

文章编号: 1000-6524 (2004) 01-0026-11

北秦岭二郎坪群低压变质作用研究

张阿利, 魏春景, 田 伟, 张翠光

(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 在对二郎坪群低压变质带进行相图分析后发现, 二郎坪群低压变质带是叠加变质带, 低压变质作用是在早期中压变质的抬升过程中发生的, 中压变质的温压条件为 0.5~0.6 GPa, 560~580 °C, 低压变质的压力为 0.3~0.45 GPa, 红柱石-十字石带的温度为 510~580 °C, 堇青石带为 590~620 °C。 pT 视剖面图在区分岩石中不同条件和期次的矿物组合及分析岩石温压演化历史和温压条件时显得更行之有效。

关键词: 低压变质作用; pT 视剖面图; pT 演化; THERMOCALC 程序; 二郎坪群

中图分类号: P588.33

文献标识码: A

Low pressure metamorphism of Erlangping Group in North Qinling Mountains

ZHANG A-li, WEI Chun-jing, TIAN Wei and ZHANG Cui-guang

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

Abstract: It has been found through phase diagram analysis that the low pressure metamorphic belt of Erlangping Group is a superimposed metamorphic belt. During the uplift of middle pressure metamorphism, the low pressure metamorphism took place. pT conditions of middle pressure metamorphism are 0.5~0.6 GPa and 560~580 °C. The pressure of low pressure metamorphism is 0.3~0.45 GPa, and the temperatures of the andalusite-staurolite zone and the cordierite zone are 510~580 °C and 590~620 °C, respectively. The pT pseudosection is a powerful tool for analyzing the pT evolutionary process and pT conditions when there exist several mineral assemblages formed in different periods and under different conditions.

Key words: low pressure metamorphism; pT pseudosection; pT evolution; THERMOCALC program; Erlangping Group

20 世纪 80 年代以来, 低压变质作用研究成为变质地质学中的又一热点 (Wickham & Oxburgh, 1985; Lux *et al.*, 1986; De Yoreo *et al.*, 1989, 1991)。低压变质作用的温压条件一般为 450~750 °C, 0.2~0.4 GPa (De Yoreo *et al.*, 1991), 地热梯度可达到 60~150 °C/km, 在不到 14 km (Al_2SiO_5 三相点的压力) 的深度, 温度可达 500~800 °C。但近几年一些岩石学家在对不同低压变质带的温压条件进行计算时却发现计算出的压力经常偏高 (Azor &

Ballèvre, 1997; Graebner & Schenk, 1999), 有人认为这与 CaO 在石榴石和斜长石中的不均匀分布有关 (Chernoff & Carlson, 1997)。笔者在对二郎坪群低压变质带进行研究时也发现了类似的问题, 为此对其中的十字石-红柱石带和堇青石带进行了详细研究, 希望能对这一问题做出进一步的解释。

1 地质背景

秦岭造山带中的低压变质带主要分布于北秦岭

收稿日期: 2003-03-24; 修订日期: 2003-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40172031)

作者简介: 张阿利 (1978-), 女, 硕士, 岩石学专业, 现从事变质岩石学研究。

二郎坪群中。二郎坪群近东西向展布于宽坪群和秦岭群之间, 根据岩石组合、原岩建造等进一步划分为大庙组、火神庙组、小寨组 and 抱树坪组, 主要由变质碎屑岩、云母片岩、大理岩及变质基性火山岩等组成。张国伟等(1996)^①认为二郎坪群中的基性火山岩和相关的深水沉积岩构成蛇绿岩组合, 与两侧的变质沉积岩系分属于不同的构造岩片。张宗清等(1994)根据火山岩的全岩 Sm-Nd 年龄(708 ± 63 Ma 和 822 ± 80 Ma) 确定其时代为新元古代。姚宗仁(1987)在变质沉积岩中发现志留纪的海百合茎、床板珊瑚, 因此认为其沉积时代为早古生代。另外, 二郎坪群变质带中还有许多大小不等的中酸性侵入体, 主要包括石英闪长岩、英云闪长岩到奥长花岗岩等, 年龄为 430 ± 16~ 399 ± 14 Ma(田伟等, 2004)^②。这些岩体与二郎坪群低压变质岩系之间为明显侵入

接触关系, 从而限制了变质作用的时代下限。

2 变质带划分和岩相学特征

二郎坪群低压变质带由南向北分为黑云母带、石榴石带、十字石-红柱石带和堇青石带(刘军, 1987), 主要分布范围为抱树坪组和小寨组。该变质带在军马河、米坪及小寨一带的分布见图 1。笔者以此划分为基础, 重点对十字石-红柱石带和堇青石带进行研究。

黑云母带分布在研究区南部, 宽 500~ 1 000 m 不等, 基本相当于抱树坪组的分布范围。岩石类型主要为黑云母片岩, 夹少量绿片岩和大理岩。黑云母片岩矿物组合为 Bi+ Mu+ Chl+ Pl+ Q^③, 另有少量不透明矿物。

石榴石带宽 500~ 1000m 不等, 主要岩石类型

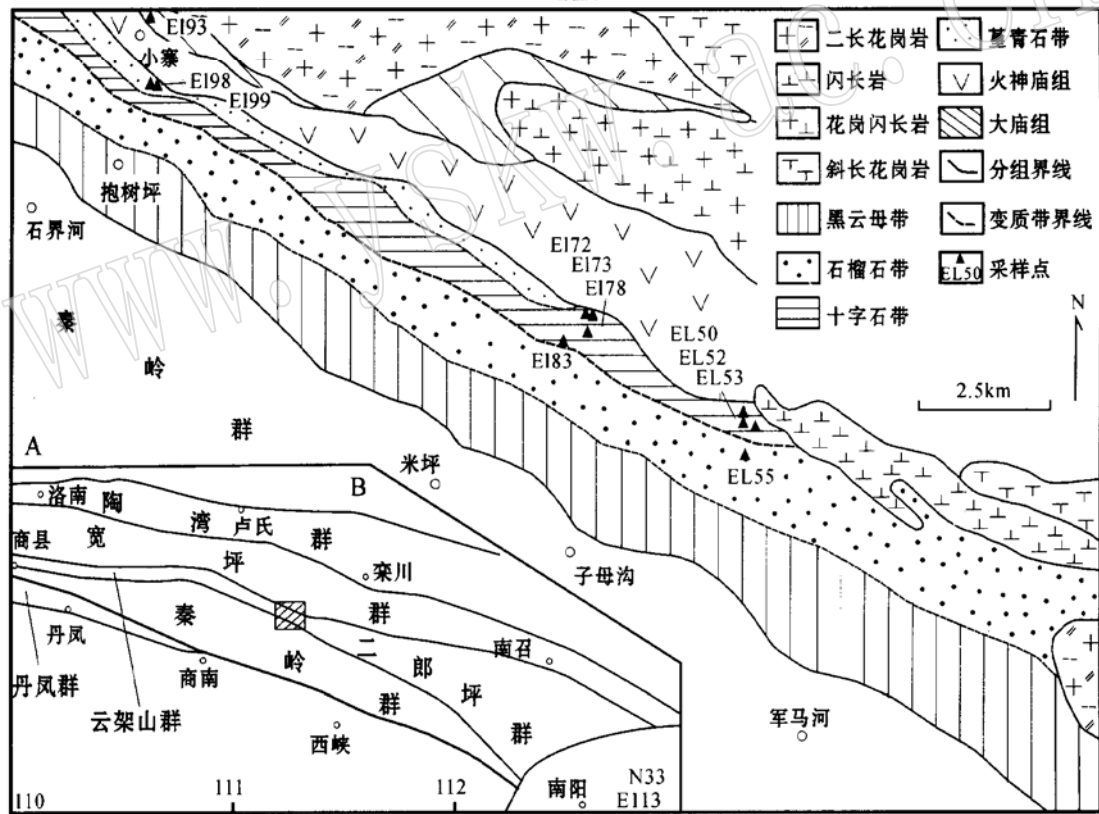


图 1 二郎坪群低压变质带的分布

Fig. 1 Geological sketch map of the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

