

文章编号: 1001-8166(2005)04-0421-06

黄镇低温榴辉岩中石榴石成分分带的扩散动力学研究*

程昊^{1,2}, 陈道公¹, 周祖翼²

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:对南大别黄镇低温榴辉岩中不同粒径的石榴石颗粒所具有的不同化学成分分带进行研究, 通过建立相应的扩散调整模型, 运用扩散动力学的方法进行了模拟计算。结果表明该榴辉岩中石榴石经过峰期榴辉岩相变质之后, 其成分环带经约 23 Ma 的扩散调整形成现在的组分特征。黄镇榴辉岩在峰期变质之后曾经历的是一个约 6 Ma 冷却过程, 该过程持续了约 23 Ma。黄镇榴辉岩不大可能与南大别超高压榴辉岩一样受到过超高压变质作用。

关键词:低温榴辉岩; 石榴石; 扩散; 数值模拟

中图分类号: P58 **文献标识码:** A

碰撞造山带的俯冲、抬升冷却历史一直是地质工作者所关心的一个问题。获得造山带抬升冷却速率的信息一般有 2 种重要方法: 一种是同位素地质年代学的方法, 即通过对具有不同封闭温度的矿物进行定年来获取抬升冷却速率^[1], 由于矿物放射性同位素体系的封闭温度并非常数, 它随着矿物及其寄主岩石的化学成分、矿物颗粒大小、冷却速率、初始峰期温度不同而不同, 也与岩石中有无流体存在等因素有关^[1-4]。因此, 给出的年龄所对应的封闭温度就存在误差。尽管可以利用 Dodson^[5] 公式给出更为准确的封闭温度值, 但公式所要求的冷却速率在一些情况下往往是未知的, 加之一些相应的扩散系数等数据的缺乏使得这种方法在变质岩的研究中有时很难确切地解决问题, 尤其是对一些短时间快速冷却事件常常无法给出可信的冷却速率^[1-6]。另一种目前开展还不很多的方法则是通过对矿物在冷却过程中由于扩散作用所形成的成分分带进行数值模拟, 计算冷却速率的地质速率计法。该方法已经在世界其它一些地区的研究中得到了一定的应用^[7-12]。两种方法以不同的角度来共同研究, 互相

验证大时间尺度的岩块冷却历史, 而用后者来给出更精细的、短时间的约束。然而到目前为止使用地质速率计方法来研究大别山抬升冷却速率的例子还很少见^[13], 尽管通过地质年代学方法已经得到了大别山一些岩块的冷却速率^[14-17], 但缺乏其它角度的辅证和支持, 特别是对于一些地区, 比如黄镇榴辉岩, 由于其形成温度较低, 矿物之间的同位素体系在峰期变质时可能尚未达到平衡, 所以试图用同位素年代学的方法来研究该地区的抬升冷却史就显得较困难, 因此我们尝试从地质速率计的角度来探讨黄镇榴辉岩的冷却史。

1 样品及分析结果

样品采自太湖县黄镇附近朱家冲, 太湖—马庙公路南侧天然露头—4~5m 宽的透镜体中。矿物温压计的研究表明该榴辉岩形成温压为 580~650 °C、2.0~2.5 GPa^[18-21], 属于典型的冷榴辉岩。其中较大颗粒石榴石中常见有绿帘石、石英、钠长石等细小矿物包体。这一方面表明榴辉岩化的温度不高, 石榴石的均匀化程度较低, 属低温榴辉岩, 另一

* 收稿日期: 2003-09-27; 修回日期: 2004-08-20.

* 基金项目: 中国博士后科学基金项目“大别山石榴石成分分带的扩散动力学研究”; 国家自然科学基金项目“大别山冷却史: 地质年代学和扩散动力学研究”(编号: 40273028)资助.

