

北京云蒙山浅色花岗岩脉及韧性剪切变形的地球化学特征

曾令森, 张建新, 许志琴, 邱小平

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:对云蒙山地区的花岗岩、糜棱岩化花岗岩及周围太古宙花岗片麻岩中的浅色花岗岩脉的主要及稀土元素地球化学研究结果表明:与未糜棱岩化花岗岩相比,浅色花岗岩脉具有较低的 LREE 和 P_2O_5 含量及 $(La/Gd)_N$ 比值, Sm/Nd 比值较高,而剪切应变岩石的 LREE 相对富集。糜棱岩化花岗岩具有近平行于未糜棱岩化花岗岩的稀土元素配分模式,浅色花岗岩脉 BH-2-5 和 BH-2-6 具有和未糜棱岩化花岗岩相似的重稀土元素配分模式;浅色花岗岩脉 BH-2-3 的稀土元素配分模式和所有分析的样品都不一样,推断 BH-2-3 有可能是古老变质岩部分熔融的产物。在部分熔融过程中,诸如独居石这样的富含轻稀土元素的副矿物以残留体的形式出现,不参与部分熔融,导致 BH-2-3 具有很低的 LREE 和 P_2O_5 含量及高达 0.412 2 的 Sm/Nd 比值。而其他两条浅色花岗岩脉有可能是云蒙山花岗岩后期岩浆分异的产物,随分异程度的增强和富含轻稀土元素的副矿物的分离结晶作用,导致最后岩浆的 SiO_2 增高、LREE 含量减少及 Sm/Nd 比值发生变化。

关键词:云蒙山花岗岩,部分熔融,稀土元素地球化学,韧性剪切变形

中图分类号:P588.12⁺1;P595;P542

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2006)03-0203-07

Geochemical characteristics of leucogranitic dikes and sheared granites in the Yunmeng Mountains, northeastern Beijing

ZENG Ling-sen, ZHANG Jian-xin, XU Zhi-qin and QIU Xiao-ping

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on a detailed structural analysis and a preliminary study of major and rare earth elements in a suite of undeformed granites, mylonitized granites and leucogranitic dikes within the Yunmeng Mountains of northeastern Beijing, the authors have reached some conclusions: with increasing shear strain, SiO_2 decreases whereas Al_2O_3 , TiO_2 , H_2O , and LREE increase in mylonitized granites; compared with the undeformed granite, the leucogranitic dikes have lower LREE and P_2O_5 contents and $(La/Gd)_N$ ratios, but elevated Sm/Nd ratios; and the REE distribution patterns of the mylonitized granites are parallel to the pattern of the undeformed granite, whereas the HREE distribution pattern of leucogranitic dike BH-2-5 and BH-2-6 is similar to that of the undeformed granite; the REE distribution pattern of BH-2-3 differs however from the patterns of all the other samples. The major and rare earth element geochemistry of BH-2-3 suggests that it was derived from partial melting of ancient metamorphic rocks. In such partial melting reactions, accessory phases that concentrated LREE like monazite occurred as residue phases, which resulted in extremely low LREE and P_2O_5 contents and elevated Sm/Nd ratios in the melts. The other two leucogranitic dikes may represent the latest crystallization differentiation product of the Mesozoic Yunmeng Mountain granites. The increasingly intense crystallization differentiation of a granitic magma resulted in the elevated SiO_2 and lowered LREE contents as well as the variation of Sm/Nd

收稿日期:2005-01-15;修订日期:2006-01-04

基金项目:国土资源部百名优秀青年科技人才计划资助;科技部973基础研究资助项目(2003CB716504)

作者简介:曾令森(1970-),男,博士,副研究员,主要从事构造地质学、地球化学及构造地貌学的研究,E-mail:lzeng@ccsd.cn

ratios in the final silica saturated products.

Key words: Yunmengshan granite; partial melting; rare earth element geochemistry; ductile shear deformation

大量的研究表明变形、变质及岩浆作用是密不可分的,这三者之间存在复杂的相互作用及反馈关系(Wickham, 1987; Handy, 1990, 1994; 曾令森等, 1996a, 1996b, 2004; 李海兵等, 1997; Handy *et al.*, 1999; Zeng and Saleeby, 2003)。例如,部分熔融作用导致原为固态的岩石成为固-熔体两相共存体系,熔体的出现严重影响其流变学性质及变形分解的样式(Handy *et al.*, 1999; Zeng and Saleeby, 2003; 曾令森等, 2004)。如何通过野外观测、地球化学分析、岩相学观察及理论模拟来深化认识这种复杂系统已成为现今构造物理学的前沿课题。另一方面,应变岩石的地球化学特征怎样随韧性剪切应变强度的变化而变化也是构造地质学中的一个重要课题。例如,在苏鲁超高压变质地体中,大多数榴辉岩都经历了强烈的剪切应变和流体作用。要可靠地恢复它们原岩的地球化学特征,需要事先了解剪切变形中流体及元素的迁移过程以及剪切应变和流体在榴辉岩地球化学特征形成中的作用。

