

北秦岭松树沟超镁铁岩的成因类型^①

张泽军

(西安地质学院)

提 要 超镁铁岩的成因类型是国内外长期有争议的课题。通过野外地质、岩石学和地球化学的综合研究分析,笔者认为,松树沟超镁铁岩有三种成因型型,即岩浆结晶(MA)型、地幔残余(R)型和交代(ME)型。MA型可分为玄武质岩浆结晶(BMA)亚类和超镁铁质岩浆结晶(UMA)亚类。ME型可分为地幔交代(MME)亚类和地壳交代(CME)亚类。因此,松树沟岩体是阿尔卑斯型复合成因超镁铁岩体的一个典型例证。这项研究成果可能有助于我们加深对阿尔卑斯型超镁铁岩成因类型的认识。

关键词 阿尔卑斯型超镁铁岩 成因类型 地幔残余 岩浆结晶 壳幔交代

三十余年来,许多研究者对松树沟岩体进行过大量基础地质与矿床地质的研究工作,发表了不少成果。关于该岩体中超镁铁岩的成因类型,早期认为属岩浆分异结晶成因类型^②,七十年代中期后又提出属地幔残余类型^[1-4]。近年来在综合分析大量新旧资料的前提下,笔者发现松树沟岩体中存在多种成因类型的超镁铁岩。因而,以往关于超镁铁岩成因类型的单一认识需要重新评价。本文报导了这方面的最新研究成果。

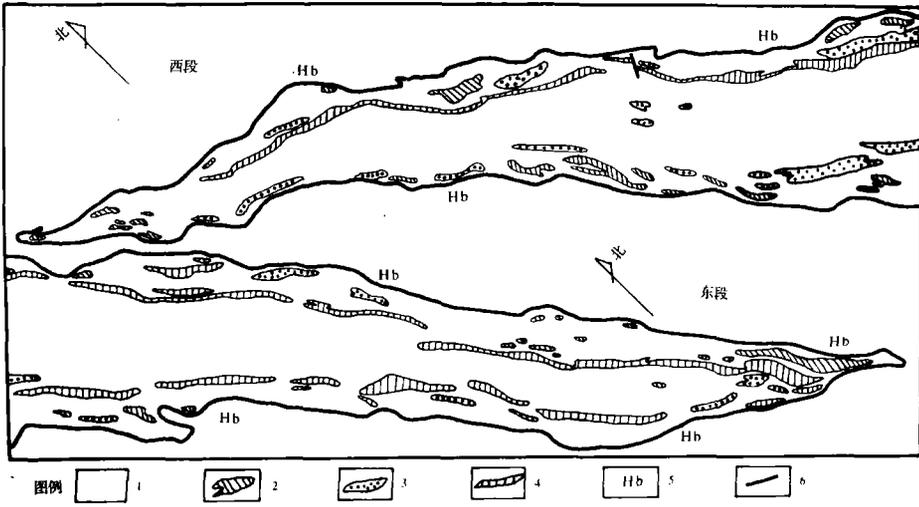
1 岩体地质概况

松树沟岩体定位在秦岭群深变质岩系中,其直接围岩是一套角闪质岩石。岩体出露面积约20km²,平面上呈长盾形(图1)。走向与区域构造线一致,倾向SW,倾角70°左右。钻探证明,岩体在深部闭合,其形态为透镜状。主要岩石类型有纯橄榄糜棱岩、中粗粒纯橄岩、方辉橄榄岩、透辉橄榄岩、透辉岩、铬铁岩、蛇纹岩和菱镁岩等。铬铁岩主要与中粗粒纯橄岩和方辉橄榄岩密切伴生。岩体中还广泛穿插辉石岩(如透辉石岩、斜方辉石岩)细脉体。岩体从内向外可划分出三个岩相带(图1):Ⅰ带,主要由纯橄榄糜棱岩组成,广泛穿插透辉石岩条带;Ⅱ带,是一条断续分布的透辉岩—透辉橄榄岩岩相带;Ⅲ带,由纯橄榄糜棱岩为背景岩相,包裹了含铬矿体或矿化的方辉橄榄岩体和中粗粒纯橄岩体。方辉橄榄岩体与纯橄榄糜棱岩之间互为过渡和互相包容(图2),是地幔部分熔融的典型的宏观表现。

由岩体产出的地质环境,岩相组合及岩石地球化学等特征,说明松树沟岩体属阿尔卑斯型

① 国家自然科学基金资助项目

② 西北冶金地质713队(1961—1978)和西安地质矿产研究所(1977,1981)等单位。



1. 纯橄榄糜棱岩 2. 方辉橄榄岩体 3. 中粗粒纯橄岩体 4. 透辉岩—透辉橄橄榄岩体 5. 角闪岩围岩
6. 岩体边界或断层

图1 松树沟超镁铁岩体地质图(据713队资料修编)

Fig. 1 Geological map of Songshugou ultramafic rock body

超镁铁岩体。

2 超镁铁岩成因类型划分概述

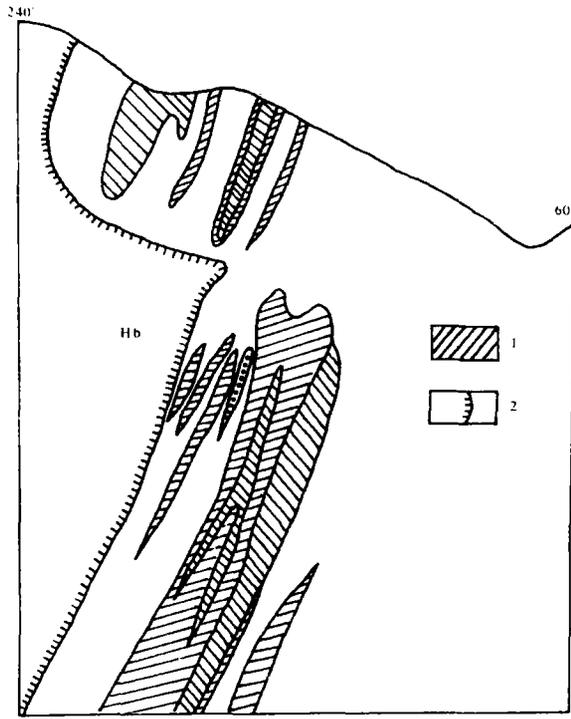
迄今国内外对于超镁铁岩成因类型的认识有着较大分歧。总结近十年来国内外有关研究成果,笔者认为可归纳出以下三种主要类型:

2.1 地幔残余(R)类型

根据实验和理论研究,在地幔橄橄榄岩的部分熔融过程中,辉石比橄橄榄石先熔出,残余相不断富集相容元素(如Mg、Cr)和亏损不相容元素(如Na、Al、Fe等),岩石组构也发生系统变化。这些认识与全球普遍一致的阿尔卑斯型超镁铁岩的特征相吻合。因此,阿尔卑斯型超镁铁岩多被解释为地幔残余成因类型。

2.2 岩浆结晶(MA)类型

目前已经建立起了相对成熟的岩浆分异结晶形成超镁铁岩的实验和理论体系及识别标志。还发现,由于岩浆成分、成岩环境及大地构造背景等不同,MA型超镁铁岩的特征也有很大差异。因此,有人根据岩浆成分将MA型超镁铁岩区分为玄武质岩浆结晶(BMA)亚类(如层状型和阿拉斯加型的超镁铁岩)和超镁铁质岩浆结晶(UMA)亚类。另外依据岩石产出的构造环境等标志,国内外也提出了多种划分意见(如,Wyllie,1967,1969;王恒升和白文吉等,1983),但严格讲这类划分方案不属于岩石成因类型的范畴。



1. 含方辉纯橄岩 2. 岩体边界 其余图例同图 1

图 2 地幔残余成因岩石的形态和产状(据 713 资料)

Fig. 2 Shapes and occurrences of mantle-residual rocks

2.3 交代成因(ME)类型

近十年来,超镁铁岩的交代成因观点又引起人们的重视。在肯定地壳交代作用的前提下,又提出了由地幔交代作用形成超镁铁岩的理论(Menzies, 1987)。现在地幔岩包体中和阿尔卑斯型岩体中发现了这类岩石。一些近期成果还表明,阿尔卑斯型铬铁矿的成因也与地幔交代作用有关。但总的看来,这种成因类型的研究程度还比较低。

根据近年来我们对松树沟岩体的详细研究结果,认为该岩体中发育着以上三种成因类型的超镁铁岩,该岩体是阿尔卑斯型复合成因岩体的一个典型实例。

3 地幔残余成因(R)类型

3.1 岩石类型

主要有纯橄橄榄岩、方辉橄榄岩和含方辉纯橄岩。

3.2 岩石的产状和形态

纯橄橄榄岩遍及整个岩体,为背景岩相(图 1)。在空间上它与方辉橄榄岩之间互为过渡

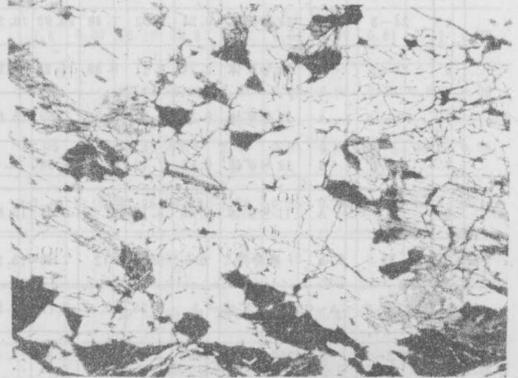
和互相包容(图2)。从方辉橄榄岩向纯橄橄榄岩方向, O_{px} 逐渐消失, O_1 中F_o含量逐渐增高,铬尖晶石自形程度增高。上述关系提供了地幔部分熔融的典型的宏观证据,即部分熔融残余构造^[5,6,7]。据初步调研和分析,岩体中242号、246号、245号、219号等含铬矿方辉橄榄岩体都具有这种宏观构造特征。

3.3 岩石结构和构造

岩石具有代表强应变相的组构特征。例如,糜棱结构(照片1)、残碎斑状结构、线理、叶理等。在方辉橄榄岩中,见到铬尖晶石与橄榄石一起被包含于斜方辉石中,使斜方辉石变成破布状(照片2),这种结构为熔融残余结构,是地幔部分熔融的微观证据^[5,7,8]。实验结果指出,这是由辉石不一致熔融形成的^[8,9]。总之,在此类岩石中几乎没有见到特征的岩浆组构。说明它们经历了部分熔融作用和地幔塑性变形作用的复杂历史。



照片1 纯橄岩的糜棱结构
正交偏光, DB17,
×20.16



照片2 方辉橄榄岩的部分熔融残余结构,橄榄石(O_1)和铬尖晶石(黑色)沿斜方辉石解理和边缘分布。斜方辉石(O_{px})呈破布状。
正交偏光, B6, ×22.4

3.4 矿物组合和矿物化学成分

岩石中矿物组合十分简单, $O_1 + O_{px} + Cr - Sp$ 。据光性测定和电子探针分析, O_1 为镁橄榄石($F_o = 91 \sim 94\%$), O_{px} 为顽火辉石($En\ 90.57 \sim 92.4, F_s\ 9.12 \sim 7.36, W_o\ 0.31 \sim 0.26, Al_2O_3 < 0.5\%$), $Cr - Sp$ 为镁铁质铬铁矿和铁质铬铁矿(表1)。如图3,此类 $Cr - Sp$ 相对贫铝(Y_{Al} 多小于0.14)和富铬(Y_{Cr} 多大于0.75), Y_{Al} 与 Y_{Cr} 呈反相关变化。这反映了部分熔融过程中铬尖晶石的成分变化趋势^[8]。

3.5 岩石化学成分

表2列出了各类岩石的化学成分。如图4,除个别样品外,绝大多数R型样品投点在阿尔卑斯型超镁铁岩区。还表现出化学成分均一, $M/F = 10 \sim 11, CA = 90 \sim 100$ (图5);枯竭亲岩浆元素,富集Mg、Cr、Ni等难熔元素(表2)等特征。这与世界范围内地幔残余成因超镁铁岩的特征是一致的^[10]。

3.6 地球化学性质

表 1 铬尖晶石的化学成分
Table 1 chemical compositions of chromium-spinels
from the Songshugou ultramafic body

