



王联魁

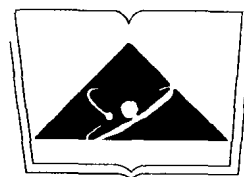
黄智龙

著

# Li-F 花岗岩液态

## 分离与实验

科学出版社



国家自然科学基金委员会资助出版

# Li-F 花岗岩液态分离与实验

王联魁 黄智龙 著

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

Li-F 花岗岩的液态分离是长期以来有争议的学术问题,本书是第一部以 Li-F 花岗岩液态分离为主题的专著。

全书共分十章:第一章绪论,详细地评述了 Li-F 花岗岩的研究历史;第二章 Li-F 花岗岩的独特性,简单地介绍了全书内容,以便读者首先建立起一般性的概念;第三章 Li-F 花岗岩的时空分布;第四章 Li-F 花岗岩体结构和岩石结构构造特征;第五章矿物学与矿物包裹体;第六章岩石化学基本特点;第七章微量元素地球化学;第八章稀土元素地球化学;第九章稳定同位素地球化学;第十章 Li-F 花岗岩液态分离高温高压实验研究。

本书内容丰富,适于地质科研、教学和生产部门使用,是广大地质工作者的一部重要参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

Li-F 花岗岩液态分离与实验/王联魁,黄智龙著.-北京:科学出版社,2000

ISBN 7-03-007864-0

I. Li… II. ①王… ②黄… III. 花岗岩, Li-F-熔离 N. P588.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 41562 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

2000 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
2000 年 2 月第一次印刷 印张: 18 1/4 插页: 1  
印数: 1—800 字数: 415 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

# 序

在岩浆作用过程中是否存在“液态分离”是长期以来引起争论的一个重要问题,因而出现了关于 Li-F 花岗岩成因问题的争论。本书作者在长期以来对典型的 Li-F 花岗岩进行了全面而较系统的研究基础上,于 1982 年首次提出了 Li-F 花岗岩液态分离的新认识,随后加以完善补充,终于撰写了这本《Li-F 花岗岩液态分离与实验》专著,这是作者对有关问题新的理性认识的总结和结晶。

作者认为 Li-F 花岗岩液态分离包括:不混溶为主和气液分馏为主两种液态分离类型。前者显示了高度富挥发分残余岩浆中产生的岩浆液态不混溶现象,导致形成性质不同的两种熔体及其所显示的一系列特殊结构构造。后者显示了富挥发分残余岩浆侵入到地壳浅部后的就地分异作用,导致形成小岩体中的垂直分带。

书中所附丰富而又系统的图表资料和测试数据,为上述新认识提供了科学的依据;相应的高温高压实验成果重现了有关理论的推导,从而增加了它的可信度。

本书的出版,不仅为 Li-F 花岗岩成因研究充实了新的内容,也丰富了整个花岗岩的基础理论研究,因而它的刊印流传具有相应的理论意义。书中还提出了一系列鉴别 Li-F 花岗岩液态分离的具体标志,为读者具体应用和理解这一理论成果提供了方便,从这个意义上讲,它也是一本具有一定实用价值的专著。

这本专著出版在即,略志数语,聊表祝贺之意。

程裕淇

1999 年 7 月

# 前 言

在岩浆作用过程中是否存在有“液态分离”,是长期以来有争议的问题。大量的实际资料和深入研究表明,它确实是一种客观存在的重要岩浆作用。但是 20 世纪 30 年代 Bowen 提出系统的结晶分异理论以后,液态分离在花岗岩研究中被忽视了,使之在花岗岩研究中几乎达到了“消声灭迹”和“无人问津”的地步,更不可能有专门论述有关 Li-F 花岗岩液态分离的论著问世。本书的出版,旨在冲破结晶分异在岩浆作用研究中“一统天下”的局面,使液态分离假说恢复其历史面貌,及其在岩浆作用中应有的地位。这也可能是作者的奢望,但至少可唤起同行的关注,起到抛砖引玉的作用。

本书是第一部以 Li-F 花岗岩液态分离为主题的专著,研究对象涉及到已知的出露在世界范围内的主要 Li-F 花岗岩。考虑到液态分离是长期争论的问题,以及地质科学的统计特点,作者在写作中希望尽量多地将有关 Li-F 花岗岩的原始数据、素描和相应的图表展现在广大读者面前,目的是更客观地将 Li-F 花岗岩的自然面貌介绍给读者,使之有可能在大量实际资料基础上来判别真伪。因此,在资料取舍方面,不免有过多的嫌疑,尚希读者见谅。

由于本书具有研究对象广、问题争论大和此专著的第一次问世等特点,因此在第一章中较多地评述了 Li-F 花岗岩的研究历史,在第二章中轮廓性地介绍了全书内容,以便于读者首先建立起一般性的概念。全书共分十章,除第十章由黄智龙和饶冰完成外,其余各章均由王联魁执笔。参加此项目的工作人员除作者外,还有饶冰、卢家烂、王慧芬、徐文新、张绍立、杨文金、梁跃龙和朱为方等。

曹俊臣、王贤觉、夏斌、于学元、于津生、洪文兴和王秀璋等教授审阅了初稿全文或部分章节,提出了许多宝贵的修改意见,作者多已采纳,并做了修改。在写作过程中,还得到卢家烂、朱金初、刘家远、胡受奚、杜乐天、白正华、朱炳泉、卫克勤、赵斌和梅厚钧等教授的热情帮助和大力支持。本书出版得到国家自然科学基金委员会和中国科学院广州地球化学研究所的资助,初稿和出版中得到谢洪源副编审热情帮助。对以上所有在成文和出版中给予帮助的专家,一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者谅解和批评指出。