浅色花岗岩脉在高级变质岩区和大型花岗岩岩体中非常常见。同构造的浅色花岗岩常常被作为确定构造变形时限和变形构造特征的一种重要地质体。这些花岗质岩脉可能是地壳重熔或岩浆后期分异的产物,研究浅色花岗岩的元素及同位素地球化学特征可以提高对地壳重熔或岩浆后期分异过程的认识,如地壳重熔是以什么样的部分熔融反应进行,岩浆分异中什么矿物在起控制作用。

前人对北京云蒙山花岗岩穹隆的研究主要有两种观点:热穹隆引起的滑覆构造(Zheng *et al.*, 1988; 王玉芳等, 1989; 张建新等, 1997)与河防口-水峪伸展型韧性剪切带相关的变质核杂岩(Davis *et al.*, 1996)。围绕花岗岩穹隆分布的太古宙及中新元古代岩石受云蒙山花岗岩侵位的影响,发生强烈的混合岩化作用,沿片理及片麻理发育大量的浅色花岗岩脉。目前对这些浅色花岗岩脉的成因及其意义缺乏深入的研究。河防口-水峪伸展型韧性剪切带是发育于云蒙山花岗岩闪长岩中一条大型伸展型韧性剪切带(图 1),宽近 1 km,该剪切带的岩性比较单一,但应变强度递进变化明显,是探讨应变岩石的地球化学特征与韧性剪切强度变化之间对应关系的理想野外实验室。张建新等(1997)对云蒙山的河防口

-水峪伸展型韧性剪切带的构造变形特征做了详细的野外、岩石学及显微构造研究和测试。分析结果表明,受下盘花岗岩的影响,韧性剪切带的变形条件从高温→中高温→中温→中低温转化。这些变形构造研究结果为探讨剪切应变对应变岩石地球化学特征的影响提供了基础。笔者试图通过对云蒙山地区的花岗岩、糜棱岩化花岗岩及周围太古宙花岗岩片麻岩中的浅色花岗岩脉的主要及稀土元素地球化学研究,在微构造分析的基础上,探讨韧性剪切变形对岩石的地球化学特征的影响。

1 地质背景及样品描述

云蒙山地区位于华北克拉通北缘,属于燕山造山带的一部分。主要以云蒙山早白垩世花岗岩为主体,周围由太古宙花岗岩片麻岩、中新元古代及古生代碳酸岩和碎屑岩以及侏罗纪的火山岩和火山碎屑岩组成(图 1)。云蒙山花岗岩穹隆为总体呈 SW-NE 向展布的不规则椭圆形,长约 25 km,宽约 12 km。采用不同的地质年代学系统($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、锆石 SHRIMP U/Pb 等)对云蒙山花岗岩的定年结果表明云蒙山花岗岩形成于 151~142 Ma 之间(Davis *et al.*, 1996; 刘翠等, 2004)。

为探讨剪切应变强度对应变岩石地球化学特征的影响,对小水峪韧性剪切带剖面进行了系统采样。从西到东,样品依次为 BH-1、BH-3-9、BH-4-3 和 BH-2-7。BH-1 为非糜棱岩化的花岗岩,主要组成矿物为石英、钾长石、斜长石和白云母,含少量磷灰石和锆石。BH-3-9 为糜棱岩化花岗岩,具不对称眼球构造、钾长石和斜长石碎斑,石英细粒化,局部保留有石英碎斑, S-C 组构发育,主要矿物为石英、钾长石、斜长石和白云母,含少量磷灰石和锆石。BH-4-3 为糜棱岩,糜棱岩化程度明显高于 BH-3-9,具不对称眼球构造,与 BH-3-9 相比,钾长石和斜长石碎斑晶减少,石英亚颗粒区域增大,碎斑晶的粒度减小,主要矿物为石英、钾长石、斜长石和白云母,含少量的磷灰石和锆石。BH-2-7 为初糜棱岩,具不对称眼球构造, S-C 组构发育,与 BH-4-3 相比,石英细粒化进一步增强,亚颗粒发育,钾长石和斜长石碎斑晶进一步减少,基本不见石英碎斑。另外,笔者在四合堂和水仙神坛

