

文章编号: 1009-3850(2006)02-0025-05

构造岩体积应变与质量迁移分析在地质学研究中的意义 ——以怒江断裂高黎贡山为例

吴小奇, 刘德良

(中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 本文以特提斯构造系怒江断裂高黎贡山韧性剪切带糜棱岩为实例。测试分析表明, 在韧性剪切带岩石变形变质前后, SiO_2 、 TiO_2 、全 Fe、 H_2O 等显著贫化, CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等显著富集; 韧性剪切带的发育使原来的片麻岩转变为糜棱岩, 原岩质量和体积的变化分别为 -29.48% 和 -26.86% 。构造岩的体积应变和质量迁移分析是构造时限年代学和流体/岩石比值研究的中间环节, 它还在估算挤压构造带缩短量以及求算碳酸盐岩脱排 CO_2 资源量等方面具有广泛的应用前景。

关键词: 怒江断裂; 高黎贡山; 体积应变; 质量迁移; 滇西

中图分类号: P542

文献标识码: A

1 引言

质量迁移量的分析在岩石学上已经是一种成熟的方法, 但岩石学家往往不很关注其相应的体积应变, 以及它们在岩石学本身之外应用价值的探索和发掘。本文基于构造地球化学的角度对这一分析方法的应用前景进行探讨。

本文根据怒江断裂高黎贡山韧性剪切带构造岩对比其原岩化学组分的质量浓度变化, 来计算分析韧性剪切带构造岩体积应变和质量迁移。岩石质量迁移参数是水岩反应和流体及成矿作用研究的重要指标; 体积应变参数是近年开拓的构造形成时限研究^[1~3]的重要基础, 对求算构造事件持续时间和估算挤压构造缩短量, 以及在评价碳酸盐岩断裂变质脱排 CO_2 、估算其资源量等诸多方面均不可或缺。

怒江断裂带是保山地块和腾冲地块的边界断裂, 在滇西境内高黎贡山近南北向展布, 其主干断裂以发育韧性剪切带为特征^[4]。所研究的采样地点位

于云南省腾冲市以东大蒿坪与保山市坝湾镇以西蒲满哨之间的高黎贡山主断裂带^[4]。该断裂构造岩为长英质糜棱岩系列岩石, 其原岩为元古宇高黎贡山群片麻岩系。原岩片麻岩主要由长石、石英、角闪石、黑云母等组成, 而其变形变质后的糜棱岩主要由石英、绢云母、绿泥石及残存长石等组成, 显示退变质作用特征。糜棱岩呈 $S=L$ 结构, 面理和线理都很发育。采集普遍分布的原岩黑云斜长片麻岩样品 (YW3-2) 和具代表性的糜棱岩样品 (YW3-3-1、YW3-3-2) 进行分析(图 1), 所采样品岩性非常均一。

2 质量迁移和体积应变分析

2.1 质量等比线拟合

选取常量元素作为质量迁移的标量元素(表 1)。痕量元素和稀土元素含量太低, 又易受流体影响, 不宜作为容变质移的指标元素^[5]。

岩石组成变化的比较学研究, 借助于化学成分但有时不可靠或者是达不到定量分析的精度^[7,9]。

收稿日期: 2005-10-17

第一作者简介: 吴小奇, 1982 年生, 硕士研究生, 地球化学专业。

资助项目: 国家自然科学基金(40172072, 40472074)。

表 1 高黎贡山样品的全岩分析数据($w_B/\%$)

Table 1 Whole rock analyses of the mylonite samples from the Gaoligongshan ductile shear zone ($w_B/\%$)

样品号	样品类型	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	H ₂ O ⁺	TFe	烧失量
YW3-2	片麻岩(原岩)	76.39	0.95	10.48	0.61	0.38	1.66	0.094	0.049	2.29	1.67	3.15	0.95	5.05	1.74
YW3-3-1	糜棱岩	69.17	1.10	14.73	0.48	2.91	1.17	0.16	0.069	3.56	2.78	2.11	0.78	4.31	1.36
YW3-3-2	糜棱岩	69.67	1.51	14.99	0.43	2.23	1.00	0.14	0.064	3.66	2.77	1.62	1.11	4.64	1.57
糜棱岩平均值	糜棱岩	69.42	1.31	14.86	0.46	2.57	1.09	0.15	0.067	3.61	2.78	1.87	0.95	4.48	1.47

