

苏鲁造山带中段宝山-桃行榴辉岩地球化学特征

朱学强¹, 王冠², 杨仕鹏¹

(1. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要 宝山-桃行榴辉岩呈透镜状包体赋存于荣成花岗质片麻岩套(Chgg)内, 通过榴辉岩主量元素地球化学、微量元素及稀土元素地球化学、石榴子石矿物化学分析, 确定榴辉岩原岩为壳成变质成因, 具有岛弧拉斑玄武岩(IAT)特征。宝山-桃行榴辉岩是其原岩与围岩一起经过高温高压变质作用而形成。

关键词 苏鲁造山带 榴辉岩 地球化学 岛弧拉斑玄武岩 宝山-桃行 山东省

GEOCHEMISTRY OF THE BAOSHAN-TAOXING ECLOGITE IN THE MIDDLE SECTION OF SULU OROGENIC BELT

ZHU Xue-qiang¹, WANG Guan², YANG Shi-peng¹

(1. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract :The Baoshan-Taoxing eclogite scatters in the granitic gneisses in the middle section of Sulu orogenic belt. With study on the major element, trace element and rare earth element geochemistry, as well as the mineral chemistry of garnet, it is concluded that the protolith of the eclogite is island arc tholeiite (IAT) derived from metamorphic crust and experienced HTP metamorphism along with its wall rock.

Key words :Sulu orogenic belt; eclogite; geochemistry; island arc tholeiite; Baoshan-Taoxing

0 引言

榴辉岩是在高压—超高压环境中形成的, 一般产于大的造山带, 其独特的形成环境及地质产状, 对大地构造、地壳演化及地球动力学等地球科学重大问题的研究有重要意义^[1]。苏鲁高压、超高压变质带(苏鲁造山带)是秦岭—大别—苏鲁高压—超高压变质带的重要组成部分, 是夹持于华北与扬子板块之间的碰撞造山带^[2], 是以广泛分布的花岗质片麻岩为主体的区域变质带。苏鲁造山带内榴辉岩广泛发育以及榴辉岩中柯石英、金刚石等的发现, 使榴辉岩的研究备受关注, 包括其分布及产状、岩相及矿物、同位素年代和成因等研究内容。关于榴辉岩的原岩及成因类型, 主要观点如下。

(1) 原地变质模式: 榴辉岩与围岩花岗质片麻岩

一起经过高温高压变质作用而形成^[3-4](Brghni, 1970; Graffin et al., 1985; 刘晓春, 1996)。

观点①: 榴辉岩是斜长角闪岩原岩经 42% 的部分熔融形成荣成片麻岩套的相应的残留体^[5]。

观点②: 来自胶南表壳岩部分熔融形成的荣成片麻岩套原岩与表壳岩、基性岩(榴辉岩的原岩)一起俯冲进入上地幔, 经历了超高压变质作用形成^[6]。

观点③: 榴辉岩与围岩是共生关系, 榴辉岩折返到地壳某一部位时与围岩相伴生, 围岩从深部喷出或侵位, 榴辉岩相对于围岩是原地的^[7]。

(2) 外来挤入模式: 榴辉岩形成于上地幔(Lappin 和 Smith, 1978, 1981; 丛柏林, 1999)或其他源区之后在构造变动过程中挤入到片麻岩中^[4]。

观点④: 东海榴辉岩是洋脊玄武岩及堆积镁铁岩

收稿日期: 2012-03-14; 修回日期: 2012-05-04; 编辑: 李兰英。

作者简介: 朱学强(1983—), 男, 硕士, 从事区域地质调查研究, 通信地址: 山东省济南市建筑新村南路 35 号, E-mail://dongbeiqiang1983@163.com

在俯冲消减过程中形成的,遭受强烈破碎,被挤压到东海群下部不同构造层位中,是外来的被肢解的蛇绿岩套^[8]。

对于榴辉岩的原岩,多数研究者认为可能以俯冲的陆壳为主,或既有陆壳也有洋壳物质,两者相混杂^[9]。

苏鲁造山带内榴辉岩主要有 3 种产状类型,即似层状榴辉岩、脉状榴辉岩、块状及透镜状榴辉岩。其围岩岩性亦存在着较大的差别,包括不同造山期的花岗质片麻岩、变质地层及变质基性、超基性岩等,因此,有必要对同一大地构造位置具有相同围岩性质的榴辉岩进行限制性条件研究。

1 榴辉岩的地质特征

苏鲁造山带榴辉岩大致由 4 条次级榴辉岩带组成,分别是:荣成-威海榴辉岩带、桃行-尚庄榴辉岩带、板泉-岚山头榴辉岩带及东海-城头榴辉岩带^[10]。研究区主要位于桃行-尚庄榴辉岩带的宝山-桃行一带,并且集中分布于宝山、崔家沟及桃行 3 处(图 1),反映了榴辉岩的分布密集性特点。

榴辉岩由石榴石(50%)、单斜辉石(45%)、石英(5%)和少量金红石组成,呈透镜状包体赋存于荣成花岗质片麻岩套(Chgg)内,表现为与大型韧性变形带相伴,并基本平行五莲断裂产出,部分地区(如宝山地区)榴辉岩沿花岗片麻岩穹隆构造呈环带状产出。榴辉岩的规模大小不一,一般长数十厘米至数百米,宽数厘米至数十米,边部一般有薄的角闪质或云母质退变边。普遍遭受过强烈变形作用,透镜体的长轴多与围岩片麻理平行并一起变形,反映它们经历了共同的高温高压变质作用和晚期退变质历史。

2 主量元素地球化学特征

王台、桃行、崔家沟 9 件榴辉岩的化学成分分析结果(表 1)显示,榴辉岩主要氧化物的变化范围为:SiO₂ 42.69%~49.2%,MgO 5.51%~7.85%,Al₂O₃ 13.17%~20.15%,P₂O₅ 0.05%~1.13%,K₂O 0.11%~1.88%,Na₂O 1.84%~3.84%,CaO 8.78%~10.9%,TiO₂ 0.28%~2.62%,MnO 0.16%~0.36%,<FeO> 10.28%~17.15%。榴辉岩的总体化学成分与辉长岩、玄武岩相当。

