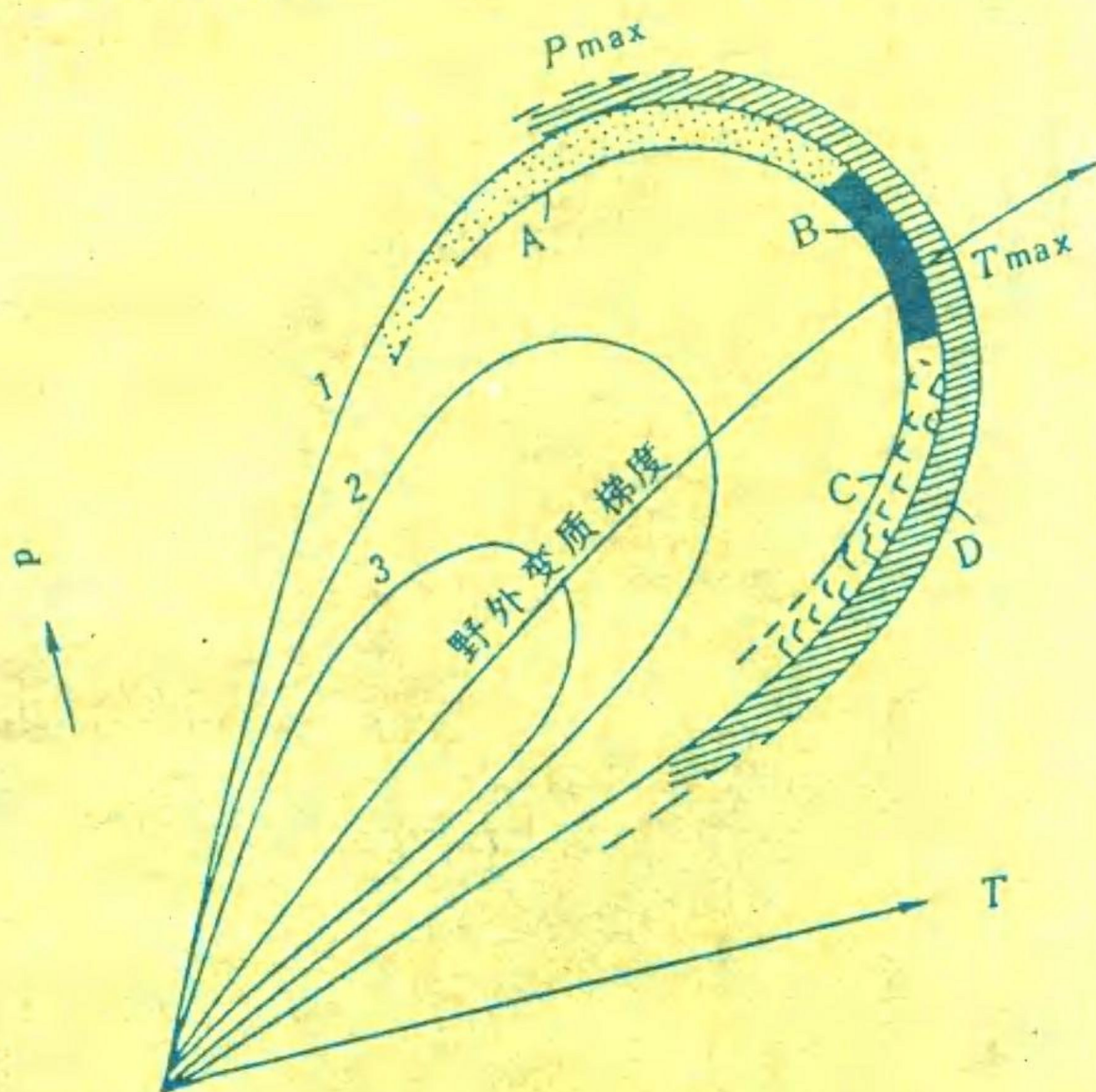


变质作用 $p-T-t$ 轨迹

中国地质大学出版社

韩郁菁 编著



• 073021

变质作用 p - T - t 轨迹

(SY11/30)SY11/15

韩 郁 菁 编 著



中国地质大学出版社

• (鄂) 新登字第 12 号 •

内 容 简 介

变质作用 p - T - t 轨迹的研究为变质岩石学开辟了一条新途径, 它使变质岩石学与构造地质学和年代地质学紧密结合, 共同探讨和解决岩石圈构造演化以及地球动力学问题。因此, 变质作用 p - T - t 轨迹已成为当前地质学研究前沿课题之一。

本书系统地论述了变质作用 p - T - t 轨迹的内容和研究方法, 详细地介绍了不同大地构造环境的 p - T - t 轨迹的基本特征。最后, 以豫西秦岭造山带为实例, 揭示了一个多期变质变形的变质地体 p - T - t 轨迹研究方法, 以及如何将 p - T - t 轨迹的研究运用于区域构造发展的地球动力学解释。它适合于地质学、岩矿学、构造学、矿床学、地球化学、地球物理等专业大学生、研究生使用, 并可供广大野外地质人员和科研人员参考。

—
出 版 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)
责任编辑 刘粤湘 责任校对 熊华珍
印 刷 中国地质大学印刷厂印刷
发 行 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 230 千字
1993 年 2 月第 1 版 1993 年 2 月第 1 次印刷 印数 1—1500 册

ISBN 7-5625-0718-x/P·254 定价 2.85 元

序

变质岩石学研究的主要目的之一在于运用变质岩的物理化学条件的演变来说明构造带的演化。过去,主要是依靠高峰变质温压条件的估算来建立区域范围的地温梯度,这固然从一个侧面反映了区域的热历史,然而,近年来人们认识到变质作用是一个动态的过程,变质作用的地温梯度,常因种种构造过程而发生变化;变质岩中不同期次的矿物(或矿物共生)的消长转化记录了压力(p)、温度(T)随时间(t)而演化的过程,即 p - T - t 轨迹。这种 p - T - t 轨迹的定量资料对于追溯一个构造带的历史极为重要。当前, p - T - t 轨迹研究已成为变质岩石学的前沿课题。

