

变质作用 $P-T-t$ 轨迹中时间(t) 的确定和意义

刘建忠

(地球科学系)

摘要 变质作用 $P-T-t$ 轨迹是当前变质地质学的研究热点,且越来越多的学者注意到了时间对变质作用的控制。本文将地质体演化的时间规律研究划分为相对年龄和绝对年龄的确定,并较为系统地讨论了各种测年方法的原理及使用条件和影响因素,并对其研究意义做了深入探讨。

关键词 变质作用 $P-T-t$ 轨迹 相对年龄 绝对年龄

0 引言

自从 England 等对以阿尔卑斯为热模型的陆壳碰撞带大地构造演化过程进行了热模拟研究以来, $P-T-t$ 轨迹的概念被广泛地应用到变质岩石学、构造地质学等领域。岩石学家们超越了都城秋穗所提出的变质相系列的范畴,而将变质作用作为一个动态的过程来研究。原来他们只把研究的焦点集中于变质峰期的矿物组合和温度、压力等物理化学条件,而现在则把变质过程放在一个时间坐标上与地壳演化、构造过程、岩浆作用以及地球物理因素等结合起来进行地质事件的历史研究。因此,决定变质作用的因素不仅仅是温度、压力和化学活动性的流体,时间效应与其它因素同样成为控制变质作用的一个主要因素。

图1为著名的苏格兰高地变质地区略图。该变质地区东南端被 Highland Boundary 大断层断开,断层北西侧的变质温度向北西方向逐渐增高,Gerge Barrow 根据特征变质矿物的出现依次划分为黑云母、石榴石、十字石、蓝晶石和矽线石带,在黑云母带低温侧(东南侧)的地带称为绿泥石带。

图2为苏格兰高地变质地区更大范围的黑云母 K-Ar 年龄值的分布情况^[1]。黑云母的 K-Ar 年龄是指变质体立即冷却,黑云母 Ar 几乎在没有发生扩散时的温度(约 310℃),形成低温到现在的年龄,也就是说,图2是用热等时线表示黑云母的形成,这种等时线分别代表变质地区各个局部冷却到 310℃ 的时代分布。

从图中可以看出,从东南向西北,黑云母热等时线明显变小,而变质温度却显著升高。可见,变质带的形成与变质作用所经历的时间具有密切关系。Harker 认为递增变质作用就是变质岩石温度随时间顺序渐次升高^[1]。可见时间(t)在变质作用的研究中有着重要的作用。

作者简介 刘建忠 男 26岁 博士生 岩石学专业 已发表“太古宙石榴石辉石麻粒岩变质动力学研究”等论文
收稿日期 1994-12-27

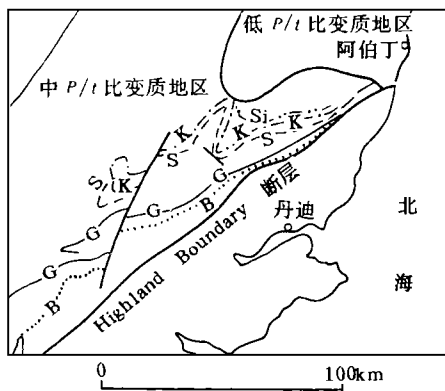


图1 苏格兰高地东南部的喀里多尼亚地区巴罗型
递进变质带图^[1]

B 黑云母等变线;G 石榴石等变线;S 十字石等变线;K 蓝
晶石等变线;Si 硅线石等变线

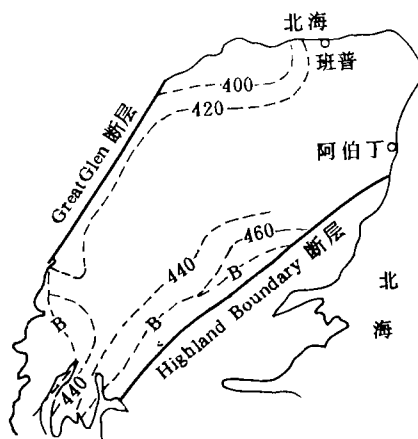


图2 苏格兰高地东南部的黑云母等变线和黑
云母 K-Ar 法测定的热等时线图^[1]