根据前人通过地质产状、岩石化学组成、矿物组成

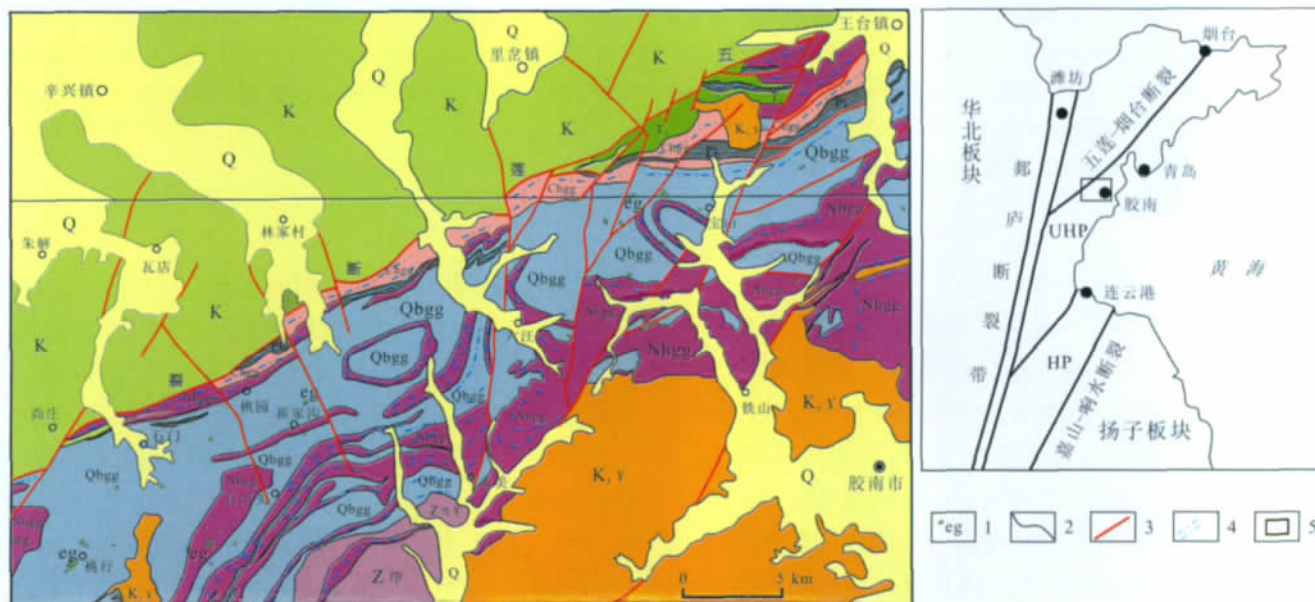


图 1 宝山-桃行地区地质图

Fig. 1 Geologic map of Baoshan-Taoping area

Q—第四系冲洪积沉积物(Quaternary alluvium-proluvium);K—白垩系陆相碎屑岩、火山碎屑岩、火山岩(Cretaceous continental clastic rocks and volcanic rocks);K_γ—早白垩世花岗岩类侵入体(E. Cretaceous granitoid intrusion);T₃—晚三叠世闪长岩类侵入体(L. Cretaceous dioritoid intrusion);Zγγ—震旦系二长花岗岩类侵入体(Sinian monzogranitoid intrusion);Nhgg—新元古代中粒含角闪二长花岗质片麻岩(Neoproterozoic amphibole-bearing monzogranitic gneiss);Qbgg—新元古代中细粒含黑云二长花岗质片麻岩(Neoproterozoic biotite-bearing monzogranitic gneiss);Chgg—中元古代变质变形的辉长岩-闪长岩-斜长花岗岩(Mesoproterozoic gabbro-diorite-plagiogranite);Pt—中元古界胶南表壳岩(Mesoproterozoic supracrustal rock);UHP—超高压变质带(ultrahigh pressure belt);HP—高压变质带(high pressure belt);1—榴辉岩(eclogite);2—地质界线(geologic boundary);3—断裂构造(fault);4—韧性变形带(ductile deformation zone);5—研究区(studied area)

表 1 榴辉岩化学成分表

Table 1 Major element composition of eclogites from Baoshan-Taoxing area

地点	王台	桃行			崔家沟				
编号	CY01b1	CY02b1	CY03b1	CY04b1	CY04b2	CY05b1	CY05b2	CY06b1	CY06b2
SiO ₂	49.2	46.66	47.81	47.84	45.15	42.69	46.41	47.52	47.5
TiO ₂	1.14	0.28	0.44	1.46	2.62	0.84	0.85	0.99	0.71
Al ₂ O ₃	16.9	15.14	16.87	15.01	13.17	20.15	17.19	15.68	17.94
Fe ₂ O ₃	4.7	3.48	4.05	6.39	7.1	2.69	2.12	3.27	1.69
FeO	5.58	7.82	10.22	5.75	10.05	11.87	12.24	7.89	12.84
MnO	0.18	0.24	0.25	0.22	0.31	0.25	0.36	0.16	0.29
MgO	6.47	7.47	6.43	6.29	5.8	5.51	7.16	7.84	6.71
CaO	9.08	10.39	10.29	8.78	10.06	10.9	10.29	10.78	9.73
Na ₂ O	2	3.84	2.32	2.93	3.02	2.39	2.87	2.3	1.84
K ₂ O	1.88	0.55	0.18	1.16	0.86	0.33	0.11	0.61	0.14
P ₂ O ₅	0.22	0.24	0.05	0.24	0.29	1.13	0.21	0.17	0.09
CO ₂	0.1	0.14	0.65	3.57	1.34	1.09	0.44	2.33	0.11
灼失	2.67								
合计	100.2	99.99	99.78	99.72	99.72	99.94	100.25	99.54	99.59

含量单位 :%.

等的分类原则 ,区内榴辉岩分类如下.

1)R. G. Coleman(1965)根据地质产状和岩石化学组成将榴辉岩分为 A、B、C 三大类 ,区内榴辉岩属 C 类 (SiO₂=48% ,Mg=6%)榴辉岩 ,为与蓝闪石片岩有关的榴辉岩 ,也是与碰撞造山有关的榴辉岩.

2)张泽明等^[11]根据不同的矿物组成和不同的全

岩化学成分 ,将榴辉岩划分为高硅型(SiO₂≥50%)、高铝型(Al₂O₃≥17%)、高钛型(TiO₂≥2.1%)、高钛铁型(TiO₂≥2.1% ,<FeO>≥15.5%)、高镁型(MgO≥12%)和正常型榴辉岩^[11]. 区内榴辉岩除 CY04b2 属高钛铁型 ,CY05b1 属高铝型外 ,其余均属于正常型榴辉岩.

