

辽宁阜新地区晚太古宙花岗质岩石 在中地壳糜棱岩化过程中的 体积亏损和成分变异

刘建忠¹ 张福勤² 刘喜山³ 李树勋³

- | | | |
|---|------------------|--------|
| 1 | 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 | 550002 |
| 2 | 中国科学院地球物理研究所, 北京 | 100101 |
| 3 | 长春科技大学地球科学学院, 长春 | 130026 |

【摘要】 对辽西阜新地区晚太古宙韧性剪切变形变质岩石岩石学, 常量、微量和稀土元素地球化学和矿物学的研究表明, 在中地壳环境下的韧性剪切变形变质进程中, 岩石中的元素都发生了不同程度的变异, 主要表现为随变形强度的增加 SiO_2 , Na_2O , Zr 等组分规律性减少, 而 Al_2O_3 , CaO , FeO , MgO 等常量元素、稀土元素以及 Ba , Cr , Sr , Ni , Rb 等微量元素规律性增加, 本文认为剪切变形变质岩石的成分变异不仅仅是流体作用的结果, 而且与剪切变形变质过程中的体积亏损相关。

【关键词】 体积亏损 成分变异 韧性剪切带 中地壳 糜棱岩化作用 阜新
中图法分类号: P588. 121

0 引言

越来越多的研究成果表明, 岩石圈深部地壳结构的调整、变形及运动形式, 均可以通过对剥露在地表的变质岩区中高应变线形构造带——韧性剪切带的演化及其与变质作用、花岗质岩浆作用的时空关系和成因联系的多学科综合研究来解决。作为地壳

中的应变软化带和局部化带, 陆壳剪切带中存在着热、力、化学和流体之间的耦合作用。同时剪切带作为陆壳中韧脆性域转化的过渡带也是地壳中流体渗透、汇聚和运移的通道, 流体在其中的流动对热的传递、物质迁移、交换都有着深刻的影响。研究表明剪切带的成分变异与体积亏损、剪切流变行为间有着紧密的联系, 且与金成矿作用息息相关^[1-4]。因此对比岩石变形前后元素的相对变异, 对研究中、下地壳

韧性剪切变形变质过程中的化学行为具有重要的指示意义。本文结合阜新地区构造岩石的变形变质过程及动力学,对元素在变形变质过程中的变异特征和变异机制进行了探讨。

1 区域地质背景

研究区位于辽宁西部阜新市北,大地构造位置属于华北陆台北缘东段,其北邻兴蒙褶皱带南缘,东接中生代下辽河盆地。与华北陆台北缘西、中段的内蒙、河北境内的北缘带相比,辽西地区早期地壳的组成、结构及演化特征基本类似,主要由晚太古宙 TTG 杂岩组成^[5,6],中有少量太古宙上壳岩包体,从包体的组成和 TTG 岩系的特点,大致以旧庙—清河门一线,将区内的晚太古杂岩划分为两个地质单元,西部区内以英云闪长岩系为主,其中以含有石榴石麻粒岩包体为其主要特征,前人称之为建平群小塔子沟组;东部区的花岗质杂岩以花岗闪长岩为主,上壳岩包体以斜长角闪岩为主,无麻粒岩包体出露,前人称之为建平群大营子组。在东部区发育北东 (NE) 和北北东 (NNE) 两个不同方向的韧性剪切带 (图 1),其中 NE 向剪切带延伸达 30 km,宽度 700 m~ 800 m,由一套黑云角闪变晶糜棱岩、糜棱片岩组成。剪切叶理走向多在 50°~ 60°之间,倾向南东,倾角 60°±,与围岩的片麻理基本一致。岩貌上的主要特点是重结晶的浅色矿物和暗色矿物互成条带相间分布,组成条带状构造。从剪切带的边部到中心,随着变形程度的渐次增强,暗色矿物 (角闪石、黑云母) 含量逐渐增加,而石英、长石等浅色矿物含量相对减少。从残斑的不对称旋转、拖尾和 S-C 组构显示出其动力学特征以左行挤压为主,而应变测量的结果也得出相同的结论^[4]。

