

北秦岭官坡地区柯石英榴辉岩 变质作用的 P-T-t 轨迹*

赵东林

(西安地质学院资源系, 西安 710054)

提 要 根据矿物包裹和替代关系以及共生组合规律, 北秦岭官坡地区柯石英榴辉岩的变质作用演化可划分为5个阶段, 即前榴辉岩相的绿帘角闪岩相、榴辉岩相、后榴辉岩相的角闪岩相、绿帘角闪岩相和绿片岩相。Sm-Nd 同位素定年显示, 北秦岭柯石英榴辉岩于 400 ± 16 Ma 沿朱夏断裂被推覆上升, P-T-t 轨迹的地球动力学成因可能与扬子和华北陆块间的俯冲-碰撞作用有关。

关键词 柯石英榴辉岩; P-T-t 轨迹; Sm-Nd 同位素年龄; 北秦岭

中图分类号 P588.3

近年来, 在秦岭一大别造山带的大别山及东延的苏鲁地区, 对高压、超高压变质作用的研究取得了举世瞩目的成果, 相比之下, 作为造山带主体的东秦岭一带此项研究显得很薄弱。最近笔者在北秦岭陕豫交界的官坡地区秦岭岩群变质地层中发现了榴辉岩^[1], 随后又在石榴石和绿辉石中发现了柯石英及其假象包体^[2], 确认了在北秦岭同样存在高压-超高压变质作用^[3]。柯石英是一罕见的高压石英变体, 过去仅见于金伯利岩、陨石坑和核弹爆炸坑中。含柯石英超高压变质岩的发现是80年代地学研究领域的重大突破之一, 它为该类榴辉岩变质作用峰值压力的确定提供了确凿证据, 进而更加准确地限定其P-T-t轨迹。本文对北秦岭官坡地区柯石英榴辉岩的岩石学、矿物学及年代学进行了较为详细的研究, 建立了P-T-t轨迹, 为秦岭一大别造山带的形成及演化提供新的证据。

1 岩石学特征

北秦岭官坡地区榴辉岩出露于北秦岭造山带秦岭岩群的北侧, 以朱夏断裂与其北侧的宽坪岩群、二郎坪岩群相接。呈NWW-SEE方向延伸, 西端被晚期断裂截切, 东部被白垩纪

1995-11-10 收稿

作者简介: 赵东林, 男, 26岁, 讲师, 在读博士, 曾发表《高温高压环境下硅酸盐矿物应变溶解模型》等论文

* 国家自然科学基金资助项目

砂砾岩覆盖,这个带宽约 2~5 km,榴辉岩在带内零星出露(图 1)。单个榴辉岩体的露头不大,较大的超过数千平方米,小的不足 1 m²,且多呈透镜状、团块状、似层状产出。围岩或伴生岩石为含石榴多硅白云母钠长片岩、含石榴多硅白云母石英片岩、石榴多硅白云母片岩、含石榴斜长角闪岩和斜长角闪岩等岩石。根据榴辉岩中的原生次要矿物可将其分为含柯石英榴辉岩、含多硅白云母榴辉岩、角闪榴辉岩和不含上述三种特征矿物的普通榴辉岩。含柯石英榴辉岩中的柯石英都是以包体形式保存在石榴石或绿辉石中^[2]。显微镜下,柯石英为正突起,Ⅰ级灰黑干涉色,二轴正晶。在含柯石英和(或)多晶石英包体的寄主矿物中发育以包体为中心向四周散射的放射状和(或)同心环状裂纹,这是因为在榴辉岩的抬升过程中,柯石英不稳定而转变为多晶石英,其体积增加近 10%(Smith, D. C., 1988)。

官坡地区柯石英榴辉岩中两种主要矿物石榴石和绿辉石的化学成分位于西阿尔卑斯地壳型榴辉岩和大别榴辉岩成分区(表 1,图 2,图 3)。石榴石中铁铝、镁铝和钙铝榴石分子的变化范围分别是 55%~60%、9%~16%和 22%~31%。绿辉石中硬玉分子变化可达 25%~42%,钙切尔马克分子含量<5%。柯石英榴辉岩中部分含多硅白云母,含量在 1%左右,多硅白云母结构式中具有高的 Si 值(3.545~3.517)(表 1)。