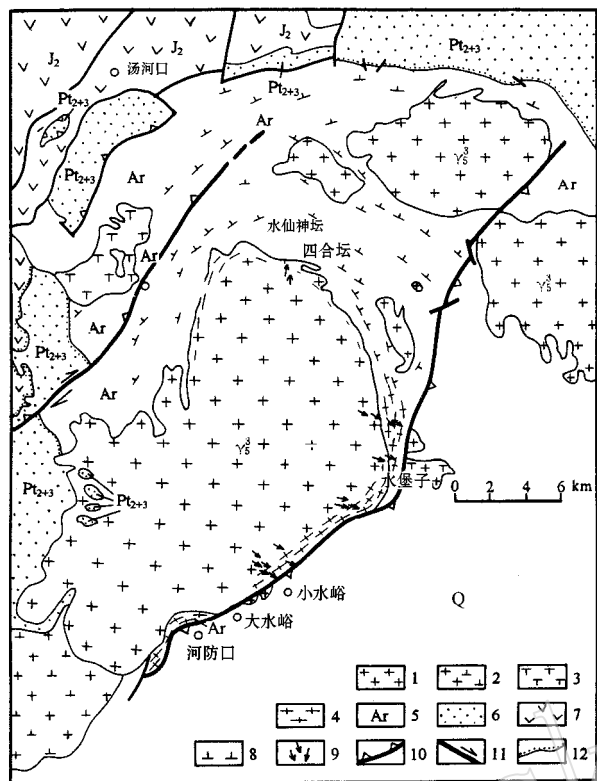


图1 北京云蒙山地区构造地质略图(据张建新等,1997)
Fig. 1 Simplified geologic map of the Yunmeng Mountains, Beijing (after Zhang Jianxin *et al.*, 1997)

1—花岗岩;2—花岗闪长岩;3—闪长岩;4—糜棱岩带;5—太古宙片岩和片麻岩;6—中元古代碳酸岩及碎屑岩;7—中侏罗世火山岩及火山碎屑岩;8—片理及片麻理;9—拉伸线理;10—正断层;11—走滑断层;12—不整合

1—granite; 2—granodiorite; 3—diorite; 4—mylonite zone; 5—Archean schist and gneiss; 6—Middle Proterozoic carbonate and clastic rock; 7—Middle Jurassic volcanic and pyroclastic rock; 8—schistosity and gneissosity; 9—stretching lineation; 10—normal fault; 11—strike-slip fault; 12—unconformity

采集了侵入到太古宙黑云母花岗岩片麻岩中的浅色花岗岩脉。BH-2-3 采自四合堂, BH-2-5 和 BH-2-6 采自水仙神坛。这些浅色花岗岩脉的宽度为 10~20 cm, 主要由石英、钾长石和斜长石组成, 具有典型的花岗变晶结构。

2 分析数据

笔者采集了新鲜且具代表性的岩石样品进行元素地球化学的分析。所取样品的主要及稀土元素的测试在国土资源部国家地质实验测试中心进行。主要元素通过 XRF (X 荧光光谱仪, 3080E) 方法测试, 分析精度为 5%。微量元素和稀土元素通过等离子质谱仪 (ICP-MS-Excell) 分析, 含量大于 10×10^{-6} 的

元素的测试精度为 5%, 而小于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 10%。个别元素 (Ho, Tm, Lu) 在一些样品中的含量很低, 测试误差大于 10%。测试结果见表 1。

与未变形的花岗岩 (BH-1) 相比, 糜棱岩化花岗岩具有较高的 Al_2O_3 (15.87%~16.90%)、 TiO_2 (0.20%~0.37%)、 Na_2O (5.17%~5.44%) 和 H_2O (0.40%~0.90%) 含量及较低的 SiO_2 含量 (68.20%~70.52%)。浅色花岗质脉具有较低的 Al_2O_3 (13.43%~14.24%)、 TiO_2 (0.03%~0.06%) 及较高的 SiO_2 (74.98%~76.41%) 和 K_2O (3.80%~4.34%) 含量 (图 2 和图 3, 表 1)。糜棱岩化花岗岩, LREE 含量为 99.4×10^{-6} ~ 173.0×10^{-6} , 明显高于未变形的云蒙山花岗岩的 85.8×10^{-6} 。样品 BH-2-3、BH-2-5 和 BH-2-6 相对于未变形的云蒙山花岗岩, 轻稀土元素相对亏损, 含量为 14.71×10^{-6} ~ 31.21×10^{-6} 。样品 BH-2-3 的 $(\text{La}/\text{Gd})_N$ 值为 1.47, 远低于其他两条花岗岩脉 (分别为 6.82 和 8.68) (表 1)。浅色花岗质脉的 Sm/Nd 比值为 0.163 6~0.412 2, 明显高于未变形的云蒙山花岗岩的 0.152 7 及糜棱岩化花岗岩的 0.149 4~0.163 2。