3)根据榴辉岩内石榴石单元组分(表 2)进行判别

表 2 榴辉岩中石榴子石化学成分表

Table 2 Compositions of garnet in eclogites from Baoshan-Taoxing area

地点	尚庄						石河头		
编号	CY07b1	CY07b1	CY08b1	CY08b1	CY08b1	CY08b1	CY04b2	CY09b1	CY10b1
SiO ₂	37.08	37.4	37.69	37.15	37.42	37.05	39.08	39.82	38.8
TiO ₂	微量	0.26	微量	微量	微量	微量	0.18	0.07	0.06(K ₂ O)
Al ₂ O ₃	20.5	20.31	20.83	20.86	21.04	21.08	22.31	22.85	21.79
<FeO>	25.78	25.19	25.49	26.28	24.78	25.42	20.98	18.31	25.53
MnO			微量	0.64	0.42	0.2	0.34	0.2	0.38
MgO	3.78	3.69	4.57	4.04	4.6	4.48	5.67	10.02	6.1
CaO	12.41	12.4	10.88	10.88	11.31	11.35	11.17	8.25	8.68
Na ₂ O	微量		微量	微量	0.17	0.38	0.14	0.18	0.37
总和	99.55	99.26	99.47	99.85	99.74	99.97	99.87	99.7	99.71
Pyp	15.2	14.6	18.1	16.2	18.6	18.7	22.1	38.1	24.4
Ald	49	50.1	51	51	47.5	46.7	45.9	38.9	49.7
Spe	0	0	0	1.5	1	0.5	0.8	0.4	0.9
Gro	17.6	23.4	19.9	15.1	15.2	8.2	31.3	22.1	18.7
Anr	18.2	11.9	11	16.2	17.7	25.9	0	0.4	6.3

含量单位 :%.

图解(图2)投影,所有样品均位于B类榴辉岩区或B类与C类的重叠区,即在片麻岩中呈夹层或透镜体产出的榴辉岩。

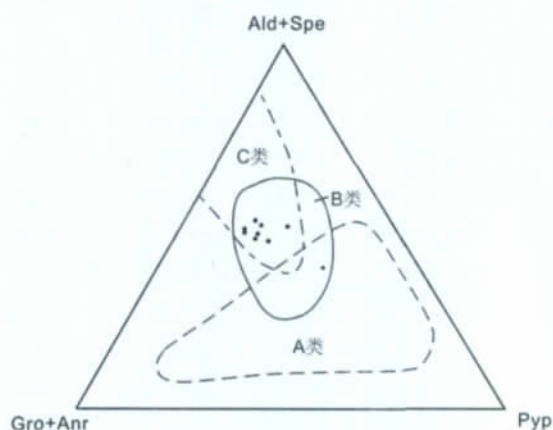


图2 榴辉岩中石榴子石的成分图解

Fig. 2 Garnet composition plot of eclogite

A类为金伯利岩或玄武岩中的包体及超基性岩层状体中的榴辉岩;B类为在片麻岩中呈夹层或透镜体的榴辉岩;C类为在阿尔卑斯变质岩层中呈夹层或透镜体的榴辉岩

图3大致表示了榴辉岩与其可能原岩类型,TAS图解中使用了较活跃的碱性元素,用这个图解给出的榴辉岩原岩类型仅作为参考,该图显示榴辉岩的化学成分与玄武岩相当。王来明等^[10]推测了榴辉岩的5种成因类型,其中产于正片麻岩中的榴辉岩,其原岩可能为一套具有大陆裂谷特征双峰式岩浆岩中的基性岩部分,也可能是酸性侵入岩中的基性岩包体。而产于正片

麻岩中的高钛铁型榴辉岩,其原岩可能是孤立的富钛铁辉长岩侵入体。

在 SiO_2 - FeO/MgO 变异图解和AFM三角图解(图4)中,研究区榴辉岩均投点于拉斑玄武岩系列区。

在 $\text{MgO}-\langle\text{FeO}\rangle-\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ 图解(图5)中,榴辉岩基本上投点于大陆玄武岩区,少量投于大陆玄武岩及大洋玄武岩区交界附近。

在 $\text{TiO}_2-\text{MnO}\times 10-\text{P}_2\text{O}_5\times 10$ 图解(图6)中,研究区榴辉岩投点主要分布于岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩(岛弧)系列区。在 $\langle\text{FeO}\rangle/\text{MgO}-\text{TiO}_2$ 图解(图7)中,榴辉岩主要投点于岛弧拉斑玄武岩区,仅有2个样品投影于洋中脊拉斑玄武岩区。

综合F1-F2及F2-F3图解(图8),研究区榴辉岩投点主要位于岛弧拉斑玄武岩区。

上述图解均显示榴辉岩的原岩为拉斑玄武岩系列。

在 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\langle\text{FeO}\rangle-\text{MgO}$ 及 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{MgO}$ 图解中(图9),研究区榴辉岩分别投点于蛇绿岩套辉长岩区及镁铁堆积岩区。李曙光等^[12]根据榴辉岩投点于拉斑玄武岩系列区的岩石化学特点,将榴辉岩与大洋玄武岩或蛇绿岩联系起来,认为它们是蛇绿混杂岩,并进一步推断它们属俯冲洋壳。但由于大多数造山带的蛇绿岩的岩石学和地球化学特征都类似于岛弧拉斑玄武岩,而不同于现代大洋中脊玄武岩^[13],并且蛇绿岩在REE分布上多是LREE亏损型。对比研究区稀土配分模式,表明研究区榴辉岩并不属于蛇绿混杂岩范

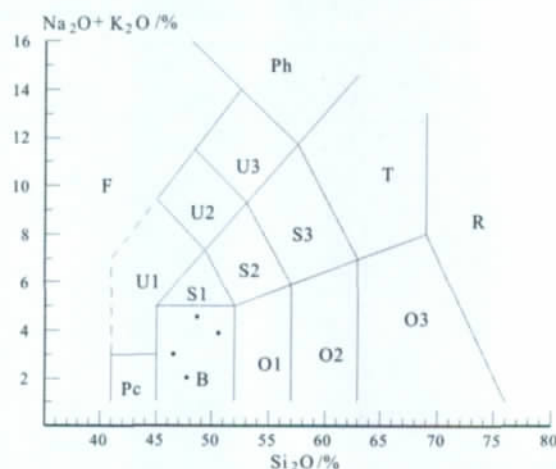
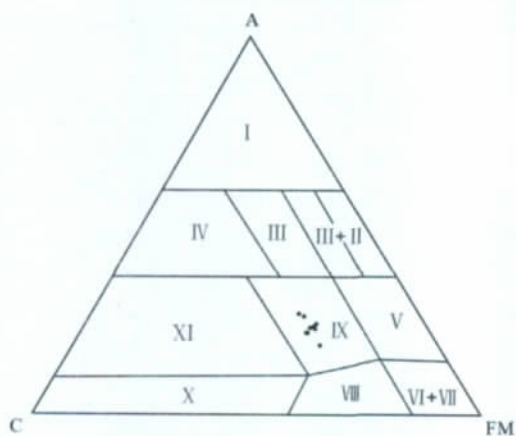


