

东秦岭商丹地区蛇绿岩中的 角闪石研究^{*}

白学让 原莲肖

(西北大学地质系)

主题词: 蛇绿岩; 角闪石; 成因矿物学; 东秦岭

提 要: 东秦岭蛇绿岩主要分布在北秦岭南缘、商丹断裂带以北的狭窄地带, 断续逶迤呈带状作近东西向展布。分布于商丹地区的蛇绿岩是东秦岭蛇绿岩带的重要组成部分并具有代表性。

本文着重论述了商丹地区蛇绿岩中广泛分布的主要造岩矿物之一, 角闪石的主要特征组份、微量元素、晶胞参数、阳离子占位度等成因矿物学特点, 并据此说明了该蛇绿岩中的角闪石属于区域正变质的产物; 形成的物质来源具有同源性, 原岩为超镁铁质-镁铁质的岩浆岩和火山熔岩; 形成的热力学条件基本相同, 变质程度为绿帘角闪岩相或角闪岩相, 变质温度为610°C左右, 压力大于 $5 \times 10^8 \text{Pa}$ 。

此外, 根据商丹地区蛇绿岩中角闪石成因矿物学特征之相同性所提供的信息表明, 东秦岭蛇绿岩带是华北和扬子两个板块俯冲、碰撞的构造边界变质带。

一、地质背景概述

东秦岭蛇绿岩主要分布在北秦岭南缘、商丹断裂带以北的狭窄地带。在陕西境内, 东起商南县的富水、松树沟、清油河, 经丹凤县的武关、桃花铺、资峪, 商县的三十里铺、垃圾庙, 卢县的涝峪, 周至县的黑河, 西止凤县的岩湾。断续逶迤呈带状作近东西向展布, 严格受着深大断裂的控制。分布于商南-丹凤地区(简称商丹地区)的蛇绿岩是东秦岭蛇绿岩带的重要组成部分并且具有代表性。

商丹地区蛇绿岩是由为数众多的超基性、基性侵入岩和基性火山岩等所组成的非层序型变质杂岩系。其主要岩石组合有:(1)超基性岩组合。以商南松树沟超基性岩体为代表, 包括一些呈长条状、透镜状、椭圆状及不规则形状, 且规模大小不一的纯橄榄岩、斜辉辉橄岩、透辉岩、透辉橄橄岩等岩体群。在岩体边部常常由于构造挤压关系多已变质成蛇纹岩、透闪蛇纹岩及滑石菱镁片岩等。(2)基性侵入杂岩组合。以商南富水基性杂岩体为代表, 包括一些规模大小不一的辉长岩、辉石岩-辉长岩、辉长岩-辉绿岩、辉长岩-闪长岩等岩体。岩石均已变质, 辉石几乎全部蚀变为角闪石和黑云母, 仅留个别辉石残晶。在规模较大的富水基性杂岩体内, 可以看到粗粒变辉长岩与细粒变辉长岩逐渐过渡所形成的火成层理——岩浆堆晶结构。(3)火山岩组合。以丹凤桃花铺郭家沟、资峪南沟的含辉绿岩席状岩墙群和枕状

^{*} 国家自然科学基金资助课题。

熔岩、英安岩岩脉的斜长角闪岩类为代表,包括一些已变质为斜长角闪片岩、石榴石斜长角闪岩、角闪石岩等镁铁质熔岩。这种变质火山岩具有水下火山岩组合特征和岛弧蛇绿岩火山岩的岩石化学特点,主要属于拉斑玄武岩系列(TH),部分为碱性系列(CA),显示出该蛇绿岩形成于大陆边缘弧后盆地或岛弧的边缘海环境。(4)碎屑岩组合。以紧挨商丹断裂南侧沿武关河鱼咀—桃花铺南油房—丹凤日月滩北一线分布的杂砂岩为代表,包括主要为成熟度较低的长石、石英质碎屑岩,夹凝灰岩和透镜状蛇纹石化橄榄大理岩。这种杂砂岩夹凝灰岩具有陆源碎屑岩的特征。

根据对分布在丹凤县东面资峪、郭家沟一带变质基性熔岩所测定的Rb-Sr同位素年龄值为 447.8 ± 41.5 Ma,和该蛇绿岩带西延部分商县垃圾庙变辉长苏长岩所测定的Sm-Nd同位素年龄值为 402.6 ± 17.4 Ma,推断商丹地区蛇绿岩的侵位时代大致在早古生代晚期⁽¹⁾。

本文旨在通过查明商丹地区蛇绿岩中角闪石的成因矿物学特点,来为探讨该区蛇绿岩产出的地质环境、原岩性质以及变质作用的热力学条件提供微观信息。

二、角闪石的分布和产状

角闪石是商丹地区蛇绿岩的主要造岩矿物之一,广泛分布于主要由变辉石岩和变辉长岩等所组成的基性侵入杂岩体,及原岩建造为基性火山岩的斜长角闪片岩、角闪岩、榴闪岩中。形成于区域变质作用的主要阶段。

产于变辉石岩和变辉长岩中的角闪石,几乎全是在区域变质过程中由岩浆结晶的辉石经交代作用而成的。呈短而粗的柱状体,在少数角闪石中尚保留有辉石的残余,或在个别辉石晶体边缘有角闪石的次变边。这些角闪石在后来的多期变质作用过程中,普遍又程度不同的遭受黑云母、绿帘石、石英等矿物的交代,形成筛状变晶结构。变辉石岩中角闪石含量一般在70%以上,有的高达85%。与其相伴而生的其它矿物有次透辉石、黑云母、绿帘石、绿泥石、斜长石等。副矿物常见有榍石、磷灰石及磁黄铁矿、镍黄铁矿等。变辉长岩中的角闪石^①其含量随着岩石结晶程度的差异而有所不同,在粗粒变辉长岩中约为60%,细粒变辉长岩中约为30%与其相伴而生的其它矿物有斜长石($An=50-61$)、微斜长石、普通辉石、黑云母、绿帘石、绿泥石、石英等。副矿物有磁铁矿、黄铁矿、榍石、磷灰石等。在整个变辉长岩中,虽然存在普通辉石和次透辉石的交代残余,但它们的含量却不超过10%。

