

花岗岩岩基的成因

地球化学证据

M. P. 艾瑟顿

J. 塔奈伊

编



C 17361

132
2
1

花岗岩岩基的成因

地球化学证据

M.P. 艾瑟顿 编
J. 塔奈伊

王德滋 刘昌实 周金城 译
邵克忠 校

地质出版社

内 容 提 要

本书是一会议文集,它集中了1979年以前有关花岗岩成因的地球化学证据的各种新资料。书中用实例阐述了如何利用Pb, O, S, Rb—Sr, Nd等同位素特征结合岩石的主要元素、微量元素,尤其是结合岩石和矿物的稀土配分,对花岗岩的成因提供了充分的地球化学依据。书内全面评述了I型花岗岩和S型花岗岩的区别、生成关系和地质分布,从全球观点论述了两类花岗岩与矿产的关系,并讨论了地球历史中随着地壳的生长花岗岩形成机制的变化。

本书可供从事岩石、矿床、地球化学、构造地质、同位素地质的教学、科研、生产的有关人员阅读和参考。

Origin of granite batholiths GEOCHEMICAL EVIDENCE

M. P. Atherton and J. Tarney
Shiva Publishing Limited, 1979

花岗岩岩基的成因

地球化学证据

M. P. 艾瑟顿 编
J. 塔奈伊

王德滋 刘昌实 周金城 译

邵克忠 校

责任编辑:牟相欣

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092¹/₁₆。印张: 7⁵/₈。字数: 177,000

1985年5月北京第一版·1985年5月北京第一次印刷

印数: 1-2,635册 定价: 1.90元

统一书号: 13038·新119

目 录

关于花岗岩地质环境的评述.....	W.S.皮彻 (1)
加洛韦侵入岩体的组分变异.....	W.E.斯蒂芬斯和A.N.哈利戴 (7)
苏格兰高地加里东花岗岩成因和演化的同位素和微量元素证据	S.J.彭克霍斯特 (14)
东南亚锡矿带花岗岩岩浆作用.....	R.D.见克塞尔 (27)
分段的秘鲁海岸岩基和伴生的火山岩的地球化学	M.P.艾瑟顿 W.J.麦科特 L.M.桑德森 W.P.泰勒 (35)
安第斯山火山岩和侵入岩的成岩关系.....	R.S.索普 P.W.弗朗西斯 (51)
破坏性板块边缘岩浆的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和微量元素特征	C.J.霍克斯沃思 (60)
有关科迪勒拉岩基成因的微量元素对比.....	J.塔奈伊 A.D.森德斯 (71)
在地球历史中岩基侵位的变化型式.....	G.C.布朗 (83)
构造后花岗岩的侵位机制及其对地球化学特征的意义.....	M.T.霍尔德 (91)
某些S型和I型花岗岩微量硫的同位素分析: 继承的还是外界的?	M.L.科尔曼 (100)

关于花岗岩地质环境的评述

W.S.皮彻

对花岗岩岩基的野外研究令人信服地表明,岩基的侵位(包括其成分变化甚至各种成因类型的复合体)具有漫长而复杂的历史(例如, Pitcher 和 Berger, 1972; Pitcher, 1978, 1979), 所以, 简单地进行地球化学调查研究不足以阐明组成岩基的各种岩浆的演化和成因。显然, 确立一个地质上的时空格架是进行这种研究的必要前提。

构成一个复式岩基的许多单个侵入体, 各自都有其自己的演化历史, 这些岩体来自数目有限的独特的岩浆类型, 对于这一点在一开始就有所认识是很重要的。这些岩浆类型在形成时间上往往是完全隔开的, 呈许多隔离的岩体遍布于地壳内的岩基中(Cobbing, Pitcher 和 Taylor, 1977)。科宾和皮彻称这些岩浆类型为“岩套”(Super-units), 贝特曼和道奇(Bateman和Dodge) (1970)用岩浆序列(magma sequences)来表示, 怀特(White)、威廉斯(Williams)和查佩尔(Chappell) 1977年以“岩组”(suites)表示, 西尔弗(Silver私人通信)以同位素域(isotopic domains)表示。例如, 秘鲁海岸岩基的利马区段由七个这样的序列组成, 它的阿雷基帕区段由四个序列组成, 所有这些序列分布于约700—800个隔开的侵入体中。

根据里德的观点(1948, 发表于1957), 花岗岩有多种多样, 即花岗岩不止是一种成因, 认识到这一点甚至是更为重要的。因此岩浆演化也就不可能只存在一种途径。在非造山区, 花岗岩类既可通过基性岩浆的分异作用形成, 也可通过地壳物质受基性岩浆影响发生部分熔融而形成; 而在造山区, 花岗岩类可以通过地幔或下部地壳复杂的部分重熔形成, 或者也可作为变质作用最终阶段的产物。这样的一些成因类型曾经为一些地质学家分别指出过, 特别是一些苏联学者(例如, Tauson和Kozlov, 1973), 他们最先意识到里德的观点在经济上的重要意义, 并且最早叙述了每一种成矿花岗岩类型的化学特性(详见 Levinson, 1974)。

虽然这种成因分类尚处于萌芽阶段, 但是十分清楚, 这些花岗岩组合的地球化学特性是很不一样的。例如, 产于不列颠群岛第三纪火山中心内与辉长岩伴生的花斑状花岗岩是不含矿的, 这与某些富铌的弱碱性花岗岩, 例如尼日利亚的中生代中心式杂岩, 以及一些更加明显富碱的“钠质火成岩型”正长花岗岩, 例如奥斯陆附近二叠纪的正长花岗岩, 形成强烈对照。此外, 不同的还有, 在欧洲海西造山带, 一种往往含锡的二云母花岗岩占主导地位, 而中生代安第斯山大量出现的钙碱性花岗岩类则有重要的斑岩铜矿伴生。造成这些差别显然与不同的地质环境有关, 而最终是与不同的成因有关。