近年来国内外出版物中每年有大量论著来研究 p - T - t 轨迹,方法学上也在不断更新。但目前国内尚缺乏一本全面专论变质作用 p - T - t 轨迹的书,作者多年来在中国地质大学讲授“变质岩成因”课程,并从事东秦岭—大别变质 p - T - t 轨迹专题研究,在教学实践和科研成果的基础上完成本书,恰好填补了国内这一空白。

变质作用 p - T - t 轨迹研究涉及变质岩石学、矿物学、构造地质学、化学热力学和化学动力学、传热学和同位素年代学等许多方面,是多学科的边缘。作者立足于地质类专业人员的实际专业知识面,在本书中对热模拟、同位素地质年代学、 p - T - t 轨迹的岩石学研究方法以及流体包裹体的研究等都作了专门详尽的介绍,许多资料是国内出版物中一般不易见到的,在介绍研究方法时不仅只阐述方法本身,而且涉及原理特别是有关的数学运算,便于读者能够清楚领会 p - T - t 轨迹的理论实质。

在详细论述方法学的基础上,作者以整章(第六章)的篇幅介绍了不同大地构造环境的 p - T - t 轨迹。最后,以豫西秦岭造山带核部杂岩的变质作用研究为实例,揭示了一个多期变质变形的变质地体 p - T - t 轨迹研究的方法,以及如何将 p - T - t 轨迹的研究运用于区域构造发展的地球动力学解释。该书理论联系实际,是迄今为止国内论述 p - T - t 轨迹最为完备的教材。它可供地质矿产研究工作者及高等院校地质学、岩石学、构造地质学、地球物理学等有关专业师生的参考。

变质作用 p - T - t 轨迹的研究还服务于基础地质工作。一项有效益的基础地质研究必然联系着经济效益。国外已经有人利用造山带或变质地体抬升、冷却等构造热历史的资料来评价某些变质热液型矿床的区域远景,因此可以预见该书的出版不仅将提高我国变质岩石学的研究程度,而且将促进中深变质地区的成矿作用研究和矿床预测。

游振东

1991年3月

本书所用矿物代号

Ab	钠长石	Law	硬柱石
Ac	方沸石	Mrg	珍珠云母
Act	阳起石	Mic	微斜长石
Adr	钙铁榴石	Ms	白云母
Al	碱性长石	Ol	橄榄石
Alm	铁铝榴石	Om	绿辉石
Als	铝硅酸盐	Opx	斜方辉石
An	钙长石	Pg	钠云母
And	红柱石	Phl	金云母
Ann	铁云母	Phn	多硅白云母
Ap	磷灰石	Pi	斜长石
Ag	文石	Pmp	绿帘石
Bi	黑云母	Prh	葡萄石
Cal	方解石	Pyp	叶蜡石
Chl	绿泥石	Pyr	镁铝榴石
Cpx	单斜辉石	Q	石英
Crd	蔷薇石	Rt	金红石
Crp	纤锰柱石	Sa	假蓝宝石
Ctd	硬绿泥石	Scp	方柱石
Czo	斜黝帘石	Ser	绢云母
Ep	绿帘石	Sil	夕线石
Ged	铝直闪石	Spe	锰铝榴石
Gl	蓝闪石	Spn	榍石
Gro	钙铝榴石	St	十字石
Gt	石榴石	Stp	黑硬绿泥石
Hb	普通角闪石	Tc	滑石
Ilm	钛铁矿	Tur	电气石
Jd	硬玉	Ves	符山石
Kf	钾长石	Wr	斜钙沸石
Ky	蓝晶石	Zr	锆石
Lm	浊沸石	Zo	黝帘石

前言

变质作用是一种动态过程,其温度、压力条件随时间演变,这就是 p - T - t 轨迹研究的内容。这一研究不仅成为现代变质地质学的前沿课题,而且代表了今后一个时期的研究方向。它是造山带热历史与大地构造演化以成因联系的纽带。

笔者自 1986 年以来在对岩矿专业高年级学生及岩石、矿物、地质、矿床、勘探等专业硕士研究生的“变质岩成因”教学中讲授了变质作用的 p - T - t 轨迹。本书是经多年教学实践并结合从事的“东秦岭—大别地区”的科研工作,采用国内、外最新研究成果,综合大量国内、外文献(主要是外文)的基础上编写而成的。

全书共分七章。第一章绪论,介绍变质作用 p - T - t 轨迹的概念、变质作用 p - T - t 轨迹的确定方法, p - T - t 轨迹的实际应用及其研究现状。第二章主要讨论热模拟,首先从地球热学性质出发,对地壳增厚情况下三种几何模型加以讨论,介绍了一维和石耀霖教授(1987)发表的二维模拟的结果和研究方法,有关增厚陆壳内温度分布的近似模拟和有关剥露作用段 p - T - t 轨迹的解析近似模拟,则分别列入该章的两个附录中,以供读者参考。变质作用 p - T - t 轨迹中时间(t)的确定,是一个很大的问题,它既涉及同位素年代学的基本知识又涉及变质作用历史的分析等基本技术问题,本书第三章专门讨论变质 p - T - t 轨迹中时间(t)确定的基本理论和方法,笔者把它分解为两个大的问题来讨论;一是相对年龄的确定,这便涉及变质变形的世代分析,利用变质岩中变斑晶的生长与面理发育的时序关系是判断变质结晶与变形时代关系的有效手段,引用新疆阿尔泰变质地带的研究成果(庄育勋,1987),作为分析实例;另一个问题是绝对年龄的确定,即同位素年代学。笔者从同位素年代学基本原理出发区分了不同的年龄如厚岩年龄、变质年龄和表面年龄,继而介绍了 U-Th-Pb, K-Ar, ^{40}Ar - ^{39}Ar , Rb-Sr, Sm-Nd, 和裂变径迹等六种方法的实质及其在 p - T - t 轨迹中的应用。