A—据刘军(1987)和河南省地质矿产局(1989)修改; B—据李英等(1994)

A—modified from Liu Jun (1987) and Henan Bureau of Geology and Mineral Resources(1989); B—after Li Ying et al. (1994)

① 张国伟等. 1996. 国家自然科学基金重大项目“秦岭造山带岩石圈构造、演化及其成矿背景”研究工作总结报告.

② 田伟, 魏春景. 2004. 北秦岭造山带中加里东期低 ALTTD 系列: 岩石特征、成因模拟及地质意义. 中国科学(评审中).

③ Bi—黑云母, Mu—白云母, Chl—绿泥石, Pl—斜长石, Q—石英, G—石榴石, St—十字石, And—红柱石, Cd—堇青石, Sill—夕线石, Alm—铁铝榴石, Prp—镁铝榴石, Grs—钙铝榴石, Sps—锰铝榴石, Ky—蓝晶石, Kf—钾长石(下文同)。

为石榴石二云母片岩, 矿物组合为 $G + Bi + Mu + Pl + Q \pm Chl$ 。石榴石含量一般不超过 5%, 粒径小于 0.4 mm, 含有少量石英包体。黑云母和白云母定向排列形成片理, 黑云母含量约 30%~40%, 白云母含量约 10%, 斜长石为更长石, 含少量不透明矿物。刘军(1987)还在部分样品中发现红柱石。

十字石-红柱石带(后文和图中简称为十字石带)主要岩石类型有十字石红柱石二云片岩和石榴石(红柱石)二云片岩等。前者矿物组合为 $St + G + Bi + Mu + And + Q + Pl$, 后者为 $G + Bi + Mu + Pl + Q \pm And$ 。镜下可见 2 组片理: 第 1 组由十字石和石榴石变斑晶内部包体定向排列形成(图 2A、B); 第 2 组由黑云母和白云母定向排列组成。两组片理以较大角度相交, 说明这两组片理由两期不同的构造事件形成。部分十字石和石榴石明显被侵蚀成港湾状, 说明其形成时期可能较早。十字石粒径 1 mm 左

右, 含量小于 5%, 含大量定向排列的石英、黑云母等包体(可高达 40%~50%)。石榴石粒径 0.2~2 mm 不等, 含量小于 5%, 部分含有少量定向排列的石英包体。红柱石含量约 5~15%, 粒径大于 2 mm, 有的切割主期片理生长, 似乎较十字石和石榴石形成晚。黑云母含量 20%~30%, 局部绿泥石化。斜长石含量很少, 钙长石组分 15~30 不等。含少量不透明矿物, 如钛铁矿和石墨等。

堇青石带分布最窄, 分布于火神庙组变质基性火山岩南侧, 主要岩石类型为堇青石黑云片岩, 矿物组合为 $Cd + G + Bi + Pl + Q \pm And \pm Sill$ 。堇青石粒径大于 2 mm, 含量不超过 5%, 有时包裹较多的十字石作为残留体(图 2C)。石榴石粒径一般 0.5~1 mm, 含量 10%~15%, 包体含量从 0%~40% 不等, 主要为定向排列的石英(图 2D)。黑云母含量约为 30%。斜长石为中长石。红柱石含量极少, 部分样

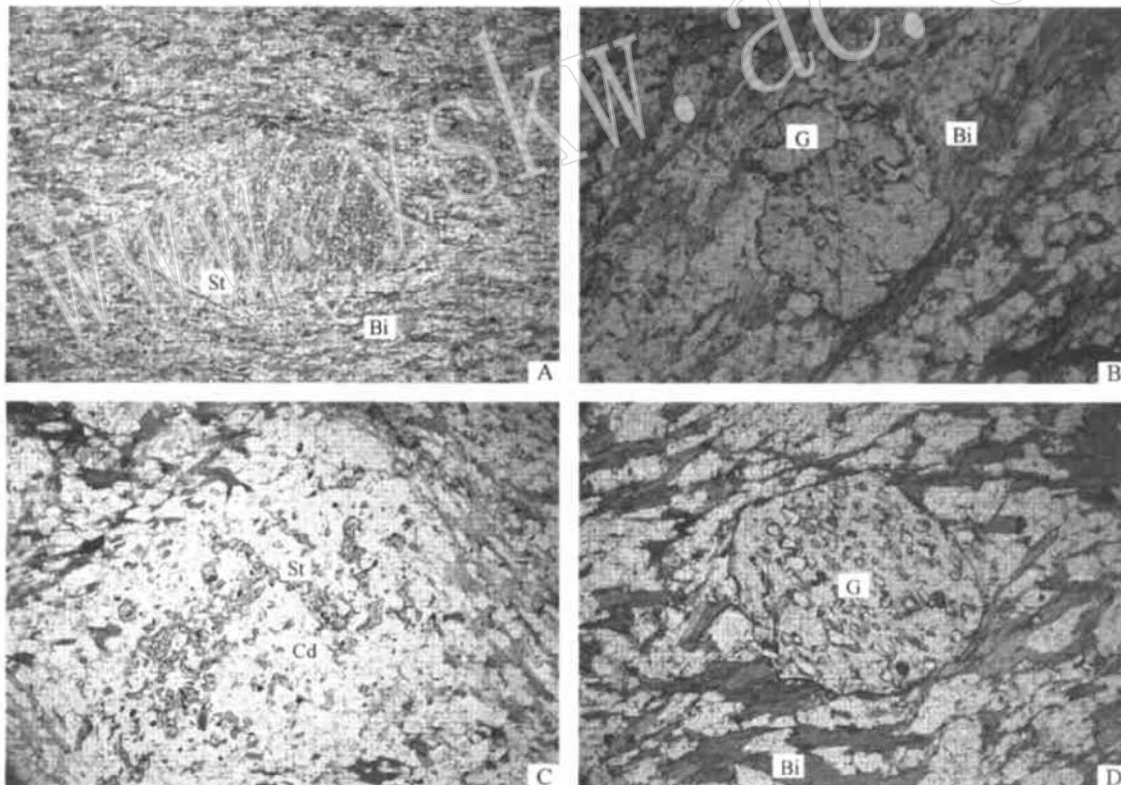


图 2 二郎坪群低压变质带的矿物组合和结构关系

Fig. 2 Micro-photograph of the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

