

# 雪峰山东段—连云山杂岩 区域变质特征及岩石圈深部作用信息<sup>①</sup>

彭和求<sup>1,2</sup>, 唐晓珊<sup>2</sup>, 郭乐群<sup>2</sup>

(1 中国地质大学, 湖北武汉 430074)

(2 湖南省地质调查院, 湖南湘潭 411100)

**摘要** 通过对新近发现的连云山杂岩空间分布特征、岩相学、变质作用期次等的深入研究, 表明它们经历了五期变质作用, 即吕梁运动导致初始的埋藏变质作用以及随后深埋到 33 km 深度的近高压绿片岩相变质作用和角闪岩相作用。此后因基性岩浆多次底侵和基底活化, 连云山杂岩在晋宁期和燕山期遭受过多期次的局部高角闪岩相的变质作用, 最后随湘东北盆—岭构造的形成和发展而进入退变质阶段, 整个过程为近顺时针方向演化的 P-T 轨迹。其 P-T 轨迹揭示了湘东北地区壳幔间相互作用过程和热历史演变。

**关键词** 古元古代, 连云山杂岩, P-T 轨迹

**中图分类号** P586

**文献标识码** A

湘东北地区, 位于扬子陆块与华南陆块的结合部位, 属雪峰山造山带东段。此前, 许多学者<sup>[1,2]</sup>将鄂西南的神农群、湘江西的冷家溪群、黔东的梵净山群、桂北的四堡群划为上述区域的基底构造层次褶皱基底<sup>[3,4,5,6]</sup>。近年来随着 1:25 万长沙市幅区调工作研究的逐步深入, 在湘东北地区首次发现有古元古代结晶基底—连云山杂岩、苍溪混杂岩的存在。湘东北结晶基底的确认, 将为华南前寒武纪大陆的形成和演化提供依据。

## 1 连云山杂岩的地质产状

连云山杂岩呈残片状展露于湘东北九岭—幕阜山岭中(图 1), 总面积大于 150 km<sup>2</sup>。与上覆中元古代冷家溪群呈断层接触, 又被印支—燕山期花岗岩吞噬、肢解而不完整。

连云山杂岩是一套变质达中—高角闪岩相的中—深变质岩系, 并经受了多期混合岩化和热接触变质作用。其组成复杂、岩石类型多样, 按地质产状可划分为变质表壳岩、变质镁铁质侵入岩和花岗质片麻岩等三个组合, 其岩石组合和变质特征可与扬子陆块北缘的桐柏杂岩等变质地质体对比<sup>[7,8]</sup>。变质表壳岩系主要包括: 十字石石榴石黑云母片岩、混合岩化石榴石二云母石英片岩、含矽线石堇青石石榴石钾长片麻岩。花岗质片麻岩主要包括: 黑云

<sup>①</sup> 收稿日期: 2002-03-11

万方数据

第一作者简介: 彭和求, 男, 高级工程师, 在读硕士, 主要从事区域地质调查工作。

母斜长片麻岩、石榴石黑云母斜长片麻岩、石榴石白云母斜长片麻岩。变质铁镁质侵入岩主要包括：石榴石斜长角闪岩、黑云母斜长角闪岩等。

连云山杂岩变质作用程度在空间上具有局部分布不均一性。在连云山附近,主要是由一套角闪岩相的十字石石榴石黑云母片岩、混合岩化石榴石二云母片岩、斜长角闪岩等组成。往北至幕阜山附近,则呈穹隆展露,核部为花岗质片麻岩,周缘依次为含矽线石堇青石石榴石钾长片麻岩、十字石石榴石黑云母片岩、石榴石云母片岩等,呈高角闪岩相向低角闪岩相演变,即围绕花岗质片麻岩穹隆呈现侧向递增性。这也说明连云山杂岩早期角闪岩相变质与燕山期幕阜山岩体无关。

