

文章编号: 1000- 6524 (2002) 04- 0336- 07

## 地质事件序列与造山过程的 $pTt$ 轨迹

邓晋福, 莫宣学, 肖庆辉, 吴宗絮, 赵海玲, 罗照华, 苏尚国,  
汪 洋, 刘 翠, 赵国春, 邱瑞照

(中国地质大学, 北京 100083)

**摘 要:** 与变质作用一样, 地质事件序列亦可反演造山过程的  $pTt$  轨迹。两种独立途径反演的  $pTt$  轨迹对造山带动力学演化研究具有互补性。本文讨论了地质过程的事件性(或突发性)以及与热模拟  $pTt$  轨迹的异同。地质事件顺时针(CW)和反时针(CCW)  $pTt$  轨迹的实例及其动力学意义。

**关键词:** 地质事件序列; 造山过程;  $pTt$  轨迹

中图分类号: P542<sup>+</sup>.2; P58

文献标识码: A

### Sequence of geological events and $pTt$ paths of orogenic processes

DENG Jin\_fu, MO Xuan\_xue, XIAO Qing\_hui, WU Zong\_xu, ZHAO Hai\_ling,  
LUO Zhao\_hua, SU Shang\_guo, WANG Yang, LIU Cui, ZHAO Guo\_chun  
and QIU Rui\_zhao

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Similar to metamorphism, the sequence of geological events can also be used to trace the  $pTt$  paths of an orogenic process. The two independent approaches used for inverse modeling of  $pTt$  paths are complementary in understanding the dynamic evolution of an orogenic belt. The eventuality of geological processes, the CW- $pTt$  and CCW- $pTt$  paths of geological events and their dynamic significance are discussed in this paper.

**Key words:** sequence of geological events; orogenic processes;  $pTt$  paths

众所周知, 1984 年 England 和 Thompson 在造山带加厚陆壳地区对演化过程中的热传输(heat transfer)进行了模拟(即正演途径), Thompson 和 England(1984)用变质岩中矿物组合的方法(即反演途径)提出了区域变质作用  $pTt$  轨迹的概念。理论和方法, 并获得广泛应用(韩郁箐, 1993; 庄育勋, 1997)。由于  $pTt$  轨迹中包含了时间参数( $t$ ), 因而这一概念的

收稿日期: 2002- 05- 10; 修订日期: 2002- 08- 13

基金项目: 中国地质调查局资助项目(200113900018); 国土资源部资助项目(20001010202); 国家自然科学基金资助项目(49772155, 49973012)

作者简介: 邓晋福(1935-), 男, 教授, 博导, 岩石学专业。

提出使变质作用的研究真正步入了“动力学”的范畴。我们把变质作用  $pTt$  轨迹的理论扩展到岩浆-构造-热事件序列, 由此反演造山-深部过程的  $pTt$  轨迹, 为大陆动力学的研究提供一个有效的途径(邓晋福等, 1999, 2000a, 2000b, 2001), 并提出变质作用  $pTt$  轨迹可作为造山-深部过程的岩石学记录, 岩浆-构造-热事件序列  $pTt$  轨迹可看作造山-深部过程的地质学记录(邓晋福等, 2002)。

### 1 岩浆-构造-热事件序列的 $pTt$ 轨迹: 造山过程的地质学记录

近年来, Brown(1993, 1994) 根据造山带变质岩的  $pTt$  轨迹讨论区域变质作用成因和花岗岩岩浆的发生、分离、上升和定位(图1), 把造山带分为两种类型: 具顺时针(CW)  $pTt$  轨迹的变质带的造山带; 具反时针(CCW)  $pTt$  轨迹的变质带的造山带, 并进而指出, CW造山带地壳加厚作用在前, 地壳增温直至达峰值在后, 花岗岩在造山旋回的中期和晚期侵位; CCW造山带地壳增温在前, 地壳加厚作用在后, 花岗岩在造山旋回的早期侵位。

图1展示了两类造山带的详细过程, 它与 England 和 Thompson(1984) 的热模拟不同之处在于: ①初始地壳的热流值不是  $60 \text{ mW/m}^2$ , 而是  $75 \text{ mW/m}^2$ , 代表一种热的初始地温; ②陆壳瞬间加厚作用之后, 有 20 Ma 的时间间隔的等压升温(图1的 CW, a→b), 然后才是剥蚀抬升, 再经过 100 Ma 之后, 恢复到初始壳厚(35 km);