图3 榴辉岩A-C-FM图解(左,据谢年科,1966)和TAS图解($\text{CO}_2<0.5\%$)(右,据Le Bas,1986)

Fig. 3 A-C-FM diagram (left, after N. L. Semenko, 1966) and TAS diagram of eclogite (right, after Le Bas, 1986)

I—富铝的黏土岩及酸性火山岩;II—黏土岩及亚杂砂岩;III—中性及碱性火山岩和杂砂岩;IV—长石砂岩;V—凝灰质粉砂岩;VI—硅铁质沉积岩;VII、VIII—超基性岩;IX—基性火山岩及铁质白云质泥灰岩;X—钙质碳酸盐岩;XI—钙硅酸盐岩及石英岩;F—副长石岩;Pc—苦橄玄武岩;B—玄武岩;O1—玄武安山岩;O2—安山岩;O3—英安岩;R—流纹岩;S1—粗面玄武岩;S2—玄武质粗面安山岩;S3—粗面安山岩;T—粗面岩、粗面英安岩;U1—碱玄武岩、碧玄武岩;U2—响岩质碱玄武岩;U3—碱玄武岩;Ph—响岩

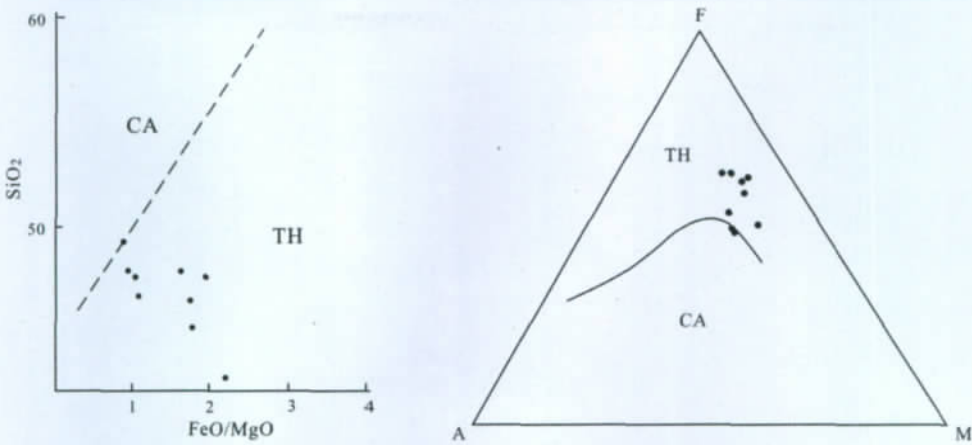


图 4 榴辉岩 SiO_2 - FeO/MgO 变异图解(左)和 AFM 图解(右, 据 T. N. Irvine, 1971)

Fig. 4 SiO_2 - FeO/MgO diagram (left) and AFM diagram (right, after T. N. Irvine, 1971) of eclogite
CA—钙碱性火山岩系列; TH—拉斑玄武岩系列

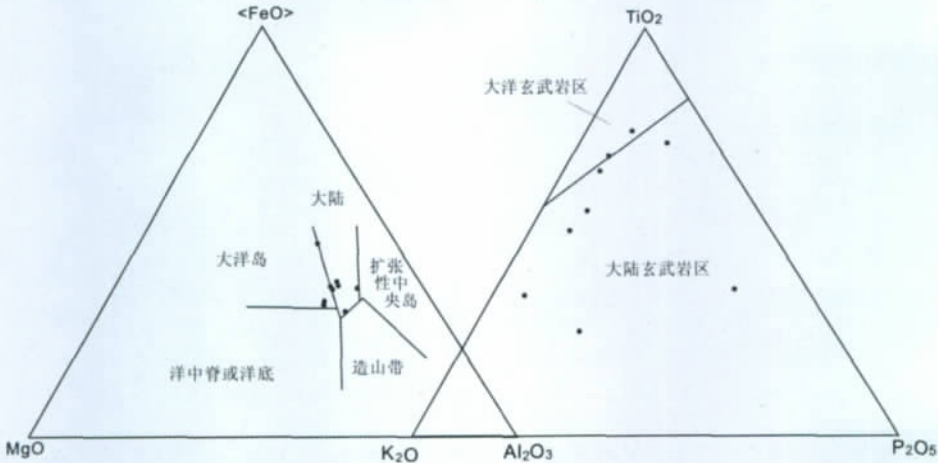


图 5 榴辉岩 MgO - $\langle\text{FeO}\rangle$ - Al_2O_3 和 K_2O - TiO_2 - P_2O_5 图解

Fig. 5 MgO - $\langle\text{FeO}\rangle$ - Al_2O_3 and K_2O - TiO_2 - P_2O_5 diagrams of eclogite

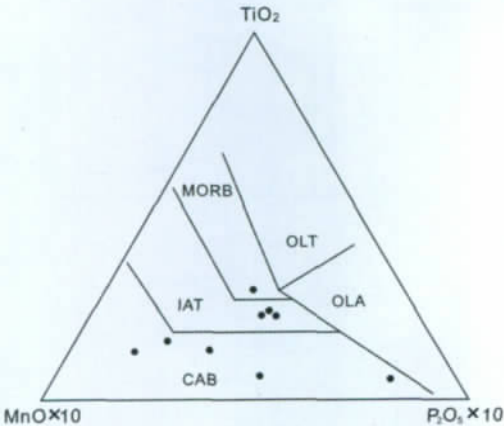


图 6 榴辉岩的 TiO_2 - MnO - P_2O_5 相关性图解
(据 Calenman, 1983)

Fig. 6 TiO_2 - MnO - P_2O_5 diagram of eclogite
(after Calenman, 1983)

