

34347

中国科学院贵阳地球化学研究所 著

华南花岗岩类的 地球化学

地质出版社

华南花岗岩类的地球化学

中国科学院贵阳地球化学研究所 著

科学出版社

1979

内 容 简 介

本书是我国区域性花岗岩类的地球化学研究成果。通过大量野外观察和室内测试、实验,对华南花岗岩类的分布规律、形成时代、地质特征、造岩矿物、副矿物、岩石化学、微量元素地球化学、熔融和形成时的温度和压力条件等进行了研究和总结,并在此基础上论述了华南花岗岩的成因、地球化学演化规律以及与矿床形成的关系。本书是一部多学科研究的综合性论著,对于探讨成矿规律、寻找矿产资源和研究岩石成因、地壳物质的演化等基础理论问题,都具有一定的参考价值。

全书除绪论和结论外,共分十章:一、华南地质构造及各时代花岗岩类;二、花岗岩类某些地质特征;三、花岗岩类的分类与主要造岩矿物;四、花岗岩类副矿物;五、花岗岩类岩石化学;六、花岗岩类微量元素的地球化学;七、花岗岩类地球化学实验;八、花岗岩类成因讨论;九、花岗岩类的演化;十、花岗岩类成矿作用的若干问题。

华南花岗岩类的地球化学

中国科学院贵阳地球化学研究所 著

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1979 年 10 月第一次印刷 印张: 26 3/4

插 1—3,050 插页: 稿 8 平 7

印数: 平 1—2,330 字数: 624,000

统一书号: 13031·984

本社书号: 1387·13—14

定价: 精装本 7.00 元
平装本 5.65 元

(另附彩色《华南花岗岩类与主要断裂分布图》一幅,随书发行)

前 言

华南地区蕴藏着极为丰富的矿产资源,尤其是有色金属、稀土、稀有金属等矿产在我国国民经济建设中有着重要的地位。众所周知,华南的钨矿著名于世。先进技术工业所需要的钽、铌及重稀土金属,近几年来在华南有了许多新发现。此外,锡、钼、铋、铍、锆、铪等矿床也都具有重要的工业价值。而这些矿产的形成,大多数在时间上、空间上、成因上与花岗岩类有密切的关系。所以,对花岗岩类及有关成矿作用的研究,不仅是地学领域的重要理论课题之一,而且对今后的找矿勘探工作亦将会提供一定的科学依据。

华南地区花岗岩类岩石分布广泛,约占全区面积的四分之一。在地质时代上,四堡期、雪峰期、加里东期、海西期、印支期以及燕山期都有花岗岩的形成,而且具有多种成因,是世界上具有特色的一个地质单元。因此,在这样一个地区进行系统的花岗岩类的地球化学研究,对于进一步探讨地壳的物质组成和演化,亦是一个重要的环节。

解放以来,华南地区的地质工作有了飞跃的发展,在区域地质调查、普查找矿以及火成岩专题研究等方面做了大量的工作,在此基础上,对花岗岩类及其有关的成矿问题进行过许多研究和总结,大家比较熟悉的有广东区测队从事研究的南岭侵入岩,南京大学地质系多年探讨的华南各时代花岗岩类及其与成矿关系的研究以及有关单位在各种刊物上已发表的论文、工作报告等科研成果。

对于华南地区花岗岩类及其成矿作用的研究,也是我所用时较长,投入人力较多的一项科研工作,大体经历这样几个阶段:

1958—1960年大跃进时期,我们在有关地区地质队和矿山的协助下,开展了以稀有、分散元素为重点的找矿研究和物质成分查定工作,并对含稀有金属花岗岩的成因和岩石学、矿物学问题作了初步的探讨。

1961—1970年,着重于对于稀有金属及其他金属有关的花岗岩,配合有关单位做了物质成分和成矿规律的研究,而同时开展了花岗岩类的同位素年代学和成矿过程的高温高压实验等工作。

在无产阶级文化大革命中,我们敬爱的周总理非常关心科研工作,作出了关于在广泛深入实际的基础上把科研工作往高里提以及必须加强基础理论研究的指示,非常及时地给我们指明了科研工作的方向和道路。1972年,我们在面上调查的基础上,感到有必要对过去华南地区花岗岩类的许多零星而无系统的研究工作进行归纳、补充、提高和总结,从而进一步制定了华南花岗岩类的专题研究和总结计划。在1972—1975年间,除了矿点的工作外,还补充了面上的工作,对不同时代、不同矿化类型的花岗岩类进行了野外调查、采样、分析、实验和资料收集等工作。

在华南广大的地质工作者以及我们多年工作的基础上,我们觉得有条件对花岗岩类的地球化学特征进行一次总结,这些条件是:

1. 华南是我国地质工作程度比较深入的地区,20万分之一区域地质测量大部分已经完成,而且对于花岗岩类有过许多专题研究,积累了非常丰富的基本资料;

2. 在华南,与花岗岩类有关的金属矿山星罗棋布,许多山地工程对花岗岩体直接观察创造了有利的条件。除了钨矿、放射性金属矿以外,在七十年代勘探的含钽花岗岩,如414、430、101、桂水等,都对花岗岩进行了详细的勘探,使我们得以认识具有分异交代作用的花岗岩的各岩相带呈似层状分布以及钨、锡、钼、铌、稀土等呈带状分布的特征。对于钠长石化花岗岩成因的认识,可以说从这里得到了很大启发。从国外发表的资料看,无论在西方国家还是在苏联,都还没有取得过象414和430岩体等这样完美的地质资料;

3. 华南地区,对于花岗岩类的时代研究得较为详细,除了野外地质观测外,湖北地质科学研究所、桂林冶金地质研究所、北京铀矿地质研究所、南京大学及我所,都在这里做了大量的同位素地质年龄测定,积累了约550多个年龄数据;

4. 约有80%左右的花岗岩体具备岩石薄片鉴定和岩石化学分析资料,在我们这次工作中,整理了近800个岩石薄片和近2000个岩石化学全分析的成果,这些成果,除我所作的一部分外,大都取自各省区测队的资料。

在总结中,我们补充了较多的室内研究和实验工作,大体可以概括为:

1. 对不同时代、不同成分以及不同成矿特征的花岗岩类的主要造岩矿物和副矿物做了物理性质和化学成分的系统分析;