③增加了 CCW- $pTt$  轨迹。对于 CW 造山带来说, 以图1CW的 a→j 为例, 初始陆壳厚度 35 km, 热流值  $75 \text{ mW/m}^2$ , 瞬间加厚之后地壳厚 70 km, 这里考虑加厚之后在 50 km 深度的陆壳出现 20 Ma 时间间隔的等压升温(即 CW, a→b), 这时温度已高于过量水条件下花岗岩和玄武岩的固相线温度(GWS & BWS), 发生广泛的下地壳的混合岩化作用; 然后剥蚀抬升, 再经过 100 Ma 之后, 地壳减薄恢复到初始的 35 km 厚度。剥蚀抬升的早期为继续升温(由 b→e), 温度依次超过白云母脱水熔融(M)、黑云母脱水熔融(B)和角闪石脱水熔融[A(IAT) 岛弧拉

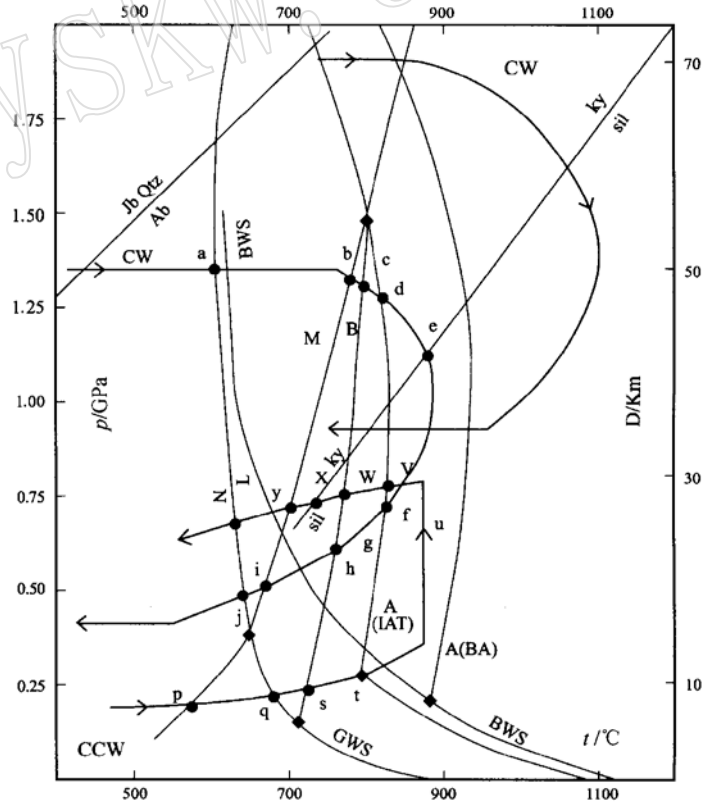


图1 造山带  $pTt$  轨迹 (据 Brown, 1993, 1994, 简化, 图例说明见正文)

Fig. 1  $pTt$  paths of the orogenic belts

斑玄武岩]曲线,在约 50~40 km 深度范围内,陆壳岩石广泛部分熔融,产生大量长英质岩浆。中期在温度达最高峰之后冷却( $f \rightarrow j$ ),导致岩浆的结晶,直至全部固结。晚期继续降温直至剥蚀抬升的结束。由上可看出,造山过程为:收缩构造产生陆壳加厚 $\rightarrow$ 等压升温导致进变质作用,直至广泛混合岩化作用 $\rightarrow$ 剥蚀抬升升温,大量长英质岩浆形成 $\rightarrow$ 剥蚀抬升降温,岩浆结晶,直至固结,退变质作用开始 $\rightarrow$ 等压降温,退变质作用大量发育。70 km 深处的陆壳过程与 50 km 处大体相同,只是热松弛的升温更高,可使碱性玄武岩组成的角闪石脱水熔融 [A(BA)]。CCW 造山带造山过程为 CCW,  $p \rightarrow z$ : ①升温,由  $p \rightarrow t$ , 进变质作用,混合岩化作用,大量岩浆的形成,依此连续地发生; ②收缩构造导致陆壳加厚作用,为等温升压过程( $u$ ); ③抬升降温( $v \rightarrow z$ ),岩浆结晶固结,退变质作用。为使  $p \rightarrow t$  升温,需要有外来热的大量供给,幔源岩浆的底侵作用是最好的机制,后者常常和地幔岩石圈的减薄作用有关,这样,在模拟时就需要在陆壳加厚时伴生有岩石圈的减薄(Brown, 1993, 1994)。

