

黄杰, 张聪, 申婷婷, 等. 拉萨地块林芝杂岩体含十字石石榴角闪岩的岩石学和变质过程研究[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1588–1600.
Huang Jie, Zhang Cong, Sheng Tingting, et al. Petrology and metamorphic evolution of staurolite-bearing garnet amphibolite in Nyingchi complex of the Lhasa Block[J]. *Geology in China*, 2015, 42(5): 1588–1600(in Chinese with English abstract).

拉萨地块林芝杂岩体含十字石石榴角闪岩的岩石学和变质过程研究

黄 杰^{1,2} 张 聪¹ 申婷婷³ 杨经绥¹ 陈 梅^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 北京大学地球科学与空间学院, 北京 100871)

摘要:在拉萨地块林芝杂岩体中新发现的石榴角闪岩矿物组合为石榴子石、角闪石、十字石、绿泥石、斜长石、钠云母以及少量的钛铁矿和磷灰石。石榴角闪岩中石榴石核部富锰($X_{\text{sps}}=0.12\sim 0.15$)贫铁($X_{\text{alm}}=0.45\sim 0.50$)而石榴子石边部相对贫锰($X_{\text{sps}}=0.01\sim 0.03$)富铁($X_{\text{alm}}=0.60\sim 0.65$),表明石榴子石的核部和边部分别形成于变质作用两个不同阶段。从核部到边部,镁铝榴石升高而钙铝榴石降低,表现为进变质环带特征,这表明石榴子石核部形成于进变质过程。生长在不同的变质阶段的角闪石具有不同的成分特征,作为变质基性岩中罕见的富铝矿物,十字石的结构特征记录了不同变质阶段的信息,结合石榴石的成分和结构特征,为相平衡模拟研究其 P - T 演化过程提供了可能。我们利用Perplex相图模拟软件在Mn-NCKMASHO体系中模拟出该石榴角闪岩的视剖面图,利用石榴子石边部镁铝榴石和钙铝榴石含量等值线确定出石榴角闪岩峰期温压为:610~630°C, $12\times 10^5\sim 13\times 10^5$ kPa,对应峰期矿物组合为石榴子石,角闪石,十字石和白云母。同时结合十字石保存的退变信息得到该石榴角闪岩经历了一个顺时针的变质演化轨迹。

关键词:拉萨地块;林芝杂岩;含十字石石榴角闪岩;变质过程;相平衡模拟

中图分类号:P 588.34⁵ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657 (2015)05-1588-13

Petrology and metamorphic evolution of staurolite-bearing garnet amphibolite in Nyingchi complex of the Lhasa Block

HUANG Jie^{1,2}, Z HANG Cong¹, SHENG Ting-ting³, YANG Jing-sui¹, CHEN Mei^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract:The newly found staurolite-bearing garnet amphibolites in Nyingchi complex of the Lhasa Block have the mineral

收稿日期:2015-06-18; 改回日期:2015-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41202034)、中国地质调查局项目(12120115026801,12120114061501)及中国地质科学院地质研究所基本科研业务费(J1518)资助。

作者简介:黄杰,男,1990年生,硕士生,从事变质岩岩石学研究工作;Email:2001130126@cugb.edu.cn。

通讯作者:张聪,男,1983年生,副研究员,从事变质地质学及超高压岩石学工作;Email:congzhang@pku.edu.cn。

assemblage of garnet, amphibole, staurolite, chlorite, plagioclase, mica and minor ilmenite and apatite. The cores of the garnet in the garnet amphibolite are extremely rich in Mn ($X_{\text{sp}}=0.12-0.15$) and poor in Fe ($X_{\text{Alm}}=0.45-0.50$), whereas their rims are relatively Mn poor ($X_{\text{sp}}=0.01-0.03$) and Fe rich ($X_{\text{Alm}}=0.60-0.65$), implying that the core and the rim of the garnets belong to two metamorphic generations. X_{py} increases and X_{gr} decreases from the garnet core to the rim, indicating characteristics of prograde metamorphic zonation. The amphibole growing at different metamorphic stages have obvious composition differences. Staurolite, as an uncommon aluminium-rich mineral in the metabasite, has also recorded different metamorphic processes in their microstructures. In combination with the garnet compositional profile, it is possible to calculate the $P-T$ evolution by phase diagram. The authors modeled the pseudosection of the staurolite-bearing garnet amphibolite under the model system of Mn-NCKMASHO, using Perple-X program with the help of X_{py} and X_{gr} isopleths of the garnet, and obtained the peak metamorphic condition of 620°C and 12kbar. The peak mineral assemblages are garnet, amphibole, staurolite and mica. In the meanwhile, the clockwise $P-T$ path has also been demonstrated by the microstructures in the staurolites, suggesting that the staurolite-bearing garnet amphibolites have experienced three stages of metamorphism.

Key words: Lhasa block; Nyingchi complex; staurolite-bearing garnet amphibolite; metamorphic process; phase equilibrium modeling

About the first author: HUANG Jie, male, born in 1990, master candidate, mainly engages in the study of petrology; E-mail: 2001130126@cugb.edu.cn.

About the corresponding author: ZHANG Cong, male, associate professor, majors in metamorphic geology; E-mail: congzhang@pku.edu.cn.

1 引言

造山带中的变质基性岩通常由高自由度的矿物组成,它们可能稳定存在于较宽的温度-压力-组分条件下,对于区域变质作用的角闪岩相变质岩而言,它们通常含有较为常见的矿物组合:斜长石、角闪石、绿帘石、绿泥石^[1],仅仅用这样的矿物组合很难准确限定其形成的温压条件。但是如果存在自由度较低的富铝矿物如蓝晶石、夕线石、堇青石、十字石,则可利用岩石学和矿物学研究有效地限定岩石发生变质作用的温压条件^[2,3]。十字石、蓝晶石、夕线石这些富铝矿物通常都被认为只存在于变泥质岩中^[4]。矿物组合中出现十字石、蓝晶石和角闪石的变质基性岩原岩一般都被认为是火山岩和沉积岩的混合^[5-9]。变质原岩仅为火山岩的变质基性岩中很少出现含十字石、蓝晶石等富铝矿物^[10-16]。自含十字石石榴角闪岩被报道以来,出现蓝晶石、石榴子石和角闪石矿物组合一直被认为是由于不同的全岩组分^[6,13,17-19]或不同的 $P-T$ 条件^[6,14]而造成的。Arnold^[2]在计算不同组分石榴角闪岩的视剖面图时候发现,含十字石石榴角闪岩仅保存在一个较窄的温压范围和相对固定的全岩组分内,这表明十字石可以很好地限定石榴角闪岩的温压条件。

