

苏北榴辉岩成因类型及其形成条件

樊金涛 程振香

(江苏省地质矿产调查研究所, 南京 211135)

主题词 榴辉岩 成因类型 矿物化学 江苏

提 要 苏北榴辉岩至少存在高压壳源型(H 型)、超高压壳源型(U 型)和幔源型(M 型)三类。其中 H 型榴辉岩的石榴石为铁铝榴石,具正环带结构,单斜辉石属低硬玉绿辉石,主要形成于晋宁期低温高压变质条件下的下地壳;U 型榴辉岩含微粒金刚石(?)、柯石英及其假象等,发育放射状胀裂结构和正、反环带结构,石榴石为钙铝榴石,单斜辉石属高硬玉绿辉石,主要形成于印支期高温超高压变质条件下的上地幔;M 型榴辉岩的石榴石属镁铝榴石,形成于晋宁期高温超高压条件下的岩石圈与软流圈交界附近。

苏胶造山带是苏北-胶南地体与胶北地体经历了洋壳俯冲、碰撞、多期陆内俯冲,并以印支期陆内俯冲碰撞为主的复杂造山带^[1],苏北新沂-东海-赣榆高压-超高压变质带是其俯冲碰撞造山的结果。其中榴辉岩类型之多,成因之复杂,可与世界著名的阿尔卑斯榴辉岩带相媲美,为我们提供了一个研究造山带高压、超高压变质变形及其动力学机制的理想地区。本文重点研究苏北榴辉岩成因类型、岩相学、矿物化学等特征,并探讨其形成条件。

1 地质特征

苏北榴辉岩带分布于扬子古陆板块北缘,位于苏北-胶南地体的西南部。新沂县郝湖至赣榆县柘汪长约 120km 的区域内,已发现榴辉岩体(块)500 余个,大体分碱场-石桥和郝湖-武强山两个亚带,分别受逆冲型角闪岩相韧性剪切带控制,呈南西-北东向展布。总体上,形成于下地壳和上地幔的高压、超高压榴辉岩单独或与赋存的超镁铁岩或大理岩、黑云变粒岩、石英岩等变质地层一起,被总体相当于角闪岩相的中地壳片麻岩所包裹,一起剥露于现代侵蚀面,反映了一种非原地构造就位机制。

1.1 壳源型榴辉岩

是苏北榴辉岩的主要类型,主要赋存于各种片麻岩内,形态以透镜状为主,规模悬殊,大者长达 2700m,宽 500 多米,小者仅几十厘米-几厘米。片麻岩经原岩恢复,大都为晋宁期中-酸性侵入岩,如闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗岩以及碱性花岗岩等,同位素年龄为 692Ma(U-Pb 法,锆石)、788Ma 和 852Ma(Rb-Sr 法,全岩)。榴辉岩与片麻岩有两种关系:一种榴辉岩呈包体产出,其剪切面理与围岩片麻理产状斜交(图 1-a)或平行,显示比围岩经历了更深层次和更多世代的变形、变质;另一种榴辉岩及其围岩片麻

岩受逆冲型角闪岩相(或绿片岩相)韧性剪切带或伸展型韧性、脆性剪切带控制,榴辉岩大都发生变形分解,与片麻岩表现为构造接触关系,其间发育规模不等的糜棱岩带或强烈的片理化(图1-b)和退变质作用,形成石榴角闪(片)岩、斜长角闪(片)岩、绿帘黑云母片岩(千糜岩)等。

