

内蒙古大青山地区石榴混合花岗质 岩石地球化学特征及成因

宋海峰, 徐仲元, 刘正宏

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 内蒙古大青山地区太古宙孔兹岩系在发生麻粒岩相变质作用的同时, 榴云片麻岩组中的石榴黑云片麻岩在近水平剪切构造变形过程中发生部分熔融, 形成了石榴混合花岗质岩石。现有证据表明, 它们形成于新太古代晚期, 在矿物组成、地球化学特征上, 大体继承了石榴黑云片麻岩, 而它们的结构和地球化学特征尤其是 REE 分布型式的变异又反映了其部分熔融和演化。尽管该石榴混合花岗质岩体规模小, 但在矿物组成、结构和地球化学特征上显示出明显的不均一性, 形成了高 K_2O 低 Na_2O 、 CaO , 稀土元素总量低, 具正 Eu 异常和低 K_2O 高 Na_2O 、 CaO , 稀土元素总量高, 具负 Eu 异常的两类石榴混合花岗质岩石。综合研究发现, 这两类石榴混合花岗质岩石的形成与部分熔融及随后的流动过程中熔体与残留体的逐渐分离有关, 前者残留体、残留矿物相极少, 富长英质; 而后者残留体和残留矿物相对较多, 因而富镁铁质, 并且控制 REE 行为的矿物相如石榴石和独居石、磷灰石、锆石等相对富集, 从而造成了两类石榴混合花岗质岩石稀土元素分布型式的差异, 与桑干地区成因相似, 成熟度较高的古元古代花岗岩具有较大差别。

关键词: 石榴混合花岗质岩石; 地球化学; 深熔作用; 孔兹岩系; 大青山; 内蒙古

中图分类号: P588.3; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0489-07

Geochemical characteristics and origin of garnet migmatitic granites in Daqingshan area, Inner Mongolia

SONG Hai_feng, XU Zhong_yuan and LIU Zheng_hong

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The garnet migmatitic granite (GMG) was formed by partial melting of Ga-Bi gneiss within Ga-Bi gneiss complex of Archaean khondalites in Daqingshan area, Inner Mongolia, in the process of subhorizontal shearing and granulite facies metamorphism. The GMG mainly inherited mineral composition and geochemical features from the Ga-Bi gneiss, while its difference from Ga-Bi gneiss in textures and geochemistry (especially REE) indicates the process of partial melting and evolution. In spite of its small bodies, GMG shows heterogeneity in mineral composition, textures and geochemistry, and can be divided into two types, of which the former has high K_2O and low Na_2O , CaO , showing apparently positive anomalies and Low ΣREE , whereas the latter has low K_2O and high Na_2O , CaO , assuming negative Eu anomalies and high ΣREE . It is suggested that the development of the two types of GMG is related to the gradual separation of partial melts from the solid residue during the partial melting and subsequent flowing. The relative lack in the former and enrichment in the latter of the restite and relic minerals, especially the REE behavior-controlling refractory minerals such as garnet, monazite, apatite and zircon, caused the difference in REE distribution of the two types of GMG. The available data suggest that the GMG was developed in Neoproterozoic and is hence quite different from the Paleoproterozoic anatexis-derived garnet-bearing granite in Sanggan area.

Key words: garnet migmatitic granite; geochemistry; anatexis; khondalite; Daqingshan; Inner Mongolia

收稿日期: 2004-11-05; 修订日期: 2005-06-09

基金项目: 中国地调局区域地质调查项目(200113000021)

作者简介: 宋海峰(1968-), 男, 汉, 在读博士, 主要从事前寒武纪变质构造研究, E-mail: yesshf@email.jlu.edu.cn; 通讯作者: 徐仲元(1963-), 男, 汉, 教授, 从事构造地质学研究, 电话 0431-8502604。

对于孔兹岩系,近年来国内外许多学者从地质产状、原岩建造、形成时的大地构造环境、变质作用演化的 $P-T-t$ 轨迹及其动力学过程等方面均进行了较为详细的探讨(董启贤和周俊昌, 1984; Condie *et al.*, 1992; Chacko *et al.*, 1992; 刘喜山等, 1992; 金巍等, 1992; 卢良兆等, 1996; 李江海等, 1999; 万渝生等, 2000), 但对相伴生的重熔成因花岗质岩石的研究则显得比较薄弱。虽有研究者对石榴黑云片麻岩经深熔作用形成的石榴混合花岗岩进行过研究(陶继雄和胡凤翔, 2002), 但对深熔作用与变质变形的关系、深熔片麻岩的岩相学及地球化学特征讨论较少。本文以包头西北部哈德门沟地区石榴混合花岗质岩石为对象, 通过对其地质特征、岩相学及地球化学特征的分析, 讨论了石榴混合花岗质岩石成因。

1 区域地质概况

研究区高级变质杂岩主要由太古宙高级变质地层和不

同类型变质深成岩组成(徐仲元等, 2002)。高级变质地层自下而上分别为麻粒岩系、黑云角闪片麻岩系和孔兹岩系。孔兹岩系为区内主要的变质岩石地层, 自下而上由3个岩石地层单位组成, 即榴云片麻岩岩组、透辉片麻岩岩组及大理岩岩组。榴云片麻岩岩组由石榴黑云片麻岩、石墨(石榴)片麻岩、黑云片麻岩、石榴长英片麻岩夹矽线石榴石英岩、长石石英岩、磁铁石英岩组成; 透辉片麻岩岩组由透辉片麻岩、长石透辉石岩、透辉石岩及复矿物大理岩组成; 大理岩岩组以厚层状白云质大理岩为特征。总体上, 从榴云片麻岩岩组→透辉片麻岩岩组→大理岩岩组, 构成由碎屑沉积为主到化学沉积为主的沉积旋回。黑云角闪片麻岩系由斜长角闪岩、黑云角闪片麻岩及长英片麻岩组成。麻粒岩系由暗色麻粒岩、中色麻粒岩及浅色麻粒岩组成。变质深成岩包括石榴混合花岗质岩石、眼球状花岗质片麻岩、石英闪长质-花岗闪长质片麻岩、紫苏花岗质-紫苏石英闪长质片麻岩(图1)。

