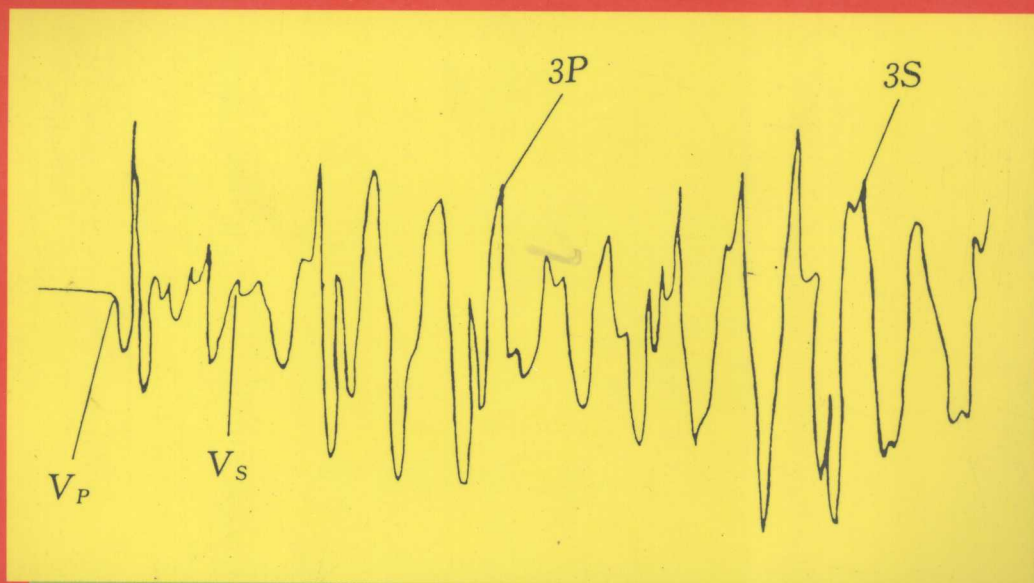


南岭花岗岩岩石 物理学与大地构造

杨树锋 陈汉林 张伯友 谢鸿森 著

The Petrophysical Properties

And Tectonic Setting of Nanling Granitoids



中国大百科全书出版社

南岭花岗岩岩石物理学与大地构造

杨树锋 陈汉林 张伯友 谢鸿森 著



中国大百科全书出版社

• 北京 •

责任编辑 孟 军

封面设计 杨大昕

图书在版编目 (CIP) 数据

南岭花岗岩岩石物理学与大地构造/杨树锋等著. -北京: 中国大百科全书出版社, 1996. 8

ISBN 7-5000-5776-8

I. 南… II. 杨… III. ①花岗岩-岩石物理性质-中国-南岭②花岗岩-地质构造-中国-南岭 IV. P588.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 13689 号

中国大百科全书出版社出版发行
(100037 北京阜成门北大街 17 号)

北京地大彩印厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 150 千字

1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—800 册

定价: 26.00 元

谨以此书

献给第三十届国际地质大会

序

学术的进步离不开人类对自然界开拓创新的研究。

当代地球科学正围绕着大陆岩石圈、全球变化和地球深部内层研究三大主题,向纵深方向发展。其迫切的任务是以活动论为指导阐明地球内部的性质及其动力学问题,而解决这一问题的关键是对组成地球物质材料的物理、化学性质的详细研究。作为岩石圈最主要组成部分的花岗岩类在岩石圈的形成和发展历史中占有重要的地位。它是地球综合作用的产物,又是这些作用过程的记录,所以它成了研究地球及其动力学的“探针”或“窗口”。长期以来,地质学家们围绕着花岗岩的岩石学、矿物学、地球化学及在此基础上的成因探讨开展的工作较多,而对花岗岩的物理性质这一物质普遍属性的研究尚嫌不足。这一专著在对南岭地区花岗岩的化学属性及地质特征详细研究的基础上,开展了南岭地区早古生代两类花岗岩的岩石物理学及其大地构造意义研究,弥补了花岗岩岩石物理性质综合研究的缺陷。

该专著是作者继《成对花岗岩与板块构造》一书后的又一花岗岩领域的全新研究专著。通过对南岭地区早古生代两类花岗岩系统的岩石物理学(弹性、磁性、导热性、光谱特性及高温高压条件下的弹性波速)的研究,首次总结了两类花岗岩的岩石物理学特性及其地质意义,特别是高温高压条件下波速“软化点”的新发现为解释地壳内部低速层的成因奠定了实验基础,具有重要的科学意义;专著还从花岗岩的岩石物理学角度探讨了两类花岗岩的构造成因。