由上面的叙述可以看出,变质作用为 CW $_pTt$  轨迹的造山带,其地质事件序列为:以逆冲推覆为代表的收缩构造变形事件 $\rightarrow$ 隆升初期发生岩浆作用的花岗岩事件 $\rightarrow$ 快速隆升后造山崩塌和伴生的花岗岩事件。这样的地质事件序列同样记录了造山过程的顺时针(CW) $_pTt$  轨迹,它符合于变质作用 CW $_pTt$  轨迹,为碰撞造山带的特征。变质作用为 CCW $_pTt$  轨迹的造山带,其地质事件序列为:幔源岩浆底侵(underplating)导致陆壳熔融发生的岩浆作用和花岗岩事件 $\rightarrow$ 收缩构造变形事件 $\rightarrow$ 隆升初期发生岩浆作用和花岗岩事件 $\rightarrow$ 快速隆升后造山崩塌和伴生的花岗岩事件。这样的地质事件序列同样记录了造山过程的反时针  $pTt$  轨迹,它符合于变质作用 CCW $_pTt$  轨迹,为岛弧造山带的特征。因此,与变质作用一样,地质事件序列亦记录了相同的造山过程  $pTt$  轨迹。

## 2 地质过程的事件性(或突发性)

无疑,热模拟(如图 1)给了我们许多新的认识和新的思路。但是,自然界的地质过程常常不完全遵循上述热模拟的具体条件。另外,热模拟本身由于所取的条件不同,会得到某些不同的结果,因此,在热模拟成果应用于地质过程解释时必须注意热模拟的条件与结果之间的对应性及热模拟的条件与自然界地质过程之间的类似性和差异性。

地质作用常常表现为突发性的事件,如图 1 的剥蚀抬升是一个缓慢的连续过程,时间长达 100 Ma,图上是一条连续的曲线,热松弛早期为升温,达峰值之后,则是晚期的降温;而地质过程,如变质岩  $pTt$  轨迹所显示的,抬升是近等温的大幅度降压,几乎是一条直线,也就是说抬升是非常快速的,表现为一种突发性事件,表明快速抬升时,温度几乎不变,因此,Ar-Ar 热年代学记录的是紧接快速隆升后的降温,Ar-Ar 冷却年龄就不代表地壳抬升过程的年龄,而是抬升事件结束的年龄(邓晋福等, 1998)。

自然界造山作用经历的过程常常比热模拟的时间(120 Ma)短,如燕山造山带南大岭玄武岩喷发(188 Ma)到造山带崩塌的变质核杂岩-造山后过碱性花岗岩的形成(118 Ma),只有约 70 Ma,按图 1 的预示,只有一次长英质岩浆的侵入活动,然而燕山造山带在 70 Ma 期间,有  $J_1$   $J_2$   $J_3$   $K_{1(1)}$   $K_{1(2)}$  5 次岩浆侵入事件。

南大别超高压(UHP)变质带内为何没有同造山和后造山的花岗岩事件?按热模拟结果,碰撞造山带应发育同造山和后造山花岗岩类。但是,需注意时间因素,热模拟(England

& Thompson, 1986) 表明, 对于经逆冲推覆的收缩构造变形之后被深埋于 70 km 处的陆壳由于热松弛的升温, 要达到黑云母脱水熔融温度(产生大量长英质岩浆), 需要经历埋深约 40~ 60 Ma 的时间间隔, 但是, 大别超高压岩石形成与折返的时间间隔只有 10~ 20 Ma, 还达不到白云母脱水熔融曲线时, 就早已折返了, 因此, 没有达到同造山花岗岩形成所需要的时间要求, 就不会产生同造山花岗岩事件。同理, 由于埋深的时间短, 升温的幅度很小, 折返时大体按深俯冲时的地温原路返回, 所以没有产生后造山的花岗岩的条件(邓晋福等, 2000b)。

### 3 地质事件顺时针(CW) $pTt$ 轨迹

以雅鲁藏布江缝合带-拉萨地块碰撞后陆内造山事件为例, 阐述地质事件顺时针  $pTt$  轨迹如下:

#### 3.1 碰撞后陆内造山构造- 岩浆事件

在 40~ 50 Ma 时印度与亚洲碰撞, 于渐新世在冈底斯带发育一次白云母花岗岩和二云母花岗岩侵入活动, 典型岩区有谢通门、确哇、雪古拉、羊八井、波密和察隅等, 其同位素年龄主要为 23~ 35 Ma(邓晋福等, 1994, 1996; 刘国惠等, 1990)。在大致同一时期内, 在该花岗岩带南侧, 主要在雅鲁藏布江缝合带位置, 发育了一套以大竹卡组为代表的巨厚磨拉石堆积, 其形成时代或归于渐新世-中新世(潘桂棠等, 1990), 或归于始新世-渐新世(肖序常等, 2000; Mercier, 1987)。在花岗岩带和磨拉石堆积带之间, 发育一套逆冲推覆构造, 蛇绿岩推覆体向南逆冲到地台型沉积的顶上(常承法等, 1982); 或冈底斯岩基向日喀则弧前盆地逆冲, 称为冈底斯逆冲系, 时限为晚渐新世-中新世(Yin, 1994)(转引自肖序常等, 2000)。北侧的上叠陆块和强过铝花岗岩带、中间的向南逆冲推覆构造系以及南侧的下叠前陆和磨拉石带的空间展布, 都具有一个典型的陆内俯冲造山带的结构样式。冈底斯逆冲系之后的仁布-泽当逆冲系是南倾的反向逆冲系, 它使大竹卡组堆积的前陆盆地闭合(肖序常等, 2000), 暗示陆内俯冲造山过程的结束。

#### 3.2 陆内造山晚期的隆升- 岩浆事件

冈底斯地区中新世芒乡组和中新世-上新世乌郁群均发育火山喷发, 为流纹岩-英安岩-安山玄武岩及其火山碎屑岩(西藏自治区地矿局, 1993, 转引自肖序常等, 2000)。麻江地区火山岩的同位素年龄 15.8~ 10.1 Ma, 主要为 10~ 13 Ma(Coulon *et al.*, 1986, 转引自刘嘉祺, 1999), 相当于中-晚中新世。藏南 EW 向拉伸作用在第四纪活动是明显的, 冈底斯带的 NS 向塔格霍拉地堑中最早的沉积物属上新世, 表明拉伸构造在上新世已是活动的。由此, Mercier 等(1987)推测, 从挤压状态到拉伸状态的转变可能发生在晚中新世时期, 西藏的正断层作用始终被认为是西藏的高地形产生的结果。念青唐古拉剪切带的形成直接与羊八井地堑的形成有关, 剪切带运动学 U-Pb 和 Ar-Ar 定年以及裂变径迹冷却年龄的详细研究(Pan & Kidd, 1992) 提出藏南高原伸展作用开始于晚中新世(8 Ma  $\pm$  3 Ma)。

由前面讨论的造山事件的性质及其时间序列可以看出, 这是一个典型的与碰撞作用有关的造山带的顺时针(CW)  $pTt$  轨迹。

#### 4 地质事件反时针(CCW) $pTt$ 轨迹

以燕山造山带为例。燕山造山带发育 5 次岩浆侵入事件和 4 次逆冲推覆构造变形事件。 $J_1$   $J_2$   $J_3$   $K_{1(1)}$  幕的地质事件序列均以岩浆活动开始, 随后逆冲推覆构造变形和隆升剥蚀结束, 以角度不整合面与另一幕的地质事件序列分隔开。上述每一幕的事件序列均指示反时针 CCW- $pTt$  轨迹的造山过程。

以  $J_1$  为例, 开始为南大岭组玄武岩喷发, 随后为窑坡组煤系沉积和九龙山组类磨拉石堆积, 然后是褶曲和逆冲推覆构造变形, 与其相伴生的是以硬绿泥石- 十字石- 石榴石- 蓝晶石- 滑石为特征的西山变质带, 它是近地表的岩石由于收缩构造变形被深埋的岩石学记录, 最后是隆升剥蚀结束了  $J_1$  造山事件, 造成与  $J_2$  髻髻山组火山岩之间区域分布的角度不整合。这是一个典型的反时针(CCW)  $pTt$  轨迹的幕式造山过程, 具有类似于图 1 的 CCW- $pTt$  轨迹。