作者简介: 程昊 (1975-), 男, 贵州贵定人, 博士研究生, 主要从事地球化学动力学方面研究. E-mail: chenghao@mail.tongji.edu.cn

方面也表明在榴辉岩化之前曾经历过绿片岩相的前进变质过程。另外石英的存在也反映榴辉岩化的压力条件尚未达到超高压变质环境。峰期矿物组合为石榴石 + 单斜辉石 + 金红石 + 磷灰石 + 石英。在退变质阶段,单斜辉石几乎完全被细小纤维状角闪石代替,仅偶尔见到少许残留,但仍保存有单斜辉石的外形,而石榴石则较稳定,仅局部出现非常窄的反应边结构。主要的退变质作用可能是在高绿片岩相(绿帘-角闪岩相)条件下进行,形成的矿物组合主要为斜黦帘石、多硅白云母和冻蓝闪石、阳起石及少许

黑云母,这些矿物较为粗大,除交代石榴石外,还在这些矿物中存在有石榴石的残留。继主退变期之后,退变作用继续延长至低绿片岩相,出现的矿物组合主要是绢云母和绿泥石。对不同粒径的石榴石颗粒进行电子探针扫描分析(图 1)。分析工作在法国亨利·普安卡雷大学(Université Henri-Poincaré,南锡(Nancy)的 Cameca SX100 上完成的。从分析结果(图 2)可以看到(CD107^[19]),不同粒径的石榴石表现出的环带特征虽不完全一致,但基本变化趋势却是一样的:从颗粒中心到边部,Mg 含量增加,Fe、

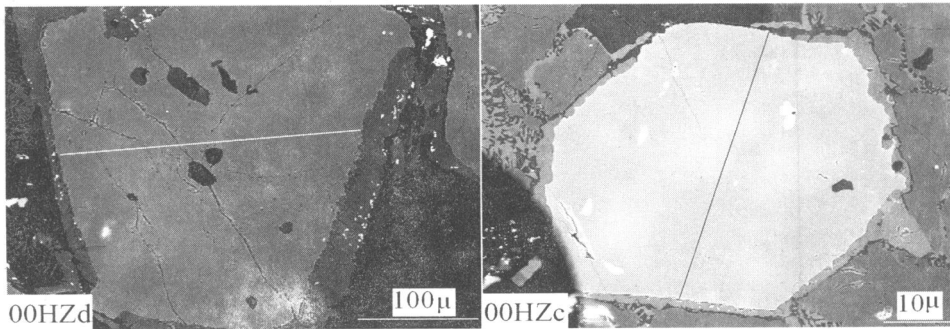


图 1 石榴石的 BSE 图

Fig 1 BSE image of garnet prophyroblasts

Ca 含量减少,并且呈左右对称,为典型的生长环带。对于约大于 1 mm 的颗粒,它们的环带特征则几乎是一样的,这和其他工作者观察到的一致^[19-23]。由于各颗粒具有相同的变质历史,那么可以认为各颗粒峰期变质前保存的是近乎一致的原始环带形状特征,只是在后期退变质过程中,由于粒径的不同,扩散作用对于其中组分调整的幅度不一致,其中较小颗粒的原始环带特征更容易被后期扩散作用所磨平,正是这种差异性调整造成了现在多样的环带特征。基于这种假设,对这些不同粒径的石榴石建立相应的扩散调整模型,进行数值模拟给出退变质过程的信息。

2 模型及模拟

Perchuk 等^[24]曾建立了一个模型,成功地对高加索山脉榴辉岩中石榴石环带进行了模拟。黄镇榴辉岩中石榴石的成分环带特征与之类似,本文采用前者建模的基本思想,结合黄镇的具体情况,设石榴石为球形并且为中心对称,那么其扩散调整过程实际上是一个均一化的过程,该过程可以用多端员组

分扩散方程来描述^[25]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{n-1} D_{ij} \left(\frac{\partial^2 C_j}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial r} \right) \quad (1)$$

其 C_i 为组分 i 的浓度, r 为距石榴石中心的距离, $0 < r < a$, a 为石榴石颗粒大小的半径, n 为组分数,扩散系数 D_{ij} 的表达式为^[26]:

$$D_{ij} = D_{ij}^0 - \left[(C_k D_i^0) \left\{ \sum_{k=1}^n C_k D_k^0 \right\} \right] (D_j^0 - D_n^0) \quad (2)$$

$i_j = 0 (i \neq j)$, $i_j = 1 (i = j)$, D_i^0 是成分 i 的自扩散系数,式 (1) 的矩阵形式为:

$$\frac{\partial \underline{C}}{\partial t} = \underline{D} \left(\frac{\partial^2 \underline{C}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \underline{C}}{\partial r} \right) \quad (3)$$

