

列岩浆岩的演化趋势是由Ⅰ区的钙质辉长岩类到Ⅷ区的锂-氟花岗岩,并在发展的每个阶段伴有 Ba-Rb-Sr 比值从Ⅰ到Ⅷ过渡区的花岗岩类(图 4)。东西伯利亚和乌克兰地盾前寒武纪超变质花岗岩类演化趋势从Ⅲ区(二长岩-二长安山岩)的紫苏花岗闪长岩和紫苏花岗岩开始,到Ⅵ区的奥长刚玉淡色花岗岩结束。与其演化趋势相吻合的是乌勒坎系列的早元古代花岗岩类:由Ⅲ区奥洛姆杂岩的辉长岩-正长岩和正长岩开始,经奥长环斑花岗岩建造Ⅵ区的次碱性花岗正长岩和花岗岩,到碱性钾质花岗岩区(Ⅶ)中的碱性花岗岩告终。总之,从地质历史观点出发,随着地壳的发育(从大洋壳向原始陆壳和陆壳)幔源岩浆产物被超变质产物所替代,随后两者又被再生重熔,形成了地球化学上不同类型和不同建造的花岗岩类。

概括起来说,在广泛分析材料的基础上查明,太古代原始地壳及在其中形成的超变质花岗岩类与幔源(古老的和年轻的)岩浆岩相比具有较高的钡-铯比值(图 2)。在地幔和地壳中形成的岩浆继承了原始地层所固有的钡-铷-铯比值,因为这些元素在熔融体结晶时不组成独立矿物,而是平均分散于矿物之中,所以这些比值是岩浆岩成因的地球化学指示剂。

根据 Ba-Rb-Sr 比值,可将幔源、壳源及混合源(壳-幔源)的花岗岩类划分为八个岩石地球化学区(图 4):拉斑玄武质斜长花岗岩、钙质花岗闪长岩和花岗岩、二长岩-二长安山岩、超变质花岗岩类、钙碱性花岗岩、奥长刚玉淡色花岗岩、碱性钾质花岗岩及碱性钠质花岗岩。花岗岩类系列和杂岩形成三个岩石地球化学演化趋势:钡-钡演化趋势是拉斑玄武质幔源岩浆的特点;铯-钡-铷演化趋势是幔-壳(混合)成因分异岩浆的特征;钡-铷演化趋势是壳源成因岩浆的特征。

译自《Тихоокеанская геология》1992, No. 4. С. 117—126

孙基安 译 张传荣 校

深成作用和变质核杂岩的成因

Gordon S. Lister Suzanne L. Baldwin

摘要 大陆伸展期的变质核杂岩的形成可以由深成活动引发。由侵入岩体、岩床或岩墙的热量输入引起的短期热事件期间,发生了韧性变形的脉动。这种侵入作用可能是变质核杂岩构造剥蚀过程中下盘差异抬升的根本原因。据 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄推断的快速冷凝可能发生在岩浆到达期之后,而毋需是迅速的侵蚀或构造剥蚀。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄的不均一性可以用形成在地壳浅部侵入岩床(或岩床群)的热量中的变形糜棱岩的快速冷却来解释。在这种情况下,表面的等温降压轨迹实际上与火成活动时和以后的瞬间矿物生长的温度-压力有关。

一、引言

核杂岩形成与深成活动之间有明显的时空联系。南山的核杂岩证明了这种联系,因为它

在时空上与周期性侵入作用(每次都发生糜棱岩化)完全一致。这种联系的另一证据可见于巴布亚新几内亚的所罗门海的核杂岩中,Hill 等(1992)和 Baldwin 等(1993)指出了那里的深成作用与这些活动的核杂岩之间的关系。在希腊爱琴海的基克拉泽斯中部,中新世的深成作用与核杂岩的形成也有类似的时空联系。

一些研究人员,如 Coney(1980)、Gans(1987)、Gans 等(1989),着重于大陆伸展期和/或核杂岩形成时的深成作用的研究。然而,在目前流行的核杂岩成因模式中(如 Wernicke 和 Axen, 1988 的“波状铰合”模式),即使有深成作用的话也只起着很小的作用。本文提出在大陆伸展期时的短期热事件(由岩浆侵入体造成)可以引起剪切带中的瞬间变质作用和韧性变形。盆岭区、所罗门海和爱琴海的核杂岩中存在着支持这一假说的直接和间接证据。

