

赣北变质核杂岩剪切带中断层岩的构造地球化学分析*

孙岩¹ 舒良树¹ 郭继春¹ 朱文斌¹ 陈祥云² M. Faure³

1. 南京大学地球科学系, 金属成矿国家重点实验室, 南京 210093; 2. 江西地质矿产局, 南昌 330002;

3. Dept. of Earth Sciences, Orleans University, Orleans 45067, France

摘要 通过对江西北部星子地区穿过变质核杂岩的3种杂岩组合(侵入杂岩、构造杂岩和变质杂岩)系统采样测试和质量平衡分析,发现微量同常量元素一样,离子半径小、比重大和电位高的在断层岩中形成聚集系列,反之则为离散系列. 稀土元素中 Σ REE, HREE相对集中,以及配分曲线上扬和Eu亏损等特点. 仅在韧性断裂上盘存在某些与一般规律相悖的现象,其总体均受岩石流变分异、力学化学耦合和构造体制反转作用的制约.

关键词 构造杂岩 韧性剪切带 微量元素 稀土元素 岩石流变 构造反转

20世纪80年代初兴起变质核杂岩研究并建立其伸展构造模式^[1],到1993年法国“造山带晚期伸展作用”学术会议对变质核杂岩的成因分类和形成过程又作了进一步的探讨^[2]. 20世纪90年代以来,我国北京大学同美国联合研究北方变质核杂岩^[3],南京大学与法国合作研究南方变质核杂岩^[4]. 后者在赣湘鄂等省调查中发现,变质核杂岩(MCC)中心部位均有岩体,且法国中央地块等欧美地区的MCC均见岩体占位,故可谓岩体变质核杂岩(IMCC). 在IMCC复杂的岩性组合中,实有3种杂岩组成,通常从核心至边缘,分别是侵入杂岩-构造杂岩-变质杂岩. 在主造山运动后期,穹窿伸展构造应力场和地球化学场最活跃的部位是构造杂岩带. 一般在该部位中韧性剪切带里的糜棱岩(包括初糜棱岩和超糜棱岩)、片麻糜棱岩(糜棱片麻岩)为典型的断层岩.

20世纪90年代以来,对地壳不同深度层次韧性剪切带的糜棱岩颗粒边界迁移、矿物晶格变异、岩矿体积增减和元素聚集分散等,中外学者均有新的研究成果^[5~7],且对韧性剪切带构造地球化学的研究方面多注重常量元素的分析上. 本文拟以赣北星子地区东牯山至温岭穿过3种杂岩的岩性剖面

(图1)系统采样分析(表1~3)和质量平衡分析(表4),对韧性剪切带糜棱岩带微量和稀土元素的变化予以扼要阐述.

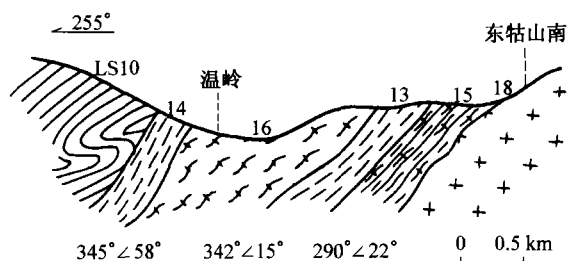


图1 赣北星子地区韧性剪切带岩性剖面图

LS10-标本号, 中元古界双桥山群云母片岩; LS14-糜棱岩; LS16-片麻岩; LS13-糜棱岩; LS15-片麻糜棱岩; LS18-细粒花岗岩

1 质量平衡分析

3种杂岩中糜棱岩与其原岩成分确定后,其间的迁移对比则需在一定的限制条件下进行. 拟以常用的 Al_2O_3 组分守恒,对图1剪切带的断层岩予以质量平衡分析^[8,9].

