

# 藏东南错那县麻玛沟角闪岩相石榴 辉石岩成因研究

刘 焰<sup>1,2</sup> 王 猛<sup>1</sup> 王彦斌<sup>1</sup> 魏 东<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所 北京 100037; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室 北京 100083;  
3. 湖北省宜昌地质勘探大队 湖北 宜昌 443100)

**摘 要:** 在藏东南错那县西南约 20 km 的麻玛沟中发现了呈透镜体产出于石榴石矽线石片麻岩中的石榴辉石岩, 其矿物组合为石榴石 + 透辉石 + 石英 + 铁角闪石 + 磁铁矿, 并含有锆石、磷灰石等副矿物。石榴石呈他形产出, 以铁铝榴石和钙铝榴石端员组分为主, 贫镁铝榴石组分, 并具有成分环带。核部相对富铁铝榴石分子, 贫镁铝榴石分子, 而边部则相反。透辉石同样富铁、贫镁,  $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$  比值一般大于 0.6。铁角闪石呈熔蚀状被透辉石和石榴石所包裹, 或产出于自形的透辉石颗粒之间, 以贫钛为特征。该岩石的全岩成分以  $SiO_2$  (59% ~ 61%),  $Fe_2O_3$  (全铁) (18% ~ 19%),  $CaO$  (12% ~ 13%) 和  $Al_2O_3$  (5.3% ~ 5.4%) 为主。运用石榴石-单斜辉石温压计估算出该岩石石榴石与透辉石的平衡温压条件分别为 650 ~ 700°C、0.8 ~ 1.0 GPa。这些特征表明该石榴辉石岩很可能系富铁的斜长角闪岩在中地壳尺度发生脱水所形成的残余。本文研究提供了一个角闪岩相石榴辉石岩的实例。

**关键词:** 角闪岩相, 石榴辉石岩, 藏东南, 麻玛沟, 岩石成因

中图分类号: P581; P588.12<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)04-0315-06

## Petrogenesis of amphibolite facies garnet clinopyroxenite from the Mama valley, Cona area, southeastern Tibet

LIU Yan<sup>1, 2</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, WANG Yan-bin<sup>1</sup> and WEI Dong<sup>3</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Yichang Geological Party, Yichang 443100, China)

**Abstract:** Garnet clinopyroxenites were found in Mama valley of Cona area, southeastern Tibet. They are enclosed as lenses in the garnet sillimanite gneisses of the Greater Himalayan Crystallines and consist of Fe-rich anhedral garnet, diopside with high  $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$  ratio, quartz, Ti-poor ferrohornblende and magnetite, together with such accessory minerals as zircon and apatite. The garnet grains somewhat exhibit zoning patterns formed in the prograde metamorphism. Whole-rock compositions of the garnet clinopyroxenites are characterized by high  $SiO_2$  (59% ~ 61%),  $Fe_2O_3$  (18% ~ 19%, total iron),  $CaO$  (12% ~ 13%) and  $Al_2O_3$  (5.3% ~ 5.4%). Solid-phase thermobarometry reveals recrystallization of the garnet and diopside at temperature of 650 ~ 700 °C and pressure of 0.8 ~ 1.0 GPa. Texture, mineral paragenesis and compositions, therefore, indicate probable derivation of the garnet clinopyroxenites from dehydration-driven partial melting of Fe-rich amphibolites in the middle crustal levels. Thus an example of amphibolite facies garnet clinopyroxenites is presented in this study.

**Key words:** amphibolite facies; garnet clinopyroxenite; southeastern Tibet; Mama valley; petrogenesis

收稿日期: 2007-01-30; 修订日期: 2007-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572040, 40573039)

作者简介: 刘 焰(1969-), 博士, 长期从事喜马拉雅造山带研究。

以石榴石+单斜辉石+石英矿物组合为代表的石榴辉石岩常见于大陆碰撞造山带内,揭示这类岩石的形成过程能够帮助人们深入理解大陆碰撞造山带演化的过程,因而受到广泛的关注。多认为石榴辉石岩是高压麻粒岩相代表性的岩石类型之一(O'Brien & Rötzler, 2003; Pattison, 2003),但也有少数例外的报道(Ghent *et al.*, 1983)。公认喜马拉雅造山带为典型的碰撞造山带,其中也发现有麻粒岩相的石榴辉石岩产出(例如, Liu & Zhong, 1997; Neogi *et al.*, 1998; Lombardo & Rolfo, 2000; Li *et al.*, 2003)这些岩石可能代表了青藏高原南部下部地壳的岩石类型,因对其形成与折返过程的研究有助于揭示喜马拉雅碰撞造山的精细过程而广受关注。最近在藏东南错那县西南约20 km处麻玛沟的高喜马拉雅结晶杂岩中发现了一种特殊的富铁石榴辉石岩,本文拟详细介绍其岩石学特征,并探讨其可能的形成过程。