然而, 关于花岗岩, 无论其来自何种环境, 有一点是共同的, 而且是很重要的。尽管当前科学界流行的对花岗岩具有不同成因的看法是一致的, 但是看来无可否认的是, 重熔作用和交代作用均需相当可观的能量输入, 如果在时间和空间上与变质环境不协调的话,

任何数量的花岗岩都未必能在原地形成 (Walton, 1955)。许多花岗岩体与其围岩显示能量上的不协调, 因此它们可能是呈岩浆方式侵入的, 无论岩浆在深部属于何种成因。

关于这方面的讨论, 一个更为共同的特点是, 花岗岩的发生主要与陆壳紧密联系, 并且以岩基规模仅仅出现于该陆壳边缘或陆壳内部活动带内。这一事实早就被理解为由于陆壳的局部增厚使温度足以升高而产生的地壳熔体 (Daly, 1933, P.263), 不过现在只是重申岩浆是发生在板块边缘上, 在这里, 由于板块下插作用 (俯冲) 或地壳缩短 (碰撞) 导致地壳增厚。

长期以来就确认在区域性变形、变质作用和花岗岩的形成与侵位之间存在着普遍的空间-时间上的联系。爱斯科拉 (Eskola) (1932) 和韦格曼 (Wegmann) (1935) 把这种联系正式归纳为岩浆-构造组合, 后来里德 (1957)、巴顶顿 (Buddington) (1957), 哈奇森 (Hutchinson) (1970) 和斯蒂芬森 (Stephannson) (1975) 又对此作了发挥。斯蒂芬森还引用了另一种分类 (见他的文章193页表1)。即浅构造、中构造和深构造岩体。这种为人们熟知的浅带、中带和深带的分组必然反映侵入体与围岩之间在韧性方面的差别, 后者又是三个重要变数的反映, 即岩性差别、侵位在地壳中的相对位置以及侵入作用与区域变质作用之间的时间联系。

这样一些联系的含意之一是: 花岗岩可能是进化变质的一种自然的最终阶段产物。然而, 只要根据花岗岩的大量侵入作用往往与变质作用的最高点相隔很长时间这一点来看, 就足以看出这种关系未必是一种直接关系, 晚志留世加里东花岗岩就是最好的例子。正是地壳的增厚提供了一个共同因素, 它以不同的方式达到, 即俯冲情况下的板块下插作用和碰撞情况下的地壳缩短作用。

再者, 当前有一种奇怪现象, 尽管实验工作已经明确地证实花岗岩类能够通过大陆岩石的部分熔融作用产生 (Winkler, 1976; Wyllie, 1977) 但人们却仍然有增无已地认为, 当地壳深部发生超变质作用时, 无论是温度或水的浓度均不足以使重熔作用发生 (例如, Brown和Hennessy, 1978), 至少是当缺乏来自地幔岩浆作用的参与时不能发生重熔作用 (参见Brown, 本文集)。然而在这方面, 正象其他许多方面一样, 在碰撞型活动带和俯冲型活动带产生的花岗岩之间存在着很大差别 (参见Beckinsale, 本文集)。在俯冲型活动带中, 脱水的俯冲地壳如果没有来自外部的热量和挥发成分未必能发生重熔, 但在碰撞型活动带中, 可以肯定水足以通过云母的脱水而获得, 特别当增厚的变质沉积岩楔状体发生进化变质时更是如此。

然而, 讨论花岗岩岩浆的起源不属于这篇开场白的目的, 而是如前所述, 表明一种见解, 我们需要朝着花岗岩的环境分类的方向努力, 甚至为此采用一种新的命名。例如能够鉴别出两种呈明显对比的主要花岗岩系列, 它们看来似乎是表示两种不同类型造山带的特征, 虽然中间类型的存在是明显的 (参见Coleman, 本文集), 两个花岗岩系列均属钙碱性, 但其中之一, 成分范围较宽, 另一个则较窄, 根据辉长岩-闪长岩/英云闪长岩-花岗闪长岩/花岗岩的比例明显地表示出二者的差别, 即, 前者的比例近于15:50:35, 后者则近于2:18:80 (Pitcher, 1979)。

再者, 这不属于什么新发现 (参见Eskola, 1932), 但近年来已经见到在各种地球化学参数上反映出明显的差别, 特别是查佩尔和怀特 (1974; 并参见Hine等, 1978) 所测定的那些参数, 并且这些也涉及到根据上述参数对花岗岩类的专门识别, 即, 一种来自

地壳的S型花岗岩类,一般成分范围较窄,一种来自地幔的I型花岗岩类,成分范围往往较宽。伴随这套参数的其他参数包括:白云母是否存在, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比,S型的初始比相对较高,以0.7060作为临界值(见Kistler, 1974; Armstrong等, 1977),以及是否存在地壳锆石的继承性捕虏晶(Silver和Deutsch, 1963; 并参见Pidgeon和Aftalion, 1978)。这样一些差别还可能反映在:是否存在标准的刚玉,或 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 比值(Taylor, 1977; O'Neil等, 1977),或磁铁矿与钛铁矿的相对数量(Ishihara, 1977)、或榍石-褐帘石对和钛铁矿-独居石对(Ivanova和Butuzova, 1968),后两点专门反映I型和S型的不同氧逸度。

花岗岩质岩浆的成分应该反映源区的差别,这是不足为奇的。来自基性火成岩的在下列方面区别于来自变质沉积岩的S型花岗岩类:有大量同源基性火成岩,成分变化比较有规律,含有‘火成’成因的耐熔残留物,熔体与残留体(restite)之间具有不同的化学关系,以及K、Rb和Sr的比值不同,氧化状态的不同,后者反映源区岩石是否经历过一次风化旋迴(White和Chappell, 1977)。然而,存在这种可能性,即花岗岩的起源决非如此单一以致否认混合类型的存在,而后者导致了具有一系列I型和S型特征的岩浆产生(参见Stephens和Halliday, 本文集)。

