

浙江陈蔡群变质矿物的氧同位素 组成及其平衡分馏温度

徐 步 台

(浙江省地质科学研究所)

浙江陈蔡群变质岩系分布于绍兴—江山断裂带南东侧。与其它前寒武纪地体一样,在陈蔡群变质岩系中有较丰富的矿产资源,已成为省内寻找贵金属和多金属矿床的最有希望的探查远景区之一。因此,对陈蔡群变质岩系的基础地质工作,日益受到重视,并取得了一些综合性的研究成果。本文就变质矿物的氧同位素组成特征以及矿物对氧同位素温度计应用等问题进行一些探讨,以期对研究该区变质作用及与其有关的矿床提供可参考利用的同位素地球化学资料。

一、变质岩特征概述

陈蔡群变质岩系是在晋宁期区域构造运动中较强烈的变形和变质作用产物。整套岩系变质程度普遍较深,属高绿片岩相-角闪岩相。其岩石类型有黑云斜长片麻岩、变粒岩、浅粒岩、石英片岩、角闪黑云片岩、斜长角闪岩及透辉石大理岩等。恢复原岩以泥岩、粉砂岩和砂岩为主,是一套副变质岩系。其中可能夹有少量由中基性或中酸性火山岩变质而成的正变质岩。后期混合岩化较为发育,并局部形成混合岩,甚至混合花岗岩。

最近,韩梦合(1985)对诸暨陈蔡-遂昌冶岭头一带以及夏安宁(1985)对龙泉乌岙地区的陈蔡群变质相作了较详细的探讨¹⁾²⁾。据现有资料可归纳如下:1.特征变质矿物有夕线石、蓝晶石、十字石、红柱石、铁铝榴石、斜长石、钾长石、普通角闪石、单斜辉石等,矿物组合的ACF和A'KF图解,皆类似于苏格兰高地巴罗及我国辽东半岛和山西中条、五台等地区的中压角闪岩相;2.由石榴石的化学成分所计算的端元组分,主要是铁铝榴石,其次是镁铝榴石,未出现钙铝榴石。石榴石在化学成分、晶格常数与变质程度关系图上(图1),大多位于蓝晶石带与夕线石带的分界线附近;3.根据变质泥质岩的共生矿物相平衡实验P-T曲线,考虑到有些地段出现了夕线石、蓝晶石和红柱石,估计温度约在600℃左右,压力约为 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。综上所述,陈蔡群变质岩系应属蓝晶石-夕线石型角闪岩相,推测其变质作用温度可能在550—620℃,压力为 $(4-6) \times 10^8 \text{ Pa}$ ¹⁾。

