

龙门山穹状递增变质作用特征及 岩石圈深部作用信息

王国芝^{1,2}

(1 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

刘树根²

(2 成都理工学院石油系, 四川 成都 610059)



【摘 要】 通过对变质带的空间分布特征、矿物组合的世代关系和同位素定年的综合研究表明, 龙门山造山带的穹状递增变质作用为发生于燕山期的区域动热变质作用, 所形成的递增变质带在空间上呈穹隆状, 等变带围绕热中心呈环带状分布, 热中心发育花岗岩, 从热中心向四周变质程度依次递减。热中心花岗岩的侵位和上隆滞后于穹状递增变质作用, 二者在成因上无直接的联系。其 pTd 轨迹揭示出了盆山耦合过程中壳幔间相互作用过程和热历史演变。

【关键词】 龙门山; 递增变质作用; pTd 轨迹
中图分类号: P313, P588.3 文献标识码 A
文章编号: 1001- 6872(2001)01- 0071- 76

0 引 言

造山带变质作用是岩石圈深部作用过程的直接反映。通过对造山带变质作用的研究, 可以重塑造山带的热结构和热状态演变, 可以为揭示盆山耦合过程中壳内层圈间、壳幔间的相互作用过程提供深部作用信息。龙门山造山带是变质作用和岩浆作用十分发育的地区, 也是揭示盆山耦合的动力学机制和深部作用过程十分理想的场所。在盆转山和山定盆过程中, 龙门山造山带经历了复杂的变质和变形历

史, 形成了独具特色的变质特征。其特色在于, 在山定盆过程中, 在盆山接合部的造山带一侧, 形成一系列不均匀分布的呈岛屿状异常热中心, 围绕这些热中心常形成独立的花岗岩岩体或穹隆状递增变质带。这种穹状递增变质带, 明显不同于由热接触变质作用所形成的变质晕圈, 它与岩浆作用并无直接联系, 而是同一深部作用过程在造山带的不同表现形式。类似的穹状递增变质带也广泛发育于松潘- 甘孜褶皱带内, 并被许志琴等 (1990) 称之为热隆, 不同的学者对于它赋予了不同的成因意义 (韩同林, 1983; 师常庆, 1985; 付小方等, 1991; 唐茂龙, 1991; 许志琴

收稿日期: 2000- 12- 10

基金项目: 国土资源部攻关项目“中国西部盆- 山系统的耦合关系及其动力学过程”

作者简介: 王国芝 男, 36岁, 副教授 (博士后) 研究方向: 造山带地质学和盆地分析

等, 1992; 1991; 许志琴等, 1992; 吴利仁, 1993)。本文将重点对分布于盆山接合部位的汶川山葱岭穹状递进变质带展开研究, 以期确定其变质作用特征和形成时间, 为揭示盆山耦合机制提供深部信息。

1 递进变质带特征

汶川山葱岭穹状递进变质带发育于茂县-汶川韧性大型左行走滑剪切带中, 它是在早期绿片岩相的区域低温动力变质作用基础之上, 伴随韧性剪切变形所发生的一幕叠加变质作用。该幕变质作用仅发育于剪切带中段的汶川山葱岭一带, 而未覆盖整个剪切变形区域, 卷入递进变质作用的主体地层主要为志留系茂县群和泥盆系危关群, 最新地层为三叠系西康群, 具有区域动热变质作用的特征, 发育中压相系的巴洛式递进变质带。递进变质带的空间分布特征如图 1 所示, 它们在空间上围绕雪隆包花岗岩呈环带状分布。尽管喜山期的冲断推覆已经使该递进变质带遭到了不同程度的破坏, 但递进变质带的特征仍是清楚的, 从外向内依次可划分出绢云母-绿泥石带、黑云母带、石榴石带、十字石带、蓝晶石带、砂线石带。等变线切割地层界线明显, 等变带围绕山葱岭一带呈穹状, 向四周变质程度递减。各变质带特征如下:

