

青 ★ 年 ★ 科 ★ 学 ★ 家 ★ 文 ★ 库

THE SERIAL BOOKS WRITTEN  
BY YOUNG SCIENTISTS

# 花岗岩熔融的 局部体系及 熔融序列

吴福元 著



青年科学家文库

# 花岗岩熔融的 局部体系及熔融序列

吴福元 著

吉林科学技术出版社

**【吉】新登字03号**

青年科学家文库  
花岗岩熔融的局部体系及熔融序列

吴福元 著

责任编辑：李洪德

封面设计：杨玉中

---

|               |                        |               |
|---------------|------------------------|---------------|
| 出版：           | 850×1168毫米32开本         | 6.75印张        |
| 发行：吉林科学技术出版社  | 插页6                    | 164,000字      |
|               | 1993年11月第1版            | 1993年11月第1次印刷 |
| 印刷：长春市永昌福利印刷厂 | 印数：1-1140册             | 定价：8.80元      |
| 装订：长春市东新印刷厂   | ISBN 7-5384-1403-7/P·4 |               |

---

## 内 容 提 要

本书是第一部有关花岗质岩石块状样品熔融实验研究的专著。全书共分六章,在全面分析实验岩石学所取得的成就之后,阐明了未来实验岩石学研究的发展趋势与动向;基于含水、含硼体系的熔融实验结果,讨论了花岗质岩石熔融的“局部体系”理论,并阐述了这种局部体系在熔融作用的不同阶段,其平衡性质的转化规律;通过封闭体系吸水熔融与开放体系失水熔融的特征对比,建立了“正、反序熔融序列”的概念,并探讨了不同熔融序列岩浆岩发育地区的地壳结构模型及其大地构造环境。书中还就构造应力对岩石熔融作用的影响等问题进行了深入讨论。

本书可供地质学专业各领域的科研人员、教师 and 研究生使用,特别对岩石学、地球化学等领域的研究人员具有很高的参考价值。

## 《青年科学家文库》评审委员会

|   |        |         |     |     |
|---|--------|---------|-----|-----|
| 顾 | 问：     | 王大珩     | 杨振宁 |     |
| 主 | 任 委 员： | 高景德     |     |     |
| 副 | 主任委员：  | 高 潮     | 刘东生 | 卢良恕 |
|   |        | 丁石孙     | 鲍奕珊 |     |
| 委 | 员：     | 按姓氏笔画排列 |     |     |
|   |        | 王寿仁     | 王泽九 | 石元春 |
|   |        | 叶耀先     | 田光华 | 许 翔 |
|   |        | 杨芙清     | 吴 博 | 何耀绅 |
|   |        | 张锐生     | 陆道培 | 陈运泰 |
|   |        | 陈佳洱     | 陈章良 | 罗 伟 |
|   |        | 赵玉秋     | 赵柏林 | 俞鸿儒 |
|   |        | 姜东华     | 顾方舟 | 高为炳 |
|   |        | 阎隆飞     | 雷天觉 | 黎乐民 |

# 祖国的希望 未来的曙光

## ——寄语青年科技工作者

王大珩

翻开吉林科学技术出版社送来的《青年科学家文库》书目及作者名单，一个个自强好学，勇于探索创新的青年人仿佛就在眼前，使我欣慰，感到后生有望。所以在《文库》编辑出版之际，我很乐于借此机会，同广大青年科技工作者讲几句共勉的话。

这些年来，一大批在五星红旗下诞生，成长起来的年轻科技工作者崭露头角，在面向国民经济主战场的应用研究和在基础科学以及高技术研究等诸多方面取得优异成绩，有的跻身国际领先地位，或达到国际先进水平，有的填补国内空白，这些成果对推动科学技术进步，发展国民经济起到了重要作用。为鼓励青年科技工作者的科学研究和发明创造，中国科学技术协会、中国科学院分别设立了青年科技奖和青年科学家奖，规定每两年评选一次。首届青年科技奖评出 94 名，首届青年科学家奖评出 25 名，他们是从全国数以百万计的青年科技工作者中层层遴选出的佼佼者。