怀特、查佩尔和他们的同事(1974, 1978; Hine等, 1978)对澳大利亚东部拉克兰(Lacklan)带的研究工作可作为对岩浆起源进行全面研究的一个实例。他们认为存在一类时代较早并变质了的均匀侵入体,大部分由S型花岗岩组成,而且这些花岗岩可能来自变质沉积物的重熔作用;而还有一类是时代较晚并同样变质了的非均匀侵入体(即具有叠加的热变质晕),主要为深部火成岩重熔形成的I型花岗岩(详细讨论见White和Chappell, 1977)。不同类型分布于相互隔开并邻接的带内,介于其间的S-I界限看来反映地壳组成上存在的变化(Chappell, 1978, p.282)。特别有意义的发现是,锡矿化与S型有关,而斑岩型铜矿化则与I型侵入体有关。

然而,我们不应过于天真,企图通过识别这些类型而提供确定源岩的特有标志,这是因为,例如,具有I型特征的花岗岩可以来自地幔或俯冲的大洋玄武岩,同样,还可来自壳下增生的暂时性阶段的复杂重熔体,还可来自从这些不同源区形成的火山岩所组成的地壳。诚然,我认为,用花岗质岩浆的多旋迴成因以模拟发生的复杂的地球化学模式是必要的。

研究花岗岩类的区域性起源,有两点显得特别明显。一点是希洛(Shilo)和米洛夫(Milov)(1977, P.122在考察苏联东北部花岗岩的侵位时提出的。在该区,侵入体出露时所处深度在不同的带内是相同的,看来很清楚,这些带内花岗质岩浆作用的岩石特征主要决定于熔体产生的位置,特别要看它是产生于地壳抑地幔内(参见Gastil, 1975)。其次一点是基斯特勒(Kistler)(1974, p.413)研究内华达山脉的花岗岩类时提出的,他认为穿越岩基见到的区域性成分变化与花岗岩类的时代无关。此外,源区岩石的性质(包括深度)决定了花岗岩的类型,这是目前强烈主张的观点,例如对俄勒冈、华盛顿和爱达荷花岗岩的S型地球化学特征就是这样解释的(Armstrong等, 1977)。

关于氧化钾-深度(K-h)关系(Dickinson, 1975),特别是目前所阐述的包括其他地球化学参数,引用时要谨慎。如果在俯冲的板块边缘上穿越岩基的各带时,k-h呈稳定增加是一条规律的话,则当岩浆从地幔和地壳这样显著不同的源区岩石产生时,以上规律将特别显著,不过,如果源区是早期旋迴增生的壳下物质,则这种规律也许就不那么

明显。

扩大一下议题的范围,我们发现岩浆作用、构造作用和地壳中位置三者间的相互关系已为许多学者讨论过,特别是关系到上面提到的十分重要的变质组合(Read, 1951; Miyashiro, 1961, 1967; Zwart, 1967, 1969)。因此,表1着重列出不同类型造山带内花岗岩类的不同作用,在此表内将兹华特(1967)所作“海西型”与“阿尔卑斯”型造山作用的性质对比扩充到包括与“安第斯型”造山作用的比较。毫无疑问,如果每种类型活动带都在某种程度上是性质单一的话,则这种列表就太简单了。然而看来,在大洋一大陆板块边缘造山带中,那些包括以洋壳为底并经受高压低温变质作用的外部的火山成因的海槽在内的造山带,很少形成花岗岩浆;而那些包括覆于陆壳之上并经受了非变形的埋藏变质作用的内部火山成因海槽在内的造山带,则形成庞大的多旋迴岩基,它们由成分范围宽而且往往经过长期集聚的I型花岗岩系列组合而成(见Pitcher, 1978)。板块内部造山带被广泛认为是由于大陆板块碰撞形成并承受低压-低温至高温变质作用,这些造山带也形成体积较小,集聚时间较短的岩基,岩基成分以S型为主(不是仅仅如此),具有有限的总体成分变异。这种明显对比可能是地壳变形的不同机制造成的,因为这些机制决定了变形作用的持续时间,还决定了来自地幔的基性岩的参加程度,甚至下部地壳的性质。在海西型造山带中,下部地壳可能属于硅铝质,而且可能是由构造上的增厚造成,而在安第斯型造山带内,很可能是由于板块下插作用、从洋壳和地幔熔化而出的火成物质造成的。

表 1 造山作用的性质对比 (以构造为基础,而不是以时间-地层为基础,
部分根据Zwart, 1967)

阿尔卑斯型造山作用:	在海沟中堆积来自岛弧的火山碎屑沉积物和熔岩;地壳缩短,发育逆冲断层伴有显著推复体;高压区域变质作用,具宽阔的进化变质带;大量超基性岩。无花岗岩岩基
安第斯型造山作用:	岛弧火山碎屑沉积物和熔岩堆积在位于大陆前缘(Continental lip)的优地槽中与大陆架相的碎屑岩带成对产出;地壳少许缩短,但以垂直运动为主,具开阔的帘形(drape)褶皱,缺乏劈理;具有区域埋藏变质作用。非均匀花岗岩基,成分范围较宽,伴有相当数量的基性深成岩以及安山质火岩。含有地壳组分的I型花岗岩仅见于演化晚期; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \leq 0.706$;含有来自壳下源区的耐熔物。
海西型造山作用:	非火山的陆源沉积物堆积在冒地槽型克拉通内盆地;地壳缩短,伴有直立的褶皱和劈理;低压变质作用,具有进化变质带;超基性岩少见。出现均匀的花岗岩基,成分范围较局限,仅伴有少量基性岩,一般缺少同期的火山岩。S型或S和I混合型花岗岩; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.706$;存在来自重复循环的地壳岩石的继承性捕虏晶

只有在安第斯型造山带内,才看到侵入作用与火山作用之间存在明显的时空关系。甚至在这种造山带内,这种关系到底直接到何种程度仍属未定,是侵入体本身通过次火山相中心杂岩(在岩基环境中无疑是存在的)开孔到达地表抛出大量火山物质呢(参考Bussell等, 1976; Atherton等, 本文集),抑或侵入作用与火山作用的联系单纯是表现在深部具同源性,但各有自己的供应途径,而火山岩浆通过裂隙开孔到达地表?我主张双重机