## 1 区域地质背景

错那南部地区从北至南,依次出露特提斯沉积岩、浅色花岗岩和变质杂岩(图1)。特提斯沉积岩主要出露于错那北部,大体呈东西向延伸,岩性以黑色页岩、粉砂岩为主。岩层整体上低角度向北倾,其中发育向南的逆冲断层与东西走向、倾向北的褶皱。由于地表覆盖较强,该沉积杂岩与南部下伏的花岗岩、变质杂岩的接触关系(图1)不明,但构造分析应为近东西走向的正断层接触。

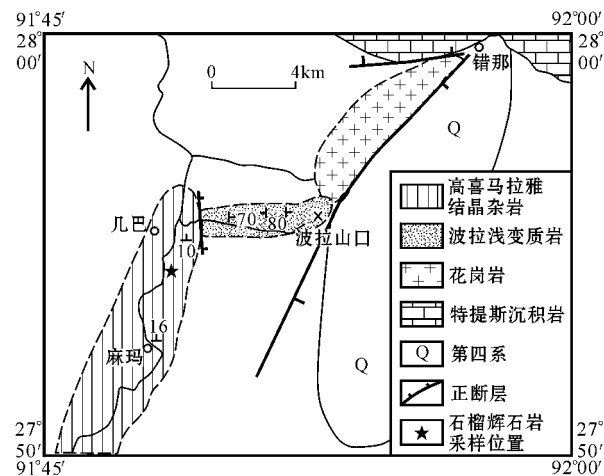


图1 错那地区地质简图(据本文实测资料)

Fig. 1 Sketch geological map of Cona area based on the authors' observations

错那西南的麻玛沟及东南的浪波沟中出露较好的变质杂岩。这套变质杂岩通常被认为属于传统的高喜马拉雅结晶杂岩。笔者的野外调查表明,该区的变质杂岩可分为上、下两套杂岩。上部杂岩在波拉山哑口出露较好(图1),本文称其为波拉杂岩,主体为绿片岩相变质杂岩,主要有细粒黑云母石英片岩、细粒黑云母长石石英变砂岩。在波拉山哑口一带,波拉杂岩走向近南北,高角度倾向西或东(图1),常见浅色花岗岩侵位于波拉变质杂岩之中。向东,该杂岩以北东向的正断层与第四纪的冰积物接触,向西,又被一近南北向的正断层与下部杂岩分开(图1)。下部杂岩在麻玛沟中出露良好(图1),以石榴石砂线石片麻岩和花岗质片麻岩为主。整体上这套杂岩低角度北倾,视厚度可达3 km以上(图2a)。石榴石砂线石片麻岩的代表性矿物组合为石榴石+砂线石+钾长石+斜长石+黑云母+石英,而花岗质片麻岩则未见石榴石。在石榴石砂线石片麻岩中发现了呈包体产出的石榴辉石岩(图2b)。

## 2 石榴辉石岩特征

麻玛沟中的石榴辉石岩为紫红色、细粒,其矿物组合为石榴石+透辉石+石英+角闪石+磁铁矿以及锆石、磷灰石等副矿物(图2c)。石榴石多呈他形产出。电子探针成分分析表明石榴石以铁铝榴石和钙铝榴石端员组分为主,分别可达63%与32%,贫镁铝榴石分子,一般只有2.2%~3.2%(表1)。石榴石稍具成分环带,从核部至边部,MnO的含量从1.35%减少为1.2%左右,FeO的含量则从28.37%减少为27%左右,而CaO和MgO的含量则分别从11.23%、0.56%增加至12.66%、0.79%。表现在端员组分上,核部富铁铝榴石分子,贫镁铝榴石分子,而边部则相对富集镁铝榴石分子,贫铁铝榴石分子(表1)。透辉石同样富铁、贫镁,Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg)比值一般大于0.6(原始数据见表1)。角闪石多呈熔蚀状被透辉石和石榴石所包裹,或产出于自形的透辉石颗粒之间。也可见一个颗粒,其中一半是角闪石,另一半是透辉石(图2d),表明透辉石的形成是以角闪石的消失为代价的。电子探针分析表明该岩石中的角闪石为铁角闪石(ferrohornblende),TiO<sub>2</sub>含量极低,在误差范围内近于0(表1),这与形成于高角闪岩相至麻粒岩相变质杂岩中的角闪石TiO<sub>2</sub>的含量常大于1.0%的现象(Pattison, 2003)截然不同。