A—十字石带的十字石包体形成的片理, —, d=5mm; B—十字石带的石榴石包体形成的片理, —, d=2mm; C—十字石为孤岛状残留于堇青石中, —, d=5mm; D—堇青石带的石榴石包体形成的片理, —, d=2mm; d 指视域直径

A—schistosity formed by staurolite inclusions in staurolite belt, —, d=5mm; B—schistosity formed by garnet inclusions in staurolite belt, —, d=2mm; C—*island-shaped* staurolite in cordierite, —, d=5mm; D—schistosity formed by garnet inclusions in cordierite, —, d=2mm;

d is diameter of visual area

品中含有少量纤维状夕线石。不透明矿物为钛铁矿和石墨。

3 变质矿物特征

二郎坪群低压变质带的主要变质矿物有石榴石、黑云母、十字石、堇青石、白云母、斜长石、红柱石、夕线石等,主要变质矿物的电子探针成分分析由北京大学地质系JXA_8100型电子探针仪完成,部分数据(表中带星号的数据)由澳大利亚墨尔本大学探针分析室完成。代表性矿物的分析数据见表1~4。

石榴石 从石榴石带到堇青石带广泛分布,其成分见表1。石榴石带中的石榴石成分 $Alm = 69.6\% \sim 70.2\%$, $Prp = 8.7\% \sim 8.9\%$, $Grs = 2.1\% \sim 2.3\%$, $Sps = 18.6\% \sim 19.5\%$ 。十字石带的石榴石成分变化较大, $Alm = 66.6\% \sim 72.4\%$, $Prp = 7.9\% \sim 9.5\%$, $Grs = 2.4\% \sim 4.0\%$, $Sps = 15.7\% \sim$

23.5% ,但边部成分与石榴石带中的石榴石相似,大部分样品环带不明显(图3A),但个别样品有明显的正环带,从核部向边部 Alm 明显升高, Sps 明显降低, Prp 在边部稍有增加, Grs 稍有降低(图3B),表明其形成温度可能有一个升高的过程。与十字石带相比,堇青石带的石榴石明显富镁贫锰,并且成分变化不大,成分为 $Alm = 72.6\% \sim 76.3\%$, $Prp = 12.8\% \sim 18.0\%$, $Grs = 4.9\% \sim 5.8\%$, $Sps = 3.6\% \sim 7.4\%$,基本没有环带(图3C、D)。单从石榴石成分看,石榴石带与十字石带温度相似,但堇青石带温度明显要高些。

黑云母 广泛存在于黑云母带到堇青石带的各种岩石中。从表2可见,石榴石带和十字石带黑云母成分相似, $X_{Fe} = 0.53 \sim 0.56$, $Ti = 0.15 \sim 0.21$ 。堇青石带中的黑云母成分变化较大, $X_{Fe} = 0.41 \sim 0.50$, $Ti = 0.18 \sim 0.30$, X_{Fe} 明显低于石榴石带和十

表1 石榴石电子探针成分分析结果

$w_B / \%$

Table 1 Microprobe analyses of garnets from the Erlangping Group low pressure metamorphic belt

变质带 样品	石榴石带		十字石带				堇青石带		
	EL55*	EL50	EL52	EL53	EL78*	EL93*	EL98*	EL99	
SiO ₂	36.91	37.16	36.84	35.95	36.17	36.34	37.83	37.42	37.33
TiO ₂	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.05
Al ₂ O ₃	20.64	20.84	21.11	20.14	20.64	20.55	21.04	20.50	20.83
Cr ₂ O ₃	0.05	0.00	0.07	0.05	0.10	0.04	0.01	0.05	0.07
FeO	31.35	31.56	29.52	30.80	32.50	30.02	33.69	35.07	33.32
MnO	8.50	8.20	8.99	10.24	6.78	9.28	3.29	2.58	1.61
MgO	2.16	2.22	1.96	2.08	2.35	1.95	3.56	3.22	4.53
CaO	0.72	0.80	1.08	1.15	0.82	1.35	1.73	1.77	2.04
Na ₂ O	0.03	0.00	0.03	0.05	0.02	0.07	0.03	0.01	0.03
Total	100.4	100.8	99.62	100.5	99.38	99.61	101.2	100.6	99.81
以12个氧为基础									
Si	2.99	3.00	3.00	2.92	2.96	2.97	3.00	3.00	2.98
Al ^{IV}	0.01	0.00	0.00	0.08	0.04	0.03	0.00	0.00	0.02
Al ^{VI}	1.96	1.98	2.03	1.84	1.94	1.94	1.97	1.93	1.94
Fe ³⁺	0.04	0.02	0.00	0.15	0.05	0.06	0.03	0.06	0.05
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.08	2.11	2.01	1.94	2.17	1.99	2.21	2.29	2.18
Mg	0.26	0.27	0.24	0.25	0.29	0.24	0.42	0.39	0.54
Mn	0.58	0.56	0.62	0.70	0.47	0.64	0.22	0.18	0.11
Ca	0.06	0.07	0.09	0.10	0.07	0.12	0.15	0.15	0.18
Na	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Alm	0.696	0.702	0.679	0.648	0.724	0.666	0.737	0.763	0.726
Grs	0.021	0.023	0.032	0.033	0.024	0.040	0.049	0.051	0.058
Prp	0.087	0.089	0.080	0.084	0.095	0.079	0.140	0.128	0.180
Sps	0.195	0.186	0.209	0.235	0.157	0.215	0.074	0.058	0.036
Fe/(Fe+Mg)	0.888	0.888	0.894	0.885	0.884	0.894	0.840	0.856	0.802