青藏高原经历了特提斯洋多次开启和消亡的

造山带演化过程。自古生代以来由多块体、多岛弧多期离散聚合和碰撞拼贴,最后在中-新生代由于新特提斯洋俯冲闭合,印度板块与欧亚板块碰撞形成的巨型复合碰撞造山拼合体^[20,21]。拉萨地体位于青藏高原南部,夹于班公-怒江蛇绿岩带和雅鲁藏布蛇绿岩带之间,是一条巨型的构造-岩浆岩带^[22-24],是揭示青藏高原形成与演化过程的关键地区之一。现有的研究认为,拉萨地体是由一套角闪岩相至麻粒岩相的变质岩系,古生代-中生代沉积岩和中、新生代岩浆岩组成^[25-27]。在拉萨地体东南部,即东喜马拉雅构造结附近,由于新生代强烈的地壳抬升和剥蚀作用,角闪岩相至麻粒岩相变质岩石出露到地表。这些岩石也曾被认为是拉萨地体的前寒武纪结晶基底,被命名为林芝岩群或波密岩群^[28]。但最近的研究表明,这套岩石并未发现类似于拉萨地体那果、多巴地区的前寒武纪基底含石榴子石片麻岩,这套岩石主要为泥质片岩、片麻岩、斜长角闪岩等,其原岩包括古生代至中生代的沉积岩,早古生代和中、新生代的岩浆岩,其变质作用发生在中、新生代^[29-34]。由于这套变质岩是由不同时代、不同类型的岩石组成,这里将其称之为林芝杂岩或林芝变质杂岩。林芝岩群被划分为米林、八一、布久三个变质带,经历了中压角闪岩相和高压岩相变质作用^[35]。前人对该区变质岩的研究集中在片麻岩和斜长角闪岩方面,主要

开展的是一些年代学工作,缺少详细的岩相学和变质过程研究。

本文首次报道在林芝地区发现含十字石石榴角闪岩,并开展了详细的岩石学和矿物化学的研究工作。通过岩石学观察,鉴别出三期变质作用,并结合相平衡模拟的方法,利用峰期矿物组合和石榴石等值线方法限定出含十字石石榴角闪岩的峰期温压条件并推演出其变质P-T演化轨迹,进一步限定研究区不同岩石类型的变质演化过程。

本文使用的矿物简写如下:Grt-石榴子石;Gr-钙铝榴石;Py-镁铝榴石;Hbl-角闪石;St-十字石;Pl-斜长石;Chl-绿泥石;Pg-钠云母;Ms-白云母;Bt-黑云母;Spl-尖晶石;Ep-绿帘石;Law-硬柱石;Ky-蓝晶石;Zo-黝帘石。

2 区域地质概况

本文的研究区位于拉萨地体东南部,东喜马拉雅构造带附近,主要由3个构造单元组成,即北部的拉萨地体(或冈底斯带),南部的喜马拉雅带(包括高喜马拉雅结晶岩系和特提斯喜马拉雅岩系),以及它们之间的雅鲁藏布江缝合带。印度-雅鲁藏布江

缝合带呈向北凸出的马蹄状分布于北部的拉萨地体和南部的喜马拉雅带(印度大陆)之间。印度-雅鲁藏布江缝合带为蛇绿混杂岩带,主要由低角闪岩相变质的超镁铁岩、镁铁岩、石英岩、白云母石英片岩和大理岩组成,局部混合有来自缝合带两侧地块的变质岩^[28]。喜马拉雅带为印度大陆北缘,又分为高喜马拉雅结晶岩系和特提斯-喜马拉雅岩系。高喜马拉雅结晶岩系,又称南迦巴瓦岩群,分布于东喜马拉雅构造结的核部,主要由花岗质片麻岩和泥质片岩组成,并以出现含石榴石蓝晶石高压麻粒岩为特征,经历了早期的高压麻粒岩相变质和晚期的低压麻粒岩相、角闪岩相退变质作用,混合岩化作用强烈^[36,37]。

研究区的拉萨地体主要由角闪岩相-麻粒岩相的变质岩系,古生代到中生代的沉积地层以及中、新生代岩浆岩构成。变质岩系北部与古生代地层呈渐变接触关系,但它们之间的界线多被新生代侵入岩所占据。主要的变质岩类型包括片麻岩类、片岩类、石英岩、斜长角闪岩类、大理岩、麻粒岩和混合岩等。片麻岩、片岩多互层产出,斜长角闪岩多呈透镜体产出在片麻岩中。靠近雅鲁藏布江缝合

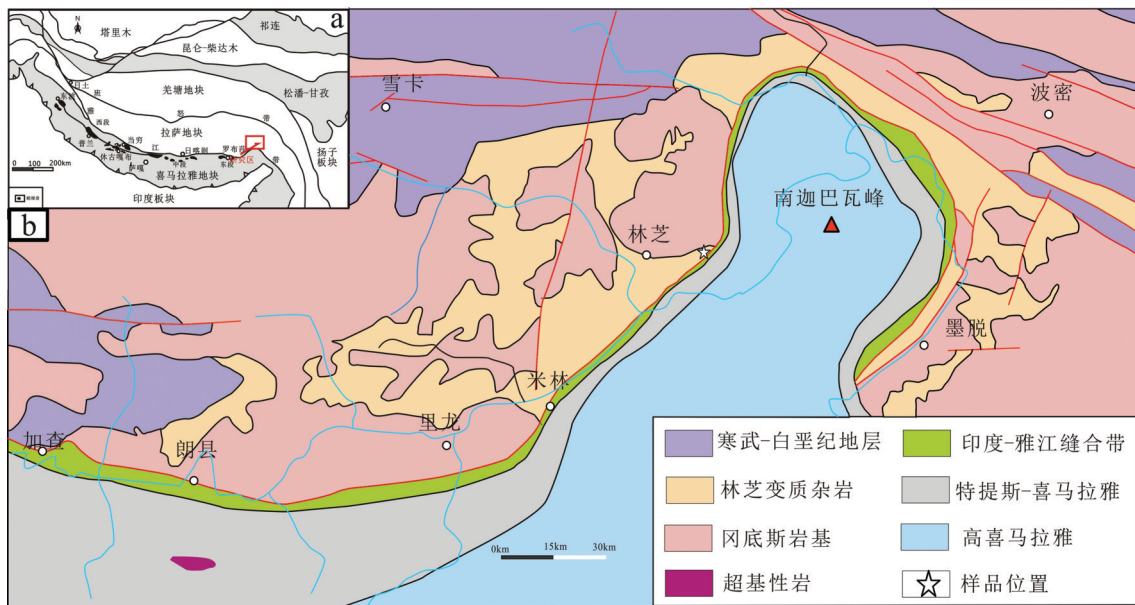


图1 青藏高原林芝地区地质简图

a-青藏高原构造单元划分简图和研究区位置;b-研究区地质图(据文献[39]修改)和本文采样位置

Fig. 1 Sketch geological map of the Nyingchi area in the Tibetan Plateau

a-Simplified map of tectonic subdivision of the Tibetan Plateau and the study area; b-Sketch geological map of the study area (modified after reference [39]) and sampling sites