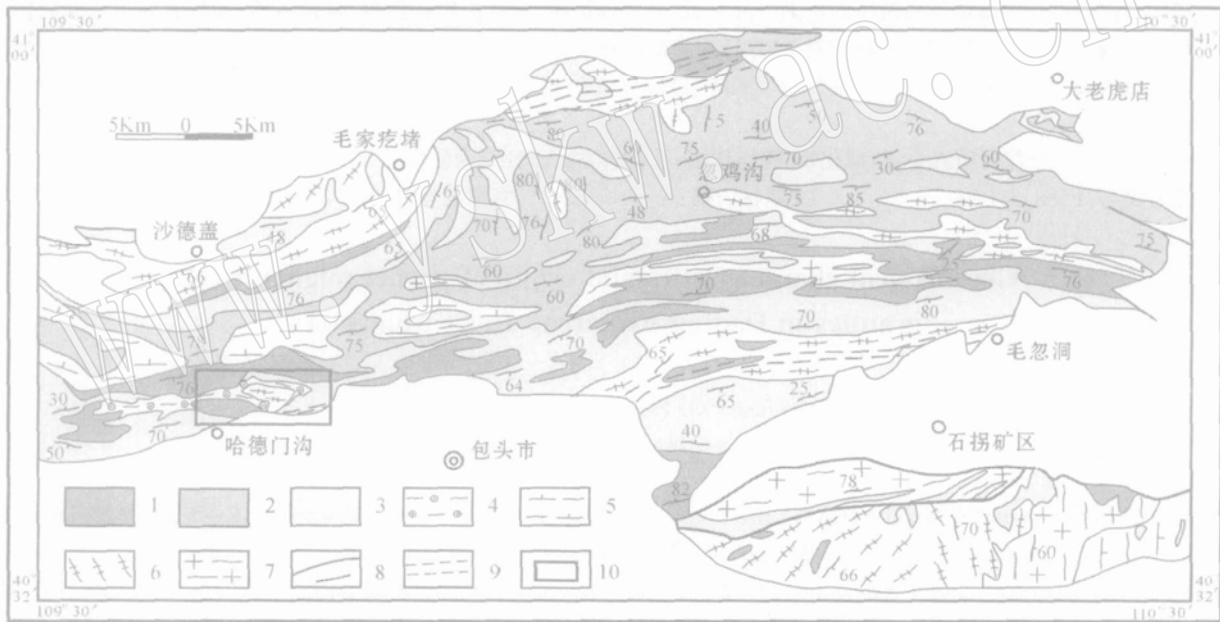


图1 内蒙古大青山地区早前寒武纪地质简图

Fig. 1 Early Precambrian geological sketch map of Daqingshan area, Inner Mongolia

- 1—麻粒岩系; 2—黑云角闪片麻岩系; 3—孔兹岩系; 4—石榴混合花岗质岩石; 5—石英闪长质-花岗闪长质片麻岩; 6—紫苏石英闪长质-紫苏花岗质片麻岩; 7—眼球状花岗质片麻岩; 8—逆冲推覆断层和走滑断层; 9—韧性剪切带; 10—图2位置
- 1—granulite; 2—biotite hornblende gneiss; 3—khondalite; 4—garnet migmatitic granite; 5—quartz dioritic-granodioritic gneiss; 6—hypersthene quartz dioritic-charnockitic gneiss; 7—eye-shaped granitic gneiss; 8—thrust and strike-slip fault; 9—ductile shear belt; 10—location of Fig. 2

高级变质杂岩经历了3期构造变形, 先发生一期近水平顺层剪切变形, 它完全抹掉了麻粒岩系与孔兹岩系早期角度不整合的痕迹, 使孔兹岩系以构造不整合覆盖在麻粒岩系之上, 之后又遭受到近南北向剪切变形或滑褶皱变形的改造; 第3期构造变形主要表现为地壳中部层次变形, 以近东西向陡倾叶理带为特征(徐仲元等, 2002, 2003)。

2 石榴混合花岗质岩石地质特征

研究区内石榴混合花岗质岩石呈不规则带状, 沿麻粒岩系与孔兹岩系之间的构造不整合界面分布, 出露面积约4 km², 其围岩为榴云片麻岩岩组、麻粒岩系及紫苏花岗质片麻岩和紫苏石英闪长质片麻岩(图2)。

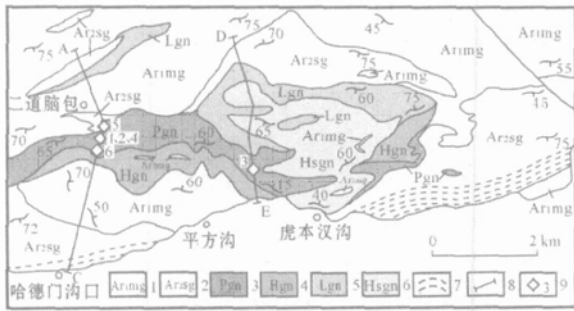


图 2 石榴混合花岗质岩石分布图

Fig. 2 The distribution of garnet migmatitic granite

1—麻粒岩系; 2—榴云片麻岩岩组; 3—石榴混合花岗质岩石; 4—紫苏石英闪长质片麻岩; 5—眼球状花岗质片麻岩; 6—紫苏花岗质片麻岩; 7—韧性剪切带; 8—图 3 剖面位置; 9—取样位置及序号
 1—granulite; 2—garnet biotite gneiss; 3—garnet migmatitic granite; 4—hypersthene quartz dioritic gneiss; 5—eye_shaped granitic gneiss; 6—charnockitic gneiss; 7—ductile shear belt; 8—location of section in Fig. 3; 9—location and serial number of sampling site