二、岩浆作用和短期韧性剪切带

岩浆侵入体,如浅成岩床或岩墙,甚至更深的侵入岩体引起邻近围岩中的热脉动。假设在足够的偏应力下,即使侵入作用发生在地壳浅部,这种热脉动也能在其他脆性岩石中诱发韧性行为。假如这种热软化已出现,那么可望观察到韧性剪切带与高应变岩体间的空间上的严格一致。最热的岩石将发生最强烈的韧性变形(如果流变参数不大的话),而且应变强度将随着与岩浆岩体距离的增加而迅速减小。较大岩床的周围有一较大的变形范围,或与岩墙群一致。

在核杂岩内的同构造期侵入体中或附近有很多支持应变局部化的观察证据(如克罗拉多河伸展地带;Reynolds,1985;Davis 和 Lister,1988;Scott 和 Lister,1992)。这个证据提出糜棱岩的形成与和侵入作用有关的热脉动一致。另外,这种应变局部化难以解释。深成作用与糜棱岩形成之间的严格关系暗示出剪切带形成在异常短的时间间隔内(即与侵入到消融有关的热异常发生的时间内)。浅成侵入体中应变局部化的这种证据我们的解释明确支持深成作用假说。

难以理解的是只有几十厘米厚的岩床如何长期影响应变局部化到足以使大的应变累积起来的,因为这些岩床应在几天内即冷凝了。然而,大的应变已在糜棱岩化的岩床内累积(如加利福尼亚的惠普尔山,Davis 等,1982)。剪切生热可有助于保持变形岩石比围岩软,因此使应变局部化得以继续。温度的差异毋需大到维持流变学的差异软化,尽管它必须大到足够防止温度降至再次发生脆性破裂的程度。可以进一步促使应变局部化的另一个因素可能是岩床中组构的发育,它引起了机械软化作用。侵入体产生的位置越深、体积相对越大,冷凝的时间就越长。值得注意的是,所观察到的应变局部化常发生在岩床群的岩床内,所以有效的周围温度和冷凝的半周期就更长,因此也就使得有更长的时间发生韧性变形。不过,所包括的时间很可能小于 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{y}$, Davis 和 Lister(1988)认为这一时间间隔对核杂岩的发育是合适的。

三、快速冷凝还是快速抬升?

变质核杂岩的氩热等时线已用于推断快速蚀顶(如 Davis 和 Lister,1988)。然而,许多核杂岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 数据的不均一性与这个假说不一致。如果所分析的样品反映了封闭时的周围条件,预料不会有这样的不均一性。假定样品没有与外来氩混合,这些结果有另一种可选择解

释。我们认为,具有最年轻的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄的样品已受到岩体内达到的最高温度的影响,但这些温度反映了不能统一应用的瞬时条件。保留着相对较老的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄的样品未被重新排列,因为它们没有被长时期加热到足以使放射成因的氩完全降气的有效温度。至于克罗拉多河伸展地带的核杂岩,最简单的假想是这种不均一性与岩床群和岩墙周围热晕的影响有关。

快速冷凝的结果可能被快速蚀顶的结果所混淆,尽管在某些地区两者是并存的(如 Baldwin 等,1993)。快速冷凝的证据连同许多变质核杂岩中 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄谱系不均一分布的证据,除了支持深成作用假说外很难解释。

四、突变糜棱岩前锋的意义

在科罗拉多河伸展地带核杂岩中的“糜棱岩前锋”(Davis,1988; Reynolds 和 Lister,1990)表示当前进到滑脱断层下盘的较深构造层位时首先陡然出现糜棱岩组构的特征。勾划出的糜棱岩前锋中,主剪切带发生了下拗和/或褶曲,出露在滑脱断层之下的下部板片的相对深的构造层位(Reynolds 和 Lister,1990)。该糜棱岩前锋已被解释为深处下垂的脆-韧性过渡带,但这样一种解释却不能解释糜棱岩的陡然出现或消失。这种突变与韧性是由随深度逐渐增加的温度所引起的想法不一致。