绢云母-绿泥石带 为分布面积最宽的一条变质带, 以形成绿泥石、钠长石和少量阳起石为特征。该变质带主要由绢云千枚岩、绿泥千枚岩、绿泥片岩、绿泥石英千枚岩、大理岩等组成。在局部地段(如推覆体的前缘), 它与后期的动力变质作用过程中形成的绢云母-绿泥石带相重叠。该带内典型矿物共生组合为绢云母+石英+绿泥石±钠长石, 其中钠长石大多呈雏晶状。该带的变质温度利用钠云母温度计估算出, 其形成温度为 $360^{\circ}\text{C}\pm$ 。从世界上其他地区的绿泥石带形成的温度看, 一般均在 $380^{\circ}\text{C}\sim 420^{\circ}\text{C}$ (Turner, 1981; Rardley, 1989) 该区绿泥石带的形成温度明显地接近其下限温度。

黑云母带 以出现黑云母为特征, 绿泥石在该带仍继续存在, 常见新生斜长石和雏晶钠长石。该变质带主要由黑云绢云千枚岩、黑云石英千枚岩、石英千枚岩、结晶灰岩组成。常见矿物共生组合为黑云母+白云母+石英±绿泥石±钠长石, 黑云母+石英±绿泥石±钠长石。利用斜长石-角闪石地质温度计估算出形成黑云母带的变质温度为 $470^{\circ}\text{C}\sim 531^{\circ}\text{C}$, 压力为 $0.5\text{ GPa}\sim 0.63\text{ GPa}$ 。

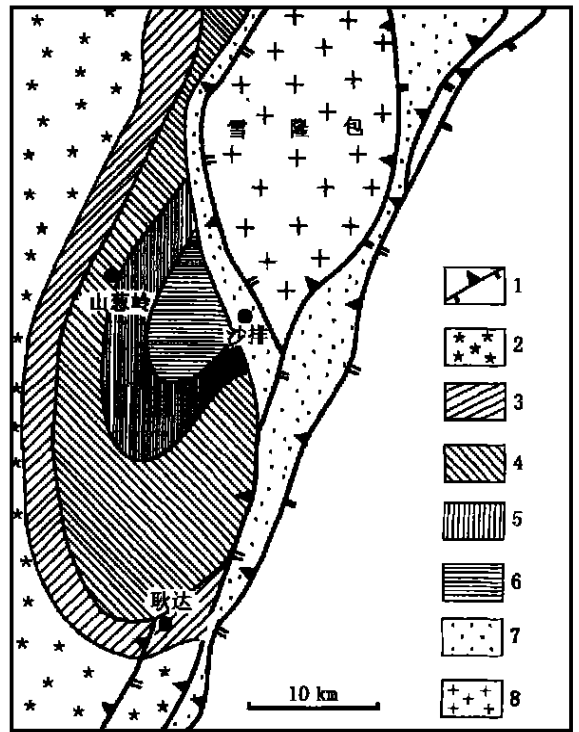


图 1 山葱岭穹状递进变质带

1. 逆断层; 2. 绿泥石带; 3. 黑云母带; 4. 石榴石带; 5. 十字石带; 6. 蓝晶石带; 7. 退变质带; 8. 花岗岩

Fig. 1 Dome progressive metamorphism zone in Shancongling areas

1. thrust fault; 2. chlorite zone; 3. Biotite zone; 4. garnet zone; 5. staurolite zone; 6. kyanite zone; 7. retrogressive metamorphism zone; 8. granite

石榴石带 以石榴石首次出现为特征, 黑云母仍稳定存在。主要由石榴黑云绢云千枚岩、黑云绢云千枚岩、石榴黑云石英千枚岩、含砾大理岩、大理岩、变玄武岩等组成, 偶见红柱石白云片岩和红柱片岩。常见典型矿物共生组合为石榴石+黑云母+白云母+石英±红柱石, 利用斜长石-角闪石和石榴石-黑云母地质温度计估算石榴石带的变质温度为 570°C , 压力为 $0.52\text{ GPa}\sim 0.69\text{ GPa}$ 。

