

文章编号: 1000- 6524 (2002) 04- 0356- 07

陆- 陆碰撞造山带中压型变质作用的 pT 轨迹

——以南秦岭佛坪地区为例

魏春景, 张翠光

(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 依据石榴石的环带特征反演了南秦岭造山带中压型变质作用的 pT 轨迹, 表明石榴石的环带记录了峰期变质前的温压条件递增过程, 其最高温度与最大压力一致, 这一过程可能与地壳的持续加厚过程相对应。峰期变质以后即出现有构造作用参与的快速抬升过程, pT 轨迹表现为 ITD 型。这一研究可以加深人们对造山带发生中压型变质作用过程的理解。

关键词: pT 轨迹; 中压变质作用; 南秦岭造山带
中图分类号: P554 **文献标识码:** A

pT path of medium pressure metamorphism of continental collision orogenic belt —exemplified by the southern Qinling orogenic belt

WEI Chun_jing and ZHANG Cui_guang

(School of Earth and Space Sciences, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: On the basis of garnet zonation, a pT path is inversely modeled for medium pressure metamorphism of the southern Qinling orogenic belt. The path indicates that the garnet zonation recorded the pT increasing process before the metamorphic peak, and that the maximum temperature was coincident with the maximum pressure in the process, probably corresponding to a continuous crustal thickening process. Following the metamorphic peak, a rapid uplift accompanied by tectonic processes took place, resulting in a pT path of ITD type. The present study is helpful to understanding the medium pressure metamorphic process of the continental collision orogenic belt.

Key words: pT path; medium pressure metamorphism; southern Qinling orogenic belt

收稿日期: 2002- 06- 04; 修订日期: 2002- 08- 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40172031); 教育部骨干教师资助项目

作者简介: 魏春景 (1962-), 教授, 主要研究变质作用。

1 引言

England & Richardson(1977)、England & Thompson(1984)以一维热模型为基础,讨论了地壳加厚区区域变质作用的影响因素和演化过程,提出了变质作用 pTt 轨迹的概念。这些学者认为由于“瞬间的”构造运动引起地壳加厚,产生热扰动,岩石在来不及受热的情况下就达到了很大的深度(图1)。最初的20 Ma为剥蚀停滞期,地壳内的岩石等压加热(IBC)。此后,加厚地壳开始遭受剥蚀,使到达深处的岩石从最大压力处回返上升,由于持续的热松弛作用,使岩石回返过程中(压力下降)温度上升,达到峰期温度(T_{max}),以后温度、压力都开始降低,直至达到地表。由于变质反应受温度的影响最明显,所以最后岩石中记录的一般是 T_{max} 处的峰期状态。这一模型表明地壳加厚区变质作用是在岩石回返或抬升过程中发生的,抬升速度和热松弛的速度是制约岩石变质程度及类型的主要因素。

Ruppel & Hodges (1994) 基于二维热模型的研究,对该一维热模型的假设和结果进行了挑战,认为同逆冲阶段(synthrusting)的 pT 轨迹受岩石埋藏速度的控制,紧随逆冲作用结束就开始剥蚀(没有剥蚀停滞期),剥露(unroofing)的速度和机制对岩石所能达到多大的峰期温度和 pT 轨迹的形状有很大影响。两个模型相似的结论是: pT 轨迹都是顺时针的;峰期变质条件是在岩石回返过程中达到的。但总的来说,依据二维模型所得的 pT 轨迹形状与一维模型不同(图1)。依据一维热传递和大陆地壳逆冲模型模拟的逆冲断层下部岩片的 pT 轨迹由粗实线 A 表示(Spear, 1995);锯齿状细实线表示地壳瞬间加厚后的地热梯度,地热梯度随时间的演化由虚线表示,数字20~100表示地壳加厚以后的时间(Ma);原始地壳厚度为35 km,从逆冲结束到剥蚀开始的时间滞后为20 Ma,抬升速度为0.35 mm/年,岩石的热导率 $k = 2.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$,壳幔交界处的热流量 $Q^* = 30 \text{ mW m}^{-2}$,岩石体内部的热增量 $A = 2.0 \mu\text{W m}^{-3}$; t_{∞} 是在地壳加厚以后无限长的时间内达到的假象稳态地热梯度,由于抬升和剥蚀作用使地壳减薄,这一地热梯度是不可能达到的。依据二维热模型模拟的,位于逆冲断层以下10 km处岩石体所经历的 pT 轨迹由粗实线 B 表示(Ruppel & Hodges, 1994),假设逆冲断层倾角 45° ,逆冲速度2 mm/年,逆冲持续时间15 Ma,剥顶速度为1 mm/年,持续30 Ma,初始地热梯度为10.4 K/km。右下部 Al_2SiO_5 多型变体相图引自 Holdaway(1971)。究竟哪一种模型的结果更接近实际的变质过程,目前尚无论及。就影响