野外观察和剖面测量过程中发现, 石榴混合花岗质岩石仅局部受到东西向陡倾叶理带改造, 发生轻微褶皱(图 3a), 大部分石榴混合花岗质岩石仍然保留近水平的似层状特征(图 3b), 漂浮在紫苏花岗质片麻岩或麻粒岩系之上, 说明这类岩石是在近水平剪切构造变形过程中形成的。位于虎本汉沟东北的石榴混合花岗质岩石整体上与石榴黑云片麻岩无截然界线, 在结构构造、矿物组成上二者为渐变过渡关系, 未见侵入关系及接触变质、冷凝边结构; 而在二道脑包一带的石榴混合花岗质岩石, 与石榴黑云片麻岩在矿物组成上相似, 但

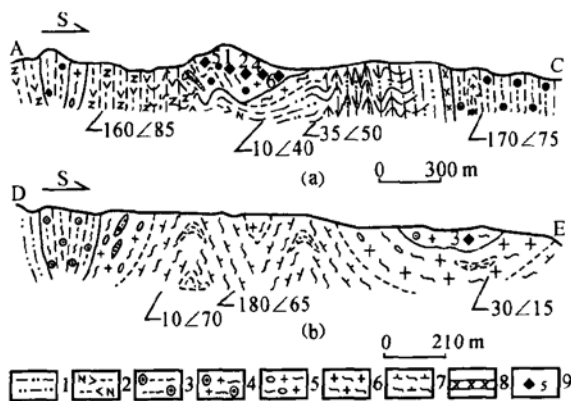


图 3 石榴混合花岗质岩石的产状

Fig. 3 Mode of occurrence of garnet migmatitic granite

1—麻粒岩; 2—黑云角闪斜长片麻岩; 3—石榴黑云片麻岩; 4—石榴混合花岗质岩石; 5—眼球状花岗质片麻岩; 6—紫苏花岗质片麻岩; 7—紫苏石英闪长质片麻岩; 8—辉绿岩脉; 9—取样位置及序号
 1—granulite; 2—biotite hornblende gneiss; 3—garnet biotite gneiss; 4—garnet migmatitic granite; 5—eye_shaped granitic gneiss; 6—charnockitic gneiss; 7—hypersthene quartz dioritic gneiss; 8—dia_base; 9—location and serial number of sampling site

二者之间的界线截然。石榴混合花岗质岩石与石榴黑云片麻岩显示出亲缘的关系。

石榴混合花岗质岩石中存在大量包体, 根据包体与寄主岩的关系, 可分为同源包体和异源包体。同源包体为石榴黑云片麻岩熔融残留的富含黑云母暗色体, 由大量黑云母和少量细粒长石、石英及石榴石组成, 多以 $1\text{ cm} \times 5\text{ cm} \sim 0.2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 不规则扁豆体产出, 长轴平行于寄主岩的片麻理, 或呈残影状散布在寄主岩石中, 与寄主岩石渐变过渡。异源包体包括磁铁石英岩和麻粒岩包体, 与寄主岩石界线截然: 磁铁石英岩包体呈细条带状, 为原石榴黑云片麻岩中的夹层; 麻粒岩包体呈钩状或透镜状产于石榴混合花岗质岩石边部, 较大, 最大可达 $30\text{ cm} \times 150\text{ cm}$, 包体的片麻理方位各异, 与寄主岩石的片麻理呈一定角度相交, 反映了熔体形成过程中的流动特征。

石榴混合花岗质岩石主要矿物组成与石榴黑云片麻岩相似, 均由长石、石英、黑云母及石榴石组成, 同时含有少量独居石、磷灰石及锆石等副矿物, 但二者在结构、构造上差别较大, 石榴混合花岗质岩石具有的中粗粒花岗变晶结构、块状构造(弱片麻状构造)与石榴黑云片麻岩具有的中细粒粒状变晶结构、条带状构造显著不同。野外和镜下观察结果表明, 这些石榴混合花岗质岩石的矿物成分变化较大, 结构构造也有较大差异。根据矿物含量及结构特征, 将石榴混合花岗质岩石分为 3 类。

第 1 类为石榴混合闪长岩(B7211_1、B7204_2), 石英含量较低, 小于 5%; 斜长石含量 $55\% \sim 60\%$; 石榴石含量较高, $35\% \sim 40\%$, 筛状变晶结构发育(图 4a), 包裹有石英、斜长石、黑云母及少量夕线石, 最大粒度 $7\text{ mm} \times 9\text{ mm}$, 与石榴黑云片麻岩中石榴石的特征一致, 说明是麻粒岩相变质作用过程中形成的; 黑云母含量变化较大, $1\% \sim 10\%$; 不均匀分布有独居石、磷灰石和锆石等副矿物; 岩石中同源包体含量较多, $20\% \sim 25\%$ 。

