

# 变质作用研究的回顾与展望

程裕淇 庄育勋 沈其韩

(中国地质科学院,北京,100037)

**摘要** 变质作用的研究历史主要表现为变质作用特征和变质作用原因两方面。变质作用特征研究方面经历了由初期对变质岩的认识、描述,到变质程度空间变化特点(递增变质带)的研究,再到变质作用随时间演化( $p$ - $T$ - $t$  轨迹)特点以及变质作用在时间-三维空间中演化特点的研究等几个阶段的研究历史,反映了对变质作用演化本质认识的不断深化。变质作用原因和变质作用与大地构造联系的研究方面表现为,从把变质作用简单地归结为深度控制的阶段,到把变质作用与区域性大地构造密切联系起来,初步形成变质地质学的阶段,再到近年来把变质作用与全球性更深层次地球动力学系统联系起来,认识到地球内部的热动能是包括变质作用在内的各种地质作用的主要原因,使变质作用研究进入更为成熟的变质地质学阶段。在过去的100多年中,变质作用的研究,已逐步形成以变质岩岩石学研究为基础和核心,与多种地质作用(岩浆作用、构造变形作用、沉积作用等)研究相结合,与多学科(地球物理、地球化学、热力学、材料科学等)研究相结合、应用多种高科技手段(高温高压实验、同位素测试、计算机模拟等)和常规测试分析,以研究探讨地球的动力学过程和演化历史为根本任务的,动态的、综合的变质地质学。如今,变质地质学已经成为具有一定边缘学科性质的地质学的一门分支学科。

**关键词** 变质作用 变质地质学 地球动力学

**CLC** P58, N0

## 1 变质作用特征研究的回顾

回顾对变质作用的研究历史,有助于认识它的研究趋势,也有助于建立新的变质作用研究思维方法。对变质作用特征的研究大致经历了四个不断前进、不断深化的阶段。

### 1.1 变质岩初步认识和描述阶段

变质作用理论的萌芽,是从J. Hutton(1726~1797)开始的。他认为有些沉积物被带到地球深部,经高温高压导致它们发生变质作用。到19世纪初,A. Boue(1820), C. Lyell(1833)进一步明确地提出了变质作用和变质岩的术语。继而地质学家们开始认识和描述各种变质岩岩石类型,并确定火成岩、沉积岩、变质岩为组成地壳的三大岩石类型(B. von Cotta, 1862)。显微镜的应用大大地促进了变质岩岩石结构、矿物组合的认识和描述。U. Grubenmann(1904~1906)根据化学成分将变质岩划分为十二个组,并按变质作用强度分为

收稿日期:1998-05-19 修改稿收到日期:1998-06-06

作者简介:程裕淇,男,1912年生,研究员,中科院院士,曾任地质矿产部副部长,变质地质学专业。现主要从事高压、超高压变质作用研究和变质作用、深融作用的研究。

三类,代表了变质岩研究已趋成熟,为变质作用研究奠定了基础。

## 1.2 变质作用程度空间分带现象和变质 $p-T$ 条件的研究阶段

G. Barrow (1893)<sup>[1]</sup>首次在苏格兰高地发现了变质作用在三度空间中变化的现象,并填制了递增变质带图。在他描述了蓝晶石型递增变质带之后, F. Beck (1903), V. M. Goldschmidt (1915), A. Harker (1932)<sup>[2]</sup>, 坂野 (1958) 和关阳太郎 (1958) 等又描述了红柱石型、蓝闪石型递增变质带。在这一时期, P. Eskola (1929, 1939)<sup>[3~4]</sup> 和 F. J. Turner (1935, 1948)<sup>[5]</sup> 提出和完善了变质相(矿物相)理论,大致确定了变质岩石形成的  $p-T$  条件。同时也广泛开展了变质作用条件的实验研究和热力学研究,对变质相和递增变质带所代表的变质作用  $p-T$  条件有了较多的了解(V. M. Goldschmidt, 1911; N. L. Bowen, 1940; A. Miyashiro, 1949; H. Ramberg, 1952; L. Jr. Coes, 1953)。A. Miyashiro (1961, 1973)<sup>[6~7]</sup> 综合了不同递增变质带类型和实验岩石学研究成果,提出了变质相系的概念。但这一时期变质作用研究的主导思想在很大程度上仍局限于: 把变质作用程度在空间上的差别主要归结为在垂向上的深度控制; 静态变质作用思维占主导地位,尚未充分认识到变质作用随时间的变化特点; 变质作用热源主要归结为地壳表层沉积物中的放射性物质衰变生热; 变质作用中以热传导为主; 许多地区的变质作用发生于稳态的地热梯度和稳态的构造环境下。