$J_2$   $J_3$  和  $K_{1(1)}$  幕均类似  $J_1$  幕, 差异在于没有硬绿泥石出现的变质作用发生。 $K_{1(2)}$  (118~120 Ma) 的正断层大量发育和 A 型花岗岩事件才指示燕山造山带进入后造山阶段(邓晋福等, 2002)。由于自然界地质过程常常有多次幕式造山事件序列, 每一幕具有相类似的 CCW- $pTt$  轨迹几何图象(图 1), 但由于每幕之间的时间间隔太短, 以致不能使它恢复到开始造山运动之前的状态(主要包括热结构和地壳厚度), 整个造山过程的 CCW- $pTt$  轨迹将是一个螺旋型上升的 CCW- $pTt$  轨迹。

#### 5 讨论

(1) 变质作用与事件序列两种反演途径所获得的  $pTt$  轨迹对于理解造山带动力学演化有互补性。区域变质作用特别是中、深变质作用常常发生于剥露于地表的造山带的中、下部, 在这样的地段, 造山带较浅部位的构造变形、岩浆活动(特别是火山活动)的许多记录保存极不完整或已缺失, 因此, 变质作用  $pTt$  轨迹是了解造山带动力学演化的最好途径。相反, 岩浆-构造-热事件序列常常在造山带的上部保存完整, 这些地段常常见不到大面积出露的中、深区域变质作用发育的地区, 这时, 事件序列的  $pTt$  轨迹是了解造山带动力学演化的最好途径。除了在不同地段上研究造山带动力学演化的互补性以外, 还可从这两种途径获得的  $pTt$  轨迹得到造山带在深度维上的动力学演化特征。这样, 两种途径的有机结合, 有可能获得造山带在三维空间上的动力学演化图像。

(2) 一般来说, 与变质作用一样, 地质事件 CW 和 CCW 的  $pTt$  轨迹分别为碰撞和大陆边缘造山带所特有, 但是 CW 和 CCW 的  $pTt$  轨迹亦可发育于同一个造山带的不同地段或不同演化阶段。例如, 中国东部燕山期华北是 CCW 型, 下扬子为 CW 型, 华南的内带为 CW 型, 外带(沿海)则是 CCW 型, 下扬子地段发育钾玄岩(SH)系列和高钾钙碱(HKCA)系列的实质是因为陆壳加厚作用在前。

(3) 不管 CW 或 CCW 造山带, 收缩构造变形导致陆壳加厚作用之后, 必伴随造山后的伸展崩塌, 热模拟的结果、变质作用的  $pTt$  轨迹均展示这种必然性。同样, 岩浆-构造-热事件序列展示的  $pTt$  轨迹亦如此, 造山后的伸展崩塌的事件主要包括: 变质核杂岩的形成,