3 讨论

3.1 浅色花岗岩的成因

在典型的花岗岩地区, 花岗岩的热侵位往往导致表壳岩或先前变质岩的局部熔融, 产生浅色花岗岩体或岩脉。而花岗岩本身的后期岩浆分异也可以产生浅色花岗岩体, 侵位于围岩之中。通过对比邻近岩体的地球化学特征、浅色花岗岩脉的稀土元素地球化学特征可判别云蒙山浅色花岗岩的成因。由于磷灰石或独居石在地壳深融过程中常常以残留体的形式出现, 先前岩石的深融作用产生的浅色花岗岩岩浆往往具有轻稀土相对亏损的特征。磷灰石普遍具有上拱或近水平的 REE 配分模式 (Bea *et al.*, 1994, Ayres and Harris, 1997) 及高于全岩的 Sm/Nd 比值, 而独居石具有强烈 LREE 富集及低于全岩的 Sm/Nd 比值等特征。所以这两种矿物在花岗质岩浆的地球化学特征形成中所赋予的特征很不一样, 可以根据全岩 REE 地球化学特征来探讨其可能的成因模式。在部分熔融过程中, 受熔融反应时的温压条件及原岩的矿物组合影响, 轻稀土富集的副矿物 (如独居石) 有可能不参与部分熔融 (Zeng *et al.*, 2005a, 2005b), 或者参与花岗岩岩浆后期的分异作

表 1 北京云蒙山花岗岩、糜棱岩化花岗岩及花岗岩脉的主要及稀土元素组成

Table 1 Major and rare earth element compositions of undeformed granite, mylonitized granites, and leucogranitic dikes from the Yumeng Mountains, Beijing

样品	BH-1	BH-3-9	BH-4-3	BH-2-7	BH-2-3	BH-2-5	BH-2-6
$w_B/\%$							
SiO ₂	72.38	70.52	70.44	68.20	75.28	74.98	76.41
TiO ₂	0.18	0.32	0.20	0.37	0.03	0.06	0.06
Al ₂ O ₃	15.43	15.87	16.42	16.90	14.24	14.13	13.43
FeO	0.65	0.99	0.38	1.49	0.07	0.09	0.07
Fe ₂ O ₃	0.87	1.46	1.12	1.12	0.68	0.78	0.81
MnO	0.05	0.09	0.06	0.07	0.10	0.04	0.05
MgO	0.24	0.45	0.23	0.65	0.01	0.04	0.03
CaO	1.56	1.43	1.27	2.38	0.99	1.02	0.87
Na ₂ O	5.02	5.31	5.17	5.44	5.09	4.33	4.37
K ₂ O	3.57	3.42	4.19	3.33	3.80	4.34	4.22
P ₂ O ₅	0.07	0.12	0.06	0.14	0.01	0.02	0.01
H ₂ O ⁺	0.36	0.64	0.90	0.40	0.08	0.10	0.22
CO ₂	0.05	0.05	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03
Total	100.43	100.67	100.49	100.51	100.41	99.95	100.58
$w_B/10^{-6}$							
La	23.99	35.28	25.43	47.32	2.98	8.01	6.69
Ce	38.18	56.12	48.04	78.08	4.86	13.42	11.73
Pr	4.13	6.13	4.20	8.18	0.69	1.54	1.32
Nd	15.00	23.47	16.72	30.79	2.96	5.52	4.28
Sm	2.29	3.83	2.55	4.60	1.22	1.34	0.70
Eu	0.61	0.90	0.68	1.13	0.29	0.39	0.20
Gd	1.55	2.83	1.81	2.88	1.71	0.99	0.65
Tb	0.17	0.34	0.21	0.34	0.30	0.14	0.08
Dy	0.73	1.65	0.95	1.58	2.03	0.77	0.35
Ho	0.16	0.33	0.18	0.33	0.48	0.21	0.10
Er	0.38	0.80	0.45	0.85	1.24	0.40	0.23
Tm	0.05	0.09	0.06	0.11	0.19	0.05	0.03
Yb	0.30	0.55	0.39	0.59	1.28	0.37	0.21
Lu	0.04	0.08	0.06	0.09	0.18	0.05	0.03
Y	3.31	7.50	4.40	7.16	12.95	3.79	2.05
Sc	1.60	2.27	1.63	2.24	1.41	1.07	0.67
(Na+K)/Al	1.15	1.11	1.08	1.25	1.13	1.10	1.11
Sm/Nd	0.152 7	0.163 2	0.152 5	0.149 4	0.412 2	0.242 8	0.163 6
LREE	85.75	128.56	99.43	172.98	14.71	31.21	25.57
Eu/Eu*	1.002 0	0.846 0	0.979 5	0.960 8	0.621 4	1.047 9	0.917 6
(La/Gd) _N	13.05	10.51	11.85	13.85	1.47	6.82	8.68