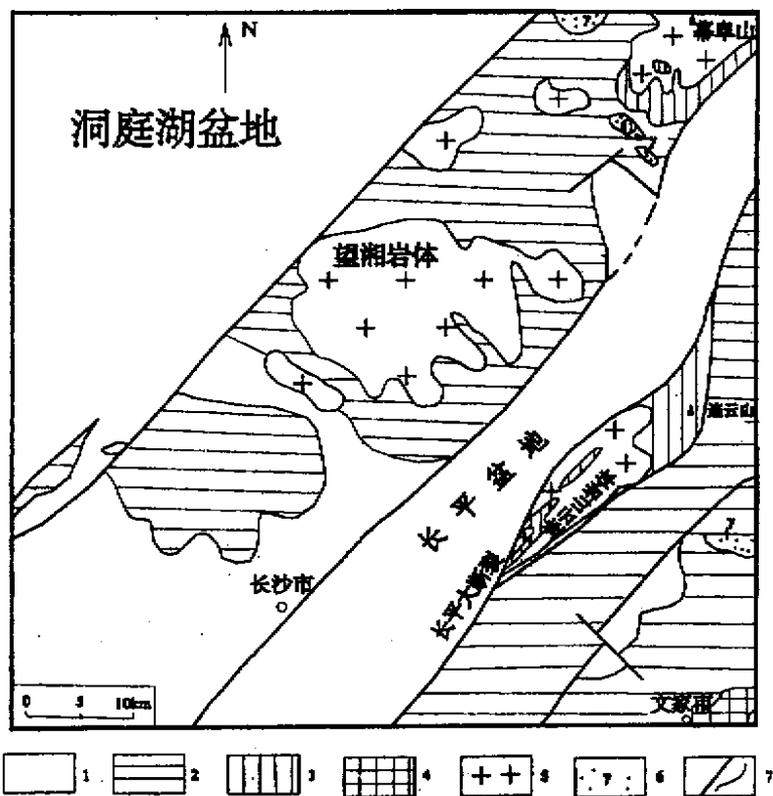


图1 湘东北地区地质略图

Fig.1 Geological sketch map of Northeastern Hunan area

- 1 - 沉积盖层 2 - 冷家溪群褶皱基底 3 - 连云山杂岩结晶基底 4 - 沧溪混杂岩结晶基底 5 - 印支—燕山期花岗岩 6 - 新元古代花岗岩 7 - 断层与地质界线

## 2 岩相学特征

### 2.1 变质表壳岩系

十字石石榴石黑云母片岩岩石为片状构造,磷片花岗变晶结构。出现特征变质矿物十字石与石榴石、黑云母、斜长石、石英组成峰期变质矿物组合。十字石呈长柱状和板柱状,局部有溶蚀,内部含丰富的石英包体。绿泥石沿边缘和解理处交代黑云母,系晚期退变质作用的产物。根据特征矿物十字石可判断其原岩为富铝泥质岩,属角闪岩相十字石亚相。

含矽线石堇青石石榴石钾长片麻岩,片麻状构造,斑状变晶结构,基质为鳞片花岗变晶结构。基质主要为钾长石、黑云母、白云母、石英、矽线石与变斑晶石榴石、堇青石组成变质峰期矿物组合。矽线石呈纤状、毛发状束状集合体,为典型的高温矿物。堇青石变斑晶中含有大量的十字石、少量的黑云母等包体,十字石呈短柱状与黑云母定向排列,与主期片理小角度相交,系早期变质作用的产物。

## 2.2 花岗质片麻岩系

黑云母斜长片麻岩,岩石具片麻状构造,磷片粒柱状变晶结构,矿物组合为斜长石、黑云母、白云母和石英等,其中斜长石含量 35%,石英约 30%,黑云母 30%,次要矿物为白云母、石榴石,副矿物有磷灰石、锆石等。

## 2.3 变铁镁质岩系

石榴石斜长角闪岩,主要为块状和芝麻点状构造,斑状变晶结构。变斑晶为石榴石,基质为粒柱状变晶结构,主要组成矿物为角闪石和斜长石,二者呈大致定向排列构成面理,此外还有少量石英、黑云母等,它们平衡共生,组成峰期组合。角闪石普遍呈港湾状,内有绿帘石、石英和黑云母等早期矿物组合。

## 3 变质作用期次分析

通过矿物平衡共生组合分析、变质反应关系、矿物世代划分和变斑晶显微构造分析等多方面综合研究,连云山杂岩至少经历过 5 期次变质作用阶段。

早期绿片相变质作用( $M_1$ ):绿片岩相区域变质是前角闪岩相变质残留,由于后期角闪岩相进变质作用,该期变质矿物组合已几乎完全消失,仅在铁家龙石榴石斜长角闪岩的角闪石晶体中发现绿帘石、石英和黑云母包裹体残留;在水家坪黑云母斜长片麻岩的斜长石斑晶中存在细少柱状阳起石和黝帘石等包裹体残留;在连云山十字石石榴石云母片岩的前构造期石榴石变斑晶中早期片理与主期片理较大角度斜交,组成早期片理的变质矿物组合为绿片岩相斜长石、石英、绿泥石和云母等。早期片理  $S_1$ ,基本无变形迹象。综合分析,早期共生矿物组合为钠长石 + 绿帘石 + 阳起石(或透闪石) + 绿泥石 + 石英,是低温绿片岩变质相<sup>[9]</sup>。且据其区域性残存分布、早期片理  $S_1$  无变形迹象推断其系埋藏变质作用所致<sup>[10]</sup>。