在此基础上，经过中国科协和中国科学院的推荐，吉

林科学技术出版社编辑出版首届部分获奖者的著作，并获得长白山学术著作出版基金的资助，这对广大青年科技工作者是很大的鼓舞。出版社关心青年科技工作者的成长是值得赞扬的。

当今，在激烈的国际竞争中，重要的是看一个国家的综合国力，而其中重要的一个方面是科学技术的进步，所以各国都把科学技术作为推动经济发展和社会进步的重要手段。我国是一个拥有十一亿人口的大国，经济还很落后，但是我们有志气、有能力振兴中华，立足于世界民族之林。实现这样的宏愿，要靠我们几代人的艰苦奋斗。中国科学技术的兴旺发达要靠我们老中青科技工作者团结合作，但归根到底要靠你们青年人。长江后浪推前浪，一代更比一代强。党和人民把国家的前途、民族的命运寄托在你们青年人身上，正如江泽民同志所说：“你们是祖国的希望所在，是中国未来的曙光。”

我们这些人都已年逾古稀，要你们接好班，要有理想、有志气。一个人也好，一个民族也好，都要有一点精神，要有使命感，要有民族自强心，要为国家、为民族争口气，奋发向上，勇于进取；作为优秀的青年科技人才，除业务上有突出成就外，还要有不计名利、无私奉献的高尚精神，现在尤其是要提倡这种精神，还要有求实的科学态度，尊重知识，尊重他人的劳动；你们要发扬中华民族的美德，那就是要有集体主义精神，要团结协作，自力更生，艰苦奋斗，不屈不挠地去拼搏，满怀希望，开拓未来！

1990年2月

## 序

花岗质岩石块状样品的熔融实验研究，是一项难度较大而颇具科学意义的工作。岩石学博士吴福元同志在博士后研究期间，通过他从事岩石学研究的具体体验和大量文献调研，选此为主题，率先在国内开展了这项工作，填补了我国实验岩石学在这方面的空白。

作者根据“不平衡熔融是自然界真实过程的反映”这一新认识，对花岗质岩石的块状样品进行了含水、含硼封闭体系的熔融实验，提出了“局部熔融体系”的概念。作者研究了构造应力对块状岩石熔融特性的影响，并讨论了熔化过程中不同阶段熔融作用平衡性质的转化。作者通过封闭体系的吸水熔融与开放体系的失水熔融两种过程的对比，建立了“正序”和“反序”两种熔融序列。作者认为，封闭体系的吸水熔融，产生了从酸性到基性的“正序列岩浆”；而开放体系的失水熔融，产生了从基性到酸性的“反序列岩浆”，从而构成了地壳深部较酸性的反常地壳结构。这一基于实验结果得出的认识是新颖的，值得注意的。

作者的实验工作是扎实的，资料和数据丰富而翔实。当然，粉末和块状两种岩石样品的实验研究，非但不相互排斥，反而会相互补充。在我看来，作者这方面的工作是对粉末法岩相平衡实验研究的一个重要补充。作者根据实验结果，对构造岩浆作用，以至地壳结构的模型，提出了一个新的思路，不能不引起我们的关注。

吴福元博士的专著《花岗岩熔融的局部体系及熔融序列》的出版，无疑对推动我国在这一领域的深入研究，跟踪国际前沿具



有重要的意义。我衷心地希望吴福元同志以及其他青年同志，今后有更多更好的这样的专著出版，为提高我国的地学水平而继续努力。

王德滋

1992年7月于南京大学

## 前 言

1987~1990年,作者在攻读博士学位期间,开展了花岗质岩石块状样品的部分熔融实验研究,提出了“局部熔融体系”的理论,并将这个理论应用于辽北地区,成功地解释了该区太古宙深熔碱长花岗岩的成因(吴福元,1990<sup>①</sup>)。由此,作者获准在长春地质学院岩石学博士后流动站进行二年的科研工作,对块状岩石的局部熔融体系及其平衡性质作深入的研究。《花岗岩熔融的局部体系及熔融序列》就是上述工作的总结。