十字石带 主要分布于汶川县沙排一带, 以形成十字石为特征。在该变质带内常见岩石类型为黑云十字石英片岩、含十字石榴黑云(二云)片岩、十字石榴黑云(二云、白云)片岩、十字二云石英片岩、石榴黑云石英片岩, 偶见含十字石黑云红柱片岩。其常见典型矿物共生组合为十字石+石榴石+黑云母+白云母+石英±石墨。根据形成十字石的变质反应, Hoschek(1969)标定其平衡温度为 $540^{\circ}\text{C}\sim 565^{\circ}\text{C}\pm 15^{\circ}\text{C}$, 压力为 $0.4\text{ GPa}\sim 0.7\text{ GPa}$, 从而确定出形成十字石带的温压区间为 $540^{\circ}\text{C}\sim 565^{\circ}\text{C}\pm 15^{\circ}\text{C}$, $0.4\text{ GPa}\sim 0.7\text{ GPa}$ 。

蓝晶石带 分布于汶川县山葱岭沙排一带, 另

在理县朴兴零星分布。出露岩石主要有石榴蓝晶二云(石英)片岩、含十字石榴蓝晶黑云(石英)片岩、石榴十字蓝晶二云(石英)片岩、黑云变粒岩、角闪片岩、斜长角闪变粒岩、花岗质混合岩, 偶见红柱蓝晶石墨白云片岩。有花岗质混合岩及白云钠长伟晶岩脉存在。常见典型矿物共生组合为十字石+ 蓝晶石+ 石榴石+ 黑云母+ 白云母+ 石英。上述矿物组合反映的变质温度为 $550^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$, 压力为 $0.5 \text{ GPa} \sim 0.7 \text{ GPa}$ (Harte and Hudson, 1979)

矽线石带 据李远图(1991)的研究, 有该带的存在, 它分布于山葱岭递进变质带的中心部分, 呈小透镜状沿片理方向呈北东向展布, 长 2.5 km , 宽 0.7 km , 出露面积为 1.61 km^2 。出露岩石类型有矽线片岩、矽线二云石英片岩、矽线蓝晶黑云(二云)石英片岩、花岗质混合岩等。有白云母钠长伟晶岩脉侵入其中。

2 矿物世代关系分析

递进变质带中的黑云母有三期。第一期黑云母

呈斑晶状独立产出或出现于同一颗粒的核部, 内部见石墨或石英包裹体构成的 S_1 与 S_2 斜交, 其中的石英多呈细小拉长的矩形状, 但粒度小于 S_2 中矩形石英(图 2b), 说明黑云母形成于 S_2 的形成早期, 它常见于从黑云母带—矽线石带的变质岩类中; 第二期黑云母常呈自形—半自形, 片状, 晶形较好, 独立呈变斑晶或基质构成 S_2 或为同一变斑晶的外部环带(图 2b, c), 同一变斑晶内两期黑云母界线截然, 常有推开 S_2 的现象。第二期黑云母内部干净, 无杂质, 该期黑云母常见于十字石带、蓝晶石带和矽线石带内。第三期黑云母较脏, 呈斑晶形式存在, 内部常见 S_2 包裹体, 个体较大, 定向, 无推开片理的现象(图 2d)。

石榴石具有长期生长特点, 均呈变斑晶形式产出。早期石榴石内部不干净, 常有石英、石墨等杂质构成的包裹体, 它们呈独立变斑晶或位于同一颗粒的核部, 常见于十字石带—矽线石带; 第二期石榴石呈自形—半自形, 无包裹物, 不具环带构造(图 2a), 它们呈独立变斑晶存在时有推开千枚理或片理的现象, 常构成早期石榴石的外环带(图 2b), 这类石榴