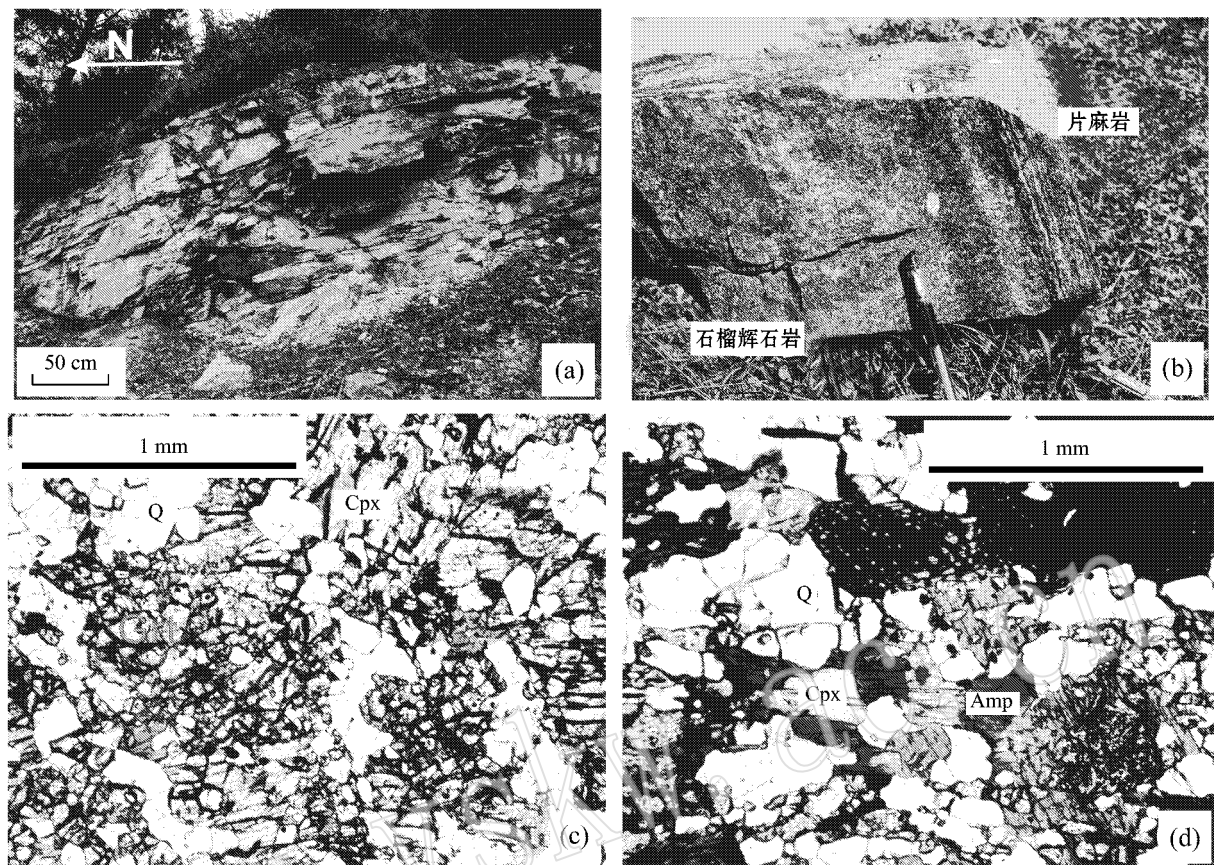


图 2 野外及镜下照片

Fig. 2 Field photographs and microphotographs

a—石榴石矽线石片麻岩野外产状,低角度北倾;b—石榴石矽线石片麻岩中的石榴辉石岩透视镜;c、d—石榴辉石岩薄片镜下单偏光照片;  
矿物缩写代号据 Kretz(1983)

a—field photograph showing the low angle north-dipping of the garnet sillimanite gneisses;b—garnet clinopyroxenite as a lens in the garnet sillimanite gneisses;c,d—microphotographs showing minerals and textures of garnet clinopyroxenite