Fe/(Fe+Mg)指计算出的原子之比,后文同。

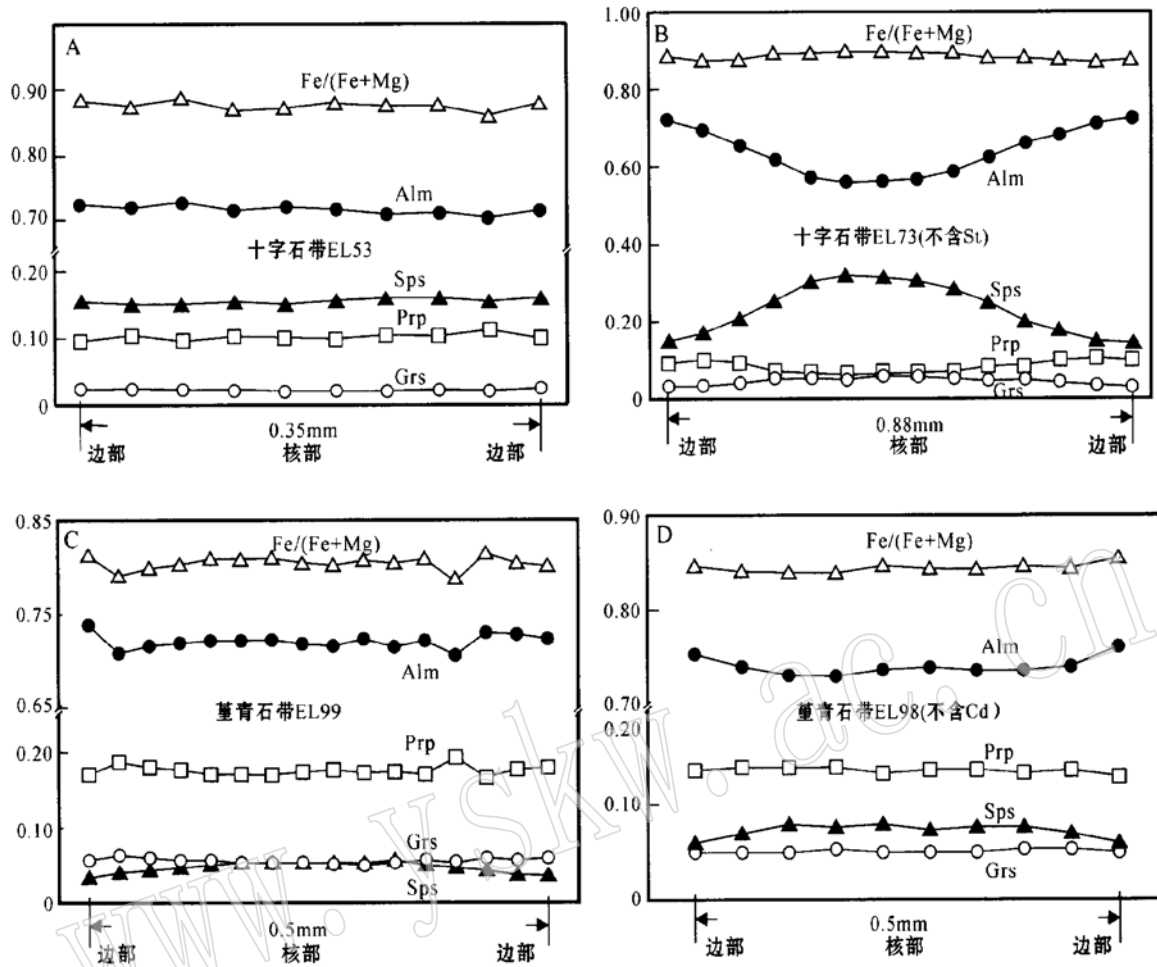


图3 二郎坪群低压变质带中石榴石的环带特征

Fig. 3 Zonation of garnets from the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

字石带,可能是离子扩散的原因。

白云母 见于黑云母带到十字石带各种岩石中,堇青石带的样品未见原生白云母。其中石榴石带和十字石带的白云母成分相似(表2),贫硅($Si = 5.97 \sim 6.23$)、贫铁镁($Fe + Mg = 0.16 \sim 0.20$),但比较富钠[$Na / (K + Na) = 0.15 \sim 0.2$]。

十字石 主要出现于十字石带,在堇青石带的个别样品中以残留体形式出现(图2C),但成分相似。 FeO 和 MgO 含量分别为 $12.31\% \sim 13.89\%$ 和 $1.45\% \sim 1.87\%$ (表3),没有环带,比共生的石榴石具有更高的 X_{Mg} ($0.16 \sim 0.2$)。 MnO 含量很低且无太大变化,为 $0.28\% \sim 0.54\%$ 。

堇青石 只见于堇青石带中,成分相似,无环带, FeO 和 MgO 含量分别为 $7.34\% \sim 7.78\%$ 和 $8.55\% \sim 9.65\%$ (表3), X_{Fe} 为 $0.3\% \sim 0.34$ 。

斜长石 主要见于十字石带和堇青石带中,成

分明不同,十字石带的斜长石 $An = 16.1 \sim 30.1$,为更长石,堇青石中斜长石 $An = 36.7 \sim 45.7$,为中长石(表4)。另外,对比十字石带和堇青石带中石榴石和斜长石中 CaO 的含量,发现两者具有相同的分配趋势(图4)。

其他矿物 红柱石只在石榴石带的个别样品中出现,但在十字石带到堇青石带普遍存在。夕线石只出现于堇青石带的个别样品中。

4 变质条件的计算

计算变质条件最经典的方法是利用传统地质温压计,但由于该方法在计算中缺少内部一致性且标定公式太多导致选择具不确定性,因此, Powell (1985)引进了“内部一致性法”(internally consistent method),编写出THERMOCALC程序,利用一套热

表 2 黑云母和白云母的电子探针成分分析结果

w B/ %

Table 2 Microprobe analyses of biotites from the Erlangping low pressure metamorphic belt

变质带 样品 矿物	石榴石带		十字石带									堇青石带		
	EL55*		EL50		EL52	EL53		EL78*		EL72*	EL83*	EL93*	EL98*	EL99
	Bi	Mu	Bi	Mu	Bi	Bi	Mu	Bi	Mu	Mu	Mu	Bi	Bi	Bi
SiO ₂	35.05	47.29	34.68	44.55	33.87	34.37	46.91	34.99	47.88	46.6	46.55	36.22	36.51	37.42
TiO ₂	1.46	0.28	1.53	0.31	1.63	1.21	0.30	1.76	0.51	0.30	0.35	2.52	1.70	1.58
Al ₂ O ₃	19.41	38	19.26	36.55	18.91	19.78	35	18.93	36.16	37.27	36.6	19.61	19.43	17.68
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	0.14	0.00	0.25	0.15	0.08	0.06	0.00	0.00	0.06	0.10	0.17	0.10
FeO	20.03	0.88	20.45	0.99	19.55	20.12	0.83	20.38	0.95	0.87	0.76	18.36	17.6	15.98
MnO	0.13	0.04	0.19	0.02	0.36	0.18	0.03	0.12	0.01	0.04	0.00	0.06	0.04	0.03
MgO	9.03	0.42	9.85	0.47	8.96	9.87	0.45	9.11	0.51	0.43	0.42	10.21	10.86	13.13
CaO	0.02	0.05	0.00	0.01	1.27	0.05	0.05	0.02	0.00	0.04	0.02	0.02	0.03	0.08
Na ₂ O	0.22	1.29	0.11	1.65	0.17	0.38	1.70	0.19	1.12	1.35	1.29	0.28	0.30	0.34
K ₂ O	8.43	8.95	10.19	10.75	11.24	10.27	10.17	8.82	9.41	9.05	8.99	8.45	8.64	9.95
Total	93.79	97.25	96.4	95.3	96.21	96.38	95.52	94.38	96.55	95.95	95.04	95.83	95.28	96.29
以 22 个氧为基础														
Si	5.66	6.10	5.52	5.97	5.46	5.48	6.22	5.64	6.23	6.10	6.14	5.65	5.72	5.80
Al ^{IV}	2.35	1.90	2.48	2.03	2.54	2.53	1.78	2.36	1.77	1.90	1.86	2.35	2.28	2.20
Al ^{VI}	1.34	3.87	1.13	3.74	1.05	1.19	3.69	1.23	3.77	3.84	3.83	1.26	1.30	1.03
Ti	0.18	0.03	0.18	0.03	0.20	0.15	0.03	0.21	0.05	0.03	0.04	0.30	0.20	0.18
Fe ²⁺	2.70	0.10	2.72	0.11	2.64	2.68	0.09	2.75	0.10	0.10	0.08	2.40	2.30	2.07
Cr	0.00	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01
Mn	0.02	0.00	0.03	0.00	0.05	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Mg	2.17	0.08	2.34	0.09	2.15	2.34	0.09	2.19	0.1	0.08	0.08	2.38	2.54	3.04
Ca	0.00	0.01	0.00	0.00	0.22	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Na	0.07	0.32	0.03	0.43	0.05	0.12	0.44	0.06	0.28	0.34	0.33	0.09	0.09	0.10
K	1.74	1.47	2.07	1.84	2.31	2.09	1.72	1.81	1.56	1.51	1.51	1.68	1.73	1.97
Fe/(Fe+Mg)	0.55	0.54	0.54	0.54	0.55	0.53	0.51	0.56	0.51	0.53	0.50	0.50	0.48	0.41