注: 安徽地质中心实验室测试。

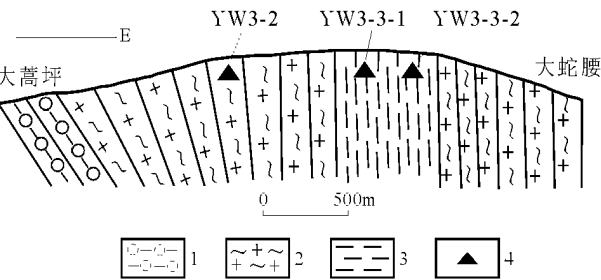


图 1 高黎贡山主韧性剪切带采样剖面图

1. 眼球状糜棱岩; 2. 黑云斜长片麻岩; 3. 长英质糜棱岩; 4. 采样点

Fig. 1 Sketch to show the sampling sites in the Gaoligongshan ductile shear zone

1 = augen mylonite; 2 = biotite plagiogneiss; 3 = felsic mylonite; 4= sampling site

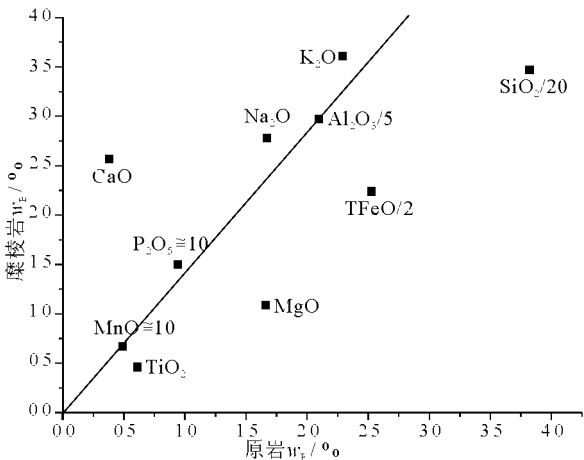


图 2 高黎贡山糜棱岩与其原岩的质量等比线图

Fig. 2 Mass isocon diagram of the mylonite and original rocks from the Gaoligongshan ductile shear zone

本文利用回归法^[9], 可以得出惰性元素组合为 {Al₂O₃, MnO, P₂O₅}。再利用最小二乘法^[11]进行拟合, 可以得到质量等比线的斜率 $b = 1.418$, 从而可以作出质量等比线图(图 2)。

2.2 质量迁移参数与体积应变参数

分别计算糜棱岩主元素的质量迁移量 ΔC_i 和质量迁移率 μ_i , 并分析其迁移方向(表 2)。一般规定, 对于 $\Delta C_i < 10\%$ 的组分, 当 $\mu_i \leq 0.1$ 时, 为无明显迁移, 反之明显迁移; 对于 $\Delta C_i > 10\%$ 的组分, $\mu_i \leq 0.05$ 时, 则为无明显迁移, 反之明显迁移。对于质量等比线而言, 高于此线的组分迁入, 低于此线的组分迁出, 重合于此线或邻近此线时则无迁移或迁移不明显, 惰性组分则都认为无迁移。组分偏离等比线越远, 迁移越明显。

将质量迁移率投影到直方图(图 3)上, 就可以看出: 迁入序列由强到弱依次为 $\text{CaO} \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{O}$, 迁出序列由强到弱依次为 $\text{TiO}_2 \rightarrow \text{TFe} \rightarrow \text{SiO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 。将 $b = 1.418$ 代入糜棱岩质量迁移率计算公式

$$\mu = M^A - M^0 = 1/b - 1 \tag{1}$$

可得 μ 为 -29.48% , 即糜棱岩的质量亏损了平

均值的对比, 其限制条件大致有 4 类: (1) 假设变形变质前后质量守恒; (2) 体积守恒; (3) 某种组分守恒, 比如常用 Al_2O_3 守恒; (4) 一些元素无迁移或迁移量很小, 在变形变质前后这些元素间的比值保持不变, 它们可以构成一条质量等比线, 以此来确定物质的迁移^[9]。对于糜棱岩而言, 因其多伴随成分的变化, 所以质量和体积往往不守恒。前人一般凭经验选取 Al、Ti、Zr 等元素作为惰性元素, 但有时不可靠或者达不到定量分析的精度^[7,8]; 所以一般采用条件(4)来进行分析。

质量等比线法自从提出后已经得到了很大的发展^[6~11]。在利用该方法进行质量等比线拟合时, 前人一般凭经验选取 Al、Ti、Zr 等元素作为惰性元素, 29.48% 。