(1) 自白母片岩(LS10)到糜棱岩(LS14)的物质成分迁移情况见表4和图2. 在 Al_2O_3 组分守恒下,设原岩质量 m_0 ,糜棱岩化后质量 m_A ,则两者之比

2002-04-26 收稿, 2002-06-03 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40173001, 40172067)和油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金资助项目

E-mail: sunyan 03@163.com

$m_o/m_A = 1.014$. 若新增加质量为 Δm , 对某种组分 i 而言增量为 Δm_i , 其糜棱化前后浓度关系是 $C_i = m_o/m_A(C_i^o + \Delta C_i)$, 其中 C_i^o 为原岩某组分浓度, C_i 为糜棱岩化后该组分浓度, 即 $\Delta C_i = \Delta m_i/m_o$. 进而确定 $C_i = 1.014C_i^o$ 的质量等比线, 实是斜率为 m_o/m_A 的一条直线, 并与质量和体积守恒时 $C_i = C_i^o$ 基本一致. 于是组分的迁移情况是, 糜棱岩石带入量 SiO_2 , Fe_2O_3 和 K_2O 等明显; 微量稀土元素中 Ga, Nb, Be, Y 和 La 等增加(图2).

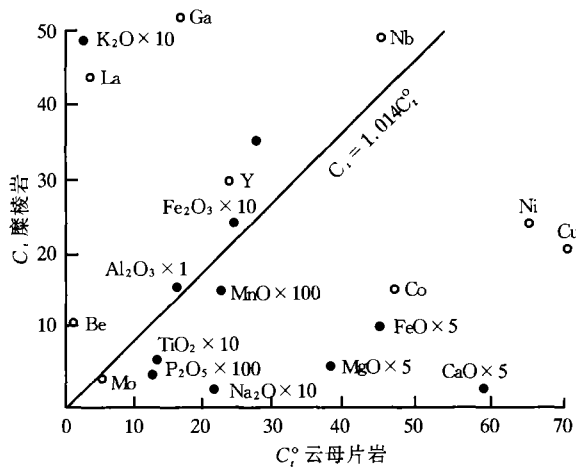


图2 韧性剪切带糜棱岩质量等比线图—糜棱岩(LS14)同云母片岩(LS10)之比

○ 示微量元素($\times 10^{-6}$); ● 示常量元素(%)

(2) 自细粒花岗岩(LS18)到片麻糜棱岩(LS15)的物质成分迁移情况见表4和图3. 同样在 Al_2O_3 守恒下, $m_o/m_A = 0.896$, 即相当于 $C_i = 0.896C_i^o$ 等比线. 片麻糜棱岩石带入量 F_2O_3 , FeO , SiO_2 和 K_2O 等显著; 微量元素中 Y 和 Mo 等增高(图3).

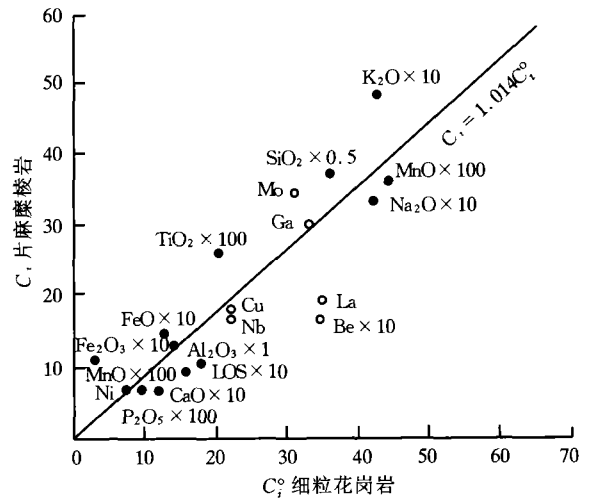


图3 韧性剪切带中片麻糜棱岩质量等比线图—片麻糜棱岩(LS15)同细粒花岗岩(LS18)之比
图例同图2

(3) 自片麻糜棱岩(LS15)到糜棱岩(LS13)的物质成分迁移情况见表4. 图上同理可确定 $m_o/m_A = 1.017$, 相当于 $C_i = 1.017C_i^o$ 的等比线. 鉴于片麻糜棱岩和糜棱岩可归入一大类, 其标志元素的带入带出表现得无上述两例明确.