2 韧性剪切变形变质作用的温压条件

晚太古宙韧性剪切变形变质作用过程中形成了韧性剪切带中的黑云角闪斜长变晶糜棱岩系,包括变晶糜棱岩和糜棱片岩,岩相学的研究表明,变晶糜棱岩具有残斑结构,残斑含量较低 (10%~ 15%),主要由角闪石和斜长石组成,其中: 1) 角闪石呈不规则粒状,具黄绿—淡黄色多色性,旋转、拖尾等现象明显,粒度在 0.75 mm±,边缘具细粒化现象,其约占残斑总量的 40%; 2) 斜长石残斑粒度也为 0.75 mm±,发育聚片双晶,细粒化现象明显,另在糜棱岩中

存在少量的钾长石残斑,多为具格子状双晶的微斜长石和条带状构造的条纹长石。基质重结晶明显,主要由角闪石+黑云母+石英+长石组成,其中角闪石多呈自形的柱状—板状与自形的黑云母晶体共同组成岩石的暗色条带,而拔丝拉长的石英与细粒的重结晶长石组成浅色条带。糜棱片岩与变晶糜棱岩相比,其主要差异表现为: 1) 从矿物组成上暗色矿物含量增高,矿物的分异更为明显,残斑数量减少,仅为 10%~ 5%; 2) 叶理构造更加发育,形成贯通的片理。而基本的结构构造差异较小。无疑变晶糜棱岩和糜棱片岩基质中的自形角闪石、黑云母以及重结晶长石是在变形过程中形成,它们形成的温压条件能够代表剪切带形成时的环境。

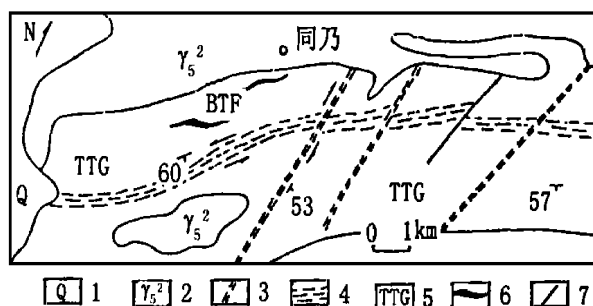


图 1 辽宁阜新地区地质简图

1. 第四系; 2. 燕山期花岗岩; 3. NNE 向剪切带; 4. NE 向剪切带; 5. TTG 杂岩; 6. BIF; 7. 脆性断裂

Fig. 1 Geological map of Fuxin area, Liaoning Province
1. Quaternary; 2. Yanshanian granite; 3. NNE trending shear zone; 4. NE trending shear zone; 5. TTG complex; 6. banded iron formation; 7. brittle fault

变晶糜棱岩中主要矿物的电子探针分析结果列于表 1 中。角闪石的分析数据表明,不仅基质中的角闪石与残斑角闪石的成分有一定差别,而且基质中自形角闪石从边部到中心的成分也有规律性的变化,特别在角闪石 $Al^{IV}-Al^I$ 成分变异图上,残斑角闪石落入角闪岩相和麻粒岩相区的交界线上,而基质中角闪石全部落入角闪岩相区,且从角闪石中心到边部, Al^I 规律性递减, Al^{IV} 增加,说明在剪切变形期间温度有升高的趋势,也就是说,剪切作用可以产生热量。同样黑云母中 TiO_2 含量从边部到中心递增,也可以说明在剪切过程中加热现象。

本文通过利用 Plyusnina^[7] 的斜长石—角闪石实验地质温压计、别尔丘克共存角闪石—斜长石的钙分配等温线以及惠特尼—斯托默^[8] 的二长石温度计进行温压估算,结果均为 $T = 773.15 \text{ K}$, $p = 0.5 \text{ GPa}$ 。大约相当于地下 18 km 的中地壳。

表 1 变晶糜棱岩中矿物的电子探针分析数据. $w(B) \%$

Table 1 The mineral compositions in blastomylonite (in percentage)