石榴辉石岩全岩成分见表 2。该岩石  $\text{SiO}_2$  的含量与中性岩相当,介于 58%~60% 之间,明显高于大多数石榴辉石岩  $\text{SiO}_2$  的含量。该岩石极为富铁,全铁含量高达 18%~19%,岩石薄片观察发现有磁铁矿产出。此外该岩石还富集  $\text{CaO}$ ,含量高达 12% 以上,贫  $\text{MgO}$ , $\text{MgO}$  含量与花岗岩类相当, $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量也不高。该岩石的另一个显著特征是极度贫  $\text{Na}_2\text{O}$  与  $\text{K}_2\text{O}$ ,这两个元素的含量近于零,这与在岩石薄片中未发现长石类矿物的现象相吻合。

### 3 变质温压条件估算

由于该岩石的矿物组成为石榴石+透辉石+石英+铁角闪石,故采用基于石榴石-单斜辉石之间的  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Mg}$  交换反应建立的被称为石榴石单斜辉石温度计来估算石榴辉石岩的平衡温度。自上个世纪 70

年代以来,许多学者根据不同体系的实验结果相继提出了不同的石榴石单斜辉石温度计(如 Raheim & Green, 1974; Ellis & Green, 1979; Powell, 1985; Krogh, 1988; Pattison & Newton, 1989; Ai, 1994; Berman *et al.*, 1995)。当应用于天然岩石体系时,一些温度计的计算结果常与实际观测偏差较大。最近 Krogh-Ravn(2000)根据包括 27 套实验岩石学数据在内的 360 个人工与天然样品的分析数据,采用多元线性回归法重新标定了该温度计。这一温度计不仅考虑了  $\text{Ca}$  还考虑了  $\text{Mn}$  对温度估计的影响,因而适用范围更宽,平衡温度估计的精度更高,是目前已公开发表的最新的石榴石单斜辉石温度计,适用于富铁石榴辉石岩平衡温度的估计,因此本文采用 Krogh-Ravn(2000)标定的温度计估计区内石榴辉石岩的平衡温度条件。

表1 石榴辉石岩矿物电子探针成分分析结果

w<sub>B</sub>/%

Table 1 Selected mineral compositions of garnet clinopyroxenite

样品	643005			643006					
	Grt	Cpx	Amp	Cpx	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
矿物位置	边部	边部	中部	边部	边部	中部	核部	中部	边部
SiO <sub>2</sub>	37.02	49.38	45.67	49.89	36.71	36.92	36.93	37.18	37.11
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.06	0.06	0.13	0.08	0.08		0.17	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.60	0.60	6.63	0.81	20.44	20.66	20.92	20.61	20.49
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.03	0.03	0.01	0.09	0.06	0.02	0.09	0.08
MnO	1.28	0.15	0.13	0.25	1.21	1.30	1.35	1.20	1.20
FeO	29.60	20.89	26.12	20.66	27.53	27.84	28.37	27.09	27.86
MgO	0.75	5.91	5.22	5.67	0.78	0.65	0.56	0.79	0.78
CaO	10.57	22.27	11.78	22.71	12.11	12.09	11.23	12.66	12.45
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.14	0.55	0.11	0.00		0.02		0.01
NiO	0.01	0.01	0.02				0.01	0.01	0.00
Sum	99.97	99.42	96.20	100.23	98.94	99.59	99.39	99.80	100.08
氧原子数	12	6	23	6	12	12	12	12	12
Si	2.971	1.962	7.191	1.967	2.964	2.964	2.973	2.973	2.962
Ti	0.003	0.002	0.007	0.004	0.005	0.005	0.000	0.010	0.007
Al	1.949	0.028	1.230	0.038	1.945	1.955	1.985	1.942	1.928
Cr	0.003	0.000	0.004	0.000	0.003	0.002	0.001	0.003	0.003
Mn	0.087	0.005	0.018	0.008	0.082	0.088	0.092	0.082	0.081
Fe <sup>3+</sup>	0.102	0.055		0.028	0.114	0.105	0.071	0.089	0.133
Fe <sup>2+</sup>	1.884	0.639	3.438	0.653	1.745	1.764	1.839	1.723	1.727
Mg	0.089	0.350	1.225	0.334	0.094	0.077	0.067	0.094	0.093
Ca	0.909	0.948	1.987	0.959	1.048	1.040	0.968	1.085	1.065
Na	0.002	0.011	0.168	0.009	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001
Ni	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Pyr					3.16	2.61	2.26	3.15	3.13
Alm					58.78	59.40	61.99	57.76	58.23
Spe					2.78	2.97	3.10	2.73	2.74
Gro					29.40	29.61	29.01	31.73	29.04
And					5.74	5.32	3.62	4.48	6.73
Uva					0.14	0.10	0.03	0.15	0.13

