

【编者按】中国矿物岩石地球化学学会自 1978 年成立的 30 多年来,有一个很好的对学科发展“十年一回顾”的传统。进入 21 世纪的十年来,我国在矿物学、岩石学、地球化学、沉积学及其相关学科的研究都有了长足的进展,在一些领域还有某些重大的突破;及时、系统地进行综合总结和展望,对促进学科发展无疑有着十分重要的意义。第七届理事会拟继续这一工作,组织编纂《21 世纪前十年学科进展的回顾与展望》的文集,所有稿件将先在《矿物岩石地球化学通报》上陆续刊出,待后辑成册出版。本刊从 2012 年第 3 期起拟陆续刊登该文集的系列文章,以飨读者。

21 世纪最初十年变质岩石学研究进展

魏春景

造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京大学 地球与空间科学学院,北京 100871

摘要:21 世纪以来变质岩石学发展迅猛。对大型俯冲带和造山带综合数值模拟研究,所得到的变质作用 p - T - t 与以往一维热模拟结果很不相同;利用内部一致性热力学数据库,进行变质相平衡的定量研究,改变了人们对变质反应和相平衡关系的理解,开辟了定量研究变质作用的新阶段;超高压变质作用的深入研究,发现了更多超高压变质作用的标志及地体,指示陆壳俯冲深度可能达 300~350 km,并对地壳岩石深俯冲的机理及变质作用演化进行了进一步探讨;对麻粒岩尤其是高压和超高温麻粒岩的研究,进一步了解了麻粒岩相条件下的深熔作用与熔体演化机理,为认识早前寒武纪的板块作用与造山过程提供了新的窗口;利用多种方法对俯冲带变质流体的研究,为深刻认识俯冲带的岩浆作用及地幔演化提供了更为广阔的视野。

关键词:变质作用 p - T - t 轨迹;变质相平衡;超高压变质作用;麻粒岩与超高温变质作用;变质流体

中图分类号:P588.3 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2012)05-0415-13

Advance of Metamorphic Petrology During the First Decade of the 21st Century

WEI Chun-jing

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education;
School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The study of metamorphic petrology has been advanced rapidly during the first decade of the 21st century. For instance, the metamorphic p - T - t paths resulted from the comprehensive numerical model of large-scale subduction and orogenic belts are obviously different from those resulted from the one-dimensional thermal model. Using internally-consistent thermodynamic database, the quantitative study of metamorphic phase equilibria has modified the understanding of metamorphic reaction and phase relations, inaugurating a new stage in the study of metamorphic petrology. The ultra-high pressure metamorphism study has led to more discoveries of ultra-high pressure metamorphic indicators and terranes. There is evidence to support that the subduction depth of the continental crust is up to 300~350 km. Moreover, the mechanism and metamorphic evolution during exhumation of deeply subducted rocks have been elucidated. The study of granulite, especially of high-pressure and ultra-high temperature granulite, has not only facilitated the discussion of partial melting and melt evolution under granulite facies but also provided insights on understanding of the early Precambrian plate tectonics and orogeny. The subduction fluids have been investigated to lead broad discussion of the subduction magmatism and mantle evolution.

Key words: metamorphic p - T - t paths; metamorphic phase equilibria; ultrahigh-pressure metamorphism; granulite and ultrahigh-temperature metamorphism; metamorphic fluids.

收稿日期:2011-12-05 收到,2012-04-16 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40972039, 40821002);国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB825007)

作者简介:魏春景(1962—),男,教授,研究方向:岩石学. E-mail: cjwei@pku.edu.cn.

变质岩石学主要研究变质作用的 p - T 条件以及 p - T 条件随着时间和空间的变化。 p - T 条件随时间变化构成变质作用的 p - T - t 轨迹;随空间变化构成变质带和变质相系。 p - T 条件记录了变质作用过程中的热流变化,与区域大地构造环境密切相关。

自 1980 年代以来,随着观测、实验和计算方法的发展,热力学数据的积累以及数值模拟理论和方法的不断完善,使得变质岩石学得到了突飞猛进的发展。如,变质作用 p - T - t 轨迹理论的提出改变了人们对变质作用过程的认识,正演和反演不同变质过程的 p - T - t 轨迹成为变质岩石学研究的核心内容^[1]。超高压与超高温变质岩石的发现,大大地拓宽了变质作用的研究范围^[2~4]。利用内部一致性热力学数据库,进行变质相平衡的定量研究,开辟了定量研究变质作用的新阶段^[5,6]。SHRIMP, LA-ICP-MS 和电子探针等可以精确测定变质锆石和独居石的形成年龄,确定不同变质作用,甚至不同变质阶段的时代^[7]。利用多种方法开展变质流体,尤其是俯冲带流体研究,以阐明洋壳俯冲过程中的元素演化与成矿、以及相关的地震和岩浆作用机理等^[8]。麻粒岩相变质及相关深熔作用的研究为探讨中下地壳的流变学行为与构造演化提供了窗口^[9,10]。

受到笔者水平和知识结构的限制,难以对变质岩石学的发展做出全面论述。这里仅选择 5 个方面,并主要就过去 10 年研究进展做一简要概述,包括:变质作用的 p - T - t 轨迹,变质相平衡,超高压变质作用,麻粒岩与超高温变质作用和变质流体研究,并简述了我国变质岩石学的学科发展现状。

1 变质作用 p - T - t 轨迹的研究

变质作用 p - T - t 轨迹的理论是以一维热传递方程为基础,模拟地壳加厚区变质作用演化过程提出的^[11,12]。变质作用 p - T - t 轨迹理论的提出完全改变了人们对变质作用过程的认识。如在地壳加厚区(造山带)变质作用发生于地壳从热扰动到热松弛的动态演化过程中,岩石的 p - T - t 轨迹是地壳加厚的方式、机制、热松弛速率和岩石折返速率的综合函数。

变质作用 p - T - t 轨迹的研究包括正演和反演模拟两种方法。正演模拟经历了一维热模型、二维热模型和综合数值模拟等发展阶段:一维热模拟假设引起热扰动的地壳构造加厚过程非常快,岩石几乎以绝热状态达到压力峰值(p_{\max}),在构造加厚作用停止的瞬间,可出现“锯齿状”地热梯度。在 p_{\max} 以

后的折返过程中发生热松弛,岩石受到加热(可达数百度),在构造加厚作用停止后的数十百万年时达到峰值温度(T_{\max})^[12]。

Ruppel 和 Hodges^[13]基于二维热模型,模拟了地壳逆冲加厚产生的变质作用 p - T - t 轨迹。模拟结果表明岩石在埋藏阶段,或同逆冲阶段(syn-thrusting)伴随明显热效应,地热梯度不会出现逆转,或呈锯齿状,岩石在达到压力峰值以后的折返过程中只出现少量加热达到温度峰值。

进入新世纪以来,利用综合数值模拟方法很多学者有效地模拟了大型洋-陆俯冲带和陆-陆碰撞型造山带中的结构与构造演化过程^[14~19]。例如,Peacock^[15]通过数值模拟发现俯冲板片所遵循的 p - T - t 轨迹取决于(1)俯冲板片的年龄;(2)俯冲板片的速度与持续时间;(3)岩石在俯冲带上的位置;(4)地幔楔对流的活力。形成年龄越小的洋壳俯冲时的地热梯度越高。小于 5~10 Ma 的洋壳俯冲时的地热梯度很高,发生热俯冲,俯冲板片在约 50 km 深处发生深熔,形成埃达克质岩浆;而老于 50 Ma 的洋壳会发生冷俯冲,俯冲板片在超过 90~100 km 深处脱水,引起地幔楔熔融,形成广泛的钙碱性弧岩浆活动^[14],俯冲板片本身不发生部分熔融。