成分	角闪石				黑云母				斜长石		钾长石	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2
SiO ₂	44.29	43.98	44.78	44.86	37.86	38.07	38.86	37.91	62.80	63.40	64.62	65.16
TiO ₂	0.80	0.90	0.97	0.83	2.32	2.23	2.15	2.20	0.18	0.30	0.35	0.21
Al ₂ O ₃	8.58	7.98	8.01	8.00	15.11	15.89	15.35	16.12	22.40	22.44	18.89	18.69
FeO	18.27	17.38	17.44	17.79	18.16	19.29	18.34	17.02	0.39	0.45	0.38	0.40
MnO	0.55	0.56	0.58	0.57	0.51	0.51	0.49	0.51	0.21	0.21	0.30	0.32
MgO	10.00	11.02	10.85	10.72	12.56	12.64	12.31	12.18	0.16	0.13	0.19	0.12
CaO	11.21	11.27	10.85	11.48	0.24	0.21	0.16	0.15	4.29	4.01	0.26	0.30
Na ₂ O	1.30	1.14	1.33	1.10	0.20	0.18	0.19	0.15	9.02	8.94	0.25	0.42
K ₂ O	0.91	0.80	0.81	0.84	4.38	4.47	8.36	7.09	0.27	0.30	14.20	14.12
Total	95.91	95.08	95.62	96.19	91.34	93.49	96.21	93.33	99.22	99.82	99.94	99.22
	以 23 个氧原子为基础的阳离子系数				以 11 个氧原子为基础的阳离子系数				以 8 个氧原子为基础的阳离子系数			
Si ^{iv}	6.735	6.725	6.800	6.790	2.584	2.810	2.837	2.789	2.794	2.798	2.968	2.991
Ti	0.092	0.104	0.111	0.094	0.132	0.124	0.118	0.122	0.006	0.010	0.012	0.007
Al ^{iv}	1.262	1.275	1.200	1.71	1.146	1.190	1.163	1.211	0.206	0.219	0.032	0.009
Al ^{vi}	0.162	0.263	0.238	0.224	0.196	0.192	0.158	0.187	0.968	0.970	0.991	1.002
Fe ²⁺	0.703	0.732	0.628	0.622	0.472	0.531	0.522	0.801	0.013	0.015	0.011	0.011
Fe ³⁺	1.542	1.409	1.518	1.561	0.621	0.601	0.540	0.157	0.001	0.001	0.002	0.003
Mn ²⁺	0.071	0.072	0.075	0.073	0.033	0.032	0.030	0.032	0.008	0.008	0.012	0.012
Mg ²⁺	2.267	2.512	2.456	2.418	1.411	1.391	1.340	1.336	0.011	0.009	0.013	0.008
Ca ²⁺	1.826	1.846	1.765	1.862	0.019	0.017	0.012	0.012	0.204	0.191	0.013	0.015
Na ⁺	0.389	0.156	0.157	0.162	0.029	0.026	0.027	0.021	0.778	0.769	0.067	0.037
K ⁺	0.177	0.157	0.157	0.163	0.421	0.421	0.779	0.666	0.015	0.017	0.832	0.827

测试单位: 长春科技大学分析测试中心电子探针室

Test unit Electron microscope probe office, Analytic Test Centre of Changchun University of Sciences and Technology