CAB—钙碱性玄武岩(岛弧); IAT—岛弧拉斑玄武岩; OLT—洋岛拉斑玄武岩; OLA—洋岛碱性玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩

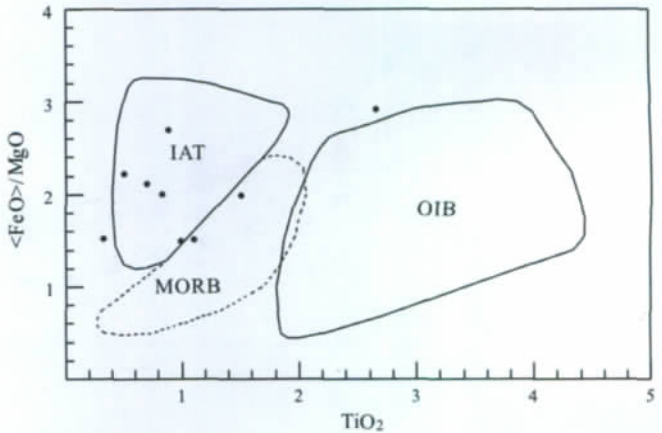


图 7 榴辉岩的 $\langle\text{FeO}\rangle/\text{MgO}$ - TiO_2 图解
(据 Glassily, 1974)

Fig. 7 $\langle\text{FeO}\rangle/\text{MgO}$ - TiO_2 diagram of eclogite
(after Glassily, 1974)

MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩

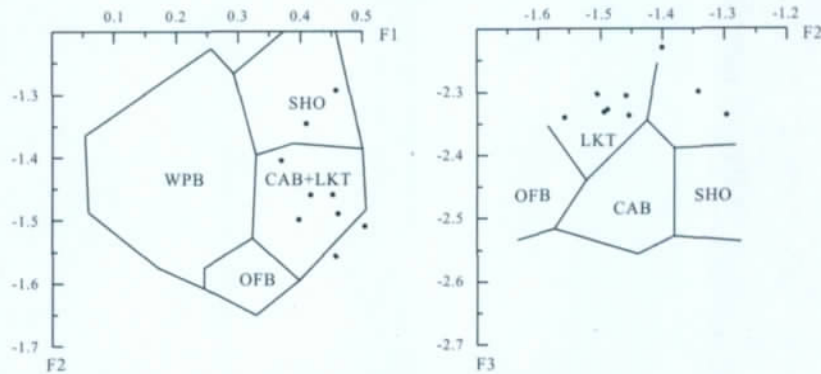


图 8 榴辉岩的 F1-F2-F3 图解
(据 J. K. Pearce, 1976)

Fig. 8 F1-F2-F3 diagram of eclogite
(after J. K. Pearce, 1976)

WPB—板块内玄武岩; OFB—大洋底玄武岩; LKT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱质玄武岩; SHO—钾玄岩

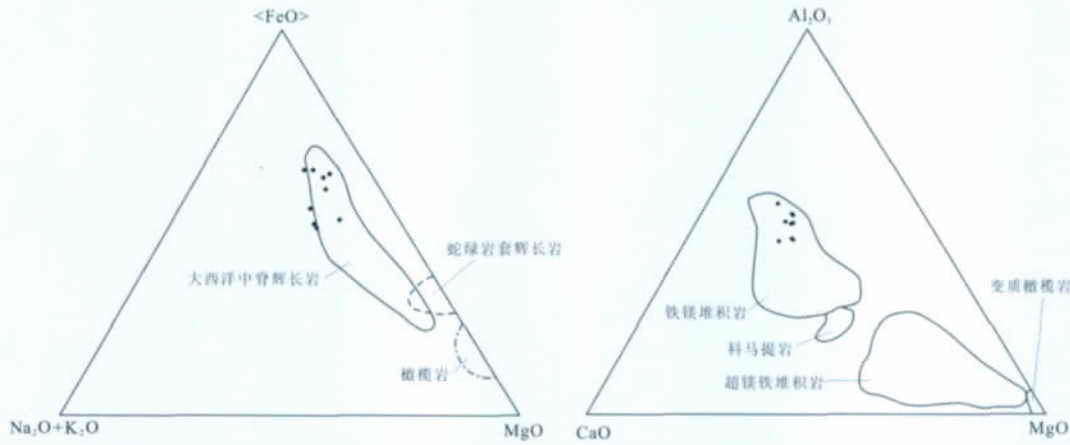


图 9 榴辉岩的 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - FeO - MgO 图解(左, 据 Moltana 和 Bolch, 1975)和 Al_2O_3 - CaO - MgO 图解(右)

Fig. 9 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - FeO - MgO diagram (left, after Moltana and Bolch, 1975) and Al_2O_3 - CaO - MgO diagram (right) of eclogite

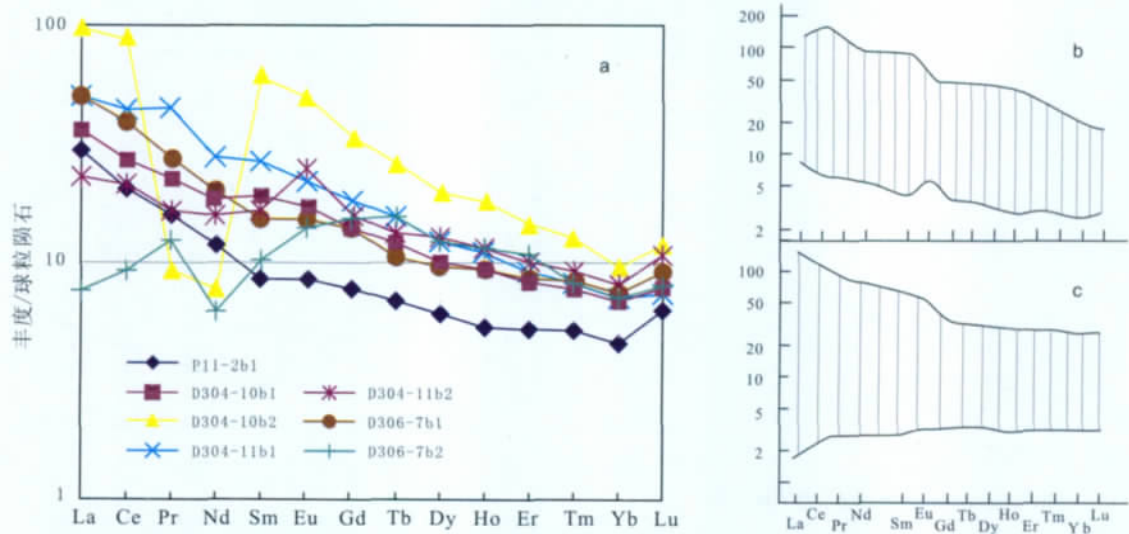


图 10 榴辉岩稀土元素配分模式(a)及大陆(b)和岛弧(c)拉斑玄武岩的稀土分布模式图
(b, c 据 Cullers 和 Graf, 1984)