产于区域变质闪岩系中的角闪石,一般为长柱状,呈明显的定向排列,与浅色矿物相间分布,构成纤状变晶结构。有的还往往呈短柱状的变斑晶出现,形成斑状变晶结构。角闪石普遍具绿帘石化和绿泥石化。在斜长角闪片岩中角闪石含量约为60%,与其组合的矿物有斜长石(主要为中长石或奥长石,含量约20%)、黑云母以及透辉石、绿帘石、绿泥石、绢云母等。副矿物有榍石、锆石、钛铁矿等。块状榴闪岩和角闪岩中的角闪石含量高达60—80%,一般颗粒较粗,与其组合的主要矿物为铁铝榴石(含量约30%),其次尚有少量绿辉石、斜长石、绿帘石及金红石、钛铁矿、榍石等含钛矿物。

① 变辉长岩中的角闪石有三种成因类型:(1)变质成因的,这是最主要的,为本文研究的对象。(2)岩浆成因的,多分布在岩浆岩结构保留较多的地段,常被后期矿物交代成残斑状态。(3)热液成因的,在岩体内成脉状分布,后二者本文将不涉及。

表1 商丹地区蛇绿岩中角闪石化学分析结果
Table 1 Chemical analyses of amphiboles from ophiolites of the Shangnan-Danfeng area

样品号 角闪石 详细名称 寄主岩名称	H-03		D-013		S-02		D-06		D-021		S-10		S-12		D-016		S-09		T-01		S-06		T-02	
	钙 角闪石	镁 角闪石	含亚铁准 角闪石	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩	斜 辉石岩
SiO ₂	44.31		43.92	48.26	48.99	46.42	46.28	45.18	49.61	45.56	42.48	45.72	47.48											
TiO ₂	1.15		0.88	0.99	0.58	0.78	0.72	1.00	0.46	0.62	1.25	0.50	0.82											
Al ₂ O ₃	10.34		10.68	10.86	7.96	10.02	10.84	10.92	7.42	11.08	12.90	10.64	9.24											
Fe ₂ O ₃	4.70		5.29	3.58	2.90	2.95	3.50	5.52	2.63	2.58	3.55	2.34	1.04											
FeO	12.78		10.14	10.84	9.26	11.31	11.89	10.55	9.76	13.45	13.64	12.91	13.35											
MnO	0.30		0.24	0.26	0.20	0.30	0.28	0.31	0.24	0.31	0.34	0.24	0.12											
MgO	10.60		12.16	9.95	12.60	11.60	10.16	9.97	13.21	9.96	9.28	10.33	11.22											
CaO	12.30		12.53	10.41	12.89	12.42	12.95	13.28	12.72	13.04	12.36	12.30	12.08											
Na ₂ O	1.40		1.27	1.08	1.36	1.26	1.16	1.32	1.03	1.30	1.54	1.39	1.12											
K ₂ O	0.62		1.02	1.88	0.62	0.62	0.57	0.62	0.75	0.35	0.62	0.62	0.35											
H ₂ O ⁺	2.02		2.16	2.07	2.33	2.27	2.31	1.88	1.52	2.14	1.96	2.45	2.30											
F	0.022		0.081	0.145	0.200	0.045	0.034	0.031	0.222	0.035	0.032	0.031	0.055											
总量	100.55		100.37	100.325	99.89	99.995	100.66	100.55	99.35	100.39	99.92	99.44	99.12											

Ti (Si)	6.59		7.115		7.28		6.9		6.83		6.77		7.25		6.78		6.86		6.369		7.0625		
	0.125	8.000	0.098	8.000	0.106	8.000	0.089	8.000	0.08	7.95	0.11	8.000	0.053	8.000	0.0714	8.000	0.144	8.000	0.054	8.000	0.089	8.000	
Al	1.286		1.402	0.779	0.6565	1.011	1.04	1.12	0.89	1.04	1.12	0.997	1.1486	0.697	1.1486	1.489	1.087	1.489	1.087	1.489	1.087	1.489	
Mg	2.34		2.67	2.116	2.7275	2.502	2.244	2.204	2.502	2.244	2.204	2.792	2.2066	2.193	2.2066	2.046	2.30	2.046	2.30	2.046	2.4195		
Fe ³⁺	1.59		1.25	1.336	1.152	1.402	1.48	1.32	1.402	1.48	1.32	1.193	1.67	1.193	1.67	1.712	1.62	1.712	1.62	1.712	1.661		
Fe ²⁺	0.52		0.587	0.388	0.36	0.321	0.39	0.5000	0.36	0.39	0.5000	0.36	0.286	0.298	0.286	0.396	0.27	0.396	0.27	0.396	0.125	5.000	
Mn	0.036		0.027	0.035	0.027	0.036	0.036	0.036	0.027	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.045	0.027	0.045	0.027	0.045	0.018	5.000	
Al	0.514		0.466	1.115	0.7335	0.739	0.85	0.81	0.739	0.85	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.765	5.000	
Na	0.03			0.284		1.913	1.982	1.994	2.000	1.974	2.000	1.915	2.000	1.99	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	0.0175	2.000
Ca	1.98		2.02	1.983	2.000	1.646	2.000	1.9375	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	1.974	2.000	0.192	2.000
Mg	0.01		0.017	0.01	0.0625	0.069	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.0625	2.000
Na	0.36		0.374	0.016	0.39	0.357	0.34	0.38	0.34	0.34	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.1435	2.000
K	0.125		0.485	0.196	0.125	0.6275	0.354	0.370	0.125	0.354	0.370	0.13	0.676	0.14	0.4394	0.126	0.584	0.126	0.584	0.126	0.584	0.071	0.2145
Ca	—		0.01	—	0.1125	0.051	0.066	0.166	0.051	0.066	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	—	—
OH	1.764		1.764	1.133	0.846	1.335	0.831	1.6504	0.831	0.831	1.6504	1.06	1.646	1.06	1.646	1.06	1.646	1.06	1.646	1.06	1.646	1.188	—
O	0.226		0.227	2.000	0.796	2.000	1.065	2.000	1.065	2.000	1.149	2.000	0.815	1.980	0.334	2.000	0.304	2.000	0.452	2.000	0.784	2.000	—
F	0.01		0.009	0.071	0.089	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.028	—

