

# 原地重熔与元素地球化学场

## ——论花岗岩的成因与成矿及 大陆内生过程的物质旋回

陈国能 曹建劲 张 珂 著

高等学校博士学科点专项科研基金资助

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书展示了一个与传统地质学理论截然不同的逻辑框架,从新的角度论述了组成大陆地壳重要部分的花岗岩 以及与花岗岩形成相伴随的各种地质、地球化学现象的成因。研究结果表明 花岗岩的形成主要是壳内物理场变化而引起壳内物质性状变化,以及在这一过程中壳内物质重新分配和重新组合的结果;花岗岩是成层的,与花岗岩的形成有关的热变质作用和成矿作用区间也是成层的。这一框架使得过去看来似乎互不相关的各种地质、地球化学资料变得甚为和谐与有序。

在对花岗岩的形成和演化过程,以及与其相伴随的热变质作用和成矿作用研究的基础上,作者进一步提出了“元素地球化学场”的概念,揭示了化学元素在内生过程中的聚散趋势和空间分布与元素周期律的关系,体现了自然界中微观和宏观的协调与统一。

本书介绍的是一个思维体系,作者追求理论的逻辑自洽。从这一角度,本书适合于任何具备一定的基础地质学知识,且对地球科学探索具有兴趣的人士阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

原地重熔与元素地球化学场:论花岗岩的成因与成矿及大陆内生过程的物质旋回/陈国能等著.-北京:地质出版社,1996.11

ISBN 7-116-02310-0

I. 原… I. 陈… Ⅰ. 花岗岩-岩石成因-研究 N. P58 8.12

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第23193号

## 地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑 蔡卫东

\*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:6.5 图版:1页 字数:148 500

1996年11月北京第一版·1996年11月北京第一次印刷

印数:1—600册 定价:10.00元

ISBN 7-116-02310-0  
P·1733

# 序

科学研究贵于发现重大、关键问题，掌握其全貌，进而唯物辩证地加以解决，由此推动学科的发展，增进入类对自然界的认识水平；本书也恰好体现了上述思路。

本书的作者从最基本的野外地质问题开始，在茫茫的资料海洋中，理出了一个与传统理论截然不同的逻辑体系。该体系的核心就是关于花岗岩浆形成的原地重熔说。该假说的主要论点是：花岗岩浆是由上陆壳的岩石原地重熔而成。花岗岩是成层的，花岗岩层和地层一样，都呈顶底新老的层序。岩基只是花岗岩层上界面的凸起部分。与原地重熔有关的成矿作用和变质作用产物，在空间上也是成层的。岩体的化学组成和同位素组成的变化，反映的是岩浆过程的物质演化，而不是岩浆的来源。成矿物质与成岩物质一样出自原地，而花岗岩矿床和热液矿床的形成，起因于重熔-结晶过程的物质调整等等。

作者还把地质过程的物质演化与元素自身结构变化规律有机地结合起来，提出了“元素地球化学场”的新概念。元素地球化学场不但展示了陆壳物质形成和演化的可能途径，而且揭示了元素在地球中的空间分布规律与元素自身结构之间的关系。这对于探讨地球形成和天体演化等问题，可能是极有意义的。更令人惊讶的是，岩体上方的成矿元素分带规律，竟与元素在周期表上的位置相吻合。显而易见，这一发现除了理论上的重大意义之外，如果能够被进一步证实，其经济价值将是难以估量的。

总之 本书思路新颖 立论有据 异军突起 成一家之言 让人信服。愿它尽早付梓 以飨读者 是为序。



1996 年 8 月 15 日

# 序

学百家长，根据实践所得资料，自主创新，是科研取得较大进展的有实际意义的途径之一。花岗岩是组成大陆地壳的重要岩石，但花岗岩的成因却是地质学长期争论的重大理论问题。本书的作者从与传统理论不同的角度，提出了一个新的理论框架，即关于花岗岩成因的“原地重熔说”。这一假说的基本观点是：

——花岗岩的形成主要是壳内物理场变化而引起壳内物质性状变化，以及在这一变化过程中化学元素重新分配和重新组合的结果；花岗岩的化学成分、稀土元素组成和同位素组成等，反映的是岩浆过程的物质演化而不是岩浆的来源。

——重熔花岗岩是成层的，岩基是花岗岩层上界面的凸起部分，岩体的形态与大小反映的只是重熔界面与剥蚀面的几何关系。

——多次重熔形成多层花岗岩，花岗岩层的层序是上老下新，复式岩体是不同期次的花岗岩层在同一空间的显露。

——与重熔花岗岩层形成有关的热变质作用的产物是成层的，热变质层底部的部分熔融可以产生混合花岗岩和混合岩。

——与重熔花岗岩形成有关的成矿作用产物也是成层的。成矿层自下而上有从高温到低温的分带。高温带的成矿物质与花岗岩的成岩物质一样，来自原地的岩石地层，等等。

原地重熔说使与上述问题有关的各种野外地质现象和地球化学、同位素地质学、成矿学等方面的资料显得甚有规律，构成了一个逻辑性较强的理论体系。

有关花岗岩成因的各种重要假说都是起源于西方。然而，“一个民族要站在科学的高峰，就一刻也不能没有它自己的理论思维（恩格斯，《反杜林论》旧序）”。原地重熔说也许就如它的作者所说“目前仍然是很粗糙的”，但它确实是中国的地质学家在思维上的新路之一。