表 2 变形变质岩石化学分析数据

Table 2 The chemical compositions of metamorphic-deformed rocks

变形强度	岩石名称	SiO ₂	FeO*	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	IOI	Total									
弱	角闪黑云二长片麻岩	70.41	3.60	14.57	0.24	0.03	1.09	0.46	4.82	4.00	0.05	1.31	99.58									
中	角闪黑云变晶糜棱岩	60.51	5.51	16.52	0.35	0.05	3.80	1.62	3.26	4.15	0.05	3.67	99.49									
强	角闪黑云糜棱片岩	58.59	6.57	16.54	0.60	0.08	4.86	2.68	3.13	4.71	0.14	1.06	98.76									
变形强度	Lu	Gd	Ho	Tm	Tb	Dy	Sm	Er	Yb	Eu	La	Nd	Pr	Ce	Y	Ba	Cr	Sr	Ni	Co	Rb	Zr
弱	0.08	1.58	0.19	0.07	0.20	1.12	0.50	0.47	0.47	0.90	16.67	14.78	3.46	32.94	6.69	1375	120.1	298.7	11.8	14.8	108.3	152.7
中	0.24	3.13	0.35	0.18	0.51	1.81	0.32	0.77	0.71	1.46	27.37	23.68	6.76	48.88	8.80	1188	107.9	444.9	26.3	28.5	68.8	181.2
强	0.18	3.64	0.45	0.17	0.50	2.28	0.86	0.88	0.96	1.62	35.47	26.30	8.54	71.38	10.52	1058	102.9	728.8	27.5	26.2	84.1	240.4

注: FeO* 为全铁; 常量元素丰度. $w(B) \%$, 微量和稀土元素丰度. $w(B) / 10^{-6}$; 测试单位: 吉林省地质科学研究所Note: FeO* is mass fraction of total iron; Unit: percentage for mass fraction of common elements $\mu\text{g g}^{-1}$ or 10^{-6} for mass fraction of trace element and REE; Test unit: Institute of Geosciences, Jilin Province

3 体积亏损和成分变异

对该区韧性剪切带变形弱—中—强三带中的剪切变质岩分别进行了采样和分析测试, 其结果(如表 2)表明从剪切带的边部到中心 SiO₂ 质量分数明显降低, 而 K₂O, Na₂O, CaO, MgO, Al₂O₃ 和 FeO 有增加的现象, 微量元素中 Ba, Cr 降低而 Sr, Ni, Co, Zr 等递增. 稀土元素表现为其总量明显升高(图 2)而分布型式基本不变, 均表现为 LREE 富集. HREE 亏损.

应用 Grant^[9]和 O'Hara^[1]等归纳的等比分析方法, 对剪切带中变形强度不同的构造岩分别作了等比线图(图 3), 其中远离等比线的元素是在糜棱岩化过程中有较大规模的组分迁移, 等比线以下为组分丢失元素, 主要为 Si 和 Na, 而等比线以上为组分获得元素, 主要为 K, Fe 等, 可以看出发生组分迁移的均为活动组分, 而 Ti, Al, Zr 和稀土元素等不活动性组分都基本位于等比线上, 说明它们在糜棱岩化前后没有或几乎没有发生组分迁移, 一般研究认为稀土元素在变质作用过程中不发生变化^[10]或变化极小^[12], 因此剪切带中不活动元素的组分变异(稀土元素和微量元素的增加)是原岩在糜棱岩化过程

中体积的亏损所致,而活动性组分的大量丢失和获得,说明在中、下地壳的剪切过程中岩石处于开放体系中,大量流体的流动使得活动性元素随流体的运移而发生带入和带出。

根据 O Hara^[1]建立的体积亏损公式:

$$C_s / C_0 = 1 / (1 - V)$$

其中 C_s / C_0 为等比线的斜率, V 为体积亏损率, 可以求出变形中等的变晶糜棱岩的等比线斜率为 1.43, 体积亏损率约为 30%, 而剪切带中心的等比线斜率为 1.67, 体积亏损率可达 40% 左右。