Jamieson 和 Beaumont^[18]利用地壳尺度的热-动力模型(thermal-mechanical models)讨论了造山带中同汇聚和后汇聚韧性流的作用,成功地模拟了喜马拉雅和格林维尔造山带的构造格局与演化历史,阐述了造山带中不同部位变质岩石的 p - T - t 轨迹。图 1 表示利用 HT-系列模型模拟的大型造山带(如喜马拉雅)中受均匀层流影响发生的同汇聚逆冲与伸展作用。在碰撞汇聚过程中,由于地壳加厚形成高原,高原之下的中地壳层由于部分熔融形成低速层,当低速层厚度达到 10~20 km 时,会受到高原和前陆之间的压力差驱动发生侧向流动,形成层流。受到地表剥蚀影响,这种层流导致深部物质在造山带前锋处折返,形成以同时发育逆冲和正断剪切带为边界的高级混合岩地体,其下盘发育逆转变质带,上覆岩层为正常序列(图 1a)。当上地壳物质不均匀,如在 4.0~7.5 km 之间存在一个软弱层时(图 1b),利用 HT-111 模型模拟表明在晚期汇聚阶段,会加速上地壳拆离,发生局部伸展,造成低密度层流物质上涌,形成以中地壳物质为核心的穹窿。图 1 中的模拟结果与北喜马拉雅片麻岩穹窿和大喜马拉雅构造层上部所观测的现象非常吻合。

图 1 中,GHS,大喜马拉雅构造层;LHS,小喜马拉雅构造层;MCT,主中央推覆带;STD,藏南拆

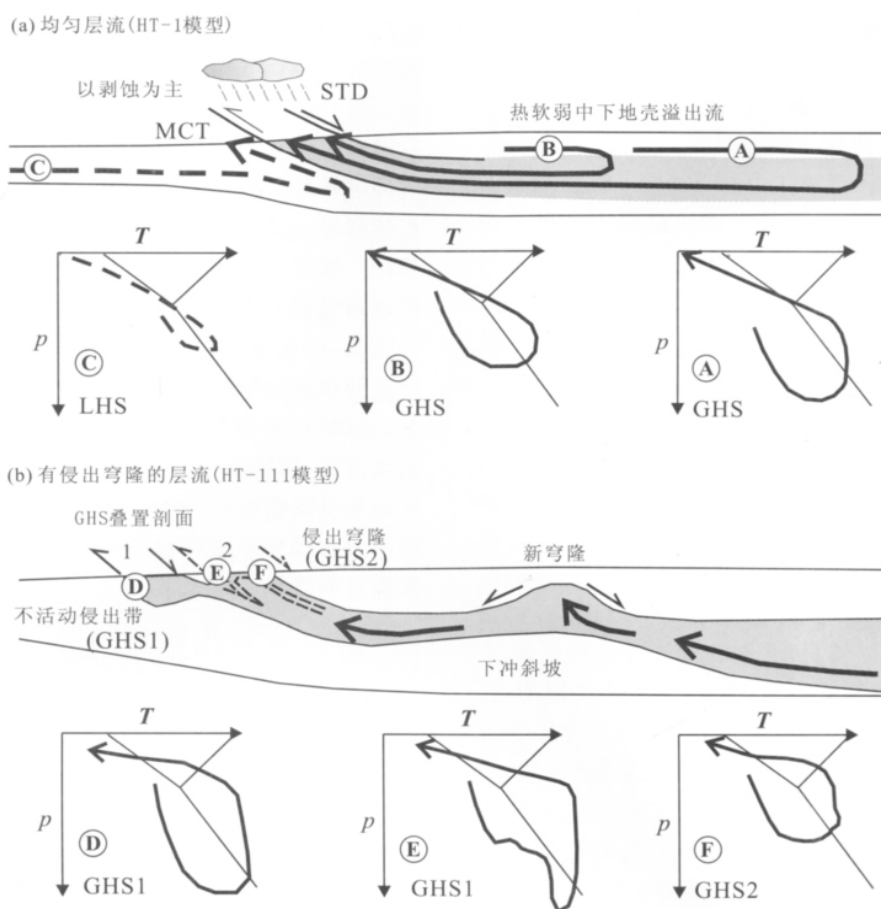


图1 大型热造山带中受均匀层流影响的同汇聚逆冲与伸展作用^[18]

Fig. 1 Synconvergent thrusting and extension in large hot orogens affected by the homogeneous channel flow^[18]

离系。图1a具有单一活动侵出带的均匀层流(HT-1模型^[16]),分别以逆冲和正断剪切带为界。A和B表示在大喜马拉雅构造层中深部和浅部两点处岩石的 p - T - t 轨迹;C表示在MCT带底盘折返的小喜马拉雅构造层岩石的 p - T - t 轨迹。图1b在基底斜坡之上受失稳软弱上地壳驱动的,以层流物质为核部的穹窿形成与侵出(TH-111模型^[17]),穹窿的侵出导致大喜马拉雅构造层叠置(1,2),出现两套逆冲和正断同时的剪切带(老的,实线;年青的,虚线),D,E,F分别表示大喜马拉雅构造层中不同部位岩石的 p - T - t 轨迹。

图1中也模拟了地壳不同部位岩石的 p - T - t 轨迹。这些轨迹特征与以往依据一维和二维热模结果很不相同:(1)造山带不同部位岩石在构造加厚达到峰期压力(p_{\max})之前出现不同程度加热过程;(2)多数情况下温度峰值(T_{\max})与 p_{\max} 同时或稍晚达到,发生明显热松弛,升温达到数百度,岩石折返过程多表现为等温降压(ITD)型;(3)变质岩石的埋深与折

返过程均发生于造山带递进汇聚过程中,受同汇聚层流控制,高级变质岩石的折返并不一定对应汇聚作用结束后(后造山)的伸展与垮塌过程。

魏春景^[20]总结反演变质作用的 p - T - t 轨迹包括3种方法:传统地质温压计方法,吉布斯/微分热力学方法和变质相图方法。无论哪种方法,都必须以详细岩相学研究为基础,在岩石中划分出两期以上矿物组合。传统地质温压计方法被广泛使用,但在确定不同期次矿物组合的平衡和 p - T 条件上有若干不确定性。吉布斯/微分热力学方法理论上非常完善,依据矿物(石榴石)的生长环带计算岩石的 p - T - t 轨迹,但是由于难以确定矿物生长阶段的矿物组合变化,以及缺少复杂固溶体的活度模型等,致使该方法实用性较差。目前反演岩石 p - T - t 轨迹的最好方法是变质相图方法,该方法依据 p - T 视剖面图上矿物等值线温压计,模拟由矿物的世代关系和生长环带所记录的 p - T 条件变化,并可以定量模拟变质过程中的矿物组合演化、变质反应和流体行为

(详见下节)。

目前,一维热模拟结果在变质岩石学领域有着更为广泛和深入的影响,影响了岩石学家反演变质岩 p - T - t 轨迹的结果,而二位热模型和综合数值模拟结果尚未受到重视。魏春景^[20]总结了不同中压型变质带和超高压型地体中岩石 p - T - t 轨迹的反演模拟结果,发现岩石在构造埋藏阶段应出现明显热效应,发生一系列递进变质作用,几乎同时达到压力与温度峰值,岩石折返过程以等温降压型(ITD)为主。这与一维热模拟结果很不相同,而与二维热模拟和综合数值模拟结果更为接近。

2 变质相平衡的定量研究

研究变质岩石中的矿物组合与变质条件及全岩成分之间的相互关系是变质岩石学研究的核心内容,称为变质相平衡研究。自上世纪 90 年代后期以来,随着内恰性热力学数据库的发展^[21],岩石学家们开始依据热力学资料,利用各种计算软件定量 p - T - X 空间内的相平衡关系,也称为第三代相图^[5]。利用这些相图可以定量模拟复杂岩石体系中矿物组合、矿物化学成分与变质作用中各种强度和广度变量之间的关系,从而可以更好地确定岩石的 p - T 条件与 p - T - t 轨迹^[20, 22, 23]。变质相平衡的定量研究是 90 年代以来岩石学中的最新进展,开辟了定量研究变质作用的新阶段。