## 1.3 揭示变质作用随时间动态演化特点的阶段

70 年代中期以来人们更多地注意到,在变质作用中一个变质地区并非是静态地热场,一系列变质带(相)并非是等时的<sup>[8~9]</sup>。程裕淇 (1986)<sup>[10]</sup> 还提出了同一变质旋回中多阶段变质作用的概念和实例。A. B. Thompson 和 P. C. England (1984)<sup>[11]</sup> 提出,一系列变质带是变质地带或构造单元在隆升过程中,上部岩层不断被剥蚀,地热梯度不断发生变化的动态下形成的,并提出了变质作用  $p-T-t$  轨迹的概念。从而明确地把时间因素引入到不同时期变质作用的研究中来,使其主导思想发生由静态向动态的重大转变。变质作用  $p-T-t$  轨迹是一个构造-变质旋回中变质作用  $p-T$  条件随时间演化的记录。通过这一研究为阐明一个地区地球动力学过程提供了有效的途径。

变质作用  $p-T-t$  轨迹的研究有两种途径:以数学方式的正演模拟方法和岩石学的反演途径。后者包括: 根据变质岩中矿物世代、共生、转变反应关系,确定变质岩结晶作用演化序列,进而应用矿物地质温压计和变质反应实验资料,确定不同结晶阶段的变质条件,从而获得变质作用  $p-T-t$  轨迹的岩石学方法<sup>[12]</sup>; 以变形序列为变质作用演化的计时标,通过确定不同变质-变形序次的矿物组合形成的  $p-T$  条件,进而确定变质作用  $p-T-t-D$  轨迹的岩石学与构造地质学相结合的方法<sup>[13]</sup>; 利用岩石中不同矿物、不同的同位素年代学方法封闭温度的差异,据此确定降温过程的变质作用  $p-T-t$  轨迹的岩石学与同位素年代学相结合的方法<sup>[14]</sup>; 通过测定变质作用中连续生长而又未受扩散影响的矿物成分环带,确定变质作用  $p-T-t$  轨迹,即矿物学相对温压计方法<sup>[15]</sup>。此外还有矿物流体包裹体方法等。

变质作用  $p-T-t$  轨迹的研究经过十余年的发展逐步形成了陆-陆碰撞造山带(P. C. England 和 A. B. Thompson, 1984)、岛弧和大陆边缘造山带(P. Wells, 1980; A. B. Thompson, 1981)、裂谷(S. Wickham 和 E. Oxburgh, 1985; M. Sandiford 和 R. Powell, 1986)、麻粒岩高级变质区(S. Harley, 1988; S. Bohlen, 1987, 1989)等不同大地构造环境的  $p-T-t$  轨迹模式<sup>[16~17]</sup>。

然而近年来的研究发现,变质作用  $p-T-t$  轨迹研究仍存在较大缺陷(庄育勋, 1997)<sup>[18]</sup>。

如在正演模拟研究中: 把造山带视为均匀的热动力场, 目前仍主要为一维的正演模拟, 多注重变质作用沿垂向上一维的变化, 忽视了水平上的二维变化。注意了变质作用的不等时性, 而在三度空间上仍可以说是静态的。把造山隆起假定为均匀块状隆起过程。现有的  $p-T-t$  轨迹研究大多认为变质作用导因于地幔热和沉积物放射性衰变生热, 而地幔为稳态热供给, 地球表层中沉积物短半衰期放射性元素裂变生热是变质作用的主要动因。同时也认为热均匀向上传导。而实际上大量的研究表明, 变质作用主要导因于地球内部热动力能在异常时期、异常构造环境下向地球表层以对流形式释放。实质上仍未摆脱传统意义上的深度带和地热梯度观念的束缚。现有的变质作用  $p-T-t$  轨迹正演模拟研究, 仍把变质作用动因归结于地球表壳层次的地质作用, 割裂了地球表层热动力现象与岩石圈及其更深部圈层热动力演化的联系。