尽管块状样品的熔融实验工作在国外60年代就已经开始(Kranck, et al., 1960),但在我国,这类研究开展得较少(吴福元、林强,1990)。由于实验本身平衡性质的影响,这种类型的实验在国外未能及时流行,近几年非平衡态热力学理论的发展,重新引起了人们对块状样品熔融实验研究的兴趣。因此,及时开展这方面的研究对我国追踪这门学科的国际前沿具有重要的意义。

在整个研究过程中,作者始终遵循既定的研究目标,根据工作的进展及国外研究的现状,随时调整工作内容与方案,努力与国外研究进展保持同步。在这一时期,除进一步进行含水体系的熔融实验工作以外,还开展了含挥发份(硼)体系的实验研究,开展了构造应力对岩石熔融性质影响的实验及开放体系的失水熔融实验。研究表明,块状样品的部分熔融实验具有粉末试样实验所无法比拟

---

① 吴福元,1990,辽北太古宙花岗质岩石的双重演化系列及花岗岩熔融体系的相平衡关系。长春地质学院博士学位论文。

的某些优越性,是模拟岩浆形成、运移及富集等动力学过程的极好手段之一。

本项研究的经费来自于博士后日常经费及博士后基金,并得到国家教委博士点基金、国家自然科学基金及北京中关村联合测试基金的资助。

本项研究自始至终都是在导师林强研究员的关注与具体指导下完成的,研究过程中,得到了王德滋、周新民、邓晋福、邱家骥、王联魁、张貽侠、林景什等教授的热情鼓励与指导,长春地质学院研究生部、科研处、地质系以及岩石教研室、成岩成矿实验研究室、高温高压变形实验研究室、电子探针室、透射电镜室、北京大学地质系电子探针室及有关老师为作者提供了便利的工作条件,保证了项目的及时完成。工作过程中还得到方占仁、卢民杰副教授及马瑞、刘村文、葛文春、舒桂明等同志的热情帮助,在此向以上单位和个人表示衷心地感谢。

本项目的研究报告已于1992年7月通过评审,评审专家有王德滋、周新民、邱家骥、王联魁、郭莫岚、李兆鼎、张貽侠、卢良兆等教授。对诸位师长的高度评价,作者表示衷心地感谢。现根据评审意见,对原报告稍做修改,予以出版。