第三代变质相图研究最有代表性的是用 THERMOCALC 程序计算各种相图,包括:(1) p - T 投影图(岩石成因格子),表示所选定的模式体系中适用于所有全岩成分的不变点和单变线,包括 p - T - X 空间内的全部信息。研究变质岩石的相平衡关系,最好以 p - T 投影图为基础。Wei 等^[24~25], Wei 和 Powell^[26~28]研究了基性岩和泥质岩在各种模式体系中的岩石成因格子。Yang 和 Powell^[29]报道了可用于超高压榴辉岩和白片岩的岩石成因格子。当然,随着热力学数据库和固溶体活度模型的更新,这些岩石成因格子会有不同程度的改变。(2) 共生图解,表示在固定 p 、 T 条件下,体系中的矿物组合、矿物固溶体成分与全岩成分之间的关系。(3) p - T 、 T - X 和 p - X 视剖面图,表示对特定全岩成分的相平衡关系。

借助这些图解,可以确定天然矿物组合的 p - T 条件、解释矿物包裹体、环带和反应关系等,从而确定岩石的 p - T 轨迹。在 p - T 视剖面图上,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^[30]等值线,从而不仅可以更精确地限定岩石的

p - T 条件和 p - T 轨迹,而且可以定量讨论岩石变质演化过程中水流体(或 CO_2)的影响。例如,近年来流行的石榴石等值线温压计,主要依据所测定的石榴石成分在视剖面图上的投影确定其 p - T 条件及石榴石生长时的矿物组合特征,并很容易从石榴石的环带特征确定岩石的 p - T 轨迹。这种方法的优点是利用一个矿物成分就可以确定岩石形成的 p - T 条件。这是因为当包括质量平衡方程时,任何一个矿物组合的自由度都等于 2,因此只要确定两个成分变量,就可以求解其他所有变量(包括 p 、 T 和其他矿物相成分和其含量等)。从而可以避免矿物组合之间是否平衡等问题。Wei 等^[31~34]用石榴石等值线方法,很好地解释了北祁连造山带的高压泥质片岩和低温榴辉岩、西南天山超高压带的泥质片岩、和西大别超高压榴辉岩等的变质作用演化,得到令人满意的结果。

3 高压变质作用研究

90 年代中期以来,相继在几个大陆碰撞地体中发现柯石英和微粒金刚石^[35~39],从而掀起了超高压变质作用的研究热潮。柯石英和金刚石的出现说明地壳岩石曾经俯冲到 80~120 km 的地幔深度,并又折返回来。超高压变质岩石的发现不仅大大地拓宽了变质岩石学的研究范围,从 40 km 的地壳深度(1.0~1.2 GPa)扩展到地幔深度,而且有关超高压岩石俯冲与折返过程和机制等问题,对传统地球科学提出了一系列挑战,因为按照传统板块构造理论,低密度的大陆物质是不能俯冲的。超高压变质岩和地体为地球科学家们探索俯冲到地幔深度的板片所含有的矿物组合、流体行为、流变学、地球化学和年代学关系等提供了非常有价值的信息。地壳深俯冲研究应该是 21 世纪地球科学研究的重要领域。

目前世界上已经确定的超高压地体 22 个^[40],分布于除了澳大利亚以外的所有大陆中。其中多数年龄小于 600 Ma,最年轻的超高压岩石只有 4 Ma,发现于巴布亚新几内亚^[41],最老的有 2.0 Ga,与北美 Trans-Hudson 造山有关^[42]。

一般把超高压变质作用理解为压力高于石英-柯石英转变线(2.8 GPa)的变质作用,主要标志是变质岩中出现柯石英和金刚石。近年来,又发现了若干超高压标志矿物,所指示的俯冲深度也越来越大。如具有 α - PbO_2 结构的 TiO_2 变体、镁铁榴石质石榴子石^[43~44]、超硅榴石^[45]、超硅和高钾单斜辉石^[46]、高磷斜顽辉石、甚至斯石英假象等,后者指示

大陆俯冲深度达到 350 km^[47]。

已有很多学者详细论述过超高压变质作用的研究进展^[2, 3, 40, 48]。目前在国际上我国学者已经成为超高压变质作用研究的中坚力量,取得了令人瞩目的成果。2001~2005 年在苏鲁造山带东海地区实施的中国大陆科学钻探(CCSN)工程,其主孔(MH)深达 5158 km,连续提取了非常珍贵的超高压岩石样品^[49~50]。

北京大学“变质作用与造山带演化”课题组通过详细的地质学、岩石学、矿物学和地球化学研究,在我国西部的西南天山和柴北缘发现了一系列超高压变质岩石,又确定了两条超高压变质带。与东部苏鲁一大别陆壳俯冲超高压变质带不同的是西南天山和柴北缘的一些超高压变质榴辉岩是由洋壳深俯冲作用形成的,因此对于丰富和完善超高压变质作用类型,探讨由洋壳俯冲到陆壳碰撞过程等都具有重要意义^[51~54]。新疆西南天山榴辉岩带是继西 Alps 之后,又一例洋壳深俯冲超高压变质带,引起了国际学术界的关注。在柴北缘石榴橄榄岩中首次发现了金刚石包体和大量辉石、金红石和钠质闪石的出溶片晶等特征结构,证明了柴北缘石榴橄榄岩的形成深度大于 200 km;在都兰地区发现了大洋蛇绿岩型地幔橄榄岩和由堆晶辉长岩及上覆玄武岩变质形成的榴辉岩,结合地球化学研究确定了其原岩属于洋壳,并在由辉长岩变质的榴辉岩中发现了柯石英残留,从而证明了柴北缘都兰一带的榴辉岩代表了俯冲的洋壳并经历了超高压变质作用;确定了柴北缘洋壳开始俯冲的时代大约为 460 Ma,大陆俯冲碰撞的时代为 420~430 Ma,提出了柴北缘—北祁连高压-超高压变质带由洋壳俯冲到陆壳深俯冲的演化模式^[55~57]。

高压-超高压岩石的折返机制和过程一直倍受关注^[58],Wang 和 Cong^[59]把超高压岩石的折返归纳为受浮力驱动^[60]和构造驱动^[61]两种机制。超高压岩石的折返过程也包括两个阶段:从地幔到下部地壳的快速折返阶段(3~5 cm/a)和从下部地壳到地表的慢速折返阶段(1~2 cm/a)。第一个阶段主要受地壳与地幔之间浮力差的驱动;第二个阶段则受到同构造和后构造伸展和剥蚀作用的控制^[60]。

很多学者讨论了超高压岩石在折返中发生的变质作用演化。如 Auzanneau 等^[62]研究表明长英质榴辉岩在固相线以上条件($T=800\sim900^{\circ}\text{C}$)向角闪岩相转化时发生白云母脱水熔融反应:

多硅白云母+绿辉石+石英=黑云母+斜长石+石榴石+熔体。

由于脱水反应易于达到平衡,因此难以在长英质片麻岩中保留超高压特征。并且,这些富水熔体的迁移和结晶会引起在基性榴辉岩块体中发生退变质作用。

Wei 等^[63]研究表明在固相线以下超高压泥质和长英质岩石的折返过程的变质作用演化可分为两个阶段:早期段以纤柱石和硬柱石等脱水为主,为流体存在条件;会导致矿物组合及矿物成分发生一系列变化;晚期阶段为流体缺失条件,除了发生硬玉向钠长石的固态转变反应之外,有利于保存早期的高压-超高压特征。

从岩石学角度来看,超高压变质作用研究还需加强下面 3 方面:(1)俯冲与折返过程中变质矿物组合的演化与流体(熔体)行为;(2)超高压变质过程中的元素迁移与演化;(3)地壳深俯冲对地幔的影响。