注：化学分析由陕西省地矿局西安测试中心邢明智、王建业完成。角闪石晶体化学通式为 A₀₋₁B₂C₁^{IV}T₅O₂(OH,F)₃。

三、角闪石的成因矿物学特点

作者对分布于商丹地区蛇绿岩不同类型岩石中具有代表性的12个角闪石单矿物,做了化学成分全分析、微量元素光谱半定量分析、红外光谱分析、晶胞参数和光性常数的测定。其主要成因矿物学特点如下所述:

(一) 主要组份特点与成因归属

根据角闪石化学全分析数据,以24个氧(O, OH)为基础计算出它们晶体化学式中的离子数列于表1中。按照B.E.Leake的闪石分类与命名原则⁽²⁾,根据(Na+Ca)和Na的离子数关系,商丹地区蛇绿岩中的角闪石均属钙质角闪石类。其详细名称有阳起角闪石、含亚铁准闪角闪石、浅闪角闪石、镁角闪石、钙镁闪角闪石、浅闪石等六种,概属于阳起石-透闪石系列。

表2列出了这些角闪石的特征组份数值。从中可以看出它们的主要组份特点是:(1)富钙 Ca^{2+} 的平均含量为1.889,显示出钙质角闪石的特征。(2) Fe^{2+} 的含量远多于 Fe^{3+} ,前者(平均1.45)约为后者(平均0.34)的4倍。这从一个侧面反映出角闪石形成于还原环境。(3)富镁 Mg^{2+} 的平均含量为2.416, $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ 大于 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$,前者平均为0.64,后者平均为0.38,相差约2倍。这是因为角闪石寄主岩石的原岩是富镁的基性-超基性岩浆岩和具有拉斑玄武岩岩石化学特征的基性火山岩之故。(4)贫碱 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)含量低,平均为0.462。反映出变质前原岩物质缺乏中酸性-碱性的岩浆作用,同时在变质过程中原始物质成分的元素分异作用较差。

表2 角闪石特征组份数值

Table 2 Characteristic components of amphiboles

组份	样号	H-03	D-013	S-02	D-06	D-321	S-10	S-12	D-016	S-09	T-31	S-06	T-02
Ca		1.98	1.993	1.646	2.05	1.982	2.06	2.14	1.991	1.99	1.982	1.97	1.92
(Na+K) _A		0.48	0.57	0.37	0.515	0.482	0.45	0.51	0.438	0.439	0.576	0.502	0.215
Ti		0.125	0.098	0.106	0.063	0.089	0.08	0.11	0.053	0.071	0.144	0.054	0.089
Fe ²⁺		1.59	1.25	1.336	1.152	1.402	1.48	1.32	1.193	1.67	1.712	1.62	1.661
Fe ³⁺		0.52	0.087	0.398	0.36	0.321	0.39	0.63	0.298	0.286	0.396	0.27	0.125
Mg		2.35	2.687	2.186	2.79	2.571	2.25	2.23	2.877	2.21	2.072	2.31	2.482
Al ^{VI}		0.514	0.466	1.115	0.734	0.739	0.85	0.81	0.691	0.801	0.801	0.783	0.777
Si		6.59	6.5	7.115	7.28	6.9	6.83	6.77	7.25	6.78	6.37	6.86	7.07
Al ^{IV}		1.286	1.402	0.779	0.657	1.011	1.04	1.12	0.697	1.149	1.489	1.087	0.849
$\frac{\text{Al}^{\text{IV}}}{\text{Al}^{\text{VI}}}$		2.501	3.008	0.698	0.895	1.368	1.22	1.38	1.008	1.434	1.858	1.388	1.094
$\frac{\text{Mg}}{\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}}$		0.60	0.68	0.62	0.71	0.65	0.60	0.63	0.71	0.56	0.54	0.59	0.60
$A = \frac{\text{Al}}{\text{Si}}$		0.27	0.288	0.226	0.191	0.254	0.27	0.29	0.19	0.29	0.359	0.27	0.23
$M = \frac{\text{Mg}}{\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}}}$		0.89	1.163	0.767	2.24	1.04	0.87	0.81	1.32	0.57	0.787	0.86	0.969
$N = \frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$		0.12	0.122	0.085	0.11	0.11	0.104	0.12	0.09	0.11	0.142	0.122	0.053

由于区域变质作用大多是在固态条件下进行的,因而表 2 所列的角闪石特征组份的变化值,不仅能清楚地反映变质前原岩的成分特点,而且还能反映出角闪石的成因属性。这可以从该表中所计算的 $M = 1.021$ 、 $A = 0.261$ 、 $N = 0.107$ 等三个标志成因特点的成因系数平均值看出。它们基本上都归属于基性岩浆成因和区域正变质成因的范畴⁽³⁾。由此指示出商丹地区蛇绿岩中的角闪石是基性岩浆岩和基性火山岩的变质矿物。这个结论,作者在有关角闪石的成因图解上进行了论证,如在角闪石的 Ti-Si 变异成因区划图解(B·E·Leake, 1965)上⁽⁴⁾,它的投影点全部落在变质闪石区。在角闪石的晶体化学-成因图解上⁽⁵⁾,其投影点落在基性到中基性岩浆成因及相应的正变质成因区,如图 1 所示。这些结果与在野外实际观察到的角闪石主要寄主为变质基性岩和基性火山岩的事实是相符合的。