设原岩与糜棱岩的体积分别为 V^0 与 V^A , 密度分别为 ρ^0 与 ρ^A , 而体积因子 $f_v = V^A / V^0$, 所以有:

$$\frac{M^A}{M^0} = \frac{V^A}{V^0} \cdot \frac{\rho^A}{\rho^0} = f_v (\rho^A / \rho^0) \tag{2}$$

利用浮力法测定岩石密度为 $\rho^0 = 2.650 \text{g/cm}^3$, $\rho^A = 2.555 \text{g/cm}^3$, 所以体积因子 $f_v = \rho^0 / (b \rho^A) = 2.650 / (2.555 \times 1.418) = 0.7314$, 而体积应变率为

表2 高黎贡山糜棱岩常量元素迁移情况

Table 2 Transport of the major elements in the mylonite from the Gaoligongshan ductile shear zone

元素	质量迁移量 $\Delta C_i / g \cdot 100g^{-1}$	质量迁移率 $\mu_i / \%$	质量迁移方向
SiO ₂	-27.43	-35.19	迁出
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	无迁移
TiO ₂	-0.29	-47.54	迁出
CaO	1.43	376.32	迁入
MgO	-0.89	53.61	迁入
P ₂ O ₅	0.012	12.77	无迁移
MnO	-0.002	-4.08	无迁移
K ₂ O	0.26	11.35	迁入
Na ₂ O	0.29	17.37	迁入
H ₂ O	-0.28	-29.47	迁出
TFe	-1.89	-37.43	迁出

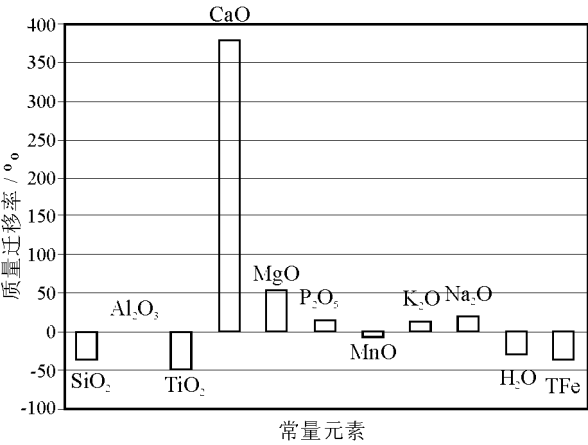


图3 高黎贡山糜棱岩常量元素迁移率直方图

Fig. 3 Histogram showing the transport ratios of the major elements in the mylonite from the Gaoligongshan ductile shear zone

$$\epsilon_v = (V^A - V^0) / V^0 = f_v - 1 \tag{3}$$

将 f_v 的值代入(3)式可得 ϵ_v 为-26.86%, 即糜棱岩的体积亏损了26.86%。

3 体积应变与质量迁移分析在地质学研究中的意义

3.1 在构造形成时限研究中的意义

构造形成时限是近年探索中的一门新兴的研究课题,其目标是研究构造地质事件的过程时间,而不是地球化学探求的峰值年龄。重要的是事件过程相对短促,往往在万年至数十万年之间,因此对于第四纪以前地质事件的时限,还缺少可供借用的有效的地球化学和古生物学定年手段。即使未来地球化学

和古生物学大大地发展了,定年精度成百倍的提高,要能够精确判定并且采集获得地质事件之初的产物与之末的产物,从而测年求差值以定时限,这依然是十分困难的。

构造地质的时限定年不仅在概念上不同于地球化学的峰值年龄,而且在方法上也完全不同。构造时限定年不借助于放射性同位素,而是用构造地质作用的产物直接测定。构造时限定年的特点是在构造地质自组织系统内完成的。具体有多种方法,就构造岩定时限的应变速率法而言,其测算过程可分为3个步骤:

- (1) 应用构造物理方法,测算构造岩变形变质的差异应力 σ ,进而求得应变速率;
- (2) 应用构造化学方法,分析构造岩的质量迁移和体积应变状况,主要求算体积因子 f_v ;
- (3) 应用数学地质方法,建立方程,从而可以计算构造形成时限。

由前述质量迁移和体积应变分析的具体过程可以看出,体积因子 f_v 与质量迁移率和体积应变率有相当紧密的关系,因此构造岩质量迁移和体积应变是时限年代研究中不可或缺的关键性的中间环节。

3.2 在区域大地构造研究中的意义

构造带的缩短量和伸展量是构造地质学定量化的新课题,现今主要采用大地测量,但对中小构造效果较差。显然,采用体积应变量与质量迁移量的计算,不仅可以了解一些压性、压剪性构造带体积缩减量,而且可以进一步估算各种组分带出总量,可以研究某些断裂在不同岩类的水平区段上和垂向层段上各不相同的缩减量、相对的平滑量以及物质迁移量。