分类	序号	样品号	岩石类型	采样位置	化学成分(Wt%)											化学参数					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MnO	H ₂ O ⁺	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	合计	$\frac{Cr_2O_3}{FeO^*}$	X _{Mg}	X _{Cr}	Y _{Cr}	Y _{Al}	Y _{Fe³⁺}
	1	24-5	A	24号矿体	0.54	7.35	11.02	6.25	16.21			0.16		56.8	98.33	2.62	0.64	0.84	0.77	0.15	0.08
	2	24-8	A-C	24号矿体	0.82	7.95	11.09	6.45	17.55			0.47		56.2	99.53	2.41	0.49	0.82	0.76	0.16	0.08
	3	24-9	A	24号矿体	0.76	7.63	9.18	7.41	11.03			0.25		55.6	91.86	3.14	0.48	0.83	0.82	0.17	0.01
	4	24-3	B	24号矿体	0.24	9.02	7.48	10.93	16.36			0.18	0.15	55.21	99.57	2.11	0.38	0.81	0.75	0.18	0.07
	5	24-2	B	24号矿体	2.74	8.11	9.89	11.25	14.97			0.85	0.17	50.01	97.99	1.97	0.4	0.81	0.74	0.18	0.08
	6	12-14	A	12号矿体	0.34	7.64	9.36	7.59	15.89			0.19	0.19	58.37	99.57	2.57	0.46	0.83	0.79	0.16	0.05
	7	12-5	B	12号矿体	0.86	7.49	10.29	5.53	15.6			0.16	0.19	59.09	99.23	2.37	0.49	0.84	0.81	0.15	0.05
	8	T11	A	11号矿体	5.48	8.11	13.06	8.01	13.65			2.23	0.17	48.86	99.57	2.34	0.45	0.8	0.76	0.19	0.05
	9	J1	A	界岭沟	0.9	9.56	12	7.48	13.36			0.48		54.88	98.66	2.73	0.45	0.85	0.78	0.14	0.08
	10	272-2	A-C	272号矿体	1	8.76	10.47	7.78	16.52					54.6	99.13	2.32	0.49	0.81	0.74	0.18	0.08
	11	272-3	A	272号矿体	0.84	8.27	10.31	6.89	17.47					55.09	98.87	2.33	0.49	0.82	0.75	0.17	0.08
	12	272-8		272号矿体	0.68	9.86	11.16	7.59	15.3			0.36		54.92	99.87	2.48	0.53	0.79	0.73	0.19	0.08
MA	13	T108-T15	A-C	272号矿体		8.96	10.14	9.12	17.77					54.84	100.83	2.11	0.5	0.8	0.71	0.18	0.11
	14	T108-T16	A-C	272号矿体		7.18	6.07	8.96	23.8					54	100.01	1.7	0.31	0.84	0.74	0.14	0.12
	15	T109-T1	A-C	272号矿体		8.18	7.75	8.9	20.81					53.51	99.15	1.86	0.4	0.82	0.73	0.16	0.11
	16	T109-T4	A-C	272号矿体		8.35	7.45	8.12	21.2					53.92	99.04	1.89	0.39	0.81	0.73	0.17	0.1
	17	CK129-T2	F	272号矿体		7.15	6.43	11.65	22.87					51.96	100.06	1.56	0.33	0.83	0.71	0.14	0.15
	18	CK124-T6	A-C	272号矿体		8.33	9.55	9.75	18.45					53.49	99.57	1.96	0.48	0.81	0.71	0.16	0.13
	19	CK146-T1	F	272号矿体		8.22	5.94	10.43	21.58					52.88	99	1.89	0.31	0.81	0.73	0.17	0.11
	20	C332	A	272号矿体	0.05	10.42	10.97		23.97		0.37		0.17	53.76	99.83	2.24	0.49	0.78	0.74	0.21	0.05
	21	C330-1	B		0.37	9.58	8.31		25.5	0.15	1.4			54.68	99.94	2.14	0.37	0.79	0.75	0.2	0.05
	22	C330-2	B		0.31	10.61	8.89		24.92		1.79		0.16	53.7	100.78	2.16	0.39	0.77	0.73	0.22	0.05
	23	C318-1	A		0.23	9.64	9.91		22.08	0.18	1.68		0.21	56.07	100	2.05	0.45	0.8	0.76	0.19	0.05
	24	C318-2	A		0.35	8.93	8.96		25.52		2.23		0.18	53.3	99.55	2.09	0.39	0.8	0.76	0.19	0.05

续表

分类	序号	样品号	岩石类型	采样位置	化学成分(Wt%)											化学参数					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MnO	H ₂ O+	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	合计	$\frac{Cr_2O_3}{FeO}$	X _{Mg}	X _{Cr}	Y _{Cr}	Y _{Al}	Y _{Fe³⁺}
	25	21-1	A	21号矿体	0.22	6.21	7.92	9.12	16.59			0.12	0.05	58.19	98.42	2.35	0.41	0.87	0.81	0.13	0.06
	26	57-1	A	57号矿体	1	7.85	8.02	4.03	21.4			0.26		57.86	100.42	2.31	0.36	0.83	0.79	0.16	0.05
	27	246-1	A	246号矿体	0.72	3.67	7.88	10.8	19.33			0.34		56.3	99.04	1.94	0.38	0.91	0.9	0.08	0.13
	28	242-1	A	242号矿体	1.02	4.58	7.64	15.42	20.52			0.14		49.06	98.38	1.34	0.36	0.88	0.7	0.1	0.2
	29	245-2	A	245号矿体	3.3	5.54	12.53	10.1	11.17			1.3	0.07	55.19	99.2	2.72	0.51	0.87	0.81	0.12	0.07
	30	336-1	A	336号矿体	0.66	4.2	10.95	6.19	14.42	0.29		0.42		62.04	99.17	3.14	0.55	0.91	0.85	0.088	0.06
	31	219-1	B	219号矿体	4	7.49	13.05	8	13.55			1.05	0.15	51.41	99.6	2.57	0.51	0.82	0.76	0.16	0.08
	32	219-2	A	219号矿体	5.26	5.15	8.84	10.99	18.2			2.4	0.15	47.25	98.24	1.68	0.25	0.86	0.78	0.13	0.1
	33	219-10	A	219号矿体	0.72	4.52	9.78	5.98	17.41	0.31		0.24		59.33	98.29	2.6	0.48	0.9	0.83	0.09	0.08
	34	219-13	A	219号矿体	0.62	6.08	9.02	5.41	18.62					59.84	99.59	2.55	0.44	0.87	0.82	0.13	0.06
R	35	L319-3	A	319号矿体		4.53	5.73	9.58	20.91					58.88	99.61	1.99	0.3	0.9	0.82	0.09	0.09
	36	612-T ₂	A	612号矿体		3.89	6.11	6.39	20.23					60.49	97.11	2.39	0.33	0.91	0.96	0.08	0.06
	37	622	A	622号矿体		5.38	4.48	14.21	22.4	0.3				51.8	98.87	1.47	0.24	0.85	0.73	0.13	0.14
	38	KA ₂ -35	F		0.66	2.34	7.65	12.7	18.11	0.37				55.27	97.9	1.87	0.39	0.94	0.81	0.05	0.14
	39	Pr ₁ -37	F		2.16	4.8	5.46	9.84	20.9	0.98				54.38	97.54	1.83	0.19	0.89	0.83	0.11	0.06
	40	Pr ₁ -45	F		1.42	5.74	5.28	19.87	15.95	0.74				4.77	96.7	1.41	0.15	0.85	0.73	0.13	0.14
	41	Co16-1	A-C		0.34	5.45	6.81		28.69	0.18				55.73	99.62	1.94	0.3	0.88	0.83	0.12	0.05
	42	Co16-2	A-C		0.47	4.92	6.61		28.97	0.26				55.97	99.59	1.93	0.29	0.88	0.84	0.11	0.05
	43	Co15-1	A-C		0.47	6.54	7.52		23.03					56.94	96.35	2.47	0.37	0.85	0.81	0.14	0.05
	44	Co15-2	A-C		0.44	5.83	8.75		22.95	0.29		0.25	57.83	98.8	2.52	0.4	0.87	0.83	0.13	0.05	