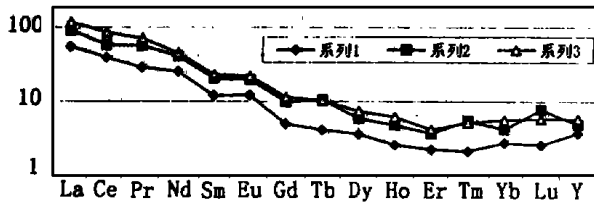


图 2 岩石的稀土分布模式图

Fig. 2 The REE distribution model diagram of rocks

4 质量平衡与岩石 流体比率

对于花岗质岩石的成分变化与变形强度之间关系的研究,国内外大部分学者^[12-14]采用 Gresens (1967)^[15]所推导的公式,本文认为 Gresens (1967) 所推导的质量平衡方程充分考虑了在变形过程中岩石体积的改变,利用其所计算的结果更符合客观实际,因此本文也利用 Gresens (1967) 的质量平衡方程: $X_n = 100 [F_v (\rho_s / \rho_0) C_n^s - C_n^0]$ 来计算糜棱岩化过程中各组分 (n) 的得失率 (X_n), 其中 F_v 为体积因子,即体积亏损后的体积与原体积之比, ρ_0 和 ρ_s 分别为糜棱岩化前后岩石的密度,本文通过利用 CIPW 标准矿物的计算求得片麻岩、变晶糜棱岩和糜棱片岩的密度分别为 2.69, 2.79 和 2.82; C_n^0 和 C_n^s 分别为组分 n 在糜棱岩化前后的质量分数 (重量百分比)。

首先通过利用上述成分-体积方程的推导和计算可以得到一系列的成分-体积方程 (以片麻岩和变晶糜棱岩为例):

$$F_v = 0.016X_{SiO_2} + 1.146$$

$$F_v = 0.058X_{Al_2O_3} + 0.814$$

$$F_v = 0.017X_{FeO} + 0.62$$

$$F_v = 0.32X_{K_2O} + 0.55$$

$$F_v = 0.24X_{Zr} + 1.01$$

$$F_v = 0.044X_{Na} + 0.66$$

$$F_v = 0.016X_{SiO_2} + 1.146$$

$$F_v = 0.055X_{Zr} + 0.88$$

$$F_v = 0.0201X_{Y} + 0.701$$

$$F_v = 0.019X_{Ca} + 0.64$$

当令 $X_n = 0$ 即组分不发生变异时,我们可以获得一系列的 F_v 值,这些 F_v 值多数在 0.6~0.8 之间变化,特别是不活动组分 (Ti, Al, Zr 和稀土元素) 的 F_v 值均接近于 0.7, 这样可以得出变晶糜棱岩的体积因子 $F_v = 0.7$ 利用同样的方法能够获得糜棱片岩的体积因子 $F_v = 0.6$, 进而可计算出变晶糜棱岩的质量平衡方程为:

$$100 \text{ g 原岩} - 26.48 \text{ g SiO}_2 - 2.58 \text{ g Al}_2\text{O}_3 - 2.45 \text{ g K}_2\text{O} - 0.99 \text{ g Na}_2\text{O} + 0.44 \text{ g FeO} + 0.02 \text{ g TiO}_2 + 1.67 \text{ g CaO} = 72.61 \text{ g 变晶糜棱岩};$$

而剪切带中心糜棱片岩的质量平衡方程为:

$$100 \text{ g 原岩} - 33.56 \text{ g SiO}_2 - 4.17 \text{ g Al}_2\text{O}_3 - 2.85 \text{ g K}_2\text{O} - 1.03 \text{ g Na}_2\text{O} + 0.1 \text{ g FeO} + 0.13 \text{ g TiO}_2 + 1.97 \text{ g CaO} = 62.89 \text{ g 糜棱片岩};$$

可见与上述利用 Grant 和 O Hara 的方法所得出的结论基本一致。上述的计算结果表明,在中地壳的糜棱岩化过程中发生了较大体积亏损和大量 SiO_2 的带出,这意味着在剪切带中有较强的流体渗透,从 SiO_2 的亏损可以计算剪切带的流体/岩石比率 (N):

$$N = L_s / C_s^f (1 - S)^{[16]}$$

式中 L_s 为 SiO_2 在糜棱岩化过程中的亏损, C_s^f 为 SiO_2 在流体中的溶解度, S 代表 SiO_2 在流体中的饱和度。研究表明在 $T = 773.15 \text{ K}$, $p = 0.5 \text{ GPa}$ 条件下, SiO_2 在水中的溶解度为 $5 \text{ g/kg}^{[18]}$, 另外,一般假定 SiO_2 在流体中的饱和度为 50%~90% 之间,这样依据上述公式可以求得剪切带的流体/岩石比率分别为:

$$N_{\text{变晶糜棱岩}} = 10.59 \sim 52.96$$

$$N_{\text{糜棱片岩}} = 13.42 \sim 67.12$$

可见,在糜棱岩化过程中水-岩间的相互作用是很强的,这也解释了在剪切带中形成金矿床的原因。

5 结论

通过对辽西阜新地区晚太古宙 NE 向韧性剪切带中产出的变晶糜棱岩-糜棱片岩详细的岩石学、矿物学和地球化学的研究,得出以下几点结论:

5.1 晚太古代花岗质岩石在中地壳层次的左行挤压环境中发生了糜棱岩化作用,形成一套变晶糜棱

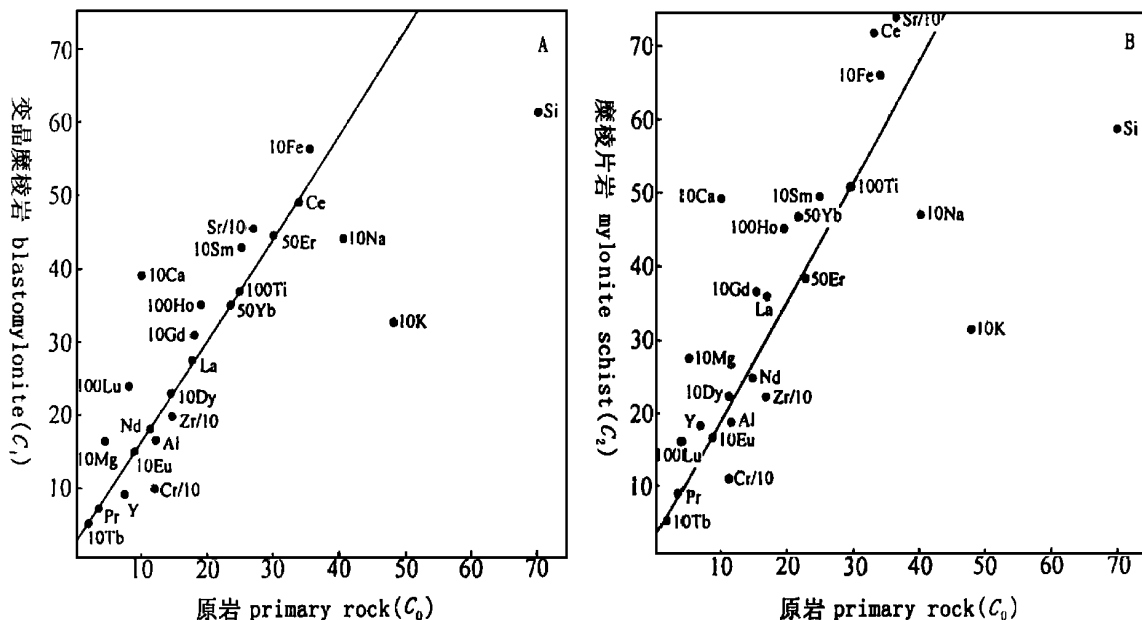


图 3 岩石的等比线图
Fig. 3 Equal ratio map of rocks

岩 - 糜棱片岩系剪切变质变形岩石。

5.2 在糜棱岩化过程中岩石发生了体积亏损和成分变异,活动元素的变异与流体-岩石的相互作用有关,而不活动性元素特别是稀土元素的成分变异与岩石的体积亏损密切相关

5.3 利用 Gresens(1967)所推导的质量平衡方程和 Grant(1986), O Hara(1988)的等比线方法的推导和计算,得出变晶糜棱岩的体积亏损率为 30% ,

流体-岩石比为 10.59~ 52.96 而糜棱片岩的体积亏损率为 40% ,流体-岩石比为 13.42~ 67.12 可见在韧性剪切变质过程中,曾发生过较强的岩石与流体的相互作用,这与许多金矿的成矿作用发生在剪切带中是相辅相成的。