这一研究成果表明岩石物理学研究在解决地球动力学问题当中具有广阔的前景,特别是采用地球物理手段解决地球内部的结构、构造及物质组成时尤为重要。这一优秀专著的出版,为中国开展岩石物理学及地质意义的研究将起到重大的推动作用。

郭令智 施央申

1995. 8. 12

前言

自 1865 年 D. Page 正式提出“岩石学”这一学科以来,岩石学作为地质学中的三大基础学科之一已走过了近 130 年的历程。近年来岩石学已大大突破了原来的涵义,朝着综合性和定量模型化方向发展。岩石学的研究在高度分化基础上,其综合性也越来越明显——除了岩石学本身衍生出许多新的研究方向之外,还表现在岩石学与其他学科的综合,形成了一系列新的交叉学科,并产生了一些新的概念和研究方法。如变质岩石学与构造地质学相结合形成了变质地质学,岩石学与物理学、地球物理学相结合形成了岩石物理学、岩石圈流变学,岩石学与板块构造学相结合形成了岩石大地构造学等。在岩石成因模型的研究和岩石的分类命名等比较成熟的基础上,岩石的动力学参数、运动学参数及系统的地球物理参数的研究已成为当前岩石学研究的热点和前缘。如果说 20 世纪 70 年代以前人们集中研究的是岩石形成的温度、压力、氧逸度……等物理化学中热力学参数的话,80 年代则更侧重于岩石形成过程中的密度、粘度、差异应力、应变速率、各种动力学与运动学中的物理参数的研究,而 90 年代则已发展到对岩石在高温高压条件下的地球物理参数的研究上来,这些参数为岩石成因和岩石圈内部结构与构造的定量模型化的研究奠定了基础。

当前地球科学的两大主题是岩石圈演化和环境问题。在这两大问题的研究当中,岩石学起到重要作用。在研究岩石圈板块的结构和演化时,认识深部岩石圈结构特征主要还是依靠地球物理手段。但是科拉超深钻的实际资料与地球物理的推测明显不一致,德国和美国的超深钻同样与地球物理资料的推断相矛盾,使得单纯地运用地球物理方法认识深部岩石圈的结构与组成陷入了困境,而目前解决这一难题最有效的方法就是地球探针法,即研究由地幔和下地壳中形成的岩浆活动带到地壳浅部的深部岩石样品及流体样品,其中关键是这些岩石矿物的高温高压实验及地球物理研究。

近 20 年来,在板块构造理论指导下,岩石学的研究获得了许多重大进展。愈来愈多的事实表明,多种多样的岩石在地壳的分布不是杂乱无章,而是有规律可寻的,它们是受地质构造环境所控制^[1]。大陆地壳可以通过裂谷作用转化为大洋壳,大洋壳又可以通过碰撞造山作用转化为大陆壳。任何地区的地质构造环境都有一个演化过程,在演化的不同阶段发育有不同类型的岩石共生组合。因此许多学者通过岩石共生组合及其岩石地球化学标志来判别其形成的大地构造环境,从

而形成了一个新的分支学科——岩石大地构造学。但是,需要指出,在这一领域的研究中人们忽视了岩石的物理性质这一物质普遍属性的重要现象。我们初步研究表明,不但岩石的地球化学性质受大地构造环境的控制,而且岩石的许多物理性质也与其形成的地质构造背景密切有关。尤其是大陆上广泛分布的花岗岩类的地球化学性质、岩石物理学性质与其形成的深部构造环境有着很好的对应关系。因此,作者首先选择了花岗岩的岩石物理性质的研究,探索其形成的大地构造环境。