深成作用假说没有上述困难,因为糜棱岩前锋已有根据既与大型似岩床岩体(图 1 示出的

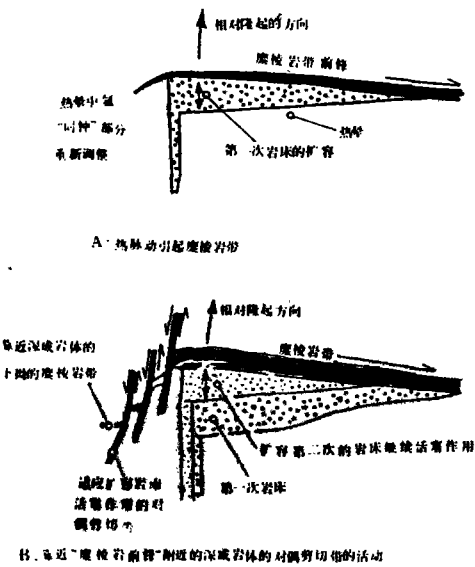


图 1 似岩床状岩体的相继侵入导致核杂岩的差异抬升。热晕导致糜棱岩前锋的发育。

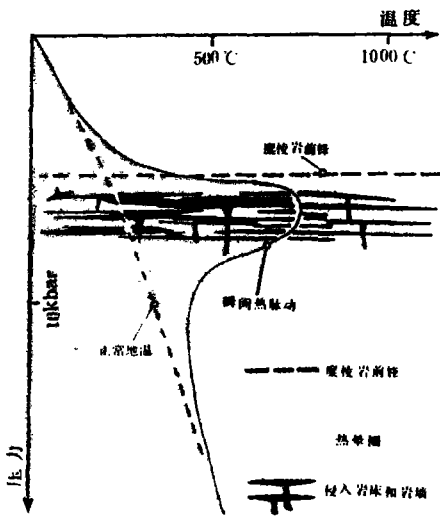


图 2 核杂岩形成时期多次岩床的侵入作用导致的热异常。热异常内韧性剪切带的运行将产生糜棱岩前锋 (Davis, 1988; Reynolds 和 Lister, 1990)

亚利桑那州的南山核杂岩)又与多个岩床(图 2

示出的加利福尼亚的惠普尔山核杂岩)有关的热异常的现成的解释。当岩床冷凝时,通过浅成

岩床群的等地温线将连续变化,并将构成图 2 所示的(瞬间)形式。糜棱岩前锋可能与标志韧性(拉长?)开始温度界线的瞬间温度前锋有关。糜棱岩前锋上的构造样品应产生相对老的表面年龄,表明岩石能够保留氩,并且在后来的热事件中样品没有完全除气。

在惠普尔山,糜棱岩前锋上出现的几个岩床是显示糜棱岩组构的唯一岩石。侵位于岩床群外侧的侵入体迅速冷凝,因此有少量糜棱岩化。相反,在糜棱岩前锋之下有大量构造上高度变形的岩床,而且岩床和糜棱岩的空间关系已有评述(Davis 等,1982;Davis 和 Lister,1988)。这些岩床储存的热足以在相对长的时期内积累强大的韧性应变。在南山,糜棱岩里的变形强度远离第三纪深成岩体就迅速减弱(Reynolds,1985)。Scott 和 Lister(1992b)报道了巴克斯金山的类似结果。瞬间热脉动可能是下覆火成岩体内部或附近出现应变局部化的原因。这种与和核杂岩形成同期的深成作用有关的应变局部化,在科罗拉多河伸展地带可能是一种普遍现象。

五、岩浆作用和抬升

核杂岩的抬升已用均衡回跳描述过(如 Spencer,1984;Buck,1988;Wernicke 和 Axen,1988;Bird,1991),其要求是在中-下中广延流动。然而,作为似岩床状岩浆房膨胀结果的差异抬升是一种有效的可选择机制。岩体的气球膨胀作用应包括膨胀的岩体与围岩拉伸薄皮之间的直接相互作用。相反,充满岩浆的水平断裂的膨胀迫使上覆岩石上隆,并且围岩的变形应限于狭窄的剪切带内。似活塞的作用可以解释南山糜棱岩前锋区内主剪切带朝下褶曲的对偶剪切带所表示的运动形式。这与更大深度似岩床状侵入体迫使上覆固态岩石体上隆的结果一致(图 1)。当挠曲支撑的载荷消失时,中地壳由补偿达到的地壳均衡将导致叠加的变形(Bird,1991)。