又如在  $p-T-t$  轨迹反演研究中: 在高级变质区岩石中, 一般难以确定早期变质阶段矿物组合, 矿物成分环带也仅记录变质高峰期及部分退变阶段的信息, 难以查明早期的  $p-T-t$  轨迹。在低级变质作用区建立  $p-T-t$  轨迹, 仍无有效的方法。在理论上变质作用  $p-T-t$  轨迹是一条连续的曲线。然而, 在实际反演确定变质作用  $p-T-t$  轨迹时, 是根据一定地区内不同地段得出的几个演化片段的记录连接而成, 有可能忽略了片段间复杂而有意义的过程, 也有可能将多个变质旋回峰期  $p-T$  点阵相连作为  $p-T-t$  轨迹的错误情况。一些研究者往往仅根据岩石学、矿物学资料建立  $p-T-t$  轨迹, 简单地套用  $p-T-t$  轨迹的大地构造演化模式, 对研究地区的大地构造实际演化过程缺乏可信的实际资料, 往往会得出相去甚远的结论; 一个造山带或一个变质地体各部分  $p-T-t$  轨迹往往并不相同, 不能以其中一个点的  $p-T-t$  轨迹, 代表整个造山带或一个变质地体的  $p-T-t$  轨迹。

#### 1.4 逐步建立变质作用时空观的阶段

自然辩证法的时空观认为, 事物都是在一定的时间-三维空间框架中发展变化的。现有的变质作用  $p-T-t$  轨迹研究, 没有重视或忽略了变质作用在造山带三维空间中的变化特点及三维空间变化与时间演化的联系, 现在到了认真考虑变质作用空间变化参数的时候了<sup>[19]</sup>。如北京西山地区 and 新疆阿尔泰地区的研究表明, 造山带并非是一个均匀的热力场, 而是表现出区域热动力异常中心。变质作用在三维空间中的变化与变质作用随时间的演化, 是一个统一的动态过程(刘国惠、伍家善, 1977; 庄育勋, 1994)。时间和三维空间是认识变质作用演化特征的基本参数。建立变质作用在三维空间中  $p-T-t$  演化框架, 从而有可能对造山隆升过程、热流来源、上升方式等得出更接近客观实际的认识, 较客观地反映造山带变质作用演化的本质特征, 并建立合理的造山带变质作用的地球动力学模型。这一思想可称为变质作用的时空观<sup>[20]</sup>。

上述对变质现象的四个认识和研究阶段, 反映出对变质作用演化本质特征认识的不断深化, 也将更接近运用自然辩证法对事物演化本质规律的认识。

## 2 变质作用原因和变质作用大地构造意义研究

纯变质岩岩石学的研究已被变质地质学的研究所代替。变质地质学不仅要认识变质作用现象本身更, 重要的是要通过这一研究探讨变质作用产生的原因, 探索地球内部热动力学性质和动力学过程。变质作用的研究历史也是人们不断地探索其发生原因的历史。

## 2.1 变质作用受深度控制的认识阶段

从 J. Hutton(1775)开始,人们就推测地下深部是高温高压的。最初人们认为变质作用程度与岩层沉降深度有关。对应于变质程度的增强,提出了浅深带(epi zone)、中深带(meso zone)和深带(kata zone)的深度带概念(F. Becke, 1903; U. Grubenmann, 1904~1906; E. Niggli, 1924)。所有观察到的变质岩岩石都被归纳到这三个带中来,巴洛式变质带被认为是在惟一的地热梯度下形成的正常的区域变质作用。

## 2.2 变质作用大地构造意义的初步探讨阶段

40年以来又相继发现发育广泛的其它类型变质带。A. Miyashiro(1961, 1973)提出变质相系概念和三个变质相系类型。变质相系类型:红柱石-矽线石型(地热梯度 $>25$  / km), 蓝晶石-矽线石型( $20$  / km)和蓝闪石-硬玉型( $10$  / km)。变质相系概念:一个变质带由一系列变质相组成,它们是在一定地热梯度条件下,随深度增加,温度和岩压也相应增加而形成的。不同的大地构造环境、不同的变质地区地热梯度存在着差异,从而出现不同的相系类型。A. Miyashiro(1973), W. G. Ernst(1974)<sup>[21]</sup>在变质作用研究中强调了对大地构造因素的考虑,明确地把不同的区域变质作用特征与其形成时的大地构造体制和过程联系起来进行研究,把变质相、变质相系与板块扩张带、板块陆壳俯冲带的不同部位联系起来,打破了长期以来进行单纯变质岩物理化学研究的倾向。在此阶段,人们注意到不同的变质作用类型与一定构造环境有某种关联,在对造山带、高级变质区的变质作用现象进行描述的基础上,也注意到其与大地构造存在的联系,使得对变质作用成因的探讨进入了一个新时期。然而,由于板块构造理论本身的缺陷和此时期对变质作用认识的局限性,变质作用仅作为构造作用的产物,并未认识到地球深部圈层热动力系统与地球表层变质现象的联系。也不难看出,变质相系的概念实际上仍未明确摆脱变质作用受深度控制的认识的影响。

