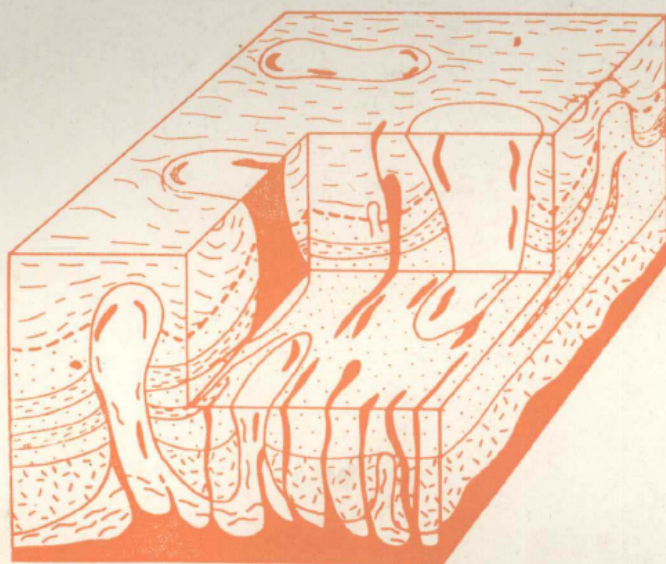


地质科技资料选编(一一六)

国外花岗岩体构造研究



地质矿产部情报研究所

一九八八年五月

国外花岗岩体构造研究

(地矿部75-16-02项目中的情报调研成果)

肖庆辉、周玉泉、李晓波、王星 编译
马万钧、林 彻、肖庆辉 校对

地质矿产部情报研究所

一九八八年

国外花岗岩体构造研究

内 容 提 要

为配合地矿部“七·五”重点科技第十六项《一比五万区调中的地质填图方法研究》(16—02项目)的开展,受部地矿司委托,由地矿部情报研究所基础室列了国外花岗岩体构造研究的专题情报调研,本专辑为最终情报调研成果。本专辑针对我国花岗岩区构造研究中的一些薄弱环节,精选了当代国外花岗岩体构造研究中一些有代表性的论文,有理论性探讨、实际工作方法以及典型地区的实例介绍;有单个岩体研究,亦有造山带大区域花岗岩基构造分析,几乎囊括了花岗岩体构造研究的主要内容,是花岗岩区1:5万区调填图以及花岗岩区地质研究的重要参考资料之一。

本书可供从事构造地质、矿产地质、花岗岩区地质,以及区域地质研究的科研、生产和教学人员参考。



地质部地质研究所图书馆

一九八八年

前言

《国外花岗岩体构造研究》是地矿部区域地质矿产地质司负责主持的地矿部《七·五》重点科技第十六项《一比五万区调中的地质填图方法研究》(16—02项目)的专题情报调研成果。

随着花岗岩地质填图的发展,人们发现,要从根本上解决花岗岩基(或岩带)的成因,不仅要對岩体进行岩石学和地球化学研究,而且还要对构成岩基的各个岩体进行构造调查。在这种背景下,近十年来,尽管各国做法不同,但共同点都不同程度地强调在区域地质填图中,要在岩性填图基础上对岩体进行构造调查,并把它作为填图的基本内容。一些研究程度较高的国家,如英国,在完成岩体地质调查后,紧接着进入了广泛开展的岩体构造调查阶段,目前正进入地球化学研究阶段。

从国外文献看,研究花岗岩构造意义重大。它不仅是研究花岗岩区区域岩石学,岩石化学,地球化学,同位素年龄,花岗岩成因,构造环境和成矿作用的基础,而且它是研究造山带,区域构造的重要环节。这些正是我国当前花岗岩地质学所面临的重大问题和薄弱环节。所以我們认为,在当前的情况下,积极开展对我国花岗岩体构造研究,是提高我国花岗岩区基础地质研究程度,做好花岗岩区成矿预测和提高找矿效果的重要基础和关键,为此我们编译了这本专辑。

本专辑针对我国花岗岩体构造研究的薄弱环节,选译了国外较有代表性的论文,共分七部分。第一部分是国外花岗岩体构造研究的新进展,综合介绍了近廿年来,尤其是近年来国外学者在花岗岩体构造研究方面所得取的成就,涌现的理论和观点,以及他们的研究思维,以便读者了解当前国外花岗岩体构造研究的现状和我们的差距,为读者阅读本专辑各部分内容打下基础,並针对我国花岗岩体构造研究所存在的问题,提出了我们的几点建议。第二部分为对花岗岩体流动构造成因和原生-次生构造划分的新认识。其中,《花岗岩质岩石中的构造:对花岗岩构造的评述》一文,是七十年代初出现的对流动构造成因提出严厉批判的最有代表性的论文,也是对经典的花岗岩构造学提出挑战的最有影响的论文之一。作者利用现代变形理论以及从流变学观点,重新研究了流动构造的成因认为,它不是岩浆流动产物,而是原地固态塑性变形的结果。由于此文的发表,一直到现在,国际上对流动构造成因的认识便出现了两派非常对立的观点。它也是今后花岗岩构造学的主攻方向之一。

《爱尔兰西北部主多内加尔花岗岩中条带状构造的成因》一文,是作者利用变形观点重新研究以往一直认为是流动成因的条带状构造的实例。它为我们提供了一个如何研究流动构造成因的方法和思路;第三部分为花岗岩浆上升和侵位形成的构造。重点介绍了近十年来国际上有关侵位构造研究方面的新进展和他们的研究思路。其中,《花岗岩类的侵位与相关的构造:述评》一文,作者提出,重力不是引起花岗岩浆上升侵位的唯一原因。他认为,花岗岩浆是在重力作用和水平构造活动的复杂的相互作用下,侵位到上部地壳中的。由于这一观点的提出,它可以比较容易解释不同侵位机制出现在同一构造层次等难题。《花岗岩深成岩体中的侵位断裂》和《侵入岩的裂隙构造》两文,强调了岩浆未完全固结好以前就可以形成各种变形构造,为此要重新认识原生节理、一些(不是全部)环状岩墙,锥状岩墙和放射状岩