王联魁 黄智龙

1998 年 12 月 20 日

# 目 录

## 序

## 前言

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....                        | (1)  |
| 第一节 Li-F 花岗岩岩浆与热液交代观点的争论 .....              | (1)  |
| 一、俄罗斯(包括前苏联)两种对立观点的发展 .....                 | (1)  |
| 二、我国两种观点争论的变化 .....                         | (4)  |
| 三、世界其他各国交代与岩浆观点的争论 .....                    | (6)  |
| 第二节 Li-F 花岗岩结晶分异和液态分离两种认识演变 .....           | (7)  |
| 一、结晶分异观点 .....                              | (7)  |
| 二、液态分离观点 .....                              | (8)  |
| 第三节 本书的研究基础和有利条件分析 .....                    | (15) |
| 一、研究 Li-F 花岗岩的良好客观条件 .....                  | (15) |
| 二、研究 Li-F 花岗岩有利的主观条件 .....                  | (16) |
| <b>第二章 Li-F 花岗岩的独特性</b> .....               | (18) |
| 第一节 岩浆热液体系 .....                            | (18) |
| 一、Li-F 花岗岩组合 .....                          | (18) |
| 二、Li-F 花岗岩空间分布 .....                        | (18) |
| 三、Li-F 花岗岩时代 .....                          | (19) |
| 四、Li-F 花岗岩物质来源 .....                        | (19) |
| 五、典型 Li-F 花岗岩产出深度 .....                     | (20) |
| 六、典型 Li-F 花岗岩“岩浆热液体系” .....                 | (20) |
| 第二节 典型 Li-F 花岗岩三端元组分 .....                  | (22) |
| 一、三端元组成和地质特征 .....                          | (22) |
| 二、三端元划分的化学标志 .....                          | (24) |
| 三、三端元划分的微量元素标志 .....                        | (26) |
| 四、三端元划分的稀土元素标志 .....                        | (26) |
| 第三节 典型 Li-F 花岗岩不混溶为主的液态分离和气液分馏为主的液态分离 ..... | (27) |
| 一、不混溶为主的液态分离 .....                          | (27) |
| 二、气液分馏为主的液态分离 .....                         | (30) |
| <b>第三章 Li-F 花岗岩时空分布</b> .....               | (33) |
| 第一节 Li-F 花岗岩时间分布 .....                      | (33) |

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| 一、前寒武纪 Li-F 花岗岩 .....                  | (35)        |
| 二、古生代 Li-F 花岗岩 .....                   | (35)        |
| 三、中生代 Li-F 花岗岩 .....                   | (35)        |
| 第二节 Li-F 花岗岩空间分布特点 .....               | (36)        |
| 一、稳定区和活动带的含义 .....                     | (37)        |
| 二、世界各大洲的构造单元组成 .....                   | (37)        |
| 三、Li-F 花岗岩在各大洲不同构造单元中分布特点 .....        | (40)        |
| 本章小结 .....                             | (42)        |
| <b>第四章 Li-F 花岗岩体结构和岩石结构构造特征 .....</b>  | <b>(44)</b> |
| 第一节 复式 Li-F 花岗岩体结构 .....               | (44)        |
| 一、Li-F 花岗岩多期多阶段组成的复式岩体 .....           | (44)        |
| 二、不同侵入阶段 Li-F 花岗岩的规模变化 .....           | (51)        |
| 三、复式岩体不同阶段 Li-F 花岗岩构成的分带特点 .....       | (52)        |
| 四、张性断裂对复式 Li-F 花岗岩体形成的控制作用 .....       | (54)        |
| 小结 .....                               | (60)        |
| 第二节 典型 Li-F 花岗岩体的垂直分带和似层状构造 .....      | (61)        |
| 一、典型 Li-F 花岗岩体垂直分带 .....               | (61)        |
| 二、典型 Li-F 花岗岩体顶部层状构造 .....             | (66)        |
| 三、岩体顶部的似伟晶岩(相当国外的 Stockscheider) ..... | (70)        |
| 四、岩体顶部的云英岩带 .....                      | (76)        |
| 小结 .....                               | (81)        |
| 第三节 Li-F 花岗岩的结构构造 .....                | (83)        |
| 一、球状或球粒构造 .....                        | (83)        |
| 二、矿化囊包体构造 .....                        | (86)        |
| 三、“纽扣”构造 .....                         | (87)        |
| 四、条带构造 .....                           | (88)        |
| 五、韵律构造 .....                           | (90)        |
| 六、“涡流”流动构造 .....                       | (91)        |
| 七、“绞合”不规则条带构造 .....                    | (91)        |
| 小结 .....                               | (92)        |
| 本章小结 .....                             | (94)        |
| <b>第五章 矿物学与矿物包裹体 .....</b>             | <b>(95)</b> |
| 第一节 主要造岩矿物 .....                       | (95)        |
| 一、不同阶段 Li-F 花岗岩的主要造岩矿物 .....           | (95)        |
| 二、典型 Li-F 花岗岩的造岩矿物 .....               | (97)        |
| 第二节 副矿物 .....                          | (111)       |
| 一、典型 Li-F 花岗岩副矿物组成 .....               | (111)       |
| 二、典型 Li-F 花岗岩垂直分带中副矿物变化 .....          | (115)       |
| 第三节 矿物中包裹体 .....                       | (119)       |