第四章介绍确定 p - T 轨迹的岩石学方法,这是本书亦即课程本身的重点。首先是介绍高峰期变质条件确定的方法;其次介绍利用矿物包体测定寄主矿物生长的 p - T 条件;第三是介绍如何运用变斑晶中的成分环带来建立 p - T 轨迹;第四是利用变质矿物之间的再平衡结构来标定冷却过程的温压矢量;最后讨论变形对变质作用 p - T 轨迹的影响。

变质岩中流体包裹体的研究可以提供变质作用的 p - T 条件方面的信息,因此它是确定 p - T 轨迹的有效方法之一。因此,第五章专门介绍确定 p - T 轨迹的流体包裹体方法,其主要内容包括变质岩中流体包裹体的特征,研究方法,利用流体包裹体估算变质作用的 p - T 条件以及研究变质岩区抬升的 p - T 轨迹等。

变质作用 p - T - t 轨迹的主要功用在于对变质作用作地球动力学解释。第六章讨论了三种不同构造区的变质作用 p - T - t 轨迹,即:大陆碰撞带、大陆岛弧区和大陆拉张环境等以与国内目前大地构造研究的热点即大陆构造相联系。

最后,第七章研究实例、以豫西东秦岭造山带核部杂岩变质作用 p - T - t 轨迹为例来阐明一个多期变质多期变形的地区,如何借助变质岩石学研究结合同位素年代学方法,来确定该区变质作用的 p - T - t 轨迹,并且作出地球动力学解释的。

该书可作为岩矿、地质、矿产等专业大学生及研究生的专题教材,也可作为科研、生产

单位广大地质工作者的参考书。

游振东教授审阅了全书，并提出宝贵的意见，谨此致以深切的谢意。书中插图由陈云兰同志清绘，并清抄全部文稿，在此亦表感谢。

限于笔者水平，书中错误和不当之处，敬请读者指正。

目 录

前 言	(1)
第一章 绪论	(1)
一、变质作用 p - T - t 轨迹的概念	(1)
二、变质作用 p - T - t 轨迹的确定方法	(2)
三、变质作用 p - T - t 轨迹的实际应用	(5)
四、变质作用 p - T - t 轨迹的研究现状	(7)
第二章 热模拟	(8)
一、地球的一些热学性质	(8)
二、热传导模型	(9)
三、地质上相关的参数范围	(14)
四、一维模拟结果	(16)
五、二维模拟	(25)
附录 I：增厚陆壳内温度分布的解析近似模拟	(28)
附录 I：有关剥露作用段的 p - T - t 轨迹的解析近似模拟	(32)
第三章 p - T - t 轨迹中时间 (t) 的确定	(35)
一、相对年龄的确定——变质变形世代分析	(35)
二、绝对年龄的确定	(39)
第四章 确定 p - T 轨迹的岩石学方法	(64)
一、高峰变质条件的确定	(64)
二、矿物包体温压测量	(75)
三、环带状变斑晶的 p - T 轨迹	(77)
四、矿物的再平衡结构标定冷却过程中的温压矢量	(80)
五、变形对变质作用 p - T 轨迹的影响	(83)
第五章 确定 p - T 轨迹的流体包裹体方法	(86)
一、流体包裹体的类型及确定	(86)
二、变质岩中流体包裹体的特征	(87)
三、变质岩中流体包裹体研究方法特点	(88)
四、利用流体包裹体估算变质作用的压力和温度	(91)
五、利用流体包裹体研究变质岩区抬升的 p - T 轨迹	(101)
第六章 变质作用 p - T - t 轨迹的地球动力学解释	(105)
一、大陆碰撞带的变质作用 p - T - t 轨迹	(106)
二、大陆岛弧区的变质作用 p - T - t 轨迹	(113)
三、大陆拉张环境的变质作用 p - T - t 轨迹	(115)
四、关于变质作用 p - T - t 轨迹地球动力学解释的复杂性	(118)
第七章 研究实例：豫西东秦岭造山带核部杂岩的变质作用 p - T - t 轨迹	(120)

一、地质背景.....	(120)
二、根据矿物生长和变质反应过程确定 p - T 轨迹	(120)
三、用石榴石成分环带定量计算的 p - T 轨迹	(127)
四、两个变质旋回时间 (t) 的同位素年龄证据	(132)
五、变质作用 p - T - t 轨迹的地球动力学解释.....	(133)
六、结 论.....	(134)
主要参考文献.....	(135)

第一章 绪 论

变质作用的 p (压力) - T (温度) - t (时间) 轨迹是本世纪 70 年代中后期提出的概念, 这是变质作用理论研究中的一大突破, 现今正得到广泛应用和发展。

一、变质作用 p - T - t 轨迹的概念

变质作用不是一种静态的变化, 而是一种动态过程, 其温度、压力条件随时间而演变。长期以来, 变质岩石学的大部分研究, 一向把目标放在确定变质作用峰期的温压条件上, 人们设计了种种地质温度计和地质压力计来计算峰期变质条件。变质相本身就是以岩石历史中的高峰变质条件为基础; 变质相系则反映从某一变质地体采集的各种岩石的一系列高峰变质条件。都城秋穗 (1961) 提出, 每一特定的变质相系都是以一定地温梯度为代表的地热体制通过前进变质作用而形成的, 且对应于一定的大地构造环境。但实际上许多变质岩原来是地表或近地表的岩石, 后来下沉到地下经受了变质作用, 它必然经历前进变质的过程。由于后来地壳抬升, 这些岩石还必然经历从地下到地表的变化, 因此变质相系所反映的 p - T 曲线并不代表任一岩石真正经历的 p 、 T 条件全过程。P. C. England 和 S. W. Richardson (1977) 在研究侵蚀作用对不同变质环境岩石的矿物相的影响时, 明确地提出了变质作用 p - T 轨迹的概念。A. B. Thompson (1981) 在讨论地壳的温度场和动力学过程的关系时提出了 p - T - t 轨迹的含意及可能获取的方法。P. C. England 和 A. B. Thompson (1984) 在对大陆增厚事件中经受区域变质作用的岩石的 p 、 T 演化规律进行研究时, 正式引入了“ p - T - t 轨迹”这一术语。