第 2 类为石榴混合石英闪长岩(D7204_2C、J7204_2a), 石英含量 $10\% \sim 15\%$; 长石类矿物含量 $52\% \sim 65\%$; 石榴石含量 $15\% \sim 20\%$, 可分为两类, 一类形态不规则, 具筛状变晶结构, 可能是变质石榴石, 另一类呈浑圆状或半自形粒状, 内部包晶很少(图 4b), 最大粒度 $4\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 可能是熔体结晶而成; 黑云母含量 $5\% \sim 10\%$, 以两种不同特征产出, 一类呈不规则片状, 红棕色, 解理不发育, 多以集合体形式产出, 粒径 $0.5\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$, 可能是石榴黑云片麻岩熔融过程中残留的黑云母, 另一类呈自形片状, 浅棕褐色, 解理发育, 粒径 $0.1\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$, 这类黑云母可能是从熔体中重新结晶形成; 同源包体含量 $10\% \sim 15\%$ 。

第 3 类为石榴混合花岗闪长岩(LH1、J7204-2b), 石英含量 $20\% \sim 25\%$; 长石类矿物 $55\% \sim 65\%$; 石榴石含量较低, $10\% \sim 15\%$, 多呈浑圆状或半自形粒状; 黑云母含量 5% 左右, 自形片状, 浅棕褐色, 解理发育; 该类岩石中同源包体规模极小, 含量在 5% 以下。

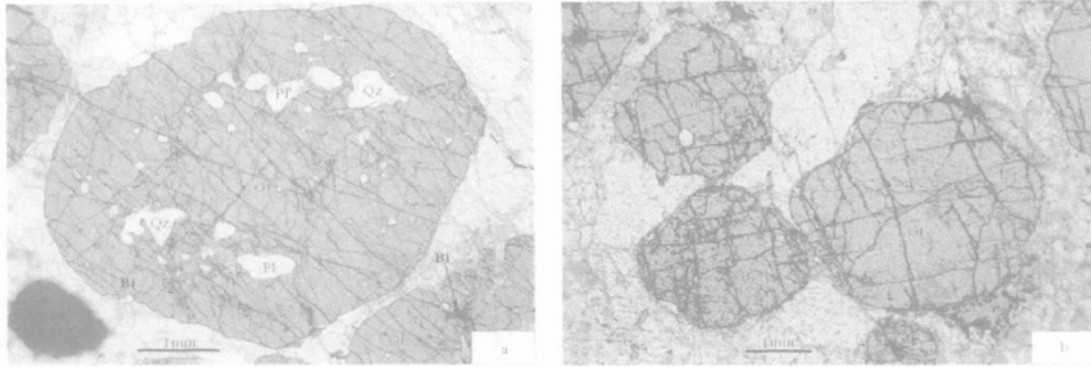


图4 石榴混合花岗质岩石中石榴石的特征(-)
Fig.4 Characteristics of garnet in garnet migmatitic granite (-)

上述3类石榴混合花岗质岩石在空间上密切共生,具有渐变过渡特征,其组成矿物特征和含量变化、内部同源包体含量变化及与石榴黑云片麻岩之间的关系反映其深熔成因,也表明区内石榴混合花岗质岩石的成熟度低,与桑干地区形成于古元古代的同类岩石(郭敬辉等,1999,2002)有着明显区别。

确定区内石榴混合花岗质岩石的形成时代不仅有助于讨论其形成过程,而且对讨论区内孔兹岩系的形成时代也有十分重要的意义。最近对石榴混合花岗质岩石中的锆石进行了SHRIMPUPb年龄测定,结果表明锆石具十分复杂的内部结构,核部锆石具岩浆环带,年龄2.5 Ga左右;幔部锆石为变质成因,年龄2.45 Ga;第1边部锆石未显示岩浆环带,但具有较高的Th/U值,年龄为2.4 Ga;第2边部锆石边十分窄,未获得可靠的年龄,虽为变质成因,但很可能不是1.8~1.9 Ga变质作用的产物(万渝生,2004,私人通信)。综合上述特征基本可以确定,石榴混合花岗质岩石可能形成于新太古代晚期。

3 石榴混合花岗质岩石地球化学特征

石榴混合花岗质岩石样品取自二道脑包东南和平方沟东北两个地点,富Al, A/NKC 介于1.32~1.59之间(表1),具有S型花岗岩特征。

石榴混合花岗质岩石的常量元素和微量元素分布特征与区内石榴黑云片麻岩十分相似,均有TiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO、Na₂O含量随SiO₂含量增加而减少的特征,并且二者的成分点相互重叠(图5);稀土元素均表现为轻稀土富集的特征[图6a,b,标准化值引自Boynnton(1984)];在微量元素蛛网图中,二者均亏损Sr、Nb、P、Ti[图7a,b,标准化值采用Pearce(1983)],表明石榴混合花岗质岩石在化学成分上对石榴黑云片麻岩的继承性,反映了二者之间的亲缘关系。

同时,石榴混合花岗质岩石与石榴黑云片麻岩也有明显的差异。化学成分上,石榴混合花岗质岩石可分为两种类型:低K₂O高Na₂O、CaO型和高K₂O低Na₂O、CaO型。前者为