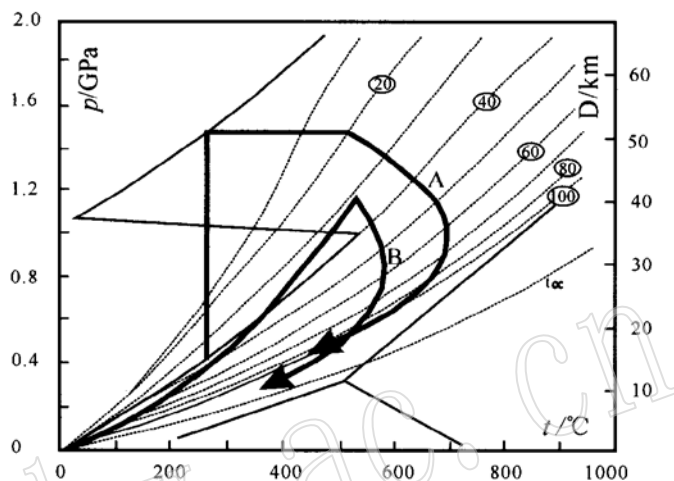


图1 依据一维和二维热模型模拟的 pT 轨迹

Fig. 1 pT paths based on one-dimensional (coarse solid line A) and two-dimensional thermal models (coarse solid line B)

来说,似乎一维模型的结果更为广泛 (Spear, 1995; 董申保等, 1997; 程裕淇等, 1998), 很多岩石学家在反演变质作用的 pTt 轨迹时不同程度地受这一模型的限制。

笔者在研究南秦岭造山带的变质作用时, 根据石榴石环带特征反演了其 pTt 轨迹, 所得结果与二维模型比较接近, 但石榴石环带所记录的递增变质过程代表地壳的加厚过程, 峰期变质温度与最大深度一致, 与一维模型结果相差较大。本文试图对碰撞造山过程中变质作用的影响因素等做一简要讨论。

2 南秦岭造山带变质作用的 pT 轨迹

南秦岭造山带位于商-丹和勉-略两条缝合带之间, 其变质地层以下古生界为主, 岩性主要为变质泥质岩、大理岩、石英岩夹少量的变质基性岩和长英质片麻岩等。变质作用可分为两期: 早期以佛坪地区为中心出现递增变质带, 由低向高依次出现绿片岩相、绿帘角闪岩相、低角闪岩相 (十字石-蓝晶石带) 和高角闪岩相 (夕线石-钾长石带), 局部地区达到麻粒岩相 (出现二辉麻粒岩)。绿片岩相-低角闪岩相为中压相系, 地热梯度约为 $17\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 而高角闪岩相到麻粒岩相为低压相系, 地热梯度约为 $25\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Wei Chun-jing *et al.*, 1999)。用锆石 U-Pb 法测得这期变质作用的时代为 $220\sim 270\text{ Ma}$ (杨崇辉等, 1999)。晚期为绿片岩相动力变质作用, 与强烈韧性变形有关, 在区内分布非常广泛, 时代可能为晚中生代-早新生代 (Zhang Guowei *et al.*, 1996)。

为确定早期中压型变质作用的 pT 轨迹, 在十字石-蓝晶石带中选择一蓝晶石-石榴石二云片岩, 其矿物组成为蓝晶石 5%、石榴石 10%、斜长石 20%、黑云母 20%、白云母 15% 和石英 30%, 各种矿物的成分见表 1。其中石榴石一般 $3\sim 5\text{ mm}$, 包裹有少量的石英及黑云母等, 石榴石具有明显的环带 (图 2), 表现为从核部向边部 X_{Mg} 含量