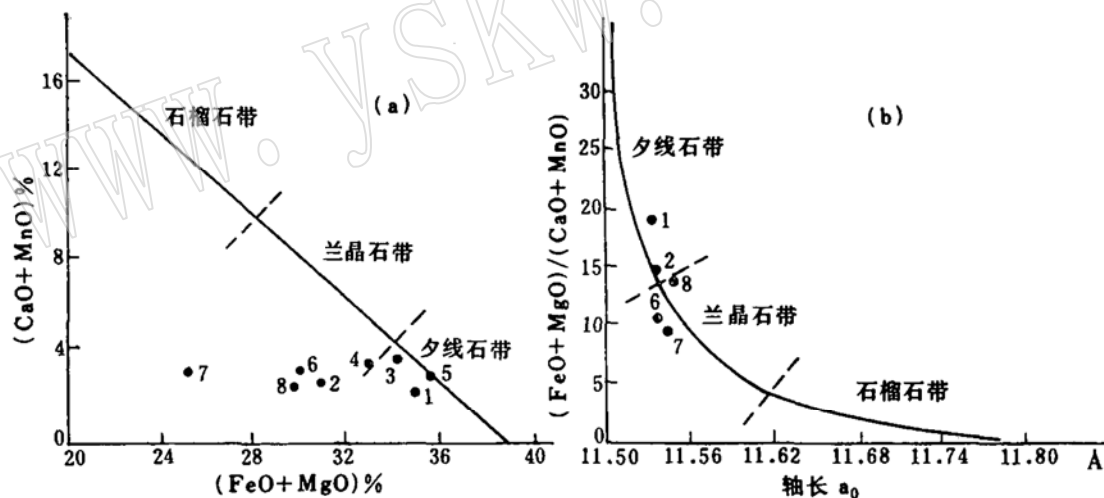


图 1. 变质泥质岩中石榴石的化学成分(a)、晶格常数(b)与变质程度关系图¹⁾

Fig. 1. Relation of metamorphic grade to chemical composition(a) and lattice constant (b) of garnets in metamorphic mudstone¹⁾

点号1—5为诸暨陈蔡、遂昌沙口和冶岭头(韩梦合, 1985); 6—8为龙泉乌岙(夏安宁, 1985)。

注: 图中“兰”字均应为“蓝”。

二、氧同位素分析结果

本文所研究的岩石样品采自诸暨陈蔡地区的丁家坞剖面中第一段2层和第二段8层³⁾。

1) 韩梦合(1985), 浙江诸暨陈蔡、遂昌大柘、冶岭头等陈蔡群变质相的探讨。

2) 夏安宁(1985), 个人提供的未发表资料。

3) 浙江省区域地质调查大队(1983), 浙江诸暨丁家坞陈蔡群剖面资料(1/5万)

其岩石类型为含石榴夕线黑云斜长片麻岩和含辉石角闪黑云片岩。岩石样品经破碎和淘洗后,用常规的磁选、电磁选和重液选等矿物分离方法,并在双目镜下仔细挑选,最后取得纯净的石英、石榴石及磁铁矿等单矿物(纯度均在98%以上),作为氧同位素分析的试样。

矿物试样中氧的提取和氧同位素组成测定的实验方法简述如下:采用五氟化溴法提取矿物中氧,将试样加热至500—700℃时与 BrF_5 反应12小时左右,产生的氧气通过与炽热(700—800℃)的光谱纯石墨棒反应转化成 CO_2 气。采用MAT-250型质谱计进行 CO_2 中氧同位素比值测定,其结果以 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值表示,平均偏差为 $\pm 0.1\%$ 。

所有矿物试样的分析结果列于表1。其中还列出了由不同矿物对计算得出的平衡分馏温度。

表 1. 陈蔡群变质矿物氧同位素组成及计算温度

Table 1. Oxygen-isotope compositions of metamorphic minerals in Chencai Group and their calculated temperatures

样品号	采样地点及岩石类型	矿 物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\%)$	矿物对计算温度 (°C)*	
				石英-磁铁矿	石英-石榴石
J ₂	诸暨丁家坞陈蔡群剖面第一段2层 含石榴夕线黑云斜长片麻岩	石 英	15.13	554	623 (616)**
		石榴石	11.54		
		磁铁矿	6.99		
J ₅	诸暨丁家坞陈蔡群剖面第二段8层 含辉石角闪黑云片岩	石 英	14.81	573	
		磁铁矿	7.02		

* 计算温度按 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-磁铁矿}} = 5.57 \times 10^6 T^{-2}$ 和 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-石榴石}} = 2.88 \times 10^6 T^{-2}$ 方程式⁽²⁾⁽³⁾。

** 按 $\Delta_{\text{石英-石榴石}} = 0.51 \Delta_{\text{石英-磁铁矿}}$ 的和谐方程式⁽³⁾。

三、变质温度测定与讨论

众所周知,温度是指示岩石和矿物形成条件的重要因素之一。现在已有多种地质测温方法,如矿物包裹体、固熔体、元素分配及同位素分馏测温法等。同位素测温法有其独特的优越性,它不受压力因素的影响,故已广泛应用于变质岩、火成岩和热液矿床的成因研究。