注:在中科院地质与地球物理研究所采用 Cameca SX51 波谱分析,采用天然和人工合成晶体标定配备多层膜分析晶体的波谱仪,测试电压为 15 kV,电流为 10 nA,电子束斑约为 2 μm,标样分析结果表明分析误差小于 5%,角闪石的阳离子数计算采用 Esawi (2004) 开发的 Excel 程序,石榴石与辉石中的 Fe<sup>3+</sup> 计算据 Droop (1987);石榴石端员组分计算据 Rickwood (1968);矿物(含端员组分)缩写据 Kretz (1983)。

表2 石榴辉石岩全岩成分

w<sub>B</sub>/%

Table 2 Bulk rock compositions of garnet clinopyroxenite

样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失	总和
643005	60.75	0.41	5.30	0.03	18.42	2.87	0.36	12.36	0.08	0.01	0.59	-0.97	100.21
643006	58.78	0.45	5.42	0.04	19.26	2.85	0.36	12.80	0.05	0.02	0.59	-0.91	99.71

注:在国家地质实验测试中心采用 XRF 法分析,分析仪器为 3080E,内插 GSR-15 标样以及重复样的分析结果表明当氧化物含量大于 0.5% 时,分析误差小于 2%;铁为全铁,烧失为负表明岩石中的 Fe<sup>2+</sup> 在 XRF 测试时被氧化成 Fe<sup>3+</sup>。

由于区内石榴辉石岩系由石榴石、单斜辉石、石英、角闪石所组成,无长石类矿物,因此,当前只能采用建立在钙铝契尔马克分子在石榴石与单斜辉石之间配分反应  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6(\text{Cpx}) + \text{CaAl}_2\text{SiO}_6(\text{Cpx}) = 2/3\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{Grt}) + 1/3\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{Grt})$  的

压力计来估计其平衡压力条件。遗憾的是,可能由于目前实验数据还太少,该压力计的标定尚不理想,应用于天然岩石体系时的偏差还比较大。尽管如此,Mukhopadhyay (1991) 提出的石榴石单斜辉石压力计似乎可半定量地估算石榴辉石岩的平衡压

力。表1所示的相邻的石榴石与辉石相距不超过10  $\mu\text{m}$ ,假定它们已达到热力学平衡,再运用前述温压计估计它们的平衡温压条件,结果温度为650~700 $^{\circ}\text{C}$ ,压力为0.8~1.0 GPa。

## 4 讨论

前已指出,石榴石稍具成分环带,核部富铁与锰,而边部相对富镁,这充分说明了石榴石很可能形成于进变质条件下,同时变质温度不高,否则由于高温下的扩散作用,石榴石难于保存进变质环带。这一认识与岩石中无退变质结构、角闪石具有富铁贫钛的地球化学特征并有转变成辉石的趋势(图2d)相吻合,表明区内石榴辉石岩很可能系斜长角闪岩通过如下两脱水反应所形成的产物: $\text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Q} = \text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Liquids}$ ,  $\text{Hbl} + \text{Pl} = \text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Q} + \text{Liquids}$ 。角闪石属进变质残余的角闪石,由此可推测其原岩斜长角闪岩也应富铁,因为长石类、云母类矿物均已消耗完,表明原岩中角闪石的含量要多一些。该岩石全岩成分中的 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量近于零, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量也只有5%左右(表2),说明该岩石可能经历了脱水过程,导致了这些元素进入流体中。

虽然本文所采用的压力计的精度不是非常高,但从全岩与矿物化学成分均具有富铁、贫镁、贫钛的特征、保存有进变质环带来看,本文的温压估算结果还算合理,并且,该估计结果与其围岩的变质程度(钾长石+矽线石)一致,这表明区内石榴辉石岩应形成于高角闪岩相变质条件下,很可能系富铁的斜长角闪岩在中地壳尺度上的脱水所形成的产物。

最近几年来,在藏南冈底斯南缘发现有大量中新世埃达克质岩石的产出(如Hou *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2005),当前一个流行的观点认为这些中新世的埃达克岩系藏南40~50 km之下地壳内的石榴斜长角闪岩发生部分熔融所形成的熔浆(Hou *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2005)。然而,这个模型可能需要先回答一个问题:藏南加厚的下地壳是否有石榴斜长角闪岩。藏南地表温泉星罗棋布,水温可达70~80 $^{\circ}\text{C}$ ,说明该地区地温梯度比较高,因此在地下40~50 km之下,斜长石、角闪石均不是稳定的矿物相,即藏南加厚的下地壳很可能不含有石榴斜长角闪岩。而本文所报道的富铁斜长角闪岩在中地壳尺度上的脱水似乎可以更合理地解释藏南冈底斯带内埃达克岩的形成过程,当然还需要做更多的工