Fig. 10 REE distribution patterns of eclogite (a) and continental (b) and island arc tholeiite (c)
(b and c after Cullers and Graf, 1984)

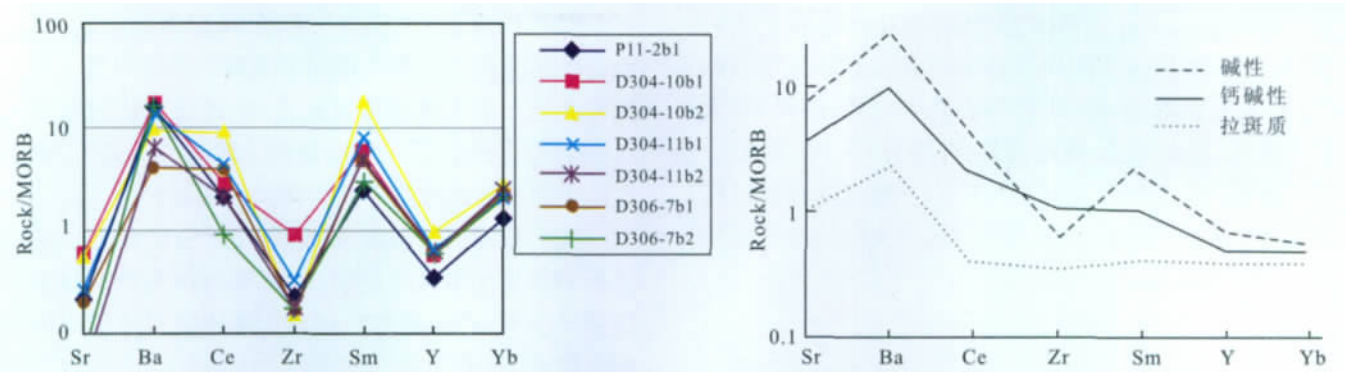


图 11 榴辉岩微量元素标准化图解(左)和火山弧玄武岩标准化图解(右,据 Pearce et al., 1982)

Fig. 11 N-MORB normalized trace element distribution pattern of eclogite (left) and volcanic arc basalt (right, after Pearce et al., 1982)

围,而且进一步说明了榴辉岩的原岩属岛弧拉斑玄武岩系列.

3 稀土及微量元素地球化学

稀土元素(REE)在榴辉岩相变质作用过程中是稳

表 3 榴辉岩稀土元素含量及相关参数

Table 3 REE contents and parameters of eclogites from Baoshan-Taoxing area

地点	桃行		崔家沟					
编号	CY02b1	CY04b1	CY04b2	CY05b1	CY05b2	CY06b1	CY06b2	
La	9.2	11.2	30.4	15.6	7.2	15.8	2.44	
Ce	16.8	22	72.2	36	17.2	32.2	7.6	
Pr	2	2.8	1.14	5.6	2	3.4	1.56	
Nd	7.2	11.6	4.64	16.8	9.6	12.2	3.8	
Sm	1.7	3.8	11.9	5.3	3.3	3.07	2.03	
Eu	0.64	1.31	3.72	1.64	1.83	1.14	1.06	
Gd	2.05	3.6	8.8	4.8	4.22	3.72	4	
Tb	0.33	0.58	1.27	0.76	0.66	0.52	0.76	
Dy	2	3.19	6.43	4	4.13	3.22	4.01	
Ho	0.39	0.68	1.3	0.8	0.83	0.69	0.84	
Er	1.12	1.78	3.1	1.95	2.15	1.85	2.3	
Tm	0.17	0.26	0.42	0.27	0.3	0.28	0.27	
Yb	0.98	1.49	2.05	1.51	1.7	1.57	1.5	
Lu	0.21	0.26	0.41	0.25	0.36	0.31	0.27	
Y	10.7	17.2	30.2	20.1	21.6	17.6	18.8	
ΣREE	55.58	81.75	229.99	115.42	76.58	97.56	51.47	
LREE	37.63	52.71	176.02	80.94	40.63	67.81	18.76	
HREE	7.25	11.84	23.78	14.38	14.75	12.16	13.92	
LREE/ HREE	5.19	4.45	7.4	5.63	2.83	5.58	1.35	
δEu	1.02	1.07	1.07	0.98	0.92	1.03	1.04	
La _N /Sm _N	3.23	1.85	1.61	1.85	1.37	3.24	0.67	
Gd _N /Yb _N	6.23	5.07	10	6.97	3.09	6.79	1.1	
La _N /Yb _N	1.69	1.95	3.45	2.57	2	5.91	2.15	

稀土元素含量单位 :10⁻⁶.

定的,不活动的^[14]. 宝山-桃行榴辉岩稀土元素和微量元素分析结果列于表 3、4.

宝山-桃行榴辉岩稀土含量(表 3)变化范围较宽, ΣREE=51.47×10⁻⁶~115.42×10⁻⁶, ΣLREE/ΣHREE=1.35~5.63, (La/Yb)_N=1.69~5.91, δEu=1.02~1.07, Eu/Sm 值在 0.3~0.55 之间,与玄武岩的 Eu/Sm 相当. 稀土元素配分模式图 10a 中可见,除 CY04b2 样品外,其余均表现为轻稀土富集,重稀土亏损,无明显正铕异常的右倾曲线,与大陆和岛弧拉斑玄武岩的球粒陨石稀土配分曲线(图 10b、c)相比较,可以看出,研究区榴辉岩的稀土配分曲线形式接近于岛弧和弧后盆地拉斑玄武岩的轻稀土富集型稀土右倾配分曲线.