所谓变质作用的 p - T - t 轨迹, 是指岩石从其变质历史的起点到被剥露于地表所经历的 P - T 条件的连续变化过程。了解变质岩在其历史中所经历的 p - T 轨迹, 就能阐明在变质作用和造山作用期间发生的各种构造过程。

现以陆壳增厚的情况为例。若陆壳因逆掩或逆冲作用而增厚, 原始地温梯度会受到很大扰动, 称之扰动地温梯度。一旦构造作用弛豫, 由于重力均衡效应, 增厚的陆壳必然会发生上隆抬升并经受侵蚀作用。在此期间内, 受扰动的地温梯度向稳态地温梯度演变, 称之热弛豫 (Thermal Relaxation), 即产生明显的加热效应; 另一方面侵蚀作用导致压力下降。此期间的地温梯度显然是瞬变的, 而目前出露于地表的变质岩所经历的“高峰”变质条件恰恰是在这一时期记录下来的这种情况, 可用图 1-1 来说明。假设侵蚀作用在逆冲事件之后 20Ma 时开始起作用, 当时 A 岩石所处的 p - T 条件为 $12 \times 10^8 \text{Pa}$ 和 650°C 。到逆冲事件之后 33Ma 时, 侵蚀作用使压力下降到 $9 \times 10^8 \text{Pa}$, 而由于热弛豫, 加热在持续进行, 使温度上升到 720°C 最高值。此后, 压力和温度均下降。在 40Ma 时, 压力下降至 $7.5 \times 10^8 \text{Pa}$, 温度为 700°C 。因岩石逐渐趋近地表, 温度迅速降低, 在 60 和 80Ma 时分别达到 500°C 和 300°C 。在逆冲事件之后 150Ma 时, A 岩石到达地表。A 岩石中的矿物组合所记录的变质条件相当于其“高峰”变质条件 (720°C 和 $9 \times 10^8 \text{Pa}$), 相应的压力则大大低于岩石在结晶早期阶段所经受的最大压力。

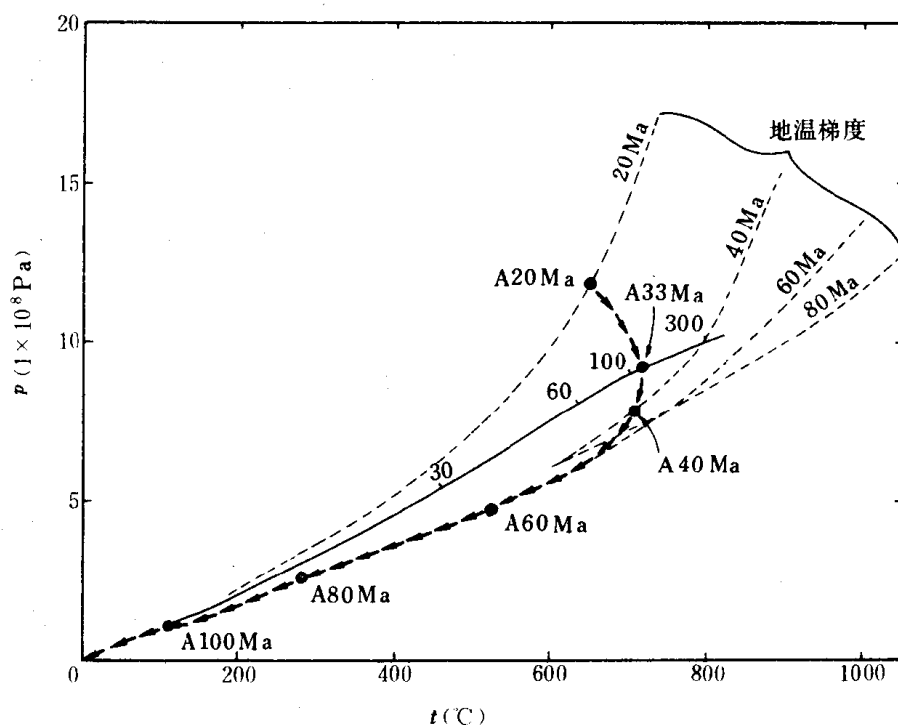


图 1-1 在逆冲作用之后陆壳中 A 岩石所遵循的 p - T - t 轨迹

(据 England 和 Richardson, 1977)

图中箭头表示 p - T - t 轨迹，虚线表示陆壳在逆冲作用之后 20、40、60 和 80 Ma 时的地温梯度曲线；
实线表示变质地温梯度，该线上注明岩石到达地表的时间

处于不同埋深的岩石具有不同的初始温压条件，所记录的“高峰”变质条件及记录这种条件的的时间也各不相同，所有最终到达地表的岩石所记录的“高峰”变质条件的连线，称为变质地温梯度 (England 和 Richardson, 1977) 或野外变质梯度 (Metamorphic field gradient) (F. Spear 等, 1984)，也有称之为温压条件系列 (Pleiothermic Array) (Thompson 和 England, 1984)。实际上高峰变质条件的这条迹线就是都城秋穗 (1961) 所称的变质相系。从图 1-1 中也可看出岩石所实际经历的 p - T - t 轨迹。它并以很大角度穿过变质地温梯度，后者显然不能指示变质作用的时间演进趋势。