2. 为了确定花岗岩中微量元素的丰度,对花岗岩类岩石样品做了系统的收集、采集和分析(化学分析、原子吸收光谱分析、X荧光光谱分析和仪器中子活化分析等);

3. 开展了包裹体测温及在高温高压条件下花岗岩类岩石熔化和结晶作用的实验;

4. 开展了放射性及稳定同位素(铷)的测定的研究。

在上述工作的基础上,于1975—1977年进行本书的编写工作,初稿于1977年6月完成,随即邀请了在华南工作的有关生产、教学和科研单位对初稿进行评议,嗣后,根据评议中提出的修改、补充意见,我们再作了充实和提高,于1978年元月正式脱稿。

全书共分十章,前面二章,分别对华南地区的地质特点、构造分区、花岗岩的时代划分及地质特征作了概括的叙述。第三章至第六章讨论了花岗岩类的造岩矿物、副矿物、岩石化学、微量元素地球化学等问题。第七章从实验角度讨论了花岗岩的几种形成方式。第八章和第九章分别就本书的中心内容,即花岗岩的重熔成因(以重熔成因为主的多成因论)和花岗岩的地球化学演化进行专题讨论。第十章简略地阐述了与花岗岩类成矿作用有关的几个问题。

限于力量、水平以及组织工作等方面的原因,我们感到本书中存在许多缺点:

1. 野外地质调查工作做得少,主要是依据华南各省区测队等的工作成果;

2. 地球物理资料收集和应用很少;

3. 没有测定和应用氧、锶等稳定同位素;

4. 没有对Cu、Mo、Sn、Pb、Zn元素等进行全面的研究。

此外,还必须说明的是,由于华南地域广阔,花岗岩地质又是一个复杂的学术课题,而我们工作的范围是有限的,参加工作的同志接触问题的角度和方法的不同,在认识上也还有许多不一致的地方,遵循毛主席提出的“百花齐放,百家争鸣”的方针,在某些地方我们还是保留和反映了不同的看法和写法,以便在今后再实践中求得进一步的认识。再如关于花岗岩类分类命名的问题也是争论较多的,我们在收集整理和应用这些资料的时候,考虑了传统的、习惯的命名,没有强求一致。对于书中存在的问题和缺点,我们诚恳地希

望读者给予批评和指正。

本书是我所花岗岩专题研究组的集体著作,涂光炽同志和郭承基同志负责业务指导,各章的主要执笔人如下:

绪论(王联魁);第一章(杨科佑、范嗣昆、吴学益);第二章(王联魁);第三章(于学元、顾雄飞、朱为方);第四章(洪文兴、高振敏、侯鸿泉、王三学、张绍立、范育祥);第五章(孙世华);第六章(赵振华、王中刚、刘义茂、李绍柄、白正华);第七章(王联魁、赵斌、卢焕章);第八章(涂光炽、于学元);第九章(郭承基);第十章(王中刚);结论(涂光炽)。

参加各章工作的同志还有:林树本、吕增文、朱正强、杨朝樾、王德孚、陈福明、丁暄、杨柏林、张湖、张玉泉、桂训唐、潘晶铭、林国珍、吴六汀、南君亚、吴宗絮、王一先、钱志鑫、蔡仁安、赵惠兰、李本超、苏贤泽、裘愉卓、林传仙、林德松、徐建国、蔡元吉、李维显、李统锦、郭逸清、王贤觉、沈丽璞、宋云华、黄舜华等。

我所五室、九室化学分析及仪器分析人员完成了大量分析测试工作,此外一室、四室、五室、六室、九室、十室及绘图组、照象组、出版组及工厂有关同志也参加了这项工作。

各章初稿完成后,由王中刚、王联魁、杨科佑、王三学、赵振华、吴泽霖同志进行总编。在评审讨论会以后,各章分别由各主要执笔人进行了修改,最后,全书由涂光炽同志复审定稿。

在本书即将出版之际,我们特别怀念华南花岗岩类地球化学研究的两位已故的开拓者——李璞同志和司幼东同志。由于万恶的林彪、“四人帮”一伙的迫害,他们未能完成他们亲自开辟的研究工作。早在六十年代初、中期,他们参加和指导了我所花岗岩类的工作。李璞同志等作出了我国第一批华南花岗岩类的同位素年龄数据并提出了华南花岗岩类分期的意见。司幼东同志领导了我所花岗岩类稀有元素的地球化学研究工作,初步提出了这些元素的迁移形式和富集规律。尽管时间不长,他们已为华南花岗岩类地球化学研究开辟了道路并作出了应有的贡献。

在工作中,我们得到广西、广东、福建、江西、湖南、浙江、安徽、江苏等省的地质队、区测队以及矿山有关单位的热情帮助,他们不仅协助、指导我们的工作,而且还提供了许多宝贵的地质资料和样品,没有他们的帮助,要完成这一总结工作是难以想象的。中国科学院计算技术研究所、贵州大学数学系、湖北省地质科学研究所、江西冶金研究所、山东地质局实验室等协助我们完成了部分数学计算与分析测试工作。此外,南京大学地质系、湖北省地质科学研究所、桂林冶金地质研究所、北京铀矿地质研究所等单位在工作中亦曾给予我们许多有益的帮助,谨一并在此致以深切的谢意!

我们还要感谢参加本书初稿评审讨论会的单位和同志们,他们首先耐心地通读了全稿,向我们提出了许多宝贵的意见,帮助我们再一次对全稿作了修改。

读者同志们!对于华南花岗岩类的研究,虽然前人做了许多工作,我们现在又做了专题总结,但是我们相信,仍然还有许多工作要做,还有许多问题需要大家继续深入地去研究,我们希望,我们的这本专著能够起到“抛砖引玉”的作用,在今后能够看到更多、更好的生产和科研成果。在以华主席为首的党中央的领导下,科学一定会兴旺发达起来,一定会捷报频传,愿我们为实现祖国的四个现代化贡献更多的力量。