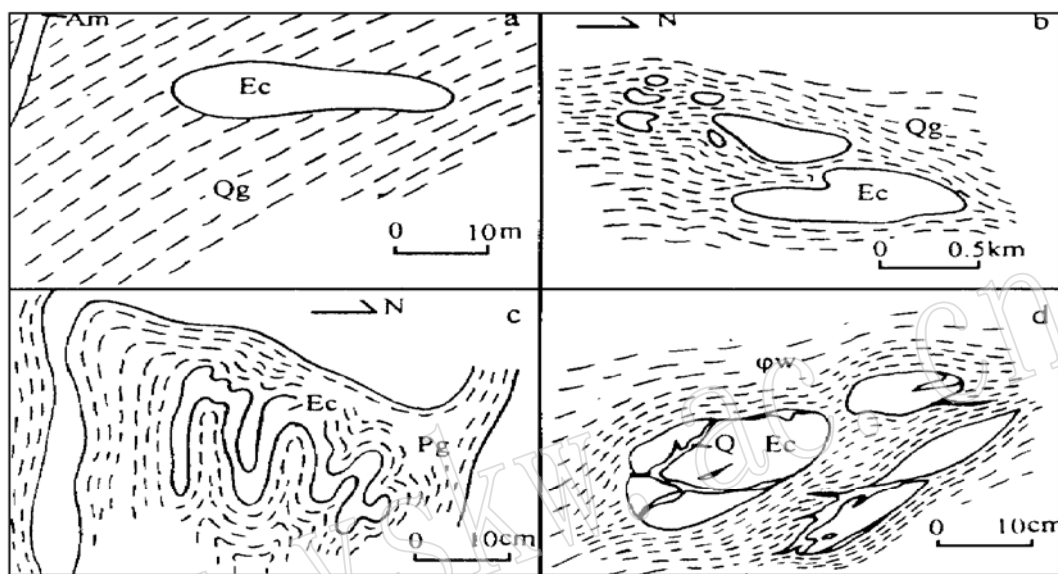


图1 苏北榴辉岩产出素描图

Fig. 1 Sketch of eclogites in northern Jiangsu

a—驼峰正片麻岩中榴辉岩包体;b—青龙山榴辉岩与正片麻岩构造接触关系;c—郝湖榴辉岩与围岩一起褶皱;d—许沟蛇纹岩中的榴辉岩包体;Ec—榴辉岩;Am—斜长角闪岩;Qg—正片麻岩;Pg—副片麻岩;φw—蛇纹岩;Q—石英脉

其次,在武强山、郝湖等地,见似层状、扁豆状、长透镜状等榴辉岩与大理岩、变粒岩、石英岩等呈顺层或互层产出,一起变质、褶皱(图1-c),共同组成表壳岩系被包裹于片麻岩中。其规模较小。

1.2 幔源型榴辉岩

见于许沟、蒋马、芝麻坊、阿湖等地,赋存于片麻岩中的蛇纹石化超镁铁岩体内(图1-d)或附近,呈透镜状、椭球状、脉状、不规则状等形态。其规模小,加之多期变形分解作用,多数为几十厘米—几厘米的透镜体。

2 岩相学

2.1 壳源榴辉岩

(1) 高压壳源型榴辉岩(H型)

岩石类型有含金红石榴辉岩、石英榴辉岩、白云母榴辉岩、蓝闪石榴辉岩、黝帘石榴辉岩、普通榴辉岩等。岩石呈灰绿—暗绿色或绿色夹红棕色条带,具柱粒状变晶、斑杂状变晶、

包含变晶、环带变晶等原生结构^①，块状、斑杂状、条带状等原生构造。原生矿物主要有石榴石、单斜辉石，其次为石英或白云母或蓝闪石或黝帘石等，含少量金红石、蓝晶石、磷灰石等。其中石榴石呈淡红、浅粉红、橙红、深红等色，自形一半自形粒状，粒径一般0.1—0.5mm，个别达1mm，常呈集合体条带状或团块状分布，含量25%—65%，电子探针扫描揭示其有正生长环带，表现为核部富MnO，边部富MgO、FeO，具典型的进变质增温增压石榴石环带特征；单斜辉石呈浅绿—深绿色短柱、粒状，粒径一般0.5—2mm，含量20%—60%；多硅白云母呈片状、柱状或板状，分布无方向性或平行排列于其它矿物间， $Si > 3.0$ ，片径0.5—2mm，含量1%—10%，个别大于15%；石英呈不规则粒状或长形粒状，粒径一般1—2mm，被石榴石、单斜辉石包裹或分布于其他矿物粒间，含量1%—30%；蓝闪石呈深蓝或蓝灰色，晶体粗大，粒径1—5mm，具多色性， N_g 蓝紫色， N_m 淡紫色， N_p 淡黄色至无色，正延长，负光性，含量可达0%—20%；黝帘石呈柱状或他形粒状，晶体较大，一般1.0mm，大者达3mm，含量0%—15%；金红石及铁金红石为暗红、黑色它形粒状、柱状晶体，少量肘状，双锥聚形晶体，粒径0.1—0.6mm，含量一般小于4%，高者可达6%；蓝晶石为无—淡蓝色柱、粒状晶体，粒径一般0.2—0.5mm，含量1%左右；磷灰石呈自形一半自形，含量一般小于1%。

岩石普遍遭受挤压，具有碎裂或碎斑结构，部分岩石遭受了明显的退变作用，具有交代残余、交代镶边、交代蠕虫状等次生结构和片麻状等次生构造。次生矿物有角闪石、绿帘石、斜长石、绿泥石、绢云母、白钛石、钛铁矿等。其中角闪石、绿帘石及绢云母围绕石榴石交代生长；角闪石、绿帘石等沿单斜辉石的裂隙和边缘交代生长，最后为角闪石+斜长石构成的指纹状、蠕虫状后成合晶所取代；金红石则向钛铁矿等转变。

(2) 超高压壳源型榴辉岩(U型)