“元素地球化学场”可以说是在原地重熔说基础上的一个较大的科学发现，它提示了元素自身结构与其在自然界空间分布的关系。元素地球化学场所揭示的规律，不但对研究陆壳的形成和演化颇有意义，对于地球和天体演化等方面研究，可能也是有参考价值的。元素地球化学场还阐明了岩体顶部和上部的成矿分带规律与元素周期律的关系，这对于矿床的普查与勘探以及老矿山寿命的延长等无疑有重要的指导作用和实用价值。当本书付梓之际，谨写数言以为之序。

陈国达

1996年10月23日

## 前 言

板块理论是一个描述洋壳演化过程的和谐框架，但事实证明，它不适用于大陆过程(R. A. Phienney 等, 1993 肖庆辉等, 1991)。洋壳与陆壳的最大区别是 后者具有花岗质层圈。显而易见，要阐明大陆的演化，首先要阐明大陆独有的、而且是组成大陆地壳重要部分的花岗岩基的成因。然而，花岗岩成因争论的历史几乎和地质学的历史一样长：最初是水成论与火成论之争，其后是岩浆论与变成论之争，近年来是对岩浆的物质来源和形成方式之争(B. E. Leake, G. C. Brown, A. N. Holliday, 1980)。

变成论和岩浆论的争论最终是后者取得了胜利(皮特福特, 1991) 可是却引出了岩浆来源和岩基空间两个问题。目前对这两个问题的研究可以说是互不相关的，前者似乎成了岩石地球化学的领地，后者则成了构造物理学的领地。但是，正如 Read (1948) 指出的 花岗岩是巨大的地质体，花岗岩问题首先应该是野外地质问题。有关花岗岩成因的假说，首先必须能够容纳野外观察到的与岩基有关的各种地质资料，包括岩基的空间。显然，现有的模式无法满足这一条件。

岩基的空间、产状及内部结构等，是岩基形成过程在形态学上的记录，与其相应的是岩基的物质演化。作为同一过程的产物，形态演化与物质演化应该是和谐统一的。但是，现有模式却使它们无法协调。

模式的预期结果与事实的冲突，迫使我们不得不对作为地质学本位理论之一的“岩浆侵入说”的真实性表示怀疑。

K. Popper (1970) 曾经讲过，科学家是理论的囚徒，打碎一个框架又进入了另一个框架。然而，必须打碎一个框架，才能进入另一个框架。在对岩浆侵入说证伪的基础上，本书阐述了一个关于大陆内生过程物质演化规律的新框架，其核心就是有关岩浆花岗岩成因的“原地重熔说”。“原地”是指花岗岩浆的形成只是地温变化而引起壳内物质性状变化的结果，这种变化没有或不需要外来物质的加入；“重熔”是指这种变化的过程，以及由此引起的壳内物质的重新分配和重新组合。

原地重熔说又称为“层状重熔说”，因为原地重熔产生的岩浆是成层的。相应地，与重熔花岗岩层相关的热变质作用和成矿作用的产物也是成层的。

在新的框架之下，各种野外地质现象，以及各种地球化学和同位素资料等，均显得甚为协调与有序。

在原地重熔说的基础上，作者提出了“元素地球化学场”的概念。它是指“与元素周期律相应的、元素在固态地球中的分布规律，以及由此所反映的元素在大陆内生过程中的聚散趋势”。元素地球化学场的发现，从更高的层次充实和完善了原地重熔的理论框架，但其科学意义可能不止如此。

任何科学理论的建立都要经过严格的证伪与证实。原地重熔说触及地质学关于大陆内生过程的整个理论体系的核心，牵涉到基础地质学的众多学科，故对其证伪和开展更深层次

的研究不可能靠少数人完成。目前的框架仍然是一个十分粗糙的框架，但是，它已清楚地展示出自然界是和谐的 大陆内生过程是一个有序过程。

原地重熔说于 80 年代末提出 (陈国能,1989)。近年来，在国家教委博士点基金的支持下，这项反常研究才得以继续进行。本人衷心感谢在研究工作几乎放弃的情况下，给予我鼓励的师长、学者、领导和朋友 感谢课题组的成员在著书过程中所付出的劳动 感谢我的夫人王东多年来的支持，以及她对全书每一稿的详细校对和对章节安排提出的修改意见；感谢我的朋友张其光、杜庆棠先生对本书出版的鼎力资助。

