

文章编号: 1673- 9469(2011) 01- 0085- 06

榴辉岩变质演化 P- T 轨迹研究新进展

张红芬¹, 闫纲丽², 张景森¹

(1. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038; 2. 黄河水利职业技术学院 土木工程系, 河南 开封 475004)

摘要: 榴辉岩研究是变质岩石学领域研究的热点与前沿, 在解决高压和超高压变质作用、大洋和大陆地壳俯冲作用、碰撞造山作用等地质学问题和地球动力学研究中具有十分重要的意义。对榴辉岩研究的重要内容之一就是确定其变质 P- T 条件及其演化的 P- T 轨迹。本文对近年来在榴辉岩研究中确定榴辉岩变质 P- T 条件的方法- 传统地质温压计方法和相平衡方法进行了简要的评述, 着重分析了在大别山西段高压和超高压榴辉岩变质演化 P- T 轨迹研究方面所取得的最新进展。分析认为, 榴辉岩变质演化 P- T 轨迹研究仍将是未来该领域的重要研究内容, 而相平衡方法的运用则是其重要发展方向。

关键词: 榴辉岩; 地质温压计; 相平衡; P- T 轨迹

中图分类号: P581; P588. 348

文献标识码: A

Latest progresses in the metamorphic P- T paths of eclogites

ZHANG Hong-fen¹, YAN Gang-li², ZHANG Jing-sen¹

(1. College of Nature Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. Yellow River Conservancy Technical Institute, Henan Kaifeng 475004, China)

Abstract: Research on eclogites is a hot and frontier issue in the metamorphic petrology field. It plays an important role in solving geological problems such as HP and UHP metamorphism, oceanic and continental crust subduction and collision orogeny and in geodynamic research. Determining the metamorphic P- T conditions and P- T paths is one important aspect of the eclogite studies. A brief comment on the methods determining metamorphic P- T conditions in recent eclogites research is given, including traditional geological geothermobarometers and phase equilibria method. The latest progresses of the metamorphic P- T paths of HP and UHP eclogites in western Dabieshan is analyzed emphatically. The analysis indicate that, in the future, the metamorphic P- T paths study about eclogites will still be an important research aspect in this field, and the development direction is to use the phase equilibria method.

Key words: eclogites; geological geothermobarometers; phase equilibria; P- T paths

榴辉岩这一术语的英文为 eclogite, 它源自于希腊语, 意思是“选择”, 由法国人 René- Just Haüy 于 1822 年提出, 并沿用至今^[1]。国际变质岩命名委员会 1997 年对榴辉岩的定义是: 榴辉岩是一种不含斜长石的变质岩、其所含石榴石和绿辉石的总量大于 75%, 石榴石和绿辉石都是主要成分, 它们中的任何一个含量都不能超过 75%。

榴辉岩在世界各大陆分布广泛, 而以欧亚大陆各地质时期的碰撞造山带最为集中, 如西阿尔

卑斯^[2]。中国的秦岭- 大别山- 苏鲁造山带是世界上规模最大、出露最好、岩石种类最多的榴辉岩分布地带, 已经成为世界瞩目的研究基地。在我国柴达木北缘^[3]、甘肃北山^[4]、阿尔金山西段^[5]和西南天山^[6]一带都有榴辉岩分布。

榴辉岩具有特殊的岩石学、矿物学和地球化学特征, 保留了大量高压和超高压变质作用和变质过程的信息, 是研究高压和超高压变质作用、大洋和大陆俯冲带、造山作用等地质学问题的关键

收稿日期: 2010- 12- 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872056) 特约专稿

作者简介: 张红芬(1980-), 女, 河北成人, 硕士, 助教, 从事岩土工程方面的教学与研究。

岩石类型,是近年来变质岩研究的热点。特别是在西阿尔卑斯山陆壳变质岩和挪威榴辉岩中柯石英的发现^[7-8]引起了研究榴辉岩和超高压变质作用的热潮。对榴辉岩研究的一个重要内容就是确定榴辉岩变质作用的P-T条件以及P-T条件随时间的变化即P-T-t轨迹。不考虑时间因素的P-T轨迹的变化仍然可以反映重要的地球动力学和构造环境信息,可以说,在过去几十年的地球科学进展中,榴辉岩及其P-T轨迹研究起到了举足轻重的作用^[9]。