角闪岩相变质作用( $M_2$ ):其矿物组合以粗粒石榴石变斑晶与特征变质矿物十字石及基质矿物角闪石、斜长石、黑云母、石英等为代表,不出现矽线石。角闪石、斜长石和黑云母构成区域面理。典型共生矿物组合为十字石 ± 黑云母 + 白云母 + 斜长石 + 石英,据普遍出现特征矿物十字石、石榴石而无矽线石判断其变质程度达角闪岩相十字石亚相<sup>[9]</sup>。

高角闪岩相或麻粒岩相变质作用( $M_3$ ):在幕阜山花岗质片麻岩穹隆核部出现典型高温矿物堇青石、矽线石和钾长石组合带。在堇青石变斑晶内有短柱状十字石、黑云母等平行定向排列并与主期片理斜交。矽线石柱状或纤状晶束的出现是高于十字石带的标志,矽线石开始出现说明变质地温梯度已跨过蓝晶石—矽线石单变线<sup>[9]</sup>。说明在十字石亚相之后发生过递进变质作用。

角闪岩相变质作用( $M_4$ ):早期十字石巨斑晶因韧性伸展作用而片理化,并形成新生矿物组合石英 + 长石 + 黑云母 + 石榴石;早期石榴石变斑晶塑性变形呈眼球状集合体;沿早期片理充填新生型细粒状石榴石集合体。该期石榴石与早期石榴石之区别为:早期石榴石一般呈较大的帚状变晶结构和环带结构,边缘被溶蚀呈圆形或椭圆形,晚期石榴石个体相对较

小,表面干净,外形为正六边形。上述变质特征仅在连云山地区被发现,推测与连云山变质核杂岩、燕山期连云山岩体有关。根据沿新生面理发育石榴石+黑云母+长石+石英的矿物组合,判断为角闪岩相,并且该期变质作用伴有石榴石、十字石的韧性流变,说明温度很高,达花岗质成分的熔融条件。这与野外观察到的燕山早期连云山地区发生过剪切深熔混合岩化相佐证。

晚期绿片相区域变质作用( $M_5$ )晚期表现为绿泥石、白云母、绿帘石等低温矿物部分置换普通角闪石、黑云母、石榴石等早期较高温矿物,其矿物组合以绿泥石+白云母等矿物组合为代表,具低绿片岩相变质特征。

综合上述,整个连云山杂岩中角闪岩相变质作用和绿片岩相变质作用不具连续递变的特点,而表现出叠加的关系。其中十字石亚相相当于中温角闪岩相,矽线石—钾长石带相当于高角闪岩相或麻粒岩相,整个岩石变质程度较高,并有混合岩化作用发生。

## 4 变质作用演化

### 4.1 变质温度、压力估算

矿物的电子探针分析结果列表1。利用变基性岩石榴石斜长角闪岩中峰期变质矿物斑晶石榴石及基质矿物斜长石、角闪石组成的温压计求得其温度、压力见表2。

表1 矿物电子探针成分分析结果(%)

Talbe 1 Microprobe analytic results of minerals(%)

