地质・矿床

辽东硼矿区层状混合岩的地质地球化学 特征及其成因探讨*

张艳飞^{1,2},刘敬党^{1,2},付艳春²,李剑锋²,张建华²,何芳军²

(1. 辽宁工程技术大学, 阜新 123000; 2. 辽宁省化工地质勘查院, 锦州 121000)

[摘 要] 辽东硼矿区层状混合岩为含硼岩系的一个重要组成部分,与各种变粒岩和浅粒岩呈整合 接触而呈层状展布,在岩性上有过度现象。岩石中交代结构发育;与变质围岩相比,混合岩的 SiO₂、 K₂O、Na₂O 等组分均明显增加,而 Fe₂O₃+FeO、CaO、MgO、MnO 等组分明显减少,K₂O/Na₂O 变化较复杂, 岩石化学成分的变化与交代作用有关;微量元素具有与围岩相似的特征,稀土元素含量高于围岩,稀土 元素配分模式与变粒岩一致,具有典型的重熔特征。这些特征表明层状混合岩是变质围岩经选择重熔 交代而形成的。

[关键词]层状混合岩 辽东硼矿区 岩石成因 重熔交代 [中图分类号]P622.3 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2009)05-0549-09

Zhang Yan-fei, Liu Jing-dang, Fu Yan-chun, Li Jian-feng, Zhang Jian-hua, He Fang-jun. Study on the genesis and geological and geochemical characteristics of layered migmatites in East Liaoning, China[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(5):549–557.

0 引言

辽东硼矿区层状混合岩,常常表现为重熔和选 择重熔的特点,程裕淇称之为均质混合岩或混合花 岗岩,辽宁省地矿局有关地质队称之为条痕状混合 岩的一套花岗质岩石,属于含硼岩系的下部岩层。 部分学者称其为辽吉花岗岩系,认为是分布于含硼 岩系底部,是与岩浆分异作用有紧密联系的岩浆型 花岗岩,具明显的底辟侵位特征^[1]。部分学者研究 认为,条痕状角闪质混合岩是含硼岩系中具有一定 层位的层状混合岩,可以作为大区域地层对比的标 志层,主要作为含硼岩系的下部地层^[2]。因此对该 混合岩的成因还存在着争议,笔者结合近几年找矿 成果,从层状混合岩的岩石学、岩石化学、微量元素 和稀土元素化学特征出发,以此来探讨层状混合岩 的成因。研究表明,层状混合岩局限于含硼岩系的 矿化层上下,但是不同地区的混合岩不能作为同一 地层对比,不同地区不同层位混合岩化程度也不同, 层状混合岩系变质围岩选择重熔交代成因。

1 混合岩的分布及岩石学特征

混合岩集中分布于辽东大石桥、凤城和宽甸等 地,在各个矿区呈近东西向展布(图1)。与含硼岩 系密切共生,或分布在含硼岩系底部或含硼岩系的 上部层位,如大石桥后仙峪矿区至冯家堡一带主要 分布在超镁橄榄岩及浅粒岩上部,而凤城翁泉沟矿 区和宽甸矿区则恰恰相反,但是总体表现为层状。

在辽阳隆昌乡,在条痕状混合岩与变粒岩层的 过度层中可见到残余的交错层理,岩层中角闪石 (中-粗粒)和长英质矿物分别集中形成的条带状和 交错层状层理向混合岩层过渡时,逐渐变成角闪条 带-条痕状混合岩^[2]。

在大石桥、凤城地区,这套层状混合岩一般出露 在穹状或短轴背形为主所组成的正向构造(相对隆 起的构造单元)核部,在宽甸地区则常与上覆含硼 岩系地层遭受同步褶皱。这套混合岩的围岩为各种 变粒岩和浅粒岩,在岩性上有过度现象,并且与围岩 呈整合接触,未发现有侵入关系和冷凝边。

[[]收稿日期]2009-04-21;[修订日期]2009-07-01。[责任编辑]孙 赫。

[[]基金项目]辽宁省国土资源厅基金(2006)项目的资助。

[[]第一作者简介]张艳飞,(1982年—),男,2008年毕业于辽宁工程技术大学,获硕士学位,在读博士,主要从事矿床地质及地球化学研究。



 Fig. 1 Distribution of layered migmatites in the boron field, East Liaoning(modified after[1])

 1—层状混合岩;2—含硼岩系中变粒岩及浅粒岩;3—浊积岩系;4—断层

1-layered migmatites;2-granulites and leucoleptites in B-bearing series;3-turbidite series;4-fault

岩石外观基本与花岗岩相似,基体与脉体界限 不清,仅见暗色矿物呈条痕状断续分布,排列略具定 向,说明其经受了强烈的混合岩化作用。岩石呈肉 红色,花岗变晶结构,条带状、条痕状构造,变粒岩中 局部有混合岩化作用,不均匀分布眼球状及串珠状 长英质脉体,混合岩化岩石矿物成份很不稳定。