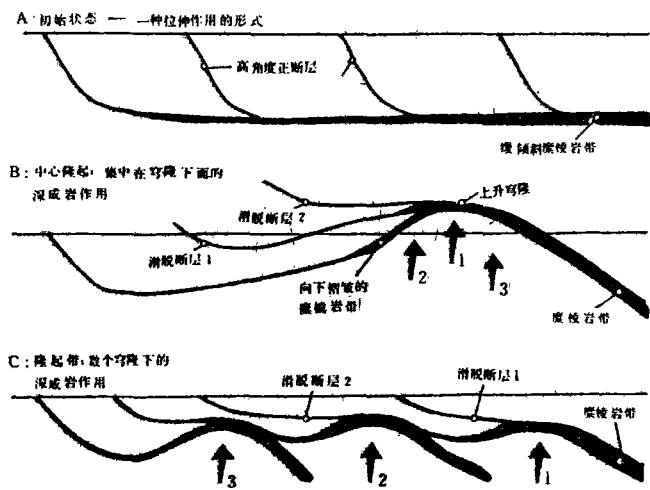


图 3 变质核杂岩的差异抬升及断层类型示意

相对上隆作了精辟独到的解释。

如果岩浆脉动局限在一条带内,那么抬升也就集中在这条带内。最终的几何形态(具有陡倾下拗的剪切带)将与圣卡塔利娜山或当特尔卡斯托群岛出现的情况相似(图 3B)。假如岩浆脉动是分散的,则抬升同样也是广布的,如图 3C 所示。分散抬升可以产生像惠普尔山、罗海德、巴克斯金山以及纳克索斯岛、帕罗斯岛、Mykonos 和伊奥斯的爱琴海核杂岩中见到的那种几何形态。与前人所有关于变质核杂岩成因的假说相比,深成作用假说对具有典型地质构造特征的片麻岩穹隆的

六、岩浆作用和瞬间变质作用

在当特尔斯托群岛的核杂岩(Hill 等,1992) 确立了一条看来包括随着快速冷凝等温降压的温度-压力轨迹(Hill 和 Baldwin,1993)。然而,氢热等时线表明不是所有的岩石都遵循相同的温度轨迹,而且有些岩石在变质作用顶峰之后快速冷凝(Baldwin 等,1993)。综合的压力-温度、温度-时间和构造资料数据组表明,岩石的快速冷凝发生在像出现侵入的火成岩体热晕中的热脉动之后。尽管我们正在研究地壳深部的变质作用,但矿物的生长是瞬间的,并且留下的压力-温度条件并没有反映周围的条件(图 4)。

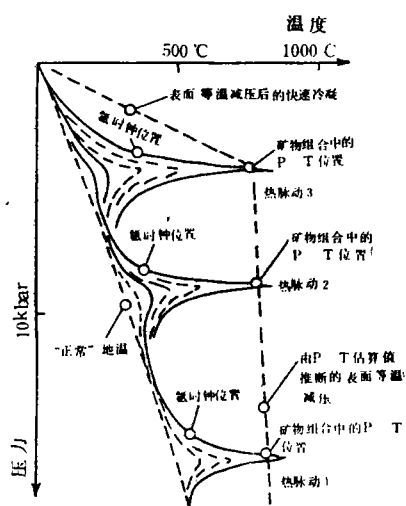


图 4 岩浆脉动对温度-压力-时间轨迹的影响。冷凝时热晕中瞬间变质作用期间的矿物组合分布。

中-高压变质作用期间形成的矿物组合的压力-温度估算值常常被假定反映了周围条件。尽管我们所描述的情况具体是核杂岩的形成,但这一概念也可以用于其他一些地壳地体。即使在较深的地壳部位,区域变质作用可能是发生在岩浆侵入体周围热晕中的一种固有的瞬间作用过程。用这种矿物组合温度-压力估计值获得的地壳地温估算值将是最大值,反映了像岩浆作用期间热局部加入的结果一样的异常高温。实际上地壳地温较低。