作为岩石圈最主要组成部分的花岗岩类一直是地质科学中一个重要的研究对象。花岗岩类岩石是大陆上分布最广泛的岩石之一,是构成大陆地壳的基础,也是造山带的重要组成部分。在地壳的形成和发展历史中,花岗岩类占有重要的地位。花岗岩类岩石是地球综合作用的产物,又是这些作用过程的记录,所以它成了研究地球及其动力学的“探针”或“窗口”^[2],它甚至也是基于大洋研究成果发展起来的板块构造学说的重要研究支柱。花岗岩和许多金属矿产关系密切,花岗岩的研究是普查找矿工作的一项重要手段。花岗岩还与建筑材料和现代材料科学、玻璃水泥等硅酸盐工业,农业无机肥料的开发等有着千丝万缕的联系。因此,花岗岩的研究,无论对于岩石圈的结构与演化、地球动力学特征的研究,还是对我国国民经济的发展都有着重要的理论意义和经济价值。对花岗岩的研究,如果说70年代以前花岗岩中的化学现象是人们研究的重点,人们一直围绕着花岗岩的岩石学、矿物学、地球化学及在此基础上的成因探讨,那么80年代之后花岗岩中的物理现象已引起科学家们更多的关注^[3]。这是花岗岩研究顺应现代地球科学发展的需要。我们知道,现代地球科学的一个迫切任务是阐明地球内部的性质及其动力学问题,而解决这一问题的关键是对组成地球物质材料的物理、化学性质的详细研究^[4],所以将现代物理学和化学的理论及实验方法应用于地球物质的研究势在必行。在这一研究过程中,特别涉及到地球化学、岩石学、矿物物理及岩石物理四门交叉性强、研究难度大的学科^[5]。岩石物理学是岩石学与物理学的交叉学科,它的研究范畴指与形成地球物理场有关的岩石物性,如密度、弹性、磁性、导电性、导热性及放射性等^[2]。岩石物理学研究不仅可以阐明岩石形成过程、地幔对流、流体运动以至全球动力学问题,而且可以通过岩石物理学研究,解释深部地球物理参数的含义以及深部物质的化学与物理状态。

南岭地区花岗岩类广泛分布,前人对该区花岗岩类从岩石学、矿物学、岩石地球化学等角度进行过多学科、多途径的深入细致的研究,取得了重大成果,出版了大量的论著,如《华南花岗岩类的地球化学》^[6]、《华南不同时代花岗岩类及其与成矿的关系》^[7]、《南岭花岗岩地质学》^[8]、《成对花岗岩带和板块构造》^[9]等。这些研究成果为进一步开展该地区的花岗岩研究奠定了基础。南岭地区也成为开展花岗岩研究的理想地区。

在国家自然科学基金会优秀中青年人才专项基金和国家教委博士点基金的联

合资助下,开展了“南岭不同成因类型花岗岩的物理性质及其构造意义研究”。本专著就是该课题研究成果的总结。本项研究选择了南岭地区早古生代 I 型花岗岩和 S 型花岗岩为研究对象,对两类花岗岩进行弹性、磁性、导热性及光谱特性的研究,同时还进行了高温高压条件下的弹性波速研究。希望通过这些研究对揭示两类花岗岩物性特征、形成的构造背景及对探讨地壳内部的结构构造起到一定的作用。

本项研究工作自始至终得到国家自然科学基金会的指导。在研究过程中得到了郭令智院士、孙枢院士、施央申教授、钱祥麟教授、马福臣教授、张知非教授、王德滋教授、赵振华教授、卢华复教授、李继亮教授、马瑞士教授、王赐银教授、汪集旸教授、季钟霖教授、兰玉琦教授、方大钧教授、赵元洪教授以及美国普度大学 (Purdue University) 的 Christensen 教授和谢越宁教授的指导和帮助。在实验过程中得到中科院地球化学研究所深部物质实验室、中科院广州地球化学研究所地球物理实验室、地矿部南海海洋地质调查局实验中心古地磁实验室、地矿部南京地质矿产研究所古地磁实验室、中科院地质研究所地热实验室、浙江农业大学光谱实验室的帮助。参加本研究的还有竺国强教授、张登荣讲师以及姜继双、陈芙蓉、陈梓军、周培华、陈宁华、刘华根、张少龙等同学。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

目 录

序

前 言

第一章 南岭花岗岩的地质—岩石学特征简述.....	(1)
第一节 花岗岩的地质特征.....	(1)
第二节 花岗岩的矿物学特征.....	(12)
第三节 花岗岩的岩石化学特征.....	(19)
第四节 花岗岩的地球化学特征.....	(23)
第二章 花岗岩的弹性特征及其地质意义.....	(36)
第一节 岩石弹性研究概述.....	(36)
第二节 岩石弹性测量的原理与技术.....	(37)
第三节 常温常压下花岗岩的弹性特征.....	(41)
第四节 高温高压下花岗岩的波速特征.....	(43)
第五节 花岗岩弹性研究的地质意义.....	(49)
第六节 花岗岩波速“软化点”的发现及构造意义.....	(50)
第三章 花岗岩的磁性及其地质意义.....	(61)
第一节 岩石磁性研究概述.....	(61)
第二节 花岗岩的剩磁与磁化率特征及地质意义.....	(62)
第三节 花岗岩的磁化率各向异性特征及地质意义.....	(65)
第四章 花岗岩的热导率和生热率及其地质意义.....	(86)
第一节 花岗岩的热导率和生热率特征.....	(87)
第二节 花岗岩的热导率和生热率及其在岩石圈热结构研究中的意义	(90)
第五章 花岗岩的反射光谱特征及其地质意义.....	(97)
第一节 花岗岩的室内反射光谱特征分析.....	(97)
第二节 花岗岩的野外反射光谱特征及其在遥感岩性识别中的意义.....	(103)
第六章 南岭花岗岩的岩石物理学特征及其形成的动力学机制.....	(107)
第一节 S型花岗岩的岩石物理学特征及形成机制.....	(107)
第二节 I型花岗岩的岩石物理学特征及形成机制.....	(109)
结 语.....	(112)
Abstract	

