较长时间平均的大气环流演变特征或异常,不仅是大气内部动力过程及其变化的结果,也是各种外界强迫因子(海温异常,太阳活动异常等)综合作用的结果.分析大气环流的异常可以对不同时间尺度的气候变化给出一定的合理解释.研究年代际时间尺度的气候变化及气候突变,分析大气环流系统的异常也是一种重要途径.

致谢 本工作为“攀登”计划(95-预-21)、国家攻关计划(96-908-01-01-04)和中国科学院项目(KZ952-S1-403)的资助项目.

参 考 文 献

- 1 Walker G T, Bliss E W. World weather V mem. Roy Meteor Soc, 1932, 4: 53~ 84
- 2 Rogers J C. The association between the North Atlantic oscillation and the Southern oscillation in the northern hemisphere. Mon Wea Rev, 1984, 112: 1999~ 2015
- 3 Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784~ 811
- 4 王绍武,赵宗慈. 北半球对流层下部温度变化的研究. 气象学报, 1984, 42: 238~ 245
- 5 Yamamoto R, Inashima T, Sanga N K. An analysis of climatic jump. J Meteor Soc Japan, 1986, 64: 273~ 281
- 6 严中伟,季劲钧,叶笃正. 六十年代北半球夏季气候跃变. iv. 降水和温度变化. 中国科学, B辑, 1990(1): 97~ 103
- 7 Ye Duzheng, Yan Zhongwei. Climate Jumps in the Hestory, Climate Variability. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 3~ 14
- 8 严中伟. 六十年代夏季气候跃变过程的初步分析. 大气科学, 1992, 16: 111~ 118
- 9 Fu C, Fletcher J. Large signals of climate variation over the Asian Monsoon region. Adv Atmos Sci, 1988, 5: 389~ 404
- 10 Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. Science, 1995, 269: 676~ 679
- 11 Jones P D, Jonsson T, Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and S W Iceland. Int J Clim, 1997, 17: 1433~ 1450

(1998-10-12 收稿, 1999-03-02 收修改稿)

阿尔金西段榴辉岩中石榴石的成分环带及其动力学意义

张泽明 杨 勇^④ 张建新

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ④中国地质大学(武汉)测试中心, 武汉 430074)

摘要 阿尔金西段的榴辉岩为中温高压变质岩,并经历了角闪岩(至麻粒岩)相退变质作用.在形成于榴辉岩相的石榴石变斑晶中保存复杂的成分环带,它记录了榴辉岩多阶段变质作用 $P-T$ 轨迹和具降压升温特征的早期退变质过程.这些证据均表明榴辉岩在峰期和早期退变质过程中的停留时间很短,即经历了快速构造折返.

关键词 榴辉岩 石榴石 成分环带 $P-T$ 轨迹 抬升速率 阿尔金

变质岩石学研究的重要目的之一就是恢复岩石的变质作用温度-压力轨迹,重建造山过程中地壳岩块的俯冲和折返速率,以及加热和冷却速率.可以提供这类信息的极其重要的矿物

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-16-1769>

是石榴石, 因为石榴石是 Ca-Mg-Fe-Mn 固溶体矿物, 它可以在各种成分的岩石中和非常宽的 P - T 条件下出现, 并可参与许多与温度、压力相关的变质反应, 非常容易形成生长成分环带和扩散环带, 因此它不仅是一个很好的地质温压计, 也是一个很好的地质速度计. 本文对阿尔金西段榴辉岩中变斑晶石榴石进行了详细的成分剖面分析, 发现在中温高压榴辉岩相变质过程中石榴石形成了明显的生长环带, 而且在角闪岩相退变质作用中仅受到轻微的成分扩散改造. 通过深入分析, 获得了变质作用 P - T 轨迹和抬升速率等重要动力学信息.

1 岩石学

在阿尔金西段, 榴辉岩主要分布于阿尔金山北坡, 呈透镜状或团块状产于角闪岩相变质的长英质片麻岩和斜长角闪岩中. 榴辉岩的矿物组合为石榴石+ 绿辉石+ 多硅白云母+ 石英+ 金红石+ 锆石. 利用共生的石榴石-单斜辉石之间的 Fe-Mg 分配系数温度计^[1] 和绿辉石中硬玉分子压力计^[2] 对榴辉岩的形成条件进行了估算, 结果是 $P > 1.4 \text{ GPa}$, $T = 751 \sim 855 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1). 在相邻的阿尔金山南坡分布有典型的孔兹岩系, 表明区域变质作用程度已达到麻粒岩相.