样品号	1025-1						1025-2			
	st-b	Bi-b	Bi-c		Gt-b	Chl	Gt-c	Gt-b	Hb-c	Hb-b
SiO <sub>2</sub>	27.577	36.69	36.02	37.40	37.355	25.59	39.080	38.566	44.117	43.151
TiO <sub>2</sub>	0.539	1.646	1.737	0.058	0.056	0.056	0.380	0.000	0.282	0.070
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55.53	20.089	20.29	22.189	20.801	21.42	21.602	22.229	14.958	15.014
FeO	15.15	21.132	20.64	37.284	38.701	28.81	28.258	29.794	18.604	18.219
MnO	0.098	0.024	0.000	0.26	0.148	0.099	1.913	1.843	0.040	0.208
MgO	1.126	9.419	8.469	2.181	2.567	9.438	1.596	1.689	7.993	8.828
CaO	0.005	0.000	0.000	0.557	0.713	0.029	6.521	5.920	9.441	8.862
Na <sub>2</sub> O	0.000	0.512	0.439	0.144	0.000	0.000	0.085	0.000	0.363	1.185
K <sub>2</sub> O	0.000	6.304	10.19	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.019	0.141
Total	100.025	95.816	97.779	100.073	100.341	85.465	99.435	100.04	95.787	95.798
O.N.	7	11	11	12	12	14	12	12	23	23
Si	1.145	2.734	2.689	3.002	3.016	2.811	3.093	3.049	6.630	6.509
Ti	0.017	0.092	0.098	0.004	0.003	0.005	0.023	0.000	0.032	0.031
Al	2.718	1.764	1.785	2.099	1.979	2.776	2.015	2.071	2.644	2.669
Fe <sup>3+</sup>				0.000	0.000		0.000	0.000	1.508	1.764
Fe <sup>2+</sup>	0.526	1.317	1.289	2.503	2.613	2.647	1.87	1.970	0.754	0.446
Mn	0.003	0.002	0.000	0.018	0.01	0.009	0.128	0.123	0.005	0.027
Mg	0.07	1.046	0.943	0.261	0.309	1.546	0.188	0.199	1.791	1.985
Ca	0.000	0.000	0.000	0.048	0.062	0.003	0.553	0.502	1.520	1.432
Na	0.000	0.074	0.064	0.022	0.000	0.000	0.013	0.000	0.106	0.323
K	0.000	0.599	0.97	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.027
Total	4.479	7.628	7.838	7.956	7.992	9.979	7.883	7.915	14.994	15.213
TotalO	2.806	2.457	2.452	2.488	2.474	2.121	2.523	2.526	2.547	2.538

续表 1( Continue Table1. )

样品号	1016-1					1025-3				
	Bi-b	Sil	Chi	Gt-c	Gt-b	Ep	Hb-c	Gt-c	Gt-b	Pl
SiO <sub>2</sub>	28.781	36.947	24.46	37.328	36.269	43.299	42.755	36.685	36.617	45.854
TiO <sub>2</sub>	2.162	0.145	0.2	0.131	0.072	0.028	0.487	0.165	0.070	0.000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.291	60.199	23.48	21.479	21.538	33.886	13.565	21.079	20.773	34.931
FeO	20.119	1.108	27.19	37.302	37.636	0.094	21.079	22.012	23.189	0.000
MnO	0.027	0.016	0.039	0.763	0.935	0.043	0.1196	11.220	10.464	0.000
MgO	9.361	0.378	13.5	2.584	1.176	0.000	7.201	0.713	0.768	0.000
CaO	0.036	0.013	0.035	0.784	1.176	16.179	10.117	7.050	7.584	16.382
Na <sub>2</sub> O	0.305	0.000	0.000	0.000	0.180	0.966	1.34	0.063	0.097	1.185
K <sub>2</sub> O	10.448	1.349	0.000	0.000	0.000	0.000	0.338	0.000	0.000	0.019
Total	92.53	100.16	88.894	100.37	99.905	94.495	97.078	98.987	99.561	98.371
O.N.	11	5	14	12	12	12.5	23	12	12	8
Si	2.324	1.01	2.562	2.999	2.95	3.082	6.508	2.985	2.975	2.131
Ti	0.131	0.003	0.016	0.008	0.004	0.002	0.056	0.010	0.004	0.000
Al	2.026	1.939	2.898	2.034	2.064	3.027	2.433	2.022	1.989	1.913
Fe <sup>3+</sup>			0.000	0.098	0.005	1.170	0.000	0.000		
Fe <sup>2+</sup>	1.358	0.025	2.382	2.506	2.453		1.445	1.498	1.576	0.000
Mn	0.002	0.000	0.003	0.052	0.064	0.003	0.025	0.773	0.72	0.000
Mg	1.127	0.015	2.109	0.309	0.254	0.000	1.643	0.086	0.093	0.000
Ca	0.003	0.000	0.004	0.067	0.102	1.314	1.65	0.615	0.66	0.816
Na	0.048	0.000	0.000	0.000	0.028	0.142	0.395	0.010	0.015	0.107
K	1.076	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.000	0.000	0.001
Total	8.094	3.041	9.974	7.976	8.019	7.773	15.382	7.999	8.033	4.967
TotalO	2.268	3.044	2.224	2.486	2.456	2.745	2.515	2.454	2.458	2.866

注:由武汉工业大学材料与测试中心 Cameca SX51 探针仪器测试。-c. 晶体核部 ;-b. 晶体边部 ;1025-1 十字石石榴石,黑云母片岩 ;1025-2 石榴石斜长角闪岩 ;1025-3 石榴石斜长角闪岩 ;1016-1 矽线石石榴石钾长片麻岩

表 2 连云山杂岩变基性岩主期变质矿物的温压估算结果\*

Table 2 The data of geothermometers and geobarometers for the meta-mafic rocks in main stages