虚线为 K-Ar 黑云母热等时线 (Ma), 标有 B 的虚线为
黑云母等变线

1 时间(t)的确定

前已述及,变质作用 $P-T-t$ 轨迹中时间(t)的确定是了解某一地质体变质和构造历史的一个重要因素,对于这种演化时间规律的研究,通常分为两类:即“相对年龄”和“绝对年龄”的确定。

1.1 相对年龄的确定

相对年龄的确定即变质与变形世代分析是一个古老而又年轻的话题。Zwart 强调了变质岩中变质与变形的密切关系,提出了三类九型的分析原理,为人们研究变质与变形先后关系提供了一个相对时标,其主要通过变斑晶与晶内外片理的相互关系来确定。他的中心思想是变斑晶在构造运动过程中发生了旋转。

自从 Bell 等提出递进变形过程中变形分解的理论后^[2],前述原理受到了挑战。变形分解理论认为,在绝大多数情况下变形可以分解,若变形分解则斑晶就不会旋转。相反,在递进简单剪切过程中变形不能分解时,斑晶将被迫发生旋转,此时只有递进剪切分量而无相应的缩短分量,这种现象仅见于包体旋转角大于 180° 的具螺旋包裹体拖尾的石榴石变斑晶^[2]。

因此,对于变斑晶的生长时间会因分析标准的不同而产生矛盾。如利用变形分解原理分析是生长在 D_2 期间的石榴石变斑晶,很容易被误认为是 D_1 期间生长的(图 3、4)^[3]。

总之,由于自然界问题的复杂性,变质作用和变形作用之间的关系在时空上的差异也极为复杂。尽管对于变质变形世代分析上仍有许多争论,但目前较为可靠实用的变质矿物生长顺序与构造运动关系判别原则一般采用 Bell 和 Rubenach(1985)和 Bell(1986)的修正方案。

1.2 绝对年龄的确定

绝对年龄又称之为同位素地质年龄。所谓同位素地质年龄,是指经过某一地质作用后形成的地质体,其中的母体和子体同位素保持封闭体系以来的时间^[4]。计算年龄的通式为:

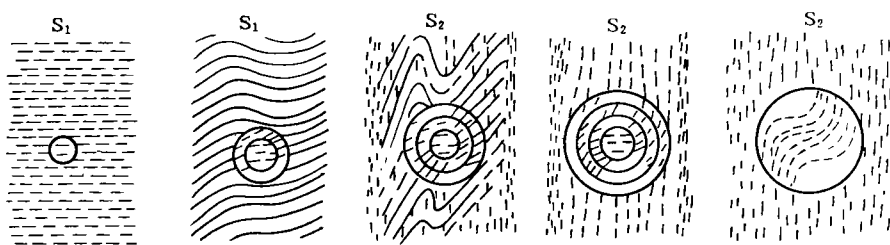


图3 变斑晶中包体S形排布的成因机制^[1]

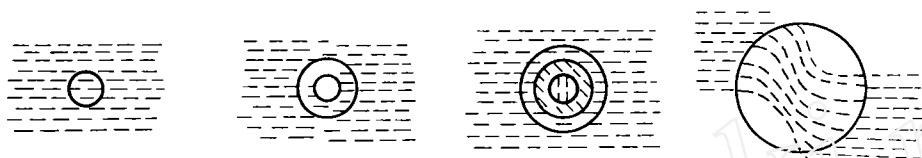


图4 Zwart 关于变斑晶中包体形态构造的成因解释^[3]

$$D^* = N(e^{\lambda t} - 1) \quad \text{或} \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln(1 + \frac{D^*}{N})$$

式中 N 为经过时间 t 衰变后,现在所剩下的放射性母体同位素的量; D^* 为放射性母体同位素经过时间 t 衰变后,至今累积的放射性成因的稳定子体同位素; λ 为衰变常数。

同位素地质年龄通常分为三类:

(1)原岩年龄(原生年龄):对沉积岩而言是指沉积作用或成岩作用的年龄;对侵入岩而言,一般指岩体固结的年龄;对火山岩而言,一般指喷出年龄。

(2)变质年龄(再生年龄):指原岩形成后经受变质作用矿物重结晶的时间。变质年龄小于原岩年龄,若岩石经受多期变质作用则可分别测定各期变质年龄。

(3)表面年龄或视年龄:由于岩石、矿物在结晶时俘获了周围的外来子体而没有准确扣除的年龄,或岩石形成后其母体、子体的封闭体系遭到破坏,造成不平衡而得到的年龄均为表面年龄。其又可分为:

①再造年龄:反映后期地质作用使子体同位素丢失的程度。

②封闭年龄或保存年龄:岩石、矿物结晶以后,因温度较高,子体同位素由于连续扩散而丢失,只有当岩石冷却到使子体停止向外扩散的温度时,此种放射性时钟方开始启动。因此,所得到的年龄不是反映岩石结晶的时间,而是反映子体同位素开始保存的时间,故称封闭年龄或保存年龄,人们又常称其为冷却年龄。

同位素测年方法即地质年代学是一门蓬勃发展的地质学分支学科,是研究地球演化的重要支柱。近年来许多地质学家分别从方法学和地质应用范围和条件等方面进行了探讨^{[5][6][7]},进一步澄清了过去年代学方法使用中的模糊认识,并出现了新的研究趋势。概括起来,对于变质岩的年代学研究,除对各种测年方法原理和测试方法精度的要求外,还要符合地质上的要求,以达到测年数据的精确性和正确性。从变质地质学的角度来说,有三方面的问题需要考虑:一是测年对象或测年方法是否能给出正确的地质年龄数据;二是测年的精

度是否达到地质上的要求;三是测年对象是否被后期地质作用所改造。在综合考虑上述条件的基础上,对于变质岩同位素年代学的测试方法主要有如下几类:

矿物 U-Pb 法

这是同位素地质年代学中建立最早的一种方法。适用于 U-Pb 年龄测定的矿物很多,如锆石、榍石、磷灰石、独居石等,其中锆石是岩浆岩、变质岩、沉积岩中分布最广的副矿物之一。锆石的晶形、颜色、粒度、微量元素含量甚至电磁性的强弱,与其所处的地球化学环境均有密切关系。对不同成因的锆石分别进行年龄测定,用图解法处理数据,对查明复杂地质体的历史具有特殊重要的作用。加之近年来微量和超微量分析技术的发展及离子探针质谱的微区分析的使用,使该方法可以达到较高的精确度。现行的锆石 U-Pb 年龄测定方法主要有如下 4 种:

①常规锆石 U-Pb 法 即一般常用一组锆石形成不一致线来测年的方法。由于锆石的结晶年龄可能是多次,所以该方法难以避免出现混合锆石的年龄,即包括捕获锆石/或继承锆石的年龄在內,因此常规锆石法可能测出的年龄偏大^{[6][8]}。

②单颗锆石蒸发 Pb-Pb 法 用质谱计直接分析锆石中 Pb 同位素比值,从而计算 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的表面年龄。这种方法比较简便,且可以区分出不同年代的锆石生长。B. Kober^{[9][10]}和刘敦一^[11]利用热离子发射质谱计逐层蒸发锆石直接测定的锆石年龄,不但可以得到锆石的结晶年龄,而且可以获得岩石的一段演化史。该方法的缺点是不适用年轻的锆石^[11],对于锆石整个晶体都发生放射性成因铅的丢失的样品精确度不高。

③高分辨离子探针质谱计法 该方法最大的优点在于能测定单个锆石不同部位的年龄和区分不同年代的锆石。如 Claoue-Long 等^[11]对西澳巴尔达绿岩带中的锆石用离子探针质谱可以分出岩浆年龄为 2692Ma,继承年龄 3450Ma 和后期活化年龄 2200Ma,继承锆石的年龄反映了绿岩带之下有更老的地壳,但可惜的是当前世界上仅有一台这样的仪器。

④单颗锆石或斜锆石 U-Pb 法 这是一种较好的测年方法^{[5][6][11][12]},其优点除了单颗锆石其它方法所具有的用样少、能区分不同年龄的锆石颗粒外,由于使用空气磨损技术将锆石表层放射性铅丢失部分磨掉,可以提高测定的精确度和可靠性^[11]。该方法除了常用锆石测年外,还可用于测定 SiO_2 不饱和火成岩中的斜锆石和金伯利岩中的钙铁矿的年龄,特别是斜锆石,是当前已知用于测定 U-Pb 年龄中最为稳定的矿物,即很少有放射性铅丢失的现象。目前只证实了在麻粒岩相条件下 U-Pb 系统只是部分地进行调整,但仍有可能用斜锆石来研究岩石的原始结晶年龄^[6]。因此斜锆石用于高级变质区年代学研究具有良好的前景。