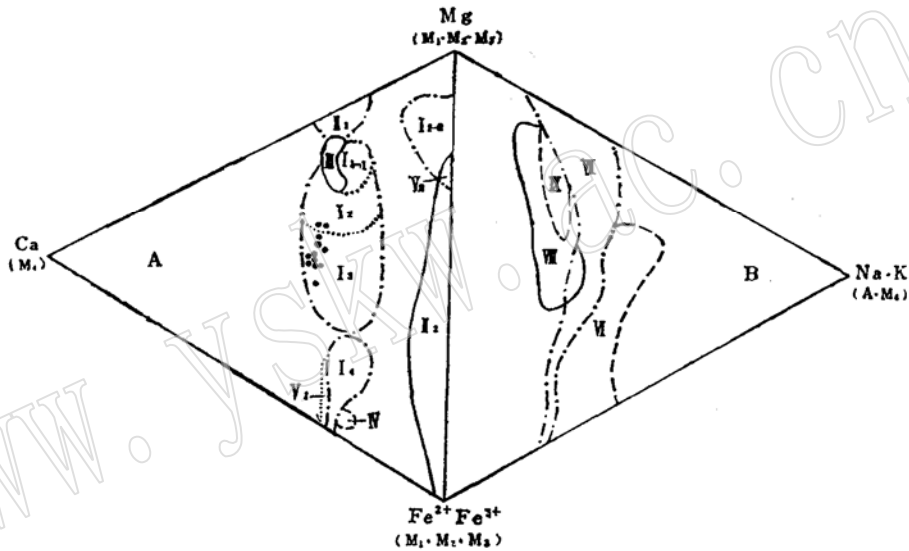


图 1 角闪石晶体化学-成因图解(仿刘劲鸿, 1986, 稍减化)

Fig. 1 Diagram of crystallochemistry genesis of amphiboles

注: A—镁-铁-锰闪石亚类和钙质闪石亚类成因图解

I—岩浆成因区(正变质成因区): I₁₋₁, I₁₋₂为超基性岩浆成因亚区及相应正变质成因亚区; I₂为基性岩浆成因亚区及相应的正变质成因亚区; I₃为中基性岩浆成因亚区及相应的正变质成因亚区; I₄为酸性岩浆成因亚区及相应正变质成因亚区; II—变质成因区: II₁为副变质成因亚区(碳酸盐岩变质); II₂为副变质成因亚区(硅铁质岩变质)。

III—接触变质成因区(多为碳酸盐岩热接触变质; IV—超变质成因集中区; V—热液和接触交代成因集中区, V₁为热液成因集中区; V₂为接触交代成因集中区。

B—钠-钙闪石亚类和碱性闪石亚类成因图解

VI—碱性岩浆成因区及相应正变质成因区; VII—岩浆碳酸盐岩成因区及相应的正变质成因

区; VIII—正变质成因区; IX—热液交代成因区

(二) 微量元素特点

商丹地区蛇绿岩中角闪石的微量元素光谱半定量分析数据及有关元素对的比值列于表 3。作者对产于不同类型岩石中角闪石的微量元素对之比值做了图解对比,如图 2 所示。从中可见如下特点:

首先,对于该蛇绿岩来说,一是产于相同类型岩石中的角闪石,所含微量元素之成分及其含量是基本相同和稳定的;二是产于不同类型岩石中的角闪石,其微量元素对的比值变化具

表3 角闪石微量元素光谱半定量分析数据 (ppm) 及其元素对的比值
Table 3 Semi-quantitative analyses of trace elements in amphiboles (in ppm)
and ratios of element pairs

样号 项目	H-03	D-013	S-02	D-06	D-021	S-10	S-12	D-016	S-09	T-01	S-06	T-02
Cu	30	10	60	15	50	80	50	30	30	10	15	80
Zn	300	150	300	150	300	400	300	250	200	200	200	500
Pb	40	8	15	10	30	10	5	15	40	10	15	10
Sn	1	2	4	4	2	3	—	5	—	2	—	5
Ga	18	15	15	10	15	15	15	10	7	18	15	18
Cr	150	120	200	600	200	200	200	600	200	150	300	50
Ni	200	80	80	500	300	300	150	600	300	150	300	200
Mo	1.5	1.5	1.5	2	1	1.5	1	0.5	2	0.5	1	1
V	250	350	400	300	300	300	300	200	300	300	300	350
Co	120	80	50	100	100	100	70	100	100	70	100	100
Be	1	2	5	2	1	<1	1	2	<1	2	1	1
Yb	5	5	4	7	4	4	3	4	4	4	4	5
Y	30	20	30	30	10	5	5	10	5	10	20	20
Zr	40	30	70	200	50	30	50	80	20	80	40	70
B	—	—	40	—	30	20	20	10	30	20	20	20
Ba	250	400	350	400	400	120	250	150	<100	300	350	<100
Sr	—	200	150	200	100	—	—	100	—	100	—	—
Mn	3000	5000	3000	3000	5000	3000	2000	2000	5000	3000	3000	2000
Ti	4000	3000	4000	3000	1500	2000	2000	2000	1500	6000	1500	3000
Cr/Ti	0.0375	0.04	0.05	0.2	0.13	0.1	0.1	0.3	0.13	0.025	0.2	0.016
Ni/Co	1.67	1	1.6	1.67	3	3	2.14	6	3	2.14	3	2
Cu/Ni	0.15	0.125	0.75	0.03	0.17	0.27	0.33	0.05	0.1	0.06	0.05	0.8
Ga/Zn	0.06	0.1	0.05	0.07	0.05	0.19	0.05	0.04	0.035	0.09	0.075	0.03
V/Ti	0.063	0.117	0.1	0.1	0.2	0.15	0.19	0.1	0.2	0.05	0.2	0.12
Yb/Y	0.17	0.25	0.13	0.23	0.4	0.8	0.6	0.4	0.8	0.4	0.2	0.25
Be/Zr	0.025	0.07	0.071	0.01	0.02	0.017	0.02	0.025	0.025	0.025	0.025	0.014
Sr/Ba		0.5	0.43	0.55	0.25			0.67		0.33	0.29	
Pb/Zn	0.13	0.053	0.05	0.07	0.1	0.025	0.016	0.06	0.2	0.05	0.075	0.02
Ni/Mn	0.05	0.027	0.027	0.17	0.06	0.15	0.075	0.3	0.062	0.05	0.10	0.10
Cr/Ni	0.75	1.5	2.5	1.2	0.67	0.67	1.33	1	0.67	1	1	0.25