Eu/Eu* = (Eu)_N / [(Sm)_N × (Gd)_N]^{1/2}; N—球粒陨石标准化, 标准化值来源于 Anders and Grevesse (1989)

用, 导致最终熔体的轻稀土元素严重亏损、P₂O₅ 含量降低及 Sm/Nd 比值的相对升高。

样品 BH-2-3 具有独特的稀土元素地球化学特征, 表现在:(La/Gd)_N 值很低, 为 1.47, 远低于其他花岗岩脉(表 1); P₂O₅ 含量很低(0.01%)(图 2); 具有区别于其他样品(BH-2-5 和 BH-2-6)的平缓的 REE 分配模式(图 4); Sm/Nd 值高达 0.412 2, 远远高于其他样品。这些特征说明其来源与其他两条花岗岩脉不一样, 有可能代表着古老变质岩部分熔融

的产物, 且独居石没有参与部分熔融作用。该推论与刘翠等(2004)认为云蒙山花岗岩具有来自古老片麻岩的贡献相一致。而其他两条花岗岩脉具有和 BH-1 相似的重稀土元素配分模式(图 4), 但它们的轻稀土元素含量分别为 31.21 × 10⁻⁶ 和 25.57 × 10⁻⁶, 低于 BH-1 的 85.75 × 10⁻⁶ 相对亏损。同时, 它们的 P₂O₅ 含量也低于 BH-1(图 3)。这种 P₂O₅、LREE 和 Sm/Nd 之间的相互关系(图 3)可能反映了云蒙山花岗岩岩浆受诸如独居石这样的 LREE 强烈