书中第八章铅锌矿床部分由曹建劲执笔，铀矿部分由张珂执笔，其它所有章节以及统稿工作均由陈国能完成。研究生贺细坤、李榴芬分别参加了野外调查和图件清绘工作。

陈国能

1996 年 7 月

# 目 录

序

序

前 言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 花岗岩成因研究中的思维误区 .....    | 1  |
| 第一节 岩浆侵入说的证伪 .....         | 1  |
| 第二节 将今论古方法应用的思维误区 .....    | 4  |
| 第二章 原地重熔的基本原理 .....        | 6  |
| 第一节 实验岩石学的提示 .....         | 6  |
| 第二节 原地重熔的基本原理 .....        | 7  |
| 第三节 层状重熔与层状花岗岩 .....       | 11 |
| 第三章 原地重熔的岩体几何学证据 .....     | 14 |
| 第一节 岩体与围岩的接触关系 .....       | 14 |
| 第二节 花岗岩背斜 .....            | 17 |
| 第三节 岩体与断裂的关系 .....         | 20 |
| 第四章 原地重熔的地球化学证据 .....      | 22 |
| 第一节 造岩元素 .....             | 22 |
| 第二节 锶同位素 .....             | 26 |
| 第三节 氢氧同位素 .....            | 30 |
| 第四节 稀土元素 .....             | 34 |
| 第五章 多次重熔与复式岩体 .....        | 38 |
| 第一节 复式岩体的内部结构 .....        | 38 |
| 第二节 复式岩体的成分演化 .....        | 40 |
| 第六章 热变质层与混合岩化 .....        | 42 |
| 第一节 热变质层与热变质晕圈 .....       | 42 |
| 第二节 部分熔融与混合岩化 .....        | 43 |
| 第七章 成矿作用与成矿层 .....         | 47 |
| 第一节 地壳升温过程的元素活化迁移与析出 ..... | 47 |
| 第二节 重熔—结晶过程的成矿作用 .....     | 51 |
| 一、热液和热液矿床的形成 .....         | 51 |
| 二、热液成矿过程的氢氧同位素演化 .....     | 54 |
| 第三节 多次重熔的成矿作用 .....        | 56 |
| 第四节 成矿作用分带及成矿层 .....       | 59 |
| 第八章 华南部分矿种成矿作用与矿床实例 .....  | 63 |
| 第一节 铅铋多金属矿床 .....          | 63 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 一、矿床类型及实例简介 .....         | 63 |
| 二、矿床成因讨论 .....            | 67 |
| 第二节 钨钼矿床 .....            | 69 |
| 一、石英脉型—黄沙钨矿 .....         | 70 |
| 二、花岗岩型—红岭钨矿 .....         | 73 |
| 三、细脉浸染型—行洛坑钨钼矿 .....      | 76 |
| 第三节 花岗岩型铀矿床 .....         | 78 |
| 一、重熔—结晶过程中铀的聚散 .....      | 78 |
| 二、花岗岩型铀矿的成矿作用 .....       | 79 |
| 第九章 元素地球化学场 .....         | 85 |
| 第一节 原地重熔的元素地球化学场 .....    | 85 |
| 第二节 地球化学场与陆壳的物质旋回 .....   | 88 |
| 第三节 元素地球化学场与地球的层圈结构 ..... | 90 |
| 总 结 .....                 | 92 |
| 主要参考文献 .....              | 94 |
| 图 版                       |    |

# 第一章 花岗岩成因研究中的思维误区

花岗岩不但是大陆的岩石，而且是组成大陆地壳上层的主要岩石。这部分如此重要的岩石的成因关系到对各种大陆地质过程包括构造过程、成矿过程及变质过程以及整个陆壳演化过程的认识。因此，花岗岩的成因不是一个单纯的岩石、地球化学问题，而是整个基础地质学的重大理论问题。不少学者对此早有同感，例如 W. S. Pitcher (1979) 就曾指出：“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演化和成因。显然，确立一个地质上的时空格局是这种研究的必要前提。”

一般认为自然界有两类花岗岩。一类为“变成花岗岩”，它被认为是由陆壳内部的岩石经花岗岩化作用原地改造而成 (H. H. Read, 1945, 1948; F. K. Dresches-Kaden, 1982)；另一类为岩浆花岗岩，它被认为是由深部岩浆入侵固结而成 (N. L. Bowen, 1928, 1948; O. F. Tuttle and N. L. Bowen, 1958; M. Walton, 1960; P. J. Wyllie, 1977 孟良义, 1993)。

现代花岗岩成因争论的焦点在于岩浆花岗岩。对于岩浆花岗岩成因的流行认识是：岩浆形成于深部源区，然后通过某种方式向上入侵，最后在地壳浅部定位，经冷凝固结后形成岩体。这一假说即为传统的“岩浆说”，其核心是“侵入”，故亦称为“岩浆侵入说”。岩浆侵入说将花岗岩的形成过程分为岩浆生成、岩浆运移和岩体形成三个阶段。三个阶段分别发生于地表以下的不同深度。

从 N. L. Bowen (1928) 开始到本世纪中叶，对岩浆“源区”的认识主要来自岩石熔融和合成花岗岩的实验研究。但这类研究给出的只是在各种限定条件之下花岗岩浆形成的可能与不可能，并不是对源区的客观观察。

随着科学技术的发展，从 70 年代起，人们尝试根据花岗岩的物质组成来探讨“源区”的特征，提出了各种花岗岩“成因类型”的划分方案 (B. W. Chappell and A. J. R. White, 1974; H. P. Taylor, 1977; S. Ishihara, 1977; Collins, 1982)。我国也有不少学者作过这样的研究，如王联槐 (1983)、徐克勤等 (1984)、董申葆等 (1984) 及杨超群 (1984)。根据上述研究，花岗岩浆“源区”的位置主要有：(1) 地幔分异说；(2) 俯冲的洋壳衍生说；(3) 下地壳同熔说；(4) 上地壳底部深熔说。

显而易见，上述认识成立与否，取决于岩浆侵入说是否为正确的背景知识。

## 第一节 岩浆侵入说的证伪

对历史和地下的地质过程是无法直接观察到的，它们只能够通过逻辑思维逐渐逼近。假说就是逻辑思维的结果。假说建立的依据是过程的遗迹，而过程遗迹的直接观察场所是野外。实验室观察只是野外观察的延伸和补充。

在前述岩浆花岗岩形成的三个阶段中，唯有最后一个阶段的遗迹可以在野外直接观察到。任何一个有关岩浆花岗岩成因的假说，首先必须能够合理解释与岩基有关的各种野外地

质现象。不可能设想，在一个假说连对直接观察到的过程的结果都无法作出合理解释的情况下，可以对整个过程作出正确的判断。

岩浆花岗岩是侵入体的认识，最早是由郝顿 1785 据苏格兰 Grampian 山脉的研究提出的。这一认识的主要依据是花岗岩与围岩的穿插切割关系。但是，对岩浆花岗岩的野外观察，同时见到的基本地质事实有两个：