|                                                                                           |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 一、Li-F 花岗岩矿物中包裹体 .....                                                                    | (119) |
| 二、典型 Li-F 花岗岩垂直分带矿物中包裹体 .....                                                             | (121) |
| <b>第六章 岩石化学基本特点</b> .....                                                                 | (125) |
| 第一节 Li-F 花岗岩化学平均值及其特点 .....                                                               | (125) |
| 第二节 Li-F 花岗岩化学成分变化反映出三端元组分的分离特点 .....                                                     | (128) |
| 第三节 不同阶段(或期) Li-F 花岗岩在单个复式岩体中化学成分变化趋势 .....                                               | (132) |
| 第四节 典型 Li-F 花岗岩垂直分带的化学成分变化 .....                                                          | (135) |
| 第五节 典型 Li-F 花岗岩化学参数间变化规律 .....                                                            | (138) |
| 本章小结 .....                                                                                | (143) |
| <b>第七章 微量元素地球化学</b> .....                                                                 | (144) |
| 第一节 Li-F 花岗岩微量元素共同特点 .....                                                                | (144) |
| 一、微量元素的富集和亏损 .....                                                                        | (144) |
| 二、早、晚阶段(或期) Li-F 花岗岩微量元素具演化关系 .....                                                       | (144) |
| 三、微量元素分布的不均一性 .....                                                                       | (148) |
| 四、Li-F 花岗岩体中相邻岩相微量元素分布的突变所表现的不均一性 .....                                                   | (151) |
| 第二节 Li-F 花岗岩微量元素标准化曲线类型 .....                                                             | (153) |
| 一、分异型 .....                                                                               | (153) |
| 二、标准型 .....                                                                               | (156) |
| 三、Zr、Hf 富集型 .....                                                                         | (157) |
| 第三节 Li-F 花岗岩不同岩相微量元素变化规律 .....                                                            | (159) |
| 一、单个岩体微量元素综合研究 .....                                                                      | (159) |
| 二、Li-F 花岗岩具体地质剖面不同岩相微量元素变化 .....                                                          | (163) |
| 本章小结 .....                                                                                | (166) |
| <b>第八章 稀土元素地球化学</b> .....                                                                 | (168) |
| 第一节 Li-F 花岗岩稀土模式变化反映出岩浆作用种类和来源不同 .....                                                    | (168) |
| 一、Li-F 花岗岩稀土模式变化不同是岩浆作用不同的指示剂 .....                                                       | (168) |
| 二、深源富 Li-F 碱性及偏碱性花岗岩稀土模式变化 .....                                                          | (189) |
| 第二节 Li-F 花岗岩 $\Sigma\text{REE}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化趋势所反映的岩浆作用种类 .....              | (194) |
| 第三节 Li-F 花岗岩 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 变化趋势所反映出的岩浆作用种类 .....                        | (196) |
| 第四节 Li-F 花岗岩 $\Sigma\text{LREE}-\Sigma\text{MREE}-\Sigma\text{HREE}$ 变化趋势反映出的岩浆作用种类 ..... | (198) |
| 本章小结 .....                                                                                | (199) |
| <b>第九章 稳定同位素地球化学</b> .....                                                                | (201) |
| 第一节 应用锶、氧同位素研究 Li-F 花岗岩形成机制 .....                                                         | (201) |
| 一、Li-F 花岗岩体顶部不同岩相氧同位素组成的变化 .....                                                          | (201) |
| 二、深浅不同相 Li-F 花岗岩氧同位素组成差异 .....                                                            | (203) |
| 三、不同阶段 Li-F 花岗岩氧同位素组成变化 .....                                                             | (204) |
| 四、不同阶段 Li-F 花岗岩锶同位素初始比值( $I_{\text{Sr}}$ )变化 .....                                        | (205) |

|                                                |              |
|------------------------------------------------|--------------|
| 第二节 两个系列不同来源 Li-F 花岗岩的稳定同位素组成特征 .....          | (206)        |
| 一、两个系列 Li-F 花岗岩锶同位素初始比值( $I_{Sr}$ ) .....      | (206)        |
| 二、两个系列 Li-F 花岗岩的氧同位素组成( $\delta^{18}O$ ) ..... | (207)        |
| 三、两个系列 Li-F 花岗岩的钕同位素 $\epsilon_{Nd}(T)$ .....  | (209)        |
| 四、两个系列 Li-F 花岗岩的钾长石铅同位素组成 .....                | (209)        |
| 本章小结 .....                                     | (211)        |
| <b>第十章 Li-F 花岗岩液态分离成因高温高压实验研究 .....</b>        | <b>(213)</b> |
| 第一节 实验初始物和实验条件 .....                           | (213)        |
| 一、实验初始物 .....                                  | (213)        |
| 二、实验条件 .....                                   | (214)        |
| 第二节 实验方法及过程 .....                              | (215)        |
| 一、实验设备 .....                                   | (215)        |
| 二、实验温压测定及校正 .....                              | (216)        |
| 三、相平衡确定 .....                                  | (216)        |
| 四、实验过程 .....                                   | (217)        |
| 第三节 实验结果及讨论 .....                              | (217)        |
| 一、一般特征 .....                                   | (218)        |
| 二、不混溶相的结构构造特征 .....                            | (221)        |
| 三、不混溶相结构构造的形成机理 .....                          | (222)        |
| 四、不混溶相的化学成分特征 .....                            | (223)        |
| 五、不混溶相的熔体结构特征 .....                            | (227)        |
| 六、液相不混溶的影响因素 .....                             | (231)        |
| 第四节 液相不混溶在 Li-F 花岗岩成岩成矿中的意义 .....              | (232)        |
| 一、液相不混溶在 Li-F 花岗岩成岩中的意义 .....                  | (232)        |
| 二、液相不混溶在 Li-F 花岗岩成矿中的意义 .....                  | (234)        |
| 结束语 .....                                      | (236)        |
| 参考文献 .....                                     | (241)        |
| 附表 .....                                       | (250)        |
| 附表 1 .....                                     | (250)        |
| 附表 2 .....                                     | (264)        |
| 附表 3 .....                                     | (274)        |
| 照片说明和照片 .....                                  | (280)        |

# 第一章 绪 论

Li-F 花岗岩在自然界往往都伴生稀有元素矿化,故通常也称稀有元素矿化花岗岩。这类花岗岩的成岩与成矿密不可分,过去多从稀有元素矿床成因方面研究花岗岩,实际上也就等于研究 Li-F 花岗岩的成因。Li-F 花岗岩成因研究历史悠久,观点认识颇多,众说纷纭,莫衷一是。让我们回顾一下各种观点演变的梗概和争论的焦点,以便对 Li-F 花岗岩的研究历史有更深刻了解。