升高, X_{Mn} 含量降低, 在接近边缘 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ 处, X_{Mn} 明显升高。在石榴石成分剖面的绝大部分 (约 90%), X_{Ca} 变化不大, 但在接近边缘 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ 处, X_{Ca} 明显降低。从石榴石核部到边部, X_{Fe} 有增加的趋势。很多学者如 Spear (1989) 研究认为, 随着变质程度增加, 石榴石的 Mg 含量增加, Mn 含量降低。因此, 该石榴石晶体的绝大部分应该记录一个前进变质作用过程。石榴石边部 Mn 含量的反弹, 可能与扩散作用有关。因此可假设石榴石次边部成分与基质中的云母、斜长石和蓝晶石等平衡, 计算峰期变质条件。根据石榴

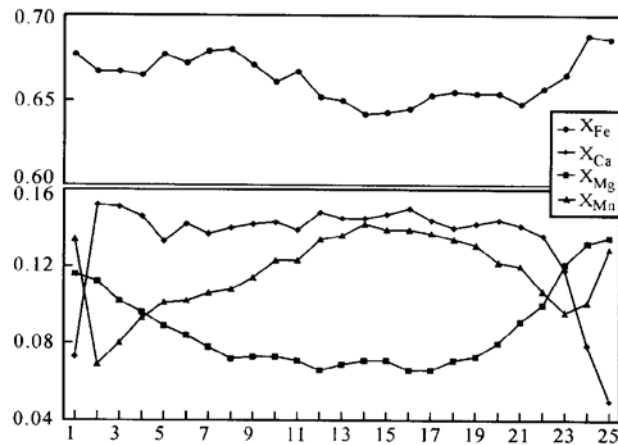


图 2 南秦岭造山带蓝晶石-石榴石二云片岩中石榴石颗粒的成分环带。

Fig. 2 Compositional zonation of garnet in kyanite-garnet two-mica schist from southern Qinling orogenic belt.

环带点 1 开始于颗粒左上, 点 25 中止于颗粒右下, 颗粒直径 2.52 mm , 分析点距 0.105 mm

表 1 南秦岭造山带蓝晶石- 石榴石二云片岩中主要变质矿物的电子探针成分分析 $w_B/\%$
 Table 1 Compositions of major metamorphosed minerals in kyanite_garnet two_mica schist from southern Qinling orogenic belt

矿物分析点	石榴石				黑云母	白云母	斜长石	蓝晶石
	R1	R2	R3	R4	1	1	1	1
SiO ₂	38.29	38.12	38.23	38.18	35.68	46.42	64.66	37.71
TiO ₂	0.07	0.36	0.25	0.02	2.56	0.80	0.05	0.00
Al ₂ O ₃	20.18	20.60	20.39	20.59	17.63	34.91	22.64	61.36
FeO	29.60	28.85	29.42	29.26	18.15	0.95	0.08	0.27
MnO	3.53	3.94	4.59	4.84	0.06	0.00	0.00	0.00
MgO	3.14	2.55	2.43	2.33	11.47	1.26	0.11	0.00
CaO	5.12	5.42	5.48	5.51	0.04	0.04	4.12	0.03
Na ₂ O	0.00	0.13	0.08	0.17	0.08	1.26	8.75	0.04
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	10.12	10.84	0.34	0.01
总量	99.93	99.97	100.87	100.90	95.79	96.48	100.75	99.42
Si	3.063	3.050	3.041	3.033	5.403	6.129	2.830	1.023
^{IV} Al	0.000	0.000	0.000	0.000	2.597	1.871	1.167	1.961
^{VI} Al	1.901	1.941	1.910	1.926	0.547	3.557	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.099	0.096	0.098	0.097	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.004	0.022	0.015	0.001	0.292	0.079	0.002	0.000
Fe ²⁺	1.881	1.834	1.859	1.846	2.298	0.105	0.003	0.006
Mg	0.374	0.304	0.288	0.276	2.589	0.248	0.007	0.000
Mn	0.239	0.267	0.309	0.326	0.008	0.000	0.000	0.000
Ca	0.439	0.465	0.467	0.469	0.006	0.006	0.193	0.001
Na	0.000	0.020	0.012	0.026	0.023	0.323	0.743	0.002
K	0.000	0.000	0.000	0.000	1.955	0.826	0.019	0.000
X _{Ca}	0.150	0.162	0.160	0.161				
X _{Fe}	0.641	0.639	0.636	0.633				
X _{Mg}	0.128	0.106	0.099	0.095				
X _{Mn}	0.081	0.093	0.105	0.111				