\underline{D} 为扩散系数矩阵,考虑到石榴石化学计量关系,存在一个独立的成分,因而扩散系数矩阵是一个 $n - 1$ 阶的方阵, \underline{C} 是一个 $n - 1$ 维向量。为了求解方程 (3),需要把原成分转化成另一种形式,引入矩阵 \underline{B} ,其列向量为 \underline{D} 的特征向量:

$$\underline{C} = \underline{B}^{-1} \underline{C} \quad (4)$$

新形式成分的扩散系数矩阵 \underline{D} 通过:

$$\underline{D} \cdot \underline{B} = \underline{B} \quad (5)$$

来计算得到。把方程 (4)、(5) 带入 (3) 就得到了新

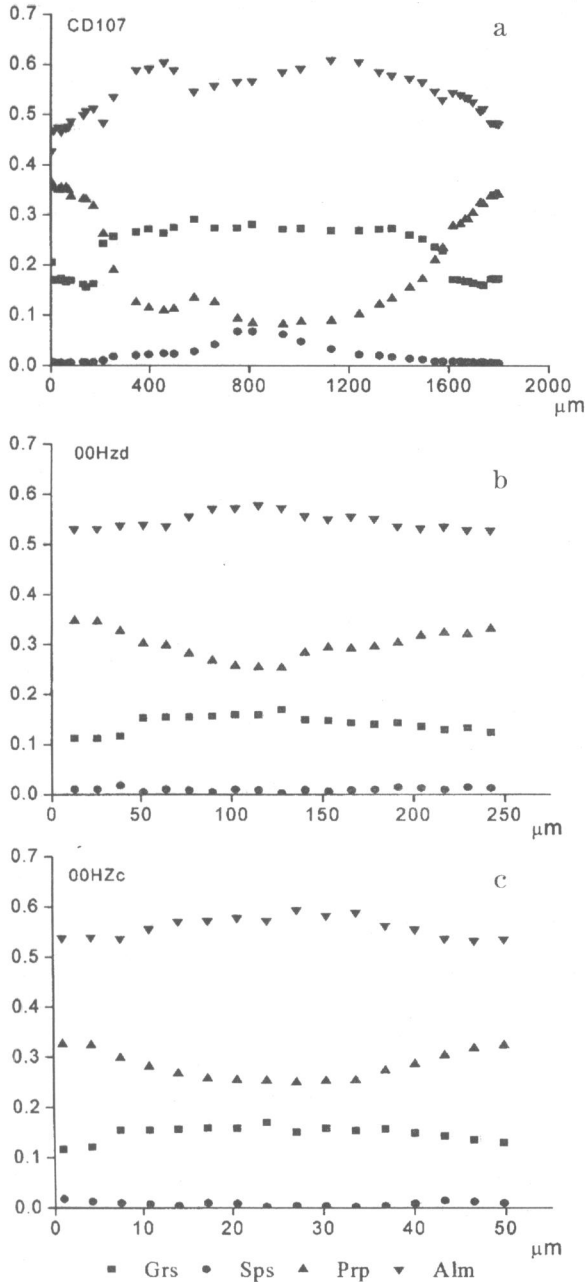


图 2 不同粒径石榴石成分分析剖面

Fig 2 Microprobe profile of garnet with different sizes

成分的扩散方程:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \quad (6)$$

由于 \bar{D} 是对角矩阵, 方程 (6) 表达式右边就是标准的球扩散方程, 从而:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \quad (7)$$

这样, 每一种成分的扩散都由上述方程约束, 设原始成分的组成为:

$$C_i(r, t = 0) = f_i(r) \quad (8)$$

引入新的无量纲的时间参数 t_i 和 r :

$$t_i = \frac{t}{a^2} \cdot \frac{r_i}{d}, \quad r = r/a \quad (9)$$

之所以引入新的时间参数是因为扩散系数是温度函数, 而温度与时间相关, 从而特定大小颗粒的 $T-t$ 演化可以由该参数表达, 显然 t_i 反映的是均一化的程度, t_i 越大表示均一化越彻底, 由于该参数与颗粒尺寸有关, 因而, 在相同的 $T-t$ 演化条件下, 小颗粒均一化程度要高些, 而大颗粒则相对易保留原始组成, 可以这样认为, 经历了相同演化历史的不同大小石榴石颗粒中, 粒径越大的颗粒, 其组成越是接近原始组成. 引入新的时间变量后, 扩散方程的解为^[27]:

$$C(r, t) = 3 \int_0^1 r^2 f_i(r) dr + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\frac{2}{n} t) \frac{\sin(\frac{n}{r})}{\sin^2 n} \int_0^1 r f_i(r) \sin(n r) dr \quad (10)$$