- (1) 结晶质的花岗岩从下而上穿插切割了先存的岩石地层；
- (2) 花岗岩体在地壳中占有巨大的空间。

“岩浆侵入说”合理地解释了第一个基本事实，但却无法解释第二个基本事实所蕴含的问题：岩基所占据的巨大空间的原始岩石去了何方？这就是花岗岩的“空间问题”。Keilhau 可能是最早提出这一问题的学者（马莫，1979）。

如果岩基是外来体，原始岩石的去向只有两种可能：

- (1) 被上升的岩浆熔化；
- (2) 被上升的岩浆挤走。

Daly (1903) 提出的“顶蚀说”主张岩浆在上升过程中吞蚀围岩而取得空间。但根据热力学原理对岩浆上升熔化岩石的可能性进行计算，即使温度高达 1000℃ 以上的地幔岩浆，也只能熔化相当其自身体积 5% 左右的冷岩石。这种计算可能过分保守，我们将其打上 10 倍的折扣，即假设岩浆能够熔化相当其自身体积 50% 的岩石。然而，岩浆的空间仍然无法解决。因为岩石熔化只是物质形态的改变而不是物质体积的改变。如果说岩石熔化后体积发生了改变，那也是体积变大了而不是变小了。就如一杯水，结了冰之后仍然是一杯。不管杯里的是水还是冰，要在杯中再加入相同体积的水显然是不可能的。

现代不少学者相信，有相当多的花岗岩是由地下 20km 左右产生的“深熔岩浆”入侵固结而成。果若如此的话，仅从能量方面考虑，就可以认为深熔花岗岩通过顶蚀方式获取空间的可能性为零。因为共结点是无变量点，不可能设想该点上产生的低熔岩浆可以向上部低温区运移几公里甚至十几公里而不固结（除非有畅通无阻的通道使大批岩浆能在短时间内到达目的地），更不可能设想这些经过长距离运移的低熔岩浆到达地壳浅部时，还有足够的热力熔化大批的冷岩石。

主张第二种可能性的主要有“底辟说”、“气球膨胀说”和“岩墙扩张说”。

底辟说主张岩浆在上升过程中将上覆岩石托起而获取空间，其机理与岩盐的底辟相似（Dixon, 1975; A. R. Berger 等, 1975）。但岩浆底辟和岩盐底辟的区别是，岩浆体顶部不是厚度不大的软岩层，而是厚达十几公里甚至几十公里的地壳。底辟说虽强调了岩浆与岩石的密度差，但却与两者粘度差的研究结果不相容（Turcotte, 1982; A. Castro, 1987; Climens & Wall, 1981; Arzi, 1978）。

J. R. Ramsay (1981) 在研究赞比亚 Chindmora 岩体时完善了 Cloos (1925) 的气球膨胀说，主张岩浆在水平方向上推开或压缩先存岩石而获得空间。该假说认为，岩浆遇到阻挡层时停止向上运动。由于岩浆的不断注入，岩浆房原地膨胀，将四周的岩石向外推开或压扁（图 1-1）。

按照上述模式，岩体与其围岩应有如下关系：

- (1) 岩体顶部的地层应近于水平或向上拱曲，并与岩体呈整合接触；
- (2) 岩体四周的围岩应强烈压缩。岩体越大，挤压越强，而且围岩中的压性构造应环绕岩

体分布或与岩体的长轴平行；

(3)岩体顶部的地层与岩体四周的地层之间应存在滑脱面(图 1-2)。

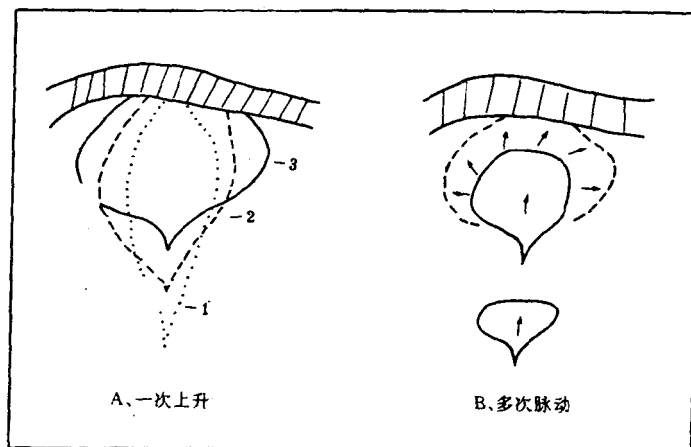


图 1-1 气球膨胀模式

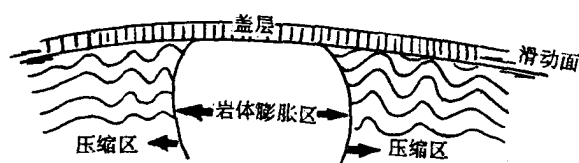


图 1-2 气球膨胀作用可能造成的围岩变形

很明显，气球膨胀模式所预示的种种围岩变形特征对绝大部分岩体而言是不存在的，例如华南三条中生代东西向花岗岩带（莫柱孙等，1980）中的大东山岩基。该岩基出露面积约  $2200\text{km}^2$  侵入到晚古生代地层中。从图 1-3 可见，岩基周围的晚古生代地层及其内的褶皱和冲断构造并没有像气球膨胀模式所预示的那样平行于岩基走向，而是几乎与岩基的长轴垂直。

1980 年美国学者 H. Shaw 把有效应力与 Griffith 的破裂理论结合起来提出了岩墙扩张说。他认为夏威夷冒纳罗亚火山之下的许多小地震是由于岩浆的注入而导致裂隙的不断生长所致，并认为这一模式适应于花岗岩浆（皮特福特，1991）。