2 柯石英榴辉岩变质历史及 P-T 轨迹

根据柯石英榴辉岩中矿物包裹和替代关系以及共生组合规律,柯石英榴辉岩经历了 5 期变质作用,即前榴辉岩相的绿帘角闪岩相、榴辉岩相、后榴辉岩相的角闪岩相、绿帘角闪岩相和绿片岩相。

2.1 前榴辉岩相的绿帘角闪岩相阶段

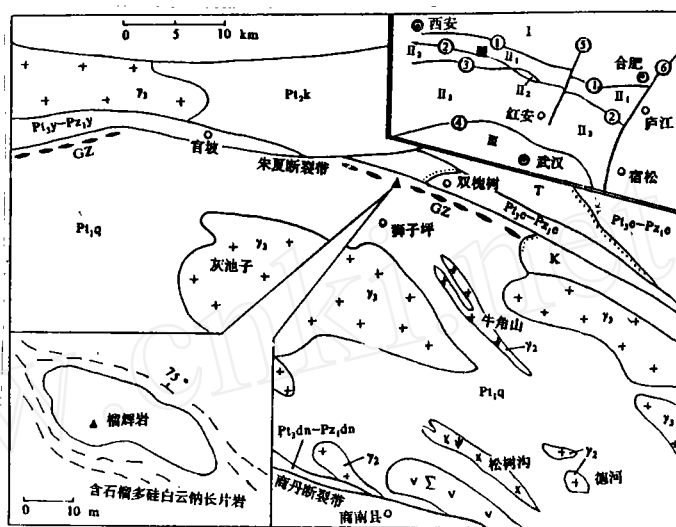


图 1 柯石英榴辉岩产地地质简图

右上角小图: I 华北地块; II 秦岭—大别造山带; I₁ 北秦岭造山带; I₂ 南秦岭造山带; I₃ 南秦岭造山带; III 扬子地块; ① 洛南—溧川—明港断裂; ② 商丹—信阳—商城—磨子潭断裂; ③ 山阳—丰镇断裂; ④ 城口—房县断裂; ⑤ 商城—团风断裂; ⑥ 郧阳断裂。图中黑方块为主图位置。

主图: 1. 白垩系(K); 2. 三叠系(T); 3. 二郎坪岩群(P₁₃e-P₂₁e); 4. 云架山岩群(P₁₃y-P₂₁y); 5. 丹凤岩群(P₁₃dn-P₂₁dn); 6. 宽坪岩群(P₁₃e-P₂₁e); 7. 秦岭岩群(P₁₃q); 8. 松树沟超基性岩体(ψ); 9. 富水基性岩体(Σ); 10. 晚元古代花岗岩体(γ₂); 11. 加里东期花岗岩体(γ₃); 12. 高压—超高压变质带(GZ)