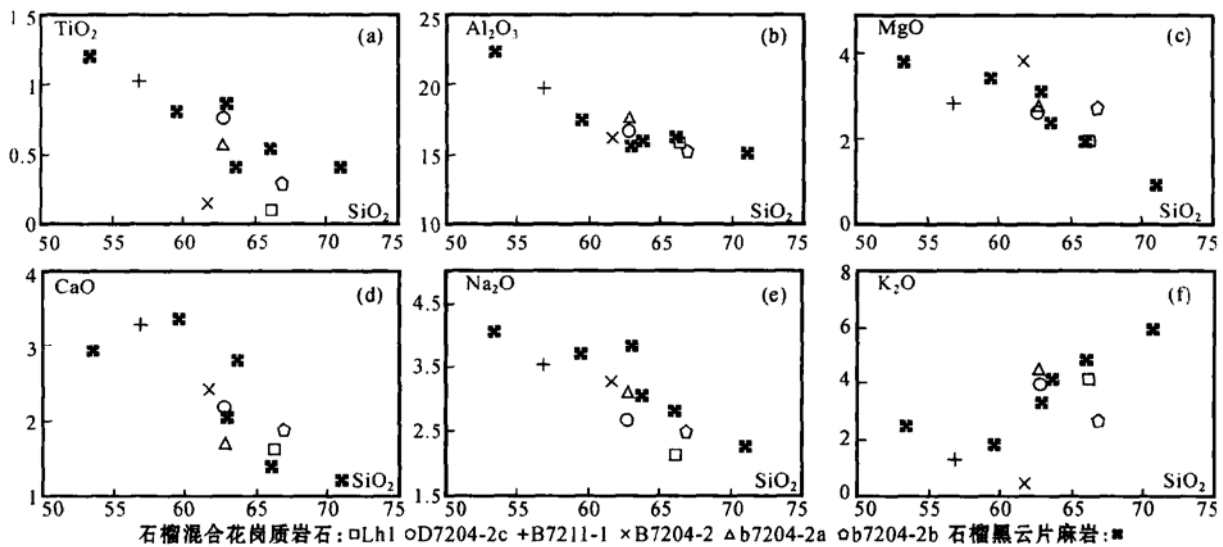


图5 石榴混合花岗质岩石与石榴黑云片麻岩的哈克图解
Fig.5 Harker diagram for major elements in garnet migmatitic granite and garnet biotite gneiss

表 1 石榴混合花岗质岩石及石榴黑云片麻岩常量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成
Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) in garnet migmatitic granite and garnet biotite gneiss

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
样品号	LH ₁	b7204_2b	D7204_2C	b7204_2a	B7204_2	B7211_1	2P ₁ b143_1	2P ₃ b15_1	B9175_1	2P ₃ b71_6	2P ₃ b2_1	Xh153
岩性	A	A	B	B	C	C	D	D	D	E	F	G
SiO ₂	66.20	66.89	62.70	62.75	61.64	56.84	63.70	66.08	62.99	53.42	71.02	59.51
TiO ₂	0.10	0.29	0.76	0.56	0.15	1.03	0.40	0.53	0.86	1.20	0.40	0.80
Al ₂ O ₃	15.90	15.10	16.70	17.50	16.20	19.70	15.96	16.20	15.62	22.40	15.04	17.57
Fe ₂ O ₃	0.58	0.66	1.03	0.34	1.02	1.19	3.24	0.35	1.04	0.68	0.16	1.30
FeO	6.32	6.23	5.90	5.45	11.20	8.78	3.97	4.17	3.84	6.56	2.03	6.32
MnO	0.09	0.07	0.06	0.05	0.12	0.11	0.09	0.12	0.08	0.12	0.05	0.07
MgO	1.94	2.71	2.61	2.74	3.81	2.83	2.36	1.95	3.09	3.79	0.90	3.41
CaO	1.61	1.87	2.18	1.68	2.42	3.28	2.80	1.39	2.04	2.93	1.21	3.39
Na ₂ O	2.13	2.48	2.68	3.08	3.25	3.52	3.06	2.83	3.84	4.06	2.27	3.70
K ₂ O	4.11	2.62	3.96	4.41	0.40	1.26	4.11	4.80	3.29	2.47	5.82	1.80
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.05	0.06	0.08	0.10	0.16	0.09	0.22	0.08	0.30	0.12
LOI	0.03	0.05	0.40	0.40	0.24	0.15	0.21	1.35	1.58	1.88	0.45	0.77
Total	99.08	99.02	99.04	99.04	100.53	98.80	100.06	99.87	98.49	99.59	99.65	98.76
La	44.08	41.39	51.20	52.97	44.98	177.60	104.00	63.00	37.20	65.10	95.30	51.10
Ce	66.74	66.55	78.90	79.91	86.48	379.20	199.00	120.00	55.90	130.00	194.00	96.60
Pr	7.73	7.39	8.59	8.72	11.03	49.95	24.50	14.50	6.49	15.10	23.40	11.00
Nd	24.55	23.05	28.10	27.59	40.01	175.90	82.70	49.40	29.90	51.60	78.70	48.30
Sm	4.35	3.98	4.12	4.11	7.91	23.32	11.60	7.80	4.53	8.26	12.40	9.19
Eu	3.26	2.86	2.99	1.58	1.13	1.83	2.20	1.74	0.98	2.42	1.70	1.59
Gd	6.37	5.79	4.58	4.55	8.66	13.05	10.40	7.46	3.27	8.53	10.10	6.13
Tb	1.43	1.24	0.94	0.91	1.57	1.90	1.17	0.88	0.39	1.03	0.99	0.88
Dy	10.37	9.21	6.85	5.81	9.40	9.49	4.96	3.87	2.16	4.73	3.40	4.88
Ho	2.37	1.81	1.31	1.04	1.80	1.70	1.08	0.82	0.40	0.98	0.54	1.02
Er	7.10	4.91	2.92	2.18	4.56	3.89	3.53	2.79	1.03	2.82	1.73	2.95
Tm	1.26	0.77	0.37	0.20	0.69	0.52	0.45	0.40	0.15	0.36	0.17	0.46
Yb	9.58	5.28	1.86	1.18	4.28	3.17	2.99	2.55	1.03	2.26	1.06	2.86
Lu	1.64	0.87	0.25	0.15	0.61	0.46	0.44	0.38	0.14	0.33	0.15	0.49
Sr	400.00	106.00	473.00	93.00	250.00	406.00	470.00	400.00	366.00	459.00	468.00	423.00
Rb	99.00	81.80	140.00	104.00	4.50	34.00	94.80	99.80	101.00	55.90	126.00	43.00
Ba	2379.00	885.00	1204.00	1472.00	114.00	258.00	1247.00	1148.00	966.00	945.00	1766.00	667.00
Th	5.20	6.20	5.20	7.20	7.80	57.00	26.80	23.40	1.50	4.53	30.60	3.30
Nb	1.90	4.50	11.00	9.50	3.10	13.00	30.20	38.20	20.10	35.10	30.80	67.00
Zr	175.00	294.00	214.00	152.00	212.00	91.00	238.00	196.00	209.00	260.00	328.00	255.00
Hf	4.70	10.00	4.40	4.40	6.00	2.00	5.10	7.80	10.00	3.00	10.50	6.70
Y	61.30	45.90	34.10	27.20	45.30	36.50	38.30	29.20	10.90	31.40	20.70	24.90
Cr	122.00	169.00	193.00	155.00	205.00	167.00	169.00	146.00	228.00	379.00	32.50	366.00
Na ₂ O+ K ₂ O	6.24	5.10	6.64	7.49	3.65	4.78	7.17	7.63	7.13	6.53	8.09	5.50
A/NKC	1.46	1.46	1.32	1.36	1.59	1.50	-	-	-	-	-	-
ΣREE	190.80	175.10	193.00	190.90	223.10	842.00	449.02	275.59	143.57	293.52	423.64	237.44
(La/Yb) _n	3.10	5.29	18.60	30.26	7.09	37.78	23.45	16.66	24.27	19.42	60.61	10.80
Eu* / Eu	1.89	1.82	2.10	1.30	0.42	0.29	0.60	0.69	0.74	0.88	0.45	0.61