岩墙扩张说强调的只是前述花岗岩形成过程三个阶段中的第二阶段，这与过去的岩浆沿断裂入侵的说法并无本质上的区别。如果将其作为岩基定位的全称命题，我们就无法解释为什么许多规模巨大的断裂（如中国东部的郯-庐断裂）没有相应规模的岩体产出，而许多规模巨大的岩基，如前述的大东山岩基，又不见相应规模断裂的事实。

部分学者把岩墙扩张说和上述的气球膨胀说结合起来，即认为岩浆上升是沿断裂注入，而最后定位则主要通过气球膨胀作用（张志强，1993）。对于同一岩体，前、后两个阶段的产物一般不可能在同一剥蚀水平上见到，常见的只是后一阶段的产物。但如前所述，气球膨胀模式不能解释一般岩基的地质特征。

问题与结论：岩浆侵入说已提出两个多世纪，科学界也进行了不懈的努力，但至今仍然

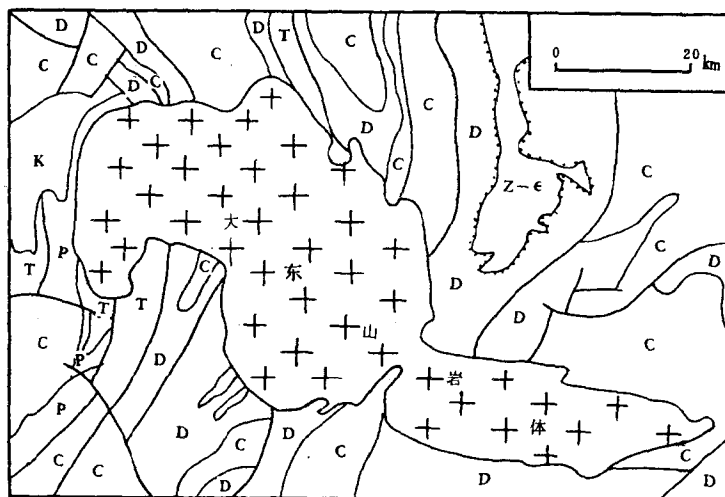


图 1-3 大东山岩基地质简图

(示岩基走向与围岩走向近乎垂直)

无法解释该假说必须解释的两个基本观察事实之一所包含的花岗岩空间问题。是观察资料不正确吗？显然不是，现有的地质填图技术和遥感技术足以保证对岩体范围和形态的观察精度；是现代科技不具备解决这一问题的能力吗？也不是，因为这一问题纯属逻辑思维的范畴，而不是观察的范畴；是资料的积累还不足以解释这一问题吗？更不是，因为一个假说的建立首先就是对原有资料进行合理解释。

看来只有一种可能：有关岩浆花岗岩成因的侵入说不真！

## 第二节 将今论古方法应用的思维误区

既然侵入说属假，我们不妨换个角度考虑问题：如果岩基的物质来自原地，就如花岗岩化论者主张的那样，而岩基的形成又经过岩浆阶段，那么是否可以解释与岩基有关的各种地质、地球化学资料呢？这就是本书论述的“原地重熔说”研究纲领的起点。

原地重熔的思想萌芽在上一世纪末已经出现：Hawes 将美国 New Hampshire Albany 花岗岩解释为岩石重熔作用的产物；Emerson 提出马塞诸塞州 Worcester 花岗岩基是围岩重熔形成的；加拿大学者 Lawson 甚至认为，原始冷却的地壳均已被重新熔融，成为新的花岗岩 (V. 马莫, 1979)。

早期的原地重熔思想未能得到科学界认同，主要原因之一是现代地温增温率（平均每公里 30℃）表明陆壳上层不具备岩石大规模融熔的条件。这种把现代地温状态作为整个地史时期地壳温度场标准的认识，既无地质事实为依据，亦无任何科学逻辑可言。但是，在地温梯度上“将今论古”的做法至今仍然是有增无减。例如不少学者在计算重熔岩浆的形成深度时，就是用实验所得到的岩石初熔温度（600 左右 除以现代平均地温梯度。

“将今论古”的英文表述是：The present is the key to the past。这一方法曾对地质科学的发展起过积极的作用，但从方法学上看，它并不是什么独特的研究方法，而仅仅是一种纵向比较法。既是比较，就必须确定比较的前提，这些前提就是古今不变的物理、化学规律。以

河流作用为例。在大陆表面，只要存在水体和允许水体流动的地形条件，就必会出现河流作用。过去如此，现在也如此，这是古今不变的万有引力定律在起作用。这就是河流作用能够将今论古的前提。现代的河流过程是知道的，现代的河流沉积也是知道的；过去的河流沉积是知道的，但过去的河流过程却是不知道的。这样，我们就可以通过对现代和过去的河流沉积的比较，以现代沉积所对应的水动力环境来确定过去的水动力环境，从而恢复已经消失的古河流过程。

地表以下的地质过程，不论是现在的还是已经过去的，我们都无法直接观察，比较的前提也难以确定。因此，把将今论古方法应用于内动力过程时要特别慎重。

在地温梯度上将今论古是将今论古方法的滥用，是花岗岩成因研究中的思维误区。现代地温梯度只是代表地壳温度场变化的历史过程中某一点上的状态，而状态是可变的。假设地温梯度古今不变，就如假设地壳某点上的重力值古今不变、地貌形态古今不变一样，没有任何的科学依据，而且也与实际资料不相容。从花岗岩的时间分布看，区域岩浆活动并非贯穿着整个地质历史，而仅发生在一个或几个时间段。以华南为例，该区绝大部分岩体均形成于中生代，而晚古生代和新生代没有或只有很弱的花岗岩浆活动。这表明地壳温度场的状态是时间的函数，而且其变化是非线性的。