## 第一节 Li-F 花岗岩岩浆与热液交代观点的争论

将近 50 年, Li-F 花岗岩或稀有元素矿化花岗岩成因认识争论的焦点一直是岩浆还是热液交代成因,但不同时期和不同国家的主导观点并不相同。分析其原因,无不与各国当时的生产发展程度和研究工作水平有关。俄国的稀有元素矿化花岗岩比较发育,生产利用早于其他国家(西方),所以,开始研究也比较早,而且研究也较详细。我国的稀有元素矿化花岗岩也比较发育,生产和研究早在 60~70 年代就投入相当大研究力量。相比之下西方各国这类花岗岩产出较少,生产和研究起步也较晚,但它们在这方面研究有逐渐加强之势。世界各国研究 Li-F 花岗岩不管起步早、晚,还是研究水平的高低,均有岩浆与热液交代两种对立成因观点的争论。

### 一、俄罗斯(包括前苏联)两种对立观点的发展

#### 1. 早期 50~60 年代,交代论点占绝对优势

50 年代至 60 年代初,随着俄罗斯稀有元素矿化花岗岩发现,研究工作也相继展开,在世界上最早提出热液交代的认识,认为通过原生花岗岩的热液交代作用,形成变花岗岩(апогранит)或稀有元素矿化花岗岩,代表性和研究较深入的学者首推 Беус 和 Шерба。Беус(1962)认为稀有元素矿化花岗岩,是由黑云母花岗岩通过一系列热液自交代作用形成,岩体自早至晚由下而上发育:①早期微斜长石化,②早期钠长石化,③云英岩化,④晚期钠长

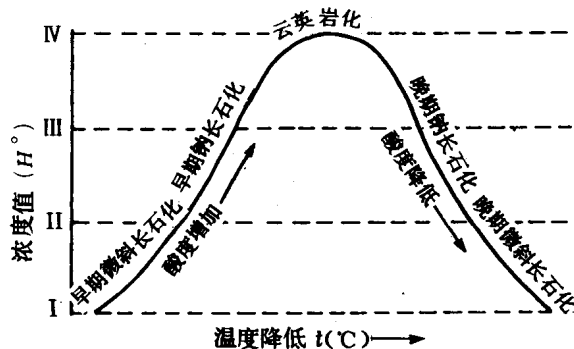


图 1-1 花岗岩岩浆结晶期后交代作用中溶液酸碱度变化曲线图

(引 Беус, 1962)

石化和⑤晚期微斜长石化等交代作用。随着温度降低,溶液性质有由碱性经酸性向碱性变化趋势(图 1-1),如此不断交代富集结果形成稀有元素矿化花岗岩和岩体的垂直分带变化。

同时代,Илєрба(1964)认为岩浆期后热液通过岩体自下而上渗透作用,对上部已固化花岗岩进行交代,使原生花岗岩中云母和长石中稀有元素析出,不断向上渗透富集成矿,从而形成稀有元素矿化花岗岩或称变花岗岩(图 1-2)。

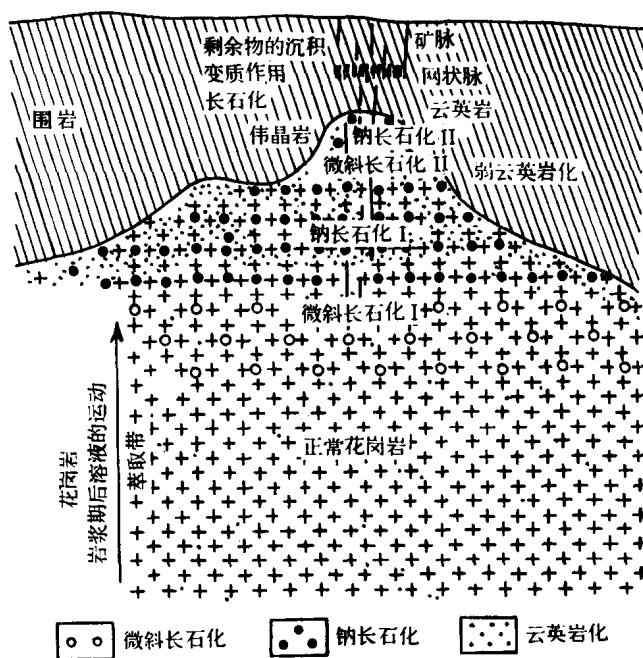


图 1-2 岩浆期后溶液引起正在  
冷凝的花岗岩侵入体自交代模式  
(引 Илєрба, 1964)

上述俄国 Бейс 和 Щерба 为代表的俄国这种热液自交代观点,60~70 年代在前苏联稀有元素矿化花岗岩研究中盛行一时,占据了统治地位。当时俄国学者从岩石、微量元素、副矿物、造岩矿物、矿物包裹体和成矿络合物迁移实验等多方面对稀有元素矿化花岗岩交代作用进行了详细研究。如 Говоров(1960)和 Щерба (1967)利用矿物包裹体测量蚀变交代产物的温度:微斜长石化 550~650℃、钠长石化 400~550℃、硅酸盐岩石的云英岩化 300~450℃、伴生的石英脉 250~450℃、硫酸盐的云英岩化 200~400℃和伴生的萤石脉 200~250℃等。可见自早至晚交代中温度有逐渐降低的变化趋势,说明热液交代作用物理条件的逐渐变化规律。Александров (1973)、Бейс(1967)和 Косалс(1976)根据实验结果,探讨了在微斜长石化、钠长石化、硅化等热液交代中,从原生花岗岩提取稀有元素形成络合物迁移和富集的某些规律性等。