镜下鉴定,主要组成矿物为微斜长石含量40% ~55%、斜长石15%~45%、石英20%~45%,次要 矿物为角闪石及少量次生矿物磁铁矿、绿泥石及副 矿物磷灰石、榍石、锆石等,斜长石与黑云母片状矿 物成定向的排列。与正常岩浆岩不同,该类花岗岩 呈现一些特殊的结构构造:最常见的结构是包含结 构,微斜长石晶体中显示不同期结晶特征,其干涉 色、糙面等光性特征略有不同,显示为晚期结晶微斜 长石包含早期结晶的微斜长石形成的包含结构,也 有部分微斜长石包含石英或斜长石颗粒及绢云母鳞 片等。微斜长石普遍具有次生边结构及次生加大结 构^[3]。交代成因微斜长石的格子双晶极不对称,显 示为交代及在不对称压力条件下生长的结果。交代 残留的角闪石、透辉石或次生的磁铁矿形成定向排 列,形成所谓条痕状,其长轴方向总是与层理一 致^[2],有些部位可见一定数量的斜长角闪岩及变 (浅)粒岩的包体^[1]。

2 岩石地球化学特征

2.1 主量元素化学特征

辽东层状混合岩主量元素分析结果及特征参数 见表1。岩石中 SiO_2 含量为61.36%~76.18%, Al_2O_3 为10.42%~18.16%, FeO为1.13%~ 5.07%, Na₂O为2.12%~6.64%, K₂O为1.09%~ 6.32%, 反映出各种化学成分变化的波动区间较大, 说明岩石化学成分很不稳定, 这同矿物成分含量不 稳定性相吻合。

由表 1 可以看出:(1)与变质围岩相比,混合岩的 SiO₂、K₂O、Na₂O 等组分均明显增加,而 Fe₂O₃+ FeO、CaO、MgO 等组分明显减少,前者为混合岩化过 程中的带入组分,形成交代矿物微斜长石、斜长石和 石英等,后者为带出组分,表现为暗色矿物含量的减 少。(2)随混合岩化程度不同,K₂O、Na₂O、CaO 有 时跳跃式变化,这主要是发育的交代作用类型不同

表1 混合岩及其变质围岩岩石化学数据(wt/%)

Table1 Chemical compositions of migmatites and metamorphic rocks (wt/%)

样号	岩石	SiO_2	TiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ 0	P_2O_5	Los	总量	ANKC	产地	
82119	条痕状角闪质混合岩	74.92	0.18	11.29	2.65	1.35	0.01	0.62	0.48	3.92	3.54	0.16	2.17	101.29	1.01	凤城林家台	
01B2617	条痕状角闪微斜混合岩	73.02	0.15	10.89	2.67	1.88	0.22		1.70	2.85	4.83	0.04	1.02	99.08	0.84	安甸荘庙	
01B2616	条痕状角闪更长混合岩	74.36	0.37	13.16	2.52	1.13	0.22	0.40	0.71	4.93	1.23	0.03	1.85	100.9	1.23	见凹作用	
YDS-1	二长花岗混合岩	76.13	0.13	10.42	0.54	1.26	0.02	0.31	0.64	2.12	6.32	0.01	1.47	99.38	0.91		
YDS-4	二长花岗混合岩	73.46	0.23	12.04	0.66	2.13	0.04	0.21	1.13	3.90	5.19	0.02	0.56	99.60	0.85		
YDS-5	斜长混合岩	66.17	0.11	18.16	0.28	1.13	0.04	0.92	3.93	6.64	1.99	0.03	0.54	99.98	0.90		
YDS-7	斜长混合岩	72.63	0.27	12.01	0.99	3.55	0.02	0.20	0.42	4.55	4.11	0.03	0.55	99.36	0.94	大石桥 后仙峪	
YDS-10	斜长混合岩	76.18	0.10	11.54	0.20	2.38	0.01	0.23	0.22	3.68	4.74	0.01	0.69	100.00	1.00		
YDS-14	二长花岗混合岩	74.03	0.29	12.92	1.62	1.57	0.01	0.26	0.54	5.71	2.59	0.03	0.42	100.01	0.98		
YDS-15	二长花岗混合岩	73.53	0.31	12.41	1.91	2.16	0.02	0.31	0.95	6.13	1.09	0.03	1.27	100.13	0.96		
1	黑云变粒岩(5)	63.05	0.33	16.39	1.35	1.75	0.04	3.35	3.59	6.36	2.17	0.16	0.95	99.63	0.85		
2	浅粒岩(3)	71.86	0.21	14.77	0.24	0.32	0.01	2.80	1.25	5.29	2.27	0.05	0.90	100.01	1.10	辽东	
3	电气变粒岩(7)	61.19	0.53	16.38	2.06	1.34	0.02	5.42	1.99	4.56	3.31	0.28	0.96	99.85	1.11		