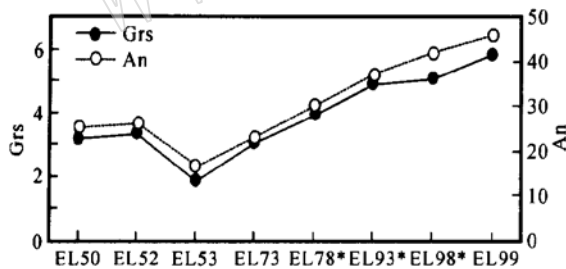


图 4 十字石带和堇青石带石榴石和斜长石中的 X_{Ca}值

Fig. 4 X_{Ca} value of garnet and plagioclase in cordierite zone and staurolite zone

力学数据和一组独立的平衡反应计算一个样品的平均温压条件,从而避免了“不一致性问题”。笔者分别利用上述两种方法对东秦岭二郎坪群变质条件进行了估算,结果见表 5。因样品 EL55 中缺失斜长石数据, THERMOCALC 法计算压力应不具参考价值。

整体而言, THERMOCALC 程序计算结果与传统地质温压计计算结果一致。但分析十字石带的样

品发现,对含十字石的样品, THERMOCALC 程序计算的压力要比传统压力计计算的结果稍高,说明十字石的存在对压力可能有一定的影响。为了分析这种影响的原因,又引入 pT 视剖面图。

pT 视剖面图(pseudosection)即基于某一岩石的具体成分对 pT 投影图所做的切面(Powell *et al.*, 1998),能显示出特定全岩成分的相平衡关系。它以某一岩石的全岩成分为基础,因此在分析该岩石的演化历史和变质条件时具有更高的准确性。做 pT 视剖面图之前必须计算出所讨论体系的 pT 投影图。 pT 投影图显示所选定的模式体系中适用于全部全岩成分的相平衡关系(不变点和单变线)。这里用的 KFMASH 体系中的 pT 投影图是魏春景计算的,包括的矿物相有石榴石、十字石、堇青石、黑云母、白云母、绿泥石、硬绿泥石、红柱石、夕线石、蓝晶石、钾长石、石英和水(设石英和水过量),温压范围为 450~750 °C, 0.05~1.2 GPa,所涉及的矿物固溶体如石榴石、十字石、堇青石和硬绿泥石的活度由对称溶液模型模拟,部分有序的黑云母、绿泥石和钾长石的活度

表3 十字石和堇青石电子探针成分分析结果 $w_B/\%$

矿物 变质带 样品	十字石					堇青石	
	十字石带			堇青石带		堇青石带	
	EL78*	EL72*	EL50	EL53	EL93*	EL93*	EL99
SiO ₂	27.56	26.58	26.98	27.07	26.84	48.29	46.97
TiO ₂	0.60	0.02	0.43	0.41	0.57	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	53.66	54.33	54.72	54.70	53.78	32.53	32.62
Cr ₂ O ₃	0.08	0.07	0.05	0.12	0.03		
FeO	12.31	13.3	13.55	13.89	13.42	7.78	7.34
MnO	0.54	0.47	0.51	0.38	0.28	0.20	0.07
MgO	1.45	1.47	1.63	1.66	1.87	8.55	9.65
CaO	0.00	0.02	0.00	0.08	0.02	0.02	0.02
Na ₂ O	0.06	0.05	0.08	0.07	0.03	0.44	0.29
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02
Total	96.27	96.31	97.96	98.4	96.84	97.84	97.01
十字石和堇青石分别以23和18个氧为基础							
Si	3.87	3.75	3.75	3.75	3.77	5.01	4.88
Al	8.86	9.02	8.95	8.92	8.88	3.97	3.99
Ti	0.06	0.00	0.05	0.04	0.06	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.44	1.57	1.57	1.61	1.57	0.68	0.64
Cr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		
Mn	0.06	0.06	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01
Mg	0.30	0.31	0.34	0.34	0.39	1.32	1.49
Ca	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.09	0.06
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg/(Mg+Fe)	0.17	0.16	0.18	0.18	0.20	0.66	0.70

表4 斜长石电子探针成分分析结果 $w_B/\%$

变质带 样品	十字石带				堇青石带		
	EL50	EL52	EL53	EL78*	EL93*	EL98*	EL99
SiO ₂	61.37	59.91	64.16	60.92	58.56	56.2	60.96
TiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	24.11	24.52	21.27	24.47	26.02	26.96	25.79
FeO	0.26	0.17	0.11	0.12	0.05	0.04	0.14
MnO	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01
MgO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02
CaO	5.68	5.87	3.85	6.41	7.9	9.54	8.08
Na ₂ O	9.27	9.13	10.46	8.19	7.46	6.24	5.33
K ₂ O	0.10	0.10	0.07	0.05	0.07	0.04	0.03
Total	100.82	99.73	99.93	100.22	100.12	99.04	100.36
以8个氧为基础							
Si	2.72	2.68	2.85	2.71	2.62	2.55	2.69
Al	1.26	1.29	1.11	1.28	1.37	1.44	1.34
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.27	0.28	0.18	0.31	0.38	0.46	0.38
Na	0.80	0.79	0.90	0.71	0.65	0.55	0.46
K	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ab	74.30	73.40	82.80	69.60	62.90	54.10	54.20
An	25.10	26.10	16.80	30.10	36.70	45.70	45.50
Or	0.60	0.60	0.40	0.30	0.40	0.20	0.20

表5 二郎坪群低压变质带的变质条件

Table 5 Metamorphic conditions of the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