岩石类型有含微粒金刚石(?)及柯石英榴辉岩、含柯石英及其假象榴辉岩、含柯石英假象蓝晶石榴辉岩、含微粒金刚石(?)钛(磁)铁矿榴辉岩等。岩石呈墨绿色或绿色夹红色条带，具等轴粒状变晶、板状变晶、斑杂状变晶、包含变晶、环带变晶等原生结构，块状、斑杂状、条带状等原生构造。原生矿物主要有石榴石、单斜辉石，其次为蓝晶石或钛(磁)铁矿等，含少量金红石、石英、多硅白云母、磷灰石等，可见柯石英及其假象、微粒金刚石(?)等。其中石榴石呈浅粉红、橙红、樱红色或淡黄、无色，它形粒状、拉长粒状或半自形粒状，粒径一般小于1mm，个别可达10mm以上，含量20%—50%，个别达95%以上，裂纹发育，有反生长环带，表现为核部富MgO、FeO，边部富MnO，具典型的退变质减压降温石榴石环带特征，亦有正生长环带；单斜辉石呈绿色它形粒状或板状、短柱状，粒径1—6mm，含量45%—50%，与石榴石紧密相嵌并呈定向排列；蓝晶石呈自形一半自形或它形粒状，粒径可达3mm，含量1%—10%，高的达18%；钛(磁)铁矿以他形为主，含量0%—20%；多硅白云母呈鳞片状， $Si = 3.5-3.6$ ，片径较大，1mm左右；石英呈粒状，粒径1—2mm，被石榴石、单斜辉石包裹或充填于其它矿物粒间；金红石呈暗红色、黑色等粒状或柱状，粒径0.1—0.6mm；磷灰石呈自形一半自形；柯石英常包裹于石榴石、单斜辉石(图2)及蓝晶石等矿物中；金刚石(?)呈八面体等形态，光泽强，高突起，全消光，粒径20—40 μm ，常为石榴石(图3)、钛(磁)铁矿、单斜辉石所包裹。碱场超高压变质榴辉岩由硬玉质辉石、石榴石、蓝晶石、石英(柯石英)和斑晶富

^① 本文将属于进变质榴辉岩相岩石的矿物、结构、构造分别称为原生矿物、原生结构、原生构造，而将其退变形成的矿物、结构、构造分别称为次生矿物、次生结构、次生构造。

钠角闪石组成。毛北榴辉岩的石榴石和单斜辉石中含金红石、多硅白云母、钠云母、钾长石和两类石英包体,一类为聚晶石英或多晶石英,另一类为石英-柯石英集合体^[2]。



图 2 毛北榴辉岩中柯石英假象包体
Fig. 2 Pseudomorphous enclaves of coesite in
Maobei eclogites

Gr—石榴石; Om—绿辉石; Rt—金红石; Q—呈柯石英
假象的石英

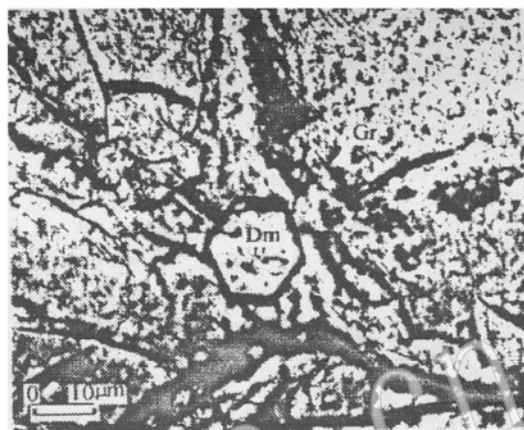


图 3 和堂榴辉岩中金刚石(?)包体

Fig. 3 Diamond (?) enclaves of Hetang eclogites
Gr—石榴石; Dm—金刚石(?)

岩石普遍遭受挤压碎裂,并发育放射状胀裂结构(图 2),部分岩石遭受明显退变质作用,具有交代残留、交代镶边等次生结构,片状、片麻状等次生构造,含有角闪石、黝帘石、绿帘石、绿泥石、斜长石、钠云母、石英、榍石、碳酸盐等次生矿物。其中黝帘石、角闪石、绿泥石及云母常垂直石榴石边界交代生长;单斜辉石亦为角闪石等交代,常沿其裂隙和边缘交代生长,最后为角闪石+斜长石构成的后成合晶所取代;蓝晶石被钠云母包围交代;金红石向钛铁矿、榍石转变。随着退变作用的加剧,角闪石增加,单斜辉石和石榴石迅速减少,岩石转变为榴闪岩,乃至形成最终矿物组合:角闪石+钠长石+白云母。

2.2 幔源型榴辉岩(M型)

