

褶皱变形过程中的构造化学效应^①

杨新岳 谢国源 李志纯

(中国科学院大地构造研究所·长沙·430013)

通过扫描分析电镜(SEM)对 2 个褶皱样品的主要造岩矿物化学成分进行分析,探讨了在中—深部地壳的变形环境下,褶皱变形作用导致变形岩石化学成分分异的规律以及褶皱变形的构造化学效应。

关键词 构造化学效应 褶皱作用 变形

1 概述

变形作用能导致化学成分的聚散和迁移,这已为地质学家所认识。70 年代末以来大量剪切带研究成果也论证了剪切变形导致化学成分呈现有规律的变化。褶皱作用是地壳中最常见的变形现象,但从构造化学效应的角度研究褶皱变形过程中化学成分分异规律尚不多见。过去理论上的一般认识是:褶皱过程中一些离子半径较大的元素和一些离子半径虽小、但不太稳定的元素,从褶皱的强挤压区(核部)向拉伸区(外弧转折端和翼部)迁移。但是,到目前为止,褶皱作用构造化学效应研究的实例还很少见,孙岩和沈修志^[1]通过变形岩石全岩化学成分分析,对 3 个大—中型褶皱中的地球化学作用进行了分析,得出了主要造岩元素的耗散活动顺序为:K、Na、Ca、Al、Mn、Mg、Fe、Si。但所选的实例为几何形态简单、岩性单一的褶皱,代表了地壳浅部层次的构造变形特征,而大量的褶皱变形是发生于中—下地壳的塑性或脆—塑性变形环境。这种变形环境常伴有矿物成分的变化和流体传质作用发生,从而导致变形岩石矿物成分和化学成分的分异。而矿物作为岩石中化学元素的载体,主要造岩矿物对应

力和应变的反应不同,化学成分的保留和迁出规律亦显示一定的差异。同一元素可能在不同的矿物中表现出不同的地球化学行为。笔者试图利用精密的矿物微区扫描分析电镜(SEM),分析微型褶皱不同部位主要造岩矿物和变质矿物的化学成分,从而探讨褶皱变形的构造化学效应。

2 变形岩石的基本特征

本文选择的两个褶皱实例为手标本规模,样品均取自新疆阿尔泰古生代造山带南缘的额尔齐斯韧性剪切带。变形岩石经历过区域动—热变质作用,变质相达高绿片岩相,并发生变质分异形成典型的 P、Q 域构造,P、Q 互层关系构成分异层理(图 1 和图 2),褶皱作用发生于变质作用的同时或者之后。

P 域中以黑云母为主,白云母次之,片状云母矿物构成明显的矿物优选方位,云母片(001)面平行 P、Q 域界面。两翼处 P 域中的云母片大量发育被动小褶皱,小褶皱轴面向褶皱核部收敛,P 域在翼部减薄、转折端加厚,转折端处的云母片被褶皱成尖棱褶皱。Q 域成分以石英和长石为主,并含变质矿物石榴子石,石英均发育波状消光和形态优选方位,Q 域厚度较为稳定。