二、变质作用 p - T - t 轨迹的确定方法

1. 正演法——热模拟 引用一些基本热参数的估计值如热导率、生热量等来进行数学模拟，确定岩石在一定构造环境中可能经历的 p - T - t 轨迹 (详见第二章)。图 1-2 和图 1-3 分别表示数学模拟的逆冲断层模式和碰撞模式。

2. 反演法 以矿物演化资料为基础再造变质作用的 p - T - t 轨迹。

选择合适的样品，即可以在一块变质岩标本上得到所有的 p 、 T 数据。当然，这需要扎实的野外和室内工作，进行构造和岩石学研究，确定研究区域的变形和变质序列。

(1) 用矿物环带定 p - T 轨迹：假设矿物环带是同一变质作用过程的产物，在变质作用过程，扩散作用对环带矿物及其中的包裹物影响不大，则矿物生长环带和其边部由退变质而引

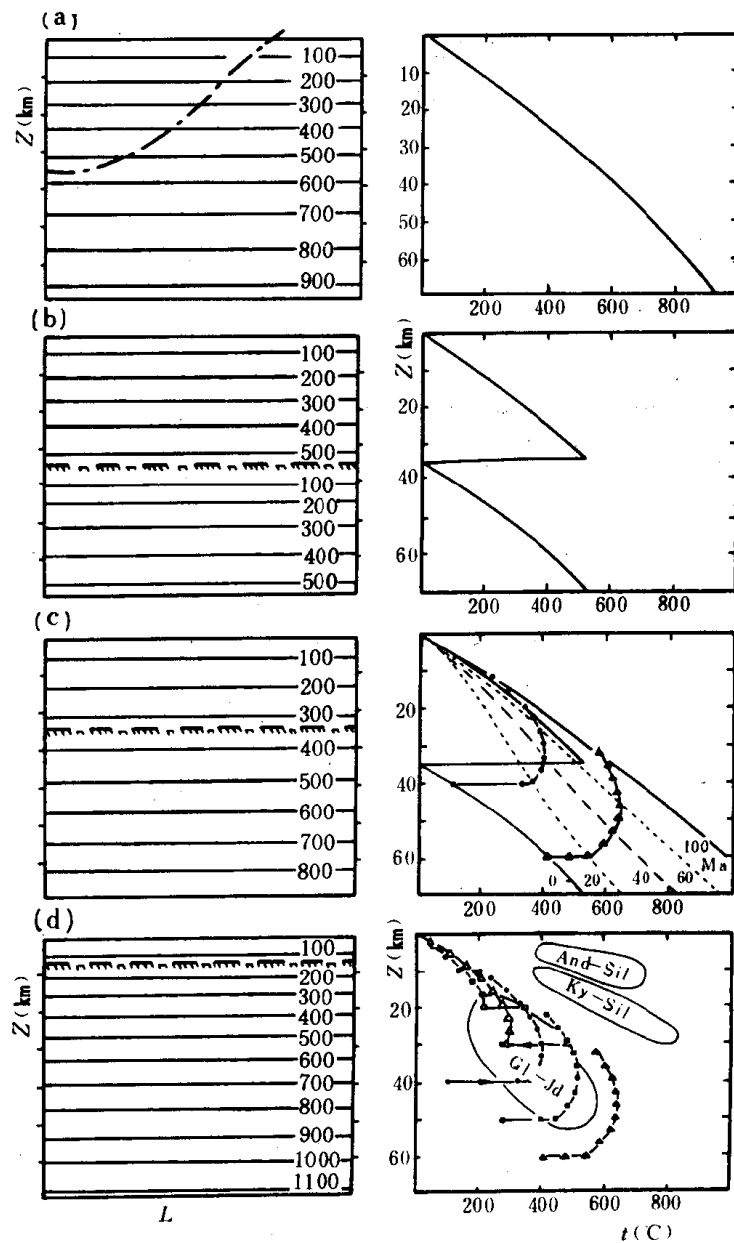


图 1-2 逆冲断层模式

(据 Thompson, 1981)

一系列深度-距离图和深度-温度图表示因逆冲作用而增厚的陆壳地温梯度演变情况。(a) 示逆冲前的等温面型式 (左图) 和稳态地热梯度 (右图); (b) 示逆冲后 0Ma 时的等温面型式 (左) 和“锯齿形”扰动地温梯度 (右), 在逆冲断层面上呈现热倒转; (c) 左图示逆冲后 50Ma 的等温面型式, 右图示演变的地温梯度和 p - T - t 轨迹 (逆冲后 20Ma 无侵蚀, 逆冲后 80Ma 有侵蚀; 两条 p - T - t 轨迹, 一为初始埋深 40km, 另一为 60km, 轨迹上注有 10Ma 的时间间隔); (d) 左图示逆冲后 100Ma 的等温面型式, 右图示初始埋深分别为 10、20、30、40、50 和 60km 的 p - T - t 轨迹; 该图中还表示了根据变质矿物组合推断的相系在 p - T 空间内的位置。注意, 左列图中粗虚线示逆冲断层面