华南中生代花岗岩活动的高峰期在晚侏罗世至早白垩世之间，形成了众多规模巨大的岩体。根据现有资料，该区中生代花岗岩的“定位”深度多在 5km 左右，许多含矿岩体的形成深度更浅（陈毓川等，1989）。同位素测年资料则表明，岩基从边缘到中心的固结通常需要数百万年（莫柱孙等，1980；陈旗新，1986）。如果这些资料确实反应了客观事实，那么中生代在华南地区地表以下数公里处曾长期存在众多规模巨大的岩浆体。不管这些岩浆体的形成是地温场变化的原因还是结果，在它们存在期间，壳内的地温梯度必然比现在高得多。

都城秋穗（1973）曾计算过日本部分变质带形成时的古地温梯度：日本中部赤石山脉地区为 75—175℃/km，本州北部最上地区大于 100℃/km，丹泽山脉地区为 40—60℃/km。

根据地热测量资料，大陆内部稳定区的地热流值一般为 0.9—1HFU（37—41mW/m<sup>2</sup>），而大陆边缘和中、新生代造山带则为 1.5—2.5HFU（62—103mW/m<sup>2</sup>），甚至更高（K. C. Condie, 1982）。如喜马拉雅地区，在藏南羊卓雍湖测得的平均热流值为 3.5HFU（146mW/m<sup>2</sup>），倒不龙地区为 4.11HFU（170mW/m<sup>2</sup>）（肖序常等，1988）。可见，陆壳温度场不论在时间上还是在空间上都是波动起伏的。

小结：用现代地壳平均地温梯度推断过去花岗岩浆的形成深度，在方法学上是错误的，在地质事实面前也是站不住脚的。在地温场的诸种要素中，唯有地温“向心增温律”可以“将今论古”——如果地球初期是炽热球体的认识是正确的话。

## 第二章 原地重熔的基本原理

既然壳内温度场的状态是可变的，就没有理由断定壳内物质的存在状态是不变的，问题是什么条件下才能变化，以及如何变化。实验岩石学的进展为这些问题的解决创造了条件。

### 第一节 实验岩石学的提示

H. F. G. 温克勒 (1980) 曾用粘土岩、页岩和硬砂岩为材料，在含水条件下对岩石进行了一系列的熔融实验 (表 2-1、2-2) 结果表明：

表 2-1 不同温度下粘土熔融后形成的熔体成分

| 组 分   | 熔体中各组分的百分含量(标准分子) |      |      |
|-------|-------------------|------|------|
|       | 670℃              | 675℃ | 765℃ |
| 石 英   | 42.1              | 32   | 34   |
| 钾长石   | 47.5              | 36   | 26.5 |
| 钠长石   | 10.5              | 26   | 31   |
| 钙长石   | 0.0               | 6    | 8.5  |
| 熔体(%) | 31.0              | 49.0 | 73   |

据温克勒(1980)

表 2-2 不同温度下硬砂岩熔融后形成的熔体成分

| 组 分   | 组分熔体中各组分的百分含量(标准分子) |      |      |      |      |
|-------|---------------------|------|------|------|------|
|       | 690℃                | 710℃ | 730℃ | 750℃ | 780℃ |
| 石 英   | 41.0                | 36.0 | 32.0 | 35.0 | 38.5 |
| 钾长石   | 37.5                | 19.0 | 16.5 | 14.6 | 13.5 |
| 钠长石   | 21.5                | 38.8 | 41.4 | 39.8 | 37.2 |
| 钙长石   | 0.0                 | 3.2  | 3.1  | 5.2  | 4.8  |
| 黑云母   | 0.0                 | 0.5  | 2.0  | 1.3  | 2.0  |
| 夕线石   | 0.0                 | 0.0  | 5.0  | 4.5  | 4.0  |
| 熔体(%) | 23                  | 48   | 59   | 68   | 73   |

据温克勒(1980)

1. 岩石在 700℃ 以下便开始熔融，形成花岗岩成分的熔体以及富铁镁的残余物；
2. 熔体的数量随着温度的升高而增多；
3. 岩石熔融时，首先应形成富硅、钾、钠的熔体。随着温度的升高，熔体中铁镁组分增多。换言之，熔渣只是相对的，它随着温度的升高而逐渐减少至消失。

刘玉山等 (1985) 对南岭花岗岩所作的熔化实验表明，在  $2 \times 10^8 \text{Pa}$  压力下，花岗岩的初熔温度亦少于 700℃ 终熔温度为 770℃ 左右 熔化区间一般少于 100℃ (表 2-3) 与 H. F. G. 温克勒等对砂、页岩的实验结果可以对比。这意味着即使在正常地温梯度下，当地壳某一深度的温度达到岩石的初熔温度时，其下 2—3km 的硅铝质岩石应已大部甚至全部熔融。

以上实验均是在饱和水的条件下进行。在“干”体系中 岩石的熔化温度要高得多 (刘建

表 2-3  $2 \times 10^8 \text{Pa}$  压力下华南某些花岗岩类岩石的熔化温度和熔化区间

| 岩 体       | 初熔温度(℃) | 终熔温度(℃) | 熔化区间(℃) |
|-----------|---------|---------|---------|
| 香花岭黑云母花岗岩 | 660     | 720     | 60      |
| 大厂黑云母花岗岩  | 670     | 770     | 100     |
| 西华山黑云母花岗岩 | 680     | 775     | 95      |
| 武功山花岗闪长玢岩 | 690     | 800     | ?       |
| 魁岐晶洞钾长花岗岩 | 670     | 745     | 75      |

资料据刘玉山等 1985)