榴辉岩P-T轨迹的确定依赖于估算其变质P-T条件的方法。截止目前,用于确定榴辉岩变质P-T条件的方法主要有传统地质温压计方法和相平衡方法两种。本文将对这两种方法作简单的介绍,重点对近年来在大别山西段高压和超高压榴辉岩变质演化的P-T轨迹研究方面取得的进展进行分析和评述。

1 榴辉岩变质P-T条件的确定方法

1.1 传统地质温压计方法

传统地质温压计是以矿物对或矿物组合为基础的。对任何一个变质反应,都可以建立一个关于T、P和相组分(平衡常数)的热力学方程,可以根据测试的矿物成分计算其形成的T和P,即地质温压计。

在榴辉岩研究中,常用的地质温压计包括石榴石-单斜辉石(GC)温度计、石榴石-白云母温度计、石榴石-单斜辉石-多硅白云母(GCP)压力计、绿辉石中硬玉组分压力计和多硅白云母中硅含量压力计。在含有蓝晶石的榴辉岩中还包括石榴石-单斜辉石-SiO₂(石英/柯石英)-蓝晶石组合温度计和石榴石-多硅白云母-SiO₂(石英/柯石英)-蓝晶石组合压力计等。这种温压计以实验资料为基础,标定矿物对或矿物组合中的组分交换或转换反应与P-T条件的关系。例如,GC温度计依据石榴石和单斜辉石两个矿物之间的铁镁离子交换反应: $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (铁铝榴石) + $3\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (透辉石) = $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (镁铝榴石) + $3\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ (钙铁辉石),随着变质温度增加,该反应使得石榴石富镁、单斜辉石富铁。也就是,石榴石和单斜辉石的铁镁成分可以反映其形成的温度条件。又如,GCP压力计依据纯转换反应: $6\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (透辉石) + $3\text{KAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (白云母)

= $2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (钙铝榴石) + $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (镁铝榴石) + $3\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (绿鳞石),随着变质压力增加,这一转换反应会导致石榴石富钙、多硅白云母富硅、单斜辉石富硬玉成分。也就是,石榴石、单斜辉石和多硅白云母组合的矿物成分可以反映其形成的压力条件。

根据榴辉岩中的石榴石、绿辉石和多硅白云母矿物组合,利用GC温度计和GCP压力计就可以确定岩石变质的P-T条件。目前,以实验和经验方法标定的这种温度计和压力计有多种表达式。当把这些不同温压计表达式应用于讨论榴辉岩变质P-T条件时,同一榴辉岩样品运用不同的温压计所计算出来的结果相差很大,对同一地区不同成分的榴辉岩运用同种温压计所计算的温压也有较大差异,同时还存在着各种温压计的适用范围不明确的问题。因此,有很多学者对榴辉岩中温压计的应用及问题进行过系统的评述^[10-13],提出了改进方法。魏春景等^[9]则基于相平衡的P-T视剖面图分析,对榴辉岩中常用的几种传统地质温压计提出了新的解释,阐明了它们各自的适用性和存在的问题,指出在不同榴辉岩矿物组合中,控制石榴石、绿辉石和多硅白云母成分变化的相组分之间的变质反应不同,这是传统温压计产生偏差的根本原因。

尽管传统地质温压计存在这样那样的问题,但是由于这种方法简便易行,在今后相当长的一段时间内仍会被广泛采用。

1.2 变质相平衡方法

相平衡方法是利用矿物热力学数据库和相关的计算机软件定量研究岩石变质作用的新手段^[14],有多种版本可以实现。自20世纪90年代以来发展最好、应用最多的是基于内洽性热力学数据库^[15-16]和THERMOCALC程序^[17]的相图方法。这种方法可以定量地计算一系列相图,包括P-T投影图、矿物共生图解、P-T视剖面图以及P-X、T-X视剖面图等。其中P-T投影图,描述了所选定的模式体系中在P-T-X(即压力、温度和岩石成分)空间内所有可能的矿物间的变质反应关系;矿物共生图解,描述了特定P-T条件下体系的矿物组合、固溶体成分与全岩成分之间的关系;P-T视剖面图,是对某一特定全岩成分在P-T-X空间内所做的剖面,表达了具体成分岩石变质矿物组合、矿物成分的相平衡关系;P-X、T-