4 麻粒岩相与超高温变质作用

以麻粒岩相为特征的高级变质岩石广泛存在于前寒武纪高级变质地体和显生宙造山带中,也常在岩浆岩中呈包体产出,作为洞察下地壳的窗口,麻粒岩的研究一直得到广泛重视。Harley^[64]通过对世界 90 多个地体或产地的麻粒岩的总结,详细阐述了当时对麻粒岩的研究进展。2002 年在北大召开了 Penrose 国际会议,其主要议题是前寒武纪高压—高温麻粒岩相变质作用。2006 和 2009 年,在 Brown 教授的倡导下,先后在巴西和捷克召开了“Granulites and Granulites 2006”和“Granulites and Granulites 2009”学术会议,并在“Journal of Metamorphic Geology”杂志出版专辑,主要讨论在麻粒岩相,包括高压和超高温麻粒岩相条件下的矿物组合转变与地壳演化过程,特别强调在麻粒岩相条件下岩石的流变学特点^[65~66]。

4.1 高压麻粒岩研究

高压麻粒岩一词是 Green 和 Ringwood^[67]提出的,是指在具有石英拉斑玄武岩成分的基性岩中出现石榴石+单斜辉石+斜长石+石英组合,在泥质岩中出现蓝晶石+钾长石。当温度为 800°C ,压力大于 0.9 GPa,相当于夕线石=蓝晶石单变线。90 年代以来,有关高压麻粒岩的研究很受地质学家的重视,相继在世界各地克拉通和造山带中报道了高压麻粒岩^[68~70],2002 年 Penrose 会议强调高压麻粒岩是近十年来前寒武纪研究最重要的进展。

O'Brien 和 Rötzler^[71]详细总结了高压麻粒岩的形成、 p - T 条件及构造意义。他们认为主要有两种高压麻粒岩:高温-超高温型和退变榴辉岩型。前

者出现高温三元长石+蓝晶石组合, p - T 条件大于 900℃和 1.5 GPa,并与石榴橄榄岩共生;后者出现单斜辉石+斜长石后成合晶,指示早期单斜辉石更富硬玉组分或缺失斜长石,相当于榴辉岩相组合, p - T 条件为 700~850℃和 1.0~1.4 GPa。高压麻粒岩的形成多与短寿命的地壳加厚事件或地壳向地幔中俯冲事件有关。客观地说,O'Brien 和 Rötzler^[71]对高压麻粒岩的总结与 Green 和 Ringwood^[67]对高压麻粒岩的定义不符。其中退变榴辉岩型是否能够出现平衡的高压麻粒岩组合还需具体分析,因为从榴辉岩相向麻粒岩相的减压过程中,通过消耗石榴石而形成斜长石和单斜辉石,石榴石经常以亚稳定形式与斜长石和单斜辉石共存。实际上 O'Brien 和 Rötzler^[71]所阐述的这类高岩麻粒岩的构造意义是早期榴辉岩的意义。与此不同,Smithies 和 Bagas^[72],Appel 等^[73]和魏春景等^[74]在西澳大利亚、坦桑尼亚东部非造山带和辽西建平地区描述的高压麻粒岩更符合 Green 和 Ringwood^[67]对高压麻粒岩的定义。其特点为在基性岩中出现石榴石+单斜辉石+斜长石+石英角闪石组合,其中单斜辉石贫硬玉组分,因此不会出现单斜辉石+斜长石后成合晶,斜长石为中长石,石榴石并未发育斜长石冠状体,与之共生的中酸性麻粒岩中出现斜方辉石(为石榴石二辉斜长麻粒岩或片麻岩)。这些高压麻粒岩的峰期 p - T 条件所指示的地热梯度为 18~22℃/km,属于中压相系,代表正常到稍微加厚的中下地壳环境^[70]。另外,O'Brien 和 Rötzler^[71]强调高压麻粒岩中没有斜方辉石,Chen 等^[75]认为斜方辉石可以出现在贫铝高镁的长英质-泥质高压麻粒岩中。

此外,用传统温压计确定高压麻粒岩温压条件有很大的不确定性。麻粒岩中有很多定量的地质温压计,如基性高压麻粒岩中出现石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合,该组合即存在纯转换反应压力计,也存在 Fe-Mg 交换反应温度计,或者利用 TWQ 方法和 Thermocalc 程序中的平均温压方法计算其 p - T 条件。由于后者受降温时扩散作用的影响,导致其封闭温度低于峰期温度。而前者(纯转换反应)受这种扩散作用影响相对小些,导致压力计结果与峰期接近。这现象被称为“麻粒岩不确定性原理”(granulite uncertainty principle)^[76]。另一方面,很多高压麻粒岩中存在多期矿物组合^[77],例如出现单斜辉石+斜长石后成合晶(反映早期存在绿辉石),石榴石发育斜长石冠状体,出现斜方辉石及退变角闪石等,我们仅从岩相学上难以判断每期矿物组合真正的平衡稳定域及相应矿物成分。因此难以利用

传统温压计方法确定其 p - T 条件^[78]。

4.2 麻粒岩相条件下熔体与流体行为

多数研究认为麻粒岩相变质过程中水活度较低,早期的研究认为水活度小于 0.4,时常在 0.01~0.2 的范围,大多数麻粒岩在接近温度峰期时,以流体缺失条件为特征^[64],在印度南部和斯里兰卡发现麻粒岩中的流体比附近的角闪岩更富 CO₂,提出富 CO₂ 流体注入促进了角闪石岩的麻粒岩化,但这种现象仅是特例^[64]。

其实,在麻粒岩相变质作用下,岩石中会发生部分熔融作用,形成熔体相,此时岩石中不会再有一个独立的流体相。在泥质岩中的深熔反应包括饱和水固相线上的一致熔融和流体缺失条件下的不一致熔融:白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融^[79],当黑云母消失后,出现几乎无水的矿物组合与熔体共生。所形成的熔体相具有很强的活动性,它可以在岩石体系中特定部位集中,发生分凝作用,形成各种混合岩,也可以进一步汲取集中,形成岩浆脉体和侵入体。对熔体分馏来说可分为三种情况:如果熔体全部保留在岩石体系中,岩石在降温过程中会发生一系列逆反应或退变反应,最后只能保留固相线上的角闪石岩相组合;如果熔体全部从岩石中分离出去,会使干的峰期麻粒岩组合在降温过程中保留下来;更多的情况是熔体发生部分分馏,留在岩石体系中的熔体结晶释放出水流体,引起岩石发生部分逆反应或退变质反应。因此,麻粒岩相岩石的矿物组合及组构特点取决于不同的进变熔融反应,不同程度的熔体分凝和汲取,以及不同程度的退变反应三种过程的综合效应^[80],麻粒岩应该代表已经排除部分熔体的残余物。因此麻粒岩相矿物组合是与熔体共存的,其缺水的主要原因是由于熔体的分离,在讨论水活度的影响时应该注意区分不同阶段和不同过程的熔体行为。

利用变质相平衡的定量研究方法,如计算 p - T 视剖面图和 T/p - M (熔体)图可以定量模拟岩石中所发生的深熔变质反应、熔体成分变化、及熔体的丢失与获得对变质矿物组合的影响。对此,White 等^[81,82]在泥质深熔过程方面进行了一系列具有开创性的研究工作。但到目前为止很少有人研究基性岩和 TTG 片麻岩的变质深熔作用。