忠等,1995)。过去一般认为深部的岩石是非渗透性的,故不可能有足够的水参与岩石的熔融。但随着大陆科学深钻取得的巨大成功,人们已对上地壳深部的地热活动有了实质性的了解。图 2-1 展示了科拉半岛 SG-3 超深钻的水文地质资料。该孔深达 12km,4000m 之下岩石的含水量不但没有减少而且增多了。德国 KGB 孔的情况同样如此 先导孔在 4000m 深处通过特别取样仪获得了 7.9 万升高矿化度的水(张良弼等,1991)。原预料在浅部向钻井喷射的卤水随深度增加将逐渐消失,钻井将越来越干燥,但 KGB 钻井在 8km 处比浅部更潮湿 而且在 9.1 km 已发现由于高温高压引起的物质流动(Kerr, 1994)。

小结:虽然我们无法直接观察到花岗岩浆的形成过程 但从前一章的讨论 可以相信地壳的温度不是恒定的。一旦地壳的温度升至有水条件下的硅铝质岩石的熔融温度(700 左右)时,上地壳中有足够的水保证岩石熔融或重熔过程的进行,而岩石的部分熔融能够产生花岗质岩浆。

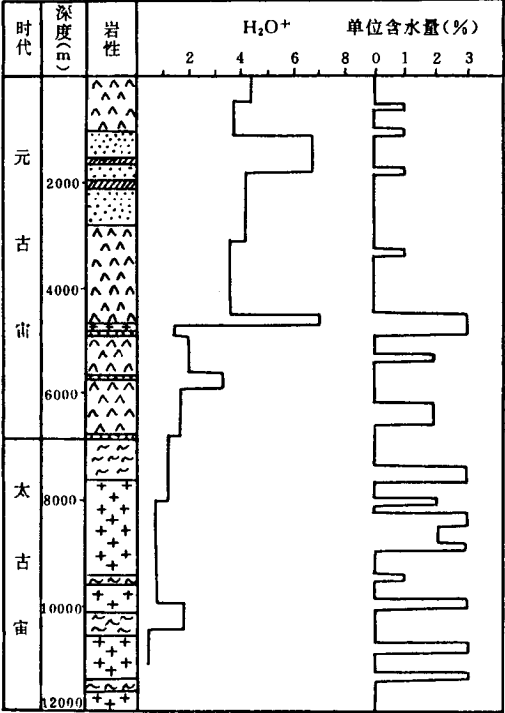


图 2-1 科拉半岛 SG-3 超深钻的水文地质特征

(据 A. I. Krivtsov 等,1991 改编)

1—火山沉积岩 2—辉长岩;3—玄武岩;4—片麻岩;  
5—二云母页岩 6—花岗片麻岩;H<sub>2</sub>O+为结晶水

## 第二节 原地重熔的基本原理

从侵入说的角度看,与花岗岩有关的热变质作用和成矿元素活化等,是岩浆带来的热所致,即对于上陆壳而言,只有物质的加入才有能量的变化。原地重熔说则认为,系统内能的增加是由于下部的能量输入,从而引起系统内部物质性状的转变,以及物质的重新分配和组合(陈国能,1989,1991,1992)。这一过程没有或不需要外来物质的加入。

如图 2-2A 所示,如果地温升高并且在上陆壳某一深度 如图中的 H<sub>1</sub> 点 达到岩石的初

熔温度时，则该处的岩石开始熔融。根据前述的岩石熔化实验结果，若温度继续升高， $H_1$  点岩石的熔化比例必将增大。相应地，平衡点将随着地温等温面的上升而向上移动。由于地温向下递增，且硅铝质岩石的熔化区间多在  $100^{\circ}\text{C}$  左右（表 2-1、2、3）故当  $H_2$  点的岩石发生初熔时，该点以下的硅铝质岩石应已大部甚至全部熔融（图 2-2B）。

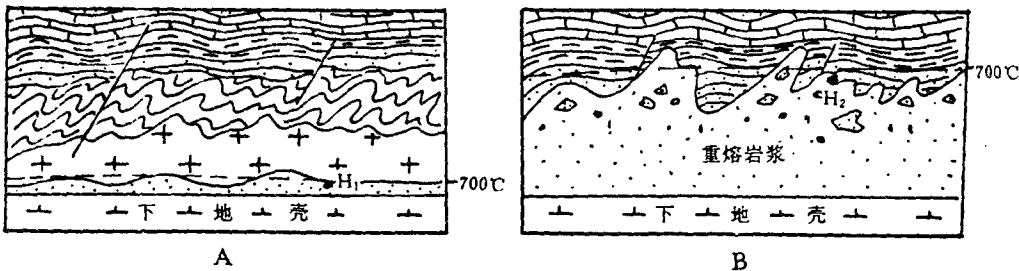


图 2-2 原地重熔的理想模式

熔出物是活动组分 在上覆岩石的巨大压力下 必会强行挤入上方未熔岩石的各种微细裂隙中 从而导致裂隙的扩大.这样 上覆岩石的整体性就会受到破坏。

原本连续的岩石地层 因为裂隙的分割而会变成众多不连续的独立单元 即岩块.图 2-3 是秘鲁海岸岩基中的岩块，清楚地显示出岩浆对其顶部盖层的上述破坏作用所产生的效果。E. J. Cobbing 和 W. S. Pitcher 等( 1972,1981 曾将这一现象作为顶蚀模式的范例.事实上 就岩浆对上覆岩石地层的破坏作用而言 原地重熔模式与顶蚀模式是一样的.不同的是，顶蚀模式的前提是侵入说 即相对于岩基现在所处的空间 岩浆是外来体.因此 它必须要靠自身的能量冲碎和熔化上升通道和定位区间的‘冷’岩石.但这样一来 岩浆能量的消耗与岩浆体积增大之间的矛盾便变得无法调和。