欧阳自远院士在百忙中审阅了全文,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- O'Hara K. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U S A *Tectonophysics*, 1988; 156: 21- 36
- Ferry J.M., Dipple G.M. Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism. *Geology*, 1991; 19: 211- 214
- Dipple G.M., Wintsch R.P., Andrews M.S. Identification of the Scales of differential element mobility in a ductile fault zone. *Journal of Metamorphic Geology*, 1990; 8: 645- 661
- 钟增球,索书田,徐启东. 桐柏-大别造山带剪切带阵列的构造岩研究. *地质学报*, 1996; 70(4): 315- 324
- 刘喜山,李树勋. 韧性剪切退变质进程中的岩石-流体相互作用——. *长春地质学院学报*, 1995; 25(增刊): 28- 34
- 王长秋. 辽西太古代建平变质杂岩的地球化学和变质作用的 $p-T-t$ 轨迹. *岩石学报*, 1991; 4: 13- 26
- 刘喜山,李树勋. 太古宙石榴石辉石麻粒岩变质动力学研究——. *辽宁地质*, 1994; 3: 236- 247
- Plyusnina L.P. Geothermometry and geobarometry of Plagioclase-Hornblende bearing assemblages. *Contrib Mineral Petrol*, 1982; 80: 140- 146
- 丛柏林. 矿物温度计和矿物压力计. 北京: 地质出版社, 1983
- Grant J.A. The isochron diagram— a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 1986; 81: 1976- 1982
- 于学元,赵振华. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989, 211- 289
- Mueck G.K. Rare earth element geochemistry of regional metamorphic rocks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1979; 11: 45- 54

- 13 Selverstone J, Morteani G, Staude J M. Fluid channeling during ductile shearing transformation of granodiorite into aluminous schist in the Tauern Window, Eastern Alps. **Journal of Metamorphic Geology**, 1991; 9: 419- 431
- 14 McCaig A M. Deep fluid circulation in fault zones. **Geology**, 1988; 16: 867- 870
- 15 游振东,徐启东. 陆壳剪切带的水岩相互作用——以沂水剪切带和河台剪切带为例. 全国第四届构造地球化学学术讨论会论文集, 1995; 31- 35
- 16 Gresens R L. Composition-Volume relationships of metamorphism. **Chemical Geology**, 1967; 2: 47- 65
- 17 O'Hara K, Blackburn W H. Volume-loss model for trace-element enrichments in mylonites. **Geology**, 1989; 17: 524- 527
- 18 Walther J V, Helgeson H C. Calculation of the thermodynamics properties of aqueous and solubility of quartz and its polymorphs at high temperatures. **American Journal Science**, 1977; 277: 1315- 1351

VARIATION OF COMPOSITION AND VOLUME LOSS DURING MID-CRUSTAL MYLONITIZATION OF LATE ARCHEAN GRANITOID, FUXIN AREA, LIAONING PROVINCE

Liu Jianzhong¹ Zhang Fuqin² Liu Xishan³ Li Shuxun³

1 Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002
 2 Institute of Geophysics, CAS, Beijing 100101
 3 Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130026

Abstract The development of a 70 m~ 80 m wide mylonite zone at mid-crustal depth in Archean granitoids in Fuxin area, Liaoning Province, have been studied. Syndeformational fluid-rock interaction produced substantial differences in mineral composition and bulk rock chemistry in shear zone. The changes in whole rock chemistry, trace and rare earth elements indicate increase in mass fraction of K, Na, Ca, Sr, Ni, Co, Zr and REE, and decrease in mass fraction of Si, Ba, Cr with the REE patterns remaining unchanged. The authors recognized that the variation of immobile elements result mainly from volume deficiency, but the variation of mobile elements from fluid infiltration. Based on the volume loss expression $C_s/C_0 = 1/(1-V)$, the fractional volume losses are 30% and 40% respectively for blastomylonite and mylonite schist. Based on the equation of fluid and rock $N = Ls/Cs^f(1-S)^{[17]}$, we obtain the ratio of liquid and rock of 11.8~ 59.4 and 14.8~ 73.9.

Key words variation of composition volume loss ductile shear zone mid-crustal mylonitization Fuxin