注;82119、01B2617、01B2616;据文献[2];YDS:本项目测试,样品由中国地质科学院地球物理与地球化学勘查研究所采用 XRF 分析。括号中 数字为样品个数。

造成的。 K_2O/Na_2O 变化较复杂,说明交代作用较复 杂,导致化学组分变化复杂。上述特点说明,层状混 合岩与其变质围岩之间通过混合和双扩散对流作用, 造成二者发生不同程度的物质、成分及能量交换。

2.2 微量元素地球化学

与维氏花岗岩中微量元素含量^[4]相比较,辽东 层状混合岩中亲铁元素 Cr、Co、Ni、P、Mn 等和 Rb、 Ba、Sr、Cs 等大离子亲石元素相对较贫(表 2),表明 混合岩更偏酸性,对比两者的常量元素含量,也可看 出这点。该区岩石同时贫化两类性质完全不同的元 素,难以用岩浆结晶分异作用来解释,推测该混合岩 贫亲石元素与其母岩成分特征有关。

在对华南花岗岩的研究表明^[5],元素 Nb 在黑 云母中比在石英、长石中的含量高一个数量级。本 区层状混合岩中 Nb 的平均含量为 16.52×10⁻⁶(表 2),远远大于其变质围岩的 Nb 含量(4.5~8.9× 10⁻⁶),表明围岩在熔出低熔组分时,黑云母受到强 烈分解,以至于混合岩中 Nb 的含量增高。本区各 类混合岩 Rb 含量均较低在 28.1×10⁻⁶~173.9×10⁻⁶ 之间,平均仅为 91.77×10⁻⁶远远小于维氏花岗岩 Rb 的含量(200×10⁻⁶)^[4]。Rb/Sr 的值较小,介于 0.06 ~3.33 之间,平均为 1.41,这主要是受变质围岩成 分影响所致,因变质围岩 Rb/Sr 绝大多数小于 1(0. 28~0.74)。 球粒陨石标准化微量元素分布模式见图 2,其 总体趋势与大洋基性、超基性岩相似,这可能表明在 不同岩性中,元素相容性的相对顺序变化不大,但与 后者相比,本区岩石的图形更陡斜一些,这与酸性岩 类中相容元素和不相容元素含量的差异比基性、超 基性岩中的差异大的特征相吻合,说明在岩石演化 发展过程中,由于元素性质不同而引起了分异,岩石 演化越强,分异就越明显。

且由图 2 可见,层状混合岩与其变质围岩曲线 型式非常相似,说明它们之间有成因联系,支持了前 者是由后者熔融交代而形成的观点。而且层状混合 岩与变质围岩曲线在部分元素相交呈"X"型,推测 元素在混合岩化作用过程中与在结晶分异作用过程 中的行为大致相反,即在岩浆演化后期富集的元素, 在部分熔融作用的早期富集。

2.3 稀土元素地球化学

稀土分析数据和某些参数值列于表 3,其中稀 土总含量 \sum REE = 38.74×10⁻⁶ ~ 1078.44×10⁻⁶,平 均为 351.62×10⁻⁶;大石桥地区混合岩的稀土总量 明显比凤城、海城地区偏高。

LREE/HREE 比值:一般情况下,在碱性岩和花岗岩 中稀土的成分有很大变化,但它们有一共同特点,即在稀 土的平均成分中轻稀土明显占优势(LREE/HREE=4~ 5)^[6-8]。本区混合岩 LREE/HREE 普遍偏高,介于 2.51 ~15.97 之间,平均值为 9.80,高出一般花岗岩约 2~3 倍,因此轻稀土富集并不均一。