变质带	样品	矿物组合	G-Bi 温度计/ °C		G-PLAl ₂ SiO ₅ -Q (QPAQ) 压力计/GPa		THERMOCALC	
			Ferry & Spear (1978)	Perchuk & Lavrent'eva (1983)	Hodges & Crowley (1985)	<i>t</i> / °C	<i>p</i> / GPa	
石榴石带	EL55	G(5) + Bi(25) + Mu(10) + Pl(5) + Q(55)	531	552		503	0.64	
	EL50	G(3) + St(3) + Bi(30) + Mu(6) + And(3) + Pl(5) + Q(50)	521	546	0.31	577	0.37	
十字石带	EL52	G(2) + Bi(25) + Mu(5) + Pl(5) + And(3) + Q(60)	537	555	0.33	549	0.29	
	EL53	G(3) + St(5) + Bi(25) + Mu(2) + And(5) + Pl(5) + Q(55)	549	562	0.37	548	0.46	
	EL78	G(2) + St(3) + Bi(30) + Mu(10) + And(5) + Pl(5) + Q(45)	518	544	0.32	569	0.36	
堇青石带	EL93	G(4) + Cd(4) + Bi(30) + Pl(10) + Q(50)	600	590		595	0.39	
	EL98	G(13) + Bi(25) + And(3) + Sill(1) + Pl(8) + Q(50)	559	567	0.30	556	0.31	
	EL99	G(12) + Cd(2) + Bi(35) + And(1) + Pl(5) + Q(45)	579	579	0.39	612	0.43	

括号中数字表示体积百分比。

由对称溶液和 DQF 模型模拟, 部分有序的白云母活度由理想溶液模型模拟, 其他端员组分如红柱石、夕线石、蓝晶石、石英和水的活度为 1。所用的程序为 THERMOCALC 3.1, 计算原理和方法见 Powell 等 (1998) 及魏春景和周喜文 (2003)。以这一 pT 投影图为基础, 在二郎坪群低压变质带中选择 2 个样品, 计算其 pT 视剖面图。

样品 EL78 为十字石带中的十字石红柱石二云片岩 (矿物组合见表 5), 用化学全分析方法计算其全岩成分为 $n(\text{Al}_2\text{O}_3): n(\text{MgO}): n(\text{FeO}): n(\text{K}_2\text{O}) = 41.82: 23.57: 20.33: 14.29$, 计算的 pT 视剖面图见图 5。该图以双变域 (没有阴影) 和三变域 (浅色阴影) 为主, 包括 1 个不变点和 8 段长短不等的单变线。从图 5 可以看出, 十字石和红柱石没有共生域, 综合岩相学观察和温压计算的结果, 可以认为十字石和红柱石应该属于两期不同的组合。石榴石仅出现于 $p > 0.95 \text{ GPa}$, $t > 570 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围。对样品 EL78 中可能的早期组合 $G + \text{St} + \text{Bi} + \text{Mu} + \text{Q}$ 来说, 其温压范围约为 $610 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.0 \sim 1.2 \text{ GPa}$ 。从表 1~3 可看出, 石榴石中含有相当多的 MnO (1.43% ~

13.31%), 而十字石、黑云母和白云母中的 MnO 则很少 (最高为 0.54%), 这就是说, 如果在 KFMASH 体系中加入 MnO , 会大大扩大石榴石的稳定范围。依据 Mahar 等 (1997) 的研究, 估计加入 MnO 后, 石榴石会出现于图 5 中的所有矿物组合中, 但这对其他贫锰矿物的稳定范围影响不大, 所以 EL78 中早期组合的温压条件会大大降低至十字石的稳定边界, 即 $p > 0.45 \text{ GPa}$, $t > 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 。依据变质条件计算结果和图 5 中的相平衡关系, 笔者倾向于其温压条件为 $0.5 \sim 0.6 \text{ GPa}$, $560 \sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5 中 EL78 可能的晚期矿物组合 ($\text{And} + \text{Bi} + \text{Mu} + \text{Q}$) 的稳定范围为 $510 \sim 580 \text{ }^\circ\text{C}$, $0.15 \sim 0.35 \text{ GPa}$, 如果考虑 MnO 的影响, 这一组合中可以出现石榴石, 但不会出现十字石, 所以该样品中晚期低压组合应发生于早期中压组合的抬升过程。其 pT 轨迹如图 5 实线所示。

样品 EL93 为堇青石带中的堇青石二云片岩 (矿物组合见表 5), 以其矿物含量及电子探针分析为基础计算的全岩成分为 $n(\text{Al}_2\text{O}_3): n(\text{MgO}): n(\text{FeO}): n(\text{K}_2\text{O}) = 30.69: 26.01: 34.37: 8.93$, 所计算的 pT 视剖面图见图 6, 该图以双变域 (没有阴影) 和三变域

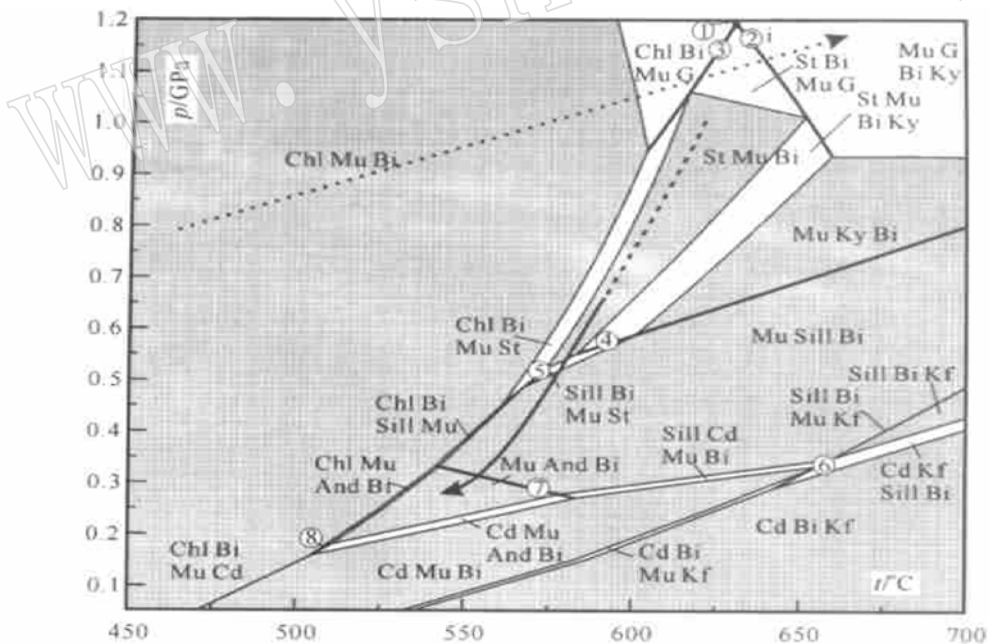


图 5 二郎坪群低压变质带中十字石带的 pT 视剖面图

Fig. 5 pT pseudosection of staurolite zone in the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

单变反应 1: $G + \text{Chl} + \text{Mu} = \text{Bi} + \text{Ky}$; 2: $\text{St} + \text{Bi} = G + \text{Mu} + \text{Ky}$; 3: $G + \text{Mu} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bi}$; 4: $\text{Ky} = \text{Sill}$; 5: $\text{Chl} + \text{Mu} + \text{St} = \text{Bi} + \text{Sill}$; 6: $\text{Mu} = \text{Bi} + \text{Cd} + \text{Kf} + \text{Sill}$; 7: $\text{And} = \text{Sill}$; 8: $\text{Chl} + \text{Mu} + \text{And} = \text{Bi} + \text{Cd}$; 虚线代表巴罗式变质带的 pT 点阵, i 代表不变点 ($G, \text{Chl}, \text{Bi}, \text{St}, \text{Mu}, \text{Ky}$)