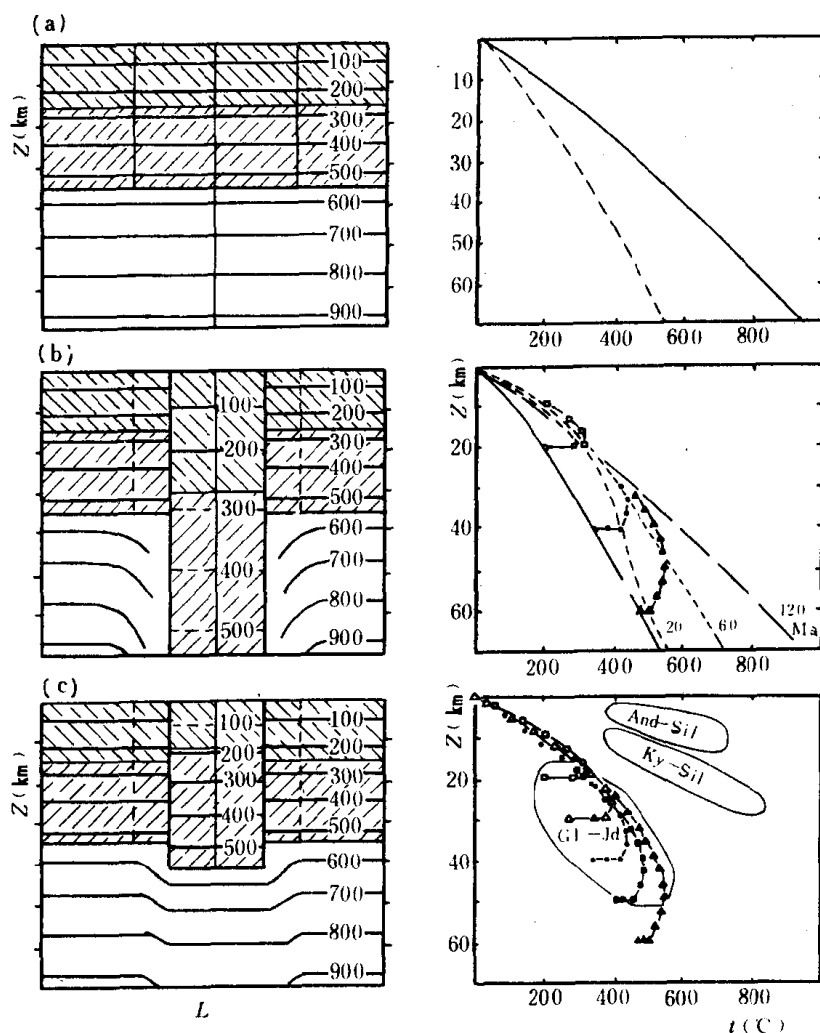


图 1-3 碰撞模式 (垂向拉伸)

(据 Thompson 等, 1981)

表示由于碰撞而增厚的陆壳地温梯度演变情况；(a) 示垂向拉伸前等温面型式 (左图) 和稳态地温梯度 (右图, 实线表示) 以及拉伸后的扰动地温梯度 (右图, 虚线表示)；(b) 示拉伸后 0Ma 的等温面型式 (左图) 和扰动地温梯度 (右图, 实线表示) 以及拉伸后 20、60、120Ma 的演变地温梯度 (右图, 虚线所示, 且 20Ma 无侵蚀, 100Ma 有侵蚀)。右图中还表示初始埋深分别为 20、40、60km 的 p - T - t 轨迹, 轨迹上时间间隔为 10Ma；(c) 示拉伸后 100Ma 的等温面型式 (左) 和 p - T - t 轨迹 (右; 初始埋深分别为 20、30、40、50 和 60km)

起的物质成分交换, 可提供温压矢量方面的资料。若为扩散环带, 可用于估测岩石的冷却速率。

(2) p - T - t 轨迹的不同段落, 即代表变质演化的不同阶段, 可用不同的方法来标定: ①变质作用早期的 p - T - t 轨迹可根据变斑晶中所捕获的包裹物来标定 (图 1-4 中 A)。这些矿物形成于峰期前某阶段, 被当时和它们平衡共生或后来继续生长的变斑晶矿物所包裹, 故得以保存; ②高峰变质条件可根据变质反应实验资料和地质温度计和压力计标定 (图 1-4 中 B); ③

退变质轨迹可根据矿物再平衡来标定(图 1-4 中 C); ④变质作用晚期的 p - T 条件可用流体包裹体测定(图 1-4 中 D)。

(3) 时间 t 的确定常用同位素年代学的方法。利用不同变质矿物的冷却年龄和相对应同位素体系的封闭温度的知识, 确定 p - T - t 轨迹上的特定点的年龄, 从而定量地查明抬升和冷却历史。

综合利用上述的不同方法可以得到相对完整的 p - T - t 轨迹。

从图 1-4 中也可看出, 在受抬升和侵蚀作用控制的环境中, 岩石的 p - T 轨迹与野外变质梯度偏离很大。沿“前进变质”的 p - T 轨迹在降压期间发生加热作用, 沿“退变质”的 p - T 轨迹在降压期间发生冷却作用。因此要强调指出, 决不能根据穿过某一变质地体的不同变质级的一些岩石的矿物组合来确立该区的 p - T - t 轨迹, 而必须根据各个样品的 p - T 轨迹来确立。

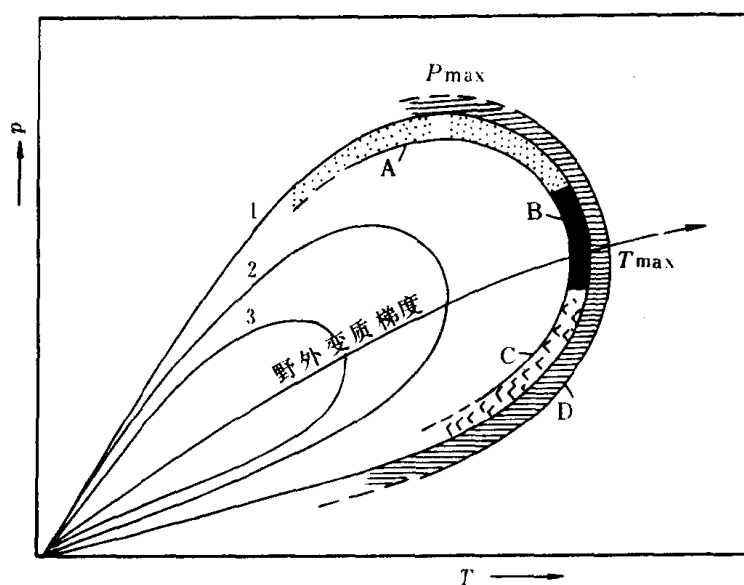


图 1-4 表示处于不同深度的单个岩石样品(1, 2 和 3)所遵循的 p - T 轨迹与野外变质梯度(由峰期变质矿物组合所指示)之间关系的压力-温度概略图解

(据 Spear 等, 1984)