矿物 K-Ar 法

同位素地质年龄测定的 K-Ar 法是建立在放射性同位素 ^{40}K 蜕变为 ^{40}Ar 原理之上的。只有在下述假设满足的情况下,这样计算出的年龄才是矿物的年龄:①在矿物所存在整个时期内,由 ^{40}K 衰变所产生的放射性成因 ^{40}Ar 没有逸出过;②矿物一形成就成为 ^{40}Ar 的封闭系统,这就意味着结晶以后矿物必须迅速冷却;③在矿物形成和存在的时间中,无过剩氩进入矿物;④对大气氩的存在做出合适的校正。该方法要求矿物必须定量保存氩和含钾,并必须能抵抗化学蚀变。适合于 K-Ar 法测年的矿物主要有角闪石、黑云母和霞石等,其中因普通角闪石对氩优越的保存能力而常被用作测年矿物。但在复杂和多次变质的地体中,该方法在解释地质事件时,除了对最后一次变质幕的最后热扰动之外,都未能得到很好的信息。因此

这一方法用于太古代地体的研究是不妥的^[5]。

矿物⁴⁰Ar-³⁹Ar法

⁴⁰Ar/³⁹Ar法年龄测定是以含钾矿物在核反应堆中用热快中子照射而形成³⁹Ar为基础的。该方法克服了K-Ar法的某些局限性,其突出的优点是钾和氩的含量在同一样品上测定,只需测定氩的同位素比值,因而不用担心样品的不均性问题,也不需要测量钾和氩的绝对含量。另外还可以区分出过剩氩和后期的热扰动且精度高。故其是一种十分有效的方法。

图5为辽宁阜新青石岭地区两种不同岩石单元中白云母样品的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱图。地质调查的研究表明^①,白云母片岩(原岩为长城系串岭沟组泥质岩)中的白云母样品记录着两次构造热事件,分别为 181 ± 3 Ma和 121 ± 2.5 Ma。而在其西侧所采的白云母斜长麻棱岩(原岩为太古宙TTG岩系)中的白云母样品记录着三次构造热事件,年龄分别为 404 ± 6 Ma、 175 ± 2 Ma、 137 ± 2.0 Ma。因此可见,太古宙基底的岩石不但遭受了海西期构造热事件的改造,而且在印支期和燕山期仍有活动。而盖层中的白云母是印支期的产物,同时受到燕山期构造事件的改造。

(4)全岩Rb-Sr等时线法

这是当前前寒武地质年代学中常用的方法之一,其测出的是封闭年龄。该方法的使用有三个方面的因素制约:其一是全岩样品有时并不同源;其二是组成岩石的封闭温度由于矿物成分复杂而难以确定;其三是Rb、Sr元素的活动性高而常发生变化。针对上述三方面的不利因素,在具体使用该方法时要作具体分析。①对于放射性Sr的保存可能与矿物的结晶温度有关,因此深变质岩的⁸⁷Sr保存较好,故对深变质岩的测定要比浅变质岩区好。②由于变质作用造成的Rb、Sr迁移程度和范围有大有小,这决定于变质作用的物化条件、矿物成分、岩石结构等。③对于剪切带因其多发生了流体/岩石的相互作用,故不能用其作全岩Rb-Sr年龄测定。但因为Rb和Sr是地球化学性质非常不同的两个元素,因而在岩浆分异过程中可产生很大的Rb/Sr比值差别,故Rb-Sr法在太