带,发育混合岩,且岩石强烈变形。区内侵入岩是冈底斯岩基的重要组成部分,其中以白垩纪黑云二长花岗岩和花岗闪长岩分布最为广泛,构成冈底斯岩浆岩的主体,沉积岩在研究区主要为石炭系一二叠系,集中分布于北部林芝县更张等地至尼洋河及其沿岸,东西向带状分布,1:25万林芝县幅^[38]认为其为一套缺底无顶,层间紧闭褶皱和走向断裂发育的变质砂岩、板岩组成的浅变质岩。采样点位置如图1-b所示,共采样6块,均为石榴角闪岩。采样区是一个片岩、片麻岩以及石英岩分布的区域变质岩区,岩石多含石榴石,岩石普遍发生了糜棱岩化。

3 岩相学研究

石榴角闪岩样品手标本(图2)颜色较暗,几乎为黑色,但可见紫红色的自形粒、均匀分布的石榴石,具粒状变晶结构,块状构造。主要矿物组成为角闪石(55%~60%),石榴石(10%~15%),十字石(10%~15%),白云母(2%~5%)钠云母(5%~10%),斜长石(2%~5%),绿泥石(1%~3%),绿帘石(1%~3%)以及钛铁矿(2%~4%)。

石榴石,呈紫红色,颗粒大小在1~3 mm,以变斑晶形式均匀分布在基质中。根据石榴石晶形完整程度将其分为两类:一类是保留完整晶形的石榴石,裂理不发育,裂理有一定的定向性,沿着裂隙发育有角闪石、钠云母和斜长石等矿物,石榴子石内部含少量角闪石、绿泥石和云母包体(图3-a, 3-b);

另一类是没有核,只保留了边部晶形的石榴子石,其核部被钠云母和斜长石交代(图3-c)。

角闪石是岩石中含量最高的一类矿物,主要存在于基质中,具有明显的浅绿-深绿的多色性,呈片状和粒状分布,粒度不均(0.1~2 mm),甚至在薄片尺度下可见粗粒角闪石和细粒角闪石的分界。镜下观察到角闪石也呈包体主要存在于石榴石和十字石变斑晶内,另外在石榴石核部生长的黑云母中也发现了角闪石包体(图3-a)。不同于基质中的角闪石,十字石和黑云母包体中角闪石部分呈浑圆状(图3-d)。

十字石,高突起,浅黄色,有的保留了较好的十字双晶(图3-d)。根据产出状态可以将其分为三类:一类是和角闪石直接接触并且含有大量角闪石包体的十字石,它们基本保留了原来的晶形,但是由于内部大量包体的存在,十字石表现为残晶结构(图3-d);一类是表面很干净,几乎不含或者含少量角闪石包体的十字石,与钠云母和绿泥石直接接触(如图3-e);还有一类是被绿泥石和钠云母交代,保留十字石残余。

斜长石,主要有3种产出状态:一是和角闪石共生,呈板状,主要在基质中产出;二是沿石榴子石裂隙生长,在部分石榴子石核部或者边部交代石榴子石而成;三是和钠云母共生,有明显的十字石残余保留,是交代十字石而形成。黑云母,棕色,半自形晶,主要发育在石榴石包体和石榴子石裂隙中(图3