岩石类型有斜辉榴辉岩、含红刚玉榴辉岩等。岩石呈墨绿色或红色斑点墨绿色,具等粒变晶、斑杂状变晶、包含变晶等原生结构及糜棱、碎斑、三联点、交代残留、交代镶边等次生结构,块状、斑杂状等原生构造及片麻状等次生构造。原生矿物有石榴石、单斜辉石、斜方辉石或红刚玉,以及少量金红石、铬铁矿等。其中石榴石呈粉红色它形粒状、斑杂状等,粒径 0.7—1.5mm,含量 15%—60%,可见对辉石的蚕蚀,常包裹浑圆的单斜辉石;单斜辉石呈无色或绿色半自形—它形柱粒状,粒度较大,含量 10%—40%;斜方辉石与单斜辉石共生,自形,具扭折现象,粒度 0.5mm 左右,含量 10%—30%;铬铁矿为自形粒状,金红石呈它形。含红刚玉榴辉岩除含石榴石和单斜辉石外,含 3%—8% 的红刚玉和少量橄榄石、金云母。红刚玉呈红色,粒状或细脉状,粒度 1—5mm,个别超过 5mm。

3 矿物化学

各种类型榴辉岩中 12 个具代表性石榴石和单斜辉石的电子探针分析结果见表 1, 其 Fe₂O₃、FeO 值采用电价差值法计算确定。

表 1 苏北榴辉岩中石榴石、单斜辉石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of garnets and clinopyroxenes from eclogites in northern jiangsu

矿物	类型 序号	H 型榴辉岩					U 型榴辉岩				M 型榴辉岩		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
石榴石	SiO ₂	38.12	39.44	36.96	39.60	38.81	40.12	38.64	40.10	40.89	41.80	41.12	42.00
	TiO ₂	0.12	0.05	0.02	0.16	0.06	0	0.07	0.04	0.02	0.07	0.08	0.07
	Al ₂ O ₃	21.92	23.40	22.20	20.67	21.74	22.19	21.68	24.00	24.10	23.03	18.82	20.78
	< FeO >	24.04	26.01	26.08	20.81	23.25	19.10	21.63	12.96	9.76	5.65	13.40	13.79
	MnO	0.41	0.98	0.59	0.62	0.43	0.45	0.30	0.26	0.15	0.08	0.56	0.46
	MgO	3.35	5.31	5.97	9.33	8.14	7.03	3.41	9.23	12.17	19.99	15.63	17.75
	CaO	10.18	5.60	7.77	7.05	7.18	11.37	12.28	13.39	11.62	9.25	5.29	3.40
	Na ₂ O	0.29	0	0.12	0.08	0.02	0	0.10	0.05	0.12	0.02	0	0.02
	K ₂ O	0	0	0.01	0.01	0	0	0.03	0	0	0	0.03	0.01
	Cr ₂ O ₃	0.03	0	0	0.006	0.01	0	0.03	0.02	0.05	0.49	3.93	0.13
	总量	98.46	100.79	99.72	98.34	99.64	100.26	98.17	100.05	98.88	100.38	98.86	98.41
	单斜辉石	Pyx	13.3	20.6	23.6	35.6	31.1	26.5	13.5	34.4	45.0	70.4	57.5
Spe		0.9	2.2	1.3	1.3	0.9	1.0	0.7	0.6	0.3	0.2	1.2	1.0
GrO		29.0	15.6	9.9	17.5	16.7	30.8	34.8	35.8	30.8	12.7	2.5	5.9
Alm		56.7	61.6	53.0	43.8	48.3	41.7	50.9	29.1	23.8	6.0	27.3	25.9
And		0	0	12.2	1.8	3.0	0	0	0	0	9.3	0	2.5
Ura		0.1	0	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1	1.4	11.5	0.4
SiO ₂		54.57	56.38	55.25	57.70	55.30	57.06	57.50	54.77	56.55	54.01	55.41	54.90
TiO ₂		0.09	0.04	0.05	0.09	0.04	0	0.02	0.03	0.07	0.06	0.09	0.07
Al ₂ O ₃	5.70	7.12	12.05	8.96	8.76	12.84	18.50	9.91	12.83	1.16	0.40	2.31	
< FeO >	8.21	7.47	6.11	8.17	7.10	3.07	3.77	1.91	0.96	0.66	2.82	3.73	
MnO	0.05	0.03	0.02	0.025	0.01	0	0	0.01	0.04	0.05	0.01	0.04	
MgO	8.42	10.41	7.71	7.72	8.21	7.66	3.07	9.55	7.66	18.35	15.62	15.36	
CaO	15.64	9.80	11.03	11.98	11.95	11.22	5.63	16.32	13.71	24.22	23.13	21.17	
Na ₂ O	5.75	7.29	7.82	7.18	7.73	8.01	9.74	5.22	7.00	0.66	1.21	2.06	
K ₂ O	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.05	0	
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0.01	0	0.04	0	0	0.01	0.11	0.27	0.96	0	
总量	98.49	98.55	100.05	101.84	99.14	99.84	98.23	97.73	98.93	99.44	99.70	99.64	
Ae	11.9	12.7	10.6	17.1	17.5	0	0	0	0	1.4	2.6	5.3	
Jd	20.6	25.7	36.4	25.3	29.2	47.1	61.8	30.7	41.6	2.2	3.6	6.0	
Quad	67.5	61.6	53.0	57.6	53.3	52.9	38.2	69.3	58.4	96.4	93.8	88.7	