选取分析样品中最大的石榴石颗粒 (CD107)^[19] 的组成代表原始成分, 对最小颗粒石榴石 (00Hzc) 进行模拟. 该原始组成可以用一个多项式来近似:

$$f_i(r) = b_1 + b_2(r)^2 + b_3(r)^4 + b_4(r)^6 \quad (11)$$

这样方程 (10) 就变为:

$$C(r, t) = b_1 + \frac{3}{5} b_2 + \frac{3}{7} b_3 + \frac{1}{3} b_4 + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\frac{2}{n} t) \frac{\sin(\frac{n}{r})}{\sin^2 n} A_n \quad (12)$$

式中, n 为 $n \cot(n) = 1$ 的根.

$$A_n = b_1 \left(\frac{1}{n^2} \sin n - \frac{1}{n} \cos n \right) + b_2 \left[\left(\frac{3}{n^2} - 6 \frac{1}{n^4} \right) \sin n - \left(\frac{1}{n} - 6 \frac{1}{n^3} \right) \cos n \right] + b_3 \left[\left(\frac{5}{n^2} - 60 \frac{1}{n^4} + 120 \frac{1}{n^6} \right) \sin n - \left(\frac{1}{n} - 20 \frac{1}{n^3} + 120 \frac{1}{n^5} \right) \cos n \right] + b_4 \left[\left(\frac{7}{n^2} - 210 \frac{1}{n^4} + 2520 \frac{1}{n^6} - 5040 \frac{1}{n^8} \right) \sin n - \left(\frac{1}{n} - 42 \frac{1}{n^3} + 840 \frac{1}{n^5} - 5040 \frac{1}{n^7} \right) \cos n \right]$$

扩散数据 Mg, Fe, Mn 采用 Ganguly^[28] 的数据, 因为其实验样品与本研究对象组分相似, Ca 采用 Schwandt^[29] 的数据. 结合前人所得到的峰期变质温压条件, 选取所有石榴石平均成分 $Alm_{53} Prp_{24} Sps_5 Grs_{21}$, 计算出扩散系数矩阵 \bar{D} , 得到由其特征向量组成的 \bar{B} 矩阵, 结合方程 (4) 得到新的成分表达式为:

$$\begin{aligned} Alm' &= -0.023Alm - 0.057Prp - 1.209Sps \\ Prp' &= -0.912Alm + 0.482Prp + 0.176Sps \\ Sps' &= -0.228Alm - 0.972Prp + 0.665Sps \end{aligned}$$

由此得到图 2a 的新组分图 (图 3). 由于扩散系数矩阵包含了 Mg, Fe, Mn 及 Ca, 所以无论对哪一个进

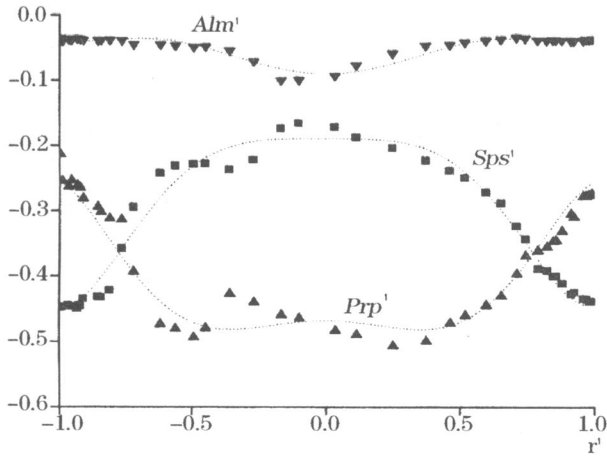


图 3 转换后的图 2a 石榴石成分分带
 Fig 3 Garnet profile of figure 2a recalculated to new components

行计算都是和谐的,只需对其中一个进行模拟计算,这里选取 Prp' 进行多项式拟合,并把 $b_{1..4}$ 代入方程 (12),从而得到该组分调整变化方程。从图 4 可以看到当 $t = 0.1$ 时环带消失,该小颗粒所对应的位置大约在 $t = 0.01$ 处。这就是说,具原始组分的石榴石 ($t = 0$) 经过 $t = 0.01$ 的跨度能够形成现在所观察到的环带特征,而当 $t > 0.1$ 后,整个原始组成信息将被彻底改造。