目 录

前言

绪论	(1)
----------	-----

第一章 华南地质构造及各时代花岗岩类	(11)
--------------------------	------

第一节 华南地质构造	(13)
------------------	------

第二节 华南花岗岩类的时代	(24)
---------------------	------

第二章 花岗岩类某些地质特征	(50)
----------------------	------

第一节 本区花岗岩类的主要地质特点	(50)
-------------------------	------

第二节 两个成岩成矿系列	(76)
--------------------	------

第三章 花岗岩类的分类与主要造岩矿物	(81)
--------------------------	------

第一节 花岗岩类的分类	(81)
-------------------	------

第二节 花岗岩类的主要造岩矿物	(87)
-----------------------	------

第四章 花岗岩类副矿物	(129)
-------------------	-------

第一节 花岗岩类副矿物的种类和研究方法	(129)
---------------------------	-------

第二节 不同时代花岗岩类副矿物	(133)
-----------------------	-------

第三节 不同成分花岗岩类副矿物	(140)
-----------------------	-------

第四节 自交代花岗岩类副矿物	(143)
----------------------	-------

第五节 花岗岩类副矿物演化特点	(147)
-----------------------	-------

第五章 花岗岩类岩石化学	(152)
--------------------	-------

第一节 华南花岗岩类岩石化学组成在成岩序列中的演化	(152)
---------------------------------	-------

第二节 华南各时代花岗岩类岩石化学成分及其演化特征	(199)
---------------------------------	-------

第三节 华南花岗岩类岩石化学成分的总体特征	(205)
-----------------------------	-------

第四节 讨论	(220)
--------------	-------

第六章 花岗岩类微量元素的地球化学	(225)
-------------------------	-------

第一节 花岗岩类中微量元素的统计分析	(226)
--------------------------	-------

第二节 花岗岩类铌、钽的地球化学	(267)
------------------------	-------

第三节 花岗岩类稀土的地球化学	(278)
-----------------------	-------

第四节 花岗岩类钨的地球化学	(303)
----------------------	-------

第五节 花岗岩类铍的地球化学	(317)
----------------------	-------

第六节 花岗岩类铷、铯的地球化学	(333)
------------------------	-------

第七节 花岗岩类氟的地球化学	(338)
----------------------	-------

第八节 花岗岩类的地球化学类型	(354)
-----------------------	-------

第七章 花岗岩类地球化学实验	(357)
----------------------	-------

第一节 花岗岩类熔化实验	(357)
--------------------	-------

第二节 花岗岩类的气液包裹体特征和成岩成矿温度的测定	(373)
----------------------------------	-------

第八章 花岗岩类成因讨论	(379)
第一节 华南花岗岩类是多成因的	(379)
第二节 花岗岩类重熔成因的依据	(381)
第九章 花岗岩类的演化	(387)
第一节 花岗岩类的演化特征	(388)
第二节 控制演化的主要因素	(396)
第三节 花岗岩的演化与找矿问题	(401)
第十章 花岗岩类成矿作用的若干问题	(403)
第一节 花岗岩类成矿的物质来源问题	(403)
第二节 花岗岩类成矿的时间规律	(405)
第三节 花岗岩类成矿的空间规律	(408)
第四节 其他有关问题	(412)
结论	(418)

绪 论

花岗岩类占据地壳上部的大部分,是地表分布最广的深成岩,尤其在我国华南地区,分布更是广泛。据南京大学统计资料,它占南方八省面积的 18.5%,闽、粤两省所占比例还要大,高达 35% 以上。从地球科学看,花岗岩类是地球的内部和外部,即地幔与地壳之间长期矛盾发展的产物和标志。本区花岗岩由于其活动的广泛性、典型性和复杂性,同时又处在西太平洋大陆边缘中心部位,无疑是太平洋地质研究的一个重要环节,因此华南花岗岩的研究对认识环太平洋地质,揭示地球内外矛盾间的某些规律性,其中包括对板块构造的认识和对区域构造活动、变质作用、岩浆活动、热液作用和成矿规律等的理解将会起推动作用。

华南花岗岩类分布地区,也是金属矿产丰富聚集地区,两者关系密切,尤其是钨、锡、钼、铋、铜、铅、锌以及稀有、稀土金属等矿产非常富饶,这些都是建设社会主义极其重要的物质基础,因此,本区乃是我国重要金属原料资源基地之一。解放以来,随着地质普查和勘探工作的蓬勃发展,积累了相当可观的地质资料和生产实践经验,如能有重点、有计划地总结和提高,无疑将会直接和间接地推动生产的发展。为了多快好省地建设社会主义,深入研究和探索华南花岗岩类地球化学和成矿关系,了解其间的内在联系和发生、发展规律等,以便有效地开展区域性地质测量、地质普查和勘探,已成为当前迫切要求和重要的任务。所以研究华南花岗岩类的地球化学,对促进国民经济发展,支援世界革命都具有重大意义。

今将花岗岩成因、成矿和构造的关系等问题简要评述如下:

一、关于花岗岩成因

花岗岩的成因是个长期争论不休的问题。争论大体可分为两派观点: 1) 岩浆派(包括原始岩浆和再生岩浆), 2) 花岗岩化派(即变质派)。在过去 100 多年的争论中,不同阶段其争论的重点和内容是不同的,其主导地位也是交替的。

(一) 显微镜应用以前的阶段

早在十九世纪中叶就开始了花岗岩成因问题的争论,斯克罗普 (Scrop, 1825)、布恩森 (Bunsen, 1815) 和郝屯 (Hutton) 等岩浆论者,根据不整合花岗岩产出特点,认为粗粒结构的石英、长石和云母组成的岩石,是从熔体中晶出的,水在花岗岩浆中对结晶起着很大作用。开始与岩浆派对立的派别是水成论,认为花岗岩是由水溶液沉淀出来的,后来演变为花岗岩化,如吉尔豪 (Keilhau, 1837)、L. Von 巴克 (Buck) 等十九世纪初认为升高温度或提高压力,可使已成岩石转变成花岗岩和正长岩。该阶段主要根据是靠野外观

察,即宏观地质研究结果。

(二) 显微镜阶段

十九世纪末和二十世纪初,随着显微镜使用和物理化学规律引入岩石学,开始了革命性的发展。岩浆论者罗森布施 (Rosebusch, 1873—1914) 总结了以前研究结果,第一个提出了原始岩浆的概念,由于原始岩浆分异,形成自然界各种各样的火成岩,其中包括花岗岩。他的基本论点是: 1) 既然假定每种喷出岩流不能都各有专门来源,那么必有一种原始岩浆,而其它都是分异产物; 2) 水是岩浆的初始组成,熔体溢出和固化中释放出大量水,在此之前水呈化合物或呈溶液或是以某种胶体形式存在于岩浆中; 3) 岩浆结晶作用包括了整个去水的过程,因而固体岩石不含水,并不表示原始岩浆中没有水; 4) 由于岩浆是硅酸盐熔体的混合物,并且常含水,结晶过程绝非偶然,而应是合乎混合溶液结晶定律的; 5) 原始岩浆的结晶分异,应当是晚期产物比早期的更酸性些,实际上的确是晚期分异物常属贫 Mg、Fe、Ca, 富 Al、K、Na 的岩石; 6) 残余岩浆可能使水富集,酸性残余岩浆可能是早期基性岩浆分异的产物。