## 2.3 变质作用与地球内部热动力系统密切联系的阶段

人们逐渐认识到来自地球内部的热动能是包括变质作用在内的各种地质作用这一主要动因<sup>[22]</sup>。

变质作用不能简单地归结为地球表壳层的缩短导致陆壳增厚或拉张导致陆壳减薄等现象的产物。变质作用是地球内部热动能在地球强烈运动时期、在一定构造环境下在地球表层释放的结果。以造山变质作用研究为例,现有的研究表明:造山作用及造山变质作用是一个短暂、迅速、不均匀的热动力过程,它与岩石圈板块的剧烈运动及地球内部热动能强烈的异常释放有着密切的时间、空间及成因上的联系;变质作用并不普遍地出现在整个造山带,而是发育在岩石圈板块运动最剧烈、地球内部热动能释放最强烈的地区;在造山作用过程中,变质作用、构造变形作用、岩浆作用(包括壳源型等不同成因花岗质岩石的形成演化等各方面)表现出时空演化和成因上的相关性和不均匀性;在造山带或构造活动带之下存在呈圣诞树状的构造或地幔柱构造。这些特点表明,变质作用的热动力,主要来源于地球内部热动能沿岩石圈板块间地壳软弱带向外释放。变质作用与造山带之下岩石圈及更深圈层的热动力活动,构成了一个统一的地球动力学体系。人们已开始探讨变质作用和壳-幔乃至更深圈层之间热动力演化的联系,并提出了一些新理论。

Mayerhoff A A, Taner I, et al. 地球动力学的新学说——颤动构造. 白星碧等译. 中国地质矿产信息院, 1992. 1~109

分层作用(delamination) P. Bird<sup>[23]</sup>在研究喜马拉雅山第三纪逆冲带中高级变质岩成因时认为,逆冲产生的摩擦热和正常地温,难以使逆冲带中岩石发生高级变质,而必须有深部上升的异常热流。他提出,岩石圈板块在莫霍面之下俯冲,使上部地壳缩短。由于俯冲的岩石圈地幔物质密度大于软流圈,使部分岩石圈分层拆离下陷,导致软流圈物质上升,因此下地壳受热后发生变质作用。

板垫作用(underplating) W. S. Fyfe<sup>[24]</sup>, K. P. Furlong 等<sup>[25]</sup>提出,古老高级变质杂岩的形成,是通过来自上地幔部分熔融产生的基性玄武岩浆侵入或添加到下地壳底部的过程中产生的。这种板垫作用,导致强烈的变质作用和下地壳的熔融作用。

地幔柱(mantle Plumes) S. Maruyama<sup>[26]</sup>等提出,在核幔层面处 D 层聚集了来自地核的大量的放射性热能并上升形成热幔柱。它是地球内部热动能传导的主要形式,是导致地壳、岩石圈发生各种地质作用的热动力来源。地幔柱构造导致大规模的地壳伸展、岩浆上升、变质作用等等。

通过变质作用来了解幔壳物质、能量交换、再循环等地球过程和机制,可以揭示地球热动力演化历史,探索地球演化热动力史和地球动力学过程。尽管如此,变质作用与全球性地球动力学体制之间的内在联系,仍是思辨性的。建立地球表层变质作用与地球内部热动力作用统一的地球动力学模式,仍需做大量的工作。