3 讨论

对黄镇榴辉岩中石榴石成分环带进行扩散模拟,得到了 t 这个重要的参数。由其定义 (方程 (9)),可知对于特定的颗粒它是扩散系数的函数,

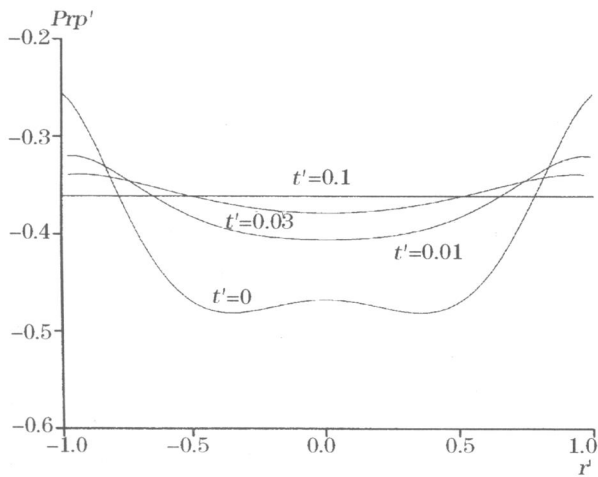


图 4 石榴石成分分带扩散调整均一化
 Fig 4 Diffusion homogenization of the zoning profile

而扩散系数是温度的函数,冷却过程中温度是时间的函数,这就使得 t 与冷却时间联系起来。由于黄镇的情况属于多端员组分的扩散问题,其扩散系数是一个矩阵,这使得用 t 直接得出冷却速率的想法无法实现。但是,多元扩散可以通过假定一个“有效二元扩散系数” $D_{i(EB)}$ 来把其降为二元扩散问题^[30-32],这样方程 (9) 中就只有一个扩散系数 $D_{i(EB)}$,而非等温扩散可以通过寻找一个固定的特征温度 T_{ch} 将其简化成等温扩散问题^[32,33],从而就有:

$$t = \int_{t_0}^t \frac{D(t)_{i(EB)}}{a^2} dt = D_{i(EB)}(T_{ch})(t - t_0) / a^2 \quad (13)$$

Chakraborty 等^[32]指出,对于单一的 $T-t$ 过程 $T_{ch} = 0.97T_{peak}$ 。结合该黄镇榴辉岩的峰期温度,这里取 650 作为 T_{peak} ,那么 $T_{ch} = 630$ 。为了计算 $D_{i(EB)}$ 需要知道除了一个非独立端员的其它各端员组分 $n - 1$ 的自扩散系数,从图 2 中可以看到, Mn 含量非常低 (平均为 2%), 可以不加考虑。这样问题就简化为三端员组分扩散的情况,把 Ca 作为其它 3 组分中非独立端员,在石榴石平均组成的条件下 ($Alm_{53} Prp_{24} Sps_2 Grs_{21}$), 得到 $D_{Fe(EB)} = D_{Mg(EB)} = 3.9 \times 10^{-25} \text{ cm}^2/\text{s}$, 代入 t , 从而 $t = 23 \text{ Ma}$ 。这意味黄镇榴辉岩经峰期之后,在冷却过程中扩散作用使得其原始组成不断变化,经过约 23 Ma 之后冷却到一个扩散不再起作用 (组分“冻结”) 的温度,这时的化学组成就保留下来,根据现有的实验扩散数据^[28,29],在温度低于 500 以下,石榴石内主要元素的扩散几乎停止,这表明黄镇榴辉岩经峰期变质之后以约 6 Ma 的速率冷却至 500 左右。由于温度 T 的估计误差,低温下扩散系数的可靠性,氧逸度的影响以及颗粒剖面的真实长度测量误差问题等这些不确定性因素都会对 t 的估计产生影响,尽管有些影响会互成消长关系,按照 Ganguly 等^[34]的估计,这些因素将会导致 t 约有 20% 的偏差。

迄今为止,大别造山带榴辉岩的年代学研究大部都集中在南大别超高压榴辉岩,还没有关于黄镇低温榴辉岩同位素年龄的正式报道。陈道公等^[35]首次对南大别黄镇低温榴辉岩和围岩花岗片麻岩进行了锆石 U-Pb TMS 及 SMS 定年,云母和角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年和矿物内部 Sm-Nd 同位素体系研究。得到一个榴辉岩样品锆石 SMS U-Pb 年龄和云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时年龄为 232 ~ 234 Ma,另一榴辉岩锆石 TMS U-Pb 年龄和围岩花岗片麻岩锆石 SMS 年龄为 221 ~ 223 Ma,退变质角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时年龄为 200 ~ 206 Ma。尽管对这些年龄代表的确切