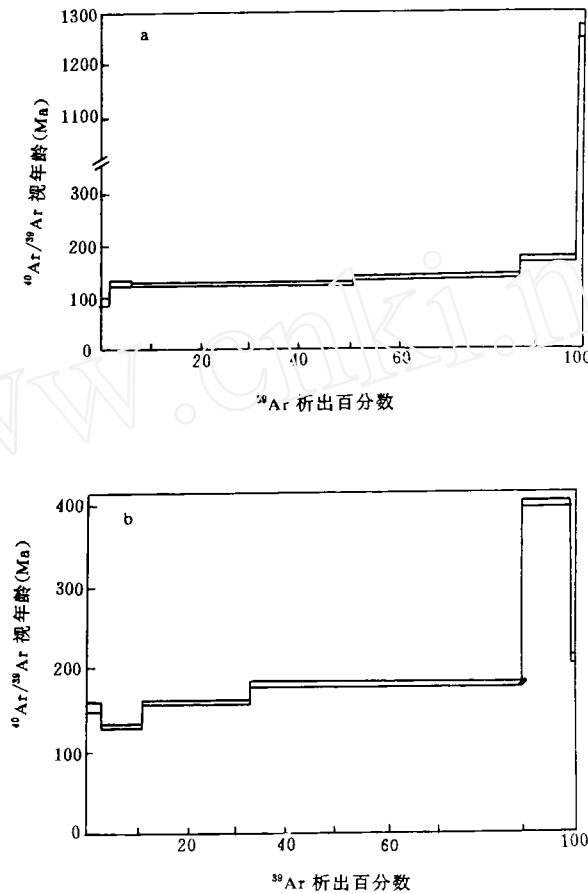


图5 白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱

a-白云母片岩(P³⁰); b-白云母斜长麻棱岩(P¹⁴)

① 李树勋,刘喜山等. 辽宁阜新-锦州地区韧性剪切带与金矿床研究报告(送审稿),1994

古代花岗岩类岩石的地质年代学研究中仍有优越性^[5]。

全岩和矿物的 Sm - Nd 法

这是 70 年代产生的一种重要的定年方法^{[8][13]}。由于稀土元素特殊的地球化学性质,使其在岩石和矿床成因及地球演化的研究中获得了广泛的应用,特别是应用于古老地质体的年代测定^[13]。

其年龄计算可分为模式年龄和等时年龄,其主要的优点是:①由于¹⁴⁷Sm 半衰期 $[(1.060 \pm 0.008) \times 10^{11} \text{ a}]$ 比⁸⁷Rb 的半衰期 $[(0.50 \pm 0.02) \times 10^{11} \text{ a}]$ 大 1 倍,故它是当前地质年代学中所用半衰期最长的一种母体放射性同位素,因而该法能够测定古老岩石的年龄;②由于 Sm、Nd 的结晶化学性质十分相近,因此由母体衰变形成的子体容易在晶格里保存下来;③ Sm、Nd 在地球化学性质上属难熔的固体元素,因而有很强的抗风化、抗蚀变的能力,在复杂而漫长的地质历史过程中能保持较好的封闭状态。由于 Sm - Nd 法的上述特点,使它成功地测定了许多太古代的年龄,特别是太古代的超镁铁质岩石,是其他方法所无法比拟的。

但等时线年龄数据的质量决定于很多因素,从样品来说必须满足四个条件:①样品具有相同成因;②样品是同时形成;③在样品形成后系统保持封闭;④各样品点的 Sm/Nd 比值足够分散。如果不能符合上述基本要求,则等时线可能是人为的或混合等时线,从而给出错误的年龄信息。为鉴别 Sm - Nd 等时线的合理性,可利用同位素参数 I_{Nd} 、 T_{DM} 和 ϵ_{Nd} 进行判别^[14],其中 I_{Nd} 为样品的钕同位素初始比, T_{DM} 为模式年龄, ϵ_{Nd} 为样品钕同位素比值偏离球粒陨石的程度。但由于 Sm、Nd 一致的地球化学性质,大多数花岗岩呈现小的 Sm/Nd 比范围,因此用 Sm - Nd 法对花岗岩侵入事件定年不太适宜。

裂变径迹法

利用天然矿物中微量铀在地质时期发生自发裂变,产生辐射损伤留下的径迹来测定矿物年龄的方法叫裂变径迹法^{[4][15]}。常用于该方法做年龄测定的矿物有锆石、磷灰石、榍石、石榴石等,其中锆石的铀含量较高 $(100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6})$,是用于裂变径迹年龄测定最常见的矿物之一,由于其外表面一般发育较好,保存也较好,因此其内外表面均可用于裂变径迹计数^[15]。在内外表面之间所观察到的裂变径迹热稳定性的差异,可能有助于锆石的热历史分析。

由于裂变径迹对热效应很敏感,可根据其受热力作用影响的程度将裂变径迹年龄分为三种基本类型。如图 6 所示曲线 A 表示快速冷却(如火山岩或浅成侵入岩)称为生成型年龄。曲线 B 表示缓慢冷却(如地盾区或造山带的一些深成岩体的冷却),其年龄为冷却型年龄。曲线 C 表示在冷却过程中还穿插加热作用,这样所测得的是一种混合型的表面年龄,对这种表面年龄,可利用径迹的直径及长度的测量来追溯它的历史,并恢复真实年龄。