总的来看,在这一时期俄国学者多认为所有稀有元素矿化花岗岩均系通过热液交代或自交代作用形成。

## 2. 70 年代以后, 岩浆观点的崛起

Коваленко(1971)在蒙古发现翁岗岩(онгонит)以后,认为应属火山岩相,稀有元素矿化花岗岩或翁岗岩是岩浆成因,从此为 Li-F 花岗岩岩浆成因的论点奠定了基础。正是由于稀有元素矿化花岗岩岩浆成因观点的确立,在俄国(前苏联)开始了交代与岩浆两种观点之争,在 70 年代以前,虽然 Апелцин(1958, 1967)认为稀有元素矿物铌铁矿属岩浆阶段产物,具岩浆成因认识,但未形成系统的岩浆成岩成矿理论。

Коваленко(1971, 1979)成为前苏联稀有元素矿化花岗岩岩浆成因论的杰出代表人物,他从岩石、矿物、副矿物、微量元素和成岩实验等方面对 Li-F 花岗岩进行了系统研究,获得许多研究成果和新认识(Коваленко, 1979; Kovalenko, 1984):①翁岗岩的石英、黄玉、磷灰石中熔融包裹体均一温度 540~1200℃, Li-F 花岗岩成岩温度也高,为 600~800℃;②熔融包裹体资料表明, Li-F 花岗岩含水量达 0.2~8.6wt%, 变化宽广,但均未达到饱和,说明岩浆房的压力较高,因此,只有过冷和压力降低时,岩浆水才达到饱和;③随岩浆熔体温度降低有粘度减小变化,推测是挥发分富集的结果;④从熔体中可直接结晶出 Li-F 花岗岩的所有主要矿物,如石英、钠长石、钾长石、云母和黄玉等;⑤ Li-F 花岗岩岩浆是普通花岗岩结晶分异的残余岩浆;⑥ Li-F 花岗岩具岩浆岩的外貌和有结晶分异特征等。所有这些均说明 Li-F 花岗岩属岩浆成因。

## 3. 80~90 年代岩浆与交代观点合二为一

此后,俄国交代派与岩浆派争论结果,于 80~90 年代明显地动摇了交代派的统治地位,而且岩浆派逐渐占据上风,过去纯交代派的观点逐渐消声匿迹,为岩浆与交代合二为一观点所代替,多数观点是主张稀有元素成矿既有岩浆作用,又有交代作用。如:

Сырицо(1993)将汉格莱稀有元素矿化花岗岩体(东贝加尔)和垂直分带,分出几种类型,早期或深部 Li-F 花岗岩称为岩浆花岗岩,包括:①浅色斑状黑云母花岗岩;②斑状白云母花岗岩;③微斜长石钠长石黑鳞云母花岗岩;④微斜长石钠长石含锂铁白云母花岗岩;⑤钠长石化与云英岩化花岗岩等。晚期浅部的 Li-F 花岗岩称为变花岗岩,即交代成因的稀有元素矿化花岗岩,包括:⑥铁锂云母-黄玉-钠长石变花岗岩;⑦锂云母-天河石-钠长石变花岗岩;⑧锂云母-钠长石变花岗岩等,是典型岩浆论与交代论合二为一观点的代表。

Александров(1988)主张由正常花岗岩向锂云母钠长石花岗岩过渡的岩体垂直分带,其形成的主导因素是晚期岩浆的分异作用,而稀有元素矿化花岗岩的 K 与 Na、Nb/Ta、K 与 Li 的变化,则反映出交代作用,也是岩浆观点与交代观点合二为一的认识。

Косалс(1976)也有与上述类似的主张,认为 Li-F 花岗岩许多酸性或碱性熔体有广泛的液态分离现象,形成贝加尔、哈萨克斯坦的含钨矿花岗斑岩墙的韵律条带构造和分离出的多次含矿岩浆构成的复式侵入体等,从这可看出他是典型岩浆论者。与此同时,他又主张,许多奥长刚玉花岗岩、亚碱性和碱性花岗岩的稀有元素矿化的形成与早期碱性、中期酸性和晚期碱性热液交代作用有关。早期碱性阶段热液从花岗岩中带出 Mo、W、Be、Ta、Nb、Zr、REE、Sn、Li、Rb、Cs 等,中期酸性阶段带出 Be、Cs、Li、Nb、Ta、Sn、REE、Zr 等,转移至晚阶段碱性热液形成稀有元素矿化。很明显,他又是交代论者,因此,同样他是岩浆论与交代论合二为一的观点。

所以俄国 Li-F 花岗岩成因的岩浆论与交代论争论结果,目前,岩浆论似乎占上风,但纯岩浆论者并不占优势,许多交代论者转变为岩浆与交代合二为一的认识以后,他们之中还有很多学者仍认为以交代为主,总体看岩浆与交代所占比例因人而异,各不相同,只能说总体上岩浆与交代合二为一的观点是主流。

## 二、我国两种观点争论的变化

我国 Li-F 花岗岩分布广泛,因此利用和研究也比较早,1958 年郭承基先生在姑婆山花岗岩研究中,鉴定出岩浆成因的褐钨铋矿,他是我国最早持岩浆观点的学者。50 年代末 60 年代初,我国大规模开展稀有元素矿化花岗岩研究。受前苏联影响,在此期间多数科学家和地质工作者持交代观点。司幼东教授是我国稀有元素矿化花岗岩交代论的先驱,1957~1964 年,他和其学生袁忠信、王中刚、洪文兴和夏铮等,在地质、岩石、矿物、地球化学和实验等方面做了大量工作,通过粤东、苏州、幕阜山、万丰山和牛屎坡等地稀有元素矿化花岗岩研究,获得系统全面认识。他们认为花岗岩的稀有矿化作用,无不与岩浆期后气液交代作用有关,自早到晚具微斜长石化→钠长石化→云英岩化的交代顺序和变化趋势,不同阶段的交代作用,具有不同的稀有元素矿化特点,从地质、矿物、地球化学与形成机制方面做了全面论述,在成矿中强调络合物迁移作用(中国科学院地质研究所,1963)。此外,中国从事稀有元素矿化花岗岩的地质工作者早期主要是交代论者,直到 1972 年贵阳召开的全国稀有元素地质会议(125 会议),成为中国研究稀有元素矿化花岗岩成因理论发展的转折点,会议岩浆论与交代论展开了热烈讨论,各持己见,讨论结果体现在稀有元素矿化花岗岩组(华东组)的总结中<sup>①</sup>,从此产生了岩浆、交代和岩浆-交代三种观点并存的局面,不过总的看,当时我国仍是以交代论者占主导,部分学者赞同岩浆或岩浆-交代理论。