注:A. 浸染状铬铁岩, B. 块状铬铁岩, C. 条带状铬铁岩, F. 超镁铁岩中副矿物,

序号 20~24, 41~44 样品由电子探针测定(15KV, 1μA, 西安地质矿产研究所探针室); 其余引自 713 队

$$X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+}), X_{Cr} = Cr / (Cr + Al), Y_{Al} = Al / (Cr + Al + Fe^{3+}), Y_{Cr} = Cr / (Cr + Al + Fe^{3+}), Y_{Fe^{3+}} = Fe^{3+} / (Cr + Al + Fe^{3+})$$
 电子探针测定的 FeO 为全铁含量。

表 2 松树沟超镁铁岩的化学成分(wt%)^{*}

Table 2 chemical compositions of Songshugou ultramafites (Wt%)

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CoO	MgO	NiO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	M/F	CA
1	43.28	0.00	0.19	0.53	2.13	6.55	1.17	0.01	45.85	0.24	0.02	0.00	0.03	8.50	39.11
2	39.13	0.02	0.91		8.40	2.84	0.15	0.02	48.15	0.28	0.05	0.01	0.02	8.16	55.27
3	39.15	0.01	0.06		6.79	3.76	0.21	0.03	49.5	0.38	0.06	0.00	0.05	8.80	54.63
4	40.34	0.01	0.24	0.81	2.04	6.78	0.17	0.02	48.85	0.49	0.07	0.00	0.17	9.96	28.40
5	41.64	0.01	0.25	0.44	2.50	6.22	0.17	0.02	47.98	0.39	0.07	0.00	0.30	9.94	18.87
6	43.24	0.01	0.29	1.08	2.72	7.61	0.21	0.02	44.41	0.35	0.04	0.00	0.02	7.75	65.83
7	40.50	0.01	0.05	0.54	1.53	7.88	0.13	0.02	48.88	0.26	0.02	0.00	0.21	9.32	8.79
8	45.60	0.03	0.76	1.83	3.49	5.87	0.11	0.01	42.22	0.11	0.00	0.00	0.02	8.31	16.16
9	46.98	0.01	0.29	0.51	4.56	5.72	0.16	0.02	41.44	0.17	0.12	0.00	0.02	7.41	84.12
10	42.42	0.00	0.54	1.88	1.76	8.30	0.15	0.00	44.64	0.13	0.07	0.00	0.11	7.94	36.63
11	41.08	0.00	0.05	0.92	1.40	6.47	0.09	0.01	49.35	0.26	0.33	0.00	0.03	11.3	91.13
12	41.58	0.00	0.06	1.14	1.89	6.62	0.14	0.02	47.56	0.29	0.65	0.00	0.03	10.1	95.22
13	41.04	0.00	0.11	1.09	2.10	7.37	0.15	0.02	47.39	0.29	0.40	0.00	0.03	9.00	92.43
14	39.87	0.00	0.08	0.81	2.01	7.91	0.15	0.02	48.55	0.30	0.27	0.00	0.03	8.80	89.30
15	42.88	0.02	0.25	0.24	0.31	7.29	0.11	0.01	47.96	0.32	0.59	0.00	0.02	11.2	96.43
16	40.52	0.03	0.42	0.72	0.93	7.68	0.02	0.01	48.57	0.24	0.80	0.00	0.03	10.2	96.16
17	41.29	0.00	0.04	0.60	1.07	7.62	0.10	0.02	48.48	0.29	0.46	0.00	0.03	9.99	93.39
18	42.68	0.03	1.23	0.38	7.39	6.14	0.21	0.02	36.27	0.11	5.39	0.00	0.14	4.98	97.36
19	44.34	0.06	1.37	0.7	4.07	6.23	0.23	0.01	35.46	0.13	7.26	0.01	0.14	6.26	97.88
20	49.94	0.10	1.79	0.48	2.09	4.77	0.14	0.01	24.96	0.08	15.5	0.00	0.23	6.6	98.51
21	48.02	0.05	1.38	0.36	2.29	6.87	0.17	0.02	25.77	0.19	14.7	0.00	0.22	5.07	98.48
22	47.61	0.05	1.41	0.53	2.22	5.42	0.19	0.01	30.64	0.11	11.7	0.00	0.13	7.19	98.88
23	53.44	0.04	0.61	0.77	1.13	5.66	0.11		27.88		10.2	0.00	0.15	7.33	98.53
24	43.37	0.00	0.23	0.49	3.61	4.67	0.15	0.02	46.51	0.27	0.66	0.00	0.03	10.3	95.07
25	42.83	0.01	0.39	0.04	2.25	6.15	0.12	0.02	47.79	0.31	0.06	0.00	0.03	10.3	65.83
26	42.91	0.00	0.17	0.43	2.22	6.27	0.12	0.01	47.12	0.27	0.45	0.00	0.03	10.1	93.10
27	39.84	0.00	0.77	0.74	2.56	6.63	0.14	0.01	48.3	0.26	0.74	0.00	0.02	9.52	97.04
28	43.37	0.01	0.75	0.40	0.85	7.01	0.16	0.01	46.49	0.28	0.70	0.00	0.03	10.5	95.68
29	44.82	0.02	0.51	0.33	0.30	7.25	0.11	0.01	45.45	0.24	0.90	0.03	0.04	10.7	92.02
30	43.63	0.01	0.62	0.46	2.88	4.84	0.15	0.01	46.31	0.31	0.75	0.00	0.02	10.9	97.04
31	43.48	0.00	0.24	0.44	0.47	7.31	0.31	0.02	47.47	0.29	0.13	0.00	0.03	10.8	82.81
32	43.57	0.02	0.43	0.76	1.57	6.27	0.11	0.01	46.03	0.26	0.93	0.00	0.03	10.6	96.51
33	42.07	0.01	0.39	0.40	1.50	7.10	0.17	0.01	47.34	0.33	0.67	0.00	0.01	9.83	98.40
34	43.27	0.01	0.53	0.36	0.65	7.30	0.15	0.02	46.59	0.32	0.77	0.00	0.03	10.4	96.06