### 3 变质地质学

变质地质学是对地球表层不同地质时期、不同地球动力学环境的热力场的时空变化所产生的变质现象进行综合研究的科学,它涉及其它地质作用以及地球物理、地球化学等不同领域,以阐明地球内部热能、动力能的释放机制与过程,进而探讨各种大地构造环境下的地球动力学机制与过程和探索地球热动力的演化历史。它以变质岩岩石学研究为核心,与多种地质作用(岩浆作用、构造变形作用、沉积作用等)研究相结合,与多学科(地球物理、地球化学、热力学、材料科学等)研究相结合,多种高科技手段(高温高压实验、同位素测试、计算机模拟等)与常规测试分析相结合,是动态的、综合的地质学分支学科,具有一定的边缘学科性质。变质地质学大致包括:研究变质作用与地球内部不同圈层的热动能相互作用的变质作用动力学、研究区域变质作用时空动态演化过程与机制的区域变质作用动力学和研究微区变质反应动态过程的变质反应动力学三个层次。

#### 3.1 地球内部不同圈层的热动能相互作用的变质作用动力学

上述研究趋势表明,变质作用研究必然由地球表层不同范畴的变质现象描述,发展为与探讨地球内部不同圈层的热动能相互作用的全球性地球动力学研究相结合的研究方向。当前变质作用地球动力学意义的探讨,基本上仍处于资料积累和思辨性的阶段。变质动力学的发展,有赖于全球性地球动力学理论的指导;全球性地球动力学理论的形成与完善,也有赖于变质动力学的研究。变质作用研究在建立新的全球性地球动力学理论中将起重要作用。

变质作用现象记录了漫长的地球演化不可逆的热动力史<sup>[27]</sup>。变质作用研究成为阐明不同地质时期热动力场状态和时空变化、探讨当时的构造体制的重要途径,这在探索地球形成的早期历史——前寒武纪地质研究中有特别重要的意义。在早前寒武纪,地幔发生大规

模循环,地球内部热动能向地球表层以对流形式大量释放,在导致出现大规模深熔作用的同时,形成了大规模面型的麻粒岩、区域混合岩和穹隆构造。80%以上的陆壳是在太古宙形成的<sup>[28]</sup>。在元古宙和显生宙时期,地球内部热动力能明显减弱,大多沿刚性岩石圈板块间的地壳软弱带释放,变质作用表现出线形展布的特点。

一定的地球动力学环境与一定的变质作用类型相对应。同一地质时期不同大地构造单元中变质作用类型,既表现出差异性又表现出内在的成因联系。重视和加强各种地球动力学环境下变质作用特征的研究,建立以地球动力学为基础的、新的变质作用分类是今后变质地质学的重要工作内容之一。

### 3.2 区域变质作用的变质作用动力学

地球内部的热动能是包括变质作用在内的各种地质作用的主要原因。变质作用、岩浆作用、构造变形作用等是岩石圈和更深圈层的热动力活动的产物和不同的表现形式。区域变质作用研究中,应注意变质作用与其它地质作用的内在联系,强调变质作用与相关的岩浆作用、构造变形作用的综合研究。

变质作用在三维空间中的变化与变质作用随时间的演化是一个统一的动态过程。在区域变质作用研究中,要强调变质作用  $p-T$  及流体在三维空间中的变化和变质作用随时间的动态演化的研究,建立三维空间中变质作用  $p-T-t$  演化模型,客观地认识造山隆升过程、热流来源、上升方式,建立合理的造山带变质作用的地球动力学模型。

对地球内部不同圈层的热动能相互作用机制探索,要求将地球表层变质作用现象的研究与地球深部地质-地球物理、地球化学研究结合起来。

要强调研究变质前原岩建造、变质作用过程中的  $p-T$  及流体的时空变化和热流上升方式等变质作用全过程<sup>[29]</sup>。

### 3.3 变质反应动力学

以往的变质反应研究,强调反应参与物的物理化学相态,大多忽略了变质反应机制、反应速率、反应过程、温压、流体条件对变质矿物成核、矿物相转变、不同矿物相间的反应的影响等动力学问题。目前变质反应研究已开始从“状态”向“过程”转变。然而,这方面研究还处于定性现象描述阶段<sup>[30~33]</sup>。变质反应动力学将成为变质地质学研究新的生长点。其新的研究成果将对经典的热力学和相平衡理论产生巨大冲击,从而对现有的变质作用  $p-T$  计、 $p-T-t$  轨迹研究产生重要影响,并有可能获得一系列矿物地质速度计。变质反应动力学研究内容包括:变质反应类型的结构分类、不同结构类型的反应动力学过程研究、变质体系中物质迁移的扩散机制、变质作用温度压力条件、变形作用及流体条件对变质矿物成核、矿物相转变、不同矿物相间的反应的影响等动力学问题。这方面研究是远未完成的领域,要在此领域获得突破,应注意引入非平衡非线性热力学等新理论和其它学科(如材料科学)研究的新成果、新方法,并加强高温高压下物质扩散、相变的研究。近年来超高压变质作用的研究,大大拓宽了变质作用的  $p-T$  范围,同时也要求加强高温高压变质反应的实验模拟研究。