岩石名称	T(℃)	温度计	P(kbar)	压力计
石榴石斜长角闪岩	450(Core) 400(rim)	Hb-Gt (Graham & Powell,1984)	10.31(rim)	Al in Hl(Hammartron & Zen,1986)
			9.38(Core)	
			11.20(rim)	Al in Hb(Hollister etal 1987)
			10.15(Core)	
石榴石斜长角闪岩	520	Hb-Gt (Graham & Powell,1984)	8.51(rim)	Al in Hb(Johnson & Rutherford,1988)
			7.14(Core)	
			8.23(rim)	Al in Hb(Hammartron & Zen,1986)
			8.37(Core)	
石榴石斜长角闪岩	520	Hb-Gt (Graham & Powell,1984)	8.86(rim)	Al in Hb(Hollister etal 1987)
			9.03(Core)	
			6.76(rim)	Al in Hl(Johnson & Rutherford,1988)
			6.87(Core)	

\*温压计出处:Hb-Gt 温度计<sup>[11]</sup>,Hl(Al)含量压力计<sup>[12][13][14]</sup>

本文所用矿物代号:Ky 蓝晶石,Sil 矽线石,And 红柱石,St 十字石,Bi 黑云母,Gt 石榴石,Hb 角闪石,Pl 斜长石,Ep 绿帘石,Chl 绿泥石

早期绿片岩相变质作用( $M_1$ )阶段温压估算。该阶段绿片岩相变质残余的矿物共生组合为绿帘石 + 阳起石 + 石英 + 黑云母(1025-2),判断属低绿片岩相。该组合的温度为400~500℃。在富铝片麻岩中,石榴石中的包体矿物组合为黑云母 + 白云母 + 绿泥石 + 石英 + 斜长石,根据反应方程式绿泥石 + 斜长石 = 铁铝榴石 + 绿泥石 + 石英 +  $H_2O$ 发生的温压条件的实验资料,上述组合形成的温压条件估计为  $T \leq 500^\circ\text{C}$ ,  $P \leq 4$  kbar。

角闪岩相变质作用( $M_2$ )阶段温压估算。该阶段以峰期变质矿物十字石大量发育为特征。根据形成十字石的变质反应,Hoschek(1969)标定其平衡温度为  $540^\circ\text{C} \sim 546^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$ 。据1025-2变基性岩样,边缘压力为8.5~11.2 kbar,温度为404℃,平均深度  $D = 33$  km,  $dT/dD = 12.2^\circ\text{C}/\text{km}$ ,核部压力为7.1~10.1 kbar,温度为450℃,平均深度  $D = 29.3$  km,  $dT/dD = 15.4^\circ\text{C}/\text{km}$ 。该变基性岩为高压相系高绿片岩相—低角闪岩相变质岩,从早期(核部)到晚期(边缘)经历了降温增压的过程。据1025-3号变基性岩样,边缘压力为6.8~8.9 kbar,温度为524℃,平均深度  $D = 26.2$  km,  $dT/dD = 20^\circ\text{C}/\text{km}$ ,核部压力6.9~9.0 kbar,温度为524℃,平均深度  $D = 26.7$  km,  $dT/dD = 20^\circ\text{C}/\text{km}$ 。据此可推断  $M_2$ 阶段经历了早期近高压低角闪岩(高绿片岩)相至晚期的中压相系的角闪岩相变质作用。

高角闪岩相或近麻粒岩相变质作用( $M_3$ )阶段温压估算。典型高温矿物组合石英 + 钾长石 + 斜长石 + 矽线石 + 铁铝榴石 + 堇青石,其温度压力范围可由变质反应线白云母 + 石英 = 矽线石 + 钾长石和角闪岩相向麻粒岩相过渡的变质反应矽线石 + 黑云母 + 石英 = 堇青石 + 石榴石 + 正长石 +  $H_2O$ 来限定,温度为660~735℃,压力在3.5~8 kbar之间<sup>[9,15]</sup>。

角闪石相变质作用( $M_4$ )阶段温压估算。该阶段以早期十字石斑晶片理化,石榴石斑晶眼球状化为特征,并伴有连云山杂岩剪切深埋作用和混合岩化,据此判断其温度大于700℃<sup>[16]</sup>,即位于泥质岩系花岗质成分初始熔融线以下。

低绿片岩相退变质作用( $M_5$ )阶段温压估算。据混合岩化石榴石斜长角闪岩和富白云母斜长花岗质片麻岩流体包裹体测温,低温组温度范围为119~199℃及204~297℃两组。低温组反映后期退变质(伴随混合岩化和热液蚀变)温度。以石榴石斜长角闪岩中退变质矿物绿泥石的化学成分,利用Cartelleanu等(1985)的绿泥石温度计计算得  $T = 235^\circ\text{C}$ 。