858

墙的成因,以及原生和次生构造划分界线等基本问题。《原地气球膨胀底辟周围接触变质带压扁变形作用》一文,是当前国外介绍岩浆上升和侵位过程的不同阶段在围岩中形成了不同构造形迹的最有代表性的实例之一,它说明研究岩体侵位机制时,要同时综合考虑围岩和区域构造,因为接触带及其围岩的构造是研究深成岩体构造型式的一个极其重要的部分,有时对它的研究,可以对岩体侵位机制取得突破性进展。通过这一实例还可以知道气球膨胀岩体的特点,它与底辟岩体的区别标志以及同构造侵入体和前构造侵入体和后构造侵入体的区分标志。另外,这个实例还告诉我们,岩浆上升和侵位并不一定是由一种机制造成,往往是多种侵位机制复合的结果。要揭示这种复合机制效应,就必须对围岩构造进行详细构造解析。

《加利福尼亚州内华达山脉西麓的白垩纪变形作用》一文,介绍了处于假塑性状态下的岩体在侵位过程中,不仅其自身会发生变形形成片麻岩,而且由于它的侵位,会使早期侵位的岩体发生拉伸变形形成片麻岩或片麻状构造;第四部分为变形构造,主要介绍岩体侵位冷却以后受到区域应力作用形成的各种构造。其中,《勃朗峰花岗岩内的断层作用型式》一文,介绍了岩体为整体变形作用产生的断层的特点;形成了沿倾斜较大的断层面集中的剪应力,而且使已经形成的断层面发生一些旋转,并介绍了利用所谓双矩形面网(笛卡尔面网)分析花岗岩断层的新方法。《花岗岩内走向滑动断层的集结和生长》一文,根据对天然断层的详细填图研究,提出了断层的集结繁殖和生长方式及其过程,其结论与大多数传统的三轴力学实验中的剪切破裂作用明显不同,但与正向和剪切联合作用的实验结论一致。这为我们解释花岗岩体内普遍发育的走滑断层的形成机制提供了新的思路,《萨莱纳断块——加利福尼亚海岸山脉中的一个构造位移花岗岩断块》一文说明,有些花岗岩体并没有根,是外来或移置地体,他们曾以地体形式发生大距离位移。这个事实告诉我们,在研究造山带内的花岗岩体侵位机制时,要加强对区域构造的研究,要判断它们是原地还是外来岩体,否则会得出非常错误的结论。《比利牛斯山脉中部花岗闪长岩体中的剪切带及这些岩体在阿尔卑斯造山运动期间的表现》一文告诉我们,岩体形成以后,在后期构造作用下会发生各种型式的变形。对这些变形构造的研究,不但可以恢复岩体的演化历史,而且是对区域构造研究的验证和补充,这是我国花岗岩体研究中的空白,值得引起重视。《津巴布韦地盾北部的非底辟岩基》一文向我们表明,花岗片麻岩穹窿的形成是多成因的。多期区域变形的叠加作用也是形成花岗片麻岩穹窿的一个极其重要的机制。本文还向读者表明,大型的花岗片麻岩穹窿并不是一次岩浆活动的产物,而是岩浆多次脉动的结果。根据矿物成分,侵入关系,捕虏体的丰度,颗粒大小和形状,构造组构以及应变强度等多项参数,可将这类穹窿进一步解体;第五部分为花岗片麻岩成因问题。虽然花岗片麻岩是多成因的,但是当前国外多数人认为,它们之中很多都是花岗岩体变形变质的结果。当前我国不少地方都把这类片麻岩当作混合岩。为了重新认识或深化我国花岗片麻岩成因问题,我们在此选了三篇文章,它们分别代表岩体在不同变形变质条件下如何从岩体递进演变成正片麻岩的全过程。其中,《由火成岩变形形成条带状片麻岩》一文,是当代研究片麻岩成因必读的文献之一,也是当代认为花岗片麻岩是由花岗岩类岩石通过变形变质而成的最有代表性的文献之一。作者曾多次在国际会议宣读此文,并得到了强烈反响。他根据对格陵兰太古宙片麻岩的构造填图和应变强度测量为基础,并以大量的照片向读者展示了块状的岩浆岩和火山岩、枕状熔岩,斑晶,岩体中的捕虏体和岩块,混合角砾岩,各种网脉以及岩体中的析离体和条带,在变形和变质条件下如何演变成片麻岩的全过程以及它