* 1) 样品 1~7 号、11~17 号为中粗粒(含辉)纯橄岩;24~26 号为纯橄橄糜棱岩;8~10 号、27~34 号为方辉橄橄岩;18~23 号为透辉岩-透辉橄橄岩;

2) 化学成分按无 H₂O 和 CO₂ 重新计算。M/F=(Mg+Ni)/(Fe+Mn), CA=Ca/(K+Na+Ca)。

3) 数据引自本文作者和 713 队(1978)的资料。

4) 样品 1~10 号属 UMA 亚类,11~23 号属 BMA 亚类,24~34 号属 R 型岩石。

表 3 和表 4 列出了各类岩石的稀土和微量元素的含量。R 岩石的球粒陨石标准化稀土元素分配型式为轻稀土亏损型(图 6a), $(Ce/Yb)_N < 1$ 。这是地幔难熔残余物的典型的稀土分配型式^[11]。从过渡元素总量($TE = V + Cu + Zn + Ga$)与亲石元素总量($LE = Rb + Ba + Nb$)的关系图解(图 7)还看出,R 型岩石以有限的变化范围和贫化亲石元素为特征。说明 R 型岩石为强亏损的地幔残余成因类型。

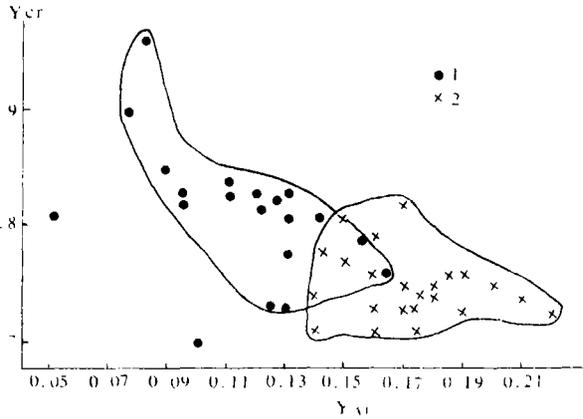


图 3 铬尖晶石的 $Y_{Cr} - Y_{Al}$ 图解

Fig. 3 Y_{Cr} vs Y_{Al} diagram of Chrome-spinels

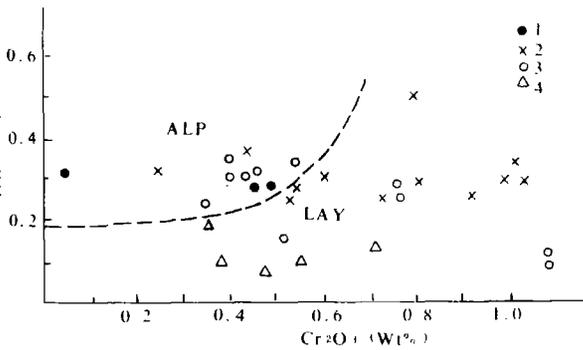
4 岩浆结晶成因(MA)类型

4.1 岩石类型

主要有中粗粒纯橄岩、方辉橄橄榄岩、透辉橄橄榄岩、橄橄榄透辉岩和透辉岩。应该注意方辉橄橄榄岩与透辉橄橄榄岩不共生。

4.2 岩石的产状和形态

MA 型岩石主要产在 II 和 III 岩相带,呈不同规模和形态的透镜体、板状体或脉状体,赋存在 R 型岩石中(图 1,图 8)。按岩石组合,可划分为中粗粒纯橄岩一方辉橄橄榄岩(UMA)组合和纯橄岩一方透辉橄橄榄岩一方透辉岩(BMA)组合。UMA 组合是重要的含矿(如 272 号、24 号、12 号等铬铁矿体)岩石组合。由它组成的岩体长几百 m 至数 m,宽数十 m 至数 cm,多呈条带状和脉状(图 8a)或透



1. 纯橄橄橄橄岩 2. 中粗粒纯橄岩 3. 方辉橄橄橄岩 4. 透辉岩一方透辉橄橄橄岩 ALP 阿尔卑斯型 LAY 层状型

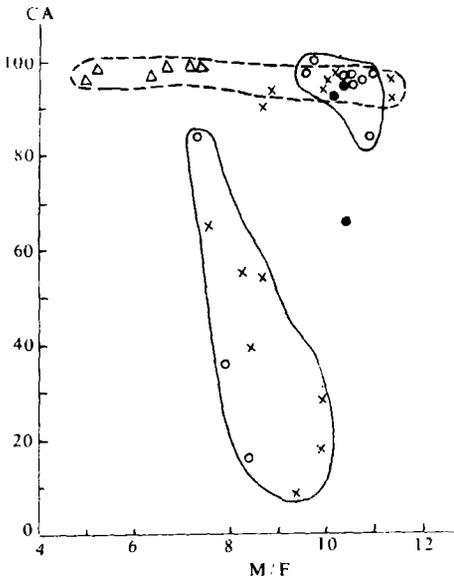
图 4 超镁铁岩的 $Cr_2O_3 - NiO$ 图解(据 Malpas, 1977)

Fig. 4 Cr_2O_3 vs. NiO diagram of ultramafic rocks

镜状(图 8b)穿切 R 型岩石,岩体界线速变,但少数情况下可呈渐变关系。BMA 组合以断续分布、组成了第 II 岩相带,与纯橄橄橄橄岩围岩为突变接触关系,多呈脉状岩体。

4.3 岩石结构和构造

MA 型岩石兼有岩浆组构和代表中弱应变相的变质变形组构。岩浆组构主要表现为辉石呈他形晶充填于橄橄橄橄橄晶间组成了堆积结构(照片 3)。还发育板粒状变晶结构(照片 4),残碎



图例同图 4

图 5 超镁铁岩的 M/F-CA 图解

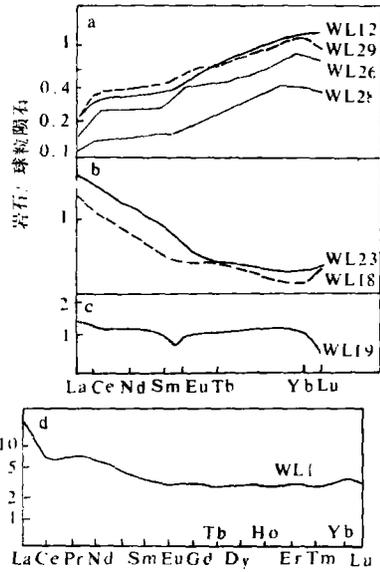
Fig. 5 M/F vs. CA diagram of ultramafic rocks