	Tal	ole 2 Con	nposition o	of trace ele	ments laye	ered migma	atites and a	metamorpł	nic rocks(×10 ⁻⁶)	
样号	YDS-1	YDS-4	YDS-5	YDS-7	YDS-10	YDS-14	YDS-15	黑云变 粒岩(5)	浅粒 岩(3)	电气 变粒岩(7)	维氏 花岗岩
岩性	二长花岗 混合岩	二长花岗 混合岩	斜长混 合岩	斜长混 合岩	斜长混 合岩	二长花岗 混合岩	二长花岗 混合岩				
Rb	173.9	146	46.1	98.2	105.5	44.6	28.1	84.4	56.3	113.2	200
Th	61.15	19.37	4.10	16.76	24.99	11.85	21.79	6.60	5.00	27.60	18.00
Та	0.69	1.33	0.53	1.18	2.72	0.99	1.11	0.80	0.50	0.50	3.50
Nb	7.7	19.8	6.5	17.9	32	16.4	15.3	8.9	4.5	7.2	20
Ba	820	867	533	224	218	525	290	162.6	283.3	153.5	830
Sr	93.7	84.4	827	43.3	31.6	104.1	145.1	302.8	193	152	300
Cs	1.64	1.15	0.88	3.11	3.16	0.54	0.77	4.9	0.9	4.2	5
Zr	135.9	269.9	89	254.3	252.7	308.4	348	150.3	288.3	215.6	200
Р	43.66	87.32	130.98	130.98	43.66	129.68	132.29	698.55	218.3	1222.5	700
Ga	16.8	20.5	18.5	16.7	20.9	19.8	21.5	14.2	18.8	14.3	20
Hf	4.50	8.72	2.48	6.49	9.14	8.74	11.27	4.2	17.6	5.3	1
Li	6.2	4.9	3.8	15.7	16.0	3.9	4.3	33.6	3.3	25.1	40
Be	1.56	2.59	2.83	3.12	5.75	1.86	2.21	3.0	3.5	2.4	40
В	36	82	128	79	51	54	33	467.1	1768.8	5064.6	5.6
Sn	3.26	3.54	1.43	5.47	4.07	3.28	4.20	6.5	2.6	6.9	1.5
Ti	701	1134	530	1388	545	1513	1747	1582	1211	2769.9	2300
Sc	1.45	3.39	3.47	4.12	1.34	1.98	4.31	7.5	2.6	6.5	3
V	17	7	7	<5	<5	10	13	19.2	17.0	87.9	0
Mn	159.62	322.44	328.92	159.62	79.81	76.69	156.47	309.8	77.4	154.9	600
Cr	5	3	10	3	4	4	5	29.5	16.9	48.4	25
Co	0.7	1.2	3.1	1.7	2.3	1.0	1.3	5.7	5.0	4.4	5
Ni	2.0	1.5	4.5	2.9	1.7	2.3	2.6	9.9	4.3	8.4	8

表 2 层状混合岩及其变质围岩微量元素组成(×10⁻⁶)

样品由中国地质科学院地球物理与地球化学勘查研究所采用 ICP-MS 分析。括号中数据为样品个数。





轻稀土元素分馏度(La/Sm)_N:(La/Sm)_N 值大 于 1,指示分馏程度较好,比值越大其分馏程度越 好,轻稀土越富集。本区混合岩(La/Sm)_N=1.56~ 7.27,平均为 4.68,即轻稀土分馏程度较高。

重稀土元素分馏度 $(Gd/Yb)_{N}$: $(Gd/Yb)_{N}$ 值越 小说明分馏程度越低。本区混合岩 $(Gd/Yb)_{N} =$ 0.61~3.94,平均为1.67,与一般壳型花岗岩 $((Gd/Yb)_{N} \approx 1)$ 接近,说明其重稀土分馏程度低。

稀土配分曲线斜率(La/Yb)_N比值:(La/Yb)_N 在1.35~23.89之间,平均值为13.26,表明轻重稀 土分馏程度也不一样,稀土配分曲线为右陡倾式。 岩石具有中等负 Eu 异常, δ Eu=0.29~0.92,平均值 0.47,与华南云开大山等地发育的各种混合岩和混 合花岗岩中 δ Eu=0.62±0.10以及华南壳型花岗岩 δ Eu=0.46^[7]十分接近,说明本区混合岩成因与壳源 混合岩化作用有关。

第5期

以上特征反应岩石具有稀土元素总量较高,轻稀 土中度富集、分馏程度较大,重稀土分馏程度低及中 等 Eu 亏损的特性。一般认为,产生 Eu 负异常的原 因与斜长石在岩浆中的分离结晶,或在地壳源区部分 熔融过程中作为难熔残余相存在有关^[9]。尽管 Eu 负异常的原因不能排除分离结晶的可能性,但更可能 是在部分熔融过程中留下斜长石作为难熔残余所致。

并且在碳质球粒陨石值^[10]标准化稀土模式图 上(图3),层状混合岩模式图形呈向右较大的陡倾 斜,重稀土部分基本呈水平状(个别的跳跃可能与 分析误差有关),Eu 中等亏损。这种稀土模式图为 所谓典型的"花岗岩化"和重熔花岗岩所具有^[11],实 际上是层状混合岩的形成没有经过或只经过微弱的 结晶分异作用。本区混合岩与其变质围岩的稀土模 式图形一致性(图3)为此提供了又一个证据。