表 4 榴辉岩微量元素分析结果表

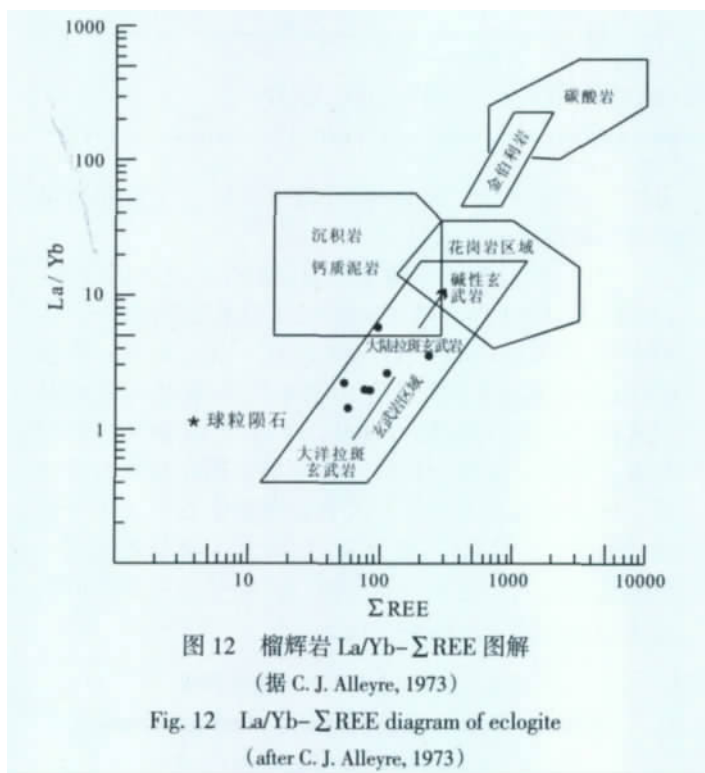
Table 4 Trace element contents of eclogites from Baoshan-Taoxing area

地点	桃行			崔家沟					
编号	CY02b1	CY03b1	CY04b1	CY04b2	CY05b1	CY05b2	CY06b1	CY06b2	
Sr	27.3	81.5	76.5	72.5	34.2	5.63	23.4	8.08	
Ba	328	544	347	201	263	128.8	80.3	319	
Cr	22.7	3.42	22.9	8.99	6.62	11.8	28.1	24.7	
Zr	20.9	22.8	82.9	14.58	29.7	15.07	15.48	16.38	
Mn	1293	926	625	1260	1545	1696	722	2140	
Be	4.18	0.98	6.16	2.93	2.28	6.77	4.62	2.57	
As	4.45	1.5	5.36	1.5	1.5	119.1	6.37	3.1	
Pb	1.63	0.45	1.45	4.21	1.52	13.1	11.3	1.25	
Sn	1.55	0.72	1.22	1.22	1.22	1.4	2.41	1.63	
Cu	432	218	6.6	67.5	97.5	414	6.97	159.6	
Zn	24.4	27.9	25.6	17.1	15.27	381	18.3	31.7	
Au	0.75	0.29	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.15	
Ag	40	20	30	30	30	60	50	40	
Ni	28.9	17.4	11.76	4.48	11.59	5.64	6.03	37.3	
Co	19.19	8.92	5.18	4.03	2.72	3.86	2.63	27.7	
Mo	4.44	6.25	3.16	3.77	5.69	2.88	2.98	6.07	

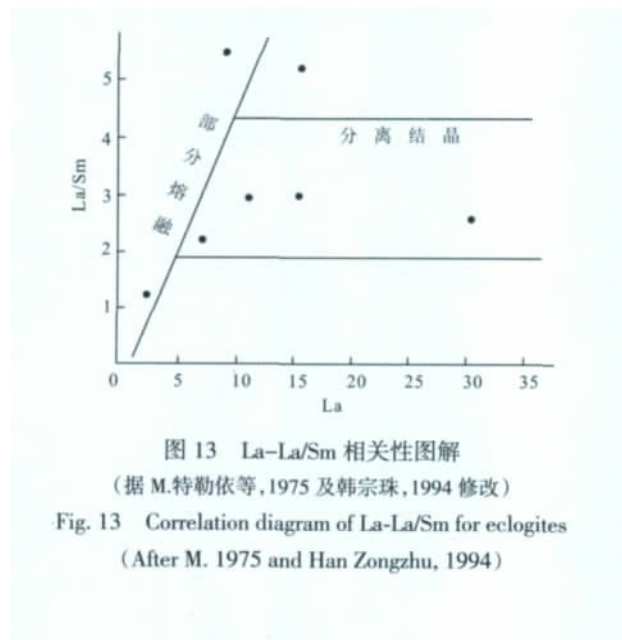
含量单位 :Au、Ag 为 10⁻⁹,其余为 10⁻⁶.

对比 Pearce et al.(1982) 用标准化洋中脊玄武岩 (MORB) 标准化的不同构造环境玄武岩地球化学图解 (图 11), 可以看出研究区榴辉岩具火山弧 (岛弧) 型玄武岩特点, 表现为 Ba 强烈富集, 并伴有 Ce、Sm 富集。

在 La/Yb- Σ REE 图解 (图 12) 上, 也可以看出榴辉岩投点主要落于大陆拉斑玄武岩区及大陆拉斑玄武岩与大洋拉斑玄武岩的过渡区。

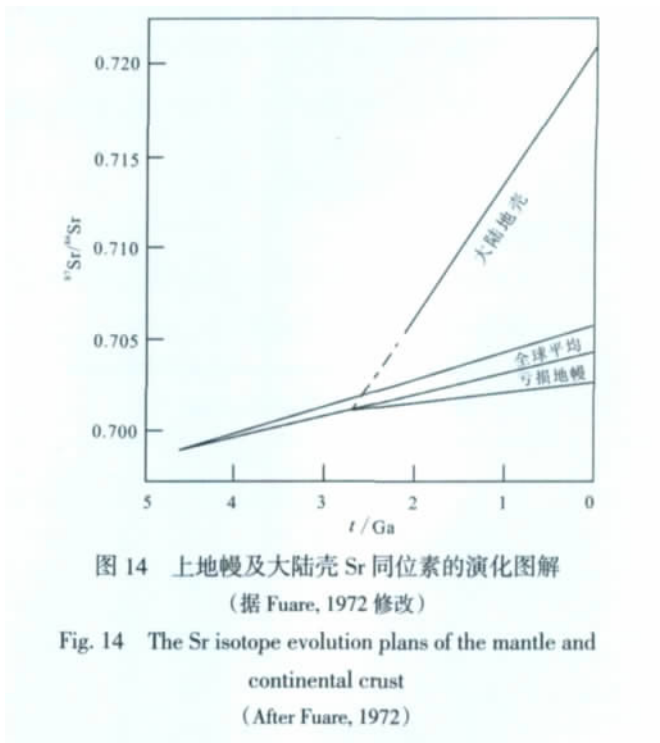


从 La-La/Sm 相关性图解中 (图 13), 大部分榴辉岩沿分离结晶趋势线分布, 可以解释成基性岩浆经分离结晶后残余岩浆冷凝物质经高压变质而成, 属岩浆晚期分异的产物。由于 TH 系列的形成与橄榄石的分