黑三角为 Sm-Nd 同位素年龄采样点

左下角插图为采样点的放大图

表 1 柯石英榴辉岩不同变质阶段代表性矿物电子探针分析

变质阶段		I														II						N					
		Sh ₁		15-1		9-1		11-2		13-4		7-4		Sh ₃		10-3		14-2		17-1		18-2					
样品号	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Grt	Omp	Grt	Omp	Grt	Omp	Grt	Omp	Grt	Omp	Phe	Am	Pl	Di	Pl	Am	Pl	Am	Pl	Act		
SiO ₂	38.70	55.59	51.11	37.05	54.36	38.58	55.14	38.03	53.46	37.71	53.94	37.44	54.85	38.93	54.35	50.48	51.18	55.54	49.93	68.68	43.75	66.13	44.34	68.66	51.82		
TiO ₂	0.07	0.09	0.62	0.16	0.17	0.10	0.18	0.16	0.24	0.17	0.14	0.08	0.07	0.11	1.02	0.51	0.12	0.05	0.73	0.06	0.73	0.05	0.76	0.01	0.00		
Al ₂ O ₃	21.73	8.81	28.18	21.54	8.28	20.59	6.14	19.83	6.10	21.55	7.87	21.94	7.06	19.03	6.89	28.28	3.99	29.70	9.87	19.79	12.32	20.82	12.67	20.87	1.21		
FeO*	26.26	5.63	2.91	25.91	8.24	27.81	9.89	28.63	8.98	27.10	8.45	27.64	4.83	27.97	8.76	3.16	16.19	0.04	8.36	0.12	16.74	0.15	16.89	0.06	15.68		
MnO	0.38	0.02	0.00	0.68	0.00	0.50	0.05	0.56	0.00	0.81	0.08	0.47	0.00	0.56	0.04	0.00	0.16	0.00	0.16	0.00	0.04	0.00	0.05	0.06	0.18		
MgO	2.29	7.12	3.07	3.87	9.04	3.69	8.41	3.57	8.58	3.79	8.94	3.78	9.73	2.92	8.68	2.96	16.69	0.00	9.54	0.05	9.17	0.03	9.75	0.00	15.39		
CaO	10.53	15.35	0.00	9.36	16.10	10.14	16.32	10.34	16.39	9.80	16.74	9.89	16.10	10.06	16.52	0.07	5.37	11.40	20.77	1.10	10.01	2.64	10.77	0.46	11.35		
Na ₂ O	0.06	5.75	0.17	0.08	4.30	0.17	5.19	0.00	4.66	0.06	4.39	0.15	5.30	0.27	5.03	0.16	3.30	4.73	1.70	11.64	3.02	10.50	2.64	11.54	1.06		
K ₂ O	0.00	0.00	8.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.04	0.00	0.05	0.39	0.10	0.75	0.08	0.00		
Σ	100.02	98.36	94.95	98.65	100.49	101.58	101.32	101.12	98.41	100.99	100.55	101.39	97.94	99.85	100.19	95.07	97.00	101.50	101.06	101.49	96.71	100.42	98.62	101.74	96.59		
O	12	6	11	12	6	12	6	12	6	12	6	12	6	12	6	11	23	8	6	23	8	23	8	23	8		
Si	3.037	2.030	3.545	2.942	1.972	2.995	1.989	2.980	1.983	2.932	1.957	2.898	2.001	3.080	1.958	3.517	7.460	2.461	1.831	2.968	6.502	2.901	6.502	2.948	7.666		
Al ^W	0.000	0.000	0.455	0.058	0.028	0.005	0.011	0.020	0.017	0.068	0.043	0.102	0.000	0.000	0.042	0.484	0.540	1.551	0.170	1.008	1.498	1.077	1.498	1.056	0.211		
Al ^W	2.010	0.379	1.848	1.958	0.326	1.879	0.250	1.811	0.250	1.906	0.294	1.900	0.304	1.774	0.251	1.838	0.155	0.000	0.257	0.000	0.660	0.000	0.691	0.000	0.000		
Ti	0.004	0.003	0.032	0.010	0.005	0.006	0.005	0.009	0.007	0.010	0.004	0.004	0.002	0.007	0.028	0.028	0.013	0.002	0.020	0.002	0.079	0.002	0.084	0.001	0.000		
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.094	0.000	0.109	0.114	0.159	0.087	0.147	0.050	0.212	0.068	0.079	0.086	0.000	0.649	0.000	0.000	0.000	0.531	0.000	0.346	0.000	0.925		
Fe ²⁺	1.724	0.171	0.169	1.627	0.250	1.705	0.184	1.719	0.192	1.616	0.207	1.576	0.080	1.771	0.178	0.182	1.324	0.002	0.256	0.004	1.550	0.006	1.725	0.002	1.014		
Mn	0.025	0.001	0.000	0.046	0.000	0.033	0.002	0.037	0.000	0.053	0.003	0.031	0.00	0.038	0.001	0.000	0.020	0.000	0.005	0.000	0.005	0.000	0.006	0.002	0.023		
Mg	0.262	0.387	0.317	0.458	0.489	0.414	0.452	0.410	0.475	0.440	0.484	0.431	0.529	0.358	0.466	0.297	3.626	0.000	0.521	0.003	2.151	0.002	2.131	0.000	3.395		
Ca	0.886	0.601	0.000	0.796	0.626	0.844	0.631	0.869	0.653	0.817	0.651	0.820	0.629	0.853	0.638	0.005	0.839	0.541	0.816	0.051	1.594	0.124	1.692	0.021	1.799		
Na	0.009	0.407	0.023	0.012	0.303	0.024	0.363	0.000	0.336	0.009	0.309	0.023	0.381	0.041	0.351	0.022	0.931	0.406	0.121	0.925	0.870	0.893	0.751	0.960	0.303		
K	0.000	0.000	0.787	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.831	0.000	0.002	0.000	0.074	0.006	0.140	0.005	0.000			