层状混合岩及其变质围岩的稀土元素平均值及 特征值列于表 4, 从表可以看出本区层状混合岩与 围岩的稀土元素各参数值都很相近,尤其与电气变 粒岩无论是稀土元素含量还是各个参数值都非常接 近,表明混合岩的形成与变质围岩有着密切的关系。 从层状混合岩与各类变粒岩稀土平均值配分曲线对 比图(图3)看出,各谱系线间关系协调,层状混合岩 与电气变粒岩、黑云变粒岩的稀土配分曲线是一致 的,这与其各个参数值都比较接近相吻合,显示出层 状混合岩与电气变粒岩和黑云变粒岩有着成因上的 联系,并且均表现为有一定 Eu 亏损,轻稀土富集、 重稀土亏损的特征。已有研究表明,混合岩的形成 和混合岩化作用过程中起主要作用的"流体相"的 产生,主要是地壳硅铝层选择性重熔形成的重熔岩 浆有关^[12],因此在岩浆形成过程中,稀土元素特别 是轻稀土元素优先进入熔体相,以至于造成层状混 合岩的稀土含量略高于其变质围岩(表4,图4)。

根据武功山的混合岩研究^[13],随着混合岩化程 度增强,∑REE 和 LREE/HREE 呈现降低趋势,但 当混合岩化达到均质混合岩时则又出现增加趋势, 并解释是由于岩石高度熔融,使一些富集 REE 的难 熔副矿物的稀土元素组分进入熔体相。本区混合岩 的 REE 和 LREE/HREE 均出现升高趋势(表4),因 此推测是由高度熔融而使其重稀土发生富集。

3 层状混合岩的成因探讨

混合岩的成因问题一直是地质工作者广泛关注 的重要问题之一。前人根据混合岩的地球化学特征 及实验结果,提出了多种成因模式,归纳起来有以下 几种^[14-17]:部分熔融、变质分异、花岗质岩浆的注入 和交代作用。

从层状混合岩、黑云变粒岩和电气变粒岩在化 学成分上的一致性,以及对于黑云变粒岩和电气变 粒岩化学成分上的继承性和时空上的分布规律,推 测它们是有成因联系的。

区域变质岩与混合岩的共生也意味着它们之间 存在某种联系。混合岩化作用是介于变质作用(狭 义)和典型的岩浆作用之间的一种地质作用和造岩 作用^[12],但是有的学者^[18]指出:混合岩化作用更是 一种交代熔融作用,在该作用过程中,熔融作用和交 代作用同时进行,构成同一作用过程的不同方面 (体系是开放的,可有大量长英质物质加入)。熔融 引起交代,交代引起更强烈的熔融,两者相互促进, 随着温度升高,压力增大,熔体逐渐增多,最后过度 到岩浆作用阶段。在古老变质岩区,对于由围岩经交 代熔融形成的花岗质岩石来说,由于他们形成温度一 般较低,所以决定其成分特征的主要因素不是它们自 身的后期演化,而是当时所处环境的地球化学特征。 本区层状混合岩的化学组成明显受围岩的制约。

层状混合岩与上下围岩始终保持整合接触,夹 于沉积变质的变粒岩、浅粒岩岩层中,并同它们呈渐 变过度关系,从未见到切穿这些岩层的现象。由于 受到岩层控制,层状混合岩的岩性有一定差别,矿物 成分和化学成分变化较大,说明交代作用占有重要 的地位。而且与变质围岩相比,混合岩的 SiO₂、 K₂O、Na₂O 等组分均明显增加,而 Fe₂O₃+FeO、CaO、 MgO 等组分明显减少,前者为混合岩化过程中的带 入组分,形成交代矿物微斜长石、斜长石和石英等, 后者为带出组分,表现为暗色矿物含量的减少。 K₂O/Na₂O 变化较复杂,说明交代作用较复杂,导致 化学组分变化复杂。