们在不同变形强度下的性状。根据这些事实可以看到,片麻理不是沉积层理,而是构造条带,因此不能作为划分地层的依据。我国前寒武纪片麻岩广布,他们的原岩真的是火山沉积岩吗?很值得研究。《正片麻岩,糜棱岩和花岗岩的非共轴变形作用——南阿摩里卡剪切带实例》和《阿尔花岗岩的应变形式:通过整体非均匀压扁作用发育的正片麻岩》两文,不但说明了岩体变形的型式,而且进一步阐述了在强烈变形作用下,由岩体变成片麻岩再变成糜棱岩的全过程。前不久,国外曾把这类片麻岩和糜棱岩看作是简单韧性剪切的结果,并把这种组物叫L-S组构。但从这两篇文章以及其它文章中可看到,形成片麻岩和糜棱岩的变形机制也是多种的,不只是简单剪切变形,也可以是压扁变形,而且在韧性剪切过程中还叠加有次一级的剪切条带(C组构),形成C-S组构和C-S糜棱岩;第六部分为花岗岩体的应变测量及其分析方法。应变测量已成为当代构造地质学的最基本的研究方法。但由于花岗岩的特殊性,当代的许多应变测量方法并不完全适用于花岗岩体的研究,需要作一些改进和完善。本辑选译了这方面有代表性的三篇文章。其中,《加拿大安大略省马斯科卡地区变形花岗类岩石的应变分析》一文,以同一岩体为例,对当前较流行的应变分析方法的有效性进行了系统研究,证明极图法 R_f/ϕ 法, R_s 法是最可靠和最灵敏的方法。《对阿尔卑斯化的海西花岗岩中的剪切带的构造分析》一文,是当前国外利用应变分析方法研究花岗岩体构造最有代表性的文献之一。它详细介绍了如何利用片理方位的变化和闪长岩质捕虏体形态的改变为基础的应变分析方法,对岩体进行应变分析研究。另外,此文还向读者介绍了作者创立的 R_a/ϕ 法,即利用石英集合体测定岩体应变的方法。这个方法特别适用于捕虏体不多,岩体变形不强的岩体。《确定花岗岩类变形捕虏体原始形状的方法》一文,是作者根据当前花岗岩应变测量中存在的问题(假设原始捕虏体形态为圆形,不考虑不同岩性之间的粘度差)而提出的适合非旋转应变的最佳应变测量方法,以及测定变形捕虏体原始形态的方法。这一方法的提出,使花岗岩类的应变测量又得到了进一步发展和完善;第七部分为通过构造填图确定花岗岩基(岩带)侵位模式的实例。近十年来,国外对岩基(或岩带)成因的研究发现,要搞清整个岩基的成因要做两方面的工作:一个是要查清构成岩基的每一个深成岩体的构造型式,二是要在上述基础上找出控制各个深成岩体发育演化的大型区域构造。其中,《爱尔兰西北部多内加尔主花岗岩侵位的构造模式》和《西班牙海西造山带中的中埃斯特雷马杜拉岩基的构造型式和上升模式》两文,是当前通过构造填图研究岩基成因的最有代表性的文献,它不仅以同一岩基不同深成岩体侵位机制或构造型式各俱特色的事实,冲破了经典的侵位机制受深度控制的理论,而且利用陆内剪切带的演化,成功地解释了同一岩基,同一构造层次上,几乎同时形成的岩体,其侵位机制各不相同的原因。从这两篇文章中我们还可以得到一种启示,即研究花岗岩基各个深成岩体的构造型式,可以帮助查明或验证区域构造。《泛非纳米比亚达马拉带的穹隆构造和基底再活化作用》一文,向读者展示了如何通过对围岩和岩体的构造填图确定穹隆构造的性质及其演化。这一实例还说明,《气球膨胀》岩体的形成是与区域变质事件紧密相连的。对岩体填图的最终目的是要确定岩体的构造型式,而岩体的三维形态是构造型式的主要单元。《花岗质深成岩体的构造岩石学——北上山地滴状深成岩体》一文,向读者介绍了如何利用岩体构造特点和地球物理资料确定岩体三维形态的方法。

本专辑由肖庆辉、周玉泉、李晓波、王星负责编译;马万钧、林彻、肖庆辉负责校对。郑亚东、栾祖谦、尚如相、肖增起、姜有钧、关玉华、杨金华、朱井泉、王和平、费文恒

应邀参加了部分文章的译校工作。在编译过程中曾得到地矿司周维屏副司长，陈克强高级工程师，田玉莹工程师，洪大卫副研究员，索书田教授，高秉璋高级工程师、郑基俭高级工程师的指导，帮助和支持。本专辑图件由赵秀兰、张尔平、魏智如同志清绘。魏智如同志抽空设计了封面，在此向上面提到的所有同志表示衷心谢意，并真诚希望他们今后与我们进一步合作。

另外，本专辑采用了部分比较精彩的图版和照片，为了印刷上的方便，统一编号，排在了书后，请读者周知。

地质矿产部情报所基础室

1988年4月 汪达金与曹顺

目 录

一、综述

1. 国外花岗岩体构造研究的新进展 (肖庆辉、周玉泉、李晓波、王星) (1)

二、对花岗岩体流动构造的新认识

1. 花岗质岩石中的构造: 对花岗岩构造的评述 (Berger, Pitcher) (26)
2. 爱尔兰西北部多内加尔主花岗岩中条带状构造的成因 (Berger) (37)

三、花岗岩浆上升和侵位形成的构造

1. 花岗岩类的侵位与相关的构造: 述评 (Castro) (46)
2. 花岗岩深成岩体中的侵位断裂 (Castro) (69)
3. 侵入岩的裂隙构造 (Невский) (76)
4. 原地气球膨胀底辟周围接触变质带的压扁变形作用 (Bateman) (83)
5. 加利福尼亚州内华达山脉西麓的白垩纪变形作用 (Bateman) (98)

四、花岗岩体变形构造

1. 勃朗峰花岗岩内的断层作用形式 (Bertini) (110)
2. 花岗岩内走向滑动断层的集结和生长 (Segall) (127)
3. 萨莱纳断块—加利福尼亚海岸山脉中的一个构造位移花岗岩断块 (Ross) ... (141)
4. 比利牛斯山脉中部花岗闪长岩体中的剪切带及这些岩体在阿尔卑斯造山运动期间的表现 (Lamouroux) (149)
5. 津巴布韦地盾北部的非底辟岩基 (Snowden) (153)

五、花岗片麻岩的构造成因

1. 由火成岩变形形成的条带状片麻岩 (Myers) (160)
2. 正片麻岩、糜棱岩和花岗岩的非共轴变形作用: 南阿摩里卡剪切带实例 (Berthe) (168)
3. 阿尔花岗岩 (中阿尔卑斯) 的应变型式: 通过总体非均匀压扁作用发育的正片麻岩 (Choukroune) (176)
4. 不同构造区与深成岩体侵位关系的初步设想 (Gastil) (183)

六、花岗岩体的应变测量及其分析方法

1. 加拿大安大略省马斯科卡地区变形花岗类岩石的应变分析 (Donald) (187)

2. 对阿尔卑斯化海西花岗岩中的剪切带的构造分析 (Ramsay) (202)
3. 确定花岗岩类变形捕虏体原始形态的方法 (Hutton) (215)

七、通过构造填图确定花岗岩基侵位模式的实例

1. 爱尔兰西北部多内加尔主花岗岩侵位的构造模式 (Hutton) (219)
2. 西班牙海西造山带的中埃斯特雷马杜拉岩基的构造型式和上升模式 (Castro) (235)
3. 花岗质深成岩体的构造岩石学—北上山地滴状深成岩体 (加纳博) (250)
4. 泛非纳米比亚达马拉带内的穹窿构造和基底再活化作用 (Kroner) (266)
- 图版 (273)

图版 (273)

三、花岗岩类上升和侵位模式

1. 花岗岩类的侵位与构造 (28)
2. 花岗岩类侵位中的侵位 (69)
3. 侵入岩的侵位构造 (Heggen) (76)
4. 侵入岩侵位时围岩的变形作用 (Bateman) (88)
5. 加纳博北上山地花岗岩的白堊纪变形作用 (Bateman) (88)