由北京大学造山带与地壳演化重点实验室分析。

石- 黑云母温度计 (Ferry & Spear, 1978; Perchuk & Lavent'eva, 1983) 和石榴石- 斜长石 - Al₂SiO₅- 石英组合的地质压力计 (Newton & Haselton, 1981; Hodges & Crowley, 1985), 计算平衡温度为 590~ 595 °C, 压力为 0.92~ 0.97 GPa。根据 Spear 等 (1983, 1987) 提出的 Gibbs 方法, 以石榴石的环带特征计算了这一岩石的 pT 轨迹 (计算时考虑了质量平衡方程), 其结果见图 3 中 AB 段。显然, 石榴石的环带变化记录了一个温压条件递增的过程, 并且其峰期温度与最大压力一致。峰期变质以后岩石中没有确切的记录, 其可能的轨迹有 3 种:

(1) 轨迹 BC 代表与前进变质过程相似的地热体制下、相对缓慢的抬升过程, 即岩石的回返速度与由于热传导导致岩石冷却的速度相当。这种过程可能出现于洋壳俯冲带中 (Ernst, 1988), 而在陆- 陆碰撞造山带中是不可能的。

(2) 轨迹 BE 代表岩石在相对缓慢的抬升过程中 (一般与剥蚀作用有关) 受扰动的地热体制向稳态地热体制松弛引起岩石在抬升过程中加热达到峰期温度, 与图 1 中两个模型的回返轨迹相似。一般来说如果岩石经历了这一过程, 其峰期温度状态必然会被记录下来

(Thompson *et al.*, 1984, Spear, 1989), 这与本区的实际观测不符。

(3) 轨迹 BD 代表有构造作用参与的快速抬升过程 (ITD) (Thompson *et al.*, 1987)。造山带中的加厚地壳区由于重力均衡作用不仅受到剥蚀, 而且经常出现伸展滑脱 (Mattauer, 1986), 因此, 在碰撞造山带中这种有构造作用参与的快速抬升是普遍的。伴随这种快速抬升, 岩石中可能出现后成合晶结构, 这在本区的麻粒岩和高角闪岩相的长英质片麻岩和角闪岩中很常见, 因此 BD 段是本区变质岩石最可能经历的过程。

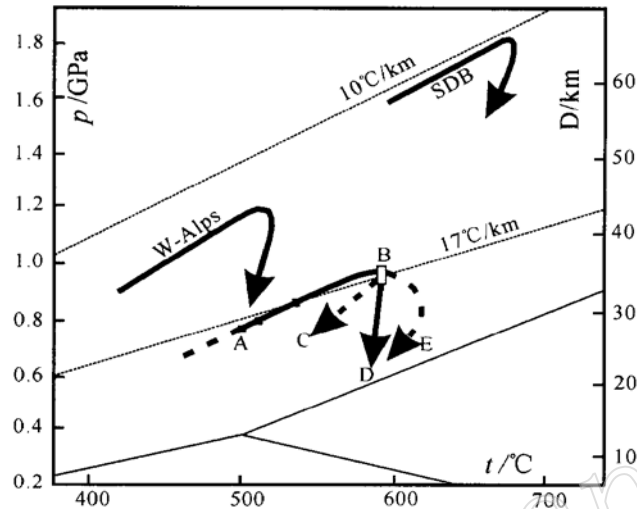


图 3 南秦岭造山带蓝晶石-石榴石-二云片岩的 pT 轨迹 (ABD)

Fig. 3 pT path of kyanite-garnet two-mica schist from southern Qinling orogenic belt

W-Alps 为西阿尔卑斯蓝片岩的 pT 轨迹 (Ernst, 1988); SDB 为南大别高压片麻岩的 pT 轨迹 (魏春景等, 1997)