注: 样品采样位置见图 2 3; A—石榴混合花岗闪长岩; B—石榴混合石英闪长岩; C—石榴混合闪长岩; D—石榴黑云二长片麻岩; E—夕线堇青石榴二长片麻岩; F—石榴黑云碱长片麻岩; G—夕线堇青石榴黑云斜长片麻岩; 常量和微量元素用 X 荧光光谱法测定, 稀土元素用等离子光谱法测定, 数据由武汉综合岩矿测试中心分析。

石榴混合闪长岩, 偏碱性, 在其低 K₂O 高 Na₂O .CaO 的同时, < FeO> .MgO .MnO 含量较高; 后者包括石榴混合石英闪长岩和石榴混合花岗闪长岩, 其 SiO₂ 含量较高, 高 K₂O 低 Na₂O .CaO, 并且< FeO> .MnO .MgO 含量偏低, 这与岩石中的矿物组成及含量变化相对应。但是, 这两类石榴混合花岗质岩石稀土元素分布型式和特征存在明显差异, 低 K₂O 高 Na₂O .CaO 的样品稀土元素总量高(ΣREE= 233.10 × 10⁻⁶

~ 842.00 × 10⁻⁶), 轻稀土元素富集, 具有明显的负 Eu 异常(0.29~ 0.42); 高 K₂O 低 Na₂O .CaO 的样品则相反, 稀土元素总量低(ΣREE= 175.10 × 10⁻⁶~ 193.00 × 10⁻⁶), 有明显的正 Eu 异常(1.30~ 2.10)。它们与石榴黑云片麻岩的稀土元素分配型式明显不同, 这意味着在深熔作用过程中地球化学成分尤其是稀土元素发生了重新调整。

普遍认为, 副矿物独居石、磷灰石、锆石及长石和石榴石

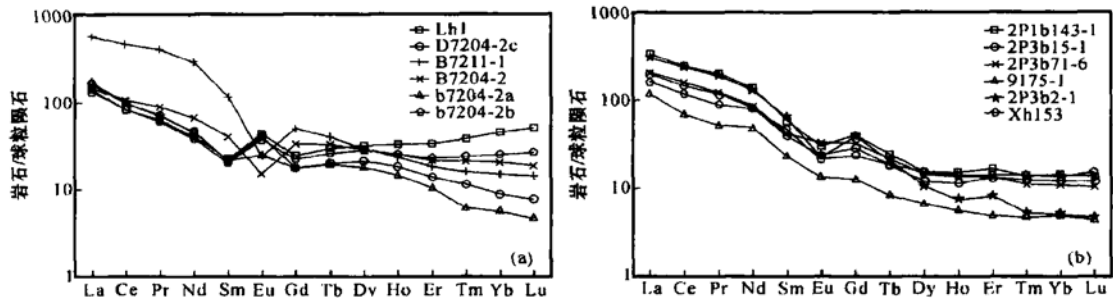


图6 石榴混合花岗质岩石(a)与石榴黑云片麻岩(b)稀土元素配分模式图

Fig. 6 Distribution of REE in garnet migmatitic granite (a) and garnet biotite gneiss (b)