2 微量元素分布

虽然在剪切带中微量元素只能作为一种次要成分被容纳在主要组分的固溶体中, 鉴于以往此方面工作较少, 故单独列出与主要组分(表1)一并加以研究. 除系统测试星子地区剪切带样品外(表2), 为对比起见, 还将邻区武功山变质核杂岩典型性剪切带中微量元素分析结果(表5)一并对比. 不难看出, 由韧性剪切带中心至外围有明显的规律可循, 拟可划分为聚集组分(元素)、离散组分、均质组分和成矿组分等4个系列^[10-12]:

表1 赣北星子地区变质核杂岩韧性剪切带岩性剖面系统采样硅酸盐分析($w/10^{-2}$)^{a)}

分析号	样品号	岩石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	LOS	合计
501	LS10	云母片岩	49.32	14.93	2.21	8.21	1.22	11.14	7.89	0.27	1.88	0.12	0.21	1.92	99.32
502	LS13	糜棱岩	70.84	12.94	0.66	4.33	0.72	1.94	1.37	2.16	3.37	0.16	0.14	1.32	99.95
503	LS14	糜棱岩	69.39	15.10	2.47	2.13	0.58	0.043	1.04	5.00	0.17	0.047	0.14	3.22	99.84
504	LS15	片麻糜棱岩	73.84	12.72	1.14	1.48	0.26	0.98	0.36	4.80	3.32	0.067	0.072	1.13	100.17
505	LS16	片麻岩	76.74	13.66	0.96	0.95	0.069	0.05	0.31	4.21	0.30	0.052	0.061	2.65	100.01
506	LS18	细粒花岗岩	71.73	14.19	0.34	1.24	0.20	1.56	0.44	4.24	4.22	0.12	0.10	1.88	100.26

a) 中国科学院贵阳地球化学研究所漆亮分析

表2 赣北星子地区变质核杂岩韧性剪切带岩性剖面系统采样微量元素分析($w \times 10^6$)^{a)}

样品号	岩石名称	Ba	Cu	Nb	V	Be	Ga	Ni	Zn	Co	Li	Pb	Cr	Mo	Sr
LS10	云母片岩	1837	71.07	84.16	421.0	0.2078	15.07	67.45	549.8	44.57	136.1	19.09	300.2	5.525	112.6
LS13	糜棱岩	738.4	14.2	18.2	111.3	2.437	28.48	22.61	189.7	18.98	191.0	32.89	63.18	3.178	177.6
LS14	糜棱岩	862.1	21.86	98.78	85.72	9.711	62.44	23.91	587.0	15.65	434.9	33.85	60.82	3.910	11.71
LS15	片麻糜棱岩	927.2	17.01	16.03	45.52	1.748	31.03	7.973	178.3	6.515	121.8	11.19	12.60	3.533	45.71
LS16	片麻岩	512.2	6.063	50.43	36.96	4.034	61.66	6.255	217.1	3.086	357.3	25.26	10.02	2.928	8.625
LS18	细粒花岗岩	1300	19.59	20.84	46.88	3.476	35.30	8.435	241.6	5.810	79.59	36.54	12.48	3.223	176.2