X 视剖面图,则表示在固定 T 或 P 时矿物组合、成分在 P-X 或 T-X 空间内的相平衡关系。借助于这些图解,可以确定天然岩石中矿物组合的 P-T 条件、解释矿物包裹体、矿物成分环带和变质反应关系等,从而确定岩石变质演化的 P-T 轨迹。特别地,在 P-T 视剖面图解上,每一个矿物组合都会有一个特定的稳定范围,可以直接与实际观察到的矿物组合进行对比,确定其 P-T 条件。在这种图上,还可以定量计算出各种矿物成分、矿物摩尔含量和岩石饱和水含量等值线,从而可以更精确地限定岩石变质的 P-T 条件和 P-T 轨迹,这是传统地质温压计所不能比拟的^[18]。魏春景等指出,在研究榴辉岩变质演化时,视剖面图方法能够给出最多的 P-T 信息,是迄今为止最好的温压估测方法^[9]。

相平衡方法一开始主要用于解决体系较为简单的变泥质岩石的变质作用问题,后来逐渐应用于研究体系复杂的榴辉岩^[19-27],特别是有关榴辉岩中常见复杂固溶体矿物角闪石和绿辉石的混溶模型^[28-29]提出后,应用相平衡方法研究榴辉岩的变质 P-T 条件和 P-T 轨迹,将更符合榴辉岩天然岩石化学成分的实际情况,也取得了许多重要的新进展^[24,27]。

在 P-T 视剖面图上确定榴辉岩的变质 P-T 条件,早期主要根据矿物组合^[20],最近则主要依据榴辉岩中石榴石的不同成分等值线相交的方法^[23,27]。

2 榴辉岩变质 P-T 轨迹的新进展

榴辉岩变质 P-T 轨迹是榴辉岩原岩从被埋藏发生变质作用形成榴辉岩直至被抬升至近地表整个过程所经历温压条件的直接反映,可以为变质作用提供构造环境信息,具有重要的地球动力学意义。许多学者对世界各地榴辉岩的变质 P-T 轨迹进行了分析讨论^[30-35]。研究表明,各地榴辉岩的变质 P-T 轨迹是不同的,以我国的大别-苏鲁变质带为例,苏鲁地区的超高压榴辉岩具有较高的峰期变质温度,经历了麻粒岩相高温退变质阶段,而大别山地区超高压榴辉岩变质温度相对较低,普遍经历了角闪岩相退变质阶段,未发生麻粒岩相退变质。即使同一地区的榴辉岩也可能有不同的 P-T 轨迹样式,如柴达木北缘榴辉岩具有两类 P-T 轨迹^[36]。由于确定 P-T 条件的方法不

同,各研究者对榴辉岩变质过程的认识和理解不同,所得榴辉岩 P-T 轨迹样式也大不相同。下面着重介绍近年来西大别高压和超高压榴辉岩 P-T 轨迹研究所取得的重要进展。

2.1 超高压榴辉岩变质 P-T 轨迹

西大别超高压榴辉岩变质演化的 P-T 轨迹最早见于 Zhang^[33] 的文献,具有进变质快速升压和退变质近等温降压的特点(图 1 中①)。该 P-T 轨迹峰期变质阶段 P-T 条件由石榴石幔部和内边缘与绿辉石、蓝晶石和柯石英依据传统温压计确定,在此之前的变质阶段则是由石榴石核部及其中所包裹的红闪石确定,退变质阶段由石榴石边缘和绿辉石、蓝晶石、冻蓝闪石和绿帘石确定。该 P-T 轨迹从进变质到退变质的转折部分呈圆滑的曲线形态,是较早期关于超高压榴辉岩 P-T 轨迹的经典样式,在以后的研究讨论中长期没有变化。

Liu^[37] 依据传统温压计确定的榴辉岩变质 P-T 轨迹则具有先升温后降温,压力始终降低的特点(图 1 中②),且只反映榴辉岩的退变质过程,研究者认为榴辉岩的超高压阶段由石榴石的核部代表,高压阶段由石榴石的幔部和边缘表征,石榴石的生长主要发生在峰期后的热松弛阶段。