4.3 麻粒岩相变质过程中的锆石年代学与地质温度计的相平衡研究

在一个变质作用演化过程中,同位素年龄的真正意义是什么?这是一个备受关注的问题。大多数人依据两种方法判断副矿物与主要硅酸盐矿物之间

的关系:①依据副矿物存在的特殊结构位置,推测可能引起副矿物生长的变质反应;②依据可能揭示副矿物与主要造岩矿物之间平衡的微量元素分布型式^[83]。对此,Kelsey 和 Powell^[84]提出了含 ZrO_2 的淡色花岗岩熔体模型,计算了 NCKFMASHTZ 体系中的 p - T 视剖面图,讨论了固相线以上锆石的生长、溶解与主要变质矿物演化的关系。变质泥质麻粒岩中,锆石的稳定性取决于全岩成分与温度(及压力),随着温度升高,熔体含量增加,会发生锆石溶解,反之发生锆石结晶,因此,麻粒岩中锆石生长应该发生于伴随熔体结晶的降温过程,一般不会记录麻粒岩相峰期时代。

近年来,金红石中的锆含量与锆石中的钛含量温度计很受关注^[85~87],计算包含 ZrO_2 的相图有助于研究和理解矿物的锆含量温度计。如在 p - T 视剖面图上计算金红石中的 ZrO_2 含量或锆石中 TiO_2 含量等值线,与实测结果对比,很容易限定岩石的稳定条件。因此,相平衡研究为解释麻粒岩相变质过程中锆石的年龄与温度提供了一个新的窗口。

4.4 超高温变质作用研究

超高温变质作用(UHT)是指地壳岩石在中压条件下(0.7~1.3 GPa)发生温度达到 900~1100℃ 的区域变质作用(面积 >1000 km²)。超高温变质作用的标志包括在富镁泥质岩中出现假蓝宝石+石英、斜方辉石+夕线石、及大隅石+石榴石等,斜方辉石富铝、长石为中条纹长石、金红石富锆,在铁质岩中出现变质易变辉石等^[4]。超高温变质岩最早发现于南极东部 Enderby 地区,目前世界上已经报导的 UHT 变质区超过 40 个。我国内蒙古武川县东坡和集宁土贵乌拉地区发现了典型超高温变质岩,在广西大容山—十万大山花岗岩带中发现了超高温麻粒岩包体等。近年来,随着热力学数据库的发展,岩石学家们利用变质相图方法可以很好地阐述超高温岩石的矿物组合特征、 p - T 条件与 p - T - t 轨迹^[81, 88]。此外依据斜方辉石中的 Al 含量、金红石中的 Zr 含量以及三元长石成分等温度计也可以限定超高温岩石的变质条件^[4]。UHT 变质作用可以发生在多种构造环境中,包括碰撞造山、碰撞加厚地壳的伸展垮塌、岩浆弧的增生碰撞带或弧后盆地以及伸展地壳的加厚等^[4]。发生超高温变质作用时的地壳热流值明显高于正常碰撞造山带,因此需要热平流方式传递额外热量,可能与幔源岩浆底辟或软流圈上涌加热地壳有关。

超高温变质作用研究不仅扩展了变质作用的温度范围(比麻粒岩相 700~900℃ 高 200℃),而且揭

示了更深地壳层次发生的深熔作用以及幔源岩浆的底辟效应等。

5 变质过程中的流体作用

变质作用过程存在着大量的流体,在不同温压条件下变质流体或者是富水流体,或者是含水熔体,或者是超临界流体,变质流体可以溶解岩石中的不相容元素,从而影响元素的地球化学行为和循环过程,目前这方面的研究逐渐形成了变质地质学新的分支“变质化学地球动力学(metamorphic chemical geodynamics)”^[8]。变质岩石中的流体主要存在于含水矿物和碳酸盐矿物中,名义上无水矿物(如绿辉石、石榴子石和金红石)中也含有相当量的流体,此外流体还可以存在于矿物中的流体包裹体和矿物的空隙中^[89, 90]。在不同的变质作用过程中,通过变质反应使矿物组合发生脱水或水化反应,导致流体带出代入,变质岩中的各种脉体(如石英脉)作为流体流动通道对流体运移起到了重要作用。造山带深部的变质流体向上运移可在浅部成矿,形成造山型矿床。这里主要介绍俯冲带变质作用流体的研究进展。

俯冲带、尤其是洋壳俯冲过程中的流体行为对理解俯冲板片与地幔中的化学变化、俯冲带上的岩浆作用、地震活动及各种成矿作用都至关重要^[91]。从岩石学角度可从以下两个方面研究俯冲带流体。

5.1 实验模拟或相平衡计算模拟

Schmidt 和 Poli^[89, 92]基于 MORB+H₂O,橄榄岩+H₂O,以及变质沉积物的实验研究结果,总结了洋壳俯冲过程中发生的亚固相线脱水作用和部分熔融作用。含水 MORB 体系相图显示在冷俯冲 p - T 体制下,基性岩层中的大部分水或者在蓝片岩相开始以前(< 20 km)释放,或者在硬柱石蓝片岩向硬柱石榴辉岩的转变深度(60~70 km)通过蓝闪石脱水释放;只有小部分水会在与岛弧岩浆的活动对应的深度范围内通过硬柱石和硬绿泥石脱水释放;有很少一部分水保存在硬柱石和多硅白云母中,能够潜入到 200~300 km 深的地幔。在冷俯冲 p - T 体制下,贫铝变质沉积岩中绿泥石和滑石与富铝变质泥质岩中的硬绿泥石和纤柱石在约 80~100 km 的深度发生脱水,也会对岛弧岩浆的形成有一定的贡献。相比而言,含水橄榄岩中蛇纹石的脱水发生在 120~180 km 的深度,在岛弧岩浆作用中起着重要作用。当洋壳沿着热 p - T 体制俯冲时,会在超过 80 km 深处跨越固相线,在流体存在或流体缺失条件下发生部分熔融;在变质沉积岩中的熔融作用受

黑云母和多硅白云母控制,在基性岩石中的熔融作用受绿帘石和角闪石控制。基性地壳产生的熔体成分在压力 $< 3.0 \text{ GPa}$ 时是埃达克质的,但是在更高的压力下变成过铝花岗质。

Maruyama 和 Okamoto^[93] 利用最近提出的 MORB+H₂O 岩石成因格子,提出了通过俯冲板片把水带到地幔转换带的新模式。这主要取决于地热梯度,在俯冲带深处,有两种不同的携水机制。如果地热梯度低,硬柱石可以把水携带到 300 km 深处,由硬柱石释放出来的水,使上覆地幔楔水化,在继续俯冲过程中,由于地幔楔中的对流作用导致水化的橄榄岩进一步俯冲到地幔转换带处。其中,含水的 β -相橄榄石起关键作用,在地幔转换带中形成一个巨大的水库。相反,如果地热梯度高,俯冲板片会在约 80 km 的较浅处 700~900 °C 条件下发生部分熔融,形成长英质熔体,水溶解到熔体中。这种情况下,水不会被携带到更深的地幔。对地幔包裹体和地幔中名义上无水矿物的研究^[94] 表明地幔中含有丰富的水。

相平衡研究表明,俯冲蛇纹岩的脱水提供了形成弧岩浆的流体。而大量的碳酸盐稳定存在的深度超过 200 km,可以为形成于深部地幔的熔体提供 CO₂^[95]。

Hacker 等^[96] 通过相平衡模拟计算阐述了俯冲带中多种岩石俯冲带流体的贡献。受蚀变交代的基性岩的俯冲携水能力与全岩中 K₂O 含量成正比;在冷俯冲过程中,受蚀变的超基性岩的携水能力相似,但在热俯冲过程中,不能把水携带到岛弧的下部。燧石岩和碳酸盐岩只能携带少量的水,而富含粘土质的陆源沉积物无论在冷俯冲还是热俯冲过程中携带的水会对弧岩浆有很大贡献。大陆地壳的冷俯冲作用可以导致硬柱石和多硅白云母稳定,可以把很多水带到地幔深处,而在热俯冲过程中,通过多硅白云母把水携带到形成弧岩浆的深度。在冷俯冲过程中,弧岩浆源区的流体通量受陆源沉积物和下地壳和地幔中的岩浆岩控制,并与全岩中的流体含量成正比。相反,在热俯冲过程中,弧岩浆源区的流体通量主要受俯冲陆壳和受蚀变岩浆岩的控制,并与岩石中的 K₂O 含量成正比。