注：由陕西省地矿局西安测试中心杨学明测定。

有一致协调之趋势。这反映出角闪石形成的物质来源具有同源性和成因联系，形成的热力学条件是基本相同的。

其次，从微量元素的丰度和分布情况来看，该蛇绿岩中各种产状的角闪石所含的像Mn、Cr、Ni、V、Co、Zn等这些属于基性岩类岩石中的特征元素，其含量都基本符合于基性岩（玄武岩）的平均丰度值^①。反映出角闪石的寄主岩石为基性侵入岩或基性火山岩的原岩性质。这与野外实地观察结果是符合的。

① 系比照A. II. 维诺格拉多夫测定的元素平均丰度值（1962）。

(三) 晶胞参数特点

根据角闪石 X 射线粉晶衍射特征谱线所确定的闪石种属名称, 和前述根据化学分析结果按照 B·E·Leake 命名原则所确定的名称是一致的, 即主要为阳起角闪石。对于衍射结果, 作者采用最小二乘法与逐次迭代修正指标化相结合的方法, 由电子计算机算出其晶胞参数, 列于表 4。

角闪石晶胞参数与成因之间的关系, 主要是通过化学成分与晶胞参数之间的变化关系上间接反映出来的。商丹地区蛇绿岩不同类型岩石中的角闪石概属单斜晶系, 结构为 $C2/m$ 型。它们与一般阳起石相比较, 其晶胞参数总的特点是 a_0 值和 β 角偏高, 而 b_0 和 c_0 值偏低。这是因为在这些角闪石的 M_4 晶位上主要为大半径阳离子 Ca^{2+} (1.12 Å) 所占据, 使其对称程度有所降低并导致 β 角增大。统计结果表明, M_4 晶位上 Ca^{2+} 由 1.913 递增到 1.994, β 角则相应的增大到 105.47° — 105.99° , 个别达 106.04° 。这个特点更进一步证实了该蛇绿岩中角闪石的种属为钙质角闪石的结论。

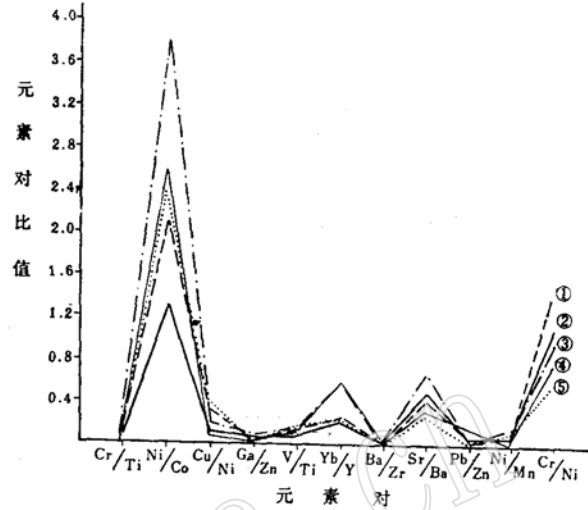


图 2 商丹地区蛇绿岩不同类型岩石中角闪石微量元素对的比值对比图

Fig. 2 Ratio contrast between trace element pairs of amphiboles from various types of ophiolites in Shangnan-Danfeng area

- ① 变辉长岩中角闪石; ② 变辉石岩中角闪石;
- ③ 斜长角闪片岩中角闪石; ④ 角闪岩中角闪石;
- ⑤ 榴闪岩中角闪石。

表 4 角闪石的晶胞参数

Table 4 Lattice cell parameters of amphiboles

	H-03	D-013	D-020	D-06	D-021	S-10	D-016	D-03	S-09	T-01	T-02	S-06
a_0 (Å)	9.860	9.893	9.898	9.871	9.862	9.840	9.892	9.791	9.869	9.868	9.808	9.880
b_0	18.055	18.014	17.968	18.114	18.040	17.995	18.112	18.078	18.031	18.021	17.979	18.019
c_0	5.251	5.286	5.290	5.218	5.250	5.266	5.291	5.231	5.278	5.280	5.246	5.269
β (°)	105.47	106.04	106.16	105.03	105.49	105.76	104.79	105.25	105.42	105.99	105.99	105.98
V (Å ³)	900.928	905.357	903.639	900.654	900.103	897.402	916.548	893.293	905.400	902.621	889.278	901.781

注: 测试者, 陕西省地矿局西安测试中心何瑞林。

作者特别注意到不同配位的 Al^{3+} 对晶胞参数变化的影响作用。从对比表 2 所列的各个样品中 Al^VI 和 Al^IV 的离子数与表 4 所列相应样号的晶胞参数, 可以明显的看出: (1) 当其 Al^VI 量递增时, a_0 值由 9.893 Å 递减为 9.840 Å, b_0 值由 18.112 Å 递减为 17.995 Å, 而 c_0 值却由 5.218 Å 递增为 5.280 Å。它们的变化可为角闪石形成的压力条件提供信息。(2) 当 Al^IV 量递增时, a_0 和 c_0 值均明显增大, 前者由 9.840 Å 递增为 9.893 Å, 后者由 5.218 Å 递增为 5.286 Å, 如图 3 所示。但 b_0 值却无多大变化, 始终保持在 18.00 Å 左右。这说明当 Al^{3+} 置换角闪石结构的四面体空隙中 Si^{4+} 的数量愈多时, a_0 和 b_0 值的增大是一个显著的标志, 它可以为角闪石形成的温度条件提供信息。