图2 含十字石石榴角闪岩的手标本照片

Fig.2 Hand specimen photographs of staurolite-bearing garnet amphibolite

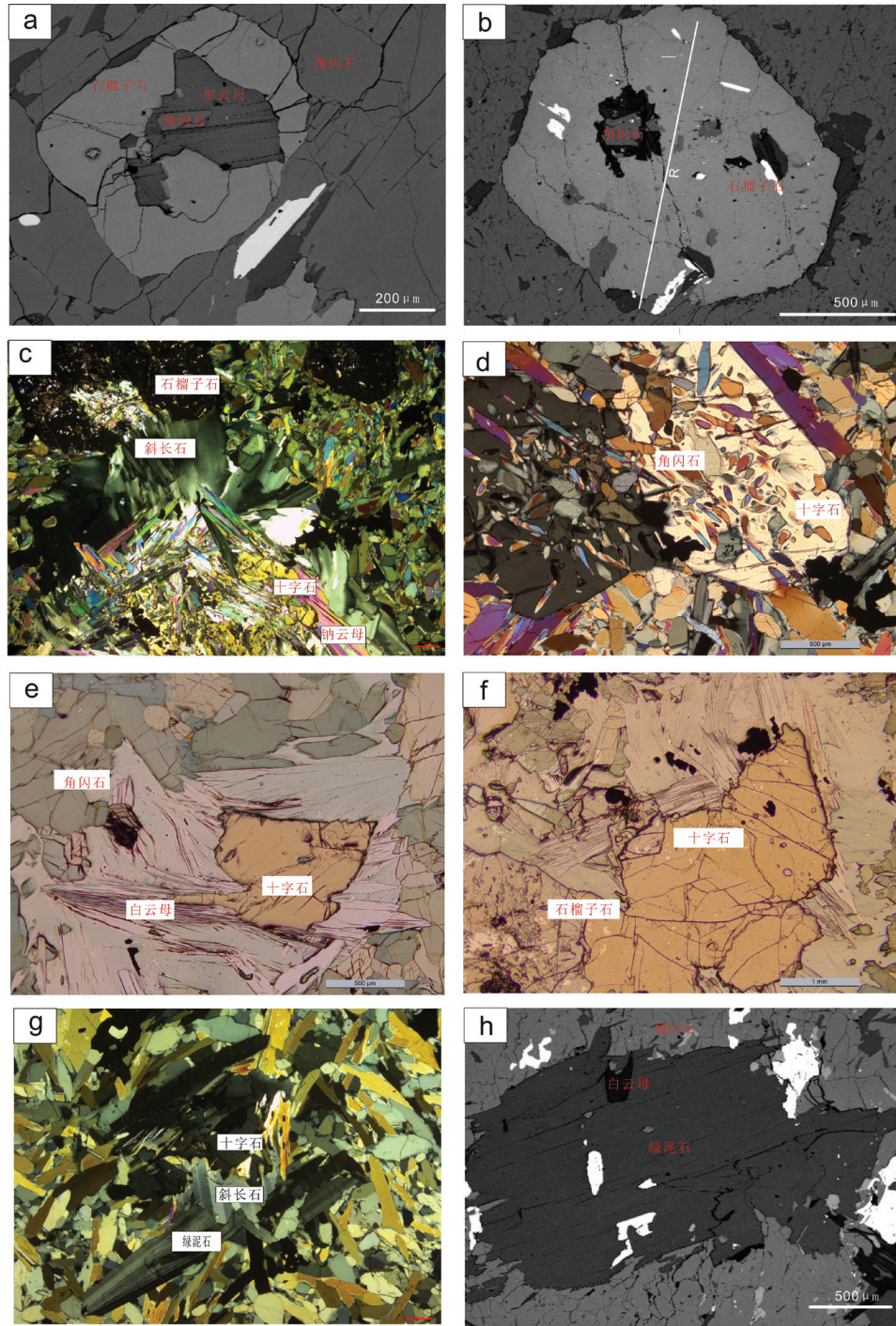


图3 拉萨地块林芝杂岩中含十字石榴角闪岩的显微结构照片

a—石榴子石裂隙中黑云母中的角闪石包体(背散射);b—晶形完整的石榴子石变斑晶(背散射)内部有角闪石和白云母包体(正交偏光);c—十字石残晶以及核部被交代的石榴子石(正交偏光);d—保留十字双晶的十字石(正交偏光);e—内部无包体的十字石和白云母共生(单偏光);f—共生的石榴子石和十字石(单偏光);g—残余十字石和斜长石、绿泥石(正交偏光);h—基质绿泥石(背散射)

Fig.3 Photographs showing the microstructure of the staurolite-bearing garnet amphibolites from the Nyingchi complex in the Tibetan Plateau

a—Amphibole in a biotite from the crack of the garnet (BSE);b—Garnet porphyroblast (BSE); c—Remnant staurolite and garnet without core (crossed nicols);d—Staurolite with crossed twinning (crossed nicols); e—Staurolite without inclusion associated with paragonite (plainlight); f—Garnet and staurolite with mica (plainlight); g—Staurolite and chlorite with plagioclase (crossed nicols); h— Matrix chlorite (BSE)

-a)。钠云母,具有一组明显平行解理,干涉色鲜艳,他形晶。主要分布在后期的流体通道中,与绿泥石和斜长石共生。有的钠云母中残留未被完全交代的十字石残晶,说明钠云母是后期退变的产物。绿泥石,有两种产出状态:一种绿泥石广泛存在于基质中,片状,自形,无色-浅绿色多色性,粒度在1~3 mm,有的内部有少量角闪石包体(图3-h);另一种绿泥石围绕十字石边部生长,与钠云母密切共生。暗色矿物主要为钛铁矿和少量的磁铁矿,它们主要在基质中分布。此外,磷灰石等副矿物以包体的形式存在于石榴子石和其他矿物晶体内。

4 全岩及矿物地球化学

全岩化学成分分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,主量元素采用XRF(X-ray fluorescence)方法进行测定,精度优于5%;选取具有代表性的石榴角闪岩全岩成分结果见表1:

总体来看,所采的六块石榴角闪岩全岩成分较为均一,具有较低的硅(37%~38%),较高的铝(19%~20%),通过如表1所示的矿物标准化,其矿物主要组成为:橄榄石23%,斜长石47%,紫苏辉石5%,具

表1 拉萨地块林芝含十字石石榴角闪岩的主要氧化物和标准化矿物含量(样品14SD154)

Table 1 Major oxides and normative mineral content of staurolite-bearing garnet amphibolite in Nyingchi area of the Lhasa Block (sample 14SD154)

氧化物	含量/%	矿物	含量/%
Na ₂ O	2.25	斜长石	47.8
MgO	8.6	正长石	2.48
Al ₂ O ₃	19.82	刚玉	6.08
SiO ₂	37.42	紫苏辉石	6.13
P ₂ O ₅	0.3	橄榄石	23.45
K ₂ O	0.25	钛铁矿 ⁺	3.42
CaO	9.03	磁铁矿	8.26
TiO ₂	1.84	磷灰石	0.72
MnO	0.23	方解石	1.23
Fe ₂ O ₃	5.7		
FeO	12.55		
H ₂ O ⁺	1.16		
CO ₂	0.11		
total	99.18		

有橄长岩的矿物组合特征。

电子探针在中国地质科学院地质所大陆动力构造实验室探针室完成。利用JEOL JXA-8110电子探针完成,分析条件为:加速电压15 kV,电流10 nA,束斑直径1 μm(白云母为5 μm),选取具有代表性的矿物进行电子探针成分分析,其结果见表2:

4.1 石榴子石

石榴子石由镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石、钙铝榴石四个端元组成,根据表2石榴子石探针成分,石榴子石是富钙、镁的铁铝榴石(Py₅₋₂₅Alm₅₇₋₆₃Sps₁₋₁₂Grs₁₀₋₂₇)。在石榴子石的成分剖面(图4)上,核部钙铝榴石和铁铝榴石成分较为均一,从核部到边部,铁铝榴石含量略微升高,钙铝榴石降低。边部镁铝榴石和锰铝榴石表现为明显的环带特征,这表明石榴子石之间的替代主要发生Mn-Mg之间。锰铝榴石表现为明显的“钟型剖面”,以及边部钙铝榴石含量降低而镁铝榴石含量升高的特征共同表现了石榴子石的进变环带特征。从核部到边部,镁铝榴石含量X_{py}从0.05增加到0.25,钙铝榴石含量X_{gr}从0.28降低到0.10。

4.2 角闪石

根据角闪石的产状,把角闪石分为三类:石榴子石包体中的角闪石;十字石包体中的角闪石;基质中的角闪石。根据Leaker^[40]角闪石分类原则,角闪石属于钙镁闪石,基质中的角闪石相对包体中的角闪石的硅含量高,变化为6.1~5.9(a.p.f.u),角闪石钠含量在0.7~0.8(a.p.f.u)。

4.3 十字石

十字石硅含量在7.6~7.7,这和变质基性岩中发现的十字石的硅含量一致^[13,41]。十字石相对富Fe,大颗粒十字石具有成分环带特征,从核部到边部,Fe含量逐渐降低,从3.5~3.0(a.p.f.u),X_{Mg}(100Mg/(Mg+Fe))在25~27。在十字石的探针成分中,Mn和Ti含量较低,不足4%。

4.4 斜长石

斜长石成分变化较大,从钠长石到钙长石都有,基质中的长石有着共同的组分An₄₀₋₇₀,相对新鲜的斜长石发育有环带。

4.5 云母

云母主要为钠云母,Na/(Na+Ca)在90%左右,云母主要替代为Na取代Ca,而K和Ca之间的替代基本

表2 林芝含十字石榴角闪岩代表性探针成分(样品 14SD154)
 Fig.2 Representative electron microscope analyses of Nyingchi staurolite-bearing garnet amphibolite (sample 14SD154)