作以证实或证伪这个猜想。

## 5 结论

不是所有的石榴辉石岩都属于高压麻粒岩,角闪岩相变质条件下也可形成貌似高压麻粒岩的岩石组合,但这种石榴辉石岩以富铁、贫钛、贫镁与高压麻粒岩相的石榴辉石岩相区别。富铁斜长角闪岩在中地壳尺度上的脱水,似乎可解释冈底斯带内埃达克岩的形成过程。

致谢 胡英明完成岩石薄片制做,河北区调队化学分析室完成岩石200目粉末样制做,毛骞、马玉光完成电子探针分析,国家地质实验测试中心完成XRF分析,匿名审稿人的评审意见细化了本文的论述,向以上单位和个人表示衷心的感谢。

## References

- Ai Y. 1994. A revision of the garnet-clinopyroxene  $\text{Fe}^{2+}$ -Mg exchange geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 467~473.
- Berman R G, Aranovich L Y and Pattison D R M. 1995. Reassessment of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer: Thermodynamic analysis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 30~42.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth-Science Reviews*, 68: 173~196.
- Ellis D J and Green D H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71: 13~22.
- Esawi E K. 2004. AMPH-CLASS: An Excel spreadsheet for the classification and nomenclature of amphiboles based on the 1997 recommendations of the International Mineralogical Association [J]. *Computer & Geosciences*, 30: 753~760.
- Droop G T R. 1987. A general equation for estimating  $\text{Fe}^{3+}$  microprobe analyses, using stoichiometric criteria [J]. *Mineral Magazine*, 51: 431~435.
- Ghent E D, Stout M Z and Raeside R S. 1983. Plagioclase-clinopyroxene-garnet-quartz equilibria and the geobarometry and geothermometry of garnet amphibolites from Mica Creek, British Columbia [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20: 699~706.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming mineral [J]. *American Mineralogist*, 68: 277~279.
- Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer - a reinterpretation of existing experimental data [J]. *Contributions to*

- Mineralogy and Petrology, 99 : 44~48.
- Krogh-Ravna. 2000. The garnet-clinopyroxene  $Fe^{2+}$ -Mg geothermometer : an updated calibration [ J ]. Journal of Metamorphic Geology, 18 : 211~219.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [ J ]. Earth and Planetary Science Letters, 220 : 139~155.
- Li D, Liao Q, Yuan Y, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granulites at Rimana (Southern Tibet) in the central segment of Himalayan Orogen [ J ]. Chinese Science Bulletin, 48 : 2 647~2 650.
- Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis [ J ]. Journal of Metamorphic Geology, 14 : 451~466.
- Lombardo B and Rolfo F. 2000. Two contrasting eclogite types in the Himalaya : implications for the Himalayan orogeny [ J ]. Journal of Geodynamics, 30 : 37~60.
- Mukhopadhyay B. 1991. Garnet-clinopyroxene geobarometry : The problems, a prospect, and an approximate solution with some applications [ J ]. American Mineralogist, 76 : 512~529.
- Neogi S, Dasgupta S and Fukuoka M. 1998. High P-T polymetamorphism, dehydration melting, and generation of migmatites and granites in the Higher Himalayan Crystalline Complex, Sikkim, India [ J ]. Journal of Petrology, 39 : 61~99.
- O'Brien P J and Rötzler J. 2003. High-pressure granulites : Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics [ J ]. Journal of Metamorphic Geology, 21 : 3~20.
- Pattison D R M and Newton R C. 1989. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer [ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 101 : 87~103.
- Pattison D R M. 2003. Petrogenic significance of orthopyroxene-free garnet + clinopyroxene + plagioclase ( quartz-bearing metabasites with respect to the amphibolite and granulite facies [ J ]. Journal of Metamorphic Geology, 21 : 21~34.
- Powell R. 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration : the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited [ J ]. Journal of Metamorphic Geology, 3 : 231~243.
- Raheim A and Green D H. 1974. Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene [ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 48 : 179~203.
- Rickwood P C. 1968. On recasting analyses of garnet into end-member molecules [ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 18 : 175~198.