A. 矿物包体在变嵌晶状主晶颗粒中被捕获的区间; B. 从地质温度和地质压力测量, 得出的高峰变质条件; C. 根据重新调整的矿物平衡得出的退化变质轨迹; D. 流体包裹体被捕获的区间

三、变质作用 p - T - t 轨迹的实际应用

从目前研究成果来看, p - T - t 轨迹的实际应用主要表现在以下几个方面:

(一) 判断地壳深部热流的演化趋势

近年来的研究表明, 至少可以建立两种“全球性”的变质作用模型: 一是变质作用在地幔热流增强的情况下发生的; 二是变质作用与陆壳因构造作用而增厚有关, 深部热流并没有明显增高。因此, 在利用变质记录来探讨地质历史时期的热流活动及其演变趋势时, 必须考

热模拟和 p - T - t 轨迹的研究成果。

(二) 探讨区域变质岩的成因和大地构造环境

关于高压—低温变质作用的研究就是一个很好的实例。按照以往的认识, 高压—低温变质带一般被作为板块俯冲带的标志, 但根据热模拟的结果, 蓝闪石-硬玉相系的变质条件在大陆碰撞型造山带发育的早期阶段是普遍存在的, 相应的矿物组合在一定的条件下也可以保存下来。为了判定蓝闪石-硬玉相系岩石的不同成因, 需要引入其他标志如原岩建造、变形样式以及用地质年代学方法或反应动力学方法来确定侵蚀速率等。欧洲地科联于 1983 年在施特拉堡举行了一次关于高压变质作用的讨论会, 题为“高压变质作用: 俯冲作用和陆壳增厚作用的标志”。在这次会议上明确提出高压—低温变质作用可以发生于多种构造环境, 不能用单一的地球动力学格局来解释。这种新的认识是变质地质学中的一个重大进展, 而 p - T - t 资料对这一认识的取得起了很大的促进作用。又如, 都城秋穗对变质相系的构造解释中, 中压相系的构造意义是不清楚的。但通过热模拟和 p - T - t 轨迹研究, 认识到大陆碰撞带是这种类型变质作用的重要环境。关于高温—低压型变质作用最近研究表明, 其构造环境也是多样化的, 不仅可以发生于岛弧区, 也可以发生于大陆碰撞带内。近期的研究强调了拉伸构造体系对此类变质作用的重要性, 太平洋区“双质变带”中的高温—低压变质带很可能是岛弧区内的拉伸作用形成的。此外热模拟和 p - T - t 轨迹的研究还有力地推动了麻粒岩成因及大地构造环境的讨论, 为麻粒岩的研究提供了新的思路。

(三) 查明造山带的构造历史和抬升历史

造山带的研究是国际固体地球科学的前沿, 造山带的抬升和冷却历史在造山带的演化中占有十分重要的位置, 是近年来国外集中研究的课题之一。在这方面的研究中, 变质作用的 p - T - t 轨迹是一种极为重要的信息来源。T. J. Dempster (1985) 对苏格兰高地达拉德岩石抬升模式的研究是一个很好的实例。他主要利用矿物同位素年龄数据恢复了该区中—高级变质岩的冷却历史, 并且引用了变质时间和变质条件等限定性资料, 在此基础上进行了热模拟, 并根据热模拟结果恢复了该区的造山运动晚期演化的历史。查明造山带的抬升和冷却历史不仅有很大的理论意义, 而且可以有助于某些变质热液型矿床的区域性远景评价工作。例如, G. N. Phillips 和 D. I. Groves (1983) 在解释西澳大利亚伊尔冈地块和皮尔巴拉地块的不同金矿成矿远景时, 所引用的主要证据之一就是这两个地块具有不同的抬升和冷却历史。他们认为, 若在高地温梯度条件下, 地壳因构造作用而增厚, 就会在抬升和侵蚀作用使压力显著降低的情况下发生热弛豫, 这显然有利于深部岩石的变质脱水和浅部岩石的减压破裂近于同时发生。伊尔冈地块具备这样条件, 又有丰富的含金源岩, 因而金矿十分发育。而皮尔巴拉地块的主要抬升期远远晚于变质高峰期, 与花岗岩的拱起有关, 在这种环境中, 深部岩石的变质脱水与浅部岩石处于减压状态的时间脱节, 因而不利于金矿的沉淀。

(四) 研究区域性构造的发育特征

F. S. Spear 等 (1984) 提出, 在热岩石就位于冷岩石上面的推覆体地区内, 上盘热岩石的 p - T - t 轨迹反映了降压期间的冷却作用, 而下盘冷岩石的 p - T - t 轨迹则显示出增压期间的加热作用。在冷岩石就位于热岩石上面的推覆体地区内, 上盘冷岩石的 p - T - t 轨迹显示降压期内的增温作用, 下盘热岩石的 p - T - t 轨迹则显示出增压期间的冷却作用。在上述两种情况下,

上盘和下盘岩石的高峰变质温度可能近于相同,因而仅仅根据高峰变质条件显然无法了解上述的构造发育过程。

应当指出,应用 p - T - t 轨迹来分析大地构造环境及其发展过程时,在许多情况下存在着“多解性”,同一地区可得出不同结论,因此,在实际工作中应对研究区进行详细地质制图,以热力学、矿物学、岩石学、同位素年代学、构造地质学、区域构造学和深部地球物理研究成果的综合分析为基础,尽可能综合利用各种标志。