3.3 在岩石成因研究中的意义

质量迁移和体积应变分析在剪切带流体与岩石关系的研究中也具有重要意义。流体在韧性剪切带中的作用显而易见,不同剪切带流体与岩石之比差异很大,这种差别与各剪切带的地质环境和构造地球化学作用相适应^[12],正是这种差别导致韧性剪切带中构造岩在化学组成、矿物组合及岩石结构上的差异,而对剪切带流体/岩石比值进行研究必须对剪切带质量迁移状况进行分析。

3.4 在地球物理研究中的意义

体积应变和质量迁移分析还可以在地球物理学科得到应用,Ballu 等就成功地将质量迁移分析应用到了裂谷区重力场变化的研究上^[13]。

3.5 在经济地质研究中的意义

为评估碳酸盐岩地区韧性、韧脆性剪切带构造

岩脱排 CO₂ 成藏潜力, 可以通过体积应变量与质量迁移量的求算来完成。李振生^[14] 即对郯庐断裂双山脆韧性剪切带变碳酸盐岩释放 CO₂ 的能力进行了有益的研究。

4 结论和讨论

(1) 怒江断裂高黎贡山韧性剪切带的质量迁移, 其迁入序列由强到弱依次为 $\text{CaO} \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{O}$, 迁出序列由强到弱依次为 $\text{TiO}_2 \rightarrow \text{TFe} \rightarrow \text{SiO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, 其中 CaO 的迁移最为显著, Al_2O_3 、 MnO 、 P_2O_5 则认为无迁移。SiO₂ 含量下降与其活化迁出有关, MgO 含量的增加和 FeO 含量的减少可能与黑云母中类质同象置换有关, CaO、K₂O、Na₂O 含量的上升与流体中富含 CaO、K₂O、Na₂O 有关。剪切带经过了退变质作用, 代出多于代入。

(2) 怒江断裂高黎贡山韧性剪切带构造岩较其原岩的质量和体积变化分别为 -29.48% 和 -26.86%, 即质量和体积都亏损约四分之一。这与滨西太平洋构造系郯庐断裂构造岩的研究成果具有可比性^[3]。但也应当指出, 怒江断裂高黎贡山构造岩样品数量很有限, 虽然野外采样具有代表性, 然而毕竟不具有统计性, 是先期预研究的一种尝试探索成果, 给出共享。这尽管不足, 但毕竟开始了滇西造山带怒江断裂构造岩体积应变与质量迁移的初步研究。

糜棱岩的孔隙度一般小于 1%^[13], 相比糜棱岩整体的体积变化而言可以忽略, 所采糜棱岩样品岩性非常均一致密, 因此在考虑糜棱岩的体积变化时未考虑其孔隙度的变化。在初糜棱岩中碎斑占据一定的比例, 然而在糜棱岩特别是超糜棱岩中, 碎斑所占比例很小, 其引起的体积变化也可以忽略。

就构造形成时限的研究方法而言, 有应变速率法、构造扩散法、反应速率法等^[1,2], 不同方法中体积变化的求算方法也不同, 本文中的体积变化求算是从应变速率法角度进行的, 构造扩散方法中的体积变化是从扩散即热力学角度进行求算的, 然而后者的研究目前仍处于探索阶段, 需要进一步的工作。