I. 榴辉岩相阶段; II. 后榴辉岩相的角闪岩相阶段; III. 后榴辉岩相的绿帘角闪岩相阶段; IV. 后榴辉岩相的绿片岩相阶段。探针型号: JXA-733, 工作条件: 15kV, 10μA, 2μm。分析的金铁 FeO* 按郑巧荣(1983)方法计算成 Fe²⁺ 和 Fe³⁺。

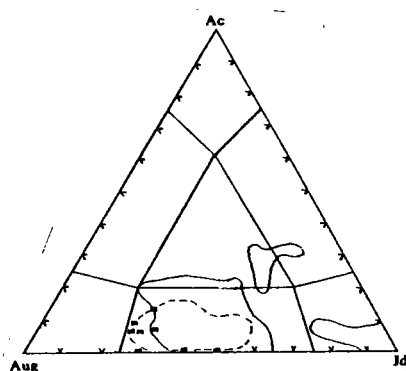


图 2 绿辉石的 Ac-Aug-Jd 图解

断线为大别山南带榴辉岩的成分域,资料来源:梁万通(1990),张泽明(1992,1993),张泽明,游振东(1992),肖林益(1993),葛宁洁(1993)。实线为西阿尔卑斯大陆型榴辉岩,资料来源: Droop, G. T. R. (1990)

这一变质事件是由柯石英榴辉岩中原生矿物石榴石和绿辉石中的矿物包裹体记录的,矿物包裹体主要为韭闪石质角闪石、多硅白云母、钠长石、绿帘石和石英,这一矿物组合与绿帘角闪岩相当。

2.2 榴辉岩相阶段

该阶段以石榴石、绿辉石(加柯石英)的共存为标志。官坡地区柯石英榴辉岩此阶段的典型矿物共生组合为石榴石+绿辉石+柯石英+金红石和石榴石+绿辉石+柯石英+多硅白云母+金红石。榴辉岩相阶段的变质温压条件根据柯石英—石英的相转变界线,石榴石—单斜辉石温度计确定^[3,4],柯石英榴辉岩的下限压力应为 2.6~3.0 GPa,温度在 602~758℃(平均 657℃)。柯石英榴辉岩稳定上限压力较难确定,由于本区还未发现金刚石,很可能在金刚石—石墨相转变线之下^[5]。

2.3 后榴辉岩相的角闪岩相阶段

柯石英榴辉岩形成之后由于构造作用而抬升, P-T 条件的改变使榴辉岩发生了明显的退化变质作用。后榴辉岩相的角闪岩相阶段以绿辉石和柯石英等矿物的消失,含斜长石的各种后成合晶矿物的广泛发育为特征,该阶段共生矿物为斜长石+角闪石+透辉石+石英。其退变质反应为 $Grt + Omp + SiO_2 + H_2O \rightarrow Am + Pl + Mt$, $Omp + SiO_2 \rightarrow D_1 + Pl$, $Grt + SiO_2 + H_2O \rightarrow Am + Mt$, 该阶段根据共生的角闪石—斜长石、角闪石—单斜辉石矿物之间的分配系数温度计和单斜辉石中硬玉分子含量压力计确定温压,温度为 602~674℃,压力为 1.0 GPa,相当于角闪岩相。

2.4 后榴辉岩相的绿帘角闪岩相阶段

后榴辉岩相绿帘角闪岩相阶段以大颗粒角闪石替代绿辉石或其后成合晶矿物,以及绿帘石和钠长石的出现为标志。该阶段代表性退变反应为 $Pl + Am \rightarrow Ep + Ab$, 根据共生的角闪石—斜长石利用 Perchuk, L. L. (1966) 和 Plyusina, L. P. (1982) 图解得其温度为 470~510℃,压力为 0.6~0.7 GPa。

2.5 后榴辉岩相的绿片岩相阶段

绿片岩相阶段以石榴石、白云母、角闪石等被绿泥石、阳起石、黑云母和绿帘石等替代为标志,共生矿物组合为阳起石+绿泥石+黑云母+绿帘石+石英。可能的变质反应有 $Grt + H_2O \rightarrow Chl + Q$, $Am + Pl \rightarrow Ep + Chl + Ab + Qt_2$, $Am + Prg \rightarrow Chl + Ab + Mt$ 和 $Am + Phe \rightarrow Chl + Ab + BiO + Mt$ 。该阶段的温度为 300℃±,压力为 0.2 GPa±。