#### 4.2 P-T-t 轨迹的重建及深部作用过程

将温压估算结果和矿物世代分析综合起来进行考虑,对连云山杂岩进行P-T作图,获得如图2所示的P-T轨迹,整个过程似顺时针方向演化的P-T轨迹<sup>[17]</sup>。根据这个P-T轨迹,我们认为连云山杂岩经历了吕梁运动初期的构造埋藏变质作用( $M_1$ )以及随后深埋到33 km深度的近高压变质作用。随后增厚的地壳,因重力均衡隆升,同时基性岩浆底侵作用和下地壳对中上地壳加温仍在继续,从而使连云山杂岩—变质地体具降压增温的轨迹。

$Sm-Nd$ 全岩等时线年龄  $1905 \pm 25$  Ma,  $\epsilon Nd(T) = 5.4$ ,  $TDM = 1947.5$  Ma,连云山地区石榴石斜长角闪岩  $Sm-Nd$ 全岩等时线年龄  $1960 \pm 3$  Ma,  $\epsilon Nd(T) = 5.6$ ,  $TDM = 1980.9$  Ma。 $Sm-Nd$ 同位素年龄和Nd同位素示踪揭示出从19.82亿年左右幕阜—连云山地区存在基性岩浆底侵作用<sup>[20]</sup>,随后1960 Ma左右吕梁碰撞造山作用使地壳收缩增厚先存低绿片岩相浅变质岩系发生板块俯冲至33 km深处并遭受近高压绿片岩相(低角闪岩相)变质作用。在1904 Ma左右发生角闪岩相变质作用。由于缓慢抬升、充分的热弛豫、连续的增温(持续低侵作用),深部岩石受到加热必然引起变质地体近等压增温,产生P-T图解中 $M_2-M_3$ 段递进变质作用轨迹<sup>[19]</sup>。

表 3 连云山杂岩 Sm - Nd 同位素年龄分析结果

Table 3 Analytical results of Sm - Nd isotopic ages in the Lianyunshan complex

样品号	Sm( ppm)	Nd( ppm)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd ( ± 2σ )	TDM( Ma )	备注
连 翠 2	2-3	5.5257	26.3968	0.1266	0.512014	1981.4
	2-5	5.0010	23.1827	0.1304	0.512063	1982.4
	2-6	5.3548	28.0737	0.1153	0.511868	1979.3
	2-7	5.5326	26.8652	0.1245	0.511987	1980.7
	2-9	5.0438	24.6959	0.1235	0.511974	1980.6
	1-1	8.3542	42.0886	0.1200	0.511949	1947.4
	1-2	7.3264	36.7877	0.1204	0.511954	1947.6
	1-3	10.6215	54.0514	0.1188	0.511934	1946.8
	1025 1	1-4	10.6547	56.0837	0.1148	0.511884
1-5		10.1670	51.5684	0.1192	0.511939	1947.0
1-6		11.0300	56.7032	0.1176	0.511919	1946.2
1-7		16.2767	71.5750	0.1375	0.511648	1957.9
1-8		16.4534	92.8763	0.1072	0.511850	1942.7
1-9		11.3546	56.3701	0.1218	0.511520	1947.1

1. <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值质量分馏用 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.72190 校正。  
 2. TDM = 1/λln [ ( <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd )<sub>s</sub> - 0.51315 / ( <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd )<sub>s</sub> - 0.2137 ] + 1 } , λ = 6.54 × 10<sup>-12</sup> / a , s 代表样品测定值。  
 3. 分析测试由天津地质矿产研究所同位素年代学实验室林源贤完成。

这个研究结果获得年代学和 Nd 同位素示踪 (见表 3、图 3) 研究的支持, 在幕阜山地区被石榴石斜长角闪岩侵入的十字石石榴石黑云母片岩, 虽然测区历经武陵运动 (10 亿年) 加里东运动和印支运动, 但是区域性的热流增高尚不足以使吕梁期已达角闪岩相变质的连云山杂岩再次发生矿物相的转变。因此武陵期、加里东期和印支期的 P - T 轨迹难以确认。只有在侵位的炽热花岗岩体周围叠加的热变质晕内才有可能, M<sub>3</sub> 期变质作用产生的高温矿物组合堇青石、矽线石和钾长石就是核部存在花岗质片麻岩这一额外热源所致。花岗质片麻岩岩石组合与九岭等晋宁期岩体岩石组合相似, 因此推断 M<sub>3</sub> 期变质作用与晋宁期构造热事件相对应。