根据区域变质岩中共生矿物的氧同位素研究表明,变质矿物之间的同位素分馏通常随着变质程度的增高而减小,在一般情况下能够达到或近似达到同位素平衡,并保持其同一形成温度下的同位素分馏。因此,有可能应用氧同位素平衡分馏作为变质岩地质温度计。这方面已有不少研究工作和资料报导⁽⁴⁻⁸⁾。但要指出的是,在有的情况下变质矿物之间的同位素分馏也会出现不平衡的现象,例如:石榴石与其它矿物之间往往没有达到完全或近似平衡,用石英-石榴石矿物对将得出异常低的 $\Delta^{18}\text{O}$ 值及异常高的温度;还有在变质冷却过程或后期退化变质、热液蚀变作用中,矿物之间的同位素分馏可能会随着变质温度逐渐降低或由于退化变质、热液蚀变而在某一较低温度下达到重新平衡,例如一些能迅速达到同位素平衡和易受环境影响的方解石、长石及黑云母等矿物,有时用石英与这些矿物组成的矿物对会得出较低的温度。这种效应对于高级变质岩来说尤为明显。目前,一般认

为以石英-磁铁矿矿物对为最佳的氧同位素温度计^{[3][5][9]}。

从表1中不同矿物的氧同位素分析结果可看出, $\delta_{\text{石英}} > \delta_{\text{石榴石}} > \delta_{\text{磁铁矿}}$, 符合变质岩共生矿物中¹⁸O富集的正常相对序列^{[3][10][11]}; 在两个相距几百米的变质岩样品中, 石英和磁铁矿各具有十分近似的同位素组成。该结果与Taylor等(1963)对美国弗蒙特(Vermont)等地区变质岩的研究结果相类似^[6]。这种氧同位素的均一化说明区域变质条件的一致性, 由两个不同岩石样品中石英-磁铁矿矿物对 $\Delta^{18}\text{O}$ 值计算的温度分别为554和573℃(表1), 两者在允许误差范围内完全吻合。上述表明, 这些共生矿物之间达到了氧同位素平衡, 并保持了在同一温度下“冻结”的氧同位素组成。按照Taylor(1967)总结的区域变质程度及其典型温度^[11], 我们所得出的氧同位素平衡分馏温度($565 \pm 10^\circ\text{C}$), 处于十字石-蓝晶石带(490—600℃)的温度范围内(图2)。

正如前述, 我们用石英-石榴石矿物对计算出异常高的温度(623℃), 表明石榴石与其它矿物之间并没有达到同位素平衡。为此, 我们又按 $\Delta_{\text{石英-石榴石}} = 0.51\Delta_{\text{石英-磁铁矿}}$ 的平衡分馏和谐方程式计算出一个“校正”温度为616℃(表1), 但仍比石英-磁铁矿矿物对所计算的温度要高得多。

Faure(1977)曾按上述和谐方程式对石榴石带、十字石-蓝晶石带和夕线石带等不同变质带中石英-石榴石矿物对分别进行了“校正”温度计算, 其中两个变质带的结果大体上与石英-其它矿物对的温度相一致, 而唯一明显例外的也是十字石-蓝晶石带仍具有异常高的温度^[3]。这些结果都从另一角度证实了用石英-磁铁矿矿物对得出的陈蔡群变质温度及其变质程度的合理性。

最后, 我们将氧同位素测温法与其它测温法所得出的温度进行比较, 并简要地讨论一下它们的适用性和可靠性。我们先前对陈蔡群变质岩中的石英和方解石, 曾做过包裹体的温度测定, 但所测得的均一法温度皆低于300℃, 大多仅在200℃左右; 爆裂法温度略高一些, 在370℃左右(两种方法所测温度均未经压力校正)。显然, 这些异常低的温度与根据变质矿物共生组合推测的变质程度是完全不相符的。看来, 矿物包裹体测温法不适用于对陈蔡群变质温度的测定。其原因可能如同赵希澈(1983)所指出的¹⁾: 从现有的矿物包裹体资料来说, 除由混合岩化作用形成的花岗岩中矿物包裹体可取得一些确切的信息外, 其它一些通过重结晶作用形成的变质岩中矿物包裹体, 它们并非变质矿物成时的产物, 而大