众多研究表明,大到地幔对流、地幔柱发育、板垫作用、分层作用,小到微区变质反应、岩石形变,在不同深度和规模、不同类型的地质作用中,都有流体参与,并且在不同圈层物质和能量的传输上都起着重要作用<sup>[34]</sup>。结合典型变质区的综合研究,探索不同变质作用类型中流体特点、超临界态流体的溶解性、流体渗透扩散能力、流体对变质反应中扩散和反应速率的影响,以及流体对岩石力学、地球物理性质的影响等已成为变质流体研究的重要课题。

## 4 结束语

变质作用研究的思维正在发生从静态向动态的转变。一方面人们已认识到变质作用经历了时间和三度空间动态变化的过程;另一方面也认识到变质作用是发生于地球内部热动力剧烈活动的时期的非稳态的大地构造环境下。随着变质作用研究的不断深入,许多传统概念、假设的合理前提,例如变质作用热源主要来自地壳中放射性元素衰变生热的观念、变质作用压力主要来自于上覆岩层压力的观念等已受到挑战、修改或否定。变质作用研究首先必须解放思想,勇于创新。

变质地质学是当今地学前沿的大地动力学的重要支柱学科之一。我国地域辽阔,变质作用现象丰富。从现在到 21 世纪初,应加强对不同地质时期、不同大地构造环境的主要变质作用类型,如麻粒岩相变质区、花岗绿岩带、超高压变质带、蓝片岩带、递增变质带、单相低绿片岩相区和极低级变质区进行立典研究。应注重在深入细致的综合性区域地质调查基础上,运用辩证唯物主义的观点研究和探索变质作用发生和演化的全过程;强调与多种地质作用研究相结合;强调变质作用三维空间变化与时间演化特征研究相结合;地球表层变质现象研究与深部地质研究相结合的方法。结合地球动力学新理论,对同一地质旋回不同的变质作用类型进行对比、综合研究和理论探索。结合区域地质调查,在对典型地区进行扎实的区域性变质地质研究基础上,探索建立三维空间—时间框架中以对流方式热传的递机制和过程,这是今后正、反演模拟的重要发展方向。在变质反应动力学研究方面应与高温高压实验研究相结合,借鉴和吸收材料科学、冶金物理学、近平衡状态反应动力学等其他学科和理论的新进展和新知识,加强学科间的渗透和交流。在不断实践中培养具有广博扎实知识和理论基础及坚实的野外、实验室研究能力的科技队伍,力争在下一个世纪初,使我国的变质地质学研究赶上世界一流水平。

未标文献序号者未列入参考文献。文中不当之处敬请指正。

## 参 考 文 献

- 1 Barrow G. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the southeastern Highlands of Scotland, and its accompanying metamorphism. *Q J Geol Soc Lond*, 1893, 49: 330 ~ 358
- 2 Harker A. *Metamorphism: A Study of the Transformation of Rock-Masses*. 2nd ed. London: Methuen, 1932. 362
- 3 Eskola P. On mineral facies. *Geol Foren*, Stockholm Forh, 1929, 51: 157 ~ 172
- 4 Eskola P. Die metamorphen gesteine. In: Barth, Tom F W, Correns C W, Eskola P, eds. *Die Entstehung der Gesteine*. Berlin: Springer, 1939, 263 ~ 407
- 5 Turner F J. Mineralogical and structural evolution of the metamorphic rocks. *Geol Soc Am Mem*, 1948, 30: 342
- 6 Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts. *J Petrol*, 1961, 2: 277 ~ 311
- 7 Miyashiro A. *Metamorphism and Metamorphic Belts*. London: George Allen and Unwin Ltd. 1973. 429
- 8 刘国惠,伍家善. 北京房山岩体围岩变质岩石学和变质带. *地质矿产研究*, 1977, 3: 160 ~ 198
- 9 England P C, Richardson S W. The inference of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environment. *Jour Geol Soc Lond*, 1977, 134: 201 ~ 213
- 10 Cheng Yuqi. Metamorphic series and metamorphic belts of China. In: Yang Z, Cheng Y, Wang H, eds. *The Geology of China*. Oxford: Clarendon Press, 1986. 210 ~ 234