### 1. 交代论者

胡受奚(1975)认为,所有 Li、Be、Nb、Ta、REE、Rb、Cs、Hf、U 和 Th 稀有元素内生矿床的形成,都与碱交代中元素转移有密切成因联系。他指出:①钠质交代,霓石化→钠质角闪石化→钠长石化→黑云母化、碳酸盐化,专属于 REE、Nb、Sr、Ba、F 等矿化;②钾质交代,钾长石化→钠长石化→云英岩化或钾长石化→钠长石化→含锂云母化(黑鳞云母、锂云母、含锂白云母等),专属于 REE、Ta、Nb、W、Sn、Be 等矿化。其他学者洪文兴(1975)、王德孚(1975)等均为交代论者,认为稀有元素矿化主要都与热液交代有关,于交代中产生稀有元素的转移和富集,从而形成矿化花岗岩。

近十年来,我国仍有许多学者认为交代作用是形成稀有元素矿化花岗岩的主要机制,如袁忠信等(1987)于《稀有金属矿床成因讨论》一文中,根据稀有元素矿化花岗岩产出特征,矿化岩石的交代结构和矿物包裹体特点,认为大多数稀有元素矿化花岗岩是由交代形成,只有极少数近地表产物属岩浆成因,很明显他们是交代论者。

### 2. 岩浆-交代论者

李绍炳(1975)认为铋钨花岗岩体自下而上地质、岩石、矿物的逐渐过渡变化,是岩浆

<sup>①</sup> 全国稀有元素地质会议华东组,关于稀有元素矿化花岗岩大会总结报告(王联魁),1972

分异演化和热液交代叠加结果,他比较强调岩浆与热液交代无明显界线,故认为这类矿床,既不属岩浆矿床,也不属岩浆期后热液交代矿床,应属岩浆分异交代矿床。

近十年来,我国仍有不少学者发表类似认识,但是交代作用在成矿中所占比例各家并不相同。比较强调交代者,如夏宏远(1991)在详细研究华南稀有元素矿床成因系列中,强调成岩与成矿的密切关系,在岩浆演化中逐渐富集稀有金属,而具体稀有金属成矿,则仍是热液交代结果,从而导致形成“变花岗岩”矿床。另外比较强调岩浆或岩浆-热液过渡者,如林德松(1996)根据钽矿床带状分布,似伟晶岩、矿物的多阶段性、矿物包裹体、稀土元素地球化学和实验岩石学资料,认为富钽稀有元素矿化花岗岩是从岩浆到热液整个演化过程中形成的,而稀土和铌矿床主要是岩浆结晶作用的产物,因此他比较强调岩浆在成矿中的作用,而热液仅表现在某些成矿的一个阶段中。

### 3. 岩浆论者

王联魁等(1970,1972)<sup>①</sup>提出稀有元素矿化花岗岩的形成是岩浆成因,许多岩体的层状构造、条带构造和稀有元素钠长花岗岩脉均系岩浆直接结晶形成,而非交代的结果。他认为稀有元素矿化花岗岩中自形石英,包含呈同心环带排列的钠长石小晶体(“雪球构造”),不是像 Beyc(1967)认为的典型热液交代结构,而应是岩浆中结晶过程中包裹正在生长的钠长石晶体的结果,如同石英晶体包裹环带状气液包裹体的形成机制。王联魁(1975)认为稀有元素矿化花岗岩顶部的似伟晶岩是岩浆-热液过渡的产物(中国科学院地球化学研究所,1979)。

刘义茂(1975)于《我国内生稀有元素矿床空间分布》一文中认为,不同类型稀有元素矿化花岗岩(角闪石黑云母中长石花岗岩、黑云母钠更长石花岗岩、黑鳞云母更钠长石花岗岩、锂白云母钠长石花岗岩、锂白云母富钠长石花岗岩和锂云母富钠长石花岗岩等类型)均系以岩浆为主的稀有元素成矿作用。

杜少华(1984)在香花岭地区发现香花岭岩,这种岩石是稀有元素矿化花岗岩的特殊变种,他在较全面研究基础上,认为是由熔体(岩浆)直接结晶形成,是典型稀有元素矿化花岗岩岩浆成因。

章锦统(1985)研究松树岗钨锡铌钽矿床地质的结果,认为含矿岩体的分带是熔体随温度降低不断从岩浆中结晶的产物,主要也是岩浆论者。

夏卫华(1989)以大量实际资料为基础,根据花岗岩中的“雪球构造”、熔融包裹体和似伟晶岩等岩浆证据,认为稀有元素矿化花岗岩是岩浆分异结果,无疑是岩浆论者。

朱金初(1992)根据香花岭岩墙的侵入接触关系、捕虏体、冷凝边、流动构造、玻璃和脱玻璃的存在与黄玉中熔融包裹体特征等,认为含稀有元素矿化的香花岭(431)岩墙是岩浆成因。