3.1 壳源型榴辉岩

1—9 号石榴石 < FeO >、CaO 含量高, MgO、Cr₂O₃ 含量低。其端员组分为 Alm_{23.8—61.6}

$\text{Pyr}_{13.3-45.0} \text{Gro}_{9.9-35.8} \text{Spe}_{0.3-2.2} \text{And}_{0-12.2} \text{Ura}_{0-0.1}$ ^①, 铁铝榴石高于镁铝榴石和钙铝榴石,

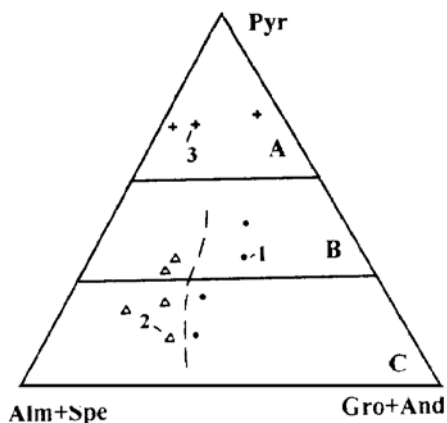


图 4 苏北榴辉岩的石榴石成分特征

Fig. 4 Compositional characteristics of

garnets from eclogites in northern Jiangsu

1—H 型榴辉岩; 2—U 型榴辉岩; 3—M 型榴辉岩

钙铬榴石的含量很低, 在 $\text{Pyr}-(\text{Gro}+\text{And})-(\text{Alm}+\text{Spe})$ 图解(图 4)中, 远离 Pyr 侧, 均落入 Coleman 等(1965)划分的 B 型和 C 型榴辉岩区。其中 H 型榴辉岩(1—5 号)的端员组分为 $\text{Alm}_{43.8-61.6} \text{Pyr}_{13.3-35.6} \text{Gro}_{9.9-29.0} \text{Spe}_{0.9-2.2} \text{And}_{0-12.2} \text{Ura}_{0-0.1}$, 含铁铝榴石高, 镁铝榴石和钙铝榴石中等, 钙铬榴石低, 属铁铝榴石, 在图 4 中, 其投影点靠近(Alm+Spe)一侧; U 型榴辉岩(6—9 号)的端员组分为 $\text{Alm}_{23.8-50.9} \text{Pyr}_{13.5-45.0} \text{Gro}_{30.8-35.8} \text{Spe}_{0.3-1.0} \text{And}_0 \text{Ura}_{0-0.1}$, 含钙铝榴石高, 镁铝榴石和铁铝榴石中等, 钙铬榴石低, 属钙铝榴石, 其投影点靠近(Gro+And)一侧, 两者有明显区别。

1—9 号单斜辉石 $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{FeO} > \text{Na}_2\text{O}$ 含量高, $\text{MgO} \text{CaO} \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量低, 其端员组分百分含量列于表 1。在辉石分类图^[3](图 5)中, 其投影点

表明, 壳源榴辉岩的单斜辉石均属 $\text{Ca}-\text{Na}$ 辉石(图 5-a)和绿辉石(图 5-b)。其中 H 型榴辉岩的单斜辉石在三类榴辉岩的单斜辉石中, 含霓石高, 硬玉中等, 属低硬玉绿辉石; U 型榴辉岩的单斜辉石含硬玉高, 无霓石, 属高硬玉绿辉石, 两者有明显的区别。

3.2 幔源型榴辉岩(M 型)

10—12 号石榴石 $\text{MgO} \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量高, $< \text{FeO} > \text{CaO} \text{Na}_2\text{O}$ 含量低, 其端员组分为 $\text{Alm}_{6.0-27.3} \text{Pyr}_{57.5-70.4} \text{Gro}_{2.5-12.7} \text{Spe}_{0.2-1.2} \text{And}_{0-9.3} \text{Ura}_{0.4-11.5}$, 在三类榴辉岩的石榴石中, 含镁铝榴石和钙铬榴石高, 含铁铝榴石和钙铝榴石低, 属镁铝榴石, 在图 4 中, 其投影点靠近 Pyr 一侧, 均落入 Coleman 等(1965)划分的 A 型榴辉岩区, 与壳源型榴辉岩的石榴石有显著区别。

10—12 号单斜辉石的化学成分中, $\text{MgO} \text{CaO} \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量高, $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{FeO} > \text{Na}_2\text{O}$ 含量低, 其端员组分百分含量列于表 1。在辉石分类图(图 5)中, 其投影点表明, M 型榴辉岩的单斜辉石含 Na 很低, 均属含硬玉和霓石极低的钙镁铁辉石, 与壳源型榴辉岩的单斜辉石有显著区别。