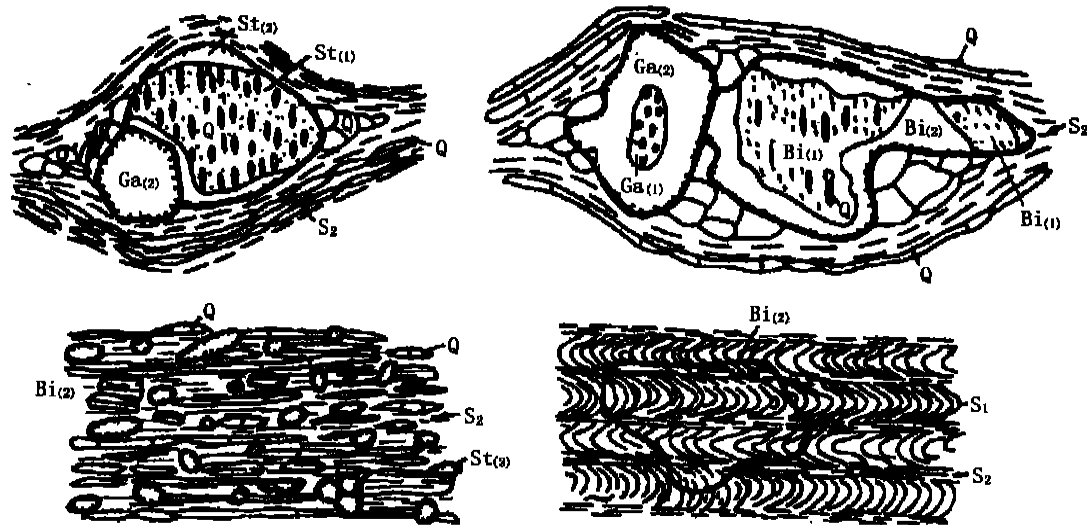


图 2 不同世代的矿物关系素描图

Q. 石英; $Ga_{(1)-(2)}$. 第一和第二世代石榴石; $St_{(1)-(2)}$. 第一和第二世代十字石; $Bi_{(1)-(3)}$. 第一和第三世代黑云母; S_1 . 第一期片理; S_2 . 第二期片理

Fig. 2 Sketch of mineral generation relation

Q. quartz; $Ga_{(1)-(2)}$. garnet from the first and second generation; $St_{(1)-(2)}$. staurolite from the first and second generation; $Bi_{(1)-(3)}$. biotite from the first two the third generation; S_1 . the first stage schistosity; S_2 . the second stage schistosity

石在石榴石带—矽线石带中均可见及。从第一期石榴石中的石英包裹体粒度小于变基质中的石英粒度, 表明第二期石榴石形成于增温过程中。第三期石榴石呈自形, 无推开片理的现象。通过对第二期石榴石的成分分析表明(表 1), 铁铝榴石端员分子为

$69.59\% \sim 80.08\%$, 钙铝榴石分子为 $6.2\% \sim 24.66\%$, 绝大部分为 $6.2\% \sim 9.24\%$, 镁铝榴石分子为 $2.54\% \sim 5.36\%$; 锰铝榴石分子为 $0.28\% \sim 13.4\%$, 绝大部分为 $7.72\% \sim 13.4\%$ 。尽管在显微镜下第二期石榴石不具环带构造, 但矿物探针微区

分析表明它们是具有成分环带的,从石榴石带的中心→边缘, MgO, FeO 明显升高; Al₂O₃, SiO₂, CaO, MnO 明显降低。都成秋穗 (1997) 指出,石榴石中的 Fe²⁺, Mg²⁺ 随变质程度的增高而增加,第二期石榴石从中心至边缘; Fe²⁺, Mg²⁺, 铁铝榴石分子和镁铝榴石分子具有明显升高趋势,说明它是形成于温度逐渐升高的递进变质作用过程中。十字石环带构造发育,它们均呈变斑晶形式产出,具有两期生长的特点,第一期为富含包裹体的十字石,呈斑晶或位于同一颗粒的核部,其中的包裹体为杂质或石英,以石英为主,包裹体中的石英呈拉长的矩形状,其粒径比变基质中的粒径稍细,由其所构成的 S₁ 与 S₂ 斜交(图 2a);从包裹体同寄主变斑晶一起被弯曲发生褶皱,变斑晶和变基质中的石英显示有变晶糜棱岩的特征,说明十字石带中的第一期十字石是形成于深部构造层次的韧塑性环境之中。第二期十字石呈柱状变斑晶或第一期十字石的边缘环带产出(图 2a, c),从第一期十字石晶内的石英包裹体比变基质中石英粒度细小,说明第二期十字石形成于温度逐渐升高的过程中。