a) 中国科学院贵阳地球化学研究所激光分析

表3 赣北星子地区韧性剪切带岩性剖面系统采样 REE 分析($w \times 10^6$)^{a)}

样品号	LS10	LS13	LS14	LS15	LS16	LS18
岩石名称	云母片岩	糜棱岩	糜棱岩	片麻糜棱岩	片麻岩	细粒花岗岩
La	3.561	26.7	44.29	20.23	0.675	35.49
Ce	10.28	59.79	46.04	49.69	1.491	61.66
Pr	2.018	5.639	9.33	4.568	0.3586	4.307
Nd	6.177	19.96	35.42	15.79	0.6258	14.29
Sm	2.38	5.425	9.001	4.493	0.2275	2.963
Eu	0.8737	1.162	1.538	0.7195	0.0307	0.6195
Gd	3.293	5.528	7.139	4.626	0.2053	2.008
Tb	0.6517	1.077	1.463	0.9412	0.1193	0.4281
Dy	3.828	5.588	4.715	5.046	0.234	1.193
Ho	0.8159	1.161	0.9421	1.093	0.0727	0.2566
Er	2.557	3.446	2.631	3.644	0.1813	0.6361
Tm	0.3807	0.5405	0.4572	0.5738	0.0528	0.138
Yb	2.077	2.723	2.378	3.168	0.1831	0.4802
Lu	0.3554	0.4405	0.4222	0.5128	0.0368	0.0781
Y	22.6	32.47	25.84	31.79	1.202	5.65
ΣREE	61.7424	171.65	191.9663	146.8845	4.4939	130.1126
HREE/LREE	1.394	0.541	0.355	0.673	1.047	0.142
Eu/Eu*	0.964	0.649	0.572	0.483	0.430	0.740
La/Yb	1.132	6.475	12.298	4.217	2.435	48.795

a) 中国科学院贵阳地球化学研究所激光分析

表4 赣北星子地区变质核杂岩剪切带中断层岩的质量平衡计算结果表

岩石名称及编号	云母片岩→糜棱岩		细粒花岗岩→片麻糜棱岩		片麻糜棱岩→糜棱岩	
	LS10	LS14	LS18	LS15	LS15	LS13
m_o/m_A	1.014		0.896		1.017	
组分	$\Delta C_i/C_i^o$	$\Delta m_i/m_o$	$\Delta C_i/C_i^o$	$\Delta m_i/m_o$	$\Delta C_i/C_i^o$	$\Delta m_i/m_o$
SiO ₂	39.16	19.32	14.89	10.68	-5.67	-4.18
Fe ₂ O ₃	10.54	0.23	274.21	0.93	-43.07	-0.49
FeO	-74.33	-6.10	33.21	0.41	187.68	2.78
TiO ₂	-52.98	-0.64	45.09	0.09	172.29	0.45
CaO	-99.62	-11.10	-29.89	-0.46	94.65	0.93
MgO	-86.96	-6.86	-8.69	-0.04	274.19	0.99
K ₂ O	1731.32	4.68	26.35	1.12	-55.75	-2.68
Na ₂ O	-91.06	-1.71	12.20	-0.51	0.00	-0.01
P ₂ O ₅	61.26	-0.07	-37.69	-0.05	134.81	0.09
MnO	-34.06	-0.07	-19.64	-0.02	91.19	0.07
LoS	65.88	1.36	-32.92	-0.62	13	0.17
合计		0.96		11.53		-1.87