本文 1994 年 4 月收到。张启芳编辑。

①受国家自然科学基金(项目编号 49102032)和国家“八五”科技攻关项目 85-902-01-05 资助。

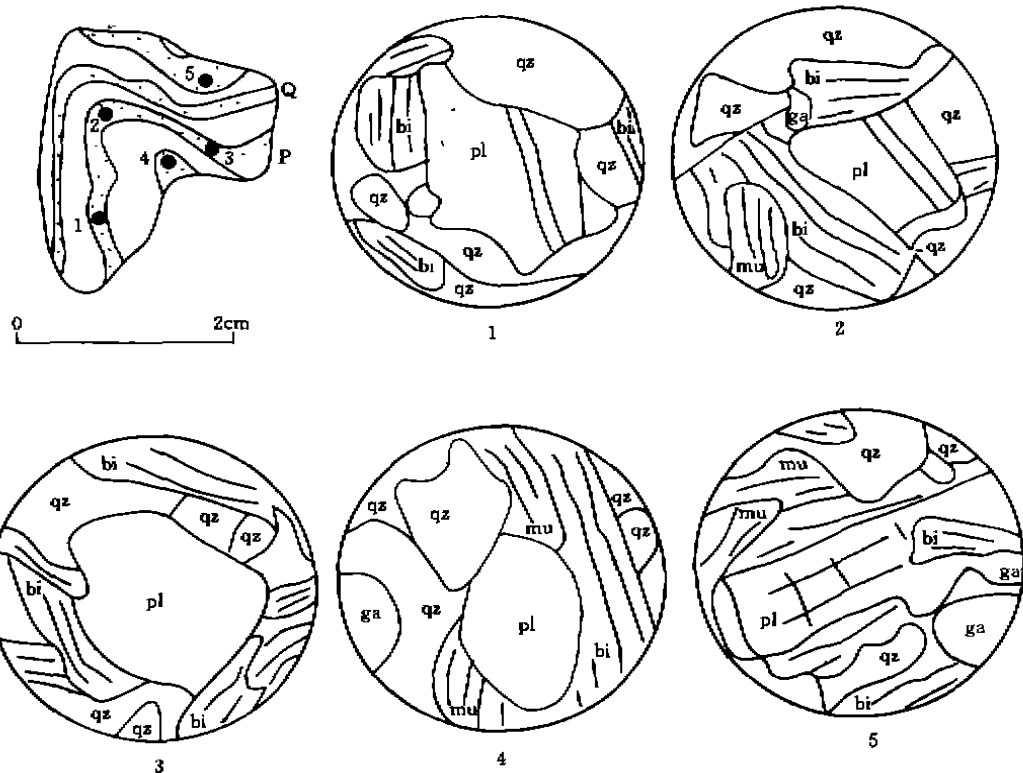


图1 样品 I 中褶皱形态、测点位置及其镜下矿物组合(放大 63×10 倍)
qz—石英;pl—长石;mu—白云母;ga—石榴子石;bi—黑云母

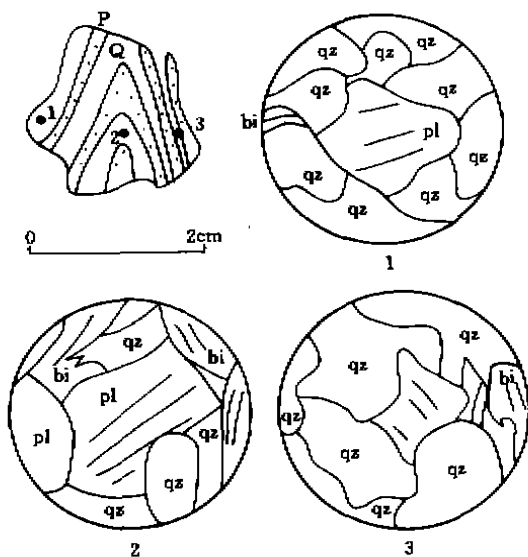


图2 样品 I 中褶皱形态、测点位置及其镜下矿物组合(放大 63×10 倍)
(至例同图1)

两个褶皱的两翼夹角分别为 54° 、 43° , 小于褶皱变形的几何临界状态的两翼角 (60°)

士)。分别选择样品 I 的 P 域和 I 的 Q 域进行矿物成分测定,测定位置及其镜下特征分别如图 1、2 所示。所测矿物包括斜长石、钾长石、黑云母、白云母和石榴子石,同一矿物在褶皱不同部位显示同期和同成因的特征,并为褶皱变形前或同时形成的矿物。

3 造岩矿物的化学成分特征

各测点主要矿物化学成分见表 1。

3.1 同一矿物的成分分异

P 域中成分分异规律较为明显,长石类矿物中,两翼拉伸区 SiO_2 含量稳定,核部挤压区含量明显减少,转折端外弧拉伸区 SiO_2 含量增高,反映 SiO_2 由核部挤压区向转折端外弧拉伸区迁移的趋势。 Al_2O_3 在两翼处含量也较稳定,转折端外弧拉伸区含量降低、内弧挤压区含量升高。 SiO_2 和 Al_2O_3 显示典型的线性消长关系(图 3a)。长石中 K_2O 的变化