3 讨论与结论

南秦岭造山带中压型变质作用的 pT 轨迹的形态与根据一维热模型正演模拟的轨迹相差很大, 与二维热模型的轨迹比较接近, 说明后者更接近于实际的地质过程。但与这二者不同的是本区中压型变质作用的最大压力与峰期温度一致, 石榴石的环带记录峰期变质前的温压条件递增过程, 这一过程可能对应于地壳的叠瓦状加厚过程, 说明这种中压相系变质作用是在地壳的加厚过程中实现的, 相应的地热梯度约为 $17\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 也是在地壳持续的加厚过程中维持的, 而不是在地壳加厚以后 (甚至经过 20 Ma 的剥蚀停滞期) 的抬升过程中达到的。加厚以后的抬升过程常有构造作用参与, 比单纯受剥蚀作用引起的抬升快得多, pT 轨迹表现为 ITD 型, 这与 England 等 (1984) 的一维热模型结果很不相同。对此笔者认为一维热模型中存在的一个重要问题是对地壳的加厚和回返过程时间的假设可能与实际过程相差甚大。

首先, 他们假设引起地壳加厚的构造作用是在瞬间完成的, 未考虑地壳加厚、岩石埋深过程中的热效应, 客观地说这种假设对任何地质环境来说都是不可能的。岩石的埋深速度最快的可能发生在洋壳俯冲带中, 可达到每年数厘米 (Mattauer, 1986; Ruppel, *et al.* 1994)。洋壳的快速俯冲过程并不是导致洋壳岩石在未发生任何变质作用的情况下就达到了很大的深度, 而是出现从沸石相 \rightarrow 葡萄石和绿纤石相 \rightarrow 蓝片岩相 \rightarrow 榴辉岩相的一系列变化, 这种高压型变质作用是伴随持续的俯冲过程发生的 (Ernst, 1988), 相应的地热梯度为 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。相对而言, 陆壳俯冲或碰撞的速度要慢得多, 一般为每年几毫米 ($1\sim 5\text{ mm}$) (Ruppel *et al.* 1994)。如果假设陆壳的下冲速度为 $5\text{ mm}/\text{年}$, 逆冲断层倾角为 30° ($\sin 30^{\circ} = 0.5$), 那么地表岩石需约 16 Ma 达到地下 40 km 。这与一次区域变质反应的时间量度 (约

10 Ma)(Spear, 1995)是完全可以对比的。因此假设相对慢得多的陆壳加厚过程中没有热效应是不合理的。另外导致岩石埋深的构造作用不是匀速的,而是“幕”式的(episodic),伴随这种“幕”式构造作用的热演化可能更为复杂。

其次,在一维热模型中,假设地壳加厚以后出现约 20 Ma 的剥蚀停滞期,这种假设也不适合于任何地质环境。正如 Spear (1995)指出这种假设是为了在地壳加厚区出现蓝晶石-夕线石型中压相系变质作用,否则变质温度和对应的地热梯度会低得多。

第三,在一维热模型中假设剥蚀 35 km 厚的地壳需要 50~200 Ma(0.175~0.7 mm/年),这一速度可能比实际过程慢得多。在不同的造山带中剥蚀速度可能相差很大,不同学者的估计值也很不相同。Ruppel *et al.* (1994) 的二维模型中所用的剥蚀速度一般为 1 mm/年。另外,造山带中不仅出现剥蚀作用,而且经常出现伸展滑脱作用,这种构造剥露的速度要比剥蚀作用快得多(Thompson *et al.*, 1987; Ruppel, *et al.* 1994)。因此造山带中岩石的剥露速度可以比其埋深速度快,南秦岭地区的 pT 轨迹就证明这一点。

本文研究的重要地质意义在于对造山带发生中压型变质作用过程的认识。伴随地壳的加厚过程出现中压型变质作用与伴随洋壳或陆壳俯冲发生高压型变质作用的机制是类似的,它们 pT 轨迹的基本形状也相似(图 3),其主要差别在于由一系列峰期条件连线得到的野外梯度[即 Miyashiro (1994)的变质相系]不同。由此看来,变质相系仍然是区分不同地质环境的重要标志。另外本文的研究结果表明,造山带中压变质岩石的定年可以大致反映碰撞作用的年代,而不是像一维热模拟结果那样相差 60~80 Ma。