斑状结构、橄榄石(少数辉石)晶内扭折带(照片 4)等变质变形组构。这说明 MA 型岩石后期叠加了塑性变形和重结晶作用。

4.4 矿物组合和矿物化学成分

UMA 组合的矿物成分为 O_1 、 O_{PX} 和 $Cr-Sp$ 。光性测定和电子探针分析表明, O_1 中 F_o 为 87~95%; O_{PX} 含量很少, 属顽火辉石; 铬尖晶石 Y_{cr} 值 (0.7~0.8) 相对较低, Y_{Al} 值 (0.14~0.22) 较高(表 1, 图 3), 其 $Y_{cr}-Y_{Al}$ 变化趋势也比较特殊(图 3)。BMA 组合的矿物成分为 O_1 和 C_{PX} 。光性测定和电子探针分析 O_1 成分为 Fo_{84-93} Fa_{7-16} 、 C_{PX} 为透辉石 ($En_{46.03-48.36}$ $Fs_{2.53-3.85}$ $Wo_{48.26-50.73}$)。

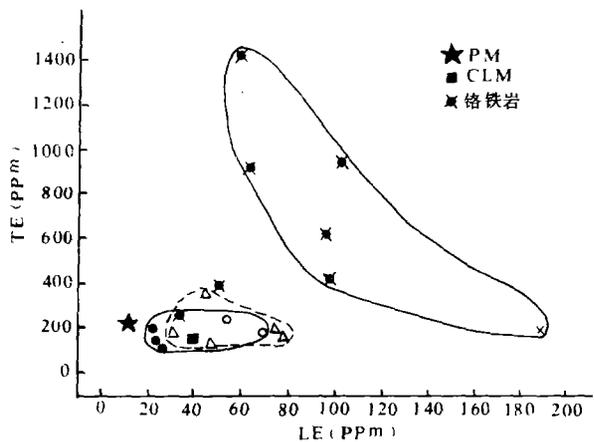
以上二个组合中橄榄石的成分皆超出了地幔残余成因岩石的一般范围 (Fo_{89-93} , Ringwood, 1977), 出现了相对富铁的贵橄榄



a. R 型 b. UMA 组合型 c. BMA 组合型 d. MME 组合型

图 6 超镁铁岩的稀土元素分配型式

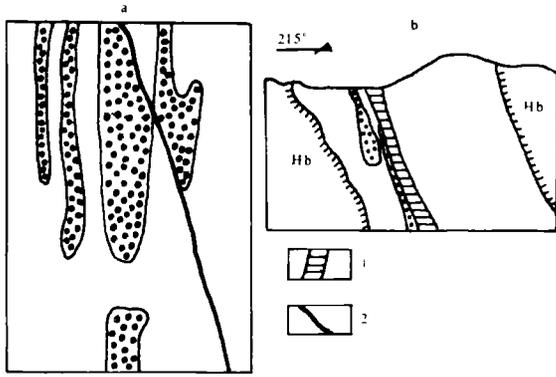
Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of ultramafic rocks



PM. 原始地幔 CLM. 大陆岩石圈地幔 其余图例同图 4

图 7 超镁铁岩的 LE-TE 图解

Fig. 7 LE vs TE diagram of ultramafites



1. 透辉岩—透辉橄榄岩 2. 充填蛇纹石的裂隙,其它图例同图2

图8 岩浆结晶成因超镁铁岩的形态和产状

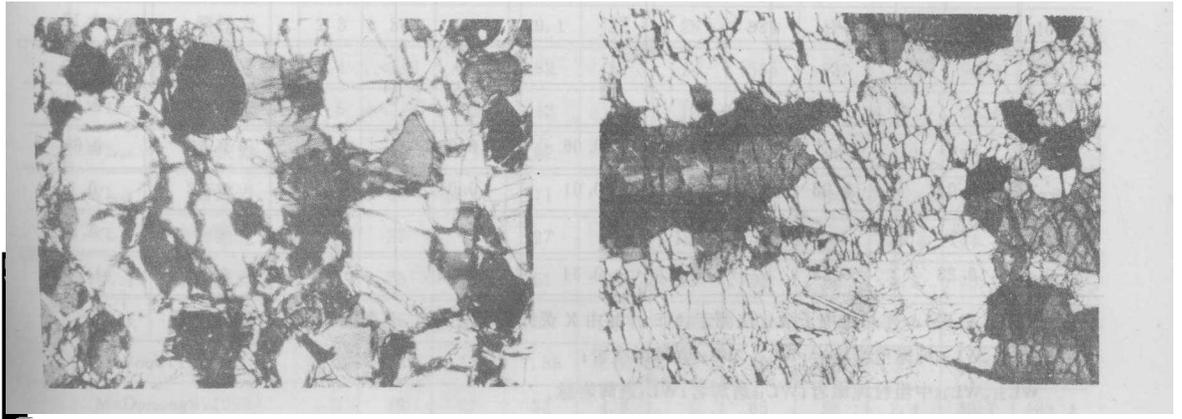
Fig. 8 Shapes and occurrences of magma crystallized rocks

浆的分异结晶趋势。

石,但与岩浆堆晶成因超镁铁岩(如 Stillwater 和 Muskox 等, Jackson, 1967; Irvine and Smith, 1967)中橄榄石的成分比较相近。

4.5 岩石化学成分

如图4,MA 样品落在超镁铁堆晶岩区。主要特征是化学成分变化大,M/F 与 CA 之间有一定的相关变化趋势(图5);UMA 组合呈反相关变异,M/F = 7.8~10,CA = 8~85;BMA 组合,随 M/F 增大,CA 变化很小,M/F = 5~11.5,CA = 95~100。这说明 UMA 与 BMA 形成于不同的岩浆体系。结合有关岩浆结晶实验资料^[12],笔者分析 UMA 趋势是超镁铁质岩浆分异结晶的产物,BMA 趋势代表了拉斑玄武质岩



照片3 辉橄岩的堆积结构,斜方辉石(有一组完全解理)呈它形晶充填于橄榄石粒间。左上部位的二个黑色晶粒是铬尖晶石,橄榄石已弱蛇纹石化。
正交偏光,127,×64

照片4 纯橄岩的板粒状变晶结构,左中部和右下部的橄榄石显示晶内扭折带,橄榄石已叠加了后期脆性变形—碎裂作用,但没有破坏其统一的光性方位。
正交偏光,1B10,×20.16