表5 赣北武功山地区变质核杂岩章庄典型韧性剪切带系统采样微量元素分析($w \times 10^6$)^{a)}

样品	SZ-1 巨斑晶 花岗岩	SZ-2 粗粒 花岗岩	SZ-3 中细粒 花岗岩	SZ-8 细粒 花岗岩	SZ-4 片麻岩	SZ-5 糜棱 片麻岩	SZ-12-1 糜棱 片麻岩	SZ-12-2 片麻 糜棱岩	SZ-12-3 糜棱岩	SZ-14 糜棱岩	SZ-16 元古界 石英片岩	SZ-18 元古界 云母片岩
Sr	115.32	124.52	105.68	65.68	165.42	150.40	61.60	105.34	205.24	93.16	557.04	374.64
Pb	28.04	93.54	76.07	121.42	28.59	15.14	511.30	29.83	30.02	32.26	21.02	203.74
Zn	78.44	87.76	82.30	73.32	119.28	129.46	204.50	116.02	124.50	106.12	84.76	181.60
Cu	24.68	9.16	14.34	12.04	13.30	30.20	116.96	20.42	30.22	79.38	70.44	12.90
Ba	821.40	421.00	232.20	446.80	570.80	458.80	773.80	449.40	797.20	457.60	137.96	638.40
Cr	70.70	28.40	25.40	40.30	59.80	183.06	154.12	187.34	136.00	59.56	313.50	274.50
V	22.00	34.12	38.22	11.22	105.44	125.28	87.64	56.12	69.36	17.32	17.96	177.06
Be	2.60	3.94	4.84	0.93	2.68	2.46	5.42	1.37	2.53	2.06	5.00	1.42
Co	4.22	5.55	6.46	2.66	12.75	20.11	12.05	10.57	14.07	4.68	4.93	37.52
Ga	13.90	15.33	16.30	13.55	18.19	14.63	17.44	13.56	14.40	20.58	14.85	13.62
Li	39.74	63.65	74.70	32.29	55.87	64.69	83.32	69.26	60.22	32.06	6.90	51.79
Mn	715.96	681.19	984.55	507.28	992.74	1303.92	805.62	793.14	853.98	489.79	650.31	1223.56
Mo	0.62	0.44	0.58	0.50	0.57	0.63	0.74	0.69	0.63	0.81	0.89	0.59
P	333.88	595.51	835.57	522.61	956.29	587.90	485.35	573.48	539.46	161.11	1695.52	583.52
Ni	8.62	3.60	5.59	3.14	6.72	19.21	24.14	24.06	28.67	8.70	12.78	90.77
Sc	7.18	6.42	7.36	3.04	13.68	20.20	16.22	9.62	10.84	7.80	5.68	27.98
Sn	19.92	19.76	22.28	12.64	25.90	27.52	26.22	21.87	20.12	15.36	16.17	22.30
Ti	1276.06	2869.46	3241.46	1647.86	5105.46	3625.46	4121.46	3859.46	4041.46	1314.46	1315.46	2541.46
Cd	0.002	0.20	0.002	0.002	0.26	0.34	0.04	0.22	0.002	0.002	0.44	0.32
La	25.58	50.24	48.14	57.06	63.80	34.92	37.10	51.84	12.24	25.32	15.02	22.94
Ce	65.96	87.76	82.30	106.70	111.42	58.82	64.60	88.74	56.42	85.12	30.12	43.58
Yb	2.36	2.22	2.96	1.16	2.14	4.14	0.90	1.28	1.26	4.36	3.20	3.40
Y	13.50	21.24	22.50	12.04	24.40	23.56	11.12	14.06	7.64	27.88	16.44	17.20

a) 中国科学院贵阳地球化学研究所激光分析

(1) 聚集组分系列——微量元素中的 Y, Yb, Be 和常量元素中的 Si, Fe, Mg 等均显示在剪切带中的聚集、稳定(图 2, 3), 表 2 样品 LS14 比围岩样品 LS10 中 Be 的含量高出近 50 倍(图 4)。细分析, 这些元素的共同特征是离子的半径小, 比重大和电位高^[10,11]。

(2) 离散组分系列——微量元素中的 Ba, Sr, Rb 和常量元素中的 Na 等, 都表现为在韧性剪切带中心离散、逸失(图 2, 3), 表 2 样品 LS16 比围岩样品 LS10 中 Ba 等的含量明显偏低(图 5)。与上述的第 1 种情况相反, 这些元素的一致特点是离子半径大, 比重小和电位低^[10,11]。

(3) 均质组分系列——或称均匀组分系列, 以元素 Ti, Sn 和 Mo 等表现得尤为明显(表 1~5)。后者在剪切带中的最大值(0.99)和最小值(0.50)相差无几。

(4) 成矿组分系列——其中以金属元素 Cu, Pb, Zn 等显得较为清楚(表 4), 其中元素 Cu 比围岩花岗岩和云母片岩的含量分别高出 5~10 倍。Cu