制，酸性熔结凝灰岩是从以侵入体为底板的破火山口开孔而出，安山岩流则自裂隙涌出。

安第斯型和海西型带内的岩基之间的差别不仅表现在火山组合、成分和成因方面，而且也许还包括侵位方式上的差别。地壳性质可以决定岩浆是以充填陷落火山口为主抑或以底辟型岩基为主 (Pitcher, 1978, 1979) ——是大部分处于超覆在俯冲带上的刚性大陆边缘的张性状态，如安第斯山中部见到的那样呢，还是处在陆内的造山带中那种压缩的韧性状态，如同在欧洲西南部海西造山带所见到的那样。

充填陷落火口的岩浆，特别是破坏性板块边缘的较干岩浆需要开辟通道并较迅速地沿较大断裂侵入，在较冷的上部地壳内产生一个窄的热缕 (heat plume)。这种高温岩浆，至少部分来自地幔，可能具有相当低的粘度，当岩浆被隔离在岩浆房内时，可以发生原地分异而提供种种火山衍生物。

上升至较热的韧性地壳内较宽的热缕内的岩浆，可能形成球状体，后者能够在韧性封套内呈底辟式扩张。单个底辟体的生命史长于充填陷落火口的岩体，并且来自地壳本身的岩浆，呈更甚的糊状和粘性，因而喷出作用被有效地阻止了。

不论是哪种情形，我都未想像侵入体在地壳内呈长距离上升，说得更确切一些，陷落火口是靠岩柱的注入充填形成，而底辟是靠扩张的球状体挤入形成，但没有哪一种机制是唯一的。

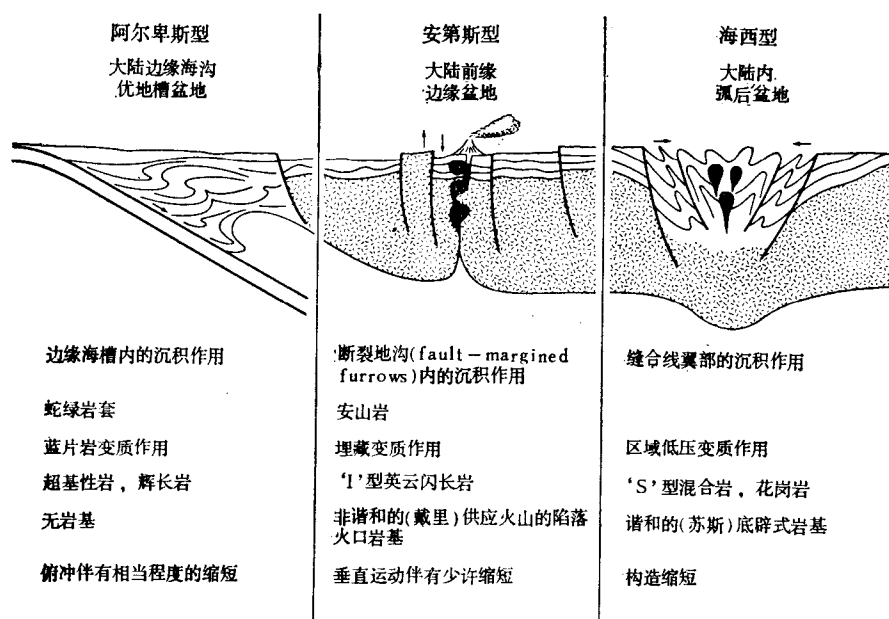


图 1 三个造山环境的简图
表示花岗质岩石的不同环境

最后，我们注意到侵入方式、造山带位置和岩浆起源三者在某程度上是相互关联的，因而我们能够建立一个一般模式 (图1)。这种模式的情景在自然界能以不同方式配置——呈同时代的毗邻带状，或呈按顺序的叠加带状，例如在智利中部 (Aguirre和Levi, 1977)，阿尔卑斯型和海西型造山带呈一对组合增生于板块边缘，成为一个火山弧的新的地壳基底。而很可能，前一种同时代的带状组合可能就是模拟中生代时下加利福尼亚的

情形。

总之，在阿尔卑斯型边缘‘海沟’环境中，低的热流不能导致在任何位置上的熔化。相反，在安第斯型大陆边缘之下，俯冲作用动力却提供了足够的热量和水以引起不同的壳下带和底部地壳层的重熔。以这种方式连续不断地在大陆边缘下面增生的物质，当俯冲特别迅速时，热的基性岩浆促使这些物质阶段性地重新活化，熔体沿着地壳深断裂上升进入地壳。新的 I 型岩浆以充填陷落火口的形式被上层的刚性地壳所容纳，往往不断增长而形成巨大的复式岩基。在更靠大陆的内侧，在海西型褶皱带内，也许由于弧后环境的闭合性碰撞使地壳缩短，引起构造上的增厚，其时，特别是由于隆起而引起的结果时，岩浆就在区域性受热的根部产生。正是在这种地区最可能发生来自地壳的 S 型岩浆，其温度低于俯冲情况下形成的岩浆，而且是呈底辟式侵入于韧性地壳内。

我已经讨论了两种可能的花岗岩组合，表明必须按照环境模式进行地球化学研究。地球化学结合环境研究有希望形成更加符合实际的假说，而最终可能表明每一环境在某种程度上是独特的，最后证实了里德关于存在多种多样花岗岩的名言。

加洛韦侵入岩体的组分变异

W.E.斯蒂芬斯和A.N.哈利戴

前 言

苏格兰南部加洛韦(Galloway)侵入岩体(图1)属于加里东造山带的新花岗岩(Read, 1961)。这些侵入岩体的特殊意义有两点:即在组分上从基性闪长岩到白云母花岗岩有明显的多样性,以及侵入岩体展现出显著的岩性带状分布。我们这一研究的目的是了解在侵入岩体中和侵入岩体间引起岩性变化的原因,并从而确定岩浆的成因以及造成岩浆后期发生变化的那些作用过程。加洛韦地区地处重要的地质位置,因为在侵入岩体现苏格兰加里东造山带的整个板块构造模式中有一个或多个消减带存在于现有各侵入体产地附近。(见Holland等评论,待刊)