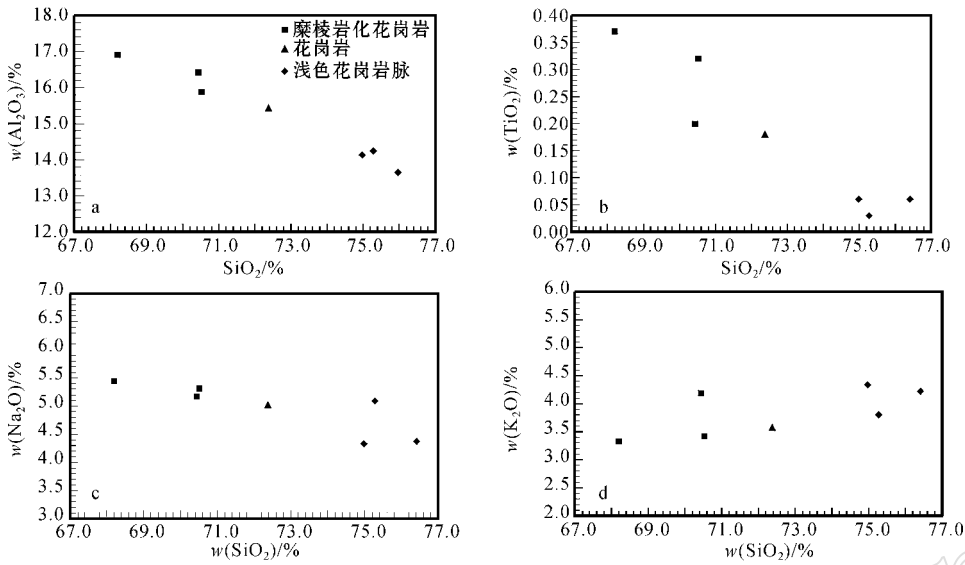


图 2 主要元素与 SiO₂ 含量之间的关系图

Fig. 2 Plots showing the correlation between major element and SiO₂ composition

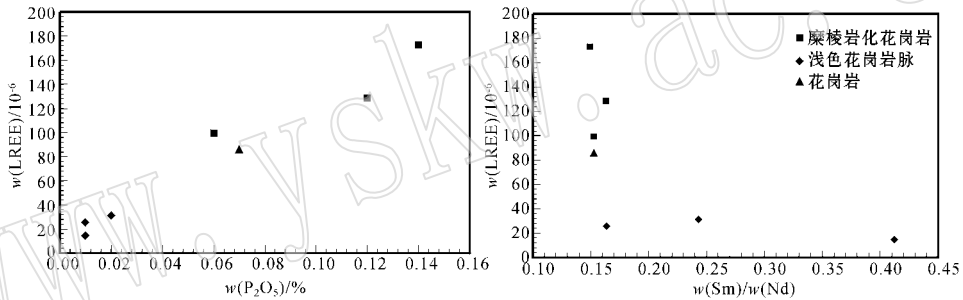


图 3 LREE 含量与 P₂O₅ 及 Sm/Nd 值之间的关系

Fig. 3 Diagrams showing the correlation between LREE contents and P₂O₅ and Sm/Nd ratios

富集的副矿物分异作用的影响,在岩浆演化后期产生类似于 BH-2-5 和 BH-2-6 这样的花岗岩岩浆,侵入到周围的片麻岩中。

3.2 剪切应变与变形岩石的地球化学

应力作用不仅可以导致岩石和矿物发生强烈的构造变形,而且还促进流体的迁移及水岩化学反应。这种机械-化学耦合作用导致强烈应变岩石的地球化学成分发生有规律的变化。有限的观测数据表明糜棱岩化过程中,几乎所有的主要元素和某些微量元素可以被活化而发生迁移(Dickin, 1988; O'hara and Blackburn, 1989; Selverstone *et al.*, 1991; Tobisch *et al.*, 1991)。但前人研究得出的结果往往互相矛盾,缺乏统一的理论解释。

根据剪切变形中体积的变化,剪切带可以分为体积丢失、等体积和体积增加3种类型(Ramsay,

1980; O'Hara and Blackburn, 1989; Bailey *et al.*, 1994)。在同一条剪切带中,可见有的段体积丢失而另外的段体积增加的现象。体积变化可能导致剪切带不同段的 REE 相对富集或亏损。Condie 和 Sinha (1996)对美国阿巴拉契亚山脉中的 Brevard 剪切带及 Hope Valley 剪切带的研究得出:由于剪切变形导致的体积损失,Brevard 剪切带中超糜棱岩的 REE 含量相对于未变形的原岩增加,但 REE 总体模式并没有改变,而在 Hope Valley 剪切带中,REE 含量随变形程度的增强而减少,反映了变形过程中副矿物(褐帘石或磷灰石)和剪切变形过程中的流体发生反应,丢失了部分 REE。Lange 等(2002)对波兰的一条角闪岩相韧性剪切带的研究得出:剪切变形并不影响变形岩石的主要元素化学成分,但导致 LREE 含量升高。这些说明了韧性剪切变形过程中应变岩

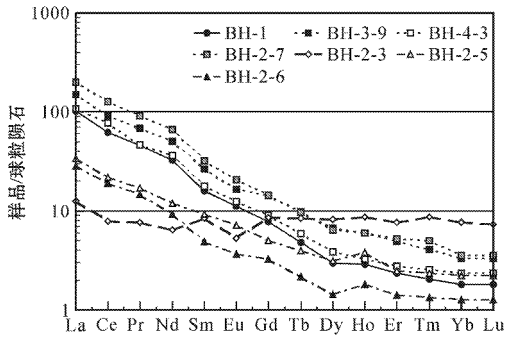


图 4 样品的稀土元素配分图解

Fig. 4 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns of samples

球粒陨石标准化数据据 Anders and Grevesse(1989)

Chondritic normalization values from Anders and Grevesse(1989)

石具复杂的地球化学过程。

野外及微构造观察结果表明,随着样品 BH-1、BH-3-9、BH-4-3 和 BH-2-7 离剪切带中心越来越近,剪切应变强度逐渐增强。和非糜棱岩化的花岗岩(BH-1)相比,糜棱岩化的花岗岩(BH-3-9、BH-4-3 和 BH-2-7)具有逐渐降低的 SiO_2 含量,但具有较高的 Al_2O_3 、 Na_2O 、 H_2O 和 LREE 含量(表 1 和图 4)。上官志冠等(1985)对云蒙山的河防口-水峪伸展型韧性剪切带的大水峪剖面做了主要元素的测试,认为随剪切强度的增强,含水矿物黑云母趋于减少,糜棱岩中 SiO_2 含量增加, Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 含量减少。笔者在小水峪剖面的测试结果并不支持他们的结论。这种不一致性也说明了在该韧性剪切带的剪切变形过程中较复杂的元素地球化学行为,其原因可能为:原岩成分的不均一、剪切变形中体积变化的差异性,或剪切变形中流体成分及行为的不同。虽然他们对云蒙山的河防口-水峪伸展型韧性剪切带的 4 条构造剖面进行了详细的氧同位素研究,并将观测结果解释为构造变形所致,但还是不能排除流体作用的可能性。两者的测试结果有可能反映了同一条韧性剪切带在地球化学行为上具有分段性。

