开始北移,形成现今的拉萨地块,并在其南缘形成被动大陆边缘,最终形成叶巴组火山岩与多底沟组海相碳酸盐岩。

笔者提出的这个简单的多岛洋俯冲与碰撞增生模型似乎可以合理地解释青藏高原最近几年来的新发现、新进展,如拉萨地块内部镁铁质杂岩,新近在青藏高原腹地发现的以榴辉岩、石榴蓝闪片岩为代表的两条高压变质杂岩带,以及晚二叠世至早侏罗世岩浆活动的规律。

5 结论

拉萨地块内墨竹工卡县旁那村附近的石榴蓝闪片岩曾经历了榴辉岩相变质作用,后再叠加了蓝闪片岩相变质。班公-怒江洋的张开很可能导致了古特提斯洋的闭合,并在冈瓦纳大陆东北缘以及欧亚大陆西南缘形成了两条冷洋壳俯冲所形成的高压变质杂岩带,随后发生了(微)陆块的会聚,分别在拉萨地块中部和羌塘地块中部地区形成了晚三叠世花岗岩基。冈瓦纳大陆和欧亚大陆分别向外增生。在中生代早期冈瓦纳大陆再发生裂解,形成了现今北移的拉萨地块。

致谢 德国斯图加特大学 Massonne H J 教授和 Theye T 博士在电子探针分析、数据处理、视剖面模拟计算等方面提供了无私的帮助,河北廊坊区调院化分室完成岩石全岩常量元素组成分析,两位匿名审稿人的审稿意见极大地提升了该文,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 307: 17 ~ 22.
- Bao Peisheng, Xiao Xuchang, Wang Jun, *et al.* 1999. Blueschist belt of Shuanghu area in center-northern Xizang (Tibet) and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 302 ~ 314 (in Chinese with English abstract).
- Chang C, Chen N, Coward M P, *et al.* 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 Geotraverse of Tibet[J]. *Nature*, 323: 501 ~ 507.
- Chen Yulu, Zhang Kuanzhong, Li Guanqing, *et al.* 2005. Discovery of an uniformity between the upper Triassic Quehala group and its underlying rock series in the central segment of the Bangong Co-Nujiang