表 1 代表性的第二世代石榴石探针分析结果

Table 1 The composition of the representative garnet from the second generation mineral association

分析项目	P01001b1	P01006b1	P01031b1		P01066b1	P01066b2
			核	边缘		
SiO ₂	36.135	37.458	37.420	36.810	37.938	37.117
TiO ₂	0.016	0.000	0.183	0.018	0.141	0.112
Al ₂ O ₃	20.740	21.413	21.005	20.884	21.041	20.742
FeO	33.772	34.953	31.774	33.719	24.546	24.825
MnO	5.727	3.325	5.976	5.141	0.262	0.097
MgO	0.617	0.858	0.912	1.005	1.061	0.780
CaO	2.095	2.962	3.135	2.767	6.687	6.722
Na ₂ O	0.000	0.000	0.134	0.000	0.000	0.174
Total	99.102	100.970	100.539	100.343	91.677	90.568
以 8 个阳离子为基准计算的阳离子数						
Si	2.988	3.024	3.027	2.994	3.275	3.259
Al	2.018	2.034	1.999	1.998	2.173	2.143
Ti	0.001	0.000	0.011	0.001	0.009	0.007
Fe ³⁺	0.005	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.323	2.356	2.146	2.279	1.769	1.820
Mn	0.400	0.227	0.409	0.354	0.019	0.007
Mg	0.076	0.103	0.110	0.122	0.136	0.102
Ca	0.185	0.256	0.271	0.241	0.618	0.632
Na	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	0.030
端员分子数						
镁铝榴石	2.54	3.50	3.74	4.06	5.36	3.98
锰铝榴石	13.40	7.72	13.92	11.81	0.75	0.28
钙铝榴石	6.20	8.69	9.24	8.04	24.29	24.66
铁铝榴石	77.85	80.08	73.09	76.09	69.59	71.08

蓝晶石有两种类型,一种为柱状晶形,内部无包裹体和杂质,另一种为疙瘩状,晶体粗大,一般为 1 cm~ 4 cm 大小,它们大多顺 S₂ 分布,可能为第二期蓝晶石。此外,在该变质带中还见有红柱石、蓝晶石、矽灰石这类高温低压变质矿物叠加于早期的递进变质作用形成的矿物共生组合上。

从上述的矿物世代关系可以将山葱岭地区递进变质作用过程分为三个阶段,第一阶段形成第一期黑云母⁽¹⁾、石榴石⁽¹⁾、十字石⁽¹⁾、蓝晶石⁽¹⁾等特征变质矿物,第二阶段形成第二期特征变质矿物黑云母⁽²⁾、石榴石⁽²⁾、蓝晶石⁽²⁾、十字石⁽²⁾等,第二阶段的矿物形成于一个温度逐渐升高的变质温压环境中。第三阶段形成第三期特征变质矿物黑云母⁽³⁾、石榴石⁽³⁾。其后叠加由于岩浆侵位引起的高温低压热接触变质作用,它说明递进变质作用在前,岩浆侵位在后,由此也暗示雪隆包花岗岩体的侵位和上隆是发生于穹状递进变质作用后,形成递进变质带的热与岩浆热并无直接成因联系,它们应分别是一个热演化过程的不同热演化阶段,从递进变质带的形成到花岗岩的侵位是一连续的热演化过程。

从前述递进变质带的矿物共生组合及岩石组合,说明递进变质作用为低绿片岩相—一角闪岩相的变质作用,区域动热变质作用特征明显,变质作用发生于深部构造层次,具有深层次的热的特点。