趋势与 SiO_2 基本相同,只是显得更活跃些,两翼拉伸区和核部挤压区均向转折端拉伸区迁移。 CaO 在长石类矿物中是最稳定的成分。云母类矿物中 SiO_2 的变异趋势与长石类矿物完全一致,但 Al_2O_3 的变化与 SiO_2 呈现正相关关系(图 3b),转折端外弧拉伸区不利于 Al 元素进入云母晶架。 K_2O 则有向挤压环

境集中的趋势, FeO 和 MgO 显示由核部向两翼迁移,转折端外弧的拉张环境也不利于 Fe 、 Mg 进入云母。上述规律反映在矿物成分上,核部挤压区有利于黑云母向白云母转变,翼部拉伸区则以含 Fe 较高的黑云母为主,转折端外弧区的云母一般不经大的成分变化。同在 P 域中的石榴子石成分的变化不明显,

表 1 褶皱不同部位主要造岩矿物的 SEM 成分

样号	构造域	点号	位置	矿物	成 分 (wt%)									总量
					SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	FeO	CaO	TiO_2	MnO	MgO	
I	P 域	1	翼部	斜长石	57.64	27.81	0.3	6.74	—	7.51	—	—	—	100
				黑云母	38.78	21.14	9.88	—	16.41	—	1.94	—	11.84	99.99
		2	转折端外弧	钾长石	63.13	27.00	7.57	—	—	—	—	—	0.95	98.65
				黑云母	50.63	20.08	4.12	—	15.00	2.86	—	3.13	4.19	100.01
				石榴子石	37.78	21.79	—	—	21.81	3.34	0.08	12.26	2.74	100
		3	翼部	斜长石	57.69	27.87	—	7.03	—	7.41	—	—	—	100
				黑云母	37.93	21.53	7.54	—	17.96	—	2.12	0.46	12.45	99.99
		4	背斜核部	斜长石	56.75	28.01	1.15	6.86	—	7.24	—	—	—	100.01
				白云母	49.09	36.96	10.26	—	1.55	—	0.58	—	1.56	100
		5	向斜核部	石榴子石	38.63	22.19	—	—	22.32	3.45	—	10.82	2.59	100
I	Q 域	1	翼部	钾长石	60.17	27.27	3.77	8.03	0.58	—	0.18	—	—	100
				黑云母	44.7	31.42	9.19	—	7.62	—	1.5	—	5.57	100
		2	核部	斜长石	62.43	26.12	—	5.55	—	5.90	—	—	—	100
				白云母	47.99	36.02	10.62	—	2.67	—	0.84	—	1.87	100.01
		3	翼部	斜长石	59.67	26.09	0.82	6.59	0.56	6.12	—	0.15	—	100
				黑云母	43.25	23.33	5.16	—	15.19	1.25	1.22	—	10.60	100
I	Q 域	3	翼部	斜长石	57.98	27.84	—	7.06	—	7.16	—	—	—	100.04
				黑云母	39.37	21.48	9.03	—	10.06	—	2.36	0.38	11.32	100