四、花岗岩类侵位模式

1. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (110)
2. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (127)
3. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (141)
4. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (149)
5. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (153)

五、花岗岩类侵位模式

1. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (160)
2. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (168)
3. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (176)
4. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (183)

六、花岗岩类侵位模式及其侵位方法

1. 花岗岩类侵位时的侵位作用 (187)

国外花岗岩体构造研究的新进展

肖庆辉、周玉泉、李晓波、王星

(地质矿产部情报研究所)

前言

花岗岩体构造是花岗岩浆和岩体运动的产物。对它的研究,不仅可以解决花岗岩区区域地质、花岗岩基(或岩带)的形成和定位方式,而且它是研究花岗岩区区域岩石学、岩石化学、地球化学、同位素年龄、花岗岩成因和构造环境以及成矿作用的基础。近十年来它得到了飞速发展,不但出现了许多新的进展和成果,而且正在形成一些新的研究思维、方法和概念,也开拓了一些新的研究前沿和方向。为了推动我国花岗岩体构造研究的开展,提高我国花岗岩区地质研究程度,现就国外花岗岩体构造研究的进展作非常概略介绍,不当之处,请批评指正。

一、原生流动构造问题

长期以来,人们一直认为,花岗岩浆是一种低粘度的充满随机定向晶体的液体。当这些液态岩浆向上侵位时,岩浆中的原先随机定向的晶体,会遵循流体流动定律形成定向排列的流线和流面组构。建立在这个理论基础上的流线流面构造一直是花岗岩体构造研究的基础。七十年代初,A.R.Berger和W.S.Pitcher(1972)利用现代变形的新理论研究多内加尔花岗岩基以后却发现,主多内加尔花岗岩中的定向构造以及规则条带构造都有晶体变形现象,而且它们都切割了岩体内部的岩性界线,接触带以及早期岩墙等(图1)。说明它们是在应力作用下原地塑性变形的产物。为此他把流线构造改称为线理,把流面构造改称为叶理。即把原生构造改称为变形构造。自此以后,关于流动构造成因的认识便出现了两种根本对立的观点,直到今天仍没有统一的结论。

引起争论的原因是,近年来许多人强调岩浆在其产生和发展过程中物理状态曾发生过变化:虽然在早期阶段花岗岩浆可能是液态的,但晚期阶段,特别是侵位阶段,岩浆已变成假塑性体。现在看到的定向构造主要是岩浆处在假塑性状态下发生变形的结果。不过从现在资料来看,定向构造既可以是岩浆流动形成的,也可以是侵入同时的韧性变形的结果,要视具体情况而定。最近Pitcher(1987)除坚持变形观点外,也同意流动似乎曾不知不觉地参与了固态下的韧性变形。它还认为,黑云母条状体向岩体逐渐过渡的现象就是岩浆流动分层的证据,是一种管状岩浆涡流的结果,而钾长石巨晶排列成的旋涡构造是岩浆湍流的结果。

目前许多人一般都是把构成定向组构的晶体是否发生过晶内变形作为区分流动构造和变

形构造的主要辨别标志：岩浆流动造成的定向构造，其晶体（层状硅酸盐或长石）没有任何晶内变形现象。如果构成定向组构的晶体发生了晶内变形和重结晶作用，则说明这些定向构造是在固态的原地塑性变形造成的，或者是在韧性介质中定位的。不过，需要指出的是，这些辨别标志并不是万能的，也有很多例外。最近Castro (1987) 对这种辨别标志持否定态度。他认为，在大多数情况下，这种区别是不相干的，也是不现实的。因为变形构造（叶理和剪切带）可以由岩浆本身的侵位动力造成的，而流动构造则可以是外部变形作用诱导的结果。例如西班牙的圣克鲁斯石英闪长岩侵入体 (Castro 1986)，其内部组构几乎全部由黑云母斑点构成。在岩体西缘，这些斑点构成一种线状组构。但这种组构向东逐渐减弱，在东部边缘则变成毫无规律了图(2)。虽然西部边缘黑云母斑点呈定向排列，但整个闪长岩体内部却不存在任何晶内变形现象。不过，在西部边缘上发育了一条N-S向左行剪切带。它没有向北和向南延伸到围岩中，说明这个剪切带是由该岩体在侵位期间，岩体还处于准固态情况下向右旋转造成的。所以当西部边缘发生剪切时，岩浆肯定完全未固结，西部边缘黑云母斑点的定向构造或流动构造显然是西部边缘剪切带诱导的变形作用的结果。

鉴于当前对岩体定向构造的成因和辨别标志的认识分歧很大，所以在确定岩体侵位机制时，要解释这种定向组构的成因，除必须进行详细构造填图以外，还要从组构的发育部位，型式，排列方式，微观特征，岩体构造环境和岩体与区域构造的关系等方面进行辨别。

例如岩体内某一类岩脉切割了捕虏体，并发生了褶皱，其本身又被岩脉和其围岩(即岩体)共有的片理所切割的话，那么，这些片理肯定是构造成因的。又例如岩体内的一些叶理可向外一直追索到围岩中，这个叶理肯定是构造成因的。

根据上述可以看到，岩体在上升和侵位过程中，当岩浆还未固结好以前，岩浆本身就可以形成一系列变形构造。这与传统的“原生”和“次生”构造概念格格不入。因为，按照经典的概念(H. Cloose, R. Balk, 1937)，变形的构造应属次生构造范畴，而次生构造是在岩浆固结以后因变形产生的。原生构造则是在岩浆固结以前及固结过程中发育的。特别需要指出的