Univariant reactions 1: $G + \text{Chl} + \text{Mu} = \text{Bi} + \text{Ky}$; 2: $\text{St} + \text{Bi} = G + \text{Mu} + \text{Ky}$; 3: $G + \text{Mu} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bi}$; 4: $\text{Ky} = \text{Sill}$; 5: $\text{Chl} + \text{Mu} + \text{St} = \text{Bi} + \text{Sill}$; 6: $\text{Mu} = \text{Bi} + \text{Cd} + \text{Kf} + \text{Sill}$; 7: $\text{And} = \text{Sill}$; 8: $\text{Chl} + \text{Mu} + \text{And} = \text{Bi} + \text{Cd}$; Dotted line represents pT series of Barrow metamorphic belt, whereas i signifies invariant points ($G, \text{Chl}, \text{Bi}, \text{St}, \text{Mu}, \text{Ky}$)

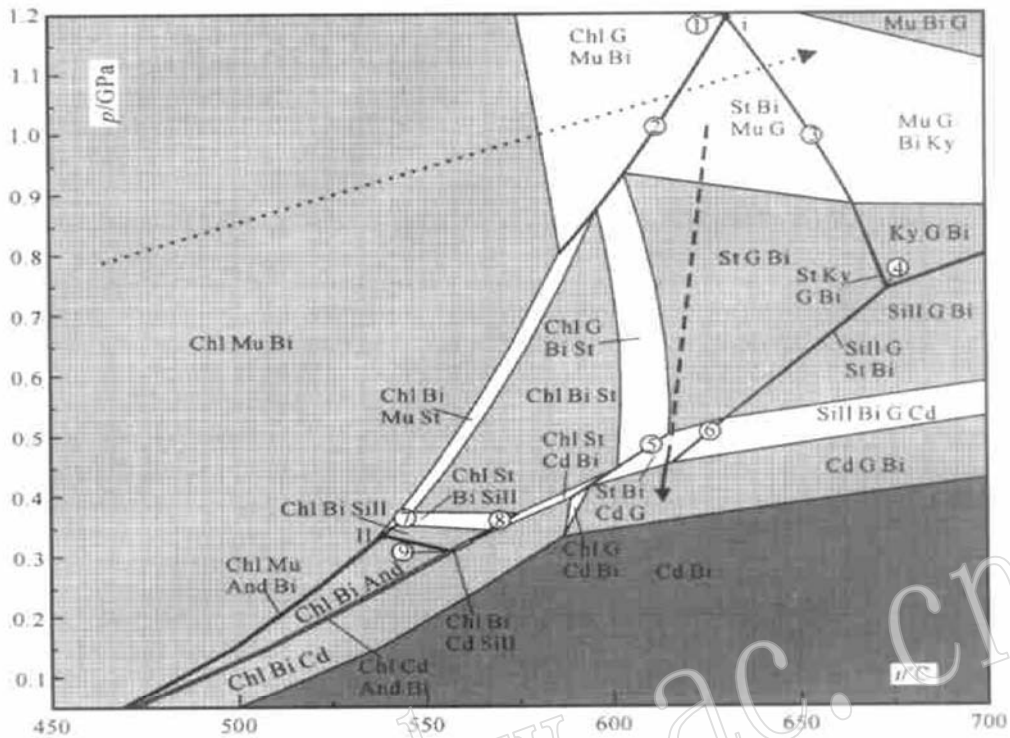


图6 二郎坪群低压变质带中堇青石带的 pT 视剖面图

Fig. 6 pT pseudosection of cordierite zone in the Erlangping Group low-pressure metamorphic belt

单变反应 1: $G + Chl + Mu = Bi + Ky$; 2: $G + Mu + Chl = St + Bi$; 3: $St + Bi = G + Mu + Ky$; 4: $Ky = Sill$; 5: $Chl + St = G + Cd$; 6: $St + Cd = G + Sill$; 7: $Chl + St + Mu = Bi + Sill$; 8: $Chl + Sill = St + Cd$; 9: $And = Sill$; 虚线代表巴罗式变质带的 pT 点阵; i 代表不变点 (G, Chl, Bi, St, Mu, Ky), ii 代表不变点 ($Chl, Bi, St, Mu, And, Sill$)

Univariant reactions 1: $G + Chl + Mu = Bi + Ky$; 2: $G + Mu + Chl = St + Bi$; 3: $St + Bi = G + Mu + Ky$; 4: $Ky = Sill$; 5: $Chl + St = G + Cd$; 6: $St + Cd = G + Sill$; 7: $Chl + St + Mu = Bi + Sill$; 8: $Chl + Sill = St + Cd$; 9: $And = Sill$; Dotted line represents pT series of Barrow metamorphic belt, i signifies invariant points (G, Chl, Bi, St, Mu, Ky), and ii means invariant points ($Chl, Bi, St, Mu, And, Sill$)

(浅色阴影)为主,包括2个不变点、9段单变线和1个四变域(深色阴影)。图中石榴石的稳定范围比图5大得多($p > 0.35$ GPa, $t > 570$ °C)。若考虑MnO的影响,则石榴石的稳定范围会更大。EL93实际观测的矿物组合 $G + Cd + Bi + Q(+Pl)$ 的稳定范围为 $t > 580$ °C, $p = 0.35 \sim 0.6$ GPa。依据变质条件计算结果和图6中的相平衡关系,笔者倾向于其温压条件为 $0.35 \sim 0.45$ GPa $590 \sim 620$ °C。EL93中十字石和堇青石之间存在明显的再平衡关系(图2C),十字石带中原生白云母普遍出现,而堇青石带中却没有原生白云母,因此可以认为EL93的平衡组合由早期含十字石的组合在降压过程中形成,其 pT 轨迹如图6实线所示。

5 讨论

Graebner 和 Schenk (1999) 在对意大利亚平宁半

岛南部 Aspromonte 地区低压变质带进行研究时,用石榴石-斜长石-白云母-黑云母压力计 (GPMB) (Hodges & Crowley, 1985) 计算出石榴石带的压力为 $0.7 \sim 0.8$ GPa, 十字石-红柱石带的压力为 $0.4 \sim 0.5$ GPa, 都高于 Al_2SiO_5 三相点的压力。Azor & Ballèvre (1997) 研究葡萄牙 Sierra Albarrana 地区的低压变质带时出现了相似的情况。在研究二郎坪变质带时,笔者也遇到了类似的问题。含十字石的组合用 THERMOCALC 程序计算出的压力较 GPAQ 压力计的结果高,对计算方法和矿物组合进行分析后认为这可能与平衡组合的确定有关。用 THERMOCALC 程序计算温压条件时,十字石和红柱石被当作共生组合,而 GPAQ 压力计不涉及十字石,因此含十字石的组合用这两者计算出的压力有差别的惟一原因就是十字石的影响。对于二郎坪群变质带中的十字石和红柱石是否共生,从岩相学角度来说并不能给出肯定的答案,两期片理的存在反而为两者