此外,刘昌实(1991,1993)和王德滋(1994)等不断发表有关这方面的文章,均反映出他们是稀有元素矿化花岗岩形成的岩浆论者。

<sup>①</sup> 同前页脚注

### 三、世界其他各国交代与岩浆观点的争论

世界除尼日利亚外,其他各国稀有元素矿化花岗岩发现较晚,相应开展研究工作也迟些。60年代末至70年代以后才陆续有这方面的系统研究,其中研究比较多的国家有法国、英国、德国、捷克、加拿大、秘鲁、尼日利亚、埃及、泰国、澳大利亚等。法国、尼日利亚和捷克等国科学家们研究稍早,法国的 Aubert (1964, 1969) 和 Burnol (1974)、尼日利亚的 Imeopkaria (1980)、捷克的 Stempok (1979) 等早期多认为稀有元素矿化花岗岩是交代成因。Burnol (1974) 认为法国中央地块的稀有元素矿化花岗岩是早期堇青石黑云母花岗岩的微斜长石化、中期 Coletts 花岗岩的钠长石化和晚期 Beauvoir 花岗岩晚阶段钠长石化等形成,最终构成钠长石化含铍花岗岩。捷克的 Stempok (1979) 认为来自地幔的深源热液交代形成稀有元素矿化花岗岩。尼日利亚的 Imeopkaria (1980, 1985) 认为稀有元素矿化花岗岩的形成,与岩浆期后热液交代作用有关(钠长石化、黑云母化)。

由以上可见,其他国家较早研究 Li-F 花岗岩的科学家与俄国、中国类似,也多持交代观点,但是,80~90年代其他国家多数从事 Li-F 花岗岩的学者则主要都是岩浆论者,如法国 Cuney (1985, 1992)、Raimbault (1984, 1995); 澳大利亚 Eadington (1978)、Pollard (1983, 1995); 加拿大 Taylor (1992) 以及秘鲁 Herrera (1984) 和泰国 Suwmonprecha (1995) 等科学家根据 Li-F 花岗岩等同物火山玻璃、黄玉流纹岩、次火山岩以及 Li-F 花岗岩岩浆演化的地球化学和岩石结构特点等,认为 Li-F 花岗岩是岩浆产物。其他国家的岩浆论者还从实验、矿物包裹体角度研究了 Li-F 花岗岩。实验方面有 Manning (1981, 1991)、London (1988)、Pichavant (1988, 1992)、Dingwell (1984~1993)、Holtz (1992~1993)、Webster (1988)、Mysen (1985)、Watson (1976) 等学者通过花岗岩岩浆体系中 F、B、Cl、Li、H<sub>2</sub>O、CO 等挥发分对相平衡、气液分配、固相线液相线以及熔体结构、粘度的影响,深入地探讨了花岗岩形成机制,使 Li-F 花岗岩研究走向更深层次。在地球化学方面,Kepler (1993) 详细研究了 F 对花岗岩中高场强元素活动的影响。在矿物包裹体方面,黄玉和石英中熔融包裹体的发现和温度、成分测定结果(Eadington, 1978; Seltsmann, 1997) 为岩浆论提供了更为直接的证据。

其他国家除单一的交代论与岩浆论之外,也有少数科学家持岩浆与交代多种成因 Li-F 花岗岩观点,这可以 Pollard (1983~1995) 为代表,他提出了 Li-F 花岗岩多成因模式(图 1-3)。

以上从俄国、中国和世界其他国家对 Li-F 花岗岩研究历史看,虽然各国研究 Li-F 花岗岩起始时间有先后之分,但是大都经过由交代向岩浆观点逐渐演变的过程。世界范围 Li-F 花岗岩交代与岩浆观点之争的结果,似乎目前岩浆论占绝对优势,交代论在俄国和中国还占相当比例,而在世界其他国家中几乎消声匿迹。

其他国家研究 Li-F 花岗岩虽然起步较晚,但是研究水平和深入程度都比较高,采用的方法手段也较先进,因而使目前研究 Li-F 花岗岩达到一个新水平,但是俄国、中国传统的地质工作比较详细,生产揭露的岩石露头较完整, Li-F 花岗岩的类型也比较齐全,都为更深入探索提供了优越客观条件。所以其他国家和俄国、中国 Li-F 花岗岩研究工作各有所长,如能取长补短,将会使该项研究获得更为理想的结果。

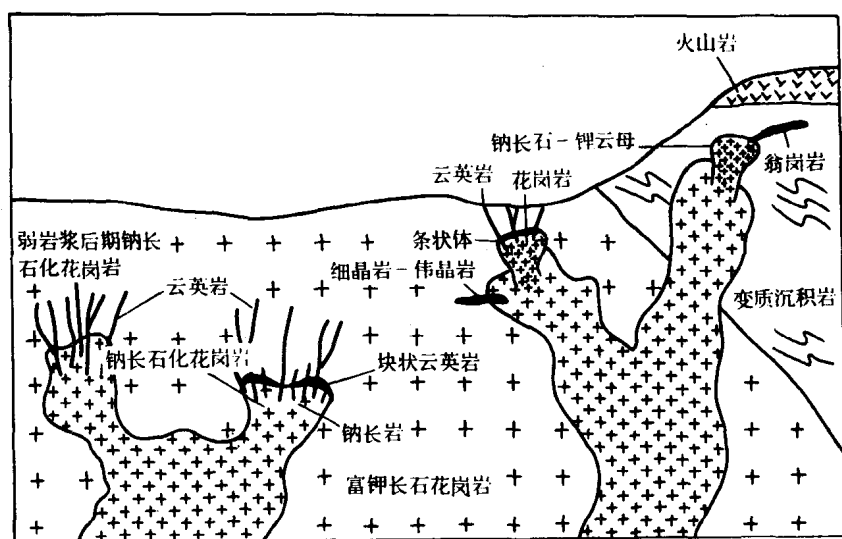


图 1-3 稀有元素矿化花岗岩类岩石的岩浆期和岩浆期后作用之间的可能关系

岩浆论在 Li-F 花岗岩研究中,无疑具有重要理论意义,如果进一步研究 Li-F 花岗岩形成机制,则岩浆论又可分为岩浆结晶分异(分离结晶)和岩浆液态分离(包括不混溶为主和气液分馏为主)两种对立的观点。