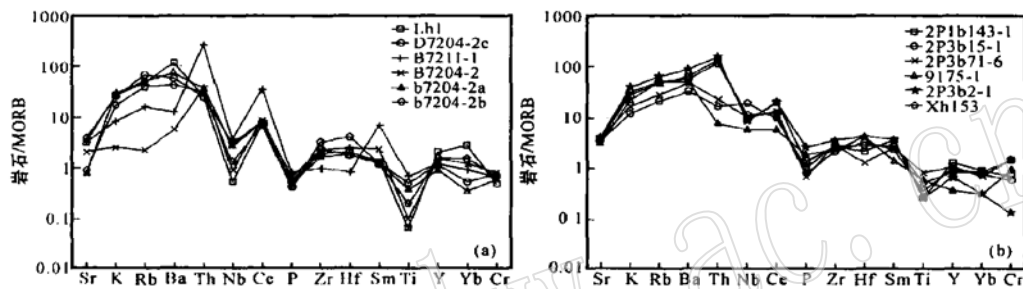


图7 石榴混合花岗质岩石(a)与石榴黑云片麻岩(b)微量元素蛛网图

Fig. 7 Multielement diagram for selected major and trace elements in garnet migmatitic granite (a) and garnet biotite gneiss (b)

共同控制着石榴混合花岗质岩石稀土元素的分布型式和特征。岩石中的 LREE 大量存在于独居石和磷灰石中, HREE 主要存在于石榴石、磷灰石和锆石中; 长石类矿物的聚集可能导致 Eu 的富集, 而独居石、磷灰石的聚集则可以导致 Eu 相对亏损, 还可导致稀土元素总量增高 (Ayes and Harris, 1997; Jung *et al.*, 2000; Johannes *et al.*, 2003)。因此低 K_2O 高 Na_2O 、 CaO 型石榴混合花岗质岩石中轻稀土元素富集、稀土元素总量较高的特征应与其独居石、磷灰石和石榴石的富集有关, 在该类岩石中大离子亲石元素 Th、元素 P 相对富集也明显反映了独居石、磷灰石含量较高; 而高 K_2O 低 Na_2O 、 CaO 型岩石明显呈正 Eu 异常, 反映了长英质矿物的相对富集, 当然也与独居石、磷灰石含量偏低有关, 突出了长石类矿物的作用, 与该类岩石偏酸性, 稀土元素总量偏低, $<FeO>$ 、 MgO 、 MnO 含量较低的特征相一致。

现有资料表明, 具有 SiO_2 含量低、轻稀土元素富集、稀土元素总量高、负 Eu 异常和 SiO_2 含量高、轻稀土元素相对亏损、稀土元素总量低、有明显正 Eu 异常的两类石榴混合花岗质岩石在纳米比亚的 Damara 中央造山带和芬兰南部的 Turku 地区也有发现, 后者被认为是前者分离结晶作用的产物 (Jung *et al.*, 2000), 分别代表了残留熔体和早期的长英质堆积体 (Johannes *et al.*, 2003)。区内两类石榴混合花岗质岩石与这两个地区的含石榴花岗岩有着明显的差别, 表现为: ①区内石榴混合花岗质岩石 SiO_2 含量低 (56.84% ~ 66.89%), 而上述两个地区的含石榴花岗岩 SiO_2 含量在 70% 以上; ②区

内石榴混合花岗质岩石具正 Eu 异常的样品中轻稀土元素富集程度明显高于上述纳米比亚和芬兰两个地区的含石榴花岗岩。本区石榴混合花岗质岩石的岩相学、地球化学特征更支持它们是熔体与残留体、残留矿物相逐渐分离的产物, 这是因为: ①据实验资料, MgO 、 FeO 在过铝花岗岩中的溶解度分别为 0.22% ~ 0.9% 和 1.27% ~ 3.01% (Jung *et al.*, 2000), 而区内石榴混合花岗质岩石中的 MgO 、 FeO 的含量分别在 1.94% ~ 3.81% 和 5.45% ~ 11.2%, 远远高于这一溶解度, 也说明它们中的镁铁质矿物至少有一部分不是熔体结晶的产物, 而是熔融过程中的残留矿物相; ②石榴混合花岗质岩石中具筛状变晶结构的石榴石、红棕色残片状黑云母以及同源包体从石榴混合闪长岩到石榴混合花岗闪长岩逐渐减少, 反映了熔体与残留体和残留矿物相的逐渐分离; ③区内的石榴混合闪长岩中的大离子亲石元素 K、Rb、Ba 明显亏损也意味着存在富 K 熔体的迁移。

4 结论

(1) 区内的石榴混合花岗质岩石是在麻粒岩相变质条件下, 在近水平剪切构造变形过程中由石榴黑云片麻岩部分熔融形成的, 形成于新太古代晚期;

(2) 区内石榴混合花岗质岩石在空间上与孔兹岩系中的榴云片麻岩岩组密切共生, 渐变过渡, 在矿物组成和地球化学特征上大体相似, 反映出它们对石榴黑云片麻岩的继承性;

(3) 区内石榴混合花岗质岩石的矿物成分、结构和地球化学特征极不均匀,反映了其成熟度低的特征。在化学成分上可分为高 K_2O 低 Na_2O 、 CaO , 稀土元素总量低, 正 Eu 异常和低 K_2O 高 Na_2O 、 CaO , 稀土元素总量高, 负 Eu 异常的两类石榴混合花岗质岩石, 这与部分熔融及随后的流动过程中熔体与残留体的逐渐分离有关。