第一章 南岭花岗岩的地质 —岩石学特征简述

中国东南部南岭地区广泛分布着不同时代、不同成因的花岗岩类。南岭花岗岩有着悠久的历史研究历史,积累了丰富的地质资料。南岭花岗岩呈北东向带状分布,从西北向东南逐渐变新。作者等对南岭(主要是广东省)的花岗岩类作了深入的研究,证实了该区早古生代的花岗岩类主要有两种构造成因类型:板内改造型(S型)和板缘挤压型(I型)^[1]。在空间分布上这两类花岗岩呈带状分布,即I型花岗岩类主要分布于粤中台山县—广州—粤北和平县的早古生代古大陆边缘,S型花岗岩类分布于大陆内部的粤西云开大山地区(包括湛江—罗定县—郁南县),两者构成了南岭地区早古生代的成对花岗岩带(图1-1)。本章将分别从这两类花岗岩的岩石矿物和地质地球化学特征、形成时代及其板块构造背景诸方面阐述南岭早古生代的成对花岗岩带。

第一节 花岗岩的地质特征

南岭地区早古生代I型花岗岩分布于粤中台山县—广州—和平县一线,其代表性岩体有开平县、台山县的龙塘花岗闪长岩岩体、粤北的和平县石英闪长岩—花岗闪长岩岩体和高寿花岗闪长岩岩体等。本文主要以龙塘岩体为例,详细剖析这一岛弧型花岗岩带的成因特征。同时代的S型花岗岩主要分布于云开大山地区。这两类花岗岩的成因特征迥然不同。

一、岩体产状及岩石类型

1. I型花岗岩

龙塘I型花岗岩分布于粤中台山县、开平县的端芬、东山、赤水、马山一带,由几个小岩体组成,出露面积约60平方公里,是一规模中等的岩株(图1-1,图1-2),侵入于含化石的寒武系八村群地层中。空间上与同时代的岛弧型钙碱性火山岩(安山岩—英安岩—流纹岩组合)共生,两者具有密切的亲缘关系。龙塘岩体主要岩石类型有花岗闪长岩、石英闪长岩、斜长花岗岩。表1-1列出了这三种岩石

的矿物成分及含量,图 1-3 是它们在花岗岩分类图上的位置。岩石呈灰色、浅灰白色,具全晶质似斑状结构,由斜长石(中长石)、正长石、石英、黑云母、普通角闪石等矿物组成。岩体内部常见暗色包体,呈椭圆状、不规划状,包体主要由细粒的黑云母、普通角闪石等暗色矿物所组成。

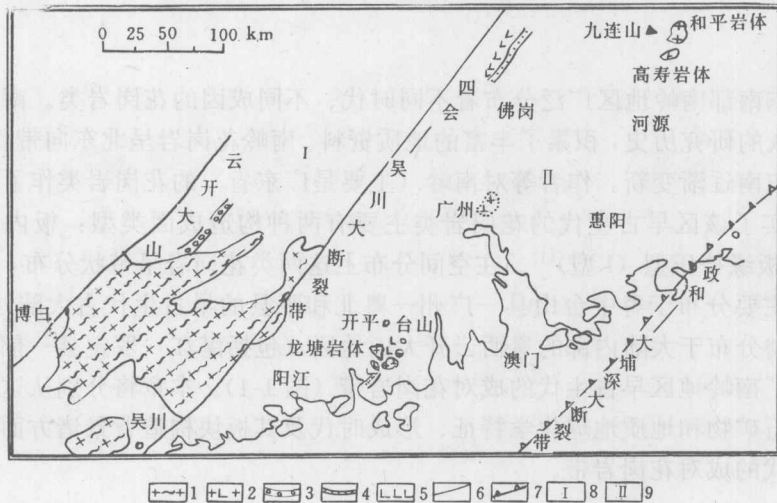


图 1-1 广东早古生代大地构造略图

- 1 早古生代板内改造型花岗岩(S型); 2 早古生代板缘挤压型花岗岩(I型); 3 奥陶纪磨拉石建造; 4 奥陶纪复理石建造; 5 奥陶纪岛弧火山岩; 6 板内断裂带; 7 早古生代古板块俯冲带; 8 云开大山早古生代隆起带(早古生代板内改造型花岗岩分布区); 9 粤中早古生代古大陆边缘拗陷带(早古生代板缘岛弧型花岗岩分布区)