到目前为止,剪切变形作用中应变岩石元素地球化学行为的研究还远远不足以提出一个普适性的模型。应变岩石的主要元素地球化学行为主要受造岩矿物控制,而稀土元素及某些微量元素主要赋存于副矿物中,这些副矿物在剪切变形中的地球化学行为是决定应变岩石的稀土及某些微量元素地球化学特征的主要因素。如何在应力条件下的热力学模型中加入副矿物的溶解动力学内容,是未来的研究方向。

4 结论

笔者研究结果表明,随剪切强度的增大,云蒙山地区糜棱岩化花岗岩的 SiO_2 含量减少, Al_2O_3 、 TiO_2 、 H_2O 、LREE 的含量增加;与未糜棱岩化花岗岩相比,浅色花岗岩脉具有较低的 LREE 和 P_2O_5 含量及 $(\text{La}/\text{Gd})_N$ 比值,及较高的 Sm/Nd 比值,高于未糜棱岩化花岗岩的 0.1527,糜棱岩化花岗岩具有近平行于未糜棱岩化花岗岩的稀土元素配分模式,而浅色花岗岩脉 BH-2-5 和 BH-2-6 具有和未糜棱岩化花岗岩相似的重稀土元素配分模式,BH-2-3 具有很低的 LREE(14.71×10^{-6})和 P_2O_5 含量(0.08%)及高达 0.4122 的 Sm/Nd 比值,其稀土元素配分模式和所有样品都不一样,推断 BH-2-3 可能是古老变质岩的部分熔融产物,富含轻稀土元素的副矿物以残留体的形式出现,不参与部分熔融,其他两条浅色花岗岩脉有可能是云蒙山花岗岩后期岩浆分异的产物,随岩浆分异程度的增强,富含轻稀土元素的副矿物的结晶沉淀导致所得岩浆的 SiO_2 增高、LREE 含量减少及 Sm/Nd 比值的变化。

致谢 感谢审稿专家对本文提出的建设性评审意见,让笔者受益匪浅。

References

- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and Solar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 197-214.
- Ayres M and Harris N. 1997. REE fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: constraints from Himalayan leucogranites [J]. *Chemical Geology*, 139: 249-269.
- Bailey C M, Simpson C and De Page D G. 1994. Volume loss and tectonic flattening in granitic mylonites from Blue Ridge province, central Appalachians [J]. *Journal of Structural Geology*, 16: 1403-1416.
- Bea F, Pereira M D and Stroth A. 1994. Mineral/leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study) [J]. *Chemical Geology*, 117: 291-312.
- Condie K C and Sinha A K. 1996. Rare earth and other trace element mobility during mylonitization: a comparison of the Brevard and Hope Valley shear zones in the Appalachian Mountains, USA [J]. *Journal of metamorphic Geology*, 14: 213-226.
- Davis G A, Qian X, Zheng Y, et al. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: a metamorphic core complex north of Beijing, China [A]. Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Evolution of Asia* [C]. Cambridge University Press, 253-279.