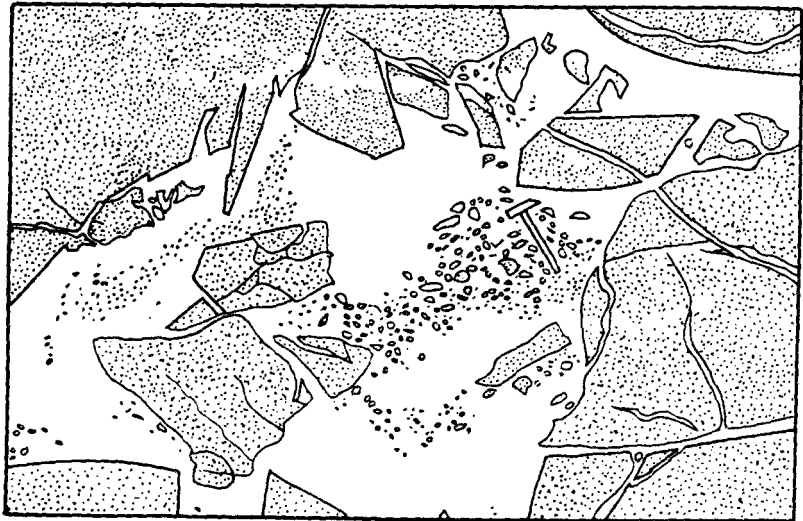


图 2-3 秘鲁海岸岩基中的岩块（平面图）  
（据 E. J. Cobbing 和 W. S. Pitcher 等,1981）

原地重熔不需要考虑系统的能量消耗，以及由于岩块加入而引起的岩浆体积变化问题。重熔岩浆体上界面 简称重熔界面 详见后 的升高完全是因地温等温面的上升.挤入上覆未

熔的‘热’岩石中的岩浆只是重熔岩浆体顶部很少一部分而这部分岩浆对上覆盖层产生的机械性破坏只是重熔界面向上移动的一种方式它是地温上升的结果而不是原因。

岩块的产生意味着岩石的受热面积增大，熔化速度加快，岩块之间的结合力也会随着岩石表面的熔化而减弱。一旦岩块脱离母体，即进入下伏的熔体中，并在重力作用下向下运移；而下部比重较轻的硅碱质熔浆则向上运动，以填补岩块离开后留下的空间。

由于温度向下递增，岩块在向下运移过程中必会逐渐熔化。根据前述岩石熔化实验结果，熔化过程首先析出的是硅、钾、钠等组分，相应地，铁镁组分在残余相中相对富集。

花岗岩作为熔出物是难以直接体现上述过程的，但从保留下来的残余熔渣中，相信可以找到上述过程的证据。不过，首先要在野外鉴别出原来的熔渣。

图版 I-1 所示的是花岗岩中常见的暗色包体（或称闪长质包体），见于深圳王母岩体中。该包体外圈为石英闪长岩，中心却为粉砂质角岩，两者呈过渡关系。这一现象明白无误地告诉我们：暗色包体即为岩石部分熔融后的残余熔渣。

岩块是固体，岩浆是熔体，熔渣则是岩块向熔浆过渡的产物。因此，熔渣在其形成至消亡的大部分时间内，物理性状应介于岩块与熔浆之间，即呈塑性状态。

图版 I-2 展示了一个形态完整的包体，其外形呈饺子状，薄边波状起伏。包体这些特征说明，熔渣在岩浆中确实存在过塑性阶段。

岩块发展成熔渣以后，在重力作用下仍要继续向下运移。当下降到其消熔深度（终熔温度区）时，熔渣应全部消失。因此：

1. 捕掳体和包体多分布于岩体的顶部和边缘，此为两者均来自重熔岩浆体上方之故。前者是落入岩浆中的岩块，在岩浆结晶时还未能下降到改变其原有面貌温度区的结果；后者则代表未到达自身消熔深度的残余熔渣。

2. 大岩基少见暗色包体。这是岩基的剥蚀深度已超过一般熔渣的消熔深度之故。

熔渣的消熔深度应主要取决于原始岩块的体积和岩石的物质组成。原地重熔卷入的岩石多种多样，岩块的体积也各不相同。因此，在同一岩体中，常可见到类型不同的包体。从包体的外形特征来看，我们可以大致判别出熔渣在岩浆中的状态和熔化程度。根据野外的调查，花岗岩中常见的包体可分为截然型和弥漫型两大类，各自又包含了几种亚类型（陈国能等，1994），分别反映了熔渣熔化的不同阶段。

#### （一）截然型

1. 双边截然型：特点是包体的边缘有一基性暗色边，在基性边外与寄主岩接触处还有一酸性浅色边，两者界线清晰（图版 I-3）。

贵阳地球化学研究所 1979 对岩石熔化实验的结果表明：“岩石的熔融是不均匀的，最先熔化的是底部和四周部分……微熔物质分浅色和黑色两种，界线十分清楚。上部为浅色，其量较少；下部为深色，其量较多。”这就是说，岩石的熔化首先从边缘开始，这与图版 I-1 显示的现象是一致的。

上述包体的特征与实验结果吻合，说明熔渣边缘熔化程度较高，硅碱组分被排出，因而包体具有基性边。被排出的硅碱组分未能与熔浆彻底混合而滞留于熔渣的周围，从而形成了包体外围的酸性浅色边。

2. 单边截然型：特点是有基性边而无酸性边，这应该与熔渣在熔浆中的下沉速度较快有关。下沉速度快意味着外部温度增加较快，熔渣边缘的易熔组分相应析出较快，从而形成