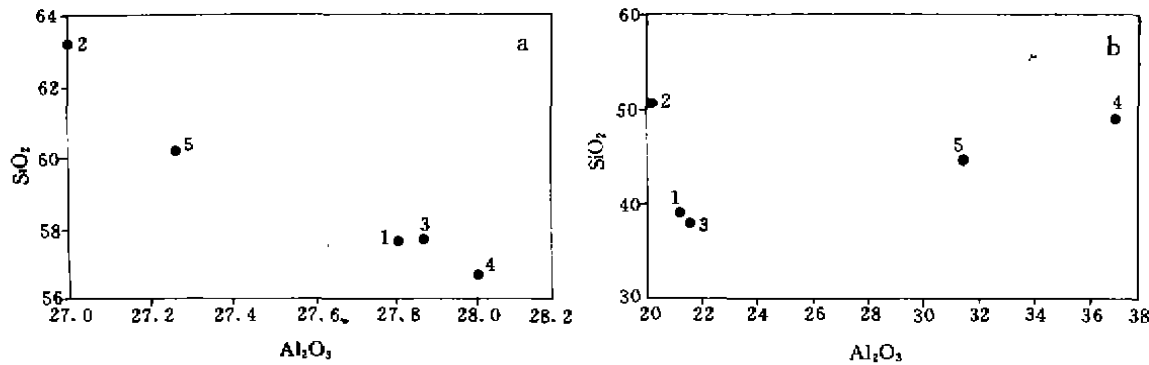


图 3 SiO_2 和 Al_2O_3 的成分关系

a—长石;b—云母

反映石榴子石对应力、应变环境的敏感程度较长石和云母低。

Q 域中的长石和云母并不显示明显的成分变异规律(表 1),反映 P 、 Q 域相间的变形

岩石中, Q 域中无大的成分带入和迁出, 与 Waldron 和 Sandiford^[2] 的结论一致。

3.2 不同矿物之间成分变化的相关性

在褶皱的不同部位, 长石和云母中 SiO_2 成分基本上是同步变化的(图 4a), 由核部挤压区向转折端外弧拉伸区迁移, 导致外弧拉伸区有利于石英的形成, 这也是褶皱鞍部易

于形成含矿鞍状石英脉(Saddle reef)的原因, 如著名的澳大利亚维多利亚省的金矿。长石和云母中 K 元素却呈消长关系(图 4b), 说明拉伸区有利于斜长石向钾长石转化, 而白云母趋向于析出 K 转化成黑云母, 核部挤压区中钾长石析出 K 转化成斜长石, 析出的 K 进入黑云母使其向白云母转化。

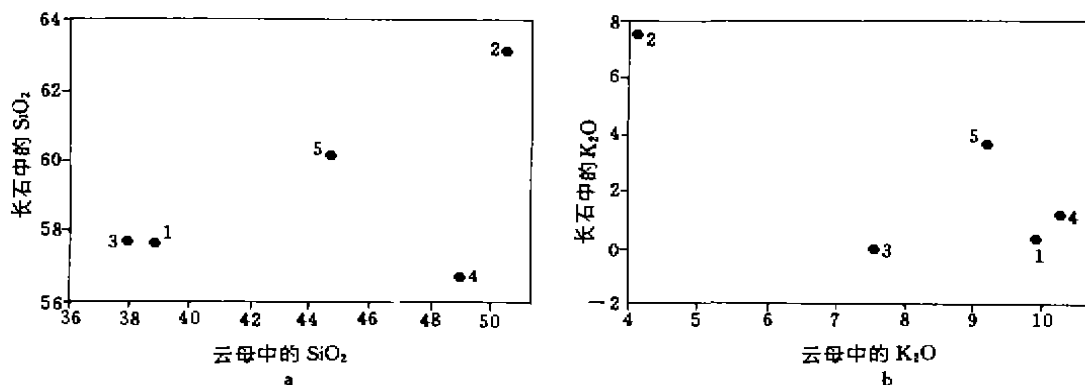


图 4 长石和云母中的成分关系

3.3 成分与温压条件的关系

根据石榴子石—黑云母—白云母—斜长石温压计^[12]计算的温压条件为: 褶皱外弧拉伸区为 5281bar、572℃, 核部挤压区为 7320bar、551℃(表 2), 说明变形过程中褶皱不同部位的温度较为均一, 而变形条件的差异体现在压力条件上, 核部挤压区明显大于外弧拉伸区, 存在较大的压力梯度, 说明前述的成分变异主要与压力条件有关。

4 褶皱变形的构造化学效应

从主要造岩矿物在褶皱变形中的化学成分分异规律, 以及不同矿物之间的成分交换

规律分析, 褶皱变形导致化学成分分异的主要构造地球化学效应应有以下几种。

4.1 压溶作用

压溶作用主要导致转折端内弧挤压区石英的溶解和长石、云母中 SiO_2 析出。显微构造和应变分析的研究已经证实, 压溶作用是褶皱变形中的一种非常重要的变形机制, 其造成的缩短效应可达 8%~24%^[4]。同时, 压溶导致的体积损失量也可达 20%~40%。本文所研究的两个褶皱的两翼夹角均小于褶皱变形的临界状态, 而当褶皱紧密程度达到临界状态时, 褶皱形态的继续调整与褶皱内弧区的压溶作用和体积损失关系密切。