鲍温 (Bowen, 1910—1915) 在罗森布施的相当完整的理论基础上,进行了干体系硅酸盐实验,用实验资料进一步证明岩浆分异的理论,建立了结晶分异理论和反应律,构成岩石学的物理化学基础,发表在他的《火成岩演化》(1928)^[5] 一书中。

此外,还有尼格里 (Niggli, 1923)^[20]、戴里 (Daly, 1933)^[6] 等均是岩浆论的代表,总的都是认为玄武岩岩浆结晶分异产生自然界各种火成岩其中包括花岗岩即所谓岩浆派的一元论者。与此同时还有二元论者。

二元论者布恩森 (1851)、迪罗歇 (Durocher, 1909)、列文生-列辛格 (Левинсон-Лессинг, 1934)^[36] 等认为,火成岩是由两种世界性的基性和酸性岩浆混合和分异而成的,其主要论据是: 1) 存在分布广度差不多的花岗岩和玄武岩; 2) 根据花岗岩含钾高,从化学观点考虑,不可能由基性岩浆分异出花岗岩成分的岩浆。

岩浆论的证据,除野外地质观察外,也进行了室内显微镜研究和实验研究,并引进了物理化学定律,从而使岩浆论发展到一个相当成熟的阶段,特别是在鲍温的实验工作发表以后,岩浆论的一元论者在论战中占据了主导地位,不过花岗岩化,特别在法国也获得了一定发展。

花岗岩化者迪罗歇 (1857)、达布里 (Daubole)、拉斯罗伊兹 (Lacroix, 1899)、米歇尔-莱维 (Michel-Levy, 1893) 和芬兰的塞得尔奥姆 (Sederholm, 1907),根据不同的片麻岩和片岩逐渐过渡成花岗岩,从而认为花岗岩物质的带入使已成岩石转变为花岗岩。所以岩浆论和花岗岩化论在十九世纪和二十世纪初均有相当发展,不过主流派仍是岩浆论。

(三) 实验岩石阶段

二十世纪四十年代以来,在实验岩石学方面由于实验装置之改进,有可能进行含水体系的实验研究,因而,使花岗岩研究跨入崭新阶段,无论岩浆论者,还是花岗岩化论者,均

获得一部分实验结果的支持。不过岩浆论者在花岗岩浆的来源方面仍有分歧意见,因而又可分为: 1) 玄武岩浆结晶分异成派生花岗岩岩浆; 2) 地壳重熔的再生花岗岩浆。花岗岩化论者,在交代方式上他们也各持不同论点,有的是主张“干”交代论,有的是主张“湿”交代论。

格兰松 (Goranson, 1931—1932)^[13,14] 作了水在花岗岩熔体中溶解度的实验,证明水不是无限度地溶解于花岗岩浆中的,水能降低花岗岩熔化的温度等。

塔特尔、鲍温 (Tuttle, Bowen, 1958)^[27] 作了人工“花岗岩” $\text{Ab-Or-Q-H}_2\text{O}$ 体系的实验,比较全面地研究了人工合成标准“花岗岩”的相图。发现三相共结点为 4000 巴和 650°C ,以及低温槽、等压结晶、绝热结晶等,并与天然花岗岩熔化实验作了对比,其结果基本一致,从而使花岗岩的熔化和结晶的某些规律性认识得到实验工作的支持。以后各国都进行了相当多的合成花岗岩体系和天然花岗岩实验,如 $\text{Ab-Or-An-H}_2\text{O}$ [约得 (Yorder), 1957]^[31], $\text{Ab-Or-An-Qz-H}_2\text{O}$ [温克勒 (Winkler), 1975]^[29], $\text{An-Qz-H}_2\text{O}$ [斯特沃特 (Stewart), 1956],以及天然的花岗岩、英云闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩熔化实验 [皮温斯基 (Piwinskii), 1968—1972^[22,23,24]、布龙 (Broun, 1963) 和希达罗夫 (Хитаров, 1957—1975)^[41,42,43]],还有沉积岩(页岩、硬砂岩、海绿石等)熔化实验 [沃特 (Wait, 1958)、温克勒 (Winkler, 1957—1961)、惠特 (White, 1958—1961)]等。同时还有除水以外的含其他挥发份或含某些盐类的人工合成“花岗岩”或天然花岗岩的实验,其结果表明,多数挥发份和盐类有降低熔化和结晶温度的作用。这些实验为地壳重熔学说提供了有利的证据。

沃尔顿 (Walton, 1960)^[28] 根据塔特尔 (1958) 等的实验结果,提出地壳“深熔模型”,以大量热流为前题条件,随地壳之拗曲作用,含水岩石下沉,由于温度升高和压力增大,水首先产生碱硅酸盐溶液,随后形成硅酸盐熔体,在 650°C 、4000 公斤/厘米²的条件下,产生“花岗岩”组分的熔体,当含水 6% 时可以全熔,如果原岩仅含 1% 的水,可获得 16% 熔体。此外,克兰克 (Krank, 1960)^[17],温克勒 (Winkler, 1958),梅内尔特 (Mehnert, 1968)^[19],彼得洛夫 (Петров, 1972)^[39] 等均认为地壳深熔的深度约 18—30 公里 (相当 6—8Kb 水压) 和温度在 $650—700^\circ\text{C}$,甚至可能在 10—16 公里深 (相当 2—4Kb 水压) 和 $640—750^\circ\text{C}$ 的条件下产生再生岩浆。因此,地壳重熔的再生花岗岩浆说在岩浆论中成为主流。至于岩浆论中的玄武岩分异的观点,似乎与实验结果有出入。实验表明,玄武岩浆分异仅能得到闪长岩,得不到含石英的岩石。如果原始岩浆内含自由 SiO_2 ,其结晶分异才有可能获得含石英的花岗岩。另一方面大量的地质资料表明,巨大的花岗岩基侵入体并没有伴生大量基性深成岩的辉长岩,通常和辉长岩伴生的仅是小的花岗岩侵入体,因此,大花岗岩基附近缺少辉长岩母岩体,这也是玄武岩浆结晶分异论的致命弱点之一。所以基性岩浆结晶分异论随着时间推移,愈来愈遭到多数地质学家的反对 [巴特 (Bath, 1952)、梅内尔特 (Mehnert, 1968)、科波捷夫-得沃尔尼科夫 (Копотев-Дворников, 1962)、徐克勤 (1966)、马莫 (Marmo, 1971)]^[3,18,35]。