元素等的主要地球化学参数离子半径等, 同聚集系列的元素有相同之处。

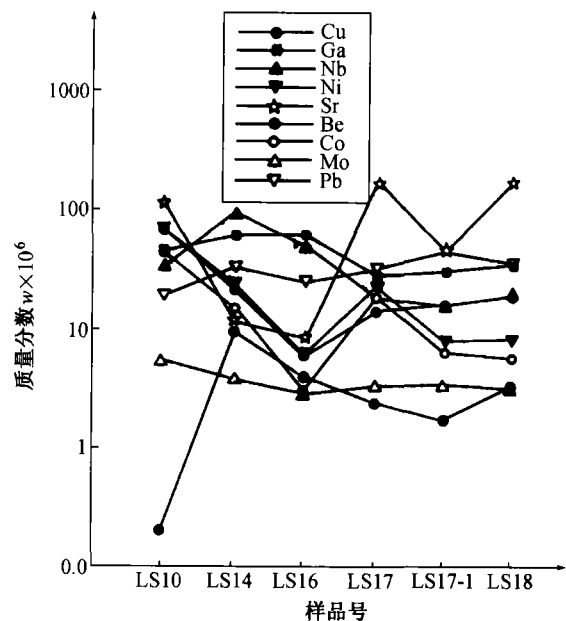


图4 表2中微量元素Cu等含量变化图示

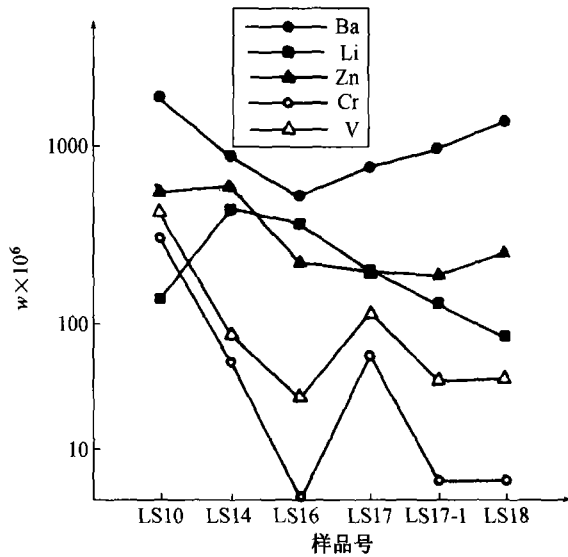


图5 表2中微量元素Ba等含量变化图示

3 稀土元素配分

稀土元素的化学性质有着相似性, 然各个元素之间在晶体化学(诸如离子半径、电价等)方面却存在着微小的差异. 也正是这种少许差别, 造成 REE 在断裂构造地球化学作用过程中极为敏感, 易于分异. 比之造岩元素, 微量元素具有明显的示踪性^[13,14], 可从下列几方面分析之.

(1) 与表1、表2同一样品的稀土元素分析中(表3), 由围岩至韧性剪切带(不论从细粒花岗岩抑或是云母片岩), 除 LS16 样品外, 其总量(\sum REE)均呈明显增加趋势, 且样品 LS14 大于 LS10 三倍多.

(2) 重稀土与轻稀土元素之比(HREE/LHREE), 在韧性剪切断裂带花岗岩一侧表面为聚集型特征; 而云母片岩一侧则相反. 其实 La/Y 之丰度比值也从另一侧面反映了上述现象.

(3) 稀土元素配分曲线(图6)表现得颇具特色. 围岩 LS18 样品显示向右陡倾; LS10 样品则平若直线. 而其余样品的曲线均向右缓倾, 以 Eu 为拐点自 Gd-Y 齐向上扬. 虽保持原配分模式的基本样式, 可糜棱岩样品曲线的上扬更为突出, 形成 Tb, Tm 和 Lu 3 个高点(图6).

(4) 以球粒陨石标准化值计算铕异常化, 原岩趋于正常, 而片麻糜棱岩和糜棱岩则显示为中等负铕异常(Eu/Eu^* 为 0.430~0.649).