流体包裹体同位素年代学

这是近年来兴起的一种测年方法^[16],与一

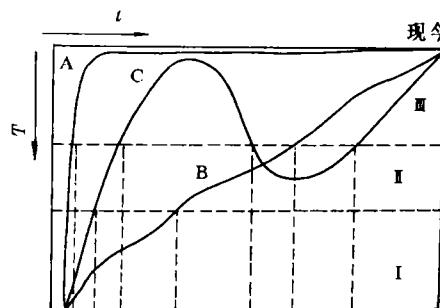


图 6 裂变径迹年龄的三种简单模型^[8]

I - 裂变径迹不稳定区; II - 裂变径迹部分稳定区; III - 裂变径迹稳定区

般全岩或单矿物测年方法相比,流体包裹体同位素测年有诸多优越性:其一,流体包裹体大都无渗漏现象,即自形成起就保持封闭地球化学体系;其二,可以通过阶段加热爆裂法区分后期地质作用与早期地质作用结晶时的流体。现行的流体包裹体测年法主要有:

①Rb-Sr 等时线法,如 Shepherd 和 Darbysire、Norman、Changkakoti 等^[16]均进行过流体包裹体中 Rb-Sr 等时线年龄的研究。

②Sm-Nd 等时线法,Norman 和 Mearns 及 Changkakoti 等^[16]对该法进行了研究。如 Norman 和 Mearns 的研究表明,挪威德拉门花岗岩是在 274 ± 1.8 Ma 形成。

③Pb-Pb 等时线法,迄今为止,流体包裹体中 Pb-Pb 等时线研究只有 Changkakoti 等进行了初步尝试^[16],并取得了较为满意的结果。

总之,流体包裹体中流体的同位素年代学研究仍处于起步阶段,但其封闭无渗漏以及岩石中普遍存在的优越性,必将使其年代学的研究有长足发展,而同位素和流体包裹体工作者之间的有机结合是把该项研究推向成功的关键。

2 变质作用过程中时间(t)确定的意义

变质作用过程中时间的确定即变质地质年代学的研究是当前变质地质学的重要研究课题,它对大陆生长、构造演化、时代划分和成矿作用等研究都起着重要作用。

2.1 大陆生长

Hoffman 对北美克拉通(包括格陵兰和斯堪的纳维亚半岛)的元古代活动带研究后作出了全新的前寒武纪构造单元图^[6]。对于以往认为加拿大克拉通由中心向外生长的概念有重大的修正,即北美太古宙的原始克拉通是由 7 个块体所组成,而太古宙的地体则是通过古元古代的碰撞带焊接在一起的。这些古元古代焊接带的前缘带是以推覆褶皱带为界,焊接带的年龄均在 2.0~1.8 Ga 之间,在 1.8~1.6 Ga 时,其南部出现了新生地壳,1.3~1.0 Ga 时在东南部拼贴上一条格林威尔叠瓦地壳,并在 1.1 Ga 时出现大陆中部裂谷,其清楚地勾勒了北美克拉通的年代构造格架。

在中国东部的郯庐断裂带以西,华北板块与扬子板块沿着近北西向的秦岭—大别山构造带缝合。对于两个板块在秦岭—大别山带的最终碰撞时间一直是个争论的问题。朱光、徐嘉炜等^[17]通过对胶北蓬莱群板岩中的全岩 Rb-Sr 年龄、伊利石-全岩对 Rb-Sr 年龄和伊利石 K-Ar 年龄,并结合地质、古生物、古地磁等证据最终证实了秦岭—大别山碰撞带是发生于晚石炭世,以较为充实的证据论证了这一难题。