表1 榴辉岩形成温度计算(假定 $P = 1.5 \text{ GPa}$)

绿辉石		石榴石			K_D	$T / ^{\circ}\text{C}$
X_{Fe}	X_{Mg}	X_{Fe}	X_{Mg}	X_{Ca}		
0.132	0.496	1.357	0.845	0.252	6.034	783
0.127	0.509	1.182	0.808	0.323	5.863	855
0.114	0.505	1.289	0.786	0.277	7.265	751

本文所研究榴辉岩呈斑状变晶结构, 经历了较强烈的退变质作用, 绿辉石几乎全部被透辉石(或角闪石)+ 斜长石后成合晶假象所取代, 部分石榴石发育有角闪石(或透辉石)+ 斜长石组成的后成晶冠状体. 石榴石粒度较粗(3~ 10 mm), 为变斑晶. 进行成分剖面分析的石榴石粒度约 6.5 mm, 其内部含有大量的矿物包体, 如石英、黝帘石、角闪石、多硅白云母和金红石(图1). 从矿物中心向边缘包体矿物的粒度加大, 数量减少. 上述矿物包体在石榴石中随机分布, 如对榴辉岩相变质作用具有指示意义的金红石在中心、幔部和边缘均有出现, 这表明整个石榴石都是形成在榴辉岩相变质过程中. 矿物包体分布较密集处和化学成分变化(见下文)指示的寄主矿物结晶中心与其几何中心并不一致, 结晶中心应在图1所示矿物颗粒的中下部.

图1 石榴石变斑晶及其包体分布图(据照片简化) 图中带箭头虚线表示所分析的成分剖面位置, 箭头方向示从分析起点至终点方向, 穿过石榴石的分析剖面长度为 6.34 mm

2 石榴石的成分环带

矿物电子探针分析在中国地质大学(武汉)测试中心电探针室 JEOL-733 型电子探针上进行, 分析条件为 15 kV 加速电压, 20 nA 电子束和 100 s 计数时间. 图2为 MnO , MgO , CaO 和 FeO 的点分析剖面, 起点在与石榴石相邻的黑云母中, 终点在石英中. 石榴石的核、幔和边 3

个不同部位的代表性分析结果见表2.

表2 石榴石成分环带代表性分析结果

	位置 ^{a)}	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	总量
核部	A	38.08	0.04	22.02	0.01	24.37	2.38	4.10	9.02	0.02	100.04
幔部	B	39.73	0.10	22.28	0.02	20.18	0.47	6.65	11.01	0.01	100.45
边部	C	39.11	0.05	22.89	0.03	20.58	0.40	10.2	6.92	0.03	100.21
最边部	D	39.68	0.08	22.44	0.01	20.99	0.53	8.77	7.44	0.01	99.95

a) 相当于图3中右侧相应阶段的位置

由图2和3可见,石榴石具明显成分环带,从中心至边部,MnO逐渐降低,到最边部略有升高;MgO逐渐升高,到最边部略有降低;FeO逐渐降低,到最边部略有升高;CaO向边部逐渐升高,在核部与边部之间达到最高值,然后向边部又逐渐降低,到最边部降低更为明显.大量的研究表明,MgO呈“碗”形,MnO呈“钟”形的成分环带是在进变质作用过程中形成的生长环带,而在最边部MgO降低、MnO升高是退变质过程中形成的扩散环带^[3~7].因此,本文所研究的石榴石除了其最边部非常狭窄的一段是扩散环带以外,核部至边部的绝大部分应为榴辉岩相进变质生长环带.若以分析剖面结束端MgO降低开始算起扩散作用涉及的深度仅约40 μm(两个分析点距),若以MnO的升高开始算起扩散作用的涉及深度可达100~200 μm(相应的分析点可达5~10个).这与已经得出的不同元素具不同扩散能力(系数)的结论是一致的^[8~10].值得注意的是,在成分剖面有几处不连续突变,这是包体与主矿物石榴石之间的成分扩散造成的.如在第60分析点附近出现斜长石和多硅白云母包体,在250点附近出现了绿帘石和石英包体,在260~270分析点附近有石英和角闪石包体.