魏春景等^[24] 2010 年利用相平衡分析方法得到的超高压榴辉岩 P-T 轨迹明显不同于以前所认为的那样,而是具有进变质阶段先升温升压然后近等温升压、退变质阶段近等温降压的特点(图 1 中③)。该 P-T 轨迹是在 P-T 视剖面图中依据榴辉岩中石榴石的生长成分环带确定的,石榴石的核部到幔部成分记录了进变质早期以升温为主的阶段,幔部至边缘成分则记录了进变质后期以升压为主的阶段,峰期 P-T 条件由石榴石边缘成分确定。由于石榴石环带不记录榴辉岩的退变质过程,退变质 P-T 轨迹根据其它退变质矿物分析得到。

比较以上三种 P-T 轨迹,相图方法得到的 P-T 轨迹由进变质到退变质的转换呈尖锐的折线,在样式上与传统的认识显著不同;进变质早期的升温阶段是传统观念中所未认识到的;而石榴石不记录榴辉岩退变质历史,也与传统确定榴辉岩变质 P-T 轨迹的方法不相容。但是魏春景等研究发现相图方法模拟的结果却与岩相学的观察结果是一致的^[24],例如:(1)石榴石所包裹的红闪石

型角闪石可以由早期的蓝闪石退变质形成;(2) 超高压榴辉岩石榴石核部和幔部成分与具有较低的压力-温度条件的高压榴辉岩石榴石边部成分十分相似^[27,38]; (3) 所观察到的大多数柯石英和其假象出现在石榴石的边部区域。如果该P-T轨迹代表了真实的超高压榴辉岩变质演化过程,则关于超高压榴辉岩的成因机制可能需要进行不同的解释,并对现有的陆壳俯冲与折返的动力学假说产生重要的影响。

由此可见,对于超高压榴辉岩变质演化P-T轨迹,无论是从方法上、观念上,还是从P-T轨迹样式与其解释上,都存在很大的分歧,许多问题还需要深入探讨。

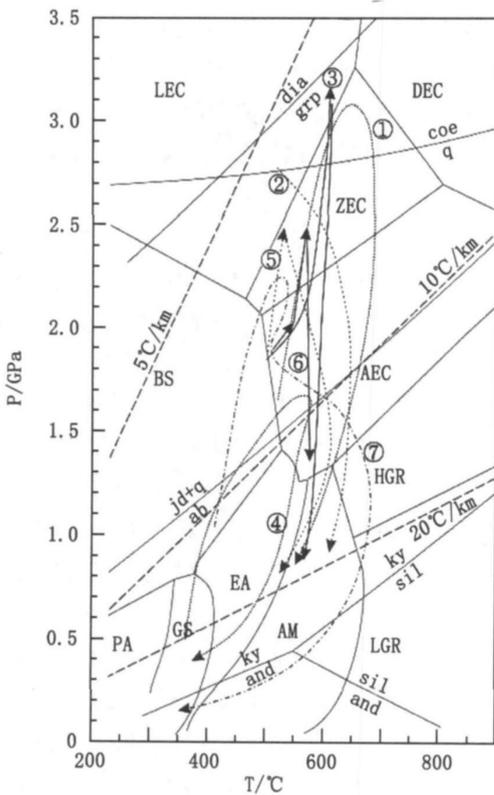


图1 高压和超高压榴辉岩变质演化P-T轨迹图

Fig.1 Diagram of metamorphic P-T paths for HP and UHP eclogites

注:榴辉岩变质P-T轨迹:超高压榴辉岩(①据 Zhang et al, 1994^[33]; ②Liu et al, 2006^[37]; ③Wei et al, 2010^[24]); 高压榴辉岩(④王晓燕, 1997^[41]; ⑤Zhang et al, 2009^[26]; ⑥ 姜玉行等, 2009^[27]; ⑦石永红等, 2008^[42])。变质相据 Oh et al, 1998^[39], Okamoto et al, 1999^[40]: PA, 绿帘石-阳起石相; GS, 绿片岩相; EA, 绿帘石-角闪岩相; AM, 角闪岩相; LGR, 低压麻粒岩相; HGR, 高压麻粒岩相; BS, 蓝片岩相; AEC, 角闪石榴辉岩亚相; LEC, 硬柱石榴辉岩亚相; ZEC, 黝帘石榴辉岩亚相; DEC, 干榴辉岩亚相。变质反应线由热力学数据

库(Holland & Powell, 1998^[16])计算生成。矿物缩写: ab, 钠长石; and, 红柱石; coe, 柯石英; dia, 金刚石; grp, 石墨; jd, 硬玉; ky, 蓝晶石; q, 石英; sil, 夕线石。