关于花岗岩化方面的实验,有“干”和“湿”之分。有关“干”的实验,如离子扩散实验,罗森奎斯特 (Rosenquist) 研究了放射性同位素于 $300—1000^\circ\text{C}$ 在微斜长石、钠长石、石英中扩散速度为 $10^{-8}—10^{-12}$ 厘米/秒,一百万年的最大扩散距离是 1 米,如果有其他因素参与,则扩散速度还要慢些。花岗岩化岩石厚度巨大,单个晶体扩散速度如此慢,因此,实验结果不具有地质意义。所以“干”扩散交代理论目前赞成者已很少。有关“湿”的实验,奥

尔菲莱 (Orville, 1963)^[21] 于 350—700℃ 和 2Kb 的条件下 $\text{KAlSi}_3\text{O}_8\text{--NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--NaCl--KCl--H}_2\text{O}$ 体系的实验结果表明,钾离子可在气相中扩散,高温处钠长石交代钾长石,低温处钾长石交代钠长石,约翰逊和温克勒 (Jehanues and Winkler, 1965) 在 2Kb 水压和 600℃ 条件下用水来溶解石英、钾长石和斜长石,温度梯度使花岗岩组分转移,Na、K、Al、Fe 向低温端迁移,Ca、Mg 向高温端迁移。此外,还有许多临界和超临界温度下钾长石、钠长石、石英和白云母等的溶解度实验和结晶实验,其结果都一致表明,含水花岗岩体系在温度不高 (600℃ 以下) 条件下,通过某些组分的迁移或从水溶液中结晶均可获得花岗岩成分的矿物组合。长石有序和无序研究及矿物测温等研究均表明,花岗岩化即交代说(“湿”)不只是理论上的探讨,而且也得到实验上的支持。所以继韦格曼 (Wegman, 1935)、里德 (Read 1948)^[25]、古德斯皮得 (Goodspeed, 1948)^[9]、苏多维科夫 (Судовиков, 1954)^[40] 之后,马莫 (Marmo, 1971) 提出所谓花岗岩化的“水热模型”,即含水沉积岩由于构造运动下沉到区域变质的深度,在 400—450℃ 水从重结晶作用中被排出,并带出花岗岩组分,使上覆岩石产生花岗岩化,下面岩石本身则产生花岗闪长岩化,利用此模式解释大花岗岩基的形成。

综上所述,花岗岩问题论战的结果是,岩浆派中以地壳重熔(深熔)说占主导,花岗岩化派内赞成“湿”交代说者占绝对优势。因此,看来历史上不同学说争论是此起彼伏的过程,是不同时期着重研究问题的某一个侧面的结果。随着科学工作的深入,那种仅强调一个侧面、排斥另一个侧面的局势,逐渐向接近全面的方向发展,致使分歧观点接近统一,所以多数地质工作者趋向承认深熔(重熔的再生岩浆)、交代(花岗岩化)和基性岩浆分异三种成因花岗岩在自然界均存在的观点,不过对具体岩体,具体地区来说,这三类花岗岩何者占比例大小仍存在分歧和争论。

(四) 微观和宏观(全球性)研究相结合的高度综合阶段

近年来,地质学中板块学说的兴起,海洋地质和海洋地貌、航空照相和卫星影象、现代火山与大陆岛弧火山的研究,地球物理学(地磁、地震、重力)、古地磁、实验岩石学、矿物学、同位素地质学以及微量元素地球化学等研究,这种种方面的研究使地质科学进入到高度综合性的新阶段。对花岗岩成因的争论,必然带来强烈影响。从目前研究花岗岩的手段来看,各种研究方法对花岗岩成因的认识都提供了一方面有益的证据。

微量元素地球化学, Rb、Sr、Tl、Ga、Th、U、V、Cr、Ti、Pt 族以及某些成矿元素 TR、Nb、Ta、Be、W、Sn、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn、As、Hg、Sb 等丰度和元素对的研究,为花岗岩的来源和成因类型划分提出有益的资料。地壳重熔(深熔)型花岗岩富 Rb,某些深源(非地壳的、基性岩浆衍生的)花岗岩对 Cr、V、Ti 是很富有特征的,据 Л.Н. 奥夫钦尼科夫 (Овчинников, 1970)^[38] 重熔型花岗岩富 Nb、Ta、Rb、Cs、Be、Sn、W、Zn、TR、Mn,基性岩浆衍生的花岗岩含稀有元素和 Rb 低,并且 K/Rb 大,花岗岩化型其微量元素特征介于以上两种类型之间。

同位素地质年龄测定对花岗岩研究,愈来愈显示出重要意义,系统地进行同位素地质年龄测定,不仅提供花岗岩时代和演化的证据,而且可用同一岩石不同副矿物长石云母测定,来探讨花岗岩的成因类型。如芬兰、苏联的前寒武纪花岗岩的云母年龄是 1800 百万

年,微斜长石是 1500 百万年,相差 300—350 百万年。为微斜长石形成晚于云母提供一方面的证据。我国摩天岭花岗岩中同一岩石不同类型锆石同位素年龄不同,来自沉积岩或变质岩的锆石年龄明显地老于花岗岩本身新生的锆石年龄,两者相差约 500 百万年。同位素地球化学特征, $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 、铅、氧同位素研究,对花岗岩物质来源提供非常有趣的资料。

矿物气液包裹体研究,不仅直接地可获得花岗岩结晶温度,而且包裹体特征的研究对阐明花岗岩成因,也是很重要的方法,我国南岭花岗岩包裹体测温结果是 600—700°C 以上,有时含有玻璃包裹体等,为岩浆成因提供一方面的证据。