事实上,具有深刻含义的是瞬间变质作用不仅可以发生在地壳的低压条件下,而且也可以发生在中-高压条件下。根据逐渐变化的压力-温度条件最终位于现存矿物组合稳定区域之外的一个特殊的岩石体系上的情况,变质岩石学提出了压力-温度条件的估计值。如果充足的驱动能量有效的话,最终变质反应开始。压力-温度-时间轨迹可以取由有关岩石体中不同矿物组合获得的压力-温度估计值连线构成的近似值。然而,设想一种不同的方案,用变质重结晶作用的热驱动波代替脉动并且这些脉动之间的岩石在这些组合直到平衡的温度点之下冷凝。用一种直接类似于热等时线中圈闭温度概念的方式,压力-温度估计值将位于单个岩石数值冷凝轨迹中的不同点上(即,如果冷凝速率相对较高,则温度也较高),并且贯穿岩块将得出许多不同的压力-温度轨迹。

七、讨 论

如果糜棱岩冷凝壳的地表侵蚀相对较小,则与核杂岩有关的火成岩可能并没出露。在当特尔卡斯托群岛的古迪纳夫岛变质核杂岩中发现的花岗岩体(Hill 等,1992)初步出露了深度侵蚀的片麻岩穹窿的中央部分。许多科迪勒拉核杂岩并没有接近如此深的切割。有地球物理证据(如低重力和航磁数据;Klein,1982)表明深部有火成岩体的存在,例如当特尔卡斯托群岛和科罗拉多河伸展地带(Klein,1982)。我们可用钻探来验证,但靠获取钻孔岩芯来判别和确

定每个核杂岩深部火成岩体的年代是行不通的。这就需要有一个可选择的办法来验证深成作用假说,尤其是深成作用的独特标志。

假如深成作用在核杂岩形成中起主要作用,则用氩热等时线来识别分布广泛的热脉动证据应该是可能的(McDougall 和 Harrison, 1988)。关键是寻找与伸展事件年龄相同的糜棱岩化火成岩体。如有可能,样品应取自远离变形的火成岩体的韧性变形强度快速减弱的部位(即靠近糜棱岩化岩床)。详细的采样可以揭示垂向上和横向上 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄的变化梯度,并且逐级加热实验可以显示热脉动影响的证据。

如果用氩热等时线能够确定老的黑云母年龄,那么采自靠近较年轻(已变形)的火成岩体的样品应随着与火成岩体的距离减小而显示出逐渐年轻的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄。一旦周围温度超过 $230\sim 250^\circ\text{C}$,黑云母保留的最大年龄值便开始急剧减小。这些温度对于绿片岩(或角闪岩)相糜棱岩的形成是太低了些。假设样品没有与外来氩混合,如果岩石保留着相对较低的周围温度直到岩体带来的短期热脉动进入绿片岩相和/或角闪岩相条件,那么这种热等时线数据是可以解释的。韧性变形必须产生在这种热异常消散的这段相对短的时期里。

不难解释在岩石圈板块移动引起运动的背景中剪切应变高达 $\gamma=10\sim 15$,即使在这样短暂的时间间隔内也是如此。然而,在这些时间跨度内巨大的相对位移(如 $40\sim 50\text{km}$)却难以解释。不过,还没有能够明确解释的数据来表示与核杂岩相伴产出的韧性剪切带提供的相对运动的程度,相反脆性滑脱断层上的相对运动已受到如此重视。

核杂岩的糜棱岩样品的氩表面年龄普遍产生重大的变化(DeWitt 等, 1986),而且这些数据的解释已成为有很大争议的主题。在伊奥斯和纳克索斯(希腊的基克拉泽斯)的爱琴海变质核杂岩中,似乎是在热脉动产生之前岩石可能太冷而无法使它产生塑性变形(绿片岩相条件下)。相对老的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 表面年龄表明,在热脉动之前的周围温度必须保持低于 $230\sim 250^\circ\text{C}$ 。因此,在糜棱岩化事件之前,岩石处于地壳浅部,周围温度低到足以使放射成因氩保留下来。随后岩石必定遭受热脉动,因为形成于绿片岩至角闪岩相条件下的糜棱岩的温度 $>300\sim 450^\circ\text{C}$ 。影响这些岩石的热脉动必须是短期的,并且一旦糜棱岩开始形成温度就迅速下降,否则就难以避免氩分馏系列的重新调整。

糜棱岩有可论证的年轻构造,因为相同的变形事件有已糜棱岩化的年轻同构造侵入体。微观构造,例如动力重结晶作用产生的斜叶理(Lister 和 Snoke, 1984)表明:当温度下降时,糜棱岩形成在非共轴的薄层流动带内。在这样的韧性剪切带内的变形因此比温度脉动持续得更久,并且变形作用和变质作用二者似乎都发生在相当短的时间内。