根据以上 5 期变质作用,结合成岩格子和各变质阶段的温压条件,便可得出官坡地区柯石英榴辉岩进、退变质的 P-T 轨迹(图 4)。整个变质作用的 P-T 轨迹特点是:呈顺时针方向

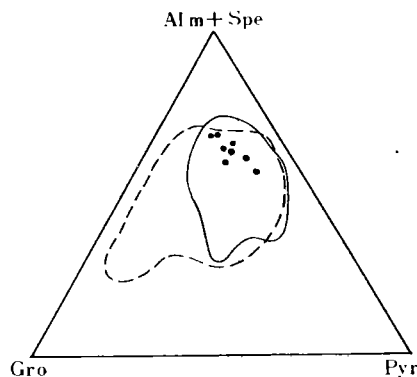


图 3 石榴石的 Alm+Spe-Gro-Pyr 图

断线为大别山南带榴辉岩的成分域,资料来源同图 2,实线为西阿尔卑斯大陆型榴辉岩,资料来源: Carswell, D. A. (1990)

旋转;进变质作用为缓慢升温的显著增压过程;退变质作用早期近等温降压,后期为降温降压过程。

3 柯石英榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄及成因解释

为确定北秦岭柯石英榴辉岩的年龄,选择新鲜榴辉岩样品进行 Sm-Nd 等时年龄测定,从样品中分选出石榴石、绿辉石、金红石和角闪石四种单矿物,所选矿物纯度达 100%,无蚀变颗粒,再加上全岩样,共 5 件样品进行了 Sm-Nd 同位素年龄测试。样品由宜昌地质矿产研究所 Sm-Nd 同位素实验室完成。样品的 Sm、Nd 含量及 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测定值列于表 2,其等时线图示于图 5,由 4 个单矿物和 1 个全岩样所确定的等时年龄为 $400 \pm 16\text{Ma}$ ^[7]。柯石英榴辉岩中的柯石英均以包裹体形式存在于石榴石和绿辉石矿物晶体中,说明组成现今榴辉岩的主要矿物石榴石和绿辉石,形成于柯石英之后。柯石英榴辉岩应是榴辉岩俯冲到最大深度时形成的,包裹柯石英的石榴石和绿辉石是该榴辉岩块被推覆上升的初期再次平衡重结晶的产物,所以该 Sm-Nd 矿物等时年龄应是柯石英榴辉岩抬升初期的年龄。

表 2 Sm、Nd 同位素分析结果

分析编号	样品名称	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
994001	全岩	2.41	8.74	0.166 4	$0.512\ 745 \pm 14$
994002	金红石	2.02	5.78	0.213 0	$0.512\ 872 \pm 26$
994003	石榴石	1.71	4.96	0.208 5	$0.512\ 850 \pm 13$
994004	角闪石	5.57	19.3	0.174 1	$0.512\ 767 \pm 15$
994005	绿辉石	2.68	9.29	0.174 3	$0.512\ 765 \pm 17$

一般认为榴辉岩是消减俯冲到深部时生成的,因此榴辉岩的生成时代代表的是洋壳俯冲时代,在俯冲作用达到高潮时形成超高压变质岩。官坡地区柯石英榴辉岩矿物 Sm-Nd 等时年龄 $400 \pm 16\text{Ma}$ 并不代表其形成年龄,即不是洋壳俯冲年龄,它代表的是榴辉岩抬升初期年龄。只有到了陆块碰撞期才可能使柯石英榴辉岩发生抬升,所以 $(400 \pm 16)\text{Ma}$ 是扬子和华北陆块碰撞的时代。

柯石英榴辉岩 P-T-t 轨迹的进变质阶段缓慢升温的显著增压轨迹,代表扬子和华北陆块之间的洋

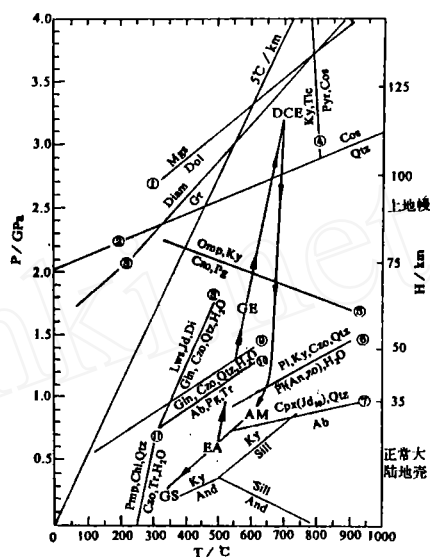


图 4 柯石英榴辉岩变质作用 P-T 轨迹
图中字母 DCE、GE、AM、EA 和 GS 分别示超高压榴辉岩、高压榴辉岩及角闪岩相、绿帘角闪岩相和绿片岩相。图中变质反应分别依据: ①、②、③ Smith (1989), ④、⑤、⑥和 ⑦ Chopin et al. (1991), ⑧、⑨、⑩和⑪ Evans (1990)。