- Dickin A P. 1988. Evidence for limited REE leaching from the Roffna Gneiss, Switzerland—a discussion of the paper by Vocke, *et al.* (1987) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 273~275.
- Handy M R. 1990. The solid-state flow of polymineralic rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 95: 8467~8661.
- Handy M R. 1994. The energetics of steady state heterogeneous shear in mylonitic rock [J]. *Materials Science and Engineering*, A175: 261~272.
- Handy M R, Wissing S and Streit J E. 1999. Strength and structure of mylonite with combined frictional-viscous rheology and varied biminerale composition [J]. *Tectonophysics*, 303: 175~192.
- Lange U, Bröcker M, Mezger K *et al.* 2002. Geochemistry and Rb-Sr geochronology of a ductile shear zone in the Orlica-Sudety dome (West Sudetes, Poland) [J]. *International Journal of Earth Science*, 91: 1005~1016.
- Li Haibing, Zeng Lingsen and Xu Zhiqin. 1997. Porphyroblast growth and evolution of the inclusion trails in the Toule Ranch ductile shear zone, Qilian Shan, West China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32: 181~192 (in Chinese).
- Liu Cui, Deng Jinfu, Su Shangguo, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP dating of Yunmengshan gneissic granite and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23: 141~146 (in Chinese).
- O'Hara K and Blackburn W H. 1989. Volume-loss model for trace-element enrichments in mylonite [J]. *Geology*, 17: 524~527.
- Ramsay J G. 1980. Shear zone geometry: a review [J]. *Journal of Structural Geology*, 2: 83~89.
- Selverstone J, Morteau G and Staude J M. 1991. Fluid channeling during shearing: transformation of granodiorite into aluminous schist in the Tauern Window, eastern Alps [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9: 419~431.
- Shangguan Zhiguan, Qiu Chunyi, Wang Yufang, *et al.* 1985. Changes in oxygen stable isotope compositions of the mylonites from the Huairou-Shuiyu granitic ductile shear zone, Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 32: 1329~1332 (in Chinese).
- Tobisch O T, Barton M D, Vernon R H, *et al.* 1991. Fluid-enhanced deformation: transformation of granitoids to banded mylonites, western Sierra Nevada, California, and SE Australia [J]. *Journal of Structural Geology*, 13: 137~156.
- Wang Yufang, Hu Zhenduo and Zheng Yadong. 1989. K-Ar ages on clay minerals from the fault gauges in Yunmengshan, Beijing and the geological significances [A]. *Lithospheric Earth Science* [C]. Beijing University Press, 102~111 (in Chinese).
- Wickham S M. 1987. The segregation and emplacement of granitic magmas [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 144: 281~297.
- Zeng L, Asimow P and Saleeby J B. 2005b. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 3671~3682.
- Zeng Lingsen and Li Haibing. 1996a. Deformation and fluid processes of the Jinzhou uplift region, southern Liaoning, East China [J]. *Geological Journal of University*, 2: 155~165 (in Chinese).
- Zeng Lingsen, Li Haibing and Xu Zhiqin. 1996b. Self-organization and fractal developed in ductile shear zones: an example from the Jinzhou ductile shear zone, southern Liaoning [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17: 269~275 (in Chinese).
- Zeng Lingsen, Li Haibing, Xu Zhiqin, *et al.* 2004. Limited migration of the leucosome in a migmatite and effects of progressive partial melting on strain partitioning [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78: 752~757 (in Chinese).
- Zeng L and Saleeby J B. 2003. Disequilibrium crustal anatexis during the formation of migmatite in the southern Sierra Nevada batholith, California [J]. *Eos, Trans. AGU*, 83(47): F1431.
- Zeng L, Saleeby J B and Asimow P. 2005a. Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: A record from the Goat Ranch migmatite complex, southern Sierra Nevada batholith, California [J]. *Geology*, 33: 53~56.
- Zhang Jianxin, Zeng Lingsen and Qiu Xiaoping. 1997. Granite dome and extensional tectonics in the Yunmeng Mountains, Beijing [J]. *Geological Review*, 43: 232~240 (in Chinese).
- Zheng Y, Wang Y, Liu R, *et al.* 1988. Sliding-thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunmeng Mountains, Beijing, China [J]. *Journal of Structural Geology*, 10: 135~144.

附中文参考文献

- 李海兵, 曾令森, 许志琴. 1997. 剪切带中变斑晶的生长及包裹体痕迹的演化 [J]. *地质科学*, 32: 181~192.
- 刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 等. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 23: 141~146.
- 上官志冠, 邱纯一, 王玉芳, 等. 1985. 北京怀柔水峪韧性剪切带花岗岩糜棱岩氧同位素组成的变异及其地质意义 [J]. *科学通报*, 32: 1329~1332.
- 王玉芳, 胡振铎, 郑亚东. 1989. 北京云蒙山区断层泥中粘土矿物及钾氩年龄的地质意义 [A]. *岩石圈地质科学* [C]. 北京大学出版社, 102~111.
- 曾令森, 李海兵. 1996a. 辽南金州隆起区构造变形及流体作用 [J]. *高校地质学报*, 2: 155~165.
- 曾令森, 李海兵, 许志琴, 等. 2004. 混合岩中浅色体的有限迁移及其对变形分解的影响 [J]. *地质学报*, 78(6): 752~757.
- 曾令森, 李海兵, 许志琴. 1996b. 辽南地壳韧性剪切变形中的分形及自组织 [J]. *地球学报*, 17: 269~275.
- 张建新, 曾令森, 邱小平. 1997. 北京云蒙山地区花岗岩穹隆及伸展构造的探讨 [J]. *地质论评*, 43: 232~240.