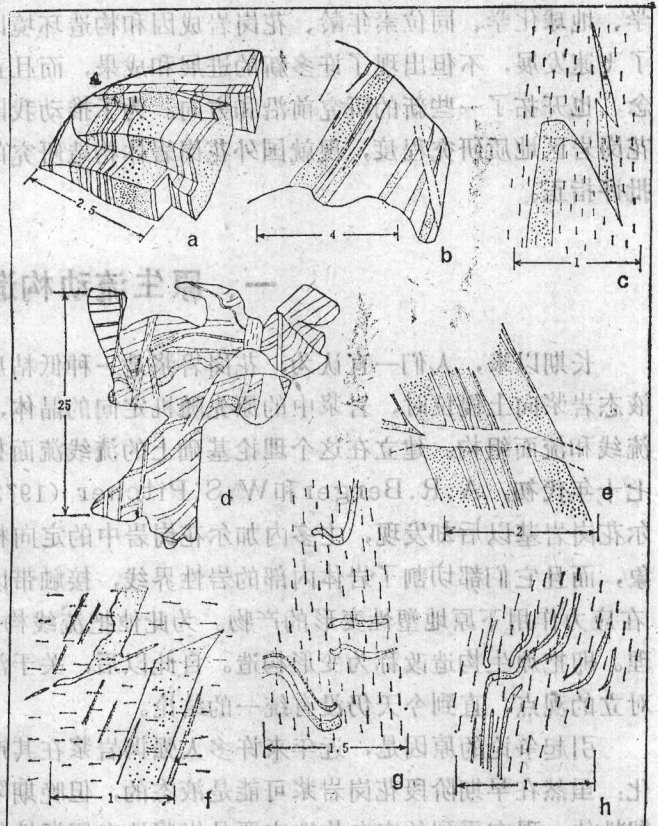


图1 主多内加尔花岗岩中规则条带构造，矿物线状排列的野外关系（小点表示暗色条带，虚线表示矿物定向构造）c、f、g、h图表明、矿物定向构造切割了岩体的条带构造

是,近年来通过对岩体构造的详细研究,原先用来区分原生构造的许多标志在变质杂岩中都可找到。例如,原先认为,同流面平行的包体或捕虏体是原生流动构造最有力的一个证据,但是在变质岩中也经常可以见到布丁构造同片理平行,而且片理围绕捕虏体分布,与花岗岩中的叶理围绕捕虏体分布一样;又如,过去认为,花岗岩中捕虏体的旋转现象是岩浆流动的证据,但是这种情况在花岗岩侵位过程中以及侵位以后由于韧性变形也可以形成这种旋转等等。

鉴于上述情况, Berger和Pitcher (1972) 等人建议,在花岗岩构造研究中取消原先的所谓《原生》和《次生》构造的概念。如果还要继续使用《原生构造》这个词,就必须重新明确它的定义。要么把它缩小限制在晶体从液体中开始生长到流体保持某一最低数量(或完全没有)之间的全过程,要么把它扩大到岩浆冷却到区域等温线之前固相线温度之下所发生的全部事件。

总之,当前对流动构造成因的认识出现了两种根本对立的观点,把花岗岩构造简单地划分为《原生构造》和《次生构造》的概念要重新明确。这也是当前和今后花岗岩构造研究的主攻方向之一。

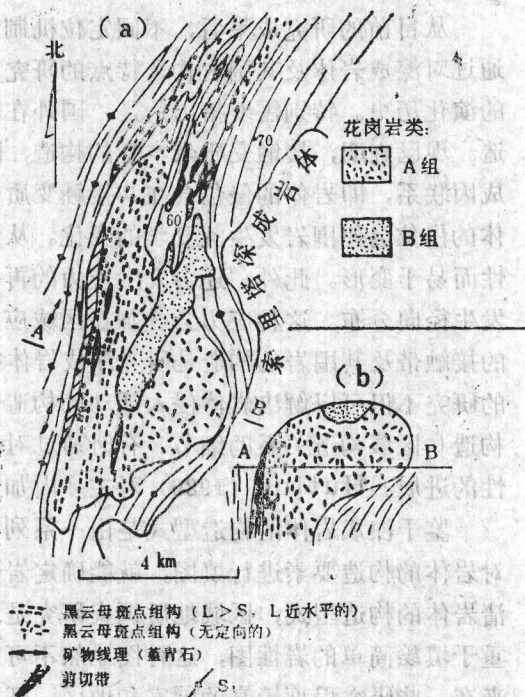


图2 (a) 圣克鲁斯深成岩体构造图
(b) 推测的A—B横剖面图。表示其流线构造是由西部剪切带诱导的结果

二、花岗岩体的侵位机制和构造

花岗岩体的侵位机制及其派生的构造是当代花岗岩地质学研究的前沿,近年来有关这方面的文献有急剧增加的趋势。以往对花岗岩体侵位机制的研究多从岩相学,岩石学和地球化学入手,并不考虑围岩而只局限于对岩体本身的研究。近年来,流变学、现代变形理论和当代构造分析技术,尤其是应变分析技术的应用,加之把岩体侵位机制和围岩以及区域构造一起综合分析研究,使花岗岩体的侵位机制研究提高到一个新的水平。虽然当前对花岗岩体侵位机制的认识很多还停留在工作假说水平上,尤其是对岩体侵位机制动力学解释具有很大的推测性,同一种侵位机制及其伴生的构造,不同人有不同的叫法和解释,但从总体来说,取得了以下一些进展:

1. 不同定位机制形成的岩体具有不同的构造型式,要搞清岩体的定位机制,应在岩性填图基础上对岩体和围岩都要进行一定的构造填图。

以往对花岗岩定位机制的研究多立足于岩石学和地球化学研究。近十年来,情况发生了很大变化,国外在定位机制研究方面加强了构造研究,特别是引进了许多当代构造地质的基

本理论和方法, 试图从岩石学和构造地质学两方面的综合研究解决岩体侵位机制, 并取得了许多可喜的成果。

从目前的研究成果看, 不同定位机制形成的岩体及其围岩具有不同的构造型式。因此, 通过对深成岩体及其围岩构造特点的研究, 就可能确定深成岩体的上升和侵位机制以及它们的演化历史。特别需要指出的是, 国外在研究侵位构造时, 特别重视研究岩体周围围岩的构造。现已查明, 接触变质晕本身的构造, 除受区域构造控制以外, 还与岩体的上升和侵位有成因联系, 即岩体的侵位会在其接触变质晕中形成独特的变形构造。特别是气球膨胀花岗岩体的侵位会使围岩发生流变学的变化。从而使花岗岩体周围比较热的围岩岩石具有较低的粘性而易于变形。此外, 还会发生应力的再分配。来自膨胀岩体内部的压力, 其最大主应力将发生径向分布。这种应力会叠加在区域应力系统之上形成岩体特有的构造变形。所以, 岩体的接触带及其围岩的构造是研究深成岩体构造型式的一部分, 而且是相当重要的一部分。对它的研究不但可以解决岩体侵入活动的构造环境, 而且还可以解决岩体的侵位方式, 岩体内部构造与区域构造关系的细节。有时通过对围岩构造的研究甚至可以对岩体侵位机制取得突破性的进展。Hutton (1986) 对主多内加尔花岗岩体侵位机制的突破就是一个典型的实例。