在科迪勒拉岩基中带状侵入岩体是很常见的,且带状的几何形态和组分趋势都显示多样性。加洛韦侵入岩体呈正常同心带状,亦即从较基性的外缘向较酸性的核心的变化趋势。有些岩体里变化是连续的,有些岩体里组分上变化不连续,或者野外接触关系表明它是一个包含了多次岩浆脉动的侵入体。这些脉动本身也显示出正常的组分变化。关于正常带状的成因,文西(VenCe)(1961)认为主要是由于结晶作用从边缘向内进行而圈闭了挥发组分,这些挥发组分能将碱质和硅酸搬运到深成体内部。本文的目的是检验这种说法以及检验其他有关深成体内和深成体间组分变异的假说。我们认为加洛韦侵入岩体的演化是复杂的,它包括岩浆源区的迁移,岩浆混合和分离结晶等复杂作用的结果。

岩石类型的变化

本文仅涉及加洛韦地区三个最大的侵入岩体。它们是洛奇 栋恩(Loch Doon),弗利特的凯恩斯莫尔(Cairnsmore of Fillet)和克赖菲尔—达尔比泰厄(Crifell-Dalbeattie)侵入体(后文简称Doon, Fillet, Crifell, 图1)。它们的规模接近相同(长 20 ± 2 km,但组分变化幅度不同。加德纳和雷诺兹(Gardiner和Reynolds)(1932),菲利普斯(Phillips)(1956)以及帕斯洛(Parslow)(1968),已经提供了详细的岩石学和野外相互关系的资料;下面的提要还包括某些新的资料。

栋恩岩体显示的顺序是:闪长岩经花岗闪长岩至黑云母花岗岩。克赖菲尔岩体是从花岗闪长岩演变为黑云母花岗岩,只在中心有少量黑云母—白云母花岗岩。弗利特岩体是黑云母花岗岩过渡到黑云母—白云母花岗岩。栋恩岩体的闪长岩面积十分小(12km^2),被认为呈岩席产出于主要侵入岩体的顶部。它含斜方辉石,经常有单斜辉石,有时被角闪石

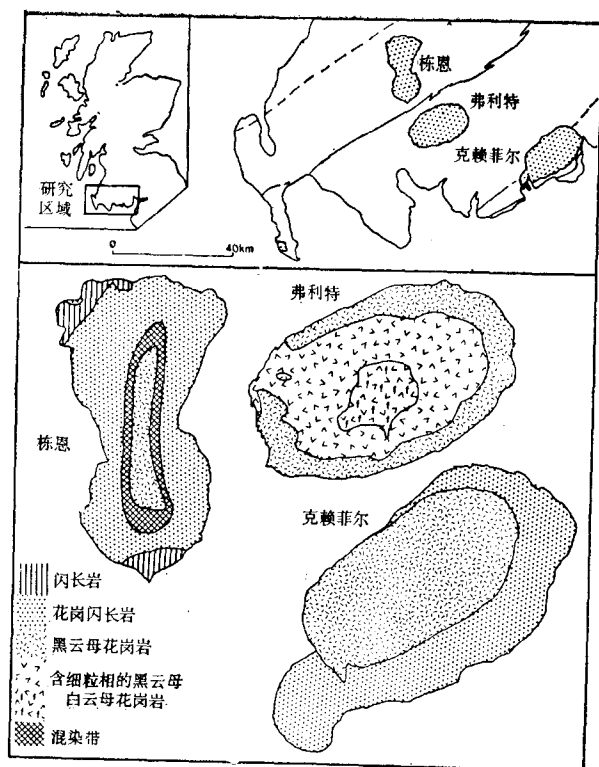


图 1 加洛韦三个主侵入岩体的产地和岩性图
注意这三个岩性图不是严格按同一比例绘制的(东恩地区岩性图是按Gardiner和Reynolds, 1932; 克赖菲尔—达尔比泰厄杂岩体岩性图是按Phillips, 1956; 这两副图经伦敦地质协会的同意复制的。弗利特岩性图是按 Parslow, 1968; 经苏格兰科学出版社同意复制的)

交代。橄榄石偶而可见。它们的粒径是多变的, 有些变种显冷凝结构。无论在岩性上或地球化学特征上, 整个“闪长岩”变化都十分大, 包括富辉石闪长岩、石英闪长岩和石英二长闪长岩。

花岗闪长岩在东恩侵入体中占优势, 约为克赖菲尔侵入岩体的一半(图1)。在东恩这个地方, 花岗闪长岩切穿闪长岩, 并向中心随着角闪石和斜长石的减少, 石英和碱性长石的增加, 而呈连续的正常带状过渡到花岗岩。在克赖菲尔, 在露头的较外部位呈明显的叶理化, 并含有丰富聚合斑状角闪石的捕虏体或斑片。碎裂构造是常见的。

黑云母花岗岩在东恩和克赖菲尔两处都组成核部。但在东恩, 它和花岗闪长岩交界处呈过渡关系, 加德纳和雷诺兹(1932)曾绘出一内部混染带。在克赖菲尔, 中心花岗岩占岩体的比例很大(图1), 根据碱性长石巨晶的出现, 可以在图上画出和花岗闪长岩的界限(Phillips, 1956) 因为什

么地方都看不到野外接触关系。在侵入岩体西北部, 中心花岗岩呈不对称定位并与围岩直接接触。仅仅在克赖菲尔侵入体的最中心部分同时出现白云母和黑云母。

弗利特侵入体升面为粗粒黑云母花岗岩, 它逐渐过渡到粗粒黑云母—白云母花岗岩(图1)。杂岩体中心部分是由细粒黑云母—白云母花岗岩组成, 具有突出的白云母巨晶。在这一中心部分与粗粒变种之间有一条可用图标示的边界(图1)。