衷心感谢王德滋教授在百忙中为本书作序。

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第1章 花岗质岩石熔融实验研究的发展与主要成就</b>   | 1  |
| 1.1 花岗质岩石熔融实验研究的主要进展及成就          | 2  |
| 1.1.1 近二三十年来实验进展的标志              | 2  |
| 1.1.2 花岗质岩石实验研究的主要进展             | 3  |
| 1.2 存在的主要问题及发展动向                 | 7  |
| 1.2.1 粉末试样熔融实验的局限性               | 7  |
| 1.2.2 近来实验岩石学研究的主要动向             | 9  |
| <b>第2章 花岗质岩石块状样品的熔融实验研究及其进展</b>  | 11 |
| 2.1 块状样品熔融实验的简要回顾                | 11 |
| 2.2 块状样品熔融实验的进展与主要研究内容           | 13 |
| 2.2.1 熔融作用及其变形机制                 | 14 |
| 2.2.2 熔融作用的熔体成分与结构变化             | 15 |
| 2.2.3 岩石熔融的动力学体制及其转变             | 20 |
| <b>第3章 花岗质岩石块状样品的熔融实验及局部熔融体系</b> | 25 |
| 3.1 英云闪长岩的熔融实验                   | 25 |
| 3.1.1 样品特征                       | 25 |
| 3.1.2 样品的制作与实验条件                 | 26 |
| 3.1.3 粉末试样的熔融实验结果                | 28 |
| 3.1.4 块状岩样的熔融实验结果                | 29 |
| 3.1.5 块状样品的局部熔融体系及其平衡性质          | 36 |
| 3.2 花岗闪长岩的熔融实验研究                 | 45 |
| 3.2.1 样品特征                       | 46 |
| 3.2.2 样品制备及实验条件                  | 49 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 3.2.3 粉末试样研究 .....                   | 49         |
| 3.2.4 块状样品的实验结果 .....                | 55         |
| 3.2.5 局部熔融体系及其平衡性质 .....             | 64         |
| 3.3 二长花岗岩的熔融实验研究 .....               | 71         |
| 3.3.1 样品特征 .....                     | 72         |
| 3.3.2 样品制备及实验条件 .....                | 73         |
| 3.3.3 熔融实验结果 .....                   | 75         |
| 3.3.4 熔体成分变异与局部体系 .....              | 80         |
| 3.4 含水体系的熔融作用过程与局部熔融体系 .....         | 90         |
| 3.4.1 流体迁移与交代作用 .....                | 90         |
| 3.4.2 熔体的发育过程与局部体系 .....             | 91         |
| <b>第4章 块状样品含硼体系的熔融实验 .....</b>       | <b>95</b>  |
| 4.1 含硼体系熔融实验研究简介 .....               | 95         |
| 4.1.1 硼的助熔效应 .....                   | 95         |
| 4.1.2 硼与体系的相关系 .....                 | 96         |
| 4.2 块状样品含硼体系的熔融实验 .....              | 97         |
| 4.2.1 实验简介 .....                     | 98         |
| 4.2.2 含硼体系熔融作用的结构表现 .....            | 99         |
| 4.3 含硼体系的熔体成分与熔融性质 .....             | 107        |
| 4.3.1 熔体的化学成分特点 .....                | 107        |
| 4.3.2 熔体成分变异与熔融性质 .....              | 114        |
| 4.4 熔体发育过程与熔体分凝 .....                | 116        |
| <b>第5章 应力作用下块状样品的熔融实验与失水熔融 .....</b> | <b>124</b> |
| 5.1 实验方法与实验过程 .....                  | 125        |
| 5.1.1 实验样品 .....                     | 125        |
| 5.1.2 实验设备及条件 .....                  | 128        |
| 5.2 失水熔融的结构特征与熔体强化变形机制 .....         | 128        |
| 5.2.1 熔融作用的岩相学 .....                 | 130        |
| 5.2.2 熔融作用与应变作用的关系 .....             | 138        |
| 5.3 熔融熔体的化学成分及其变异 .....              | 146        |
| 5.3.1 熔体成分特点 .....                   | 146        |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 5.3.2 熔体成分变异——局部熔融体系 .....                | 157        |
| <b>第6章 正、反序熔融序列及其地质意义 .....</b>           | <b>160</b> |
| 6.1 吸水熔融与失水熔融的特征对比 .....                  | 161        |
| 6.2 冀东太古宙晚期深熔作用与正序熔融序列 .....              | 165        |
| 6.3 长江中下游地区中生代岩浆岩形成的<br>反序熔融序列及地质意义 ..... | 170        |
| 6.3.1 溧水盆地火山岩及其成因 .....                   | 171        |
| 6.3.2 反序熔融序列及其地质意义 .....                  | 178        |
| <b>结 语.....</b>                           | <b>181</b> |
| <b>参考文献.....</b>                          | <b>184</b> |
| <b>图 版.....</b>                           | <b>201</b> |

# 第 1 章

## 花岗质岩石熔融实验 研究的发展与主要成就

现代岩石学研究的一个重要进展就是通过实验来模拟自然界岩石的形成过程,由此产生了一门新的学科——实验岩石学 (Experimental petrology),对花岗岩来说,岩石的熔化实验是模拟其形成条件的主要内容。

有关花岗岩的熔融实验在 19 世纪就开始了常压下的研究 (Delesse, 1847; Fauque and Michel-Levy, 1891),其后几十年,花岗岩的熔融积累了大量的资料 (Greig, et al., 1931; Shairer, 1950),但这些实验都是在干系统的条件下进行的。Goranson (1932) 首次进行了含水系统 (0.15GPa) 的花岗岩熔融实验,在此基础上,花岗质岩石含挥发份系统的熔融实验资料越积越多 (Tuttle and Bowen, 1958; Luth, et al., 1964; Wyllie, 1977)。Winkler 以及他所领导的实验室首次开展了加入 An 组份的实验