Reference

- Cheng Yuqi, Zhuang Yuxun, Shen Qihan. 1998. Metamorphism: review and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 5(4): 257~265 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shenbao, Wei Chunjing. 1997. Some recent advances in metamorphic geology[J]. Acta Petrologica Sinica, 13(3): 274~288 (in Chinese with English abstract).
- England P C, Richardson S W. 1977. The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments[J]. J. Geol. Soc. London, 134: 201~213.
- England P C, Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, Part I: heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. J Petrol., 25: 894~928.
- Ernst W G. 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist $P-T$ paths[J]. Geology, 16: 1081~1084.
- Ferry J M, Spear F S. 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 66: 113~117.
- Hodges K V, Crowley P D. 1985. Error estimation and empirical geothermo-barometry for pelitic systems[J]. Am. Mineral., 70: 702~709.
- Holdaway M J. 1971. Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram[J]. Am. J. Sci., 271: 97~131.
- Mattauer M. 1986. Intracontinental subduction, crustal-mantle decollement and crustal stacking edge in the Himalayas and other collision belts[A]. Collision Tectonics[C]. Geological Society Special Publications, 19: 37~50.
- Miyashiro A. 1994. Metamorphic Petrology[M]. UCL Press.
- Newton R C, Haselton H T. 1981. Thermodynamics of the garnet-plagioclase- $Al_2Si_2O_5$ -quartz geobarometer[A]. Navrotsky A, Wood B J. Thermodynamics of Minerals and Melts. Advances in Physical Geochemistry[C]. New York: Springer Verlag, 2: 129~145.

- Ruppel C, Hodges K V. 1994. Pressure- temperature- time paths from two-dimensional thermal models: prograde, retrograde, and inverted metamorphism[J]. *Tectonics*, 13: 17~ 44.
- Spear F S, Selverstone J. 1983. Quantitative $P-T$ paths from zoned minerals: theory and tectonic applications[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83: 348~ 357.
- Spear F S. 1987. $P-T$ path: a Fortran program to calculate pressure- temperature paths from zoned metamorphic garnets [J]. *Computers in Geoscience*, 12: 247~ 266.
- Spear F S. 1989. Petrologic determination of metamorphic pressure- temperature- time paths[A]. *Short Course in Geology [C]*. American Geophysical Union, 7: 1~ 55.
- Spear F S. 1995. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure- Temperature- Time Paths[M]*. America: Mineralogical Society of America, Washington D C, 799.
- Thompson A B, England P C. 1984. Pressure- temperature- time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblage in metamorphic rocks[J]. *J Petrol.*, 25: 929~ 955.
- Thompson A B, Ridley J R. 1987. Pressure- temperature- time ($P-T-t$) histories of orogenic belts[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*. 321: 27~ 45.
- Wei Chunjing, Shan Zhenggang. 1997. Metamorphism of the Susong complex from the southern Dabie Mountains, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 356~ 368 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing, Yang Chonghui, Zhang Shouguang. 1999. Metamorphism of the east sector of the southern Qinling orogenic belt and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 65~ 77.
- Yang Chonghui, Wei Chunjing, Zhang Shouguang, *et al.* 1999. U- Pb Zircon dating of granulite facies rocks from the Fuping area in the southern Qinling Mountains [J]. *Geological Review*, 45(2): 173~ 179 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, *et al.* 1996. Three Dimensional architecture and dynamic analysis of the Qinling orogenic belt [J]. *Science in China (Series D)*, 39 (supp.): 1~ 9.

附中文参考文献

- 程裕淇, 庄育勋, 沈其韩. 1998. 变质作用的回顾与展望[J]. *地学前缘*, 5(4): 257~ 265.
- 董申保, 魏春景. 1997. 变质地质学的某些进展[J]. *岩石学报*, 13(3): 274~ 288.
- 魏春景, 单振刚. 1997. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究[J]. *岩石学报*, 13(3): 356~ 368.
- 杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 等. 1999. 南秦岭佛坪地区麻利岩相岩石锆石 U- Pb 年龄[J]. *地质论评*, 45(2): 173~ 179.