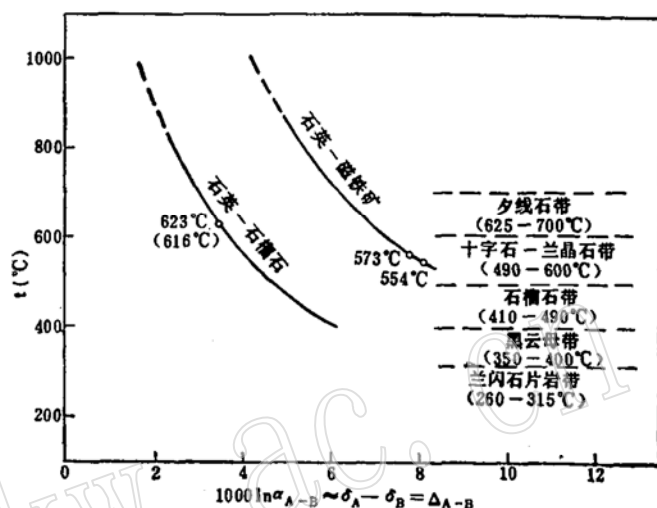


图2 氧同位素温度测定方程与温度(℃)关系图⁽³⁾

Fig. 2. Oxygen-isotope thermometric equations versus temperatures (in degree Centigrade)⁽³⁾

石英-磁铁矿和石英-石榴石分馏曲线按表1中温度测定方程绘制; 区域变质带及其相应典型温度引用 Taylor (1967) 的资料^[11]。

注: 图中“兰”字均应为“蓝”。

1) 赵希澈(1983), 矿物中包裹体的研究。

多是在原有岩石未发生重结晶就已存在于变质前的矿物中,为重结晶作用时残留下来的“继承性包裹体”。因此,这种矿物包裹体不能确切反映变质作用时的各种物理-化学条件。

韩梦合¹⁾(1985)通过变质岩中黑云母-石榴石矿物对的 $Mg/(Mg+Fe+Mn)$ 分配系数的计算和图解,得出陈蔡群变质矿物的形成温度约为700℃(685—700℃)。但已知夕线石带的上限温度仅为700℃左右,同时,据陈蔡群变质岩中石榴石化学成分、晶格常数与变质程度关系图解(图1),大多落在蓝晶石带与夕线石带的分界线附近。实际上,在陈蔡群变质岩系中有些地段出现了特征变质矿物夕线石、蓝晶石和红柱石。因而,即使对变质温度作过高一些的估计,也不会超过620℃;另外,通常出现异常高温度的石英-石榴石矿物对的氧同位素测温结果也只有623℃。据此,我们认为上述黑云母-石榴石矿物对的元素分配系数法得出的温度是偏高了一些,可能也没有确切反映陈蔡群的变质条件。

四、几点初步结论

通过对陈蔡群变质矿物氧同位素组成的测定以及共生矿物对氧同位素温度计的应用,并结合对变质岩的其它方面研究工作。我们可得出如下几点初步结论:

1. 本文所研究的陈蔡群变质矿物,除石榴石外,石英和磁铁矿之间达到了氧同位素平衡分馏,并保持其较高变质温度下“冻结”的氧同位素组成。

2. 对两个不同变质岩样品,应用石英-磁铁矿矿物对计算出相当一致的温度,分别为554和573℃。此结果与根据变质岩中矿物组合特征所推测的变质条件相符合。因此,可合理地认为陈蔡群的变质温度约在 $565 \pm 10^\circ\text{C}$,其变质程度达到了蓝晶石带。