								,		
样号	83001	82120	82119	YDS-1	YDS-4	YDS-5	YDS-7	YDS-10	YDS-14	YDS-15
岩性	角闪质 混合岩	角闪质 混合岩	角闪质 混合岩	二长花岗 混合岩	二长花 岗混合岩	斜长 混合岩	斜长 混合岩	斜长 混合岩	二长花岗 混合岩	二长花岗 混合岩
地点	海城马风	凤城 张家沟	凤城 林家台	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪	大石桥 后仙峪
La	22.18	21.33	5.12	249.70	49.02	9.32	140.7	99.11	47.74	159.00
Ce	42.33	50.47	13.84	494.4	108.2	18.03	262.00	183.50	96.81	302.1
Pr	4.82	5.11	1.40	57.94	13.46	2.14	28.04	18.88	11.52	33.86
Nd	18.34	18.00	4.80	186.7	50.84	8.12	87.91	59.57	39.98	109.9
Sm	2.41	4.14	2.07	27.86	10.61	1.86	12.17	9.68	7.15	15.17
Eu	0.40	0.36	0.48	2.29	1.62	0.56	1.48	0.97	0.94	1.67
Gd	1.52	3.19	2.27	23.28	10.65	1.83	11.10	8.91	6.05	12.77
Tb	0.30	0.67	0.36	3.15	1.91	0.33	1.68	1.44	0.98	1.83
Dy	2.57	4.70	2.35	16.34	12.24	2.10	9.92	8.95	5.98	10.62
Но	0.54	1.31	0.61	2.77	2.52	0.45	1.81	1.77	1.12	1.94
Er	1.23	2.63	1.93	7.62	7.73	1.39	5.72	5.70	3.29	5.84
Tm	0.27	0.49	0.38	0.91	1.09	0.23	0.80	0.88	0.46	0.80
Yb	2.02	2.09	2.55	4.77	6.18	1.39	4.37	5.15	2.44	4.49
Lu	0.52	0.64	0.59	0.71	1.04	0.26	0.73	0.89	0.39	0.65
Σ REE	99.54	116.83	38.74	1078.44	277.11	48.00	568.44	405.40	224.86	660.64
Y	13.40	20.49	17.34	62.40	63.50	16.60	48.20	48.60	27.30	51.60
\sum REE+ Y	112.94	137.32	56.08	1140.88	340.60	64.57	616.64	453.97	252.15	712.24
LREE/HREE	10.09	6.32	2.51	17.11	5.39	5.02	14.73	11.04	9.85	15.97
$(La/Sm)_N$	5.79	3.24	1.56	5.64	2.91	3.15	7.28	6.44	4.20	6.59
$(Gd/Yb)_N$	0.61	1.23	0.72	3.94	1.39	1.06	2.05	1.40	2.00	2.30
(La/Yb) _N	7.40	6.88	1.35	35.27	5.34	4.50	21.73	12.98	13.20	23.89
δΕυ	0.60	0.29	0.67	0.27	0.46	0.92	0.38	0.32	0.43	0.36

表3 层状混合岩的稀土元素含量(×10⁻⁶)及参数

Table 3 REE abundance and some parameters layered migmatites ($\times 10^{-6}$)

注:YDS 系列样品由中国地质科学院地球物理与地球化学勘查研究所采用 ICP-MS 分析,其它数据引自文献[2]。

表4 层状混合岩及其变质围岩稀土元素平均值(×10⁻⁶)及参数

Table 4	Average	REE v	alues a	nd som	e par	ameters	of laye	red mi	gmatite	s and	metam	orphic 1	rocks(>	×10 ⁻⁶)	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
黑云变粒岩	24.7	57.1	7.0	25.5	4.6	0.8	4.2	0.7	4.1	0.8	2.5	0.5	2.5	0.4	21.86
浅粒岩	7.34	16.82	2.20	8.79	2.37	0.61	2.34	0.43	2.61	0.53	1.62	0.25	1.52	0.32	13.76
黑云电气变粒岩	53.12	110.09	13.89	51.27	8.91	1.13	7.34	1.04	5.77	1.02	3.01	0.41	2.30	0.40	24.60
层状混合岩	80.32	157.17	17.72	58.42	9.31	1.08	8.16	1.26	7.58	1.49	4.31	0.63	3.54	0.64	36.94
岩性	ΣRE	E R	EE+Y	LREI	£	HREE	LREE/	HREE	Eu/Sm	(La/	(Sm) _N	(Gd/Yb)) _N (La/	Yb) _N	δEu
黑云变粒岩	135.3	32 1	57.18	119.6	9	15.64	7.0	55	0.17	3.	38	1.36	6.	66	0.53
浅粒岩	47.7	4 6	51.51	38.1	3	9.62	3.9	96	0.26	1.	95	1.24	3.	26	0.80
黑云电气变粒岩	259.7	70 2	84.31	238.4	1	21.29	11.	20	0.13	3.	75	2.58	15	. 57	0.43
层状混合岩	351.	52 3	88.57	324.0	2	27.6	11.	74	0.12	5.	42	1.86	15	. 30	0.37



Fig. 4 Comparision of Chondrite-normalized REE patterns for bedded migmatites and metamorphic rocks

为了研究层状混合岩的成因,在 K—Na—Ca 图 解中(图5),投点较分散,样品点多数投在岩浆花岗 岩区以外,在其内者也多分散在岩浆花岗岩与交代花 岗岩的交界处。在 CIPW 标准矿物分子 Q—Ab—Or 图解中(图6),本区层状混合岩的数据点亦很分散, 部分在岩浆区,部分在其区外。岩石化学资料也表明 层状混合岩不是岩浆成因的,更不是幔源的岩浆岩。









在 A/MF—C/MF 图解(图7)中,层状混合岩主 要落于变泥质岩部分熔融区,少量样品落在变杂砂 岩部分熔融区。表明层状混合岩由地壳成熟度较高 的变泥质岩部分熔融的产物。