Min	st	st	st	st	pl	pl	Hbl-st	Hbl-st	Hbl-Grt	Hbl-Grt	Hbl-Ms	Chl	Ms	Bt
SiO ₂	27.36	27.57	27.56	61.99	62.64	40.16	40.53	40.56	40.40	41.61	26.36	46.48	39.97	
TiO ₂	0.51	0.50	0.45	0.00	0.00	0.55	0.49	0.53	0.52	0.51	0.09	0.76	0.29	
Al ₂ O ₃	53.30	52.99	53.00	23.55	23.04	17.00	16.86	17.01	16.87	16.20	22.27	38.14	18.42	
Cr ₂ O ₃	0.07	0.06	0.07	0.01	0.02	0.35	0.38	0.32	0.37	0.31	0.01	0.11	0.01	
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.02	16.12	16.27	16.07	16.90	17.88	1.54	12.15	
MnO	13.40	13.38	13.33	0.02	0.01	0.12	0.13	0.08	0.08	0.09	0.02	0.02	0.02	
MgO	0.09	0.16	0.08	0.01	0.00	9.14	9.26	8.97	9.05	9.03	20.89	0.17	14.52	
CaO	2.65	2.68	2.57	4.76	4.28	10.33	10.35	10.45	10.37	9.90	0.00	0.69	0.12	
Na ₂ O	0.03	0.00	0.02	8.91	9.04	2.85	2.73	2.83	2.86	2.88	0.04	6.55	0.66	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.35	0.38	0.32	0.37	0.29	0.03	0.57	0.00	
Totals	97.41	97.34	97.08	99.45	99.04	96.87	97.23	97.33	96.95	97.73	88.45	95.03	89.53	
Si	7.62	7.69	7.70	2.76	2.79	6.04	5.94	5.99	5.93	5.94	2.65	3.00	2.82	
Ti	0.11	0.11	0.09	0.00	0.00	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.01	0.04	0.02	
Al	17.51	17.42	17.46	1.24	1.21	2.99	2.92	2.86	2.90	2.89	2.64	2.90	1.70	
Cr	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.07	0.00	0.14	
Fe ²⁺	3.12	3.12	3.12	0.00	0.00	1.64	1.98	1.95	1.94	1.95	1.50	0.08	0.80	
Mn	0.02	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	
Mg	1.10	1.11	1.07	0.00	0.00	1.99	1.98	2.07	2.10	2.04	3.13	0.02	1.70	
Ca	0.00	0.00	0.00	0.23	0.20	1.67	1.63	1.62	1.64	1.65	0.00	0.05	0.01	
Na	0.01	0.00	0.01	0.77	0.78	0.82	0.82	0.75	0.81	0.79	0.01	0.82	0.10	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.00	0.05	0.00	

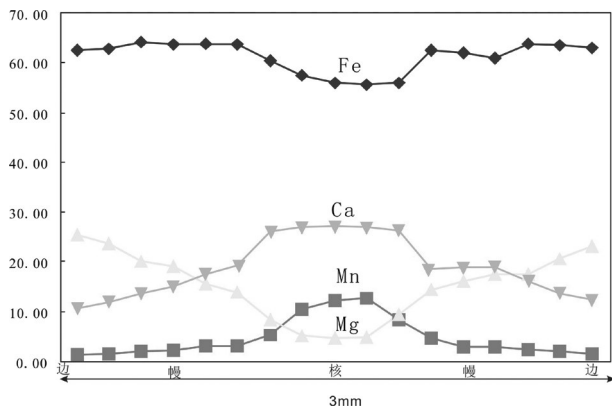


图4 林芝杂岩体含十字石榴角闪岩中石榴石环带的成分剖面

Fig.4 Compositional profile of garnet from staurolite-bearing garnet amphibolite in the Nyingchi complex

$$\text{Fe}=\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca}), \text{Mg}=\text{Mg}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca}), \\ \text{Ca}=\text{Ca}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca}), \text{Mn}=\text{Mn}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}+\text{Mg}+\text{Ca})$$

可以忽略或者根本就没有发生,白云母主要成分是钠云母端元,云母的Si含量在2.9~3.0(a.p.f.u)。云母中钙含量较低,最高含量为1%。此外在石榴子石核部包体中有黑云母存在,含量很少。

5 相平衡模拟和P-T轨迹

Arnold^[2]研究了矿物组合为蓝晶石、十字石、石榴子石、角闪石的视剖面图,并且讨论了全岩FeO、MgO、CaO、Na₂O、Al₂O₃对视剖面图中矿物稳定域的影响,但是在假设前提中,他把斜长石当作过剩矿物来处理,也没有考虑钠云母的存在。而本文研究的样品中,斜长石是峰期变质后退变质作用的产物,同样钠云母也是后期退变的产物,所以应该将斜长石和钠云母加入要计算的矿物组合中。

相平衡模拟使用Perple_X程序,数据库选择Holland and Powell^[41]的升级版。所涉及的矿物及熔体相的活度-成分关系模型选自Perple_X文件(solution_model.dat),包括:石榴石-Grt(HP),黑云母-Bt(TCC),白云母-Ms(CHA1),长石(hpl),堇青石-hCrld,尖晶石-Spl(HP),十字石-St(HP),角闪石(WHP),考虑到P₂O₅主要形成磷灰石,且在所研究的样品中含量比较低,以分子式Ca₅[PO₄]₃(OH)中磷和钙的比例扣除相应的钙组份,然后将P₂O₅排除在计算体系之外,考虑到Ti主要存在于钛铁矿这个独立

的矿物相中,对相平衡模拟过程矿物相关系几乎没有影响。因此也忽略该组分,所以选择的计算体系为:Na₂O-CaO-MnO-K₂O-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-O(Mn-NCKMASHO)。

图4是根据实测的全岩成分以及水含量计算得到的富铝石榴角闪岩的P-T视剖面图。在计算的温度(300~700°C)和压力(1×10⁵~16×10⁵ kPa)范围内,绿泥石稳定存在于各个变质域内,石榴子石出现在温度高于430°C压力高于5×10⁵ kPa变质域内,十字石稳定存在于600~700°C,8×10⁵~16×10⁵ kPa温压范围内,角闪石、绿泥石稳定存在于各个变质域内。钠云母和斜长石出现在400~650°C,2×10⁵~5×10⁵ kPa的温压范围内。尖晶石出现在温度大于650°C的变质域。

从石榴子石镁铝榴石和钙铝榴石等值线来看,镁铝榴石等值线具有较为陡的正斜率,随温度变化明显,随着温度升高镁铝榴石含量不断增加;钙铝榴石有平缓至陡的正斜率,随压力变化明显,随着压力增大,其含量显著增加,所以可以把二者结合起来作为岩石变质过程中温度与压力变化的指示。根据石榴子石环带特征,核部石榴子石生长于进变过程,幔部或者边部石榴子石生长在峰期或者近峰期的变质过程中,石榴子石保存的变质信息可以用来研究进变和峰期的变质过程。核部石榴子石和钙铝榴石投点在Chl+Hbl+Pl+Grt+Ms变质域内,边部石榴子石的镁铝榴石和钙铝榴石投点在St+Grt+Hbl+Ms变质域内,根据石榴石的环带特征,我们可以得到石榴角闪岩的进变到峰期的P-T轨迹。结合退变早期形成大量角闪石,晚期形成的钠云母和斜长石的岩相学特征,根据退变矿物组合St+Grt+Hbl+Pl+Pg,推测石榴角闪岩经历的退变P-T轨迹,这样建立了石榴角闪岩顺时针P-T演化轨迹。