3 变质作用时间

对穹状递进变质作用的时间存在两种完全不同的认识,一部分人认为变质作用发生于印支—燕山期(唐若龙, 1991; 刘树根, 1992; 林茂炳等, 1996),另一部分认为华力西期变质作用(胡金成, 游再平, 1991; 四川省地质志, 1991) 由卷入递进变质带的最新地层为三叠纪侏倭组,说明山葱岭递进变质作用带形成于印支—燕山期,根据变斑晶生长与 S₂ 的关系研究发现,前述的第一阶段和第二阶段变质矿物主要形成于左旋走滑韧性剪切变形过程中。对该期变质作用过程中所形成的变质矿物进行 Ar—Ar 同位素测年(由澳大利亚墨尔本大学分析测试),获得 120 Ma 和 130 Ma 的变质年龄。与此同时,川西前陆盆地对造山带的左旋走滑,具有明显的沉积响应,冲积扇扇体在早中侏罗世和早白垩世—古新世表现出明显的从北东向南西方向的侧向迁移,从而说明左旋走滑主要发生于早中侏罗世和早白垩世—古新世。从同位素年龄和盆地沉积记录共同限定该区的区域动热变质作用发生于燕山期(120 Ma~ 130

Ma), 相应地由雪隆包花岗岩岩体切割递进变质带的等变线这一关系, 表明雪隆包花岗岩的侵位和上隆主要发生于 120 Ma 和 130 Ma 以后。

4 pTd 轨迹及深部作用过程信息

在前述研究的基础上建立起该区的 pTd 轨迹如图 3 所示, 它与大陆碰撞挤压环境中的 pTd 轨迹相似。从图中可以看出, 其 pTd 轨迹可以分为三个迹段, 它们分别是: (1) 增温增压迹段; (2) 降压增温迹段; (3) 降压降温迹段。其中, 增温增压迹段与楔形

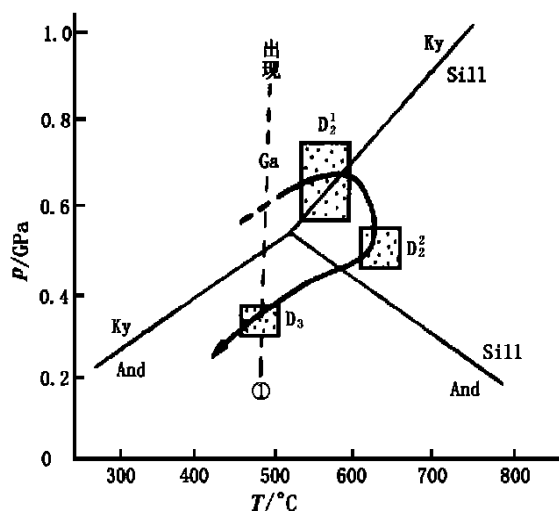


图 3 山葱岭地区变质作用的 pTd 轨迹

① 据 Winkle, 1976; And. 红柱石; Ky. 蓝晶石; Sill. 矽线石; Ga. 石榴石

Fig. 3 The pTd path of metamorphism in Shancongling areas

① after Winkle (1976); And. andalusite; Ky. kyanite; Sill. sillimanite; Ga. garnet

挤出和壳幔间的相互作用密切相关。在第一幕变形的基础上, 研究区继续受到 NE-SW 不平衡挤压, 造山带继续发生由北西南东方向的楔形挤出, 使造山带不断向盆地逆冲推覆; 与此同时, 位于松潘-

甘孜造山带前缘的盆山结合部位发生左旋走滑剪切。由于这一时期楔形挤出, 发生于盆山结合部位的逆冲推覆使变质岩系被深埋, 使其具增压的特点, 同时上地幔岩浆底侵下地壳, 使下地壳增温和下地壳增厚, 导致中上地壳增温, 使深埋的变质岩系被加热, 同时使其具有增温和增压的特点。在此作用过程中形成第一世代的矿物共生组合, 之后壳幔相互作用继续, 下地壳岩石受热膨胀上拱, 造成中地壳沿下地壳之间的软弱层(高导层)发生滑脱拆离, 变质体发生缓慢的抬升, 下地壳对中上地壳加温继续, 而使其具降压增温的特点。由于缓慢的抬升, 充分的热弛豫, 连续的增温, 地幔对下地壳的底侵作用继续, 引起中、上地壳岩石的重熔(如变质基底的重熔)形成花岗岩(如雪隆包花岗岩)上侵到上地壳变质岩系之中, 发生高温低压的热接触变质作用。之后壳幔之间的相互作用结束, 变质体发生十分缓慢的抬升, 受扰动的地热梯度逐渐向稳态地热梯度恢复, 形成近等压降温(第三迹段)的特点, 在降温过程中形成第三世代变质矿物共生组合。