图2 石榴石成分环带的点分析剖面

图左侧为剖面起点,起点矿物为黑云母,右侧为剖面终点,终点矿物为石英;横坐标为分析点号,经过石榴石的等间隔分析点数为291个,点间距为21.8 μm

图3 石榴石成分环带的4个生长阶段划分

(据图2简化)

A示榴辉岩进变质阶段,B示榴辉岩相变质作用峰期,C示升温降压退变质阶段,D示降温降压退变质阶段

3 动力学讨论

从低到中级进变质作用过程中,某些元素在石榴石和共生矿物之间的不均匀分配,以及缓慢的晶内扩散常使石榴石形成生长成分环带.但是到高角闪岩相,变质作用温度 $> 600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,元素的扩散能力大大提高,将足以使石榴石在低温下形成的生长环带部分或全部均匀化^[5,7,11,12].在大别山地区,在含柯石英的超高压中温($700\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)榴辉岩中石榴石成分均匀,不具环带,而在不含柯石英的高压低温($550\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$)榴辉岩中石榴石普遍发育生长环带^[13].但近来的研究发现,在经历了较高温变质的榴辉岩和麻粒岩中石榴石也可以保存进变质生长环带^[10,14,15].相应研究者推测这些榴辉岩和麻粒岩在高温下的持续时间可能是很短的.本项研究也表明,经历了较高温($750\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)变质的榴辉岩可以保存进变质生长环带,而且这种环带又是形成在榴辉岩相域,并不从低级变质相向榴辉岩相的进变质过程中.

据榴辉岩形成下限压力($> 1.4\text{ GPa}$,见上文)推测其形成深度应 $> 40\text{ km}$,如果榴辉岩没有经历快速俯冲和快速抬升过程,较高温下的成分扩散作用将足以使生长环带均匀化.据扩散模拟结果,在 $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下石榴石边部形成 $15\text{ }\mu\text{m}$ 深的扩散环带所需时间 $< 100\text{ }000\text{ a}$ ^[14].按本文所获得的 $200\text{ }\mu\text{m}$ 最大扩散深度计算,所需时间最长约为 $1\text{ }333\text{ }333\text{ a}$.这表明榴辉岩从地幔抬升到相当于角闪岩相的中地壳层次所需时间不会 $> 1.3\text{ Ma}$.按照榴辉岩的下限压力(1.4 GPa)和角闪岩相上限压力($1.0\sim 1.2\text{ GPa}$)计算,抬升距离为 $6\sim 12\text{ km}$,抬升速率应 $> 4.5\sim 9.0\text{ mm/a}$.当然,这样快的抬升速率仅表示的是榴辉岩最初的抬升速率,并不意味着榴辉岩在向地表的抬升过程中一直具有这样高的速率.

研究表明,在石榴石生长环带中 MgO 逐渐升高和 MnO 逐渐降低反映岩石的形成温度逐渐升高, CaO 含量越高形成压力越高,而且据成分变化可恢复岩石所经历的 $P\text{-}T$ 轨迹^[3,10,16\sim 18].本文基于石榴石中主要氧化物的成分变化特征,将整个环带划分为A、B、C和D 4个部分(图3),它们分别对应于具有不同动力学条件的4个变质阶段(图

4). A阶段(部分), MnO 逐渐降低, MgO 和 CaO 逐渐升高,表示岩石的温压条件逐渐升高,即升温升压进变质阶段;B阶段, MnO 明显下降, MgO 明显升高, CaO 也逐渐升高,并达到最大值,表明岩石达到最高变质压力,为峰期变质阶段;C阶段, MnO 降到最低, MgO 逐渐升高,并达到最大, CaO 逐渐降低,表示在压力下降的同时温度继续升高,为升温降压退变质阶段;D阶段, MnO 升高, MgO 和 CaO 降低,为通过成分扩散形成的反环带,为降温降压退变质阶段.值得注意的是,矿物包体密集分布所指示的石榴石结晶中心与成分剖面所显示的结晶中心(MnO 最高, MgO 和 CaO 最低)基本一致,但与矿物几何中心不同.在石榴石结晶中心与边缘相距的较窄部分(图1的下半部,图2和3的左半部)缺失升温降压历史记录(C阶段).图4表示榴辉岩变质作用 $P\text{-}T$ 轨迹呈顺时针方向旋转,最高压力与最高温度并不同时达到,显示在其抬升过程中经历了升温降压过程,很有可能进入到了角闪岩相(至麻粒岩相) $P\text{-}T$ 区域.