## 第二节 Li-F 花岗岩结晶分异和液态分离两种认识演变

根据岩浆论观点, Li-F 花岗岩形成机制通常有结晶分异、熔体不混溶和气液分馏(包括射气分异)等岩浆分异作用。作者理解,气液分馏是气流体与熔体(液)分离作用,熔体不混溶是熔体(液)与熔体(液)分离作用,两者均属岩浆流体(液)分异,是包括气体在内的液态下的分离作用,故应统称液态分离。而结晶分异(分离结晶)则不同,它是固体与熔体(液)分离作用,属固液分离的岩浆分异作用。因此,岩浆 Li-F 花岗岩形成机制实际上主要只有两种,即结晶分异和液态分离。

### 一、结晶分异观点

结晶分异(分离结晶)是岩浆分异中传统应用的一种形成机制,由于 Li-F 花岗岩成分特殊,有带状分布和一系列特殊结构,所以研究中有时很难用结晶分异原理解释一些地质现象,因而常引起争论。根据地质、岩石、矿物、岩石化学、微量元素、稀土元素地球化学和实验等多方面资料,国内外多数科学家普遍承认结晶分异观点,如 Коваленко (1977~1984)、Pollard (1983~1995)、Groves (1978)、Burt (1990)、Manning 等 (1983~1992)、Congdon (1991)、朱金初 (1992, 1996)、夏卫华 (1989)、章锦统 (1985)、干国梁 (1988)、宋新华 (1992) 等学者都认为结晶分异是形成 Li-F 花岗岩的主要机制。其中 Kovalenko (1984) 总结的比较系统全面,他分析了 Li-F 花岗岩体自下而上垂直分带的变化:斜长石逐渐为钠长石代替,钠长石含量增加;云母中锂含量愈来愈高,由铁叶云母经铁锂云母

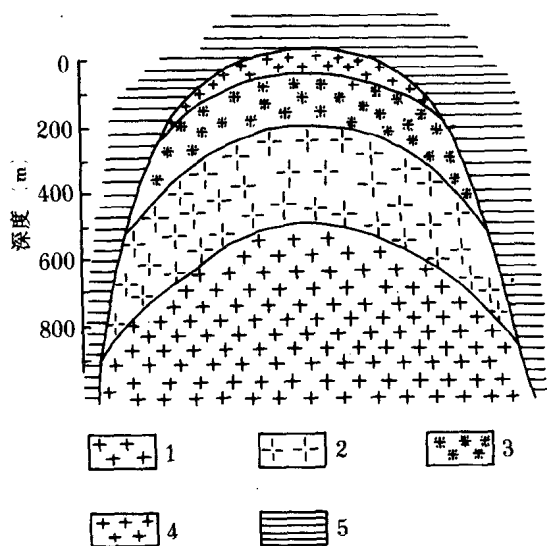


图 1-4 分异最好的 Li-F 花岗岩体分带示意图

- 1 浅色黑云母花岗岩; 2 含黑鳞云母的微斜长石钠长花岗岩;  
3 含铁锂云母的天河石钠长花岗岩;  
4 钠长石锂云母花岗岩; 5 围岩

应变化宽广和粘度低, 为富 Eu 的长石分离沉降创造了有利条件, 从而导致岩体顶部带岩石的 REE 模式中  $\delta_{Eu}$  逐渐变小, 因此在 Li-F 花岗岩结晶过程中长石等矿物结晶并很容易沉降, 构成分离结晶(结晶分异)过程, 故结晶分异应是形成 Li-F 花岗岩的主要机制。同时, 他还指出, 在 Li-F 花岗岩岩浆分异中, 还可能射气分异参与, 不过只能起到微不足道的作用。Groves(1978)主张多阶段冷凝和结晶分异(图 1-5)。

此外, Pichavant(1988~1992)、Manning(1981~1991)从实验, 干国梁(1988)和宋新华(1992)根据 REE 和矿物计算, 朱金初(1992, 1996)以 F 的“涨落”以及夏卫华(1989)和章锦统(1985)等都从不同角度、不同方式探讨了结晶分异的可能性。

因此, Li-F 花岗岩结晶分异理论, 虽然在解释 Li-F 花岗岩形成机制时尚有不少矛盾和亟待解决的问题, 但目前仍为绝大多数中外地质学家所承认, 获得许多岩浆论者普遍应用。

## 二、液态分离观点

岩浆液态分离(magmatic segregation)或称熔离(Ликвация)或称不混溶(immiscibility), 这方面研究起始较早的, 根据 Левинсон-Лессинг (1949)选集可知, 在 19 世纪末 20 世纪初, 由 Дюроше (1857)和 Бекстрём (1889)提出, 经 Левинсон-Лессинг (1905~1915)、Sundius(1926)、Tomkiewf(1929)和 Daily(1933)等积极倡导的一种重要岩浆分异方式。其中 Левинсон-Лессинг (1905~1915)极力主张岩浆液态分离的重要性, 他将液态分离称为

至锂云母; 黄玉含量增加; 标准矿物逐渐富 Ab 贫 Or; 化学成分  $SiO_2$  降低和  $Al_2O_3$  升高, Na/K 增加; 微量元素 Li、Rb、F 升高和 K/Rb 降低以及 Fe、Mg、Ca 含量减少等(图 1-4); 黄玉, 石英和磷灰石的包裹体特征是存在熔体-卤水-水不混溶包裹体和均一温度变化达 540~1200℃; 实验资料花岗岩- $H_2O$ -HF, 翁岗岩- $H_2O$ -HF、Ab-Or-Q-F 等体系研究说明, F 可以降低固相线(550~576℃)与液相线(630℃)温度, 扩大 Q 区, 使 Ab 增加 Or 降低等, 这些特点都与天然 Li-F 花岗岩垂直分带特点和矿物变化、结晶途径一致。正是由于微量元素 Li、Be、Sn、W、Zr、F、Nb、Ta(包括 Rb、Cs、B)的晶体/熔体分配系数远小于 1, 所以结晶分异中稀有元素会得到富集; 矿物包裹体均一温度变化大与含 F 的实验资料都说明, Li-F 花岗岩的矿物结晶温度