4 形成条件估算

4.1 壳源型榴辉岩

(1) H 型榴辉岩

① Pyr—镁铝榴石; Spe—锰铝榴石; Gro—钙铝榴石; Alm—铁铝榴石; And—钙铁榴石; Ura—钙铬榴石; Ae—霓石; Jd—硬玉; Quad—钙镁铁辉石

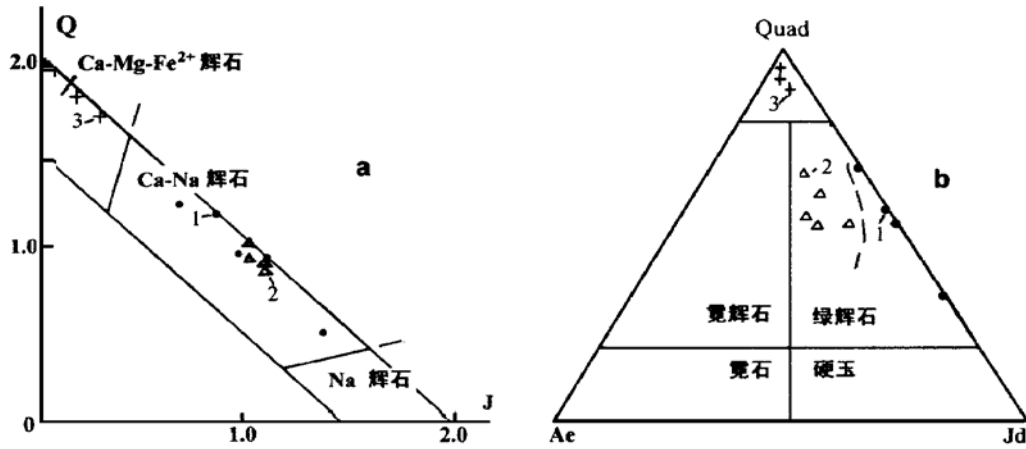


图5 苏北榴辉岩的单斜辉石分类图(据 Morimoto, 1988)

Fig. 5 Classification of clinopyroxenes from eclogites in northern Jiangsu (after Morimoto, 1988)

Quad—钙铁辉石; a 图中, $J = 2Na$, $Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$; b 图中, $Q = Wo + En + Fs$ 1—H 型榴辉岩; 2—U 型榴辉岩; 3—M 型榴辉岩

对含金石榴辉岩、石英榴辉岩、白云母榴辉岩、普通榴辉岩等的石榴石-单斜辉石矿物对电子探针分析结果(表1的1—5号),采用 Holland(1980)实验校正的单斜辉石硬玉分子地质压力计^[4]和 Ellis, Green(1979)的石榴石-单斜辉石矿物地质温度计^[5]进行估算:

$$T(^{\circ}C) = [3104 X_{Ca}^{Gr} + 3030 + 108.6 P(GPa)] / (\ln K_D + 1.9034) - 273$$

$$\text{其中 } X_{Ca}^{Gr} = [Ca / (Ca + Mg + Fe^{2+})]_{Gr}$$

$$K_D = (Fe^{2+} / Mg)_{Gr} / (Fe^{2+} / Mg)_{Cpx}$$

获得它们形成时的石榴石与单斜辉石之间的 $Fe^{2+} - Mg$ 分配系数 (K_D) 为 11.6—61.3, 温压条件为 355—595 °C 和 0.96—1.33 GPa (表 2)。根据干玄武岩类岩石转化为榴辉岩的最低压力的实验研究结果^[6], 1、2、5 号应是高压退变质榴辉岩。现依 3、4 号榴辉岩形成的压力条件,按一般的岩石圈密度模型^[7]换算获得其形成深度为 38—40 km。该深度在大陆地壳的一般结构^[8]中,相当于下地壳的范围。它代表一个近于 15 °C/km 的地热梯度,比中生代俯冲作用的地热梯度高,这可能与时代有关。Newton(1986)在《B 类和 C 类榴辉岩的变质温度和压力》一文中认为,前寒武纪的俯冲作用地热梯度可超过 16 °C/km。本区的沉积建造、岩浆活动、大地构造及其演化反映,在晋宁期苏北—胶南地体北部外侧存在洋壳沿其北缘海沟向南俯冲作用^[11],榴辉岩的晋宁期年龄组为晋宁期末花岗岩类所包裹(图 1— a)亦证明了这一点。因此,高压壳源型榴辉岩主要形成于晋宁期洋壳俯冲阶段低温高压变质条件下的下地壳。