根据希腊爱琴海、巴布亚新几内亚的当特尔卡斯托群岛、亚利桑那州的劳希德山(Rawhide)的核杂岩资料,而且也参考了加利福尼亚州的惠普尔山核杂岩的资料,看来短期热脉动时期的变形证据是存在的。估计出快速冷却期间的热衰减常数是可能的,而且有效的数据模拟表明,热衰减常数可能是 0.1m.y. 。我们怀疑,核杂岩中短期热脉动时变形作用和变质作用的证据在进行更详细地构造和热等时线研究时变得更平常。

与岩床群或似岩床侵入体相伴的热脉动温度有关的瞬间效应允许有一个对变质核杂岩中观察到的另一些奇妙现象的简单解释,例如从韧性到脆性行为的多次过渡(如南山核杂岩中所见的)。侵入体也可使在伸展大陆地壳中形成低角度正断层的矛盾问题得到解释,因为与岩墙侵位有关的瞬间应力脉动(Parsons 和 Thompson, 1991, 1993)可以提供一种由垂向到水平方

向暂时性转换 σ_1 的动力,从而使岩床得以侵位。韧性变形岩床冷凝期间后期过渡到脆性状态。结果导致了低角度断层的形成(Scott 和 Lister, 1992b)。

八、结 论

韧性变形的脉动看来发生在许多核杂岩下部板片的糜棱岩中,但只在温度太低不能发生塑性变形的这一长的时期之后。核杂岩的形成可能是具有不可思议的地质构造特征的片麻岩穹窿之下深成活动的直接产物。岩床的膨胀为差异抬升提供了一种机制,并且与岩体侵入有关的热脉动使剪切带与火成岩体的时空关系得到解释。许多核杂岩中出现的韧性到脆性的过渡可能是侵入事件之后岩体上方韧性剪切带冷却的结果,而不是与深度有关的过渡。向下穿过糜棱岩前锋出现的由脆性到韧性状态的急剧过渡也可作类似的解释。

译自《Geology》, 1993, Vol. 21 p. 609—610

何龙清 译 芮柏校

新斯科舍省南山岩基东部的淡色花岗岩

D. B. Clarke 等

南山岩基内为一过铝花岗质杂岩体,成分范围从黑云母花岗闪长岩至白云母-黄玉淡色花岗岩。淡色花岗岩(黑云母一般 $<2\%$)占岩基的小部分($\sim 1.5\%$),可划分两种类型:(1)伴生式,在细粒淡色二长花岗岩中呈较小的带状产出;(2)独立式,一般形成较大的侵入体,与其他岩类没有特定的空间关系。伴生式和独立式各自的平均化学成分如下: Na_2O (3.46, 3.83)、 K_2O (4.40, 4.09)、 P_2O_5 (0.25, 0.45) (以上为重量百分比), Li (149, 281)、F (1199, 2712)、Rb (393, 725)、U (7.4, 4.4)、Nb (12.8, 23.4)、Ta (2.9, 7.1)、Zr (52, 31) (以上为 ppm); 它们的稀土总量(ΣREE 34.1 和 19.9 ppm)及重稀土分馏程度(Ga_N/Yb_N 4.6 ± 2.2 , 2.0 ± 0.7)也明显有别,此外,伴生式的稀土组成与其周围的淡色二长花岗岩相似。它们的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $+11.2 \pm 1.2\%$, $+11.4 \pm 0.5\%$, 与整个南山岩基的平均值 ($+10.8 \pm 0.7$) 类似。两类淡色花岗岩白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法年龄均为 $372 \pm 3\text{Ma}$, 与用其他方法测定的岩基中花岗闪长岩和二长花岗岩的年龄相当。野外关系和地球化学特征表明:伴生式淡色花岗岩起源于流体与其围岩淡色二长花岗岩间在开放体系内的交代作用;而独立式淡色花岗岩为高分馏熔体的不连续侵入体,并在封闭体系中经历了岩浆晚期至岩浆期后流体的蚀变作用。在矿化方面,前者可有云英岩型或浸染型多金属矿化,而后者则有伟晶岩型或浸染型多金属矿化。

摘译自《Journal of Petrology》, 1993, Vol. 34, p. 653—679

肖志发 译 马大铨 校