- junction zone, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 24 (7): 621 ~ 624 (in Chinese with English abstract).
- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. Geology, 34: 745 ~ 478.
- Connolly J A D. 1990. Multivariable phase diagrams; an algorithm based on generalized thermodynamics[J]. Am. J. Sci., 290: 666 ~ 718.
- Connolly J A D. 2005. Computation of phase equilibria by linear programming; A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 236: 524 ~ 541.
- Deng Xiguang, Ding Lin, Liu Xiaohan, *et al.* 2000. Discovery of blueschists in Gangmar-Taoxing Co area, central Qiangtang, northern Tibet[J]. Scientia Geologica Sinica, 35(2): 227 ~ 232 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiguang, Ding Lin, Liu Xiaohan, *et al.* 2001. Petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic ages of blueschists in Gangmar, central Qiangtang, northern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 45 (21): 2 322 ~ 2 326 (in Chinese with English abstract).
- Dewey J F, Shackelton R M, Chang C, *et al.* 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond., A327: 379 ~ 413.
- Fuhrman M L and Lindsley D H. 1988. Ternary-feldspar modeling and thermometry[J]. Am. Mineral., 73: 210 ~ 215.
- Guynn J H, Kapp P, Pullen A, *et al.* 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet[J]. Geology, 34: 505 ~ 508.
- He Zhonghua, Yang Deming and Wang Tianwu. 2006a. Age, geochemistry and its tectonic significance of Kaimeng ophiolites in Jiali fault belt, Tibet[J]. Acta. Petrol. Sin., 22: 653 ~ 660 (in Chinese with English abstract).
- He Zhonghua, Yang Deming, Zheng Changqing, *et al.* 2006b. Isotopic dating of the Mamba granitoid in the Gangdise tectonic belt and its constraint on the subduction time of the Neotethys[J]. Geol. Rev., 52: 100 ~ 106 (in Chinese with English abstract).
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. J. Meta. Geol., 16: 309 ~ 343.
- Hsü K J, Pan G T, Sengör A M C, *et al.* 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: a working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis[J]. Int. Geol. Rev., 37: 473 ~ 508.
- Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, *et al.* 2005. SHRIMP zircon U-Pb age and isotopic study on the Nyainqentanglha group in Tibet[J]. Sci. China, 35: 29 ~ 37 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ke, Li Cai, Cheng Liren, *et al.* 1995. Gangmacuo-Shuanghu blueschist belt in central Qiangtang raea of Tobet and its geological significance[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 23(3): 268 ~ 274 (in Chinese).
- Huang Xiaopeng, Li Cai and Zhai Qingguo. 2007. Geochemistry and tectonic settings of Indosinian granites in the Mayêr Kangri area, central Qiangtang, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(12): 1 646 ~ 1 653 (in Chinese with English abstract).
- Jin Chenwei. 1981a. Northern Xizang Intermediate-Acidic Intrusive Rocks Belt[A]. The Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau. Magmatism and Metamorphism in Xizang (Tibet)[C]. Beijing: Science Press, 99 ~ 111 (in Chinese).
- Jin Chenwei. 1981b. Volcanic Rocks of Xizang[A]. Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau. Magmatism and Metamorphism in Xizang (Tibet)[C]. Beijing: Science Press, 212 ~ 270 (in Chinese).
- Kapp J L D, Harrison T M, Kapp P, *et al.* 2005. Nyainqentanglha Shan: A window into the tectonic, thermal, and geochemical evolution of the Lhasa block, southern Tibet[J]. J. Geophys. Res., 110, B08413.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, *et al.* 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 22(4): 1 043.
- Leake B E, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles; Report of the subcommittee an Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. Am. Mineral., 82: 1 019 ~ 1 037.
- Li Cai. 1987. The Longmucuo-Shuanghu-Lanchangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permian-Carboniferous system in northern Xizang, China[J]. J. Changchun Univ. Earth Sci., 17(2): 155 ~ 166 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai. 1997. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and its significance of the crosstie from the blueschist in the Mid-Qiangtang area, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 42(1): 88.
- Li Cai, Li Yongtie, Lin Yuanxian, *et al.* 2002. Sm-Nd dating of the protolith of blueschist in the Shuanghu area, Tibet [J]. Chinese Geology, 29(4): 355 ~ 359 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Wang Tianwu, Li Huimin, *et al.* 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdise area; Evidence for the existence of paleo-Gangdise[J]. Geol. Bull. China, 22: 364 ~ 366 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhai Qingguo, Chen Wen, *et al.* 2006b. Ar-Ar chronometry of the eclogite from central Qiangtang area, Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 2 843 ~ 2 849 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhai Qingguo, Chen Wen, *et al.* 2007a. Geochronology evidence of the closure of Longmu Co-Shuanghu suture, Qinghai-Tibet plateau; Ar-Ar and zircon geochronology from ophiolite and rhyolite in Guoganjianian[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 911 ~ 918 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, *et al.* 2006a. Discovery of eclogite and its significance from the Qiangtang area, central Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 51(9): 1 095 ~ 1 100.
- Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, *et al.* 2007b. Establishment of the upper Triassic Wanghuling formation at Guoganjianian mountain, central Qiangtang, Qinghai-Tibet plateau, and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 1 003 ~ 1 008 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qisheng, Jiang Wan, Jian Ping, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb age and petrochemical and geochemical features of Mesozoic muscovite monzonitic granite at Ningzhong, Tibet[J]. Acta Petrol. Sin., 22:

- 643 ~ 652 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jipu, Zhang Neng, Huang Weihong, *et al.* 2006. Characteristics and significance of the metamorphic minerals glaucophane-lawsonite assemblage in the Hongjishan area, north-central Qiangtang, northern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 25 (1 ~ 2): 70 ~ 75 (in Chinese with English abstract).
- Massonne H J and Kopp J. 2005. A low-variance mineral assemblage with talc and phengite in an eclogite from the Saxonian Erzgebirge, central Europe, and its P-T evolution [J]. *J. Petrol.*, 46: 355 ~ 375.
- Massonne H J and Willner A P. 2008. Dehydration behaviour of metapelites and mid-ocean ridge basalt at very-low to low grade metamorphic conditions [J]. *Eur. J. Mineral.*, 20: 867 ~ 879.
- Mei Huojun and Lin Xuenong. 1981. Ophiolite of Xizang [A]. *The Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau. Magmatism and Metamorphism in Xizang (Tibet) [C]*. Beijing: Science Press, 147 ~ 211 (in Chinese).
- Morimoto N, Fabris J, Ferguson A K, *et al.* 1988. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Am. Mineral.*, 73: 1 123 ~ 1 133.
- Pan Guitang and Ding Jun. 2004. Geological Map (1:1 500 000) of Tibetan Plateau and Its Adjacent Areas [M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing (in Chinese).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdise Orogenic belt and its evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 521 ~ 533 (in Chinese with English abstract).
- Qian Hui, Jiang Mei, Chen W P, *et al.* 2007. Tomography of Gyirong-Lugu profile (Hi-Climb) and the subduction of Indian-Tibet collision [J]. *Chinese J. Geophys.*, 50 (5): 1 427 ~ 1 436 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yonggui, Wang Yongsheng, Zhang Shuqi, *et al.* 2003. An inspiration from the section of the late Triassic Duoburi formation in the Xainza area—Stratigraphic constraint on the Indosinian movement in Gangdise [J]. *Geological Bulletin of China*, 22 (7): 470 ~ 473 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fubao and Jin Chengwei 1990. Plutonic rocks in central southern Xizang [A]. *Chinese Academy of Geological Sciences. Metamorphic and Igneous Rocks in Xizang (Tibet) [C]*. Beijing: Geological Publishing House, 100 ~ 198 (in Chinese with English abstract).
- Wang Genhou, Jia Jiancheng, Wan Yongping, *et al.* 2006. Forming and tectonic significance of the Youxi tectono-schistose formation, north Baqen country, eastern Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 13 (4): 180 ~ 187 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianping, Li Qiusheng, Liu Yanming, *et al.* 2003. Tethyan Geology of Eastern Tibet (Xizang) [M]. Beijing: Science Press, 330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yujing, Wang Jianping, Liu Yanming, *et al.* 2002. Characteristics and age of the Dingqing ophiolite in Xizang (Tibet) and their geological significance [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 19 (4): 417 ~ 420 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xingguo, Yue Long, Xu Anquan, *et al.* 2006. Geochemistry and geodynamics of the strongly peraluminous granites in Darying, Qiangtang, Xizang [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (4): 41 ~ 46 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ronghua. 1990. Geochronological study of granitoids and metamorphic rocks in Xizang [A]. *Chinese Academy of Geological Sciences. Metamorphic and Igneous Rocks in Xizang (Tibet) [C]*. Beijing: Geological Publishing House, 287 ~ 321 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ronghua, Scharer U and Allegre C J. 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study [J]. *J. Geol.*, 93: 41 ~ 57.
- Yang Deming, He Zhonghua, Zheng Changqing, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Dezhong granitic gneisses and its geological implications in Menba area, south Tibet [J]. *J. Jilin Univ.*, 34: 10 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Geng Quanru, *et al.* 2006. A possible new HP/UHP(?) metamorphic belt in China: discovery of eclogite in the Lasha Terrane, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (12): 1 787 ~ 1 792 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Tianfu, *et al.* 2007. Oceanic subduction-type eclogite in the Lhasa block, Tibet, China: Remains of the Paleo-Tethys ocean basin? [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (10): 1 277 ~ 1 287 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Xu Z, Li Z, *et al.* 2009. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys? [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 34: 76 ~ 89.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211 ~ 80.
- Zhai Qingguo and Li Cai. 2007. Zircon SHRIMP dating of volcanic rock from the Nadigangri formation in Juhuashan, Qiangtang, northern Tibet and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (6): 795 ~ 800 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Jianqiu, *et al.* 2007. Indosinian orogenesis of the Gangdise terrane: Evidences from zircon U-Pb dating and petrogenesis of granitoids [J]. *Earth Sci. J. China Univ. Geosci.*, 32: 155 ~ 166 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. Late Jurassic-early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdise: New insights from volcanic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 534 ~ 546 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍佩声,肖序常,王 军,等. 1999. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义 [J]. *地质学报*, 73 (4): 302 ~ 314.
- 陈玉禄,张宽忠,李关清,等. 2005. 班公湖-怒江结合带中段上三叠统确哈拉群与下伏岩系角度不整合关系的发现及意义 [J]. *地质通报*, 24 (7): 621 ~ 624.
- 邓希光,丁 林,刘小汉,等. 2000. 藏北羌塘中部冈玛日一桃形错蓝片岩的发现 [J]. *地质科学*, 35 (2): 227 ~ 232.
- 邓希光,丁 林,刘小汉,等. 2001. 青藏高原羌塘中部冈玛日地区蓝闪石片岩及其⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学 [J]. *科学通报*, 45 (21): 2 322 ~

2 326.