副矿物研究,从形态、种类、含量和成分研究,不仅可指明花岗岩成因特点,而且对成矿也有明显的指示作用。据 B. B. 利亚霍维奇(Ляхович, 1972)^[37]的资料,重熔花岗岩的顶部多萤石、绿柱石、铌钽铁矿、黄玉等,接触带附近多榍石、磷灰石、褐帘石,在交代型花岗岩中副矿物不仅分布上不规律,并且富含堇青石、石墨、石榴石、电气石和圆滑的锆石等,与深部基性岩有关的花岗岩类多含榍石、磁铁矿和磷灰石等。

主要造岩矿物钾长石、斜长石、云母和石英的研究,愈来愈显示其作用,长石三斜度和有序、无序以及巴尔特(Barth)作为地质温度计的方法、云母的多型和成分研究,石英相转变等研究,对花岗岩成因也提供了很有意思的证据。例如,长石有序和无序程度,不仅分别表示其结晶温度低和高,而且判别其晶出过程和时代新老也有帮助;云母中 Mg 、 Al 、 Fe^{3+} 的变化,可作为温度、氧逸度和碱性变化的指示剂^[30]; β 石英转变成 α 石英是 575°C (1 个大气压下),据约得(Yoder, 1950)的资料每升高静压 1000 公斤/厘米²其转变温度提高 25°C,根据贝特切(Boettcher, 1968)^[4]实验,在花岗岩-水体系中于温度 670°C 和 2.9 万巴以上的条件下,石英可转变成柯石英等等。

岩石结构构造特点,如条纹构造、蠕状石、变晶结构^[1,2]等也是划分花岗岩成因类型的标志之一。

实验岩石学发展,到目前为止,不仅可以模拟地壳花岗岩形成的某些条件,而且还可以实验更深处地幔物质相转变及测定某些岩石的物理化学参数,从而使我们有可能探索深至 100—200 公里,甚至上千公里深处岩浆形成条件和物质状态的转变等。

古地磁、海洋地质、海洋地貌、火山岛弧岩石学等研究,不仅为板块理论提供研究的必要条件,而且对花岗岩成因研究打开更广泛的思路,环太平洋活动带广泛分布花岗岩大岩基和火山岩带,占据着巨大空间,同时发现在水平方向上具规律性的变化,如岛弧范围在向大陆方向上有玄武岩 → 安山岩 → 流纹岩的变化趋势。这些全球性的岩石分布的规律性,如大花岗岩基带延续上千公里,跨过地槽和地壳上部不同的构造单元,所以从地壳的地槽发生和发展来理解大花岗岩基带形成,显然是有困难的,在逻辑上必须联系到全球构造的发生和发展。

地球物理方法包括人工地震、磁力、重力等综合研究的结果,表明地球深部物质呈固态和层状分布,测出随深度变化温度、压力和岩石密度的变化参数。重力、磁力和人工地震以及地震、火山研究结果表明,地下同时也存在熔融状态的岩浆源或岩浆室,其深度在海洋内 60—150 公里,大陆上 150—250 公里,岩浆室的存在也是产生地震的震源点;在阿拉斯加人工地震网发现几十个浅部岩浆室,浅者在 8—10 公里深处,大小约 $5 \times 2 \times 2$ 立方公里,深者达 50 公里,面积 50×20 平方公里,厚数公里;在堪察加也发现在深 4 公里

处的岩浆室。此外,地球物理资料还提供了花岗岩体产状和形态的宝贵资料。一般花岗岩基并不是无“底”的,厚度多数是2—8公里范围以内^[34,26,32],岩浆通道处可达10—12公里,甚至更厚。

正是这些愈来愈精确的资料的积累,由微观至宏观多种手段的应用,为花岗岩成因的认识提供了广阔远景。在新的资料基础上,目前对花岗岩基成因的认识,又有向反方向发展的趋势,即认为花岗岩浆来源于基性和超基性物质(地幔)的演变。

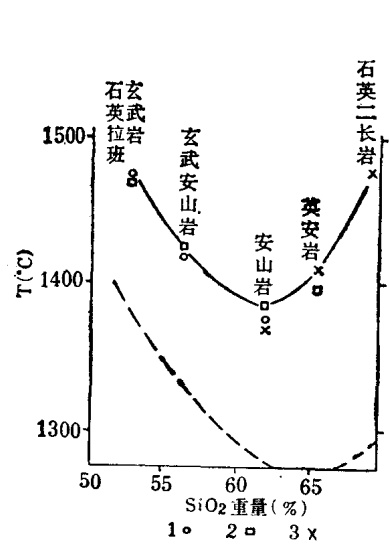
多伊布鲁斯 (Doe Bruce, 1967)^[7,8] 据太平洋沿岸和美国中部花岗岩的铅、锶同位素的差别,推论美国太平洋沿岸花岗岩属非地壳产物,为一种特殊来源的岩浆。

松本 (Matsomoto, 1964) 根据实验资料,制定地幔7个相(见下表),推论在深300—1000公里深处存在富Na、Al、Mg,贫Ca、Fe的酸性分异体,成分接近花岗岩(钙碱性),地幔物质对流结果,使其上升到4相,引起部分或全熔产生原生花岗岩浆。

地 幔 相

地幔相	1	2	3	4	5	6	7
压力(千巴)	0—6	6—26	26—31	31—89	89—120	120—200 或 300(?)	200—300
深度(公里)	0—20	20—95	95—110	110—300	300—420	420—1000	1000

格林 (D. H. Green)、林格伍德 (A. E. Ringwood, 1968)^[10,11] 根据在30—40 Kb (相当100—140公里深) 实验结果,在干体系中岩石系列的液相线和固相线最低温度点是安山岩成分,而不是比较酸性的英安岩或石英二长岩(见下图)。在100—150公里深的干条件下玄武岩部分熔化(选择熔化)产生安山岩熔体,但是在有水的情况下,将形成英安岩或流纹岩成分的熔体。



液相线和5个合成组分结晶顺序图
(据格林、林格伍德, 1966)
实线为液相线,虚线表示接近固相线
1. 辉石 2. 石榴石 3. 石英

皮温斯基 (A. J. Piwiskii, 1968)^[22-24] 根据美国西部岩基的天然花岗岩熔化实验结果,花岗闪长岩和英云闪长岩熔化的温度区间都比较大,约250°C,黑云母、角闪石、斜长石多悬浮在花岗岩熔体中,认为美国西部大岩基是辉长岩浆分离结晶和地壳下部重熔花岗岩浆的混染,然后迁移至地壳上部定位,形成大岩基。