不共生提供证据。从 pT 视剖面图(图 5.6)可明显看出十字石和红柱石没有共生域,即它们不是共生组合,那么 THERMOCALC 程序的计算结果显然不合理,而 GPAQ 压力计的结果则可能更好地反映了红柱石组合(不含十字石)的压力。也就是说,当岩石中含有温压条件变化不大的多期组合时,由于岩相学观察有时难以对其进行区分,可能会导致温压计算时的误差,引入 pT 视剖面图对岩石的 pT 演化历史和温压条件进行分析就显得更行之有效。据上文分析的二郎坪群低压变质带的情况来看, CaO 在石榴石和斜长石中具有相同的分配趋势,因此可以认为低压变质带压力计算过高的原因可能是由于岩石中存在多期组合,而不是 CaO 在石榴石和斜长石中的不均匀分布,高的压力代表了岩石中早期组合的条件。

根据相图分析,可以发现二郎坪群低压变质带的岩石中有两期组合,早期含十字石的组合属于中压型,含红柱石的组合才是低压型。周汉文等(1994)发现红柱石在二郎坪群变质带中普遍存在,并且十字石有被红柱石局部取代的现象。刘国惠等(1993)也曾在二郎坪群变质带中观察到含蓝晶石的组合。这些都充分说明二郎坪群变质带实际上是一个叠加变质带,晚期低压变质作用是在早期中压变质的抬升过程中发生的。田伟和魏春景(2004)^①对二郎坪群中加里东期低 ALTTD 系列花岗岩的研究认为,该系列花岗岩的成因是由于地壳拉张、地幔上涌造成的早期玄武质岩石的重熔,这一重熔过程意味着中下地壳热流状态从低向高的转变。而变质作用过程说明中上地壳热流状况也有一个从低到高的变化,这可能与岩浆作用反映了同一时期的同一构造背景。

刘国惠等(1993)认为,晚元古代晋宁期华北与扬子两个板块发生汇聚后,紧接着在二郎坪群分布的范围内发生南北向拉张作用,出现裂谷式洋槽(盆),持续到加里东时期,由于南北两个陆块的相向移动,发生慢速俯冲碰撞,使洋槽未能进一步扩张就很快闭合。俯冲碰撞造成热源的集中,使中浅层次岩浆得以侵位并伴随发生中压变质作用。随后,由于下地壳拆沉导致地幔上涌,挤压增厚的地壳发生抬升,而岩浆运动又产生热平流,这样低压变质作用

的发生就顺理成章了。

6 结 论

(1) 当岩石中含有多期矿物组合,特别是温压条件变化不大的多期组合时, pT 视剖面图是分析、区别不同期次矿物组合的有效手段,在确定岩石温压演化历史和温压条件时也比传统温压计的方法更为可靠。

(2) 二郎坪变质带是一个叠加变质带,低压变质作用发生于早期中压变质岩石的抬升过程,中压变质的温压条件为 0.5~0.6 GPa 560~580 °C,低压变质的压力为 0.3~0.45 GPa,红柱石-十字石带的温度为 510~580 °C,堇青石带为 590~620 °C,这为讨论该地区的地质演化提供了热演化方面的重要限定。

致谢:感谢杨崇辉研究员对初稿的审阅。

References

- Azor A & Ballèvre M. 1997. Low-pressure metamorphism in the Sierra Albarrana area (Variscan Belt, Iberian Massif) [J]. *Journal of Petrology*, 38(1): 35~64.
- Chernoff C B & Carlson W D. 1997. Disequilibrium for Ca during growth of pelitic garnet [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 421~438.
- De Yoreo J J, Lux D R and Guidotti C V. 1989. The role of crustal anatexis and magma migration in regions of thickened continental crust [A]. Daly J G, Duff R A & Yardly B W D. *Evolution of Metamorphic Belts* [C]. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 43: 187~202.
- De Yoreo J J, Lux D R & Guidotti C V. 1991. Thermal modelling in low-pressure/high-temperature metamorphic belts [J]. *Tectonophysics*, 188: 209~238.
- 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.
- Geology and Mineral Bureau of Henan Province. 1989. *Regional Geological Bulletin of Henan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Graefner T & Schenk V. 1999. Low-pressure metamorphism of Palaeozoic pelites in the Aspromonte, southern Calabria: constraints for the thermal evolution in the Calabrian crustal cross-section during the Hercynian orogeny [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 17: 157~172.

① 田伟,魏春景. 2004. 北秦岭造山带中加里东期低 ALTTD 系列: 岩石特征、成因模拟及地质意义. 中国科学(评审中).

- Hodges K V & Crowley P D. 1985. Error estimation and empirical geothermobarometry for pelitic systems[J]. *American Mineralogist*, 70: 702~ 709.
- Li Ying, Zhao Donglin and He Ruifang. 1994. Discussion of isotopic geochronology and heat history of metamorphic rock series in eastern part of north Qinling Ranges[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 16(3): 1~ 9(in Chinese).
- Liu Guohui, Zhang Shouguang, You Zhendong, *et al.* 1993. Metamorphic Rock Group and Metamorphic Evolution of Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Liu Jun. 1987. Metamorphism of Erlangping Group in eastern Qinling Mountain[D]. Peking University (in Chinese).
- Lux D R, De Yoreo J J, Guidotti C V, *et al.* 1986. The role of plutonism in low_pressure/high_temperature metamorphic belt formation [J]. *Nature*, 323: 794~ 797.
- Mahar E M, Baker J M, Powell R, *et al.* 1997. The effect of Mn on mineral stability in metapelites[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 223~ 238.
- Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non_linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 577~ 588.
- Wei Chunjing, Yang Chonghui and Zhang Shouguang. 1999. Metamorphism of the eastern Qinling orogenic belt and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*. 73(1):65~ 77.
- Wei Chunjing and Zhou Xiwen. 2003. Progress in the study of metamorphic phase equilibrium[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 341~ 351(in Chinese with English abstract).
- Wickham S M and Oxburgh E R. 1985. Continental rifts as a setting for regional metamorphism[J]. *Nature*, 318: 330~ 333.
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi and Fu Guomin. 1994. Research of Isotopic Geochronology of Metamorphic Stratum, North Qinling[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhou Hanwen and Chen Nengsong. 1994. Metamorphism, deformation and metamorphic reactions of low_pressure metamorphic belt in east Qinling orogenic belt, western Henan[J]. *Journal of China University of Geosciences_Earth Science*, 1: 9~ 18(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 李英, 赵东林, 何瑞芳. 1994. 北秦岭东部变质岩系同位素年龄学及热历史研究[J]. *西安地质学院学报*, 16(3): 1~ 9.
- 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘军. 1987. 东秦岭二郎坪群的变质作用[D]. 北京大学.
- 魏春景, 周喜文. 2003. 变质相平衡的研究进展[J]. *地学前缘*, 10(4): 341~ 351.
- 姚宗仁, 涂金顺. 1987. 二郎坪的层序、古构造环境及成矿作用讨论[J]. *河南地质*, 4: 1~ 10.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年龄研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 周汉文, 陈能松. 1994. 豫西东秦岭造山带低压变质带的变质变形和变质反应[J]. *中国地质大学(武汉)学报——地球科学*, (1): 9~ 18.