四、变质作用 p - T - t 轨迹的研究现状

本世纪 60 年代后期开始对变质带热模拟,当时主要研究对象是与岩石圈板块俯冲有关的变质作用。D. P. McKenzie (1969)、E. R. Oxburgh 和 D. L. Turcotte (1970) 等成功地用岩石圈板块俯冲期间产生的瞬变热体制解释了某些环太平洋变质带的发育原因。到了 70 年代中期,热模拟的重点转向大陆碰撞作用形成的变质带。Oxburgh 和 Turcotte (1974) 以及 M. J. Bickle 等 (1975) 运用固体导热的数学理论 (Carslaw 和 Jaeger, 1947, 1959), 建立了适用于这类变质地体的一维传导热弛豫模型,奠定了研究方法的基础。England, Richardson 和 Thompson (1977, 1981, 1984) 对欧洲阿尔卑斯造山带热模拟,提出了变质作用 p - T - t 轨迹的概念和术语,正是通过对形成于特定构造环境的变质地体进行热模拟,对变质地体的地热演化和构造演化之间的关系才有了更深入地了解,使人们能够利用从变质矿物推断出的 p - T - t 轨迹来建立或检验造山带的构造模型、研究造山带的演化,或者进行区域性的构造解释。

关于区域变质作用的 p - T - t 轨迹的研究,使都城秋穗 (1961) 提出的变质相系概念得以进行重大修正,为变质岩石学资料在区域构造研究中的应用开辟了新的前景。1985 年,国际地质对比计划正式增设了第 235 号项目——“变质过程与地球动力学体制的相互关系”,该项目的宗旨是综合考虑热力学、岩石学、同位素年代学、构造地质学、区域构造学和热流研究的成果,力图将变质过程与地球动力学环境相联系,特别是致力于前寒武纪变质岩区的研究。该项目的主要任务之一,就是确定各种构造环境中的变质岩的 p - T - t 轨迹。1987 年在爱尔兰都柏林召开“变质带的演化”学术讨论会,主要探讨 p - T - t 轨迹与变质带的构造演化的关系,包括变质作用的压力、温度和时间关系的测定技术以及大地构造、热演化和变质作用间的相互关系。会后出版了“变质带的演化”专著 (1989),共有 44 个研究实例,本书是当前变质带热演化的研究现状的总结,这基本上是一个边缘学科领域,涉及岩石学、同位素年代学和大地质构造学等多种学科。1989 年第 28 届国际地质大会中突出反映了 p - T - t 轨迹的广泛应用和发展,已经运用精确的数学模拟,导出二维 p - T - t 轨迹,把热力学、构造地质和同位素年代学紧密结合起来。近来研究者都非常强调 p - T - t 轨迹和构造变形作用演化过程的成因联系,提出了 p - T - t - D (变形) 轨迹, Tuisku 和 Laajoki (1990) 通过成岩格子的研究,考虑组分因素,进行 p - T - D - X (组分) 轨迹的研究。总之, p - T - t 轨迹的研究是当前的热点。

p - T - t 轨迹的概念和研究方法引入我国后,已受到高度重视,并已初步开展了相应的研究工作。1990 年我国地质学会岩石学专业委员会等单位主办的“ p - T - t 轨迹及其在变质地质学中的应用研讨会”在天津举行,这是属于追踪国外前缘科学的一次研讨会,足见 p - T - t 轨迹研究已为广地质界所关注。我国地质构造条件有自己的特色,某些变质岩区已具有相当高的研究程度,进一步开展变质地体的热模拟和 p - T - t 轨迹研究工作是大有可为的。

第二章 热 模 拟

一、地球的一些热学性质

(一) 地球的热分布及热源

地表平均温度为 $10-20^{\circ}\text{C}$ ，而在近代火山活动区有热泉，从热泉喷出的水是在地壳内部加热的，因此地温是随深度的增加而增高。地壳中温度 ($^{\circ}\text{C}$) 随深度 (km) 变化的数值 (表 2-1) 可以投在图上得出一条曲线，称为地温梯度曲线。该曲线的斜率，称为地温梯度，即指一特定地区的温度随深度变化的速率，单位是 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图 2-1)。要注意，最初温度增高的速率是大的，但随深度增加而减小。

表 2-1 地壳中温度随深度的变化

深度 (km)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	15	60	110	150	180	210	230	250	265	275	285

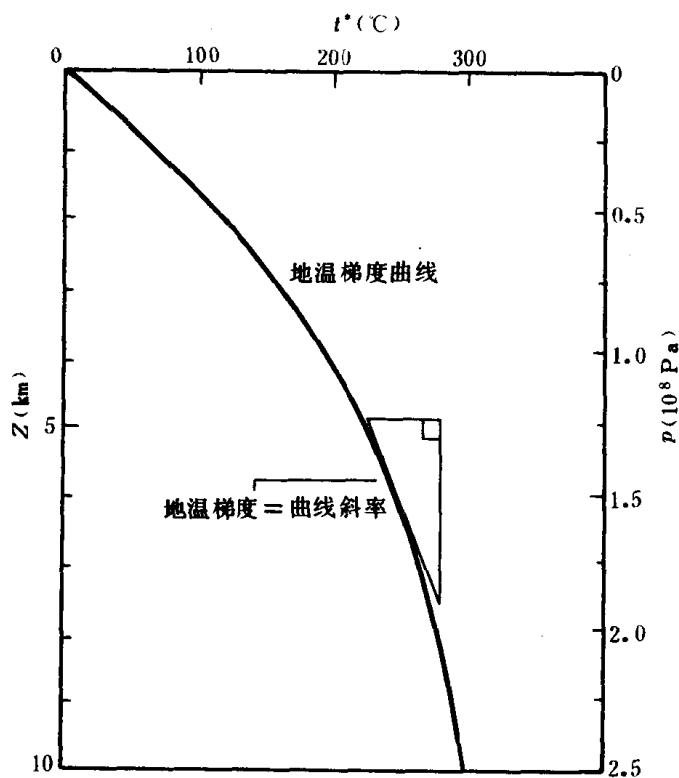


图 2-1 地壳中地温梯度曲线