图 7 层状混合岩的 A/MF-C/MF 图解 Fig. 7 A/MF-C/MF diagram of layered migmatites

微量元素则表现为强烈亏损 V、Cr、Co、Ni 等地 幔元素,而富集 K、Rb、Ba 等地壳元素; 层状混合岩 微量元素分布模式图与其变质围岩的曲线型式基本 相似;本区层状混合岩中 Nb 的平均含量为 16.52× 10⁻⁶,远远大于其变质围岩的 Nb 含量(4.5×10⁻⁶ ~ 8.9×10⁻⁶),表明围岩在熔出低熔组分时,黑云母受 到强烈分解,以至于混合岩中 Nb 的含量增高,也说 明变质围岩遭到了高度的熔融。

稀土元素总量较高,轻稀土中度富集、分馏程度 较大,重稀土分馏程度低及中等 Eu 亏损的特性。 这种稀土模式图为所谓典型的"花岗岩化"和重熔 花岗岩所具有,实际上是层状混合岩的形成没有经 过或只经过微弱的结晶分异作用。本区混合岩与其 变质围岩的稀土模式图形一致性为此提供了又一个 证据。并且在 La/Sm—La 图解中,成分投点呈现明 显的斜线分布特征(图 8),表明层状混合岩为部分 熔融成因。

辽东地区含硼岩系经受了中压角闪岩相的区 域变质作用^[1,19],变质带相当于角闪石-石榴子石 带,局部达到麻粒岩相,变质温度约 600 ~ 700℃, 压力 5×10⁸Pa±。在此温压条件下,足以使岩石内 部易熔组分发生部分熔融^[20],其中变质围岩黑云 变粒岩、浅粒岩和电气变粒岩中大多数低熔点的





矿物如石英、长石等,首先开始重熔,形成由石英、 长石(钾长石和斜长石)等组分所组成的共结岩 浆,而后在一定的构造部位分异结晶形成层状混 合岩。

4 结论

辽东地区层状混合岩本身具溶蚀残留结构、 交代结构、包含结构,条带状构造等。不同地区的 层状混合岩的岩石矿物相似,岩石化学资料证明 层状混合岩不是岩浆成因的,更不是幔源的岩浆 岩,其化学成分的差异表明其经历了较强的交代 作用。微量元素数据说明层状混合岩发生了高度 的熔融,在温度约 600~700℃,压力 5×10⁸Pa±条 件下,足以使变质围岩发生选择性重熔;稀土资料 表明,层状混合^②岩与其变质围岩的稀土元素配分 模式具一致的演化趋势,都属于轻稀土富集,重稀 土相对亏损型,具中等负 Eu 异常,为典型的重熔 花岗岩所特有。无论是岩石产状、结构构造,或是 岩石化学、稀土元素特征都表现出变质围岩的重 熔交代特点,明显反映出未彻底改造的原岩成分 的特点。因此,辽东地区层状混合岩为高级变质 地区黑云变粒岩、电气变粒岩等变质围岩在封闭 系统下选择性重熔形成重熔岩浆,重熔岩浆同时 与变质围岩发生交代作用,两者相互促进,但总的 来说,交代作用不占重要地位,从而使变质围岩改 造成为一种偏酸性的混合岩。由于受到岩层的控 制,而变质围岩多为层状展布,因此重熔交代成因 的混合岩和外围地层产状一致,具有层状特征。

「参考文献]

[1] 张秋生. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京:地质出版社, 1988:1-574.

Zhang Qiu-sheng. The early crust and deposits of eastern Liaoning peninsula[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1988: 1-574.

[2] 姜春潮. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,1987:184-255.

Jiang Chun-chao. Precabrian geology of eastern Liaoning-Jilin [M]. Shenyang; Liaoning Technological Press, 1987;184-255.

[3] 刘敬党,肖荣阁,王翠芝,周红春,费红彩.辽宁大石桥花岗质 岩石成因分析及其在硼矿勘查中的意义[J].吉林大学学报 (地球科学版),2005,35(6):714-719.

Liu Jing-dang, Xiao Rong-ge, Wang Cui-zhi, Zhou Hongchun, Fei Hong-cai. Genesis of the Dashiqiao Granite and Its Significance in Borate Mineral Exploration [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2005,35(6); 714-719.

[4] 武汉地质学院地球化学教研室.地球化学[M].北京:地质出版社,1979:1-294.

Teching-research section of geochemistry of Wuhan Geological Institue. Geochemistry[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1979: 1-294.

[5] 中国科学院地球化学研究所.华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京:科学出版社,1979:1-421.

Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences. Geochemistry of granitic rocks in south China [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1979:1-421.

[6] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京:地质出版社, 1987:57-80.

Liu Ying-jun, Cao Li-ming. . Introduction to geochemistry of the elements [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1987:57-80.

 [7] 王中刚,于学元,赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学 出版社,1989:133-246.
 Wang Zhong-gang, Yu Xue-yuan, Zhao Zhen-hua. REE Geo-

chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989:133-246.

 [8] P·亨德森.稀土元素地球化学[M].北京:地质出版社,1989: 20-177.
 Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing:

Geol. Pub. House, 1989:20-177.