(四)阳离子占位特点

作者对商丹地区蛇绿岩中12个角闪石做了红外吸收光谱分析,它们的吸收频率都具有阳起角闪石的基本特征。包括以下四个吸收谱带: $900-1150\text{cm}^{-1}$ 的O—Si—O伸缩振动及Si—O—Si非对称伸缩振动带; $650-800\text{cm}^{-1}$ 的Si—O—Si对称伸缩振动带; $300-500\text{cm}^{-1}$ 的Si—O弯曲振动及阳离子—氧(M—O)晶格振动带; $3615-3675\text{cm}^{-1}$ 的羟基(OH)伸缩振动带。

由于利用红外光谱测定角闪石中阳离子在不同结构位置上的占位度,是通过受阳离子影响的OH伸缩振动谱带的强度来进行的。因此,我们着重对 $3615-3675\text{cm}^{-1}$ 范围内吸收带的数目、位置和相对强度进行研究。为了取得该范围内 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 占位度的精确资料,采取加大试样重量(6mg)、扩展扫描范围($4000-3400\text{cm}^{-1}$,横坐标扩展为2)的办法,获得了良好的角闪石OH伸缩振动谱图,如图4所示。A=(MgMgMg)OH、B=(MgMgFe)OH、C=(MgFeFe)OH、D=(FeFeFe)OH四个OH吸收谱带的波数分别为: $3670-3672\text{cm}^{-1}$; $3656-3658\text{cm}^{-1}$; $3641-3642\text{cm}^{-1}$; $3618-3624\text{cm}^{-1}$ 。

作者利用R·G·Burns和R·G·J·Strens(1966)以及A·П·Никигина(1973)提出的计算公式⁽⁴⁾,根据各谱带的强度,分别计算出 M_1 和 M_3 以及 $[M_1+M_3]$ 和 $[M_2+M_4]$ 等晶位上 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的占位系数(Site-occupancy factor),具体数据列于表5。计算结果表明, Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 在 M_1 的占位系数都是大于在 M_3 的。如 Fe^{2+} 在 M_1 的平均值为0.794,而在 M_3 的平均值为0.475; Mg^{2+} 在 M_1 的平均值为1.206,而在 M_3 的平均值为0.524。总之,在所有样

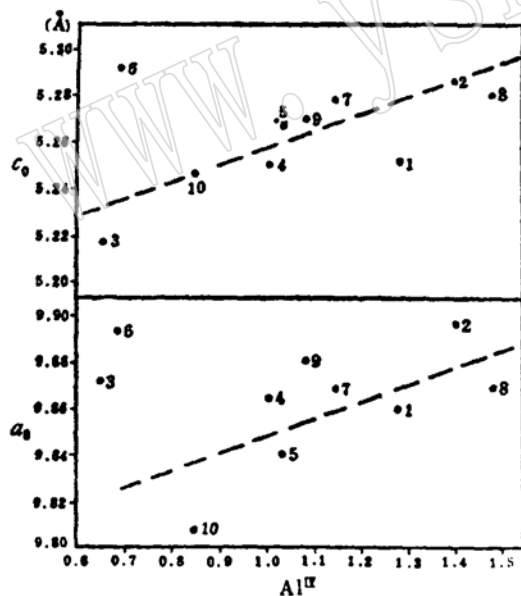


图3 角闪石成分与晶胞参数关系图解
Fig. 3 Diagram showing relationship between components and lattice cell parameters of amphiboles.

1.H-03; 2.D-013; 3.D-06; 4.D-021; 5.S-10;
6.D-016; 7.S-09; 8.T-01; 9.S-06; 10.T-02

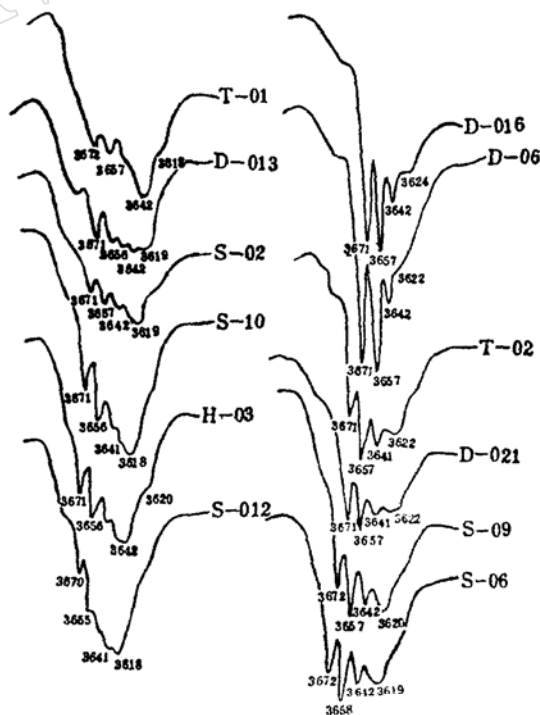


图4 角闪石的OH伸缩振动谱图
Fig. 4 Diagram of OH stretching vibration in amphiboles

测定者: 陕西省地矿局西安测试中心魏权凤、孔宪春。

品中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 在 M_1 的占位系数普遍大于在 M_3 的一倍以上。以其比值而言, $Fe^{2+}(M_1)/Fe^{2+}(M_3) = 1.055-2.131$ (平均1.646), $Mg^{2+}(M_1)/Mg^{2+}(M_3) = 1.847-2.674$ (平均2.281), 也是符合上述情况的。此外, Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 在 $[M_1 + M_3]$ 的占位系数也都是远远大于在 $[M_2 + M_4]$ 晶位的。