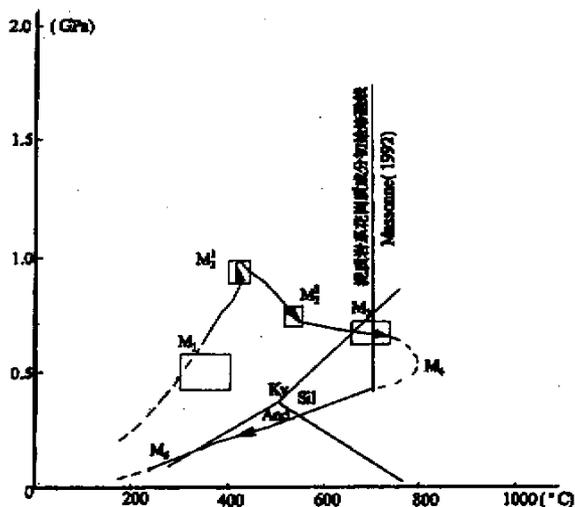


图 2 连云山杂岩变质作用 P - T 轨迹

Fig.2 The P - T path of metamorphism of the Lianyunshan complex

M<sub>4</sub> 期变质作用仅存在于连云山地区, 连云山岩体 Rb - Sr 全岩年龄 140 ~ 149 Ma<sup>[21]</sup> 可作该期变质年龄的估计值。伴随该期变质有剪切重熔型花岗岩 (连云山岩体) 形成和连云山杂岩第一期混合岩化。据研究 M<sub>4</sub> 期高角闪岩相区域变质与燕山期岩石圈地幔拆沉、基底再次活化和底侵作用密切相关。之后, 湘东北地区进入了 NE 向盆—岭构造形成和发展阶段, 九岭—幕阜山岭快速抬升, 连云山杂岩发生降温降压的低绿片相退变质作用。绿片岩相退变

质时期与九岭—幕阜山岭第一阶段隆升时期对应:即 131 ~ 120 Ma<sup>[21]</sup>①。

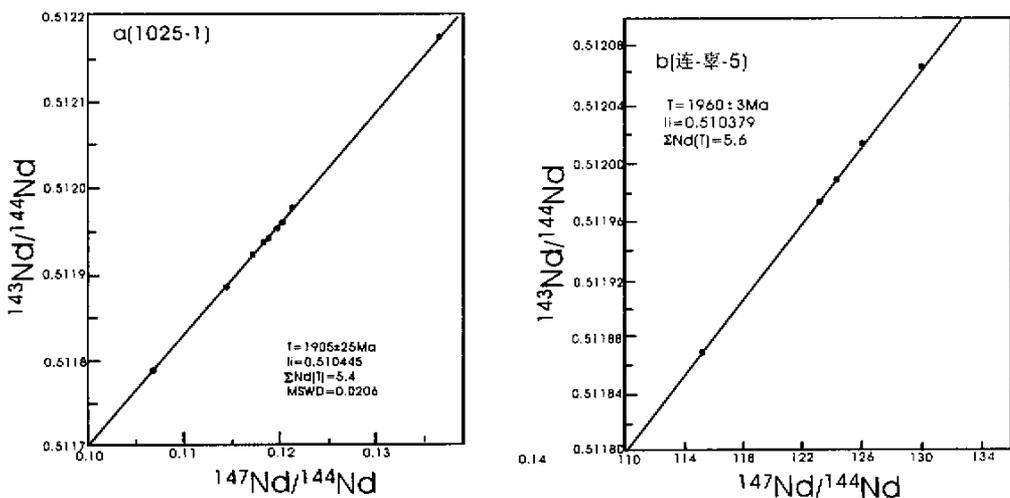


图3 连云山杂岩 Sm - Nd 全岩等时线图

Fig.3 Sm - Nd isochron of the Lianyunshan complex

### 5 结论

(1)连云山杂岩是迄今为止在湘东北地区所发现的一套变质达角闪岩相,局部达高角闪岩(麻粒岩相)的中、深变质岩系。主期角闪岩相变质系吕梁运动所致。

(2)连云山杂岩经历了一个漫长复杂的变质过程,至少经历了5期变质作用,整个变质过程为顺时针方向演化的P-T轨迹。

(3)在 1900 Ma ±,由于碰撞地壳明显加厚,板块俯冲使连云山杂岩深埋到地下 33 km 深处,接受了近高压变质作用。Nd 同位素示踪和递增变质作用的热历史反映出圈间、壳幔间的相互作用强烈。连云山杂岩经岩石圈地幔拆沉、多期底侵和基底活化而折返至地表的。