鉴于深成岩体的构造型式是由一系列构造单元(或要素)构成。所以, 只要我们在野外对岩体的构造要素进行填图, 就能确定岩体的构造型式, 进而确定其侵位机制。总之, 要弄清岩体的构造型式, 区域地质调查研究是最基本的研究方法。但以往的花岗岩填图工作多偏重于填绘简单的岩性图, 这种图显然不可能搞清花岗岩体的构造型式和侵位机制。所以近年来在一些研究程度较高的国家和地区, 开始在原有的岩性图基础上填绘构造图, 或者在一些关键地段进行详细构造填图。据洪大卫(1984)和高秉璋, 高维敬等人的访英考察报告(1987), 英国花岗岩区域地质研究, 在完成岩体岩性调查后, 紧接着进入构造填图阶段, 目前正进入地球化学研究阶段, 很值得引起有关方面的重视。

在对岩体进行构造填图时, 填图内容一般包括了侵入体和其围岩的侵位和变形构造, 接触带构造以及接触变质矿物的显微构造特征等。按西班牙Castro (1986, 1987)的研究, 构造填图的最终目的是搞清岩体的构造型式。按他的意见, 构造型式由下列构造要素构成:

1. 深成岩体的平面和剖面形态。

2. 深成岩体的内部构造, 它又包括:

(1) 结晶结构, 其中包括层状硅酸盐, 长条形石英集合体以及钾长石巨晶的定向排列

(2) 捕虏体的形状和定向

(3) 节理或侵位断裂, 剪切带等

(4) 岩石类型的空间分布等

3. 侵入体附近的围岩构造

(1) 区分出侵位以前的构造(如区域片理)与侵位本身诱发的构造

(2) 接触变质晕内变形作用和变质矿物之间的显微构造关系

(3) 接触变质矿物的组构

(4) 围岩构造的空间分布

2. 岩浆底辟上升侵位机制的作用正在下降, 气球膨胀和岩墙扩展侵位机制已受到普遍

重视和研究。

自从1945年F. E. Grout提出底辟侵位机制以来, 尽管受到很多批判, 但它一直是花岗岩体构造学的基础。所以多年来, 多数人一直认为, 花岗岩浆主要是通过底辟的型式上升和侵位到地壳上部的。但近廿年来, 尤其是近年来, 许多野外观测和实验模拟研究与这一结论不符。例如, 野外观察发现, 许多所谓底辟岩体周围实际上没有边缘向斜; 底辟岩体周围的围岩属总体均匀压扁的应变型式, 不存在一些剪切现象; 很多岩体形态为蘑菇状, 而不是水滴状; 加上模拟实验发现, 底辟构造实际上是穹窿构造发育的中间阶段产物, 当他进一步发育时, 会发生横向拓宽, 岩体形态由水滴状发育成蘑菇状。如Dixon (1975) 的模拟发现, 穹窿、底辟、气球膨胀是同一岩浆上升侵位过程中的不同演化阶段的产物。即气球膨胀实际上是由穹窿, 经过底辟演化而成 (图3)。Berner (1972) 的数字模拟也得到同样的结论 (图4)

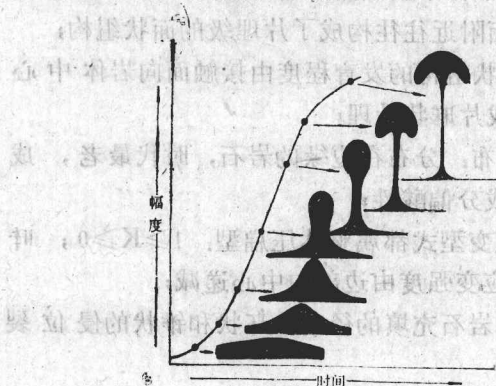


图3 数字模型的幅度—时间图解, 表示底辟演化中各个阶段的几何形状,

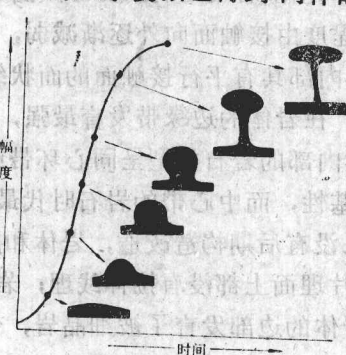


图4 Berner等人 (1972) 的油底辟模型的幅度—时间图解, 表示由穹窿, 经过底辟到气球膨胀的演化阶段

鉴于上述的一些事实, 许多人对底辟侵位机制提出了批评意见。1980年在英国利兹大学召开的《底辟作用和重力构造》讨论会上, 许多人对底辟作用提出怀疑。在这次会上, 虽然仍坚持有底辟构造存在, 不过, 许多作者强调, 要正确鉴定底辟构造, 需要进行大量的野外观察, 应变测量和室内模拟实验。最近几年, 对底辟机制的批判仍在上升。March (1982) 认为, 如果岩浆是通过底辟整体上升, 那么, 其周围的接触变质晕的粘度必须很低, 但要使它的粘度降低到能使底辟上升, 就必须要求它发生高度的部分熔融, 但实际上在野外很少见到这种现象。R. Bateman (1984, 1985) 根据澳大利亚坎尼巴尔克里克岩体研究, 以及对已发表的文献分析后认为, 以前人们所认为的底辟构造, 实际上绝大多数都是属气球膨胀岩体, 所以他把这种底辟叫做气球膨胀底辟。

鉴于上述情况, 当前国外愈来愈多的人认为, 深部岩浆的侵位, 特别是最后的侵位可能是通过深成岩体原地气球膨胀作用实现的。气球膨胀侵位机制是通过侵位岩浆本身的膨胀或横向拓宽把周围的围岩压扁缩小而扩大自己的空间。由于岩浆侵位时, 岩体规模较小, 一般只占现有体体积30-40%, 即岩体现有体积的大部分是通过横向拓宽把围岩压缩而扩大自己空间的。这个侵位机制可以比较好地解决花岗岩类侵位机制长期争论不休的《空间》问