表5 角闪石中 M_1 、 M_3 、 $M_2 + M_4$ 等晶位 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的占位系数
Table 5 Site-occupancy coefficients of Fe^{2+} and Mg^{2+} at M_1 , M_3 ,
and $M_2 + M_4$ sites in amphiboles

样号	Fe^{2+}				$Fe^{2+}(M_1)$	Fe^{2+}	Mg^{2+}				$Mg^{2+}(M_1)$	Mg^{2+}	化学式中 M_4 位离子数	
	M_1	M_3	$M_2 + M_4$	$M_1 + M_3$	$Fe^{2+}(M_3)$	$Fe^{2+} + Mg^{2+}$	M_1	M_3	$M_2 + M_4$	$M_1 + M_3$	$Mg^{2+}(M_3)$	$Mg^{2+} + Fe^{2+}$	Ca ²⁺	Na ⁺
H-03	0.972	0.530	0.088	1.502	1.834	0.501	1.027	0.468	0.855	1.495	2.194	0.499	1.98	0.03
D-013	0.909	0.477	0	1.386	1.906	0.462	1.09	0.522	1.075	1.612	2.088	0.538	1.983	—
S-02	0.961	0.500	0	1.461	1.922	0.487	1.038	0.50	0.588	1.538	2.076	0.513	1.646	0.284
D-06	0.448	0.420	0.29	0.868	1.067	0.288	1.548	0.579	0.663	2.127	2.674	0.712	1.938	—
D-021	0.730	0.438	0.234	1.168	1.667	0.389	1.269	0.561	0.741	1.830	2.262	0.611	1.913	—
S-10	0.965	0.507	0.008	1.472	1.903	0.490	1.034	0.492	0.724	1.526	2.102	0.510	1.994	—
S-12	1.153	0.541	0	1.694	2.131	0.585	0.846	0.458	0.926	1.304	1.847	0.435	1.974	—
D-016	0.422	0.400	0.372	0.822	1.055	0.274	1.577	0.600	0.7	2.177	2.628	0.725	1.915	—
S-09	0.753	0.480	0.437	1.233	1.569	0.411	1.246	0.519	0.444	1.765	2.401	0.589	1.99	0.007
T-01	0.840	0.480	0.392	1.320	1.750	0.44	1.16	0.52	0.392	1.68	2.231	0.560	1.974	—
S-06	0.760	0.481	0.379	1.241	1.580	0.413	1.239	0.518	0.553	1.757	2.392	0.587	1.97	0.02
T-02	0.619	0.45	0.592	1.064	1.376	0.355	1.38	0.557	0.545	1.937	2.478	0.645	1.92	0.018

这种 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 均趋于占据 M_1 晶位和趋于占据 $[M_1 + M_3]$ 晶位的择优占位现象, 说明了它们在角闪石不同结构位置上的分布状况基本上是无序的。从而反映出商丹地区蛇绿岩中角闪石的阳离子分配有序化程度低, 这个特点为确定角闪石形成于较高的变质温压条件下提供了微观信息。A. Л. Литвин指出⁽⁷⁾, 在区域变质作用下当变质程度达绿帘角闪岩相或角闪岩相时, 钙质角闪石中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的占位趋势为 $M_1 \geq M_3$ 。这种规律是符合于本区实际情况的。

四、角闪石及其寄主岩石变质的 $P-T$ 条件

作者判定商丹地区蛇绿岩中角闪石及其寄主岩石变质的 $P-T$ 条件, 主要是根据其单位晶胞中能够反映热力学条件特点的离子数量相对变化值作为标志的。这是因为温度和压力控制角闪石成分乃至精细结构的变化, 主要是通过其中不同的结构位置上离子的分配调整来体现的。

首先, 角闪石成分中的Al所提供的信息对判定其变质 $P-T$ 条件很有用。这是因为当变质的温压条件不同时, Al进入角闪石结构中四面体空隙和八面体空隙中离子数是不同的。Al^{IV}含量是温度的函数, 而Al^{VI}含量是压力的函数, 它们的变化可作为变质程度的标志。我们把商丹地区蛇绿岩中角闪石的Al^{IV}和Al^{VI}含量分别标绘在B. B. Закруткин的Al^{IV}-Al^{VI}变异与变质程度关系图解上⁽⁸⁾, 投影点均落在绿帘角闪岩相和角闪岩相区, 如图5所示。

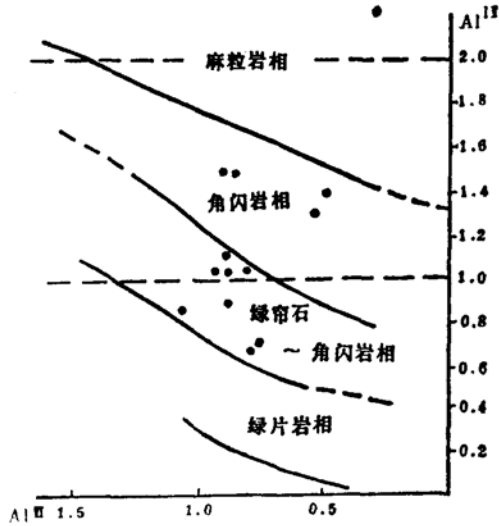


图5 商丹地区蛇绿岩中角闪石的 $Al^{IV}-Al^{VI}$ 变异与变质程度关系图解

Fig. 5 Diagram showing relationship between $Al^{IV}-Al^{VI}$ variation and metamorphism of amphiboles from ophiolite of Shangnan-Danfeng

(仿B. B. Захарукhin, 1968)