6 讨论

6.1 石榴角闪岩中出现十字石

根据矿物的成分特征和结构特征,笔者可以确定林芝杂岩体中的石榴角闪岩峰期变质条件下的平衡矿物组合为:十字石、石榴子石、角闪石、白云母,结合含十字石变质基性岩的相关研究,石榴角闪岩经历了一个高压角闪岩相的峰期变质作用。十字石作为该石榴角闪岩中的特征变质矿物,很好

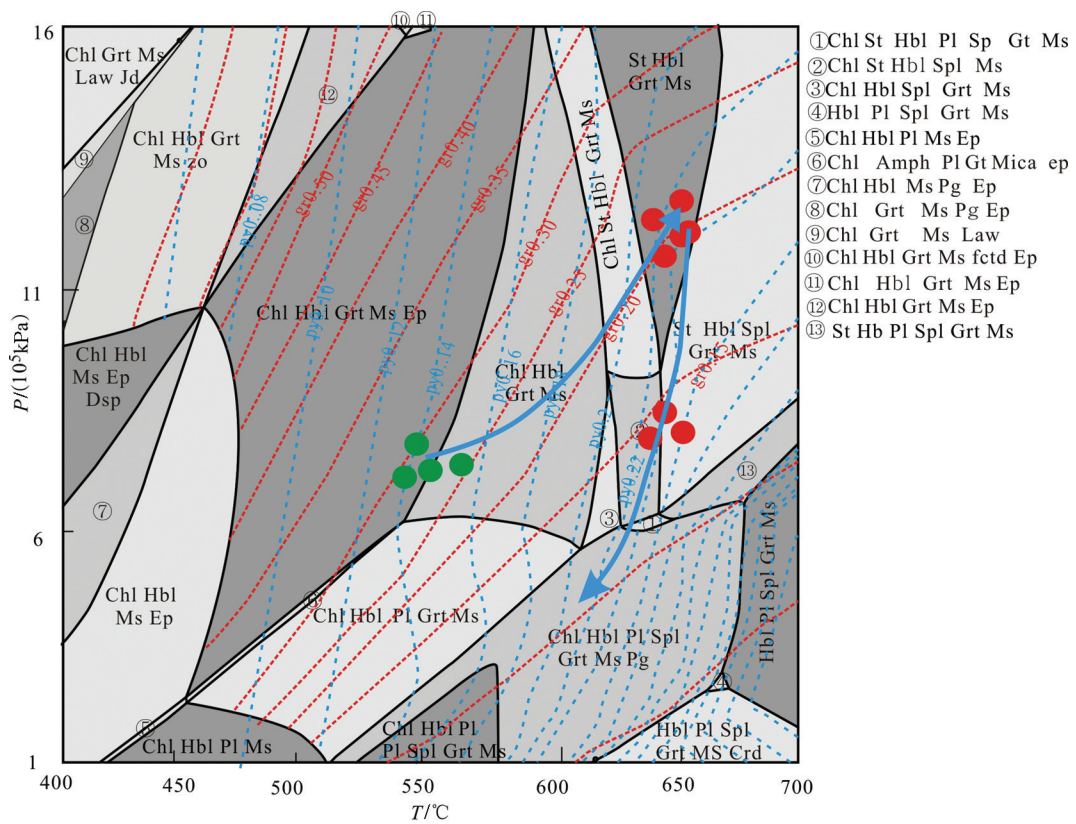


图5 含十字石石榴角闪岩 $P-T$ 视剖面图及其变质演化轨迹

方法根据文献[42],计算全岩成分为基于表1的重量百分数,绿圆圈和红色圆圈代表石榴石环带成分点,绿色圆圈来自核部石榴子石成分,红色圆圈来自幔部和边部石榴子石成分。Grt-石榴子石;Gr-钙铝榴石;Py-镁铝榴石;Hbl-角闪石;St-十字石;Pl-斜长石;Chl-绿泥石;Pg-钠云母;Ms-白云母;Spl-尖晶石;Ep-绿帘石;Law-硬柱石;Zo-黝帘石;Jd-硬玉

Fig. 5 The $P-T$ pseudosection and metamorphic $P-T$ path of the staurolite-bearing garnet amphibolites

Method is based on Connolly[42] and the oxide values of the rock used in the pseudosection are listed in Table. Plots of the garnet compositions are shown as green- or red pink-colored circles, green-colored circles come from the composition of the core of garnet and the red-colored circles come from the composition of the mantle and the rim of the garnet. Grt-Garnet; Gr-Grossular; Py-Pyrope; Hbl-Hornblende; St-Staurolite; Pl-Plagioclase; Chl-Chlorite; Pg-Paragonite; Ms-Muscovite; Spl-Spinel; Ep-Epidote; Law-Lawsite; Zo-Zoisite; Jd-Jadeite

地记录了各个变质阶段的变质信息。Gibson^[10]首次在变质基性岩中发现十字石,他在角闪石边部发现了针状十字石嵌入角闪石边部,但是在角闪石核部没有十字石的发现。Purtscheller 和 Mogessie^[13]在西澳大利亚奥茨山谷结晶基底的变质基性岩的石榴子石和角闪石均发现了十字石。Selverstone^[6]在研究含十字石的钠云母石榴角闪岩认为富钠的核和富钙的边的斜长石是稳定存在的矿物相,从核部到边部的成分变化特征和变质过程没有关系。同样 Arnold^[2]在做含十字石的石榴角闪岩视剖面图时,把斜长石当作过剩矿物相处理,他的理论依据是富钠的核和富钙的边的斜长石是稳定存在的矿物相。

他们认为高铝(全岩 Al_2O_3 不小于 35%,全岩的计算方式为 $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + FeO + MgO + CaO + Na_2O)$)是形成富铝矿物的主要因素,通过相平衡模拟得到十字石形成温度为 550°C,角闪石形成的温度为 595°C。同时形成十字石等富铝特征变质矿物的变质基性岩和全岩镁密切相关 X_{Mg} 在 0.2~0.7 之间 ($X_{Mg} = MgO / (MgO + CaO)$)最有利于富铝矿物出现。总之,岩石中全岩铝的含量决定是否出现富铝矿物,而全岩 Fe/Mg 的比值决定哪种富铝矿物的出现。Tsuji-mori 和 Liou^[3]研究发现出现在富铝基性岩的矿物组合 $Amph + Zo + Ky + St + Pg + Ab$ 以经历了高压绿片岩相变质作用为特征。Shah Wali Faryad^[43]在研究西阿尔