致谢: 本文撰写过程中得到了吉林大学地球科学学院内蒙古大青山科研队老师的悉心指导, 审稿专家对本文提出了详尽的修改意见, 受益匪浅, 深表谢意。

Reference

- Ayres M and Harris N. 1997. REE fractionation and Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: constraints from Himalayan leucogranites[J]. *Chemical Geology Res.*, 139: 249~ 269.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Elsevier, 63~ 114.
- Chacko T, Ravindra kumar C R, Meen J K, *et al.* 1992. Geochemistry of high grade supracrustal rocks from the Kerala Khondalite belt and adjacent massif charnockites, South India[J]. *Precam. Res.*, 55: 469~ 489.
- Condie K C, Boryta M D, Liu J Z, *et al.* 1992. The origin of Khondalites: geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton[J]. *Precam. Res.*, 59: 207~ 203.
- Dong Qixian and Zhou Junchang. 1984. Stratigraphic distribution of the original Wula Shan Group in the Wula Mountains, Nei Mongol (Inner Mongolia) [J]. *Regional Geology of China.* (10): 21~ 37 (in Chinese).
- Guo Jinghui, Shi Xin, Bian Aiguo, *et al.* 1999. Pb isotopic composition of feldspar and U-Pb age of zircon from early Proterozoic granite in Sanggan area, North China craton: Metamorphism, crustal melting and tectono-thermal event[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 199~ 207 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo and Xu Ronghua. 2002. The age of large-scale granulite facies metamorphism in Sanggan area, North China: Geochronology of Zircon U-Pb[J]. *Science in China(Series D)*. 32(1): 10~ 18 (in Chinese).
- Jin Wei, Li Shuxun and Liu Xishan. 1992. A study on characteristics of early Precambrian high grade metamorphic rock series and their metamorphic dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica.* (3): 281~ 289 (in Chinese).
- Johannes W, Ehlers C, Kriegsman L M, *et al.* 2003. The link between migmatites and S_type granites in the Turku area, southern Finland [J]. *Lithos Res.*, 68: 69~ 90.
- Jung S, Hoernes S and Mezger K. 2000. Geochronology and petrogenesis of Pan-African, syn-tectonic, S_type and post-tectonic A_type granite(Namibia): products of melting of crustal sources, fractional crystallization and wall rock entrainment[J]. *Lithos Res.*, 50: 259~ 287.
- Li Jianghai, Qian Xianglin and Liu Shuwen. 1999. Geochemistry of khandalites from central portion of North China craton (NCC): implications for the continental cratonization in the NeoArchaean[J]. *Science in China(Series D)*, 29(3): 193~ 203 (in Chinese).
- Liu Xishan, Jin Wei and Li Shuxun. 1992. Low-pressure metamorphism of granulite facies in an Early Proterozoic orogenic event in Central Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 66(3): 244~ 256 (in Chinese).
- Lu Liangzhao, Xu Xuechun and Liu Fulai. 1996. The Early Precambrian Khondalite Series in North of China[M]. Changchun: Changchun Publishing House (in Chinese).
- Pearce J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[A]. Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Shiva, Nantwich, 230~ 249.
- Tao Jixiong and Hu Fengxiang. 2002. The formation of garnet-bearing migmatitic granite in Zhuozishan area, Inner Mongolia, China[J]. *Progress in Precambrian Research*, 25(1): 59~ 64 (in Chinese).
- Wan Yusheng, Geng Yuansheng, Shen Qihan, *et al.* 2000. Khandalite series- geochronology and geochemistry of the Jiehekou Group in Luliang area, Shanxi province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 49~ 58 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong and Yang Zhensheng. 2002. The strata texture of khondalite in Daqingshan area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth science edition)*, 32(4): 313~ 318 (in Chinese).
- Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong and Yang Zhensheng. 2003. The discovery of Zaoergou angular unconformity and establishment of Meidaizhao Group- complex in Daqing Mountains, Inner Mongolia - Paleoproterozoic Low grade metamorphic strata on the Khondalite series[J]. *Geological Bulletin of China*. 22(7): 480~ 486 (in Chinese).

附中文参考文献

- 董启贤, 周俊昌. 1984. 内蒙古乌拉山区原乌拉山群地层划分新议 [J]. *中国区域地质*, (10): 21~ 37.
- 郭敬辉, 石 昕, 卞爱国, 等. 1999. 桑干地区早元古代花岗岩长石 Pb 同位素组成和锆石 U-Pb 年龄: 变质与地壳熔融作用及构造-热事件演化[J]. *岩石学报*, 15(2): 199~ 207.
- 郭敬辉, 翟明国, 许荣华. 2002. 华北桑干地区大规模麻粒岩相变质作用的时代: 锆石 U-Pb 年代学[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(1): 10~ 18.
- 金 巍, 李树勋, 刘喜山. 1992. 内蒙大青山地区早前寒武纪高级变质岩系特征和变质动力学[J]. *岩石学报*, (3): 281~ 289.
- 李江海, 钱祥麟, 刘树文. 1999. 华北克拉通中部孔兹岩系的地球化学特征及其大陆克拉通意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 29(3): 193~ 203.
- 刘喜山, 金 巍, 李树勋. 1992. 内蒙古中部早元古代造山事件中麻粒岩相低压变质作用[J]. *地质学报*, 66(3): 244~ 256.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系 [M]. 长春: 长春出版社.
- 陶继雄, 胡凤翔. 2002. 内蒙卓资山地区深熔作用形成的石榴混合花岗岩[J]. *前寒武纪研究进展*, 25(1). 59~ 64.
- 万渝生, 耿元生, 沈其韩, 等. 2000. 孔兹岩系—山西吕梁地区界河口群的年代学和地球化学[J]. *岩石学报*, 16(1): 49~ 58.
- 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 2002. 内蒙古大青山地区孔兹岩系的地层结构[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 32(4): 313~ 318.
- 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 2003. 内蒙古大青山地区枣儿沟角度不整合的发现与美岱召岩群的建立——孔兹岩系之上的古元古代浅变质地层[J]. *地质通报*, 22(7): 480~ 486.