3. 从不同测温法所取得结果的比较,进一步说明了氧同位素测温法的适用性和可靠性。此法既是测定岩浆岩和热液矿床的形成温度,也是测定变质温度的一种有效方法。

4. 陈蔡群变质矿物在几百米范围之内仍具有几乎相同的氧同位素组成,表明该区域变质条件的共同性和氧同位素的均一化。一般认为出现这种情况是由于在区域变质作用中各种矿物与同位素组成一致的迁移孔隙流体发生同位素交换反应的结果^[6]。现在,我们若根据所测得的变质温度,由已知的石英-水平平衡分馏关系式,即可得出代表这种孔隙流体的氧同位素组成, $\delta^{18}\text{O}$ 约为13.4‰。只要今后再取得变质矿物中包裹体水或羟基水的氢同位素组成 δD 值,那么还将能为该区的变质岩及其有关矿床的研究工作提供有意义的变质水中氢和氧同位素组成的资料。

本文承蒙宋鹤彬、黄报章同志审阅。在工作中曾得到郑淑蕙、陈成业老师以及梁如华、水涛、邱郁双等同志热忱帮助。朱鲁生同志帮助绘图。在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] 贺同兴等, 1980, 变质岩岩石学。138—164页, 地质出版社。

[2] 丁梯平, 1980, 氢氧同位素地球化学。43—136页, 地质出版社。

[3] Faure, G., 1977, Principles of Isotope Geology, 351—373, John Wiley & Sons Inc., New York.

[4] 魏菊英等, 1979, 冀东滦县一带前震旦纪含铁石英岩中磁铁矿的氧同位素组成。地球化学, 第3期, 195—201页。

1) 韩梦合(1985), 浙江诸暨陈蔡、逐昌大柘、治岭头等地陈蔡群变质相的探讨。

- [5] 崔文元、郑淑蕙, 1980, 冀东遵迁滦地区变质杂岩的氧同位素初步研究. 地质学报, 第2期, 144—153页.
- [6] Garlick, G. D., & Epstein, S., 1967. Oxygen isotope ratios in coexisting minerals from regionally metamorphosed rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 31, 181—214.
- [7] Epstein, S., & Taylor, H. P. Jr., 1967. Variation of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in minerals and rocks. In *Researches in Geochemistry*, vol. 2, 29—62, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [8] Eslinger, E. V., & Savin, S. M., 1973. Oxygen isotope geothermometry of the burial metamorphic rocks of the Precambrian Belt Supergroup, Glacier National Park, Montana. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 84, 2549—2560.
- [9] Addy, S. K., & Ypma, P. J. M., 1977. Origin of massive sulfide deposits at Ducktown Tennessee: An oxygen, carbon and hydrogen isotope study. *Econ. Geol.*, vol. 72, 1245—1268.
- [10] O'Neil, J. R., 1977. Stable isotopes in mineralogy. *Phys. Chem. Minerals*, vol. 2, 105—123.
- [11] Taylor, H. P. Jr., 1967. Oxygen isotope studies of hydrothermal mineral deposits, In *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 109—140, Holt, Rinehart & Winston Inc., New York-London.

Oxygen Isotope Compositions of Metamorphic Minerals and Their Equilibrium Fractionation Temperatures in the Chencai Group, Zhejiang Province

Xu Butai

(Geological Institute of Zhejiang, Hangzhou)

Abstract

This paper reports the oxygen isotope data of metamorphic minerals in the Chencai Group and the determination of their metamorphic temperatures using these data. Two rock samples were collected from the Dingjiawu strata profile in the Chencai Group, Zhuji. Pure quartz, magnetite and garnet were separated from the samples. The BrF_5 technique was used in extracting oxygen from these minerals. Oxygen reacted with graphite to generate CO_2 , and then the oxygen isotope ratio was measured on MAT-250 model mass spectrometer. The $\Delta^{18}\text{O}$ values of two quartz-magnetite pairs calculated in the samples were, yielding temperatures of 554 and 573°C, respectively, which is geologically reasonable. In contrast, the temperature calculated from quartz-garnet pair was high anomaly of 623°C, indicating that oxygen isotopes are not in equilibrium between two minerals. Thus, the average temperature of $565 \pm 10^\circ\text{C}$, calculated from two quartz-magnetite pairs, is selected as metamorphic temperature of rocks in the Chencai strata. Oxygen isotope thermometry, therefore, is one of the available techniques for the determination of temperatures of metamorphic rocks.