5.2 古俯冲带高压-超高压岩石的研究

分布在世界各地的高压-超高压变质带作为俯冲带的“化石”,使人们直接观察发生在俯冲带深处的地质过程。这方面研究包括研究俯冲岩石的 p - T 条件,反演俯冲带的热体制;研究俯冲岩石主体、脉体(和分异体)和矿物中的流体包裹体的成分,阐明

俯冲变质过程中的化学变化和流体行为^[8]。例如,Philippot 等^[97] 基于对榴辉岩中流体包裹体的盐度和氧同位素研究表明,蚀变洋壳在俯冲过程中再循环到地幔中的 Cl 可达到 100~200 $\mu\text{g/g}$,这可以解释 Guatemala Fuego 火山俯冲形成玄武岩玻璃质包裹体中的 Cl 浓度 760~1500 $\mu\text{g/g}$ ^[98]。Alt 等^[99] 研究了俯冲带中的硫循环,基于硫同位素和硫的浓度,认为火山玻璃中的硫来源于俯冲沉积物。

Gao 等^[100] 对西天山俯冲杂岩的野外观察表明,在从蓝片岩相转变为榴辉岩相的脱水过程中,高强度元素 Ti、Nb 和 Ta 是活动的,并与 Zr 和 Hf 分馏,发育亏损晕的分异体代表脱水活化的初始阶段,其中发育厘米级的针状金红石颗粒。在发生元素长距离运移的脉体中,发育厘米级的柱状金红石晶体。在发育分异体的主岩中,石榴石和金红石中的钛含量,金红石和榍石的含量以及全岩中 Ti、Nb 和 Ta 含量向分异体方向降低,表明这些元素从主岩向分异体中运移。对榴辉岩相脉体的结构及地球化学资料表明,富含 Ti、Nb 和 Ta 的流体可以通过裂隙长距离运移,至少可以达到米级。包裹体研究表明,榴辉岩相的流体是低盐度以水为主的流体(盐度低于 5%)。

很多学者通过对大别-苏鲁造山带超高压变质岩的研究,阐述了陆壳岩石在俯冲与折返过程中的流体行为。如 Zheng 等^[90, 101] 通过氧同位素研究,认为超高压榴辉岩中的流体是内部缓冲的,名义上的无水矿物在减压过程中释放的水可以使榴辉岩发生角闪岩化。Zheng 等^[101] 和 Wu 等^[102] 对南大别黄镇地区和西大别新县地区低温超高压岩石中的石英脉体进行了研究,发现这些石英脉体与寄主榴辉岩在 Hf 和 O 同位素组成上相似,时代上稍微年轻,推测在超高压岩石早期减压折返阶段有大量流体,石英脉作为流体流动通道,是流体原地分馏结晶的产物。Wei 等^[34] 通过相平衡研究表明榴辉岩变质过程中的流体行为,对西大别新县地区的超高压榴辉岩来说,峰期变质阶段岩石中可含水达到 3.15%~3.87%(wt) 主要存在于含水矿物相如硬柱石、滑石、蓝闪石和多硅白云母中,其中约 70%~90% 的水可在超高压岩石折返的早期阶段由硬柱石(和少量滑石)脱水释放出去。岩石中脱出的水有利于形成蓝闪石、绿帘石和钠云母等。在超高压变质过程中,多硅白云母始终稳定,含量变化不大,因此对岩石中的流体贡献不大。Xia 等^[103] 在南大别片麻岩中发现海绵状锆石,Zhang 等^[49] 在苏鲁超高压变质岩中发现复杂脉体,认为可能存在超临界流体。

流体在变质作用过程中的重要性已为越来越多的研究者所认识,有关变质化学地球动力学方面的研究已成为变质地质学新的前沿领域。

6 我国变质岩石学发展现状

我国各种变质岩出露齐全,为变质地质学的发展提供了得天独厚的野外实验室。上世纪 80 年代,在以董申保、程浴淇等老一辈科学家的领导下,完成了 1:400 万中国变质地质图的编图工作^[104],1988 年在长春召开了“变质作用与地壳演化”国际讨论会,1993 年美国变质地质学杂志(*Journal of Metamorphic Geology*)出版了中国变质地质学研究专辑,使中国变质地质学研究走进国际学术舞台。1990 年代以来,我国在变质地质学研究中又取得了一系列令人瞩目的研究进展,目前已初步形成了一支以中、青年科学家为骨干,在国际学术界有了一定影响的研究团队。在超高压变质作用研究方面,我们由开始被动参与,后来发展成为研究的中坚力量,到目前逐渐转变为主导力量。在变质岩定量相平衡研究方面,我们与国外学者密切合作,及时掌握了这一变质地质学前沿理论和方法,成为国际上少数几个能够开展此项研究的国家之一。在变质流体与化学地球动力学研究方面,由于一些原位分析测试方法的发展,目前与国外同行齐头并进。在高压麻粒岩与前寒武纪地壳演化研究方面我国学者取得了很多令人瞩目的成果。但是在变质过程和造山带的数值模拟方面进展缓慢,在变质反应的实验研究方面尚未形成自己的研究特色。因此,我国变质岩石学发展应注意加强以下研究:

(1)开展对变质作用以及大型构造带(如俯冲-碰撞造山带)的综合数值模拟研究。数值模拟研究可以有效地约束影响地质过程的各种变量的变化范围,模拟大型构造带造山带的结构与演化过程,从而为地质学家的观察现象提供更为合理的解释。

(2)加强并推广对变质岩的定量相平衡研究,并与实验研究相结合,进一步从相平衡角度阐述各种变质岩的变质演化过程,确定变质岩石的 p - T - t 轨迹。

(3)加强变质流体,尤其是加强俯冲带与造山带变质流体研究,阐明变质过程中的流体行为与元素变异。

(4)加强麻粒岩相与超高温变质作用研究,以阐明地壳深熔作用机理与过程,阐明变质作用与岩浆作用的联系。

(5)加强变质矿物地球化学研究,以阐述变质

演化过程中微量元素和同位素的活化过程和机理,为准确地解读全岩和宏观地球化学提供更为精细的变质岩石学依据。

此外,一个不容乐观的现状是目前国内变质岩石学研究主要集中于几个科研院所和少数高等学校,多数高校的地球科学院系缺少高层次师资队伍,难以培养出有发展前途的后继人才。因此,需要加强高等院校中变质岩石学的师资队伍建设,更多培养从事变质岩石学研究的高层次人才,才能促进我国变质岩石学学科深入发展。

参考文献 (References):

- [1] Spear F S. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths[Z]. Washington D. C., Mineralogical Society of America, 1993: 799.
- [2] Ernst W G, Liou J G. Overview of UHP metamorphism and tectonics in well-studied collisional orogens[A]. Ernst W G, Liou J G. Ultra-high pressure metamorphism and geodynamics in collision-type orogenic belts[M]. Columbia M. D.; Bellwether Publishing Ltd., 2000: 170-180.
- [3] Zheng Y F. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 3081-310.
- [4] Harley S L. Refining the p - T records of UHT crustal metamorphism[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2008, 26: 125-154.
- [5] Powell R, Holland T J B. Calculated mineral equilibria in the pelitic system; KFMASH (K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) [J]. Am. Mineral., 1990, 75: 367-380.
- [6] 魏春景,周喜文. 变质相平衡研究进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 341-352.
Wei Chunjing, Zhou Xiwen. Progress in the study of metamorphic phase equilibrium [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 341-352. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wan Y S, Song B, Liu D Y, Wilde S A, Wu J S, Shi Y R, Yin X Y, Zhou H Y. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Paleoproterozoic tectono-thermal event [J]. Precam. Res., 2006, 149: 249-271.
- [8] Bebout G E. Metamorphic chemical geodynamics of subduction zones[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2007, 260: 373-393.
- [9] O'Brien P J, Rötzler J. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21: 3-20.
- [10] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. Assembly, accretion and breakup of the Paleoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China craton[J]. Gondwana Research, 2003, 6: 417-434.
- [11] England P C, Richardson S W. The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments[J]. J. Geol. Soc., 1977, 134: 201-213.

