

韧性剪切变形过程中稀土元素的变异—— 对“稀土元素在剪切带中的含量变异及其变异机制”一文的讨论

杨晓勇

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 第三世界科学院中国科学技术大学地球科学
和天文学高级研究中心, 合肥 200026)

关键词 韧性剪切带 稀土元素 变异机制

摘要 本文通过对周建波等人1998年发表在本刊上的有关韧性剪切带稀土元素稳定性一文的讨论, 结合国内外有关稀土元素在各地质环境中的活动性和韧性剪切带流体渗滤作用对体系中元素迁移影响的研究成果, 探讨了韧性剪切变形过程中稀土元素的可变性质及其控制因素。

周建波等在《岩石矿物学杂志》1998年第一期上发表“稀土元素在剪切带中的含量变异及其变异机制——以胶南造山带北缘剪切带为例”一文(以下简称周文)^[1], 详细讨论了剪切带内糜棱岩在韧性剪切变形前后稀土元素变异情况, 认为韧性剪切带稀土元素含量增加主要是由于糜棱岩构造变形之后产生较大体积亏损所致, 对认识韧性剪切变形过程中稀土元素变异机制具有一定的指导作用。笔者对周文提供的全岩稀土元素原始数据进行仔细分析求证, 并结合前人有关论述以及稀土元素在地质环境中变化行为的研究成果, 认为将该区韧性剪切带岩石中稀土元素的变异简单归因为岩石在剪切变形前后的体积变化似有不妥之处, 望与原作者和同行们商榷, 不足之处敬请批评指正。

从周文提供的一条韧性剪切带构造岩(糜棱岩和超糜棱岩)以及原岩(二长花岗岩)的稀土元素分析数据中(原文表1)可以简单看出, 糜棱岩和超糜棱岩的各稀土元素组成均有不同程度的增加。原作者通过应用 Grant(1986)等比分析方法^[3], 得出糜棱岩与原岩之间稀土元素的变异是由于剪切变形前后岩石体积亏损所致, 计算出体积亏损率为14.5%; 超糜棱岩与原岩间稀土元素的变异是由于变形前后岩石体积亏损和开放体系下流体作用共同所致, 但主要因素仍归因于体积亏损, 计算出体积亏损率为20%。

笔者依据周文的三组原始数据进行重新计算, 采用类似 Gresens^[22]的方法, 在计算过程中定义一个元素变异率(S_i^j):

$$S_1^i(\%) = [(C_1^i - C_0^i) / C_0^i] \times 100 \text{ (糜棱岩)} \quad (1)$$

$$\text{或 } S_2^i(\%) = [(C_2^i - C_0^i) / C_0^i] \times 100 \text{ (超糜棱岩)} \quad (2)$$

其中 C_0^i 代表原岩中稀土元素 i 的测量值; C_1^i 、 C_2^i 分别代表糜棱岩和超糜棱岩中稀土元素 i 的测量值; S_1^i 、 S_2^i 分别代表计算的糜棱岩和超糜棱岩中稀土元素 i 的变异率。

第一作者简介 杨晓勇, 男, 35岁, 博士, 从事构造岩石学和地球化学研究。

收稿日期 1999-08-10, 改回日期 1999-10-09

现将周文表 1 的原始平均数据和此次计算出的变异率列入表 1。从表 1 可以看出,岩石在变形前后各稀土元素的变异率是很不一致的。对于糜棱岩,在轻稀土系列中,从 La → Pr 变异率最大,在 18% ~ 24% 之间,呈增加的变化趋势,但在 Nd 之后变化相对复杂,总体趋势是减小,甚至元素 Lu 的变异率为负值;对于超糜棱岩,各元素的变异率变化更大,甚至个别元素(Yb)为 106% 以上,而另外一些元素(Tb、Tm)为 0,元素 Lu 为 -14% 以下,即强烈亏损。

表 1 稀土元素原始数据(10^{-6})和变异率(S_i^1)

Table 1 The original contents and variation ratios of REE

元素	二长花岗岩(C_0)	糜棱岩(C_1)	超糜棱岩(C_2)	S_i^1 (%)	S_i^2 (%)
La	39.6	46.8	56.4	18.2	42.4
Ce	98.2	121	145	23.2	47.7
Pr	11.5	14.2	15.7	23.5	36.5
Nd	28.3	33.6	32.2	18.7	13.8
Sm	3.53	3.96	4.40	12.2	24.7
Eu	1.39	1.47	1.26	5.8	-9.4
Gd	3.72	4.44	3.64	19.4	-2.2
Tb	1.24	1.39	1.24	12.1	0
Dy	3.78	4.64	4.51	22.8	19.3
Ho	0.60	0.75	0.81	25.0	35.0
Er	1.62	1.78	1.90	9.9	17.3
Tm	0.24	0.27	0.24	12.5	0
Yb	1.05	1.30	2.17	23.8	106.7
Lu	0.42	0.41	0.36	-2.3	-14.3