在成文过程中承蒙湖南地调院贾宝华总工程师和中国地质大学(武汉)刘嵘博士的指导,致以诚挚谢意。

### 参考文献

[1] 唐晓珊. 湖南冷水溪群岩石地层的研究[J]. 湖南地质, 1989, (2): 1-9

[2] 王自强, 索书田. 黔、湘、赣中、上元古界分层及对比[J]. 前寒武纪地质, 1986, 3: 73-86

[3] 湖北省地矿局. 湖北省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990

[4] 湖南省地矿局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987

[5] 贵州省地矿局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991

[6] 广西壮族自治区地矿局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985

[7] 索书田, 桑隆康, 韩郁菁, 等. 大别山前寒武纪地体岩石学与构造学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1993

① 《1:5万望湘地区区域地质调查报告》(内部资料)

- [ 8 ] 桑隆康,游振东.大别山前寒武纪变质地体基本组成[J].地质论评,1993,40(3):265-273
- [ 9 ] 游振东,王方正,桑隆康,等.变质岩岩石学教程[M].中国地质大学出版社,1988
- [ 10 ] 俞良军,王凯怡,王志洪,等.五台山早元古代高压变质作用研究[J].岩石学报,2001,17(2):301-312
- [ 11 ] Graham, C. M., Plwell, R. . A garnet - hornblende geothermometer, Calibration, testing and application to the Pelone Schist, southern California [ J ]. J. Metamorphic Geol. ,1984( 2 ):13 - 33
- [ 12 ] J. M. Hammartron, E - an Zen. Aluminium in hornblende : an empirical igneous geobarometer [ J ]. Amer . Mineral . ,1986 71 : 1297 - 1313
- [ 13 ] Hollister L. S. ,Grison ,G. C. ,Peters ,E. K. .etal. Conrirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc - alkaline pluton [ J ]. American Mineralogist ,1987 ,72 231 - 239
- [ 14 ] Johnson M. C. , Rutherford MJ. Experimental calibration of an aluminium - hornblende geobarometer applicable to calc - alkaline rocks [ J ]. EOS. 1988 69 :1511
- [ 15 ] Ehlers ,E. G , Blatt ,H. . Petrology [ M ]. W. H. Freeman . & Company ,1980 511 - 682
- [ 16 ] H. J. Massonne. Evidence for low - temperature ultrapotassic siliceous fluids in subduction zone environment from experiments in the system  $K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$  (KMASH) [ J ]. Lithos. ,1992 28 :421 - 434
- [ 17 ] 韩郁菁. 变质作用 P - T - t 轨迹 [ M ]. 北京 :中国地质大学出版社 ,1993
- [ 18 ] 李思田,路凤香,林畅松,等.中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景 [ M ]. 北京 :中国地质大学出版社 ,1997
- [ 19 ] 李三忠,韩宗珠,刘永江,等.辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义 [ J ].地质论评,2001,47(1):9-16
- [ 20 ] 陆松年.前寒武纪大陆地质演化示踪 [ M ].北京 :地质出版社 ,1996 :1 - 97,301 - 312
- [ 21 ] Immo Wendt , Klaus Fesefeldt , Lothar Henkes , et al. Radiometric dating of the Wangxiang intrusive complex , Hunan Province , P. R. of China [ J ]. Geologisches Jahrbuch Reihe. 1992 :1 - 37

## Regional metamorphism of the Lianyunshan complex in the eastern Xuefeng mountain belt and its significance on crust - mantle interaction

PENG He - qiu<sup>1,2</sup> , TANG Xiao - shan<sup>2</sup> , GUO Le - qun<sup>2</sup>

( 1 China University of Geosciences , Wuhan 430074 , China )

( 2 Hunan Institute of Geological Survey , Xiangtan 411100 , China )

### Abstract

Primary research on distribution , petrography and metamorphism of the new discovered Lianyunshan complex , indicates a complicate metamorphic history of five stages. They are burial metamorphism due to the Liliang movement and the subsequent high pressure greenschist facies and low amphibolite facies metamorphism at a depth around 33km. The Lianyunshan complex suffered high amphibolite facies metamorphism locally during the Jinning and Yanshan periods. Final retrograde stage started when the NE Hunan basin - mountain system developed. The clockwise P - T - t path of the Lianyunshan complex reveals the crust - mantle interaction process and the geothermal evolution history.

**Key words** : Paleoproterozoic ; Lianyunshan complex ; P - T - t path

万方数据