4.6 地球化学性质

MA 样品有二种稀土分配型式。UMA 为轻稀土富集型(图6b), $(Ce/Yb)_N > 1$ 。BMA 为平

坦型(图 6c), $(Ce/Yb)_N \approx 1$ 。从 LE-TE 关系图解(图 7)还看出, UMA 样品比其它样品更富含亲石元素, LE 与 TE 呈反相关变异; 而 BMA 样品相对贫亲石元素和过渡元素, 其变化范围大致相近于 R 型样品。可见 UMA 与 BMA 具有不同的地球化学性质, 它们代表了不同的成因过程。此外, 相对大陆岩石圈地幔(CLM)^[13]或原始地幔(PM), MA 样品均不同程度地富集不相容元素(图 7), 说明这些岩石可能遭受过壳幔交代作用。

表 3 超镁铁岩的稀土元素含量(ppm)*

Table 3 REE contents of ultramafites (ppm)

	R				UMA		BMA	ME
	WL ₁₂	WL ₂₅	WL ₂₆	WL ₂₈	WL ₂₃	WL ₁₈	WL ₁₉	WL ₁
La	0.06	0.06	0.04	0.03	0.9	0.58	0.38	7.8
Ce	0.24	0.28	0.2	0.1	1.72	1.02	1	6.4
Pr								0.81
Nd	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	4.1
Sm	0.08	0.09	0.06	0.03	0.2	0.11	0.21	0.72
Eu	0.03	0.04	0.03	0.01	0.05	0.03	0.06	0.21
Gd								0.96
Tb	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.13
Dy								0.92
Ho								0.18
Hr								0.55
Tm								0.08
Yb	0.21	0.2	0.13	0.06	0.05	0.04	0.18	0.65
Lu	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.1
Y								3.3
$(\frac{Ce}{Yb})_N$	0.23	0.28	0.3	0.34	6.96	5.16	1.12	1.99

* R、UMA、BMA 样品由中子活化法测定, ME 样品由 X 荧光光谱法测定, 北京铀矿地质研究所

WL₁₂、WL₂₅ 纯橄橄榄岩; WL₂₆、WL₂₈ 方辉橄橄榄岩;

WL₂₃、WL₁₈ 中粗粒纯橄岩; WL₁₉ 透辉岩; WL₁ 透辉岩脉。

5 交代成因(ME)类型

5.1 岩石类型

现在查明的主要岩石类型有蛇纹岩、滑石菱镁岩、透辉石岩和斜方辉石岩等。在成因上这些岩石可区分为地壳交代(CME)亚类和地幔交代(MME)亚类。蛇纹岩和滑石菱镁岩属 CME 亚类, 它们的特征和成因的认识争议不大, 故本文将不再赘述。这里着重讨论了 MME 亚类岩石。透辉石岩和斜方辉石岩属 MME 亚类。

5.2 岩石的产状和形态

按其形态和产状, MME 类岩石可被命名为条带状、肠状(图 9a)和火焰状(图 9b)的透辉石岩脉(斜方辉石岩脉)。这些新生脉体广泛分布在纯橄橄榄糜棱岩中或方辉橄橄榄糜棱岩中。脉宽多为 1~3cm, 延长数 mm 至数 m。这些脉体的产状与其围岩或区域的构造线和谐一致, 与其围岩呈速变接触关系。脉体的形态说明交代作用是在超镁铁岩塑性流变状态下进行的, 暗示交代环境可能是下地壳—上地幔环境。

表 4 超镁铁岩及伴生铬铁岩的微量元素含量(ppm)

Table 4 Trace element contents of ultramafites & chromitites (ppm)

分类	样品号	岩石	Rb	Sr	Zr	Ba	Nb	Cu	Zn	V	Ga	LE	TE
R	WL ₈	纯橄橄榄糜棱岩	4.1	<10	11	5	14	7	114	30	2.6	23.1	153.6
	WL ₉	纯橄橄榄糜棱岩	5.3	27	<10	6.6	13	8	111	31	2	24.9	152
	WL ₁₂	纯橄橄榄糜棱岩	4.9	<10	18	6	11	33	116	31	1.1	21.9	181.1
	WL ₂₆	方辉橄橄榄岩	6.8	<10	<10	37	10	20	188	27	1.8	53.8	236.8
	WL ₂₈	方辉橄橄榄岩	7.4	16	13	53	10	28	111	33	2.3	70.4	174.3
	WL ₃₂	铬铁岩	4	<10	11	32	13	7	248	134	2.9	49	391.9
	WL ₃₁	铬铁岩	3.9	<10	12	17	12	12	176	73	1.2	52.9	262.2
UMA	WL ₂₃	中粗粒纯橄岩	2.8	51	20	174	14	25	122	38	1.9	190.8	186.9
	WL ₃₀	铬铁岩	2.1	14	<10	79	15	14	485	183	5.4	96	607.4
	WL ₃₁	铬铁岩	2.3	34	17	29.1	27	26	982	471	2.6	58.4	1401.6
	WL ₃₃	铬铁岩	4.4	<10	<10	82	19	14	585	337	2.2	1054	938.2
	WL ₃₅	铬铁岩	1.5	<10	<10	42	18	12	615	279	1	61.5	907
	WL ₃₆	铬铁岩	1.1	16	<10	82	15	15	292	96	1.5	98.1	404.5
EMA	WL ₁₉	透辉岩	4.7	66	<10	11	14	8	67	96	2.6	29.7	173.6
	WL ₂₀	透辉橄橄榄岩	5.4	27	14	27	12	159	71	101	21.8	44.4	352.8
	WL ₂₄	橄橄榄透辉岩	5.1	73	<10	51	14	23	92	65	2.6	70.1	182.6
	WL ₂₅	透辉岩	6.5	96	21	55	14	19	74	69	2	75.5	164
PM (Wood, 1979)			0.86	23	11	7.56	0.62	26	53	59	84	9.04	222
CLM (McDonough, 1990)			1.9	49	21	33	4.8	11	65	56	2.4	39.7	134.4

* WL 样品由 X 荧光光谱法测定, 北京矿冶地质研究所, LE = Rb + Ba + Nb, TE = Cu + Zn + V + Ga.