变质阶段还有待进一步探讨,但可以认为,221~223 Ma是榴辉岩相峰期变质作用时间的最小估计值,而200~206 Ma为角闪岩相退变质作用年龄。也就是说从峰期榴辉岩相变质开始到角闪岩相退变质这个阶段大约经历了20 Ma的时间,这与我们模拟石榴石环带得到的结果是一致的。黄镇榴辉岩相对该区的超高压榴辉岩而言,其冷却速率是很慢的^[36,37],这种冷却速率上的差别表明它们的折返,从而俯冲情况是不同的,黄镇榴辉岩不大可能与南大别超高压榴辉岩一样受到过超高压变质作用。

致谢:感谢 Carswell D. 教授为其研究提供 CD107的数据。

参考文献 (References):

- [1] Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 40: 259-274.
- [2] Chakraborty S, Ganguly J. Compositional zoning and cation diffusion in garnets[J]. *Advance Physical Geochemistry*, 1991, 8: 121-175.
- [3] Perchuk A L, Philippot P. Geospeedometry and times scales of high-pressure metamorphism [J]. *International Geology Review*, 2000, 42: 207-223.
- [4] Weyer S, Jarick J, Mezger K. Quantitative temperature-time information from retrograde diffusion zoning in garnet: Constrains for the P-T-t history of the Central Black Forest, Germany[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1999, 17: 449-461.
- [5] Dodson M H. Closure profiles in cooling systems[J]. *Materials Science Forum*, 1986, 7: 145-154.
- [6] Burton KW, Kohn M J, Cohen A S, et al. The relative diffusion of Pb, Nd, Sr, and O in garnet[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1995, 133: 199-211.
- [7] Duch ne S, Albarede S, Lardeaux JM. Mineral zoning and exhumation history in the Munchberg eclogites (Bohemia) [J]. *American Journal of Science*, 1998, 298: 30-59.
- [8] Perchuk A L, Philippot P. Rapid cooling and exhumation of eclogite rocks from the Great Caucasus, Russia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 299-310.
- [9] Perchuk A L, Philippot P, Erdner P, et al. Rates of thermal equilibration at the onset of subduction deduced from diffusion modeling of eclogitic garnets, Yukon-tannana terrain, Canada[J]. *Geology*, 1999, 27: 531-534.
- [10] Lindström R, Viitanen M, Huhanoja J, et al. Geospeedometry of metamorphic rocks: Examples in the Rantasalmi-Sulvaka and Kiuruvesi areas, eastern Finland: Birtite garnet diffusion couples [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, 9: 181-190.
- [11] Medaris L G, Wang H F, Misar Z, et al. Thermobarometry, diffusion modeling and cooling rates of crustal garnet peridotites: Two examples from the Moldanubian zone of the Bohemian massif[J]. *Lithos*, 1990, 25: 189-202.
- [12] Gerasimov V Y, Savko K A. Geospeedometry and thermal evolution of garnet-cordierite metapelites of the Vionezh massif[J]. *Petrology*, 1995, 6: 563-577.
- [13] Cheng Hao, Chen Daogong, Cheng W, et al. Optimized geospeedometry—Evidence for slow cooling of Huangtuling granulite, Northern Dabie[J]. *Geochimica*, 2003, 32 (2): 167-172. [程昊,陈道公, Cheng W,等.最优化的矿物扩散地质速率计——北大别黄土岭麻粒岩缓慢冷却的证据 [J]. *地球化学*, 2003, 32 (2): 167-172.]
- [14] Ganguly J, Dasgupta S, Cheng W, et al. Exhumation history of a section of the Sikkim Himalayas, India: Record in the metamorphic mineral equilibria and composition zoning of garnet[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2000, 183: 471-486.
- [15] Chavagnac V, Jahn B. Coesite-bearing eclogites from Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 29-51.
- [16] Li S, Jagoutz E, Chen Y. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 1 077-1 093.
- [17] Eide E, McWilliams M, Liu J. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology and Exhumation of High-Pressure to Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in East-Central China[J]. *Geology*, 1994, 22: 601-604.
- [18] Okay A. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China[J]. *European Journal of Mineral*, 1993, 5: 659-675.
- [19] Carswell D, O'Brien P, Wilson R, et al. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie mountains of central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 239-252.
- [20] Wang X, Liu J, Mao H. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1 085-1 088.
- [21] Wang X, Liu J. Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China: Evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite [J]. *Geology*, 1991, 19: 933-936.
- [22] Wang X, Liu J, Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the Dabie mountains, central China: Petrogenesis, P-T paths, and implications for regional tectonics[J]. *Journal of Geology*, 1992, 100: 231-250.
- [23] Zhang Z, You Z, Hua Y, et al. Petrology, metamorphic process and genesis of Dabie-Sulu eclogite belt, eastern central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 9: 134-156.
- [24] Perchuk A, Gerasimov V, Philippot. Theoretical modeling of eclogite uplift[J]. *Petrologiya*, 1996, 4: 518-532.
- [25] Onsager L. Theories and problems of liquid diffusion[J]. *Annual of the New York Academy Sciences*, 1945, 46: 241-265.
- [26] Lasaga A C, Richardson SM, Holland H D. The mathematics of cation diffusion and exchange between silicate minerals during retrograde metamorphism [A]. In: Saxena S K, Bhattacharji S,