2.2 构造演化

同位素年代学对地壳构造演化的研究同样具有重要的意义。首先是它们对于一个变质事件中不同变质幕、变形幕和花岗质岩浆侵入时代的确定起着重要作用。倘若这些数据齐全可使 $P-T-t$ 轨迹的时间含义更加明确,还可以进一步推测岩石在地壳中加温和冷却的速率及构造掩埋的速率和地体上升回返的速率等。如 S. Harley^[18]对 Enderby Land 太古宙 Napier 杂岩的 $P-T-t$ 轨迹及同位素年代学研究结果表明,第一期变质作用发生于 3 100~3 000 Ma,第二期变质出现于 2 500 Ma 左右,在 500 Ma 期间温度下降约 300℃,说明冷却很缓慢,同时在这一期间按压力减低的数值计算,地壳仅从 21~30 km 深处上升 6~9 km,说明其侵蚀速率极慢,约 (2~3) cm/1000a,完全不同于一般造山带。现在许多 $P-T-t$ 轨迹图中都标明了重要变形、变质阶段花岗质岩浆活动的时代,有些学者还应用岩石中不同变质矿

物封闭温度的不同来估算其冷却过程和速率。如假定 K - Ar 角闪石和黑云母的封闭温度分别为 550℃ 和 300℃, 若同一岩石中这两个矿物的 K - Ar 年龄相近, 说明岩石从 550℃ 到 300℃ 只经历了很短时间, 即冷却很快, 反之亦然。T. J. Dempster 用这一原则研究了苏格兰高地安格斯剖面的

Dalradian 岩系之后, 得出了如图 7 所示的冷却速度时空上的变化^[19]。根据同构造侵入体和板岩的全岩 K - Ar 法测得其变质峰期年龄为 520~490 Ma。图中区段 A 的 Rb - Sr 白云母记录了最老年龄为 515 Ma, 表明冷却很迅速, 约 15~25℃/Ma。在第二段时间里, Rb - Sr 白云母记录的年龄为 480 Ma, 而 Rb - Sr + K - Ar 黑云母的年龄只有 430 Ma, 说明降温缓慢, 为 4℃/Ma。区段 C Rb - Sr

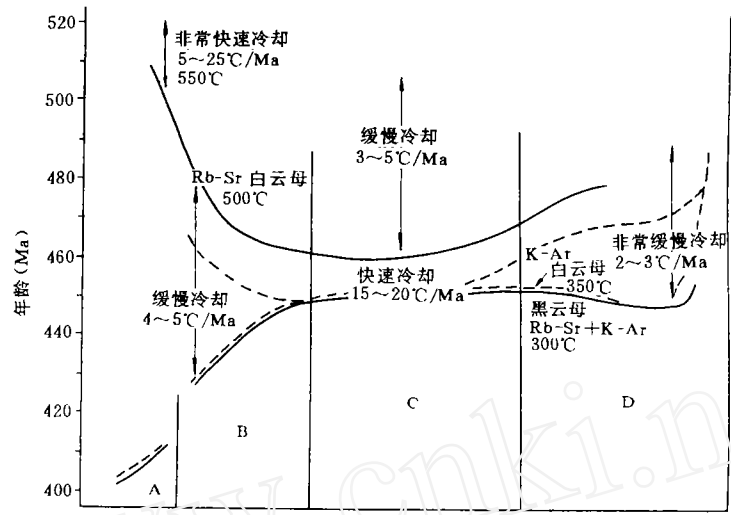


图 7 安格斯剖面矿物年龄资料综合图^[19]
图中标出了近似的冷却速率和假定的封闭温度

白云母记录的年龄为 460 Ma, 这说明降温缓慢, 即由 500 Ma 时的峰期 650℃ 开始, 到 460 Ma 才降到 Rb - Sr 白云母的封闭温度 500℃, 故冷却速率为 3℃/Ma 左右。但接着第二阶段则快速冷却, 因为由 Rb - Sr 白云母的封闭温度 500℃ 降到 K - Ar 白云母的 350℃ 和 K - Ar 黑云母的 300℃ 封闭温度只用了 10 Ma 左右, 即冷却速率为 20℃/Ma。区段 D 从峰期开始也经历了快速冷却和缓慢冷却两个阶段, 这说明各地段在回返上升过程中速度的不均匀性和非等时性。

2.3 时代划分

年代学对变质作用研究的意义不仅限于对地质体的测定, 而且对前寒武时代的划分也有重要意义。国际前寒武地层分会奋斗了 20 年, 终于在 1988 年利用锆石 U - Pb 年龄提出了前寒武划分方案, 并于 1989 年 7 月在 28 届国际地质大会上通过^[6]。这一划分方案将元古宙划分为 3 个代和 10 个纪, 并给予了希腊文的正式命名和年代界线, 分会阐明了是按年代划分, 而不是按地质体划分, 但对地质体进行精确的测年即可将之归入某一年代划分范围之内, 并赋予其时代意义, 因此地质年代学的研究就更加重要。