5.3 岩石结构和构造

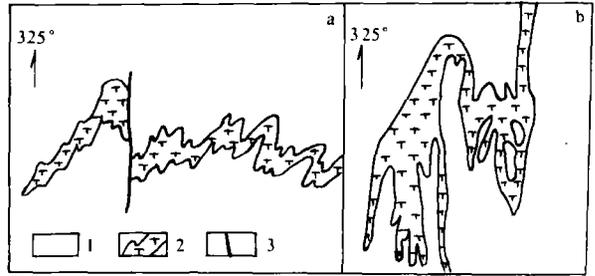
据野外和显微镜下观察, MME 亚类岩石粒度粗大, 为中粗粒—巨粒结构, 块状构造。在脉体中还出现了交代残留的纯橄橄榄糜棱岩或方辉橄橄榄糜棱岩的残体(图 9b), 残体形态复杂多样, 如细脉状、眼球状、角砾状、条纹状、火焰状等。脉体与残体之间、或脉体与其围岩之间的界面表现为齿状和港湾状, 界面形态很不规则。界面处没有冷凝边和烘烤边。以上特征提供了交代成因(而不是岩浆结晶成因)脉体的重要证据。

5.4 矿物组合和矿物化学成分

MME 亚类岩石的矿物成分比较简单。透辉石岩主要由透辉石和磁铁矿组成。斜方辉石岩主要由斜方辉石、极少量橄榄石和铬尖晶石组成。据光性测定和电子探针分析,这些辉石的含铁量均比 R 型和 MA 型中辉石的含铁量更高。

5.5 地球化学性质

图 6d 是一个透辉石岩脉的稀土分配型式,相似于 UMA 的型式(图 6b)。从质量平衡角度看,假定岩脉是岩浆结晶产物,若地幔橄榄岩中全部透辉石熔融,也不会使岩脉富集这么多的稀土元素(表 3)。因此这是一个不切实际的部分熔融模式。可见脉体可能是在富含 REE 的熔体或液体带入情况下,由地幔交代作用形成的。总之透辉石脉可能属地幔交代成因类型。



1. 纯橄榄糜棱岩 2. 透辉石岩脉 3. 充填蛇纹石的裂隙

图 9 交代成因的透辉石岩脉

Fig. 9 Diopside veins from metasomatism origin

6 讨论和结论

综上所述,松树沟超镁铁岩可划分为地幔残余成因(R)类型、岩浆结晶成因(MA)类型和交代成因(ME)类型。MA 型又分为超镁铁质岩浆结晶(UMA)亚类和玄武质岩浆结晶(BMA)亚类。ME 型又分为地幔交代(MME)亚类和地壳交代(CME)亚类。因此,松树沟岩体是阿尔卑斯型复合成因岩体的一个典型例证。

鉴于岩体中有着大量地幔残余型纯橄岩、以及发生过超镁铁质岩浆活动和壳幔交代作用等事实,结合其围岩角闪岩(原岩被恢复为拉斑玄武岩)具有洋岛玄武岩或初始裂谷玄武岩的地球化学性质^[14],有理由认为松树沟岩体是大陆边缘伸展热点(extensional hotspot)环境中^[15]地幔热柱演化的产物。关于各类岩石的形成演化历史,这里提出了一个简单模式。在地幔柱底辟上涌过程中,地幔二辉橄橄榄岩发生了多期部分熔融。第一期熔融出橄榄拉斑玄武质岩浆(M₁熔体),相应残余物为方辉橄橄榄岩。M₁熔体在脱离底辟体前遗留下 BMA 岩石组合,后喷出地表形成本区拉斑玄武岩系。由于地幔交代作用,促使早先形成的方辉橄橄榄岩残余相发生部分熔融,形成一种超镁铁质岩浆(M₂熔体),相应残余物为纯橄橄榄糜棱岩,这是第二期熔融。M₂熔体一旦产生即被迁入由 R 型岩石圈闭的若干小岩浆房中,结晶形成 UMA 岩石组合。当底辟体上升到壳幔过渡带时,由于再次地幔交代和地幔塑性变形的共同作用,形成了 MME 亚类岩石。在底辟体进入地壳后遭受了地壳交代或变质作用,最后形成 CME 亚类岩石。

研究工作得到安三元教授的指导,特此致谢。

参考文献

- 1 安三元等. 陕西商南松树沟超镁铁岩体的地质特征及其成因. 西安地质学院学报, 1981, 3(2)
- 2 张泽军. 陕西商南松树沟地区超基性岩成因探讨. 西安地质学院学报, 1981, 3(2)
- 3 汤耀庆等. 东秦岭蛇绿岩的形成时代和构造环境. 成都地质学院学报, 1986, 13(2)
- 4 贾东, 施央申. 东秦岭商南边缘海型蛇绿岩的发现及其板块构造意义. 南京大学学报(地球科学版), 1988, (1)
- 5 王希斌, 鲍佩声. 豆荚状铬铁矿床的成因——以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例. 地质学报, 1987, 61(2)
- 6 Boudier F, Coleman R G. Cross section through the peridotite in Samail ophiolite, S. Oman Mountains. JGR, 1981, 86
- 7 Dick HJB. Evidence for partial melting in the Josephine peridotite. Ore Dept Geol Min Ind Bull, 1977, 96
- 8 Dick HJB, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and Alpine-type peridotite and spatially associated lavas, 1984, 86
- 9 Dicky Jr Js, et al. Chromium in silicate-oxide systems. Carnegie Inst Wash Yearb, 1971, 70
- 10 Coleman R G. Ophiolite. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1977
- 11 张泽军. 造山—蛇绿橄榄岩和地幔岩包体的稀土分配模式. 西北地质, 1990, (2)
- 12 Cox K G et al. The interpretation of igneous rocks. George Allen and Unwin, London, 1979
- 13 McDonough W F. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. Earth Planet. Sci. Lett., 1990, 101
- 14 张泽军, 安三元. 陕西商南松树沟两类正角闪岩的地球化学研究. 矿物岩石, 1991, 11(4).
- 15 White R Mckenzie D. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. JGR, 1989, 94(B6)

THE GENETIC CLASSIFICATION OF SONGSHUGOU ULTRAMAFIC ROCKS IN NORTH QINLING MOUNTAINS

Zhang Zejun

(Xian College of Geology)

Abstract

The genetic classification of ultramafic rocks is the long-disputed subject. After integrated studies and analyses in field geology, petrology and geochemistry, the writer think that Songshugou ultramafic rocks in North Qinling can be divided into three genetic types, that is the magma crystallization (MA) type, the mantle residue (R) type and the metasomatism (ME) type. The MA type is further divided into two subtypes of basaltic magma crystallization (BMA) and ultramafic magma crystallization (UMA). The ME type also into two subtypes of mantle metasomatism (MME) and crustal metasomatism (CME). Therefore the Songshugou body is a typical example of Alpine-type multigenetic ultramafic body. The author think that achievements of this paper will push studies of genetic classification of Alpine-type ultramafic rocks forward.