(Winkler and platen, 1958; 1960; 1961; Winkler, 1965, 1976; platen and Holler, 1966), 强调加入  $An$  组份后体系熔融温度及相平衡关系的变化, 由于这种实验更接近地质实际, 他们的成果得到了广泛的应用。

## 1.1 花岗质岩石熔融实验研究的主要进展及成就

### 1.1.1 近二三十年来实验进展的标志

本世纪六七十年代是花岗质岩石熔融实验资料大量积累的阶段, 主要表现在:

①实验压力逐渐加大: 自 Tuttle 和 Bowen (1958) 进行了常压至 0.36GPa 条件下花岗岩—水体系 ( $Q-Ab-Or-H_2O$  系) 的相图实验以后, Luth 等人 (1964) 将实验压力推高至 1.0GPa, 而 Wyllie 等人 (Stern and Wyllie, 1973; Ringwood, 1968; Piwinskii, 1974)。将压力更推高到 3.5GPa, 因而出现了高压下花岗岩的实验。

②实验岩石的范围逐渐扩大: 在这类实验中, 所用的原料既有天然花岗岩, 包括花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩、正长岩、伟晶岩等, 也有火山岩 (如黑耀岩、流纹岩、英安岩、花岗斑岩等) 和沉积岩 (包括粘土页岩、钙质粘土和硬砂岩), 而大量运用的还有人工合成花岗岩和用化学试剂配制而成的花岗岩玻璃。

③挥发份种类增多: 自 Goranson (1932) 年首次进行了水体系的实验以后, 含其它挥发份体系的实验也开展起来, 现在的实验资料除  $H_2O$  挥发份以外,  $CO_2$ 、 $HF$ 、 $NH_3$ 、 $SO_2$ 、 $P_2O_5$ 、 $HCl$ 、



$\text{Li}_2\text{O}$  以及 B 等挥发份的实验研究都有较可靠的资料。

④进行了不同含水比例条件下的熔融实验：这方面的研究主要是由 Wyllie 及其领导的研究小组在 70 年代开始倡导的 (Stern and Wyllie, 1975; Maaloe and Wyllie, 1975)。他们特点是开展了不饱和水情形下的实验研究，探讨熔融体系中不同矿物的稳定范围。目前这方面的研究主要朝两个方向发展，其一是向多挥发份体系 ( $a_{\text{H}_2\text{O}} < 1$ ) 方向发展，研究在不同水活度情形下体系的相平衡关系 (Ebadi and Johannes, 1991, Johannes and Holtz, 1990)；其二就是向水不饱和的天然岩石体系方面发展 (Vielzeuf and Holloway, 1988; Le Breton and Thompson, 1988)。尽管目前这方面的资料还很不充分，但研究的结果却具有十分重要的意义。

⑤过量组分对熔融作用的影响：从 70 年代开始，人们又将一部分注意力从纯的  $\text{Q-Ab-Or-H}_2\text{O}$  系或  $\text{Q-Ab-Or-An-H}_2\text{O}$  系的研究转向含过量组份或附加组份 (excess and (or) additional Components) 体系的研究，探讨过量组份 ( $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等) 对体系熔融温度及熔融性质的影响 (Thompson and Alger, 1977; Huang and Wyllie, 1974; Winkler, 1979; Whitney, 1975; Naney, 1983)。目前这方面的研究已积累了丰富的资料 (Grant, 1985; Thompson, 1982)，对解释花岗岩的成因具有重要意义。

由于上述实验领域的扩大，花岗岩熔融体系的资料大为增加，并形成了一系列的理论，这些资料对解释花岗质岩石的成因起了决定性的作用。

### 1.1.2 花岗质岩石实验研究的主要进展

综观近几十年来花岗质岩石熔融实验研究的结果，下述方面的成就集中体现了该领域的主要进展。

#### 1. 挥发份对岩石熔融温度的影响