汉密尔顿 (Hamilton, 1967)^[15]、基斯特勒 (Kistler, 1971)^[16] 等认为美国西部中生代大花岗岩基形成是与贝尼奥夫带热效应有关,结果使地壳下部或上地幔选择熔化,产生花岗岩浆,形成大岩基。其主要根据是这些大岩基形成的周期性、同生深成岩体的地理分布、侵入深度、Rb-Sr丰度、花岗岩原生Sr同位素组成等。

总之,愈来愈多的岩理学家认为大花岗岩基的形成,并非地壳的产物,而主要是地壳深部或上地幔的基性或超基性物质局部熔化(选择熔化)的产物。

看来,很可能地幔与地壳物质在形成花岗岩过程中是不可分割的,作为地幔与地壳的界面——“莫氏面”反映了地壳、地幔物理性质的差异,因此,地球表层的酸性岩浆活动既制约于地壳物质重熔程度,也依附于地幔物质转化方式间的比例关系。例如,地壳深部或地幔的气体、气液流体和熔体等物质,依地壳断裂体系和强度的大小,会有不同比例的物质向上迁移,从而为地壳物质的活动和转化提供先决条件,甚至参与其活动,所以发生在活动带中的花岗岩,常有花岗闪长岩或二长花岗岩¹⁾ → 花岗岩 → 富碱富硅的花岗岩 → 花岗斑岩的侵入序列。从侵位凝结的物理条件考虑,上述系列主要是由深而浅的演化顺序,它反映了地壳不断上升(隆起过程)的发展趋势。从物质来源看,该系列似乎是以地壳重熔为主的产物(不排除有部分地幔物质参与),再经过长期演化形成一系列不同特点的花岗岩侵入体,并具有一定的顺序。

二、关于构造与岩浆岩的关系

在地质和岩石学工作者中对此也存在不同观点,其主要论点有: 1) 构造产生岩浆论; 2) 构造与岩浆产生无关论; 3) 岩浆产生构造论。

在四十到五十年代,多数学者赞成第一种观点,即构造产生岩浆。在构造断裂带,由于压力降低,岩石熔化温度将降低,因而岩石熔化,导致产生岩浆,或者是由于构造摩擦生热产生岩浆等。第二种观点是构造与岩浆无关,若地壳下肯定存在岩浆带,这种情况下两者无关是合理的。构造断裂仅起通道作用,但是地球物理资料证明,深部不存在岩浆“带”或“层”。第三种观点是岩浆产生构造,即由于岩浆活动诱导构造活动。近年来很多学者倾向于这种观点,格林^[11,12]、别洛乌索夫(Белюсов)^[43]等认为,上地幔物质部分熔化、上升和聚集产生大的构造运动,或者联系到板块学说的地幔对流产生构造运动等。

从华南地区构造断裂和花岗岩间分布特点看,似乎构造与岩浆是不可分割的环节,活动带中花岗岩的形成与断裂紧密相关,常沿断裂带产生“重熔”型花岗岩,后者是构成华南花岗岩的主要成因类型。

三、花岗岩与成矿的关系

这是一个复杂的问题,到目前为止还没有获得解决。华南地区与花岗岩有关的矿床,有 Fe、TR、Nb、Ta、Li、Rb、Cs、Be、Sn、W、Bi、Mo、As、Cu、Zn、Pb、U 等矿种。它们产出在花岗岩内外接触带或附近,空间联系是明显的。其中有些矿化直接呈浸染状赋存在侵入体以内或在接触带,如斑岩铜矿、斑岩钼矿、斑岩钨矿,浸染状的 Nb、Ta、W、Sn 矿等;有的直接产在接触带上的云英岩型矽卡岩型的 W、Sn、Be、Cu、Zn 等矿,或者直接由花岗岩过渡成的伟晶岩型 W、Sn、Nb、Ta 及热液钨锡矿等。这些无疑是与花岗岩类(广义)侵入有直接成因联系。然而,另一些产出呈热液脉状或不规则矿体,如 W、Sn、Pb、Zn、Cu、Hg、Sb、U、Fe 等矿床往往在与花岗岩的成因联系上发生分歧意见。这类矿床就

1) 在华南地区,这个代表性的序列内容是相当丰富的,总趋势是基性成分降低,早期花岗闪长岩或二长花岗岩,有时还有闪长岩或石英闪长岩等,中期黑云母花岗岩,晚期浅色花岗岩即富碱富硅的暗色组分含量低的一些花岗岩,如二云母或白云母花岗岩,含锂云母钠长石花岗岩等,末期花岗斑岩还包括石英斑岩、细粒花岗岩等。

形成方式而论,有以下几种观点:

1) 再生岩浆形成的花岗岩体直接分异出的热液矿化,从而形成高-低温各种类型矿床;

2) 再生岩浆花岗岩体的深处分异,产生热液,上升至地壳浅处花岗岩体接触带附近成矿;

3) 再造成矿,花岗岩浆或花岗岩化,使围岩中成矿物质“活化”,富集成矿,或反复花岗岩化成矿等;

4) 地下水(包括深部循环热水)成矿,与花岗岩活动完全无关,属地下热循环水或冷循环水成矿;

5) 超深断裂或穿透构造断裂成矿,花岗岩与成矿溶液均来自地壳以下的上地幔,当然还有介于上述典型概念之间的成矿观点。

这五种成矿,从物质来源分,基本上可以说:1—4 属于地壳来源的成矿,5 属于地幔物质来源成矿。徐克勤(1973)¹⁾将成矿分为:1)成矿物质来源于地壳以下的上地幔的岩浆-热液矿床;2)成矿物质来源于地壳,与花岗岩化有关的气化-热液矿床;3)与地下水溶液活动有关的来源于矿源层的矿床。苏联多数人比较强调岩浆建造和成矿专属性,不言而喻,主张成矿与花岗岩有成因联系。西方地质工作者比较强调围岩对成矿的作用,特别是同生性和继承性。总的说来,花岗岩与成矿关系的争论从大的方面看,也代表了矿床学中长期争论的焦点,即基本物质来源问题,是来源于地幔还是地壳?这个矿床学上在几十年前就争论的问题,近来又有兴起的趋势。当然,在上述基本前提下,进一步考虑形成方式问题,仍还有1—5 诸观点的争论。