因此, 花岗岩类岩石的成分变化幅度是按东恩—克赖菲尔—弗利特岩体这样顺序而变狭窄, 而花岗岩质类型的演化则按此顺序而愈益充分。下面将会看出这种演化顺序是与侵入体绝对年龄以及同位素组分是一致的。

主要氧化物和标准矿物趋势

绍汤和塔特尔分异指数

花岗岩的分异指数是标准矿物石英、正长石和钠长石之和, 是总体组分的一个很好的概括指标。所有这三个深成岩体其分异指数都展示很好的同心状趋势, 但这里详细考虑的仅仅是克赖菲尔侵入体的变异。图2a是根据180个数据点用计算机算法直接打印出的等值线图

(是一种简单的距离倒数加权的内插法)。粗看起来,带状图形是连续的,但详查之,从等值线的间距可看出其梯度是十分不同的。这可用一次空间导数的近似值来加以分析,也就是,正象斯蒂芬斯和哈利戴(准备发表)描述过的一幅全部侵入岩体分异指数的变化速率的等值线图(图2b)在一次空间导数图上,脊是代表特别陡峭的梯度,并且在侵入岩体之内可以跟着发生一条连续的脊,该脊的轨迹十分接近在野外所看到的花岗闪长岩和花岗岩之间的边界(图1)。一次导数脊证明了这两部分之间的边界是不连续的,而且说明岩体是一复式岩体。然而,梯度的宽窄有明显变化这一事实表明:在岩浆脉冲之间本身就存在成分上的差异。这一现象的最简单的解释是:跨越岩浆脉冲之间的边界曾发生某种相互作用。并且我们认为相互作用的量与一次空间导数的值成反比。这一结论被下面将要讨论的初始铈的同位素变化所证实。

如此,克赖菲尔深成岩看来是由早期花岗闪长岩(低分异指数)脉冲和晚期花岗岩(高分异指数)脉冲构成的,并且两者之间在原地曾发生强烈的反应。因而中心部分花岗岩就经受某种的分离结晶作用,如表现在分异指数的增高上(图2a)。栋恩侵入岩体在花岗岩闪长岩-花岗岩部分呈现更加连续的变化。在弗利特,变化的幅度非常地小,然而分异指数的绝对值比栋恩和克赖菲尔侵入岩体都高(栋恩为54—58;克赖菲尔为66—90;弗利特为86—94)。在弗利特,最低的分异指数值趋向在外缘出现。

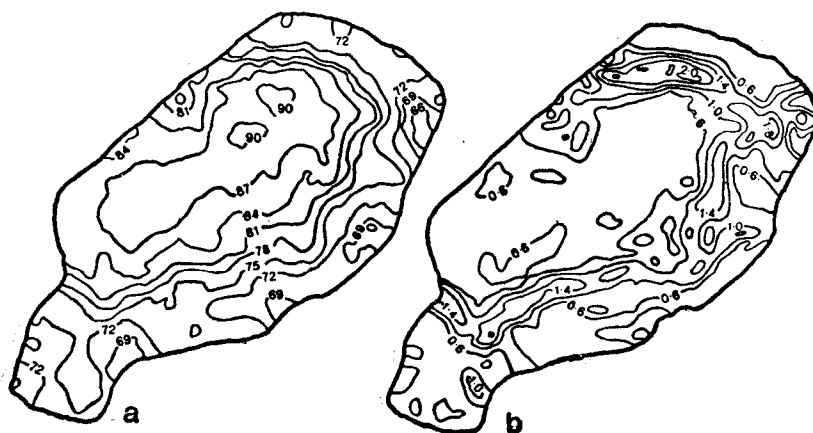


图 2

(a) 克赖菲尔侵入岩体的绍汤和塔特尔分异指数的等值线图;(b) (a) 的一次导数近似值图,不包括小0.6的值

标准矿物刚玉—透辉石对 SiO_2 的趋势

来源于广阔构造环境范围的许多钙碱性侵入岩体、岩基以及侵入体都显示出随全岩 SiO_2 增高,出现透辉石减小而刚玉增加的趋势(Cawthorn等, 1976)。加洛韦侵入岩体的样品也显示这一趋势。从栋恩闪长岩到弗利特富白云母花岗岩,这些数值显示连续变化(图3)。考索恩等(Cawthorn等)(1976)探讨过这一十分重要趋势的可能成因,并推断这是由于角闪石分异的主导作用引起的。借助于铈同位素数据,我们认为只有角闪石分异不能产生加洛韦侵入岩体成分的多样性,并认为岩浆混合作用可能是占主导的。

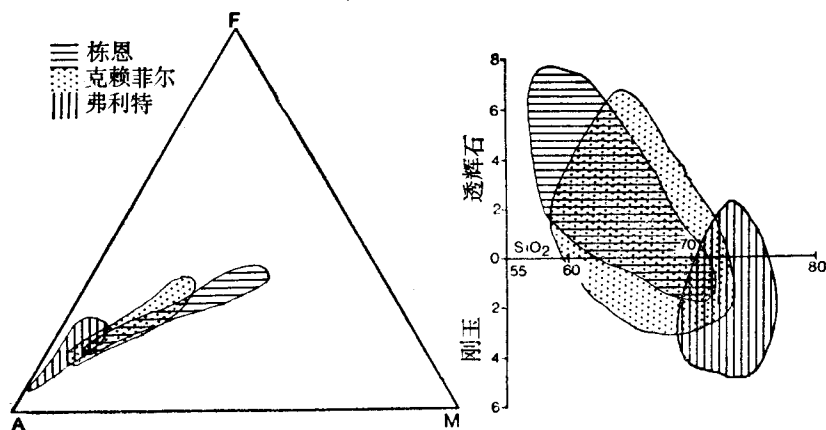


图 3 三个加洛韦侵入岩体组合数据AFM图解以及标准矿物刚玉或透辉石对 SiO_2 图解

AFM 趋势

加洛韦侵入岩体数据在AFM图解中显示出和许多其他钙碱性侵入岩区一样的趋势(图3)。

铷 同 位 素

对三个深成岩体及它们的主岩——变沉积岩已作过同位素研究。皮金和阿弗泰利昂(Pidgeon和Aftalion) (1978), 布拉克斯兰等(Blaxland等) (1979), 哈利戴等(Halliday等)(1979)报道了锆石的U—Pb草测以及普通铅的研究。