表 2 矿物化学成分和温压计算

样号	点位	石榴子石				黑云母		白云母			斜长石		P (bar)	T (℃)
		X_{Al}	X_{Py}	X_{Gr}	X_{Sp}	X_{Ann}	X_{Ph}	X_{K}	X_{Na}	X_{AlVI}	X_{Ab}	X_{An}		
I	2	0.50	0.112	0.104	0.285	0.375	0.173				0.608	0.374	5281	572
	4	0.527	0.109	0.104	0.259	0.174	0.227	1	0	0.878	0.591	0.344	7320	551

4.2 传质作用

继压溶作用之后和/或与压溶作用同时,成分的运移和再分配是通过传质作用来完成的。传质作用的运移机制有两种,包括扩散作用和渗透作用。本文所研究实例为中—深地壳环境下变形和变质的产物,为变质流体相参与的相对封闭环境,在扩散作用中,有效扩散距离可表达成:

$$X_D = (2D_F \beta t)^{1/2}$$

其中, D_F 为流体扩散率,为组分浓度的函数; β 为岩石孔隙度; t 为时间。显然,在扩散机制为主的传质作用中,传质距离受组分浓度控制,一般为在 10^6 年时间内,通过颗粒边界和矿物晶格的扩散距离仅几m或更小。这种机制的传质作用可能发生在褶皱变形的早期,褶皱不同部位的构造压力分异还不太明显。随着褶皱变形的继续,褶皱不同部位发生明显的构造压力分异,并有矿物优选方位和劈理形成,渗透作用将作为传质作用的主要机制,传质的有效距离为:

$$X_A = \frac{K \cdot \bar{V}_P}{V \cdot \beta} \cdot t$$

其中, K 为渗透率, $\bar{V}_P$ 为压力梯度; V 为流体粘度。渗透传质距离受构造应力条件的直接控制,组分上挤压区向拉伸区迁移。

4.3 构造减压沉淀机制

由核部挤压区向转折端外弧拉伸区,压力明显降低,由7320bar降至5281bar,造成较大的压力梯度。而在弯滑褶皱作用和弯流褶皱作用中,都可能造成转折端虚脱,形成压力突然降低的空间。压力的降低和沉淀空间的存在,为矿物结晶沉淀提供了条件,因此转折端外弧拉伸区通常为褶皱体系中的构造减压带,为矿脉和石英脉形成的良好空间。

压带,为矿脉和石英脉形成的良好空间。

5 结论

(1)中—深地壳的变形环境中,褶皱变形导致变形岩石中主要造岩矿物的化学成分发生有规律的变化。表现在:核部挤压区中长石、云母均经历压溶,析出 SiO_2 , Al_2O_3 则与 SiO_2 呈现一定的消长关系,反映 Al_2O_3 为矿物中相对稳定的成分。

(2)在相对封闭的环境,发生了P、Q域分异的岩石中,褶皱变形主要导致P域的化学成分发生分异,而相对能干的Q域不发生大的组分带入和带出,这也是平面应变的一个重要特征。

(3)褶皱变形过程中导致变形岩化学成分分异的主要地球化学过程包括:压溶作用、传质作用和构造减压沉淀作用,这是一个物质再分配的全部过程,而且是在新的一期变形中,又可能发生重复的过程。

感谢中南工业大学测试分析中心电镜室韩寿民和沈立凯同志在SEM分析中提供的热心帮助。

参考文献

- 1 孙岩,沈修志.三个褶皱中一些常量元素变化的初步探讨.地球化学,1989,(3):265~269.
- 2 Waldron H M and Sandiford M. Deformation volume and cleavage development in metasedimentary rocks from the Ballarat slate belt. J. Struct. Geol., 1988, 10:53~62.
- 3 Hodges K V and Spear F S. Geothermometry, geobarometry and the Al_2O_3 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. Amer. Miner., 1982, 67, 1118~1134.
- 4 杨新岳,Gray D R. 低级变质岩区压溶作用在褶皱变形中的意义.大地构造与成矿学,1993,17(3):271~288.

Tectono—Geochemical Effects in Folding Deformation Process

Yang Xinyue, Xie Guoyuan, Li Zhichun

In terms of chemical components of major rock-building minerals in two fold samples, chemical changes and tectono-geochemical effects are studied.

Key words: tectono-geochemical effects, folding distortion.