- 11 Thompson A B, England P C. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism : their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Jour Petrol* , 1984, 25: 929 ~ 955
- 12 Droop G T R. Alpine metamorphism in the south-east Tauern Window, Austria. .  $p-T$  variation in space and time. *Jour Meta Geol* , 1985, 3: 371 ~ 402
- 13 Laajoki K, Tuisku P. Metamorphic and structural evolution of the Early proterozoic Puolankajarvi Formation, Finland . Structural and textural relations. *Jour Meta Geol* , 1990. 8: 357 ~ 374
- 14 Haugerud R A, Fan Zen. An essay on metamorphic path studies or Cassandra in  $p-T-t$  space. In: Perchuk L L, ed. *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology*. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1991. 323 ~ 348
- 15 Spear F S, Selverstone J. Quantitative  $p-T$  paths from zoned minerals. *Theory and Tectonic Applications. Contrib Mineral Petrol* , 1983, 83: 348 ~ 357
- 16 卢良兆. 变质作用  $p-T-t$  轨迹及其地球动力学意义. 国外前寒武纪地质, 1991, (3): 4 ~ 19
- 17 卢良兆. 麻粒岩相变质作用的  $p-T-t$  演化及其地质动力学意义. 国外前寒武纪地质, 1993, (1): 1 ~ 19
- 18 庄育勋. 变质作用  $p-T-t$  轨迹及矿物地质温压计研究的评述. 见: 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志主编. 岩石圈研究的现代方法. 北京: 原子能出版社, 1997. 137 ~ 150
- 19 Brown M.  $p-T-t$  evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism. *J Geol Soc Lond* , 1993, 150: 227 ~ 241
- 20 庄育勋. 中国阿尔泰山带热动力时空演化和造山过程. 长春: 吉林科技出版社, 1994. 1 ~ 402
- 21 Ernst W G. Metamorphism and ancient continental Margins. In: *The Geology of Continental Margins*. New York: Springer-Verlag, 1974. 907 ~ 919
- 22 , . 张维根译. 变质作用与地球动力学. 地质科学译丛, 1989(2): 23 ~ 27
- 23 Bird P. Interpretation of intracontinental subduction in the Himalaya. *J Geophys Res* , 1978, 83: 4 975 ~ 4 987
- 24 Fyfe W S, Leonardos O H. Ancient metamorphic-migmatite belts of the Brazilian African coasts. *Nature* , 1973, 224: 501 ~ 502
- 25 Furlong K P, Fountain D M. Continental crustal underplating: thermal consideration and seismic-petrologic consequences. *J Geophys Res* , , 1986, 91: (B8) 8 285 ~ 8 294
- 26 Maruyama S. Plume tectonics. *J Geol Soc Japan* , 1994, 100(1): 23 ~ 29
- 27 董申保, 魏春景. 变质地质学的某些进展. 岩石学报, 1997, 13(3): 274 ~ 289
- 28 Martin H. The archaean grey gneisses and the genesis of continental crust. In: Condie, ed. *Development in Precambrian Geology. Archaean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 1994. 205 ~ 259
- 29 董申保, 等. 中国变质作用及其与地壳演化的关系. 北京: 地质出版社, 1986. 1 ~ 233
- 30 Vernon R H. *Metamorphic, processes*. London: Allen and Unwin, 1976. 1 ~ 247
- 31 Barker A J. *Introduction to metamorphic Textures and Microstructures*. New York Blackie USA: Chapman and Hall, 1990. 1 ~ 162
- 32 张泽明. 大别山地区超高压变质岩的不平衡退变反应及动力学. 地球科学, 1996, 21(5): 501 ~ 507
- 33 Passchier C W, Trouw R A J. *Microtectonics*. Heiderberg Berling: Springer-Verlag. 1996
- 34 Fyfe W S. Deep fluids and volatile recycling: crust to mantle. *Tectonophysics* , 1997, 275: 243 ~ 251

## METAMORPHISM : REVIEW AND PROSPECT

Cheng Yuqi      Zhuang Yuxun      Shen Qihan

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

**Abstract** Two main aspects of the history of study of metamorphism since the early 18th Century are briefly reviewed. The investigation of the basic characteristics of metamorphism began