- [12] England P C, Thompson A B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, part I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust [J]. *J. Petrol.*, 1984, 25: 894–928.
- [13] Ruppel C, Hodges K V. Pressure-temperature-time paths from two-dimensional thermal models: Prograde, retrograde, and inverted metamorphism [J]. *Tectonics*, 1994, 13: 17–44.
- [14] Peacock S M, Wang K. Seismic consequences of warm versus cool subduction zone metamorphism: Examples from north-east and southwest Japan [J]. *Science*, 1999, 286: 937–939.
- [15] Peacock S M. Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs [A]. Eiler J. Inside the subduction factory, geophysical monograph 138 [C]. American Geophysical Union, Washington D. C., 2003: 7–22.
- [16] Jamieson R A, Beaumont C, Medvedev S, Nguyen M H. Crustal channel flows: 2. Numerical models with implications for metamorphism in the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, B06406. doi: 10.1029/2003JB002811.
- [17] Jamieson R A, Beaumont C, Nguyen M H, Grujic D. Provenance of the Greater Himalayan Sequence and associated rocks: Predictions of channel flow models [A]. in: Channel flow, ductile extrusion, and exhumation of lower-mid crust in continental collision zones [M]. Law R D, Godin L, Searle M P. Geological Society London Special Publications, 2006, 268: 165–182.
- [18] Jamieson R A, Beaumont C. Coeval thrusting and extension during lower crustal ductile flow-implications for exhumation of high-grade metamorphic rocks [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 33–51.
- [19] Gerya T V, Meilik F I. Geodynamic regimes of subduction under an active margin: Effects of rheological weakening by fluids and melts [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 7–31.
- [20] 魏春景. 变质作用 p - T - t 轨迹的研究方法与进展 [J]. *地学前沿*, 2011, 18(2): 1–16.
Wei Chunjing. Approaches and advancement of the study of metamorphic p - T - t paths [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 1–16. (in Chinese with English abstract)
- [21] Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 2. data and results [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3: 343–370.
- [22] Powell R, Holland T, Worley B. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations, with examples using thermocalc [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 577–586.
- [23] Holland T J B, Powell R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 333–383.
- [24] Wei C J, Powell R, Zhang L F. Eclogites from the south Tianshan, NW China: Petrologic characteristic and calculated mineral equilibria in the Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O system [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 163–179.
- [25] Wei C J, Powell R, Clarke G L. Calculated phase equilibria for low- and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22: 495–508.
- [26] 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]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2003, 145: 301–315.
- [27] Wei C J, Powell R. Calculated phase relations in high-pressure metapelites in the System NKFMAH (Na_2O - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) with Application to Natural Rocks [J]. *J. Petrol.*, 2004, 44: 183–202.
- [28] 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]. *J. Petrol.*, 2006, 47: 385–408.
- [29] Yang J, Powell R. Calculated phase relations in the system Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O with applications to UHP eclogites and whiteschists [J]. *J. Petrol.*, 2006, 47: 2047–2071.
- [30] Guiraud M, Powell R, Rebay G. H_2O in metamorphism and unexpected behavior in the preservation of metamorphic mineral assemblages [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2001, 19: 445–454.
- [31] Wei C J, Song S G. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogen, NW China: Phase equilibria and P - T path from garnet zonation [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26: 301–316.
- [32] 魏春景, 苏香丽, 姜玉行, 李艳娟. 榴辉岩中地质温压计新解: 来自 PT 视剖面图的证据 [J]. *岩石学报* 2009, 25: 2078–88.
Wei Chunjing, Su Xiangli, Lou Yuxing, Li Yanjuan. A new interpretation of the conventional thermobarometry in eclogite: Evidence from the calculated p - T pseudosections [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 2078–88. (in Chinese with English abstract)
- [33] Wei C J, Yang Y, Su X L, Song S G, Zhang L F. 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.
- [34] Wei C J, Li Y J, Yu Y, Zhang J S. Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the western dabieshan terrane, central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28: 647–666.
- [35] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, 86: 107–118.

- [36] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. *Nature*, 1984, 310: 641—644.
- [37] Wang X, Liou J G, Mao H. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1085—1088.
- [38] Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: A new environment of diamond formation[J]. *Nature*, 1990, 343: 742—746.
- [39] Xu S, Okay A, Ji S, Jiang L L, Ji S Y, Okay A I, Sengör A M C. Diamonds from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80—82.
- [40] Carswell D A, Compagnoni R. Introduction with review of the definition, distribution and geotectonic significance of ultrahigh pressure metamorphism[A]. Carswell D A, Compagnoni R. Ultra-high pressure metamorphism[C]. *European Mineral Union Notes Mineral*, 2003, 5: 3—7.
- [41] Baldwin S L, Monteleone B D, Webb L E, Fitzgerald P G, Grove M, Hill E J. Pliocene eclogite exhumation at plate tectonic rates in eastern Papua New Guinea[J]. *Nature*, 2004, 431: 263—267.
- [42] Cartigny P, Chinn I, Viljoen K S, Robinson D. Early proterozoic ultrahigh pressure metamorphism: Evidence from microdiamonds[J]. *Science*, 2004, 304: 853—855.
- [43] Ye K, Cong B L, Ye D N. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km[J]. *Nature*, 2000, 407: 734—736.
- [44] Mposkos E, Kostopoulos D. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: A new ultrahigh-pressure metamorphic province established[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, 192: 497—506.
- [45] Ogasawara Y, Fukasawa K, Maruyama S. Coesite exsolution from supersilicic titanite in UHP marble from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan[J]. *Am. Mineral.*, 2002, 87: 454—461.
- [46] Zhu Y F, Ogasawara Y. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene[J]. *Int. Geol. Rev.*, 2002, 44: 831—836.
- [47] Liu L, Zhang J, Green H W, Jind Z M, Bozhilov K N. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to > 350 km [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 263: 180—191.
- [48] Liou J G, Tsujimori T, Zhang R Y, Katayama I, Maruyama S. Global UHP metamorphism and continent subduction/collision: The Himalayan model[J]. *Int. Geol. Rev.*, 2004, 46: 1—27.
- [49] Zhang Z M, Shen K, Sun W D, Liud Y S, Lioue J G, Shia C, Wang J L. Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72: 3200—3228.
- [50] Liu F L, Gerdes A, Zeng L S, Xue H M. SHRIMP U-Pb dating, trace element and Lu-Hf isotope system of coesite-bearing zircon from amphibolite in SW Sulu UHP terrane, eastern China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72: 2973—3000.
- [51] Zhang L F, Ellis D J, Jiang W. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: Evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites[J]. *Am. Mineral.*, 2002, 87: 853—860.
- [52] Zhang L F, Ellis D J, Williams S, Jiang W. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: evidence from magnesite in eclogite[J]. *Am. Mineral.*, 2002, 87: 861—866.
- [53] Zhang L F, Ellis D J, Arculus R J, Jiang W, Wei C J. “Forbidden zone” subduction of sediments to 150 km depth—the reaction of dolomite to magnesite + aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 523—529.
- [54] Lü Z, Zhang L F, Du J X, Bucher K. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism[J]. *Am. Mineral.*, 2008, 93: 1845—1850.
- [55] Song S G, Zhang L F, Niu Y L. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China[J]. *Am. Mineral.*, 2004, 89: 1330—1336.
- [56] Song S G, Zhang L F, Niu Y, Su L, Jian P, Liu D Y. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, 234: 99—118.
- [57] Song S G, Zhang L F, Niu Y, Su L, Song B, Liu D Y. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data [J]. *J. Petrol.*, 2006, 47: 435—455.
- [58] Warren C J, Beaumont C, Jamieson R A. Modelling tectonic styles and ultra-high pressure (UHP) rock exhumation during the transition from oceanic subduction to continental collision[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, 267: 129—145.
- [59] Wang Q C, Cong B L. Exhumation of UHP terranes: A case study from the Dabie Mountains, Eastern China[A]. Ernst W G, Liou J G. Ultra-high pressure metamorphism and geodynamics in collision-type orogenic belts[C]. *Columbia M D.*: Bellwether Publishing Ltd., 2000: 170—180.
- [60] Ernst W G. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices; implications for arcs and continental growth; processes and consequences of deep subduction[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 127: 253—275.
- [61] Platt J P. Exhumation of high-pressure rocks: A review of concepts and processes[J]. *Terra Nova*, 1993, 5: 119—133.