根据华南地区成矿特点看,与花岗岩类有关的矿化,基本可分两个系列:1)与酸性岩系列(花岗闪长岩、二长花岗岩→黑云母花岗岩→浅色花岗岩→花岗斑岩)有关的矿化,主要的是 TR、Nb、Ta、Be、W、Sn、Bi、U,次要的是 Cu、Fe、Zn、Pb 等,明显与花岗岩有成因联系的有花岗岩型铌钽矿、云英岩型钨锡铍矿、热液钨锡矿等;2)与中酸性侵入岩系列(辉石闪长岩→花岗闪长岩→石英二长岩→石英粗安岩)有关的矿化,主要的是 Cu、Fe、Mo,次要的是 Zn、Pb、W 等。

总之,从花岗岩成因、花岗岩与构造关系、花岗岩与成矿关系三方面研究概况看,过去研究工作是积累了相当可观的实际资料,但是各种各样的观点层出不穷。观点分歧演变历史告诉我们,很多对立的观点是本世纪初,甚至上世纪就开始的,经过长期争论和演变,可看出是一部此起彼伏的波浪状发展史。因此,对立面双方均含有合理的反映客观实际的一面,绝对排斥那一方面是不可能的。另外,也可看出,过去研究多是单一研究的一个侧面,仅从岩石学、或个别矿物、或孤立从物理化学及其实验等等来探讨花岗岩的成因,自然会产生片面的观点及各种分歧意见。实际上,正如我们开始所谈的,地幔与地壳、基性岩浆与酸性岩浆、岩浆与热液、岩浆与变质、岩浆与构造是地球深部运动在地球表面互相联系的统一征兆和标志。因此,从孤立的、单一、小范围的研究来看问题将容易产生片面性的错误。对花岗岩如此庞大对象的研究,应当是:1)宏观与微观、大与小范围相结合,以宏观(全球性的)、大的地质体研究为主;2)在方法上,全面与单一深入研究相结合,以全面用各种方法综合研究为主;3)统一与局部相结合,以统一全面的研究构造、变质、岩浆

1) 徐克勤:花岗岩类与成矿关系,兼论内生矿床的物质来源问题(1973)。

(包括基性、酸性岩浆)与热液成矿为主。例如北美和南美西部广泛发育中生代侵入体和斑岩铜钼矿床,延长数千公里;我国东南沿海、苏联亚洲部分的东部、泰国、日本等成矿的带状分布以及成岩的带状分布,这些都暗示了与全球性质的构造与岩浆活动有更宏观的联系,利用传统的地槽学说或仅从一种岩石或一个矿床研究问题将很难得到合理认识。因此,我们不得不考虑全球构造问题去研究和理解花岗岩、成矿和构造活动间的联系。

我们根据对我国华南花岗岩类的研究,提出以下几点认识:

1. 花岗岩与构造断裂是密切相关的。断裂既是上升的通道,又是花岗岩浆形成、分异的主要因素之一。矿床的形成,也往往受构造断裂的控制。

2. 以地壳重熔为主形成再生花岗岩浆。但是,也不排除地幔物质混入的可能性。在一定条件下,由于地幔物质的运移(包括气化、熔化、蠕动)上升与地壳物质互相作用的结果,可导致地壳局部重熔和混熔。因此,岩浆和成矿元素的来源也有部分地幔物质带入的可能性。

3. 与花岗岩有关的矿床的形成,是一个包括构造运动(以断裂变动为主)、变质作用、岩浆活动和成矿作用等主要因素在内的总的物理场综合作用的产物。其中压力、温度和水在上述不同作用阶段显示出各自的主导作用。深断裂的发育,还可能导致地幔物质的上升。

4. 再生岩浆经过长期分异(包括结晶分异、液态分异、同化、气化分馏等各种分异作用)和演化,形成一系列岩浆地质体(花岗闪长岩、二长花岗岩→黑云母花岗岩→浅色花岗岩→花岗斑岩)和相应的矿化(TR、Nb、Ta、Be、Sn、W、Bi、Mo、Cu、Zn、Pb、U等)。

参 考 文 献

- [1] Augustithis, S. S.: 1973, Atlas of the textural patterns of granites, gneisses and associated rock types.
- [2] Barker, D. S.: 1970, Compositions of granophyre, myrmekite, and graphic granite. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 80, No. 11.
- [3] Barth, T. F. W.: 1952, Theoretical petrology.
- [4] Boettcher, A. L.: 1968, Melting of granite with excess water to 30 kilobars pressure. *J. Geol.*, 76.
- [5] Bowen, N. L.: 1928, The evolution of the igneous rocks.
- [6] Daly, R. A.: 1933, Igneous rocks and depths of the earth.
- [7] Doe, B. R.: 1967, The bearing of lead isotopes on the source of granitic magma. *J. Petrol.*, 8, No. 1.
- [8] Doe, B. R.: 1968, Lead and strontium isotope studies of the Boulder batholith, southwestern Montana. *Econ. Geol.*, 63.
- [9] Goodspeed, G. E.: 1948, Origin of granite. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 28.
- [10] Green, D. H., Ringwood A. E.: 1966, Origin of the calcalkaline igneous rock suite. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1, No. 5.
- [11] Green, D. H., Ringwood A. E.: 1968, Crystallization of basalt and andesite under high pressure hydrous conditions. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 3, No. 5.
- [12] Green, D. H., Ringwood A. E.: 1967, The genesis of basaltic magmas. *Contrib. Miner. Petrol.*, 15, No. 2.
- [13] Goranson, R. W.: 1931, The solubility of water in granite magmas. *Amer. J. Sci.*, No. 132.
- [14] Goranson, R. W.: 1932, Some notes on the melting of granite. *Amer. J. Sci.*, No. 135.
- [15] Hamilton, W. B.: 1967, The nature batholiths. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper.
- [16] Kistler, R. W.: 1971, Nevada plutonic cycle part I Origin of composite granitic batholiths. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 82, No. 4.
- [17] Kranck, E. H. and Oja R.: 1960, Experimental studies in anatexis. *Internat. Geol. Cong.*