- 邓希光,张进江. 2005. 藏北依布茶卡地区发现石榴子石蓝片岩[J]. 地学前缘,12(3):89~90.
- 和钟铨,杨德明,王天武. 2006a. 西藏嘉黎断裂带凯蒙蛇绿岩的年代学、地球化学特征及大地构造意义[J]. 岩石学报,22(3):653~660.
- 和钟铨,杨德明,郑常青,等. 2006b. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新提斯洋俯冲时代的约束[J]. 地质论评,52:100~106.
- 胡克,李才,程立人,等. 1995. 西藏羌塘中部冈马错-双湖蓝片岩带及其构造意义[J]. 长春地质学院学报,23(3):268~274.
- 胡道功,吴珍汉,江万,等. 2005. 西藏念青唐古拉岩群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素研究[J]. 中国科学,35:29~37.
- 黄小鹏,李才,翟庆国. 2007. 西藏羌塘中部玛依岗日地区印支期花岗岩的地球化学特征及其形成环境[J]. 地质通报,26(12):1646~1653.
- 金成伟. 1981a. 藏北中酸性侵入岩带[A]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏岩浆活动和变质作用[C]. 北京:科学出版社,99~111.
- 金成伟. 1981b. 西藏火山岩[A]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏岩浆活动和变质作用[C]. 北京:科学出版社,214~270.
- 李才,李永铁,林源贤,等. 2002. 西藏双湖地区蓝闪片岩原岩 Sm-Nd 同位素定年[J]. 中国地质,29(4):355~359.
- 李才,王天武,李惠民,等. 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩-古冈底斯造山存在的证据[J]. 地质通报,22:364~366.
- 李才,翟庆国,陈文,等. 2006b. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J]. 岩石学报,22(12):2843~2849.
- 李才,翟庆国,陈文,等. 2007a. 青藏高原龙木错-双湖板块缝合带闭合的年代学证据—来自果干加年山蛇绿岩与纹流岩 Ar-Ar 和 SHRIMP 年龄制约[J]. 岩石学报,23(5):911~918.
- 李才,翟庆国,董永胜,等. 2006a. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报,51(1):70~74.
- 李才,翟庆国,董永胜,等. 2007b. 青藏高原羌塘中部果干加年山上三叠统望湖岭组的建立及意义[J]. 地质通报,26(8):1003~1008.
- 李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报,17(2):155~166.
- 李才. 1997. 西藏羌塘中部蓝片岩青铝闪石 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 科学通报,42(4):488.
- 李化启,蔡志慧,陈松永,等. 2008. 拉萨地体中的印支运动事件及年代学证据[J]. 岩石学报,24(7):1595~1604.
- 刘琦胜,江万,简平,等. 2006. 宁中白云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报,22(3):643~652.
- 陆济璞,张能,黄位鸿,等. 2006. 藏北羌塘中北部红脊山地区蓝闪石+硬柱石变质矿物组合的特征及其意义[J]. 地质通报,25(1~2):70~75.
- 梅厚钧,林学农. 1981. 西藏的蛇绿岩[A]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏岩浆活动和变质作用[C]. 北京:科学出版社,147~211.
- 潘桂棠,丁俊. 2004. 青藏高原及邻区地质图(1:1 500 000)及说明书[M]. 成都:成都地图出版社.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报,22(3):521~534.
- 钱辉,姜枚,Chen W P,等. 2007. 青藏高原吉隆-鲁谷(Hi-Climb)层析成像与印藏碰撞的消减作用[J]. 地球物理学报,50(5):1427~1436.
- 曲永贵,王永胜,张树岐,等. 2003. 西藏申扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示—对冈底斯印支运动的地层学制约[J]. 地质通报,22(7):470~473.
- 王富宝,金成伟. 1990. 西藏中南部深成岩类[A]. 中国地质科学院. 西藏变质岩及火成岩[C]. 北京:地质出版社,100~198.
- 王根厚,贾建称,万永平,等. 2006. 藏东巴青县以北西西岩组构造片理形成及构造意义[J]. 地学前缘,13(4):180~187.
- 王建平,李秋生,刘彦明,等. 2003. 西藏东部特提斯地质[M]. 北京:科学出版社,1~330.
- 王玉净,王建平,刘彦明,等. 2002. 西藏丁青蛇绿岩特征、时代及其地质意义[J]. 微体古生物学报,19(4):417~420.
- 熊兴国,岳龙,徐安全,等. 2006. 西藏羌塘达尔应强过铝花岗岩地球化学特征及地球动力学意义[J]. 地质通报,26(4):40~46.
- 许荣华. 1990. 花岗岩类和变质岩的年代学同位素研究[A]. 中国地质科学院. 西藏变质岩及火成岩[C]. 北京:地质出版社,287~321.
- 杨德明,和钟铨,郑常青,等. 2004. 西藏门巴地区德宗花岗岩片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),34(10):12~14,22.
- 杨经绥,许志琴,耿全如,等. 2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带—青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带[J]. 地质学报,80(12):1787~1792.
- 杨经绥,许志琴,李天福,等. 2007. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩:古特提斯洋盆的残留?[J]. 地质通报,26(10):1277~1287.
- 姚宗富. 1988. 西藏北部发现含蓝闪石类岩石[J]. 中国区域地质,(2):190,193.
- 翟庆国,李才. 2007. 藏北羌塘菊花山那底岗日组火山岩锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 地质学报,81(6):795~800.
- 张宏飞,徐旺春,郭建秋,等. 2007. 冈底斯印支期造山事件:花岗岩类锆石 U-Pb 年代学和岩石成因证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报,32(2):155~166.
- 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境:火山岩约束[J]. 岩石学报,22(3):534~546.