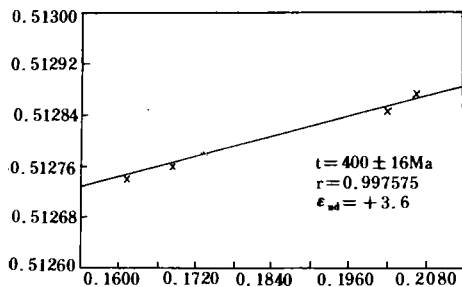


图 5 Sm-Nd 等时线图

壳向华北陆块快速消减俯冲过程,退变质阶段早期近等温降压轨迹代表俯冲作用停止,转为陆内逆冲推覆,柯石英榴辉岩沿朱夏断裂快速折返至陆壳以下 40 km 左右这一过程,后期的降温降压轨迹代表陆陆碰撞后期构造弛豫阶段较缓慢的抬升过程。

4 结论

(1)官坡地区柯石英榴辉岩经历了 5 期变质作用,即前榴辉岩相的绿帘角闪岩相、榴辉岩相、后榴辉岩相的角闪岩相、绿帘角闪岩相和绿片岩相。

(2)官坡地区柯石英榴辉岩 P-T-t 轨迹呈顺时针方向旋转,进变质作用为缓慢升温的显著增压过程,退变质作用早期近等温降压过程,后期为降温降压过程。

(3)柯石英榴辉岩矿物 Sm-Nd 等时年龄(400 ± 16)Ma 代表扬子和华北陆块的碰撞时代,并非洋壳俯冲的时代。

参 考 文 献

- 1 胡能高,杨家喜,王 涛,赵东林.东秦岭秦岭岩群中榴辉岩的发现及其地质意义.西安地质学院学报,1994,16(2): 105~106
- 2 胡能高,赵东林,徐柏青,王 涛.北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义.科学通报,1994,39(21): 2013
- 3 胡能高,赵东林,徐柏青,王 涛.北秦岭官坡地区高压-超高压榴辉岩岩相学及变质作用研究.矿物岩石,1995,15(4): 1~9
- 4 Bohlen S R, et al. The quartz-coesite transformation: a precise determination and effects of other components. J. Geophys. Res. 1982, 87: 7073~7087
- 5 Krogh E J. The garnet - clinopyroxene Fe - Mg geothermometer - a reinterpretation of existing experimental data. Contrib. Mineral Petrol., 1988, 99: 44~48
- 6 Kennedy C A. The equilibrium boundary between graphite and diamond. J. Geophys. Res. 1976, 2467~2470
- 7 胡能高,赵东林,杨家喜.北秦岭榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄.矿物学报,1996,16(4): 35~38

METAMORPHIC P-T-t PATH FOR THE COESITE ECLOGITES FROM THE GUANPO AREA, NORTHERN QINLING MOUNTAIN

Zhao Donglin

(Dept. of Economic Resources, Xi'an College of Geology, Xi'an 710054)

Abstract On the studies of the relations of mineral generations and conversion of mineral assemblages, the metamorphic evolution of the coesite eclogite in Guanpo area, northern Qinling mountain, may be divided into five stages: epidote-amphibolitic facies of the pre-eclogite facies, coesite eclogite facies, amphibolitic facies of the post-eclogite facies, epidote-amphibolitic facies and greenschist facies. The Sm-Nd dating of the rock specimen yields an excellent isochron, indicating that the coesite eclogite was uplifted along Zhuxia fault at about 400 Ma ago. The geodynamic process for the P-T-t path of coesite eclogite might be related to the underthrust collision between Yangtze and Huabei massifs.

Key words Coesite eclogite, P-T-t path, Sm-Nd isochron age, Northern Qinling mountain