题, 所以它是近年来花岗岩侵位构造研究的热点。据国外文献报导, 研究比较好的气球膨胀岩体有阿达拉(Pitcher and Berger 1972; Holder 1979; Sanderson and Meneilly 1981), Chindamora岩体(Ramsay 1981), Ploumanach花岗岩杂岩(Barriere 1977), 主多内加尔花岗岩(Hutton 1981)和坎尼巴尔克里克花岗岩(Bateman 1984)。根据上述岩体, 气球膨胀岩体构造型式的特点可归纳如下:

- (1) 岩体的平面形态多为圆形和椭圆形, 立体形态多为蘑菇状或漏斗状;
- (2) 岩体发生横向拓宽, 而围岩则发生整体压扁收缩。岩体横向拓宽的体积比初始体积大1-2倍以上。例如阿达拉拓宽了72%(Holder 1979), 坎尼巴尔克里克为70%(Bateman 1984), Ploumanach至少为50-65%(Barriere, 1977);
- (3) 岩体周围围岩发生明显变形, 围岩中具有平行于接触面的面状组构, 面状组构的发育程度由接触面向外逐渐减弱, 在接触面附近往往构成了片理级的面状组构;
- (4) 岩体内部具有平行接触面的面状组构, 面状组构的发育程度由接触面向岩体中心递减, 在岩体的边缘带发育最强, 往往构成片麻状叶理;
- (5) 岩体内部的岩石类型呈同心环带或分带展布: 分布在边缘的岩石, 时代最老, 成分偏基性, 而中心带的岩石时代最年轻, 成分偏酸性;
- (6) 如果没有后期构造改造, 岩体和围岩的应变型式都属整体压扁型: $1 \geq K \geq 0$; 叶理和片理面上都没有拉伸线理, 岩体内的应变强度由边部向中心递减;
- (7) 在岩体的边部发育了被细晶岩, 伟晶岩等岩石充填的径向、环状和锥状的侵位裂隙;
- (8) 接触变质晕中的变斑晶与叶理为同构造生长(这是关键标志之一);

要特别注意的是, 底辟岩体和原地气球膨胀岩体并不是相同的构造体, 它们之间有明显的差别。按Bateman and Jackson(1980)的意见, 底辟岩体可定义为穹状岩体或上隆岩体因核部活动物质或火成岩侵入活动而引起的穿刺作用。所以凡是深成岩体使其周围的接触变质晕发生整体缩短作用, 但没有穿刺, 就应把它们正确称为气球膨胀岩体。总之, 底辟岩体这一术语似乎应限制在已证实有穿刺的那些深成岩体。如果是这样的话, 气球膨胀岩体与底辟岩体的构造型式就明显不同。它们之间的区分标志:

- (1) 底辟岩体周围发育有周缘向斜;
- (2) 底辟岩体周围的早期向外陡倾的岩层, 其褶皱的轴面比岩层(或岩层的包络面)陡, 而气球膨胀岩体周围的岩层刚好相反, 其褶皱轴面比岩层平缓得多(图5);
- (3) 应变形式明显不同, 底辟顶部岩层为压扁型应变, 但岩体与两侧围岩之间为剪切变形, 有拉伸线理, 鞘褶皱, 拉伸岩墙布丁构造等。而气球膨胀岩体为整体(或叫全方位)递进不均一缩短作用, 片理面上没有拉伸线理。

最近10年, 国外一部分学者在对底辟侵位机制批判的同时, 提出了岩墙扩展机制作为岩浆上升运移的主要机制。他们认为, 花岗岩浆不是通过底辟整体上升, 而是经由地壳深部断裂穿过地壳上升的。现在有不少学者认为, 它是深部花岗岩浆向上运移侵位的主要机制。Hutton(1982)在关于主多内加尔岩基的岩浆上升模式中, 把与陆内剪切带相伴发育的张性断裂看成是花岗岩类岩浆上升的通道; Castro(1985, 1986)在研究西班牙中埃斯特雷马杜拉岩基时, 也认为与陆内剪切带伴生的张性断裂为花岗岩类的上升起了通道作用; 另外,

Garcia de Figuerola等人 (1983) 利用岩墙扩展机制,解释了西班牙中西部的侵入作用、变质作用和区域变形作用的时间顺序,等等。所谓岩墙扩展机制是指深部岩浆经由断裂或岩墙上升一直到达上部的岩浆库或岩浆池,然后冷却而成一种不整合岩体。不过,随着岩浆由深部向地壳浅层运移过程中,运移岩浆的断裂或通道不断扩展加宽或张开。因而,在自然界,通过这种机制形成的岩体并不是以岩墙型式出现,而是形成大的深成岩体。其实,这些岩体本身就是一个岩浆池。据Castro (1987)的意见,岩墙扩展机制往往发育在大陆拉伸构造环境里。由这种机制形成的不整合侵入体的构造型式,其特点是:

- ①平面形状为不规则状;
- ②一般没有内部构造;
- ③在侵位过程中围岩的作用是被动的。侵入作用以前的围岩在接触面附近并未被扰动;
- ④接触面弯弯曲曲,往往与围岩互相穿插;
- ⑤在岩体边缘常见有一些小型的顶蚀作用;

要注意的是,在造山带里,当岩浆通过狭窄的通道或岩墙到达上部地壳时,如果在上升侵位过程中同时还伴有区域性变形作用,特别是水平构造挤压作用的话,那么,岩浆就将在基底之上以不整合深成岩或以气球膨胀岩体型式在最终的岩浆库中积聚起来,形成气球膨胀岩体,或底辟岩体。