图4 据石榴石成分环带推测的榴辉岩变质作用 $P\text{-}T$ 轨迹片断

致谢 研究工作得到许志琴院士和杨经绥研究员的指导与帮助,并得益于与李海兵和吴才来博士的讨论. 本文得到中法“阿尔金山-祁连山构造演化及岩石圈剪切作用”合作项目,国家自然科学基金(批准号:49772142)和国土资源部大陆动力学开放研究实验室,及壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室资助.

参 考 文 献

- 1 Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J Metamorphic Geol*, 1985, 3: 231~ 243
- 2 Holland T J B. The reaction albite= jadeite+ quartz determined experimentally in the range 600~ 1200 °C. *American Mineralogy*, 1980, 65: 129~ 134.
- 3 Ghent E D. A review of chemical zoning in eclogite garnets. In: Smith D C, ed. *Eclogites and Eclogite-facies Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1988. 207~ 235
- 4 Ronald F B, Tracy R J. *P-T* paths from zoned garnets: some minimum criteria. *American J Science*, 1991, 291: 917~ 939
- 5 Spear F S. On the interpretation of peak metamorphic temperatures in light of garnet diffusion during cooling. *J metamorphic Geol*, 1991, 9: 379~ 388
- 6 Zhang R Y, Liou J G. Coesite-bearing eclogite in Henan Province, Central China: detailed petrography, glaucophane stability and *P-T* path. *Eu J Mineral*, 1994, 6: 217~ 233
- 7 Jiang J Z, Lasaga A C. The effect of post-growth thermal events on growth-zoned garnet: implications for metamorphic *P-T* history calculations. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 105: 454~ 459
- 8 Spear F S. *Metamorphic phase equilibrium and pressure-temperature-time paths*. Washington D C: Mineralogical Society of America Monograph, 1993. 799
- 9 Hiroi Y, Seneviratne L K, Motoyoshi Y, et al. Compositional zoning of garnet in pelitic granulite from Sri Lanka: Four major elements (Fe, Mg, Mn, Ca). *Journal of Geological Society of Japan*, 1995, 101: VII~ VIII
- 10 Hiroi Y, Kishi S, Nohara T, et al. Cretaceous high-temperature rapid loading and unloading in the Abukuma metamorphic terrane, Japan. *J Metamorphic Geol*, 1997, 16: 67~ 81
- 11 Carlson W, Schwarze E. Petrological significance of prograde homogenization of growth zoning in garnet: an example from the Liano Uplift. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 631~ 644
- 12 Florence F P, Spear F S. Effects of diffusional modification of garnet growth zoning on *P-T* path calculation. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 107: 487~ 500
- 13 Zhang Z M, You Z D, Hna Y J, et al. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, Eastern central China. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 9: 134~ 156
- 14 O'Brien J P. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation. *Lithos*, 1997, 41: 119~ 133
- 15 Chen N S, Sun M, You Z D, et al. Well-preserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, central China. *J metamorphic Geol*, 1998, 16: 213~ 222
- 16 Spear F S, Selverstone J, Hickmott D, et al. *P-T* paths from garnet zoning: a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes. *Geology*, 1984, 12: 87~ 90
- 17 Arenas R, Abati J, Martinez Catalan J R, et al. *P-T* evolution of eclogites from the Agualada Unit (Ordenes Complex, northwest Iberian Massif, Spain): Implications for crustal subduction. *Lithos*, 1997, 40: 221~ 242
- 18 Enami M. Pressure-temperature path of Sanbagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet. *J Metamorphic Geol*, 1998, 16: 97~ 106

(1998-09-08 收稿, 1999-02-10 收修改稿)