5 结论

5.1 穹状递进变质作用所形成的变质带呈穹状, 等变带围绕雪隆包花岗岩体呈环带状分布, 从中心向四周变质程度递减, 等变线切割地层界线明显。在成因上它与雪隆包花岗岩没有直接的成因联系, 它们是同一构造作用的两种不同的热表现形式。变质作用类型为绿片岩相-角闪岩相的区域动热变质作用。

5.2 穹状递进变质作用主要发生于燕山期(120 Ma~130 Ma) 其中心的雪隆包花岗岩的侵位和上隆主要发生于燕山期或其期后。

5.3 穹状递进变质作用的热历史反映出盆定山过程中, 层圈间、壳幔间的相互作用强烈, 深部岩石层圈间的相互作用控制了变质作用和岩浆作用的形成和演化。

参考文献

- 1 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.
- 2 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- 3 许志琴, 侯立伟, 王宗秀等著. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1992.
- 4 胡金城, 游再平. 后龙门山变质带的变质时期探讨 [J]. 四川地质学报, 1991, 11(3): 188~191.
- 5 范晓. 四川后龙门山变质带中压变质地体的形成时代问题 [J]. 中国区域地质, 1989, (3): 269~274.
- 6 唐若龙. 龙门山-大雪山-锦屏山推覆构造带特征 [J]. 四川地质学报, 1991, 11(1): 1~8.
- 7 李远图. 山葱岭递进变质带特征 [J]. 四川地质学报, 1991, 11(1): 17~20.
- 8 付小芳, 侯立玮, 许志琴等. 雅江北部热隆扩展系的变形-变质作用 [J]. 四川地质学报, 1991, 11(2): 79~86.

- 9 林茂炳, 荀宗海, 王国芝等. 四川龙门山造山带模式研究 [J]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996.
- 10 Worley A B, Wilson C J L. Deformation partitioning and foliation reactivation during transpressional orogenesis, an example from the Central Longmen Shan, China[J]. **Journal of Structural Geology**, 1996, 18(4): 395~ 411.
- 11 Worley A B, Powell R, Wilson C J L. Crenulation cleavage formation: Evolving diffusion, deformation, and equilibration mechanisms with increasing metamorphic grade[J]. **Journal of Structural Geology**, 1997, 19(8): 1 121~ 1 135.
- 12 Dirks P H G M, Wilson C J L, Chen S *et al.* Tectonic evolution of the NE margin of the Tibetan plateau: Evidence from the Central Longmen Mountains Sichuan Province, China [A]. 罗志立主编. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化 [C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994, 230~ 248.

THE CHARACTERISTIC OF DOMAL PROGRESSIVE METAMORPHISM AND DEEP PROCESS IN FORMATION FROM LITHOSPHERE IN LONGMENSHAN, CHINA

WANG Guo-zhi^{1,2} LIU Shu-gen²

(1 *Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002*)

(2 *Chengdu institute of Technology, Chengdu 610059*)

Abstract The comprehensive studies based on space distribution of metamorphic zone, generation relation of mineral assemblage and geochronology, suggest that the domal progressive metamorphism in Longmenshan orogen is regional dynamic thermal metamorphism which happened in Yanshan age. The progressive metamorphic zone displayed a shape of dome in space, granite intruded in the central metamorphism zone and isograd band distributed around thermal center as zonal, strength of metamorphism decrease gradually from thermal center to outside. The time of intrusion and uplift of granite located in the thermal center lag that of domal progressive metamorphism, there is no origin connection between metamorphism and igneous intrusion. The *pTd* path reveals that mutual process information between crust and mantle, and evolution of thermal history during Basin-Mountain coupling.

Key words Longmenshan; progressive metamorphism; *pTd* path