以上计算没有将岩石的密度考虑进去(原文无岩石密度数据),但即使考虑到岩石密度的影响,按照周文结论即糜棱岩或超糜棱岩中稀土元素的富集是由于韧性剪切变形作用中的体积亏损所致,各元素的变异率也应该一致或比较接近。然而结果并非如此,显然这个结论不能成立。

早在 1969 年, Micheal 等通过不同地质环境中独居石、榍石和磷灰石中稀土元素的研究就曾指出,稀土组成受到地质环境的强烈影响,在富硅的火成岩中有利于重稀土和 Y 的富集,在低硅高碳的体系中有利于轻稀土的富集^[2]。笔者以为韧性剪切带变形岩石中稀土元素的变异主要归因于两大因素:一是岩石变形前后物理性质的变化(如体积和密度),二是变形过程中流体对岩石的渗滤作用。毋须质疑,韧性剪切变形作用将导致岩石的体积亏损^[4],体积的亏损又直接导致变形后岩石中元素的富集。但是,国内外韧性剪切带的研究成果表明,韧性剪切作用往往伴随着大规模的流体渗滤作用,同时伴随着元素的迁移^[5-8,23,24]。韧性剪切作用一般发生在中、下地壳,这种流体显然是具有较高温度和压力的热流体,对岩石中元素的选择性交代渗滤作用是不可忽视的。周文认为稀土元素为不迁移元素,虽然符合稀土元素的一般地球化学行为,特别是在低温地质作用过程中。但是,在地下深处热流体和强大韧性剪切力的驱动下,稀土元素的迁移必然发生。Nebelek 的研究表明制约稀土和其他微量元素发生溶解迁移的另一因素是流体与岩石之比,流体/岩石之比越大,对体系中稀土元素的溶解和迁移越有利^[9]。事实上,国内外大量研究成果表明,岩石

在变质作用过程中,特别是存在地下热流体作用时,稀土元素表现出较大的活动性^[10~14]。以富稀土的磷酸盐为例,Jonasson 等研究指出,稀土磷酸盐(REEPO₄)的溶解度从 La → Nd 是逐渐降低的, Nd → Er 是逐渐增高的^[15]; Byrne 等研究指出,从 Ce → Yb, 稀土磷酸盐的溶解度是逐渐增高的^[16]; Liu 等也得出相同的结论^[17]。上述研究表明,就稀土磷酸盐而言,在热液体系中从轻稀土到重稀土其溶解度一般逐渐增大。最近, Lewis 等在对美国黄石国家公园热液成矿系统进行研究时发现,新鲜和蚀变岩石的稀土组成存在差异^[18]; Hellman 等的研究结果证实热液蚀变过程中全岩的稀土元素特别是轻稀土是活动的^[19]。上述研究充分显示热液蚀变过程中稀土元素是活动的。

时间也是影响韧性剪切变形作用中稀土元素变异的一个因素。Martin 等的绿片岩相条件下玄武岩/海水体系相互交换反应实验显示轻稀土元素具有稳定性^[20]。但笔者却认为,这是由于实验条件较短,流体未能达到有效渗滤之故。对于韧性剪切带,情况就大不相同。O'hara 研究美国阿巴拉契亚山脉蓝岭推覆体韧性剪切带时,计算出的水/岩之比可以高达 10³ 量级^[5]。笔者等在研究郯庐断裂带南段安徽境内几条韧性剪切带时也发现有 10 ~ 1000 量级的水/岩之比^[8]。韧性剪切带发育过程中大多存在过高的水/岩比值,对岩石中稀土元素的选择性交代起着至关重要的作用。同时,考虑到韧性剪切带的发育都有一个相对较长的时期,或者经历了多期变形作用,地下渗滤流体能够达到有效的渗滤,必然对体系中的元素进行反复的交代作用,稀土元素很难在体系中保持恒定。一般而言,过量富集的个别稀土元素可以解释为富含该种元素的流体长期对岩石渗滤交代的结果,并受岩石应变过程中体积变化的联合制约。