(2) U 型榴辉岩

对含微粒金刚石(?)含柯石英榴辉岩、含柯石英及其假象榴辉岩、含柯石英蓝晶石榴辉岩等的石榴石-单斜辉石矿物对电子探针分析结果(表1的6—9号),采用 Bohlen 和 Boettcher(1982)石英-柯石英相平衡压力计^[9]、Bundy(1980)石墨-金刚石相平衡压力计^[10]及 Ellis 和 Green(1979)的石榴石-单斜辉石矿物对地质温度计^[5],估算获得它们形成

时的石榴石与单斜辉石之间的 $Fe^{2+} - Mg$ 分配系数 (K_D) 为 5.1—7.0, 温压条件为 860—970 °C 和 1.70—4.10 GPa (表 2)。根据柯石英出现最低压力的实验研究结果^[11], 7、8 号应是超高压退变质榴辉岩。现依 6、9 号榴辉岩形成的压力条件, 按一般的岩石圈密度模型^[7] 换算获得其形成深度为 86—120 km。该深度在大陆地壳的一般结构^[8] 中, 应相当于岩石圈的上地幔。它代表一个近 10 °C/km 的地热梯度, 与中生代俯冲作用的地热梯度接近。根据本区超高压榴辉岩的同位素年龄主要集中于印支期^[12], 结合大地构造及其演化^[11] 分析, 它们应形成于印支期胶北地体与苏北—胶南地体俯冲阶段。因此, 超高压壳源型榴辉岩主要形成于印支期陆内俯冲阶段高温超高压变质条件下的上地幔。

表 2 苏北榴辉岩形成条件估算表

Table 2 Estimated formation conditions of eclogites in northern Jiangsu

类型	序号	石榴石			单斜辉石		X_{Ca}^{Gr}	K_D	P (GPa)	T (°C)
		Mg	Fe^{2+}	Ca	Mg	Fe^{2+}				
H 型榴辉岩	1	0.395	1.589	0.862	0.462	0.109	0.3029	17.1	1.05	590
	2	0.606	1.664	0.459	0.558	0.075	0.1682	20.4	1.10	480
	3	0.692	1.457	0.647	0.406	0.060	0.2314	14.2	1.33	580
	4	1.072	1.305	0.582	0.401	0.042	0.1967	11.6	1.27	595
	5	0.932	1.434	0.591	0.438	0.071	0.1999	61.3	0.96	355
U 型榴辉岩	6	0.794	1.209	0.922	0.402	0.090	0.3152	6.8	2.87	860
	7	0.400	1.424	1.036	0.166	0.115	0.3622	5.1	2.17	970
	8	1.019	0.803	1.063	0.516	0.058	0.3685	7.0	1.70	860
	9	1.331	0.599	0.914	0.404	0.029	0.3214	6.3	4.10	920
M 型榴辉岩	10	2.093	0.147	0.696	0.996	0.020	0.2371	3.5	4.90	1089

4.2 M 型榴辉岩

对芝麻坊石榴石二辉橄榄岩中斜辉榴辉岩包体的石榴石—单斜辉石矿物对及斜方辉石电子探针分析结果, 采用 Brey 等(1986) 依据 CMAS 体系石榴石—辉石平衡的实验资料建立的斜方辉石矿物地质压力计^[13] 和 Ellis、Green(1979) 的石榴石—单斜辉石矿物地质温度计^[5]:

$$P(\times 0.1 \text{ GPa}) = 34.4 - 19.715 \ln X_{Al}^{M1} + 17.702 \ln X_{Ca}^{M2}$$

$$X_{Al}^{M1} = (Al + Cr + Na - 2Ti) / 2, X_{Ca}^{M2} = Ca$$

估算获得其形成时的石榴石与单斜辉石之间的 $Fe^{2+} - Mg$ 分配系数 (K_D) 为 3.5, 温压条件为 1089 °C 和 4.9 GPa (表 2)。据其压力条件, 按一般的岩石圈密度模型^[7] 换算获得其形成的深度为 150 km 左右。据 Gurney(1990) 研究, 刚性的岩石圈地幔之下是软流圈地幔, 两者之间的界线是一个不连续面, 这个边界的上下大约在地下 150—250 km 之间, 主要是含金刚石的橄榄岩类(石榴石斜辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩) 和榴辉岩^[14]。对芝麻坊石榴石二辉橄榄岩的斜方辉石电子探针分析结果, 采用 Brey 等(1986) 的斜方辉石矿物地质压力计^[13], 估算获得其形成压力为 5.6 GPa, 由此换算其形成深度为 170 km 左右。因此, 芝麻坊斜辉榴辉岩是芝麻坊石榴石二辉橄榄岩在上升过程中捕获的。芝麻坊石榴石二辉橄榄岩的同位素年龄为 $925 \pm 53 \text{ Ma}$ (单矿物, Sm—Nd 法)^[15], 因此, 芝麻坊斜辉榴辉岩的形成时代应早于上述年龄。它们可能是由于俯冲地体的刮带而一起折返, 最终剥露于现代侵蚀面的。