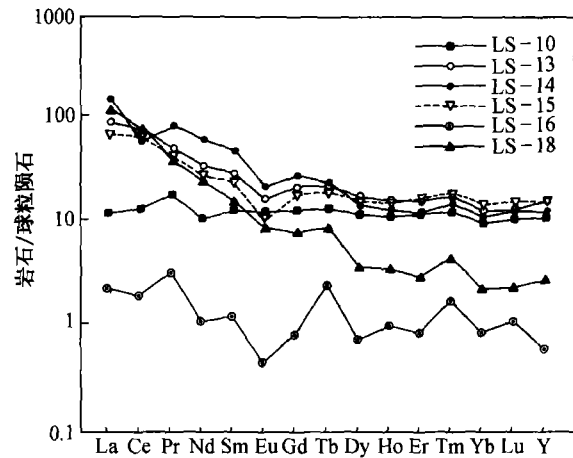


图6 表3中稀土元素配分曲线图

4 3种相关作用

上述微量元素、稀土元素在变质核杂岩韧性剪切带的分布现象、行为机理可以从下列3种构造地球化学作用诠释.

(1) 岩石流变分异作用

借助常用的 $(al + fm) - (c + alk)$ 与 Si 的比值和图解法, 可将所论韧性剪切带的动力变质岩的原岩属性类型进行区分^[15](图略), 进一步对流变分异深入讨论. 图中清楚显示3种原岩, 即火山岩(LS18, 15), 泥岩(LS13, 10)和砂岩(LS16, 10).

流变分异是岩石动力分异和变质分异的最直观的体现, 故近片岩的片麻糜棱岩、糜棱岩的颗粒细; 近花岗岩的则粗. 然而其共性是表1至表4中的常量、微量和稀土元素, 以其半径、比重和电位等参数所划分的聚集、离散组分系列, 则是由于分异作用的缘故. 诚然应力起着主导的地位, 岩石产生明显的韧滑流变水平分带(图1), 并可促成元素递增(减)变化(表1, 图4, 5).

(2) 力学化学耦合作用

岩石流变分异基本是固态固熔体的变异; 而力学化学耦合则主要表现在液态流体的渗散^[16,17], 其情况更为多变. 在韧性剪切带中流体活动、水-岩反应和自组织作用同动力泵压作用直接相关^{[18]1)}. 热动力作用, 力学与化学的耦合作用由流体的渗透更加活跃, 通常在动力变质岩中产生富硅质体系(甚至在脆性断层壁的塑变域中均可显示), 酸性斜长石

1) Sibson R H. Fluid pressure reductions induced by faulting their role as a precipitating agent at specific structural sites. SGEG, Ore Fluids Conference, Record (1990-1995). Canberra, Australia, 1991, 75-76

增加(前者镜下更清楚,表1可体现).在这种地球化学和岩矿条件下,易形成 Σ REE富集, Eu亏损,并对金属成矿具有示踪作用^[13,19].

(3) 构造体制反转作用

据以上分析,韧性剪切带中常量、微量和稀土元素基本符合流变分异和化学耦合作用的规律.但是在稀土元素方面,近云母片岩一侧的HREE/LREE和样品LS16中 Σ REE的变化与其规律不协调,其中分别在常量元素和稀土元素耗散序列排首的K和La尤为明显.细究之,这同造山带韧性断裂由挤压型向伸展型构造体制反变化有关.通过⁴⁰Ar-³⁹Ar法的断层岩应力矿物测年,其转化年代在庐山地区为(104.4±1.0)Ma¹⁾,此间不仅长石糜棱组构可出现直观变化^[20],以及构造断裂带可变性(deformability)增强、力学性质转变.而且会产生两套绝然不同的水岩反应,即脱水-还原作用系列转变为水解-氧化作用系列^[21].以至导致元素在剪切带局部变化(断裂上盘尤其)与其总体分布产生相悖现象,这通常在韧性剪切带中是不难发现的^[20,22].