- [62] Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2006, 152: 125–148.
- [63] Wei C J, Wang W, Clarke G, Zhang L F, Song S G. Metamorphism of high/ultra high-pressure pelitic-felsic Schist in the south Tianshan orogen, NW China: Phase equilibria and p - T path[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50: 1973–1991.
- [64] Harley S L. The origins of granulites: A metamorphic perspective[J]. *Geol. Mag.*, 1989, 126: 215–247.
- [65] Brown M, White R W. Processes in granulite metamorphism [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26: 121–124.
- [66] Brown M, Schulmann K, White R W. Granulites, partial melting and the rheology of the lower crust [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 1–6.
- [67] Green D H, Ringwood A E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, 31: 767–833.
- [68] 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1991, 4: 119–131.
Wang Renmin, Chen Zhenzhen, Chen Fei. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991, 4: 119–131. (in Chinese with English abstract)
- [69] Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: Examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif in Lower Austria [J]. *J. Petrol.*, 1993, 34: 427–459.
- [70] 翟明国. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩(HT-Hp 和 HT-UHT)及其相关问题[J]. *岩石学报*, 2009, 25(8): 1753–1771.
Zhai Mingguo. High- T and high- P granulites in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753–1771. (in Chinese with English abstract)
- [71] O'Brien P J, Rötzler J. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 3–20.
- [72] Smithies R H, Bagas L. High pressure amphibolite-granulite facies metamorphism in the Paleoproterozoic Rudall complex, central western Australia[J]. *Precam. Res.*, 1997, 83: 243–265.
- [73] Appel P, Möller A, Schenk V. High-pressure granulite facies metamorphism in the Pan-African belt of eastern Tanzania: p - T - t evidence against granulite formation by continent collision [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 491–509.
- [74] 魏春景, 张翠光, 张阿利, 伍天洪, 李江海. 辽西建平高压麻粒岩变质作用的 p - T 条件及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 269–282.
Wei Chunjing, Zhang Cuiguang, Zhang Ali, Wu Tianhong, Li Jianghai. Metamorphic p - T conditions and geological significance of high-pressure granulite from the Jianping complex, western Liaoning province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 269–282. (in Chinese with English abstract)
- [75] Chen Y, Ye K, Liu J B, Sun M. Quantitative p - T - X constraints on orthopyroxene-bearing high-pressure granulites in felsic-metapelitic rocks: Evidence from the Huangtuling granulite, Dabieshan Orogen[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26: 1–15.
- [76] Pattison D R M. Petrogenetic significance of orthopyroxene-free garnet+clinopyroxene+Plagioclase±quartz-bearing metabasites with respect to the amphibolite and granulite facies [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 21–34.
- [77] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A. High-pressure granulite (retrograded eclogites) from the Hengshan complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications [J]. *J. Petrol.*, 2001, 42: 1141–1170.
- [78] Powell R, Holland T J B. On thermobarometry[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26: 155–179.
- [79] Brown M. Retrograde processes in migmatites and granulites revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20: 25–40.
- [80] Kriegsman L M. Partial melting, partial melt extraction, and partial back reaction in anatectic migmatites [J]. *Lithos*, 2001, 56: 75–96.
- [81] White R W, Powell R, Holland T J B. Calculation of partial melting equilibria in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (NCKFMASH) [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2001, 19: 139–153.
- [82] White R W, Powell R. Melt loss and the preservation of granulite facies mineral assemblages[J]. *Journal Metamorphic Geol.*, 2002, 20: 621–632.
- [83] Rubatto D, Williams I S, Buick I S. Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2001, 140: 458–468.
- [84] Kelsey D E, Powell R. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{ZrO}_2$ system [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29: 151–166.
- [85] Zack T, Moraes R, Kronz A. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2004, 148: 471–488.
- [86] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2006, 151: 413–433.
- [87] Tomkins H S, Powell R, Ellis D J. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile-thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 703–713.
- [88] Kelsey D E, White R W, Powell R. Calculated phase equilibria in $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ for silica-undersaturated sapphirine-bearing mineral assemblages[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23: 217–239.
- [89] Schmidt M W, Poli S. Generation of mobile components dur-

- ing subduction of oceanic crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 567—591.
- [90] Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime[J]. *Earth Sci. Rev.*, 2003, 62: 105—161.
- [91] Manning C E. The chemistry of subduction-zone fluids[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 223: 1—16.
- [92] Schmidt M W, Poli S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, 163: 361—379.
- [93] Maruyama S, Okamoto K. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11: 148—165.
- [94] Katayama I, Nakashima S. Hydroxyl in clinopyroxene from the deep subducted crust: Evidence for H₂O transport into the mantle[J]. *Am. Mineral.*, 2003, 88: 229—234.
- [95] Kerrick D M, Connolly J A D. Metamorphic devolatilization of subducted oceanic metabasalts: Implications for seismicity, arc magmatism and volatile recycling[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, 189: 19—29.
- [96] Hacker B R. H₂O subduction beyond arcs[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9(3): 1—24.
- [97] Philippot P, Agrinier P, Scambelluri M. Chlorine cycling during subduction of altered oceanic crust [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, 161: 33—44.
- [98] Harris D M, Anderson Jr A T. Volatiles H₂O, CO₂, and Cl in a subduction related basalt[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, 87: 120—128.
- [99] Alt J C, Shanks III W C, Jackson M C. Cycling of sulfur in subduction zones: The geochemistry of sulfur in the Mariana Island Arc and back-arc trough [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 119: 477—494.
- [100] Gao J, John T, Klemm R, Xiong X M. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, 71: 4974—4996.
- [101] Zheng Y F, Gao T S, Wu Y B, Gong B, Liu X M. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust: Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein within ultrahigh-pressure eclogite [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 267—283.
- [102] Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Yang C H, Liu Y C, Jiao W F, Liu Y S, Yuan H L, Gong H J, He M C. U-Pb age, trace-element, and Hf-isotope compositions of zircon in a quartz vein from eclogite in the western Dabie Mountains: Constraints on fluid flow during early exhumation of ultrahigh-pressure rocks[J]. *Am. Mineral.*, 2009, 94: 303—312.
- [103] Xia Q X, Zheng Y F, Hu Z C. Trace elements in zircon and coexisting minerals from low-T/UHP metagranite in the Dabie orogen: Implications for action of supercritical fluid during continental subduction-zone metamorphism[J]. *Lithos*, 2010, 114: 385—412.
- [104] 董申保, 沈其韩, 孙大中, 卢良兆. 中国变质地质图(1:4,000,000)及其说明书(中英文版)[M]. 北京:地质出版社, 1986.
- Dong Shenbao, Shen Qihan, Sun Dazhong, Lu Liangzhao. Metamorphic map of China (1:4,000,000) and its explanatory text (*Chinese and English Editions*)[M]. Beijing: Geological Publishing House 1986.