- eds *Energetics of Geological Processes* [C]. Berlin: Springer, 1977. 353-388.
- [27] Crank J. *Mathematics of Diffusion* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- [28] Ganguly J, Cheng W, Chakraborty S. Cation diffusion in aluminosilicate garnets: Experimental determination in pyroxene-amandine diffusion couples [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 131: 171-180.
- [29] Schwandt C, Cygan R, Westrich H. Ca self-diffusion in grossular garnet [J]. *American Mineral*, 1996, 81: 448.
- [30] Ganguly J. Diffusion, Atomic Ordering and Mass Transport: Selected Topics in Geochemistry, *Advances in Physical Geochemistry* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [31] Cooper A R. The use and limitation of the concept of an effective binary diffusion coefficient for multicomponent diffusion [A]. In: Wachman J B Jr, Franklin A D, eds *Mass Transport in Oxides Process Symposium* [C]. Washington DC: US National Standard Spectra Publisher, 1968. 79-84.
- [32] Chakraborty S, Ganguly J. Cation diffusion in aluminosilicate garnets: Experimental determination in spessartine amandine diffusion couples, evaluation of effective binary diffusion coefficients, and applications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 111: 74-86.
- [33] Shewmon P G. *Diffusion in Solids* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1963.
- [34] Ganguly J, Chakraborty S, Shap T, *et al*. Constraint on the time scale of biotite grade metamorphism during Acadian orogeny from a natural garnet-garnet diffusion couple [J]. *American Mineralogist*, 1996, 81: 1 208-1 216.
- [35] Chen Daogong, Debule E, Cheng Hao, *et al*. Multi-isotopic systems dating of Huangzhen eclogites [J]. *Science in China (D)*, 2003, 33 (9): 828-840. [陈道公, Debule E, 程昊, 等. 南大别黄镇低温榴辉岩多同位素体系年代学研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 2003, 33 (9): 828-840.]
- [36] Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 29-51.
- [37] Li S, Jagoutz E, Chen Y. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 1 077-1 093.

MODELING OF HUANGZHEN LOW-T ECLOGITE WITH DIFFUSION KINETICS THEORY

CHENG Hao^{1,2}, CHEN Dao-gong¹, ZHOU Zu-yi²

(1. *Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Geology, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)*

Abstract: We determined the compositions of various sizes of garnets in so-called cold Huangzhen eclogites from Southern Dabie with electron microprobe, and observed that it shows intriguing zoning patterns. We find these zoning patterns can be interpreted by a relaxation diffusion mechanism. Using relaxation diffusion model, with the determined PT condition by means of traditional petrologic methods by others and numerically model of the profile's adjusting, the result suggests the adjustment of the smallest garnet in this study cost 23Ma until the process ceased. This means that the rocks of Huangzhen suffered an exhumation velocity about 6 /Ma after the peak metamorphism. This result supports the idea that the Huangzhen eclogites did not experienced UHM, and also provides important information on the tectonic mechanism for the mountain Dabie eclogites exhumation.

Key words: Cold eclogite; Garnet; Diffusion; Numerical model