另外, 同位素年代学对于成矿作用的研究也具有非常重要的意义。众所周知, 矿床的成矿年龄多年来一直是地质工作者关注的问题之一。成矿年龄的精确测定可以为找矿提供一个时间界限, 从而缩短找矿周期。

3 小 结

根据上面的讨论, 可以得出如下结论:

(1)时间同温度、压力、化学活动性流体一样是控制变质作用的一个重要因素。

(2)对于时间规律的研究,可以分为相对年龄和绝对年龄的确定。相对年龄的确定以 Zwart 的三类九型判别原则和 Bell^[2]的方案为依据。而绝对年龄的确定即同位素地质年代学的研究可以使用多种方法。不同的测年法各有优缺点,应当特别注意测年与地质条件进行结合,地质与测试紧密结合才能取得精确合理的结论。目前对于前寒武纪变质岩石的研究,多使用单颗粒锆石 U-Pb 法,⁴⁰Ar/³⁹Ar 法和 Sm-Nd 法。值得指出的是,流体包裹体年代学的发展具有广阔的前景。

(3)同位素年代学的研究对大陆生长、地壳的构造演化及前寒武时代划分和成矿作用的研究均有重要意义。

参 考 文 献

- 1 都城秋穗. 时间是控制变质作用的一个主要因素. 左祖发译. 地质科学译丛, 1993, 10(3): 1~7
- 2 Bell T H, et al. Porphyroblast nucleation growth and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development. J. Metamorph. Geol. 1986, 4(1): 37~67
- 3 肖龙, 汪劲草. 变质岩中变斑晶成核生长及旋转问题述评. 地质科技情报, 1993, 12(3): 25~29
- 4 G. 福尔著. 同位素地质学原理. 潘曙兰, 乔广生译. 北京: 科学出版社, 1983
- 5 江博明. 太古代岩石的定年——方法学和局限性的讨论. 地球化学, 1989, (2): 163~189
- 6 孙大中. 前寒武纪地质年代学问题的探讨. 中国区域地质, 1990, (4): 289~300
- 7 Claoue long J C. Sm-Nd systematics of kambalda greenstones revisited and revised. Nature, 1984, 307: 697~701
- 8 韩郁菁. 变质作用 $P-T-t$ 轨迹. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
- 9 Kober B. Whole-grain evaporation for ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age investigations on single Zircons using a double-filamentation source. Contrib. Mineral. Petrol, 1986, 93: 482~490
- 10 Kober B. Single Zircon evaporation combined with Pb⁺ emitter bedding for ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age investigations using thermal ion mass spectrometry and implication to chronology. Contrib. Mineral. Petrol, 1987, 96: 63~71
- 11 刘敦一, 赵敦敏. 用热离子发射质谱计直接测定单颗粒锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄. 地质论评, 1988, 34(6): 496~503
- 12 Krogh T E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of Zircon extraction of U and Pb isotopic age determination. Geochim. Cosmochim. Acta, 1973, 37: 385~489
- 13 许荣华等. 稀土地球化学和同位素地质新方法. 北京: 地质出版社, 1985
- 14 陆松年. Sm-Nd 等时线年龄合理性判别. 中国区域地质, 1994, (2): 148~159
- 15 Tohru Danhara 等. 使用锆石内外表面进行裂变径迹年龄校正. 方洁译. 地质地球化学, 1993, (5): 39~44
- 16 鲁观清, 卢焕章. 流体包裹体同位素年代学与放射成因同位素研究评述. 地质地球化学, 1993, (1): 48~53
- 17 朱光, 徐嘉伟等. 胶北蓬莱群的同位素年龄及其区域大地构造意义. 地质学报, 1994, 68(2): 158~171
- 18 Harley S L. Garnet-Orthopyroxene bearing granulites from Enderby Land, Antarctica: metamorphic pressure-temperature-time evolution of the Archean Napier Complex. Jour. Petrol. 1985, 26: 819~856
- 19 Dempster J E. Aspects of the post-depositional evolution of Dalradian and Highland Border Complex rocks in the Southern Highlands of Scotland. Earth Sciences, 1985, 75, part 2: 151~163