卑斯 Speik 杂岩体的富铝变质基性岩认为岩石经历了 580°C 、 $12 \times 10^5 \text{ kPa}$ 的峰期变质作用和 580°C 、 $5 \times 10^5 \text{ kPa}$ 近等温减压的退变。由于发现后期形成的葡萄石和绿纤石,证明了其经历了更为低温和低压的退变作用。

本文所研究的石榴角闪岩在全岩成分和西阿尔卑斯 Speik 杂岩体的石榴角闪岩极为类似,在矿物组合上与原岩为火成岩的富铝石榴角闪岩类似,不同之处在于本文研究石榴角闪岩不含蓝晶石,十字石保留了不同的晶形,相对以往研究的不易识别的小颗粒的矿物包体中的十字石,林芝杂岩体的石榴角闪岩十字石粒径在 $1\sim 3 \text{ mm}$,以大的变斑晶存在,它们以不同的产出状态记录了不同的变质信息。十字石的出现和它的不同结构特征使得我们能够对温压范围不易限定的石榴角闪岩进行相平衡模拟研究,相平衡模拟结果表明拉萨地块林芝杂岩体经历了高角闪岩岩相变质作用,经历了 $610\sim 630^{\circ}\text{C}$ 、 $12 \times 10^5 \sim 13 \times 10^5 \text{ kPa}$ 的峰期变质作用和早期减压斜长石退变和晚期十字石周围形成钠云母和绿泥石的退变。

6.2 含十字石石榴角闪岩的变质演化过程

根据相平衡模拟结果和岩相学观察,结合建立的 $P-T$ 演化轨迹,我们可以把富铝石榴角闪岩经历的变质演化过程划分为3个变质演化阶段: I 进变质阶段; II 峰期变质阶段; III 退变阶段。

(1) 进变质阶段

在进变质阶段形成的矿物有绿泥石、黑云母、十字石、石榴子石、钠长石、钾长石、角闪石。石榴子石的进变环带(图4)和矿物中的包体,如石榴子石中的黑云母、角闪石包体,十字石中的角闪石包体都很好地保存了进变信息。

(2) 峰期变质阶段

峰期变质阶段的温压条件为,矿物组合为 $\text{Grt}+\text{Hbl}+\text{St}+\text{Ms}$ 。峰期富水矿物的存在可以使峰期矿物组合不断演化,所以矿物记录的峰期条件低于岩石实际经历的峰期温压,深绿色的角闪石颗粒在石榴子石周围生长,它们粒径在 1 mm 左右,在大颗粒十字石周围也可见较为自形的角闪石生长,这些角闪石可能在峰期和石榴子石、十字石平衡共生。通过石榴子石-角闪石温压计得到峰期变质条件为 $11 \times 10^5 \sim 12 \times 10^5 \text{ kPa}$ 、 $600\sim 620^{\circ}\text{C}$,这和相平衡模拟结果很吻合。

(3) 退变阶段

早期的退变以角闪石大量生成成为特征,沿着石榴子石裂理有角闪石,此外针状角闪石在石榴子石边缘生长,这些典型的岩相学特征都表明早期退变过程形成了部分角闪石,晚期的退变以十字石被钠云母和长石交代为特征,石榴子石核部被长石和云母交代为特征,在该阶段长石和钠云母大量生成,在钠云母和斜长石中间有十字石被交代的残余,石榴子石核部也被钠长石和钠云母交代,这些都代表了明显的退变特征。所以该阶段的矿物组合为 $\text{St}+\text{Hbl}+\text{Grt}+\text{Pg}+\text{Pl}$ 。

7 结 论

本文研究的富铝石榴角闪岩相平衡模拟结果显示,林芝杂岩体石榴角闪岩峰期温压条件为 $610\sim 630^{\circ}\text{C}$ 、 $12 \times 10^5 \sim 13 \times 10^5 \text{ kPa}$,对应的矿物组合为石榴子石、角闪石、十字石和白云母。石榴角闪岩经历了高压角闪岩相的变质作用,同时通过石榴子石-角闪石地质温压得到了相平衡模拟类似的峰期变质的温压条件。最终结合十字石的退变特征得到石榴角闪岩顺时针的 $P-T$ 演化轨迹,结合拉萨地块内部松多榴辉岩研究和林芝杂岩体其他片岩片麻岩研究,石榴角闪岩可能经历了造山带变质作用。

致谢:感谢中国地质大学(北京)的董天赐和卢雨潇同学在野外勘查及样品采集上的帮助,中国地质大学(北京)王云鹏在电子探针实验上给予帮助,中国地质科学院向华在相图上给了极大的帮助。匿名审稿人和编辑部王学明老师对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Laird J. Phase equilibria in mafic schist from Vermont[J]. *J. Petrol.*, 1980, 21: 1-37.
- [2] Arnold J, Powell R, Sandiford M. Amphibolites with staurolite and other aluminous minerals: calculated mineral equilibria in NCFMASH[J]. *J. Metamorp., Geol.*, 2000, 18: 23-40.
- [3] Tsujimori T T, Liou J G. Metamorphic evolution of kyanite-staurolite-bearing. Epidote-amphibolite from the Early Palaeozoic Oeyama belt, SW Japan[J]. *J. Metamorp. Geol.*, 2004, 22: 301-313.
- [4] Turner F J. *Metamorphic Petrology: Mineralogical, Field and Tectonic Aspects*, 2nded[M]. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [5] Spear F S. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond Volcanics, Mt Cube Quadrangle, Vermont[J]. *J. Petrol.*, 1982, 23:

- 383-426.
- [6] Selverstone J, Spear F S, Franz G, et al. *P-T-t* paths for hornblende + kyanite + staurolite garnet schists: high-pressure metamorphism in the Western Tauern Window[J]. *Austria. Eos.*, 1984, 64: 351-352.
- [7] Ward C M. Magnesium staurolite and green chromian staurolite from Fiordland, New Zealand[J]. *Am. Mineral.* 1984, 69: 531-540.
- [8] Humphreys H S. Metamorphic evolution of amphibole-bearing aluminous gneisses from the Eastern-Namaqua Province, South-Africa[J]. *Am. Mineral.*, 1993, 78: 1041-1055.
- [9] Kuhns R J, Sawkin F J. Magmatism, metamorphism and deformation at Helmo, Ontario, and the timing of Au-Mo mineralization in the golden mine[J]. *Econ. Geol. Bull. Soc.*, 1994, 89: 720-756.
- [10] Gibson G M. Margarite in Kyanite- and Corundum-Bearing Anorthosite, Amphibolite, and Hornblende From Central Fiordland, New Zealand[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 68: 171-179.
- [11] Grapes R H. Chromian epidote and zoisite in kyanite amphibolite, Soperthern Alps, New Zealand[J]. *Am. Mineral.*, 1981, 66: 974-975.
- [12] Selverstone J, Spear F S, Franz G, et al. *P-T-t* paths for hornblende + kyanite + staurolite garnet schists: high-pressure metamorphism in the Western Tauern Window[J]. *Austria. Eos.*, 1983, 64: 351-352.
- [13] Purtscheller F, Moggessie A. Staurolite in garnet amphibolites from the oetztal old crystalline basement, Austria[J]. *TMPM*, 1984, 32: 223-233.
- [14] Helms T S, McSween H Y, Labotka T C, et al. Petrology of a Georgia Blue Ridge amphibolite unit with hornblende + gedrite + kyanite + staurolite[J]. *Am. Mineral.*, 1987, 72: 1086-1096.
- [15] Moen S. Staurolite from a metabasite and its paragenesis[J]. *Mineral. Mag.*, 1991, 55: 140-142.
- [16] Kuyumjian R M. Kyanite-staurolite-orthoamphibolite from the Chapada region, Goiás, central Brazil[J]. *Mineral. Mag.*, 1998, 62: 501-507.
- [17] Spear F S. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond Volcanics, Mt Cube Quadrangle, Vermont[J]. *J. Petrol.*, 1982, 23: 383-426.
- [18] Ward C M. Magnesium staurolite and green chromian staurolite from Fiordland, New Zealand[J]. *Am. Mineral.*, 1984, 69: 531-540.
- [19] Grew E S, Standiford M. Staurolite in a garnet-hornblende-biotite schist from the Lanterman Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Neues Jahrb.* Mineral. Monatsh, 1985, 9: 396-410.
- [20] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Xu Zhiqing, Yang Jingsui, Li Haibin, et al. Orogenic Plateau: Terranes Composing, Collision Orogeny and Uplift Mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007(in Chinese).
- [21] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85: 1-33.
- Xu Zhiqing, Yang Jingsui, Li Haibin, et al. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85: 1-33 (Chinese with English abstract)
- [22] Chang C F and Zheng S L. Tectonic features of the Mount Jolmo Lungma region in southern Tibet, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1973, 1: 1-12.
- [23] Dewey J F, Shackelton R M, Chang C, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, 327: 379-413.
- [24] Pearce J A, Deng W. The ophiolites of the Tibetan geotraverse, Lhasa-Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [M]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1888, 327: 215-238.
- [25] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan Orogen[J]. *Ann. Rev. Earth Planetary Science Letters*, 2000, 28: 211-280.
- [26] 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. *地质通报*, 2002, 21: 701-707.
- Pan Guitang, Li Xingzheng, Wang Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21: 701-707(in Chinese with English abstract).
- [27] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22, 521-533.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22: 52-533(in Chinese with English abstract)
- [28] Geng Q R, Pan G T, Zheng L L, et al. The Eastern Himalayan syntaxis: Major tectonic domains, ophiolitic mélanges and geologic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 265-285.
- [29] 王金丽, 张泽明, 石超. 拉萨地体东南缘的多期深熔作用及动力学[J]. *岩石学报*, 2008, 24: 1539-1551.
- Wang Jingli, Zhang Zeming, Shi Chao. Anatexis and dynamics of the Lhasa terrane in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24: 1539-1551(in Chinese with English abstract)
- [30] 王金丽, 张泽明, 董昕, 等. 西藏拉萨地体南部晚白垩纪石榴石二辉麻粒岩的发现及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25: 1695-1706.
- Wang Jingli, Zhang Zeming, Dong Xin, et al. Discovery of Late Cretaceous garnet two-pyroxene granulite in the southern Lhasa terrane, Tibet and its tectonic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 1695-1706(in Chinese with English abstract).
- [31] 董昕, 张泽明, 王金丽, 等. 青藏高原拉萨地体南部林芝岩群的

- 物质来源与形成年代: 岩石学与锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石学报, 2009, 25: 1678-1694.
- Dong Xin, Zhang Zeming, Wang Jinli, et al. Provenance and formation age of the Nyingchi Group in the southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Petrology and zircon U - Pb geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 1678-1694 (in Chinese with English abstract).
- [32] Dong X, Zhang Z M and Santosh M. Zircon U-Pb chronology of the Nyingchi Group, southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan - African provenance and Mesozoic - Cenozoic metamorphism[J]. *The Journal of Geology*, 2010, 118: 677-690.
- [33] Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, et al. Two stages of granulite facies metamorphism in the eastern Himalayan syntaxis, South Tibet: Petrology, zircon geochronology and implications for the subduction of Neo - Tethys and the Indian continent beneath Asia[J]. *J. Metamorp. Geol.*, 2010, 28: 719-733.
- [34] Guo L, Zhang H F, Harris N, et al. Paleogene crustal anatexis and metamorphism in Lhasa terrane, eastern Himalayan syntaxis: Evidence from U-Pb zircon ages and Hf isotopic compositions of the Nyingchi Complex[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 100-111.
- [35] 董昕, 张泽明, 刘峰, 等. 拉萨地体东南部变质岩的成因与中—新生代造山作用[J]. 岩石学报, 2012, 28: 1765-1784.
- Dong Xin, Zhang Zeming, Liu Feng, et al. Genesis of the metamorphic rock from southeastern Lhasa terrane and the Mesozoic - Cenozoic orogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28: 1765-1784 (in Chinese with English abstract).
- [36] 丁林, 钟大赉. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29: 385-397.
- Ding Lin, Zhong Dalai. Metamorphic characteristics and geotectonic implications of the high - pressure granulites from Namjagbarwa, eastern Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29: 385-397(in Chinese).
- [37] 张泽明, 郑来林, 王金丽, 等. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80~100 km 深度的证据[J]. 地质通报, 2007, 26: 3-12.
- Zhang Zeming, Zhen Lailing, Wang Jinli, et al. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet. China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80-100 km depth[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26: 3-12(in Chinese with English abstract).
- [38] 云南省地质调查院. 1:25万区域地质调查报告(林芝幅)[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Autonomous Region. Regional Geological Survey Report of the people's Republic of China, 1:250000 Linzhi picture[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003 (in Chinese).
- [39] Zhang Z M, Dong X, Santosh M, et al. Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet: Constraints on the origin and evolution of the north-eastern margin of the Indian Craton[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 123-137.
- [40] Leaker B E, Woolley A R, Arpes C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *Am. Mineral.*, 1997, 82: 1019-1037.
- [41] Holland T, Baker J, Powell, R. Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O[J]. *Eur. J. Mineral*, 1998, 10: 395-406.
- [42] Connolly J A D. Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation[J]. *EPSL*, 2005, 236: 524-541.
- [43] Shah W F, Georg H. Reaction textures in Al-rich metabasite: implication for metamorphic evolution of the eastern border of the Middle Austroalpine basement units[J]. *Lithos*, 90: 145-157.