5 结论

(1) 苏北榴辉岩成因类型至少存在幔源型(M 型)、高压壳源型(H 型)和超高压壳源型(U 型)三类,前者与 Coleman 等(1965)划分的 A 型相当,后两者与 B 型和 C 型相当。

(2) H 型榴辉岩的石榴石具正生长环带;U 型榴辉岩含微粒金刚石(?)或柯石英及其假象,发育放射状胀裂结构,石榴石具正、反环带结构;M 型榴辉岩未发现环带结构和放射状胀裂结构。

(3) H 型榴辉岩的石榴石属铁铝榴石,单斜辉石属低硬玉绿辉石;U 型榴辉岩的石榴石属钙铝榴石,单斜辉石属高硬玉绿辉石;M 型榴辉岩的石榴石属镁铝榴石,单斜辉石属钙镁铁辉石。

(4) H 型榴辉岩 K_D 高,为 11.6—61.3,形成于晋宁期洋壳俯冲阶段低温高压变质条件下的下地壳;U 型榴辉岩 K_D 中等,为 5.1—7.0,形成于印支期陆壳俯冲阶段高温超高压变质条件下的上地幔;M 型榴辉岩 K_D 低,为 3.5,形成于晋宁期(或更早)高温超高压条件下的岩石圈与软流圈交界附近。

参 考 文 献

- 1 Jintao Fan. The Donghai ophiolite of the Jinning stage and the evolution of the Su- Jiao orogenic belt, North Jiangsu, China. *Progress in geology of China* (1993- 1996). Beijing: China Ocean Press, 1996, 132—137.
- 2 Hirajima T, Ishiwatari A, Cong B et al. Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai country, northeastern Jiangsu Province, China. *Mineralogical Magazine*, 1990, 54: 579—583.
- 3 Morimoto N et al. 著, 陈健译. 辉石的命名. *国外地质科技*, 1989, (3): 25—41.
- 4 Holland J J B. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600– 1200 °C. *A. Mineral.*, 1980, 65: 129—134.
- 5 Ellis D J and Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet- clinopyroxene Fe^{2+} - Mg exchange equilibria. *Cont. Mineral. Petrol.*, 1979, 71: 13—22.
- 6 Hyndman D W 著, 王方正等译. 火成岩与变质岩岩石学(上册). 武汉: 中国地质大学出版社, 1990: 147.
- 7 Anderson D L 著, 关华平等译. 地球的理论. 北京: 地震出版社, 1993: 60—61.
- 8 陈道公、支霞臣、杨海涛. 地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994.
- 9 Bohlen S R and Boettcher A L. The quartz- coesite transformation: a pressure determination and the effects of other components. *J. Geophys. Res.*, 1982, 87: 7073—7078.
- 10 Bundy F P. The P , T phase and reaction diagram for elemental carbon. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 6930—6936.
- 11 Schertl H P et al. The pyrope coesite rocks and their country rocks at Arigi, Dara Maira massif, Western Alps: detailed petrography, mineral chemistry and P - T path. *Cont. Mineral. Petrol.* 1991, 108: 1—21.
- 12 从柏林等. 中国苏北- 胶东南高压变质带的同位素地质年代学初探. 见: 中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室年报(1989—1990). 北京: 中国科学技术出版社, 68—72.
- 13 Brey D et al. Grnet- pyroxene equilibria in the system CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 (CMAS): Prospects for simplified (“ T ” independent) peridotite geobarometer and eclogite barometer. *Cont. Mineral. Petrol.*, 1986.
- 14 Guney J J. The diamondiferous roots of our wandering continent. *South African Journal of Geology*, 1990, 93(3).
- 15 白文吉、胡旭峰、周美付. 胶东- 苏北石榴石二辉橄榄岩形成条件及年代. *岩石矿物学杂志*, 1992, 11(4): 299—305.

Genetic Types and Formation Conditions of Eclogites in Northern Jiangsu

Fan Jintao, Cheng Zhenxiang

(Surveying Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 211135)

key words: eclogite; genetic type; mineral chemistry; Jiangsu

Abstract

The eclogites in northern Jiangsu have at least three types: high pressure crustal type (H_type), ultrahigh pressure crustal type (U_type) and mantle type (M_type). The eclogites of H_type were mainly formed in the lower crust through the low_temperature and high_pressure metamorphism of Jinning orogeny. The eclogites of U_type contain micrograined diamond, coesite and pseudocoesite and exhibit tension crack texture and normal or inverse zoning structure. The garnets consist mainly of grossular and the clinopyroxenes comprise chiefly omphacite of high jadeite, formed in the upper mantle under megatemperature and ultrahigh pressure of Indosinian orogeny. The garnets of M_type belong to pyrope mainly formed near the boundary between lithosphere and asthenosphere under the megatemperature and ultrahigh pressure of Jinning or earlier orogeny.