对这些侵入岩体测得Rb—Sr矿物—全岩年龄如下: 栋恩, $408 \pm 2\text{Ma}$; 克赖菲尔, $597 \pm 2\text{Ma}$; 弗利特, $392 \pm 2\text{Ma}$ 。以这三个深成岩体样品的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) t 值(这里 t 代表上面给定的年龄值)和现代 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值作成图4。图4并标出南部高原下部古生代沉积岩13个样品的上述数值。这13个样品包括了下部古生代沉积岩成分类型的主要部分。用垂直线符号连接沉积岩样品计算的408Ma和392Ma年龄值。在图解中用星号表示其加权平均值397Ma。在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) t 对 $1/\text{Sr}$ 的投影图中(未绘出), 数据点也呈现类似的排列, 例外的是沉积岩的点更加分散。显然, 在初始Sr同位素组成上也按栋恩—克赖菲尔—弗利特这样顺序, 亦即先后侵位顺序, 其放射成因铷趋向增加。从图4和图5显然可见, 初始比总的说来随Rb/Sr增加而增加。因此, 在每个侵入岩体内, Rb/Sr比向着岩体内部增大, 除少数例外外, 其初始比也增高(图6)。

在现在侵蚀水准面上, 和每一侵入岩体直接接触的古老沉积岩含有相对高的放射成因铷。因此, 显而易见: 围岩反应的影响是轻微的, 并且不会是岩体边缘初始比较低的原因。在克赖菲尔中部花岗岩和变沉积岩相接触200米范围内, 从克拉伊格奈尔(Craignair)采石场(图6)收集到一套捕虏体, 它们和局部岩浆几乎完全处于同位素平衡状态(图5)。因为它们代表了本区所发现的捕虏体类型的变化范围, 很清楚, 在深成岩体中心部位捕虏

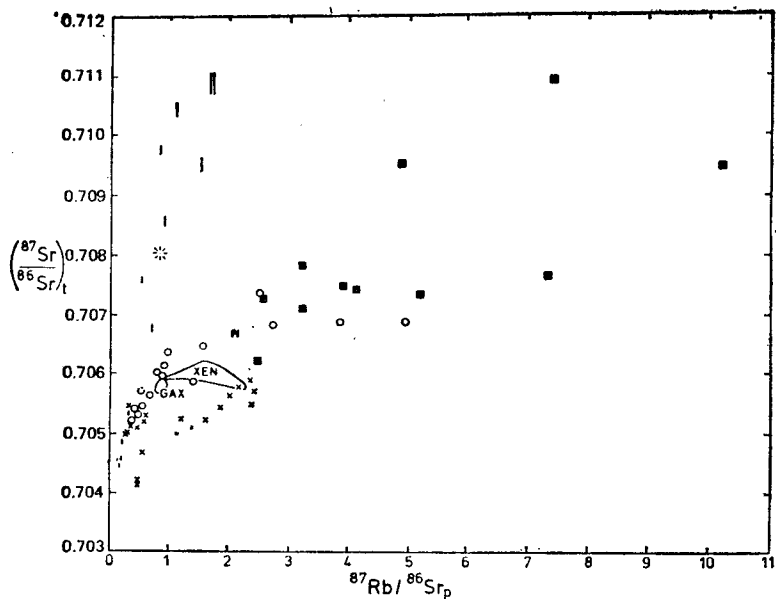


图 4 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 对现代 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图解

其符号和年龄值是：十字代表栋恩，408Ma；圆圈代表克赖菲尔，397Ma；实方形代表弗利特，392Ma；垂直线代表沉积岩（参见正文）

体较大的同化程度并非同位素带状分布的原因。克赖菲尔岩体蚀变最强的样品，8478号，具有十分低的初始比（图5）克赖菲尔侵入体中心部位的交代岩（219号样品）也背离数据点的主要趋势（图5）。这些结果表明，亚固相线改变的影响会使同位素数据分散。

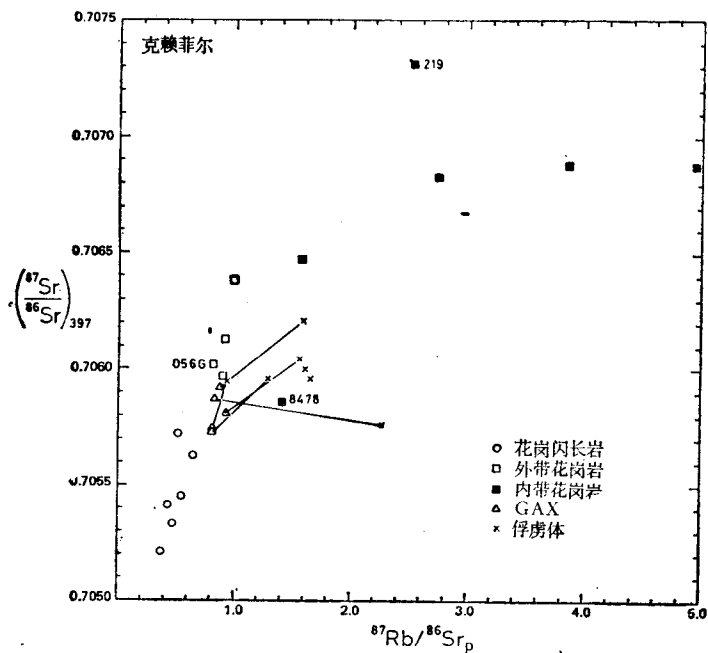


图 5 克赖菲尔侵入体样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比对现代 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比的图解