Mg的分配相图⁽³⁾，经四对样品的计算， X_{Mg}^{Al} 平均为0.545， X_{Mg}^{Cr} 平均为0.205，投影结果估算出平衡温度约为610℃左右。这个数值大致可以代表角闪石及其寄主岩石变质的温度条件。

五、结 语

东秦岭蛇绿岩带沿商丹深大断裂带分布在秦岭早古生代造山带的秦岭古岛弧上。商丹地区蛇绿岩是东秦岭蛇绿岩带的组成部分，由于强烈而多期构造运动的解体，致使该区蛇绿岩剖面不具典型蛇绿岩层序关系。但蛇绿岩的主体建造——超基性岩体群、基性侵入杂岩体、镁铁质熔岩系及岩脉(岩墙)群等均很发育，且出露面积较大。因此，它在东秦岭蛇绿岩带中具有代表性。

角闪石是商丹地区蛇绿岩的主要造岩矿物之一，广泛分布于蛇绿岩的不同类型岩石中。通过角闪石主要成因矿物学特征研究表明：它属于区域正变质产物；形成的物质来源具有同源性，原岩为超镁铁质—镁铁质的岩浆岩和火山熔岩，且它们之间有一定的血缘关系；形成的热力学条件基本相同，变质程度为绿帘角闪岩相或角闪岩相，变质温度约为610℃左右，压力大于 5×10^8 Pa。

东秦岭蛇绿岩带位于华北和扬子两大板块结合的构造边界地带。根据商丹地区蛇绿岩中角闪石成因矿物学特征相同性所提供的信息看，这些角闪石是在早期较大规模的区域变质作用过程中形成的。这表明东秦岭蛇绿岩带是一个重要的变质带，它实际上代表了上述两大板块俯冲、碰撞的主要缝合带。

P. Raase 和 M. E. Fleet 等人均提出以 5×10^8 Pa 作为区分高压和低压的界限，他们指出：当 Al^{IV}/Al^{VI} 大于2者为低压，小于2者为高压⁽⁸⁾⁽⁹⁾。商丹地区蛇绿岩中角闪石的 Al^{IV}/Al^{VI} 值除变辉长岩中的H-03及D-013两个样品大于2外，其余10个样品均在0.698—1.858之间(见表2)，总平均值为1.487，仍小于2，表明角闪石形成的变质压力大于 5×10^8 Pa。P. Raase 还提出利用角闪石中 $Al^{IV}-Si$ 变异图解的方法判定其结晶压力⁽⁸⁾，作者将本区角闪石投影在该图解上，除个别样品(H-03, D-013, T-01)外，其余投影点也均落在 5×10^8 Pa 压力线以上的高压区，与上述结果是吻合的。根据区域地质特征分析，这样的高压型变质与构造动力条件有一定的关系。

此外，作者利用商丹地区蛇绿岩中角闪石-石榴石(铁铝榴石)共存矿物对之间Fe-Mg分配系数进行地质测温。运用Л. Л. Перчик (1970)的在变质岩中共存角闪石和石榴石之间

参 考 文 献

- (1) 孙勇, 1987, 东秦岭蛇绿岩稀土元素地球化学, 科学通报, 第1期, pp.1654-1655.
- (2) B. E. Leake, 1978. Nomenclature of amphiboles. Amer. Mineral., vol. 63, pp.1023-1052.
- (3) 薛君治、白学让、陈武, 1986, 成因矿物学。武汉地质学院出版社, pp.39-40.
- (4) 靳是琴、李鸿超, 1986, 成因矿物学概论(下册)。吉林大学出版社, pp.212-234.
- (5) 刘劲鸿, 1986, 角闪石成因矿物族及其应用。长春地质学院学报, 第1期, pp.41-48.
- (6) 白学让、魏权凤、孔宪春, 1988, 东秦岭商南-丹凤地区蛇绿岩中角闪石的阳离子占位度及其地质意义。陕西地质, 第6卷, 第1期, pp.45-55.
- (7) А. Л. Литвин, и др. 1977. Кристаллохимия И Структурный Типоморфизм амфиболов, Киев.
- (8) P. Raase, 1976. Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism, contr. Min. Petrol., vol. 45, pp.231-236.
- (9) M. E. Fleet and R. L. Barnett, 1978. Al^{IV}/Al^{VI} partitioning in calciferrous amphiboles from the Froid Mine, Sudbury, Ontario. Can. Mineralogist, vol. 16, pp.527-532.

A Study of Amphibole from the Ophiolites in Shangnan-Danfeng Area, East Qinling

Bai Xuerang Yuan Lianxiao

(Department of Geology, Xibei University)

Key words: ophiolite; amphibole; genetic mineralogy; east Qinling

Abstract

The ophiolites of east Qinling are mainly distributed within a narrow zone lying along the southern fringe of east Qinling and to the north of Shangnan-Danfeng fault zone, winding nearly latitudinally as a discontinuous belt. The ophiolites in Shangnan-Danfeng area make up an important and typical component part of this belt.

This paper deals emphatically with the genetic mineralogical characteristics of amphibole, an important rock-forming mineral extensively-distributed in ophiolites of Shangnan-Danfeng area, including its main characteristic components, trace elements, lattice cell parameters and cationic occupancy. On such a basis, it is demonstrated that (1) the amphibole in the ophiolites is a product of regional orthometamorphism, (2) the material sources thus formed show consanguinity, and the original rocks are ultramafic-mafic magmatic rocks and volcanic lava, and (3) being under basically identical thermodynamic condition, the metamorphism belongs to epidote-amphibolite facies or amphibolite facies, with the metamorphic temperature being 610°C or so and pressure higher than 5×10^8 Pa.

In addition, the similarity in genetic mineralogical characteristics between various amphiboles from ophiolites of Shangnan-Danfeng area suggests that the ophiolite zone of east Qinling is the metamorphic belt of a tectonic margin resulting from the subduction and collision of North China plate and Yangtze plate.