- [9] Hugh R Rillison. 岩石地球化学[M]. 杨学明,杨晓勇,陈双喜译. 合肥:中国科技大学出版社,2000;83-133.
 Hugh R Rillison. petrogeochemistry [M]. Yang Xue-ming, Yang Xiao-yong, Chen Shuang-xi. translated. Hefei: University of Science and Technology of China Press,2000;83-133.
- [10] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. in: Henderson P. ed. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam: Elserier, 1984:63-144.
- [11] 南京大学地质系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系

② (辽宁省地质矿产局第七地质大队, 1986, 辽宁省宽甸杨木杆碰矿床研究报告,

[M].北京:科学出版社,1981:133-246.

Department of Geology of Nanjing University. Granitoids of different ages and its relations with the ore-forming in South China [M]. Beijing; Science Press, 1981;133-246.

[12] 贺同兴,卢良兆,李树勋,兰玉琦.变质岩岩石学[M].北京: 地质出版社,1980:191-207.

> He Tong-xing, Lu Liang-zhao, Li Shu-xun, Lan Yu-qi. Metamorphic Petrology[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1980:191-207.

[13] 徐世进.花岗质岩石的稀土元素地球化学问题:1.变质-深熔 过程中稀土元素对岩石成因的意义[J].南京大学学报(地球 科学),1990:3:44-53.

> Xu Shi-jin. The issue of REE geochemistry of granitic rocks: 1. The significance of REE on petrogenesis in the process of metamorphism-anatexis[J]. Journal of Nanjing University(Earth science), 1990;3: 44-53.

- Yardley B W D. Genesis of Skagit gneiss migmatites, Washington and the distinction between possible mechanisms of migmatization
 [J]. Geological Society of America Bulletin, 1978, 89: 941 – 951.
- [15] Ashworth J R. Introdution [A]. In: Migmatites, Ashwoth, J R ed[M]. Scotland: Blackie and Son Ltd, 1985:1-35.
- [16] Johannes W. What controls partial melting in migmatites? [J].

Metamophic Geol, 1988, 6: 451-465.

- [17] 五河锦. 国外混合岩研究的某些新观点与新动态[J]. 国外地质(北京), 1989,6:43-47.
 Wu He-jin. Some new viewpoints and trends of the study on migmatites abroad[J]. Foreign geology(Beijing), 1989,6:43-47.
- [18] 万渝生.山东雁翎关地区雌山混合花岗岩地球化学特征及其成因[J].岩石矿物学杂志,1986,5(3);203-211.
 Wan Yu-sheng. Geological and geochemical characteristics and genesis of Cishan migmatitic granite inYanlingguan District, Shandong[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1986,5(3); 203-211.
- [19] 贺高品,叶慧文. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用 及其构造意义[J]. 岩石学报,1998,14(2):52-162.
 He Gao-pin, Ye Hui-wen. Two types of early proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas[J]. Acta Petrologica sinica,1998,14(2):52 -162.
- [20] 应思淮,俞理宝,杨主恩. 混合岩化的发生与发展[J]. 地震地质,1980,2(1):49-62.
 Ying Si-huai, Yu Li-bao, Yang Zhu-en. On the origin and development of migmatization[J]. Seismology and Geology,1980,2 (1): 49-62.

Study on the Genesis and Geological and Geochemical Characteristics of Layered Migmatites in East Liaoning, China

ZHANG Yan-fei^{1,2}, LIU Jing-dang^{1,2}, FU Yan-chun², LI Jian-feng², ZHANG Jian-hua², HE Fang-Jun²

(1 Liaoning Technical University, Fuxin 123000; 2 Liaoning Geological Survey for Chemical Industry, Jinzhou 121000)

Abstract: The layered migmatites of boron deposit in east Liaoning is an important component part of the boron-bearing strata, which conformably contactes with various granulites and leucolepitites, and shows transition in lithofacies. Residual crossbedding can be observed within transitional layers between striated hornblende migmatites and granulites. There are widely developed metasomatic textures. Compared with the metamorphic well-rocks, the major elements such as SiO₂, K₂O and Na₂O are significantly increased, meanwhile such as Fe₂O₃+FeO, CaO, MgO and MnO are distinctly decreased, K₂O/Na₂O is in complex change. The difference among petrochemical compositions in the layered migmatites is obvious and is related to metasomatism. Trace element distribution of migmatites is similar to that of metamorphic well-rocks, except that their REE content is higher than that of wall-rocks. The distributed pattern of REE is consistent with granulites, especially biotiteleptynite, and is of representative anatexis characteristics. The reason for this is that part of granulites melted and formed the layered migmatites. So the results indicated that the layered migmatites are produced by anatexis and metasomatism of metamorphic wall-rocks.

Key words: the layered migmatites, boron deposit in east Liaoning, the origin of rocks, anatexis and metasomatism