总之,通过研究区内穿越3种杂岩组合(侵入杂岩、构造杂岩和变质杂岩)的系统采样测试和质量平衡分析,对变质核杂岩韧性剪切带中断层的构造地球化学,特别是对其中微量元素和稀土元素进行了全面分析.发现微量同常量元素一样,离子半径小,比重大和电位高的在断层岩中形成聚集系列,如微量元素Y, Yb和Be等.反之则为离散系列,如微量元素Ba, Sr和Rb等. Σ REE相对集中, HREE/LREE明显增高.以及配分曲线以Eu为拐点自Gd-Y齐向上扬,且为中等负偏异常.只是在韧性断裂带的上盘存在某些与一般规律相悖的现象,其总体上当受到岩石流变分异、力学化学耦合和构造体制反转作用的制约.

参 考 文 献

- 1 Wernicke B P. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province nappe tectonics in the extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645
- 2 Malavielle J P. Late orogenic extension in mountain belts; In sights from the Basin Range Province the late Paleozoic Variscan belt. *Tectonics*, 1993, 12: 1115
- 3 郑亚东,等. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层. *地质学报*, 1993, 67: 301

- 4 Sun Yan, et al. Study on the extensional tectonics and geodynamic evolution of the Wugongshan area in the Jiangxi Province. *Annual Science Report-Supplement of JNU(NS)*, 1994: 30: 69
- 5 Michibayashi K. Syntectonic development of strain independent steady-state grain size during mylonitization. *Tectonophysics*, 1993, 222: 151
- 6 Shi Huosheng, et al. The discovery of gold in quartz dislocation wall and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39: 322
- 7 Davison I. Laminar flow in shear zones: The Pernambuco Shear Zone, NE-Brazil. *Struc Geol*, 1995, 17: 149
- 8 Kisters A F, et al. Hydrologic segmentation of high - temperature shear zones: Structural, geochemical and isotopic evidence from auriferous mylonites of the Renco mine, Zimbabwe. *Struc Geol*, 2000, 22: 811
- 9 李仰春,等. 黑龙江盘古-碧水韧性剪切带中段构造地球化学特征. *地质科学*, 2001, 36: 144
- 10 吴学益. 构造地球化学导论. 贵阳: 科学技术出版社, 1998. 178~342
- 11 孙 岩,等. 断裂构造地球化学导论. 北京: 科学出版社, 1998. 33~107
- 12 Golubev V S. Thermodynamics of metasomatic mineral formation at mobile geochemical barriers during mass transport by infiltration. *Int Geochem*, 1992, 20: 11
- 13 Chen J, et al. Distribution of REE and other trace elements in the Hetai deposit of South China: Implications for evolutions an auriferous shear zone. *Southeast Asian Earth Sci*, 1994, 10: 217
- 14 Albarede F. *Introduction to Geochemical Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 543
- 15 Rollison H R, 著. 杨学明, 等译. 岩石地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000. 83~133
- 16 Ouzegane, et al. Pressure - temperatrue-fluid evolution in eburnean metabasites and metapelites from tamanrasset (Hoggar, Algeria). *Geol*, 2001, 109: 247
- 17 Hippler S J. Deformation microstructures and diagenesis in sandstone adjacent to an extensional fault: Implication for the flow and entrapment of hydrocarbons. *AAPG*, 1993, 77: 625
- 18 Phyllips J D. Signatures of divergence and self-organization in soils and weathering profiles. *Geol*, 2000, 108: 92
- 19 Conti A, et al. The relationship between evolution of fluid chemistry and the style of brittle deformation: Examples from the Northern Apennines (Italy). *Tectonophysics*, 2001, 330: 103
- 20 Prior D J, et al. Feldspar fabric in a greenschist facies albite-rich mylonite form electron backscatter diffraction (EBSD). *Tectonophysics*, 1999, 303: 29
- 21 孙 岩,等. 浅层构造反转体制中的两个水岩反应系列. *南京大学学报(自然科学, 地质流体专辑)*, 1997, 33: 53
- 22 周建波,等. 稀土元素在韧性剪切带体积亏损研究中的应用. *地质论评*, 1999, 45: 241

1) 法国 Montpellier 大学同位素测年实验室 P. Monie 博士测定