因此,在图5中,除这二点外,其他各点表现出的有规律的趋势不能认为是由亚固相线的变更引起的(无论怎说在南部高地花岗岩中这种变更是较小的)。

克赖菲尔的花岗闪长岩和外带花岗岩中,初始比与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_p$ 比值接近于线性相关(图5),与距今 $512 \pm 13\text{Ma}$ 近似年龄一致。但这种相关性不能归诸于在一个单一源区里由于时间这个独立变量变化而引起的。因为岩浆是按照从边缘往内,岩浆由基性变为酸性的顺序侵位的。可以预料,如果一个共同源区发生熔融,那么将获得与前面所述的侵入先后相反的顺序。这种情况也适用于其他侵入体。

简单地借分离结晶作用解释同位素的变异,其模式有二:

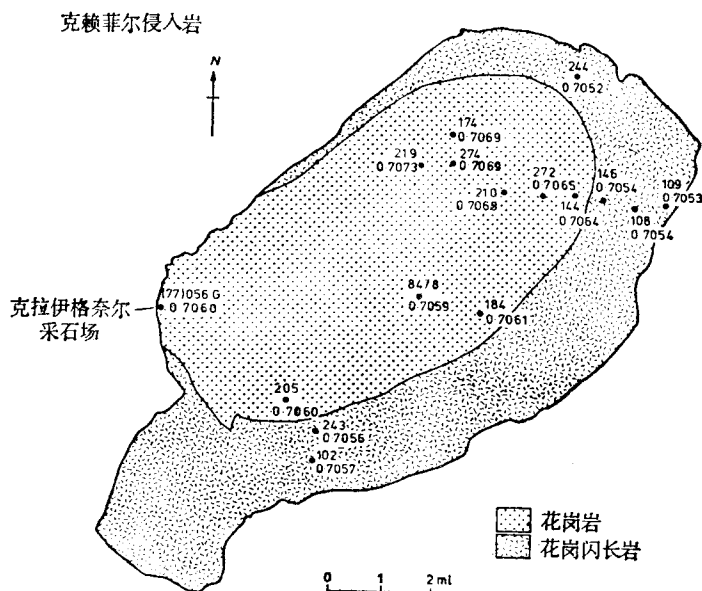


图6 在克赖菲尔侵入体内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比分布图

1. 固体相和熔体相在同位素方面处在不平衡状态,固体相就地分离,而熔体相优先受到放射性铈的混染。

2. 在足够时间下(数千万年)分离结晶作用,随着堆积相逐渐聚积,残余相 Rb/Sr 比提高,在熔体内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比会有显著的增大。

模式1是难以采用的,主要是由于这一模式要求有大量的混染。模式2也有问题,因为在这里所考虑的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化要求在长时间有很高的 Rb/Sr 比,而这种高比值是不现实的。例如,克赖菲尔岩浆必须最初结晶出的相, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7052$ (克赖菲尔岩体的最低值),而最后结晶出的相, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \cong 0.7069$ (克赖菲尔岩浆岩最大值)。假使这一对岩相在侵位之前的时间跨度是 20Ma ,那么在克赖菲尔对于最高数值的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 397样品就必须使它们的Sr同位素组成演化在具有 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (现代相当值) > 5.94 铈同位素环境里。但这个值要比在克赖菲尔岩体中测得的最高值还要高。所以直到固结的最后阶段,熔体也不可能具备这样高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值。

这样,同位素变异就反映了来自不同源区岩浆的混合作用。一方面这种岩浆可能是变沉积岩的部分熔融,另一方面这种岩浆可能是来自具低 Rb/Sr 和低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比的更原始

的铁镁质源区。岩浆的每一次脉冲(克赖菲尔的花岗闪长岩和花岗岩)其本身就是一种不同程度的混染岩,而且脉冲的岩浆变得逐渐富含变沉积岩的成分。这两种情况在整个侵入旋迴作用中以及在每个侵入岩体侵位的时间跨度里都会出现。岩浆的混合发生在原地也是明显的。例如,克赖菲尔岩体在花岗闪长岩内,初始比是自北东向南西增加,然后在花岗岩内它们从北东向南西减少,这就导致在北东部分初始比的跳动比南西部分更加剧烈(图6)。

化学变异也呈现类似的结果。一种可能的机制是,跨过侵入体边界的混合作用在南西要比北东部分更加彻底。花岗闪长岩质岩浆的侵入可能有助于地壳较高位置上熔体的活化。这种熔体又侵入了在深处花岗闪长岩质岩浆,并上升进入它的热的、塑态的核里。在每一侵入岩体中也存在着在化学上有别,但同位素上是大体一致的部分,这是由于可能在原地的分离结晶造成的。

结 论

虽然作过详细研究的岩体只有克赖菲尔岩体,但根据这三个侵入体的全部资料能够使我们得到有关加洛韦侵入岩体如下结论:

1. 我们认为闪长岩和花岗闪长岩的起源区最初是在下部地壳玄武质部分和(或)上地幔。但克赖菲尔和栋恩中心部分的花岗岩以及全部弗利特花岗岩岩浆变沉积岩熔融组分所占比列较高。这种变沉积岩源区可能是下部地壳,但数据上也不排除下部古生代沉积物的可能。

2. 花岗闪长岩和花岗岩岩浆的某种程度的混合,形成克赖菲尔和栋恩的混染边缘带,并使其在变异图解上呈现连续趋势。

3. 分离结晶作用可能部分地把栋恩的花岗闪长岩与主体闪长岩联系起来。栋恩的花岗闪长岩和花岗岩,克赖菲尔的花岗岩以及弗利特的花岗岩,它们的连续带状可以认为是由于分离结晶作用形成的。

4. 围岩就地被同化而使岩浆发生的混染作用在大规模改造深成岩体内部的岩浆组分方面不起重要作用。

5. 加洛韦侵入岩体的同心带状性是由于熔融源区的迁移、岩浆混合以及分离结晶作用等复杂因素造成的。

6. 空间上的带状性以及时间上沉积岩派生的熔体日益增多表明,存在一个上升着的熔融带,它随时间而把地壳中在较高位置上形成的熔体加入到这个带里。