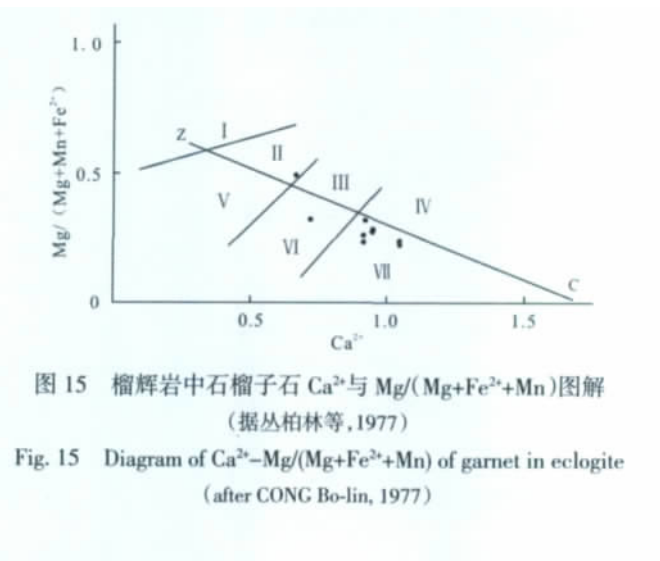
离结晶作用有关^[15], 同时大陆玄武岩不是原始岩浆, 而是低压分离的结果, 说明了榴辉岩的原岩属大陆拉斑玄武岩而非大洋拉斑玄武岩。并且通常认为双峰式火山岩的玄武岩端元是地幔部分熔融的产物^[16]。因此也说明榴辉岩的原岩不具双峰式火山岩特点。

利用锶同位素组成, 特别是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值探讨岩石的物质来源被广泛引用。诸城石河头锶同位素分析结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.707383\pm 47$, 其比值与地壳成因榴辉岩接近 (图 14)。



4 石榴子石矿物化学

在石榴子石的 Ca^{2+} 与 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ 相关性判别图解 (图 15) 中, 研究区榴辉岩大部分投点位于 ZC 线下方的壳成蓝闪石片岩相榴辉岩区。



5 讨论

综合宝山-桃行榴辉岩的岩石化学、地球化学特征和石榴子石矿物化学特征, 均显示榴辉岩原岩为壳成变质成因的, 具有岛弧拉斑玄武岩(IAT)特征, 表明这些榴辉岩可能形成于岛弧环境. 这进一步说明了榴辉岩是板块俯冲-折返作用的结果.

刘福来^[17]通过激光显微拉曼光谱探测, 在东海大陆科学钻探岩心样品中, 除后期侵入的花岗岩之外, 所有正副片麻岩在锆石示踪都发现柯石英. 刘景波等^[18]对大别苏鲁超高压变质带中的各类区域片麻岩锆石包裹体研究也得到同样的结论, 从而证明了大别-苏鲁超高压变质岩整体经历了深俯冲作用.

研究区榴辉岩同样与其围岩荣成片麻岩套共同经历了同样的高温高压变质作用、变形作用及退变质作用. 荣成片麻岩套(Chgg)属同造山花岗岩(王来明, 2004), 同造山运动花岗岩含有丰富的基性包体^[19]. 因此认为宝山-桃行榴辉岩是其原岩与围岩一起经过高温高压变质作用形成的.

参考文献:

- [1]李钟模. 中国榴辉岩的研究已为国际地学界瞩目[J]. 地球, 2005, 5: 3—4.
- [2]马杏垣. 江苏响水至内蒙满都拉地学断面南北两段的地质观察[J]. 地球科学, 1989, 14(1): 1—7.
- [3]张儒缓, 从柏林, 刘忠光. 苏鲁超高压变质地体及其成因解释[J]. 岩石学报, 1993, 9(3): 21—22.
- [4]苏尚国, 顾德林, 张春林. 山东诸城地区榴辉岩成因岩石学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(1): 33—43.
- [5]宋明春, 王来明, 王兰中, 等. 鲁东荣成片麻岩套及其成因[J]. 山东地质, 1995, 11(2): 32—44.
- [6]宋明春, 韩景敏, 官述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据: 新元古代多成因花岗质片麻岩[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 22—32.
- [7]宋明春, 金振民, 赵庆玲, 等. 山东莒南-日照地区榴辉岩与围岩的接触关系及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2004, 24(2): 1—5.
- [8]樊金涛. 苏北海榴辉岩地球化学及原岩成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(1): 26—35.
- [9]卢良兆, 林强, 刘招君. 成因岩石学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004: 383.
- [10]王来明, 宋明春, 王沛成, 等. 苏鲁超高压变质带的结构与演化[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 52—67.
- [11]张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100—2050 m)榴辉岩岩石化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 27—42.
- [12]李曙光, 刘德良, 葛宁浩, 等. 青岛榴辉岩相蛇绿混杂岩——俯冲“洋壳”推覆体的发现及意义[J]. 科学通报, 1991, 36(15): 1161—1164.
- [13]张旗. 蛇绿岩研究中的几个问题[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 228—240.
- [14]Shatky V S, Kozmenko O A, Sobolev N V. Behaviour of rare earth elements during high-pressure metamorphism [J]. Lithos, 1990, 25: 219—226.
- [15]邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392—402.
- [16]张旗, 钱青, 王焰. 造山带火成岩地球化学研究. 地学前缘, 1999, 6(3): 113—120.
- [17]刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国苏北预先导孔 CCSD-PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及超高压变质作用的证据 [J]. 科学通报, 2001, 46(3): 241—246.
- [18]刘景波, 叶凯, 丛柏林, 等. 大别超高压带片麻岩锆石中柯石英包裹体[J]. 科学通报, 2001, 46(13): 1124—1127.
- [19]都城秋穗. 变质作用与变质带[M]. 周云生, 译. 北京: 地质出版社, 1979: 86.