所以,韧性剪切带中稀土元素的变异应看作是由于流体渗滤作用与岩石体积亏损共同所致,从而导致了岩石中元素乃至同位素体系的重新调整^[21]。

参 考 文 献

- 1 周建波, 胡克, 申宁华, 高游, 孙加鹏. 稀土元素在剪切带中的含量变异及其变异机制——以胶南造山带北缘剪切带为例. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(1): 17~22.
- 2 Micheal F and Altschular Z S. The relationship of rare earth composition of minerals to geological environment. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1969, 33: 725~732.
- 3 Grant J A. The isocon diagram a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 1986, 81: 1976~1982.
- 4 Ramsay J G and Wood D S. The geometric effects of volume change during deformation process. *Tectonophysics*, 1973, 16: 263~277.
- 5 O'hara K. Fluid flow and volume loss during mylonization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North California. *Tectonophysics*, 1988, 156: 21~36.
- 6 Sinha K A, Hawwit D A, Rimstidt J D. Fluid interaction and element mobility in the development of ultramylonites. *Geology*, 1986, 14: 883~886.
- 7 钟增球, 游振东. 剪切带的成分变异及体积亏损——以河台剪切带为例. 科学通报, 1995, 40(10): 913~916.
- 8 Yang Xiaoyong, Liu Deliang, Yang Xueming, et al. Characteristics of compositional migration in mylonites from the ductile shear zones of the southern Tancheng-Lujiang fault belt, Eastern Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 1998, 72: 37~50.
- 9 Nebelek P I. General equation for modeling fluid/rocks interaction using trace elements and isotopes. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 1765~1769.
- 10 Wood D A, Gibson I L, Thompson R N. Element mobility during zeolite facies metamorphism of the Tertiary basalts of

- eastern Iceland. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1976, 55(2): 241~ 254.
- 11 Tahle H J, Raith M, Hoerns S, et al. Element mobility during incipient granulite formation at Kabbaldurga, India. *Journal of Petrology*, 1987, 28: 803~ 834.
 - 12 Seifert K E and Sarah A C. Depletion of heavy rare earth elements in metamorphic minerals from Adirondack anorthosites. *Geology*, 1989, 17: 1004~ 1006.
 - 13 Hopf S. Behavior of rare earth elements in geothermal systems of New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 1993, 47: 333~ 357.
 - 14 Leroy J L, Turpin L. REE, Th and U behavior during hydrothermal and supergene processes in a granitic environment. *Chemical Geology*, 1988, 68: 239~ 251.
 - 15 Jonasson R G, Banoft G M, Mesbit H W. Mobility of some hydrous REE phosphates with implications for diagenesis and seawater concentrations. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 2133~ 2139.
 - 16 Byne R H, Kim K H. Rare earth precipitation and co-precipitation behavior: The limiting role of PO₄ on dissolved rare earth concentrations in seawater. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 519~ 526.
 - 17 Liu X, Byrne R H. Rare earth and yttrium phosphate solubilities in aqueous solution. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 1625~ 1633.
 - 18 Lewis A J, Martin R P, Neil C S, et al. The rare earth elements geochemistry of acid sulfate and acid sulfate chlorite geothermal systems from Yellow Stone National Park, Wyoming, USA. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1997, 61(4): 695~ 706.
 - 19 Hellman P L, Henderson P. Rare earth elements mobile during spilitisation. *Nature*, 1977, 267(1): 38~ 40.
 - 20 Martin M, William S J. Experimental evidence of rare earth element immobility in greenstones. *Nature*, 1979, 282(22): 398~ 399.
 - 21 Su Q, Fullagar P D. Rb/Sr and Sm/Nd isotopic systematics during greenschist facies metamorphism and deformation: examples from the southern Appalachian Blue Ridge. *Journal of Geology*, 1995, 103: 423~ 436.
 - 22 Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 1967, 2: 47~ 65.
 - 23 Newman J and Mitra G. Lateral variations in mylonite zone thickness as influenced by fluid-rock interactions, Linville Falls fault, North Carolina. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15(7): 849~ 863.
 - 24 O'hara K. Fluid-rock interaction in crustal shear zones: A directed dislocation approach. *Geology*, 1994, 22: 843~ 846.

The Variation of REE in the Process of Ductile Shearing: A Discussion on the Paper of "Variation of REE Content in Shear Zone and Its Mechanism"

Yang Xiaoyong

(Department of Earth & Space Sciences, University of Science & Technology of China; Advanced Center
for Earth Sciences & Astronomy, the Third World Academy of Sciences, Hefei 230026)

Key words: REE; ductile shear zone; variation mechanism

Abstract

The paper gives detailed comment on the paper of "Variation of REE content in shear zone and its mechanism" — Exemplified by the ductile shear zone on the northern margin of Jiaonan

(下转第 54 页)(to be continued on p. 54)

www.yskw.ac.cn

(上接第 48 页) (Continued from p. 48)

orogenic belt", published in this magazine in 1998. Combined with the results of mobility of REE in various geological environments and the element migrations effected by fluid flowing in the ductile shear zones, the author expounds that fluid infiltration and rock volume loss are controlled factors of REE variation in the process of ductile shearing.