3、重力不是引起花岗岩浆上升侵位的唯一原因,区域水平挤压力的作用也是重要的。

按经典的理论,花岗岩类岩浆之所以能上升并侵位到地壳较高的层次,是因为这种岩浆或岩体的密度比围岩低造成的。Ramberg (1981) 通过模拟实验也认为,岩浆上升和侵位所必需的能量仅仅是由重力的不稳定性造成的。但是近年来的野外地质填图和实际研究却发现一些事实与此不符。例如,在西班牙的一些岩基中,可以见到密度较大的侵入体却侵位在密度比其小的围岩中的反常现象。奥利文萨-莫内斯特里奥岩基的一些侵入体就是一例 (Pons and Brun 1984)。Winkstron (1984) 也描述过一个密度比围岩大的气球膨胀侵入体。从Berner等人 (1972) 的油底辟模型中 (图4) 可以看到,底辟的最终体积在隆起期或中间阶段的迅速增长期开始时就能完全达到。换句话说,一些气球膨胀岩体的上部外壳并不是通过主干补给的,它的水平扩展的蘑菇形态是从原始的球体底辟形态在形状上改变的结果。Dixon (1975) 的模拟实验表明,由于《器壁效应》,下沉层向底辟的主干发生聚合流动 (图6),但模型的刚性壁却阻止了初始穹隆向外的侧向流动。就是说,直上直下的离心应力可以分解为垂直作用于层边界的正应力 (δ), 和平行于层边界的剪应力 (τ), 但剪应力被模型壁消除了。于是正应力使初始穹隆的转折点向模型中心移动,于是形成了腰部。虽然在自然界这种器壁效应不可能存在。然而,在岩浆侵位过程中往往有水平缩短作用,而这个水平缩短作用与 Dixon模型中覆盖层的聚合下沉作用可以相比。所以在岩浆侵位过

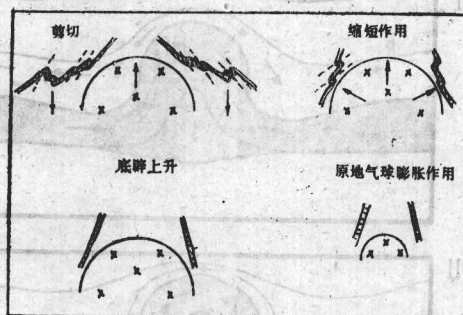


图5 底辟岩体和气球膨胀岩体造成围岩的不同变形效应示意图。

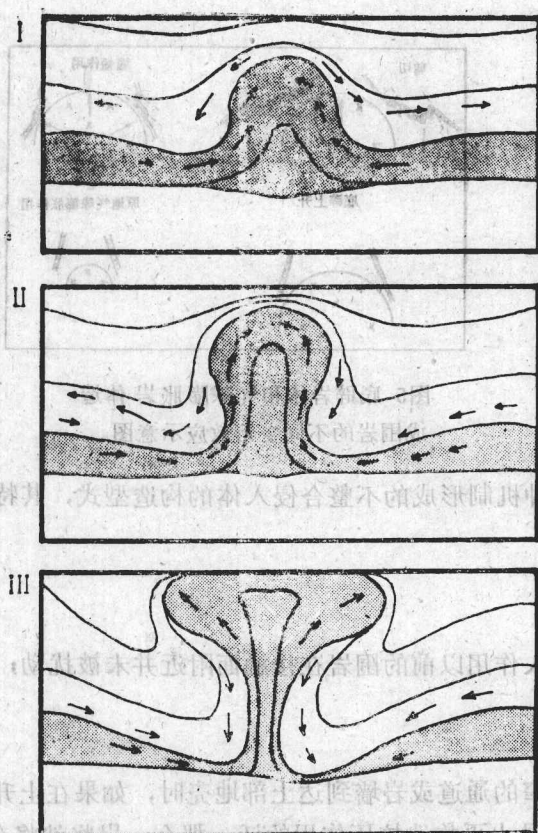


图6 Dixon的底辟构造的三个演化阶段的模型。箭头指明了每一个层中的流动型式 (据Castro 1987)

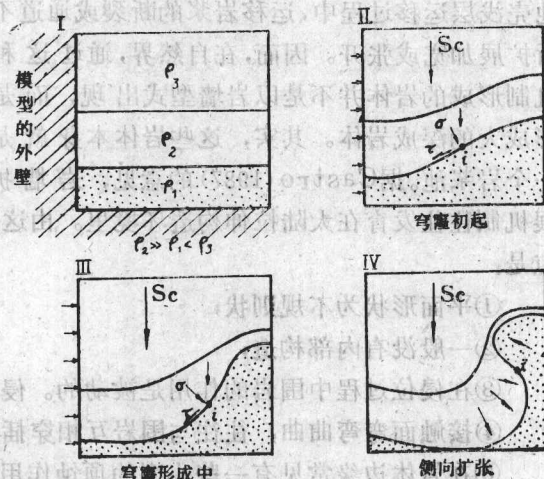


图7 表示Dixon模型的《器壁效应》的示意图。它决定了下沉层的聚合流动和上浮底辟的侧向扩展。 ρ_1, ρ_2, ρ_3 为各层的密度, Sc 为离心应力, σ 为正应力, τ 为剪应力, i 为转折点

程中,特别是气球膨胀体的侵位,区域性的水平缩短作用起了重要作用。在这种情况下, Castro等人(1987)认为,花岗岩类岩浆是在重力作用和水平构造活动的复杂的相互作用下,侵位到上部地壳中的。

4、控制花岗岩浆侵位型式的主要因素不只是深度,还受多种因素的共同制约

按以往多数人的认识,地壳深度是不同定位机制的主要控制因素。A. F. Buddington (1959) 对此作过系统的总结。他认为,穹隆和底辟岩体都产在地壳的深带,而顶蚀作用和火口沉陷作用则发生在上部壳层中。因此,与区域构造整合的深成岩体是侵位到地壳深处韧性壳中,而不整合的深成岩体则被认为侵位到了上部脆性壳中。可是,近十几年来来的许多研究成果与此格格不入。现在,在很多地方都能发现,整合深成岩体却定位在地壳高层次的低级变质岩石中的反常现象 (R. Bateman 1985; A. Castro 1986; L. G. Corretge 1971; Carnicero and Castro 1983; J. Pons and J. P. Brun 1984)。在多内加尔岩基和奥利文萨-莫内斯特里奥岩基 (A. Carnicero and A. Castro 1982, 1983; J. Pons and J. P. Brun 1984) 都发现所谓产于不同层次的不同定位机制却产在同一个地壳层次上,特别是底辟和火口沉陷几乎同时同地出现在同一地壳层次上。

鉴于上述情况,近年来国外一些学者认为,控制花岗岩浆侵位型式的主要因素不只是深