2.2 高压榴辉岩变质P-T轨迹

较早时候,西大别高压榴辉岩的P-T轨迹是使用传统地质温压计获得的^[41],其演化轨迹为绿片岩相-蓝片岩相-高压榴辉岩相-绿帘角闪岩相-绿片岩(图1中④),具有进变质升温升压和退变质降温降压的特点。

张景森等^[26]首次用基于NCKFMASH和NCFMASH体系的相图方法,根据石榴石成分环带得到西大别高压榴辉岩P-T轨迹(图1中⑤),进变质以升压为主,退变质以降温升压为主。在该相平衡计算中所使用的角闪石固溶体模型不完善,因而确定的榴辉岩变质P-T条件可能存在难以估计的误差。

姜玉行等^[27]使用改进的角闪石和绿帘石模型^[28-29]基于NCKFMASHO体系,对石榴石的成分环带进行了更为细致的研究,获得的P-T轨迹如图1中P-T轨迹⑥所示,具有进变质早期升温后期升压和退变质以近等温降压的特点。

由上可见,对于西大别高压榴辉岩P-T轨迹的认识同样存在很大的分歧。姜玉行等^[27]2009年确定的西大别高压榴辉岩P-T轨迹与魏春景等^[24]2010年确定的超高压榴辉岩的P-T轨迹样式相似,该地区高压和超高压榴辉岩可能经历了相似的变质过程。另外,和超高压榴辉岩一样,用相平衡方法确定高压榴辉岩P-T轨迹时,石榴石也不记录退变质过程。关于榴辉岩的退变质过程,石永红等^[42]在东大别山获取的高压榴辉岩的P-T轨迹显示退变质过程存在显著的升温现象,升温幅度达150°C,见图1中P-T轨迹⑦,这一点与张景森等^[26]2009年的认识相似。此前的研究认为在东大别和西大别地区许多榴辉岩都不存在这样的升温过程。如果高压榴辉岩存在退变质升温过程,那么是局部升温还是全部升温,局部升温又是发生在哪些地区及其机制,这些问题的回答对于认识榴辉岩的形成与折返过程具有重要的意义。

3 结语

由于研究者观念不同、认识不同,同时也由于使用的研究方法不同,目前和未来相当长一段时期内在对P-T轨迹的认识和解释上仍然会存在

很大的分歧。就研究方法而言, 传统地质温压计仍然会得到广泛采用与改进, 相平衡方法是确定榴辉岩变质 P-T 轨迹的最好方法, 无疑会是未来的发展方向。

参考文献:

- [1] GODARD G. Eclogites and their geodynamic interpretation: a history [J]. *Journal of Geodynamics*, 2001, 32: 165–203.
- [2] CARSWELL D A, HARLEY S L. Eclogite facies rocks[M]. Glasgow: Blackie Chapman and Hall, 1990.
- [3] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. *科学通报*, 1998, 43(14): 1544–1549.
- [4] 梅华林, 于海峰, 李 铨, 等. 甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花岗岩质岩石[J]. *科学通报*, 1998, 43(19): 2105–2111.
- [5] 刘 良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41(16): 1485–1488.
- [6] 高 俊. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(7): 737–740.
- [7] CHOPIN C. Coesite and pure pyrope in high grade pelitic blueschists of the Western Alps: a first record and consequences [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86: 107–188.
- [8] SMITH D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics [J]. *Nature*, 1984, 310: 641–644.
- [9] 魏春景, 苏香丽, 姜玉行, 等. 榴辉岩中传统地质温压计新解: 来自 P-T 视剖面图的证据[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9): 2078–2088.
- [10] CARSWELL D A, O' BRIEN P J, WILSON R N. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 239–252.
- [11] KROGH RAVNA E J. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: An updated calibration [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 211–219.
- [12] KROGH RAVNA E J, TERRY M P. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists – an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22: 579–592.
- [13] 陈 意, 叶 凯, 吴春明. 榴辉岩常用温压计在应用中应注意的问题 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1067–80.
- [14] 张景森, 张 静, 周俊杰. 矽卡岩和矽卡岩型矿床研究方法[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(1): 85–89.
- [15] HOLLAND T J B, POWELL R. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic data set with uncertainties and correlations: The system $K_2O-Na_2O-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2-O_2$ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1990, 8: 89–124.
- [16] HOLLAND T J B, POWELL R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 309–343.
- [17] POWELL R, HOLLAND T, WORLEY B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using thermocalc [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 577–588.
- [18] 魏春景, 周喜文. 变质相平衡的研究发展 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 341–351.
- [19] CARSON C J, POWELL R, CLARKE G L. Calculated mineral equilibria for eclogites in $CaO-Na_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$: Application to the Pouébo Terrane, Pam Peninsula, New Caledonia [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1999, 17: 9–24.
- [20] WEI C J, POWELL R. Phase relations in high-pressure metapelites in the system KFMASH ($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) with application to natural rocks [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2003b, 145: 301–315.
- [21] WEI C J, POWELL R. Calculated phase relations in high-pressure metapelites in the system NCKFMASH ($Na_2O-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) with Application to Natural Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 44: 183–202.
- [22] WEI C J, POWELL R. Calculated phase relations in the system NCKFMASH ($Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) for High-Pressure Metapelites [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2): 385–408.
- [23] WEI C J, YANG Y, SU X L. Metamorphic evolution of low-T eclogite from the north Qilian orogen, NW China: Evidence from petrography and calculated phase equilibria in system NCKFMASHO [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2009, 27: 55–70.
- [24] WEI C J, LI Y J, YU Y, et al. Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the Western Dabieshan Terrane, Central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(6): 647–666.
- [25] 张景森, 魏春景, 周喜文. 大别山西段含蓝闪石-蓝晶石榴辉岩的相平衡研究 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2861–2874.