(3) 质量迁移和体积应变是构造时限年代学研究的重要组成部分, 分析结果对求算构造时限精度

有直接影响, 也为进一步研究其断裂形成时限铺垫了基石, 展望了该方法于典型岩石学之外在构造地质学、地球物理学、天然气地质学等广阔领域中的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘德良, 曹高社, 杨晓勇, 等. 韧性构造地质事件时限的确定[J]. 高校地质学报, 2000, 6(1): 29—33.
- [2] 刘德良, 曹高社, 杨晓勇, 等. 构造形成时限测定方法的探索[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 467—469.
- [3] 刘德良, 曹高社, 李振生, 等. 郯庐断裂南段主断裂韧性剪切带形成历时时限的探索[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 475—482.
- [4] 钟大赉, 等. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 189—190.
- [5] 王奎仁, 刘德良, 杨晓勇. 郯庐断裂带南段构造地球化学研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [6] 顾德林, 胡玲, 张雪亭. 山东沂水峨山口韧性剪切带糜棱岩类质量平衡分析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(2): 149—155.
- [7] 凌其聪, 刘丛强. 层控夕卡岩型矿床成矿系统的元素活性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿床为例[J]. 矿物学报, 2003, 23(1): 37—44.
- [8] 邓海琳, 涂光炽, 李朝阳, 等. 地球化学开放系统的质量平衡[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 121—131.
- [9] 高斌, 马东升. 围岩蚀变过程中地球化学组份质量迁移计算——以湖南沃溪 Au-Sb-W 矿床为例[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(2): 23—29.
- [10] GRANT J A. The isocon diagram—A simple solution to Gressen's Equation for metasomatic alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8): 1976—1982.
- [11] BAUMGARTNER L P, OLSEN S. N. A least-squares approach to mass transport calculations using the isocon method[J]. Economic Geology, 1995, 90(5): 1261—1270.
- [12] JOCHEN K, AMANDA R, MICHAEL M F et al. Development of fluid conduits in the auriferous shear zone of the Hutti Gold Mine, India: evidence for spatially and temporally heterogeneous fluid flow[J]. Tectonophysics, 2004, 378(1—2): 65—84.
- [13] BALLU V, DIAMENT M, BRIOLE P et al. 1985–1999 gravity field variations across the Asal Rift: insights on vertical movements and mass transfer[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 208(1—2): 41—49.
- [14] 李振生, 刘德良, 杨晓勇, 等. 脆韧性剪切带碳酸盐岩 CO₂ 的释放能力[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 130—133.
- [15] 李振生, 刘德良, 刘波, 等. 断裂性能差异的力学和化学因素分析[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 485—491.

Volume strain and mass transport of tectonite: Implications for geology, with an example from the Gaoligongshan ductile shear zone

WU Xiao-qi, LIU De-liang

(Faculty of Earth and Space Sciences, China University of Science and Technology, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The mylonite from the Gaoligongshan ductile shear zone within the Nujiang fault, western Yunnan is markedly depleted in SiO_2 , TiO_2 , total Fe and H_2O , and enriched in CaO , MgO , Na_2O and K_2O . The development of the ductile shear zone has led to the alteration of the pre-existing gneiss into mylonite, with the mass and volume change of the original rocks of -29.48% and -26.86% , respectively. The analysis of volume strain and mass transport of tectonite is an intermediate link of the examination of structural chronology and fluid/rock ratios, and will be widely used in the estimation of shortening volumes of compressional structural zones and the resources.

Key words: Nujiang fault; Gaoligongshan ductile shear zone; volume strain; mass transport; western Yunnan

古热带地区上二叠统中典型的三叠纪冈瓦纳植物群分子

中东的二叠纪植物常为欧美、华夏和冈瓦纳分子的混合物。*Dicroidium*, 一种典型的冈瓦纳三叠纪种子蕨, 出现于约旦死海地区 Wadi Himara 中的上二叠统 Um Ima 组。

丰富且保存完好的微体植物主要为 *Falcisporites*, 呈簇状及单个花粉颗粒产出。*Falcisporites* 已知产于上二叠统, 但在三叠系中高达59%。该花粉类型已被归入作为 Wadi Himara 地区微体植物优势种的 *Dicroidium*。另外还发现近60种其他孢粉类, 时代为晚二叠世, 包括 *Luackisporites virkkiae*, *Klausipollenites schaubergeri*, *Nuskoisporites dulhuntyi* 和 *Jugasporites delasaucei*。产自 Um Ima 组上部附近地点的另一种植物含几种典型的晚二叠世华夏分子, 包括 *Lobatannularia* 和 *Gigantonoclea*。覆于 Um Ima 组之上的 Ma'in 组产低分异度的微体植物, 以石松类孢子 (*Endosporites papillatus*, *Densoisporites neiburgii*) 和疑源类 (*Verhachium* sp.) 为主。

Dicroidium 为典型的冈瓦纳分子, 产自古纬度 35°S 以上, 即非洲南部、澳大利亚、新西兰、印度、阿根廷、智利、巴西南部及南极, 为时代最早、最北面的一个属, 传统上被认为是典型的三叠纪冈瓦纳疑源类。其于二叠世产于古热带地区, 随着典型的 *Glossopteris* 植物的衰落和最终消失, *Dicroidium* 可能已经向南迁移。随着三叠纪气候的改善, *Dicroidium* 可能扩散得更远, 最终定殖于整个冈瓦纳大部, 成为优势植物分子。

(摘自 *Geology*, 2006, 34(4): 265—268)