大量正断层的发育, A 型花岗岩的发育及断陷盆地的发育。

## Reference

- Brown M. 1993.  $P-T-t$  evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism[J]. *J. Geol. Soc. London*, 150: 227~ 241.
- Brown M. 1994. The generation, segregation, ascend and emplacement of granite magma; the migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens[J]. *Earth Sci. Rev.*, 36: 83~ 130.
- Chang Chengfa, Pan Yusheng, Zheng Xilan, *et al.* 1982. Tectonics of Tibet Plateau [M]. Beijing: Sci. Press, 20~ 60 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Dai Shengqian, Wu Zongxu, *et al.* 2000 b. Petrological structure and thermal structure of the Dabie orogenic belt and its geological implications [J]. *Acta Geol. Sinica*, 74(3): 206~ 215 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Lai Shaocong, Zhao Hailing, *et al.* 1994. Intracontinental orogenic igneous rock pair and orogenic processes [A]. Ouyang Ziyuan. *New Development of Mineralogy, Petrology and Geochemistry Studies (1)* [C]. Lanzhou Univ. Press, 134~ 135 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 1999. Igneous petrotectonic assemblage and crust-mantle metallogenic system [J]. *Earth Sci. Front.*, 6(2): 259~ 270 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 2001. Inhomogeneity of the lithosphere of the Tibetan Plateau and implications for geodynamics [J]. *Sci. in China (Series D)*, 44(supp.): 56~ 63.
- Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Hailing, *et al.* 2000 a. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic deep processes in East China [J]. *Geol. Rev.*, 46(1): 41~ 48 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, *et al.* 1998. Formation and evolution of lithosphere-atmosphere system [A]. Ouyang Ziyuan. *Review of Researches on Mineralogy, Petrology and Geochemistry* [C]. Beijing: Atom. Energy. Press, 97~ 104 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. Continental Roots-plume Tectonics of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1~ 110 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Wang Yang, Zhao Hailing, *et al.*, 2002. The  $pTt$  paths of magmatic-tectonic-thermal event sequences and orogenic deep processes (chapt. 6) [A]. Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, *et al.* *The Ways of Investigation on Granitoids* [C]. Beijing: Geol. Pub. House, 121~ 127 (in Chinese).
- England P C & Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism. I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust [J]. *J. Petrol.* 25(4): 894~ 928.
- England P C & Thompson A B. 1986. Some thermal and tectonic models for crustal melting in continental collision zones [A]. Coward & Ries. *Collision Tectonics* [C]. *GSA Spec. Pub.*, 19: 83~ 94.
- Han Yujing. 1993.  $P-T-t$  paths of metamorphism [M]. Wuhan: China Univ. Geosci. Press, 1~ 136 (in Chinese).
- Liu Guohui, Jin Chengwei, Wang Fubao, *et al.* 1990. *Metamorphic and Igneous Rocks of Tibet* [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 20~ 30 (in Chinese).
- Liu Jiaqi. 1999. *Volcanoes in China* [M]. Beijing: Sci. Press, 1~ 193 (in Chinese).
- Mercier J L, Armijo R, Tapponnier P, *et al.* 1987. Change from late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision [J]. *Tectonics*, 6: 275~ 329.
- Pan Guitang, Wang Peisheng, Xu Yaorong, *et al.* 1990. *Cenozoic Tectonic Evolution of Tibet Plateau* [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 6~ 24 (in Chinese).
- Pan Y, Kidd W S F. 1992. Nyainqentanglha shear zone: A late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan Plateau [J]. *Geol.*, 20: 775~ 778.
- Thompson A B & England P C. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism. II. Their inference and interpretation from using mineral assemblages in metamorphic rocks [J]. *J. Petrol.*, 25(4): 929~ 955.
- Xiao Xuchang, Li Tingdong. 2000. *Tectonic Evolution and Uplift Mechanism* [M]. Guangzhou: Guangdong Sci. Tech. Press,

1~ 313 (in Chinese).

Zhuang Yuxun. 1997. Review on the researches of  $pTt$  paths of metamorphism and geothermobarometer [A]. Zhang Bingxi, Hong Dawei, Wu Xuazhi. Methods of Study on Lithosphere [C]. Beijing: Atom. Energ. Press, 137~ 150 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 常承法, 潘裕生, 郑锡澜, 等. 1982. 青藏高原地质构造[M]. 北京: 科学出版社, 20~ 60.
- 邓晋福, 戴圣潜, 吴宗絮, 等. 2000b. 大别造山带岩石学结构和热结构及其地质意义[J]. 地质学报, 74(3): 206~ 215.
- 邓晋福, 赖绍聪, 赵海玲, 等. 1994. 青藏陆内造山火成岩成对性与造山过程[A]. 欧阳自远. 中国矿物岩石地球化学研究新进展(1)[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 134~ 135.
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 1999. 火成岩构造组合与壳幔成矿系统[J]. 地学前缘, 6(2): 259~ 270.
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 2001. 青藏高原岩石圈不均一性及其动力学意义[J]. 中国科学(D辑), 31(增刊): 55~ 60.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 2000a. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山- 深部过程[J]. 地质论评, 46(1): 41~ 48.
- 邓晋福, 赵海玲, 罗照华, 等. 1998. 岩石圈- 软流圈系统的形成与演化[A]. 欧阳自远. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望[C]. 北京: 原子能出版社, 97~ 104.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根- 柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1~ 110.
- 邓晋福, 汪洋, 赵海玲, 等. 2002. 岩浆- 构造- 热事件序列  $pTt$  轨迹与造山- 深部过程[A]. 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[C]. 北京: 地质出版社, 121~ 127.
- 韩郁菁. 1993. 变质作用  $P-T-t$  轨迹[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~ 136.
- 刘国惠, 金成伟, 王富宝, 等. 1990. 西藏变质岩及火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 20~ 30.
- 刘嘉祺. 1999. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1~ 193.
- 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等. 1990. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 6~ 24.
- 肖序常, 李廷栋. 2000. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州: 广东科技出版社, 1~ 313.
- 庄育勋. 1997. 变质作用  $pTt$  轨迹及矿物地质温压计研究的评述[A]. 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志. 岩石圈研究的现代方法[C]. 北京: 原子能出版社, 137~ 150.