- [26] ZHANG J S, WEI C J, LOU Y X. Phase equilibria of hornblende-bearing eclogite in the Western Dabie Mountain, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 57-69.
- [27] 娄玉行, 魏春景, 初航, 等. 西大别造山带红安高压榴辉岩的变质演化: 岩相学与 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 体系中的相平衡关系[J]. *岩石学报*, 2009, 25(1): 124-138.
- [28] DIENER J F A, POWELL R, WHITE R W, et al. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(6): 631-656.
- [29] GREEN E C R, HOLLAND T J B, POWELL R. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-dioptase-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks[J]. *American Mineralogist*, 2007, 92: 1181-1189.
- [30] HIRAJIMA T, ISHIWATARI A, CONG B L. Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai county, northeastern Jiangsu province, China [J]. *Mineralogical Magazine*, 1990, 54: 579-583.
- [31] WANG Q, ISHIWATARI A, ZHAO Z Y. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1993, 5: 141-152.
- [32] ENAMI M. Pressure-temperature path of Sanbagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet [J]. *Metamorphic Geology*, 1998, 16: 97.
- [33] ZHANG R Y, LIOU J G. Coesite-bearing eclogite in Henan Province, central China: detailed petrography, glaucophane stability and P-T path [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1994, 6: 217-233.
- [34] BANNO S, ENAMI M, HIRAJIMA T. Decompression P-T path of coesite eclogite to granulite from Weihai, Eastern China[J]. *Lithos*, 2000, 52: 97-108.
- [35] 张泽明, 张金凤, 游振东, 等. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹[J]. *岩石学报*, 2005, 21(2): 257-270.
- [36] SONG S G, SU L, NIU Y. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt, Northwestern China[J]. *Lithos*, 2007, 96: 243-265.
- [37] LIU J B, YE K, SUN M. Exhumation P-T path of UHP eclogites in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China [J]. *Lithos*, 2006, 89: 154-173.
- [38] LIU X, WEI C, LI S, et al. Thermobaric structure of a traverse across western Dabieshan: implications for collision tectonics between the Sino-Korean and Yangtze cratons [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22: 361-379.
- [39] OH C, LIOU J G. A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism [J]. *The Island Arc*, 1998, 7: 36-51.
- [40] OKAMOTO K, MARUYAMA S. The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+ H_2O system [J]. *Am. Mineral*, 1999, 84: 362-373.
- [41] 王晓燕. 鄂北-豫南地区榴辉岩相岩石变质作用演化特征[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 72-83.
- [42] 石永红, 林伟, 王清晨. 大别山桐城地区雷庄低温高压榴辉岩的增温退变 P-T 轨迹及其构造含义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1759-1770.

(责任编辑 马立)