I型和平岩体和高寿岩体分布于粤北和平县(图 1-1),侵入于寒武系,本身又被中生代黑云母花岗岩所侵入,出露面积 60 余平方公里;由中心相的中粒角闪石黑云母花岗闪长岩和边缘相的细粒石英闪长岩所组成(表 1-1,图 1-3),岩石呈灰白色,具半自形粒状结构。

2. S 型花岗岩

云开大山的早古生代 S 型花岗岩,大面积出露,呈岩基状,北东向带状延伸,平行于北东向的吴川—四会深大断裂,与挤压—剪切断裂构造和平缓构造带有密切的成因联系。S 型花岗岩以缺少同源火山岩,发育交代结构、片麻状、条带状构造为显著特征。岩体与围岩大多呈渐变过渡关系,从外围未受到混合岩化作用的区域变质带到糜棱岩化、混合岩化的云母片岩、混合岩和混合花岗岩。随着混合岩化程度的增高,岩石的结构构造、矿物成分、化学成分表现出有规律的变化:基

表 1-1 I 型花岗岩类主要岩石类型的矿物组成及含量

岩 体	岩石名称	主要矿物成分及含量(%)					
		钾长石	斜长石	石英	黑云母	普通角闪石	副矿物
龙塘岩体	花岗闪长岩	18	52	20	6	2.5	1.5
	石英闪长岩	15	55	7.5	7	14	1.5
	斜长花岗岩	2.5	45	42	8		1.5
和平岩体 ¹⁾	花岗闪长岩	17	44	23	10	6	
	花岗闪长岩	18	45	20	7	10	
	石英闪长岩	12	50	18	7	10	3
高寿岩体 ²⁾	花岗闪长岩	12	55	16	6	7	4

1) 和 2) 据 1/20 万连平幅区测报告

体逐渐减少,脉体逐渐增多;交代结构由弱到强;斜长石牌号从高到低;微斜长石含量由少至多; Mg 、 $(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 、 Mn 、 Ti 、渐次减少, K 、 Na 、 Si 逐渐增高。根据变形变质混合岩化程度由弱到强,可以依次分为 4 个岩带:糜棱岩化带;部分混合岩化带;混合岩带;混合花岗岩带。

(1) 糜棱岩化带 本区糜棱岩化带通常较为平缓,是作为地层变质岩与混合岩化带的过渡部位,彼此呈渐变过渡,糜棱岩带一般宽达 1~2 公里,具有区域延伸性。糜棱岩带中的糜棱岩具有特征变形构造,如石英的动态重结晶和亚颗粒构造,变形纹、变形带构造,云母的鱼状构造和长石的扭折、不对称眼球等构造;带中有较强的蚀变作用,表现为退化变质作用,如绿泥石化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化等含水矿物的生成反应。接近混合岩带的糜棱岩和混合岩中的糜棱岩残留体,其变形更为强烈,表现为石英质超糜棱岩和长石的韧性变形,甚至有角闪石的细粒化结构。这说明剪切作用的热作用可能导致混合岩化的同时,熔体的高温和流体又反过来对变形岩石起了强化变形的作用^[2,3]。

(2) 部分混合岩化带 本带位于糜棱岩带和混合岩带之间。组成本带的岩石为部分混合岩化的变质岩。混合岩化作用表现为岩石中含有不同数量、种类、厚度的注入脉体或交代脉体。脉体的含量一般小于 20%,通常呈 2~50 厘米宽窄不等的脉状沿基体的片理分布。脉体的成分为石英脉、长英质脉、花岗岩脉。有时脉体呈蜿蜒曲折状形成肠状混合岩。本类岩石按基体原岩性质不同而命名为混合岩化夕线石黑云母石英片岩、混合岩化二云母石英片岩、混合岩化绢云母石英片岩等,其中有不少基体岩石为糜棱岩。此外,本带中也出现不少片麻岩如黑云母更长石片麻岩、夕线石黑云母斜长石片麻岩。

(3) 混合岩带 本带位于部分混合岩化带和混合花岗岩带之间。组成该带的

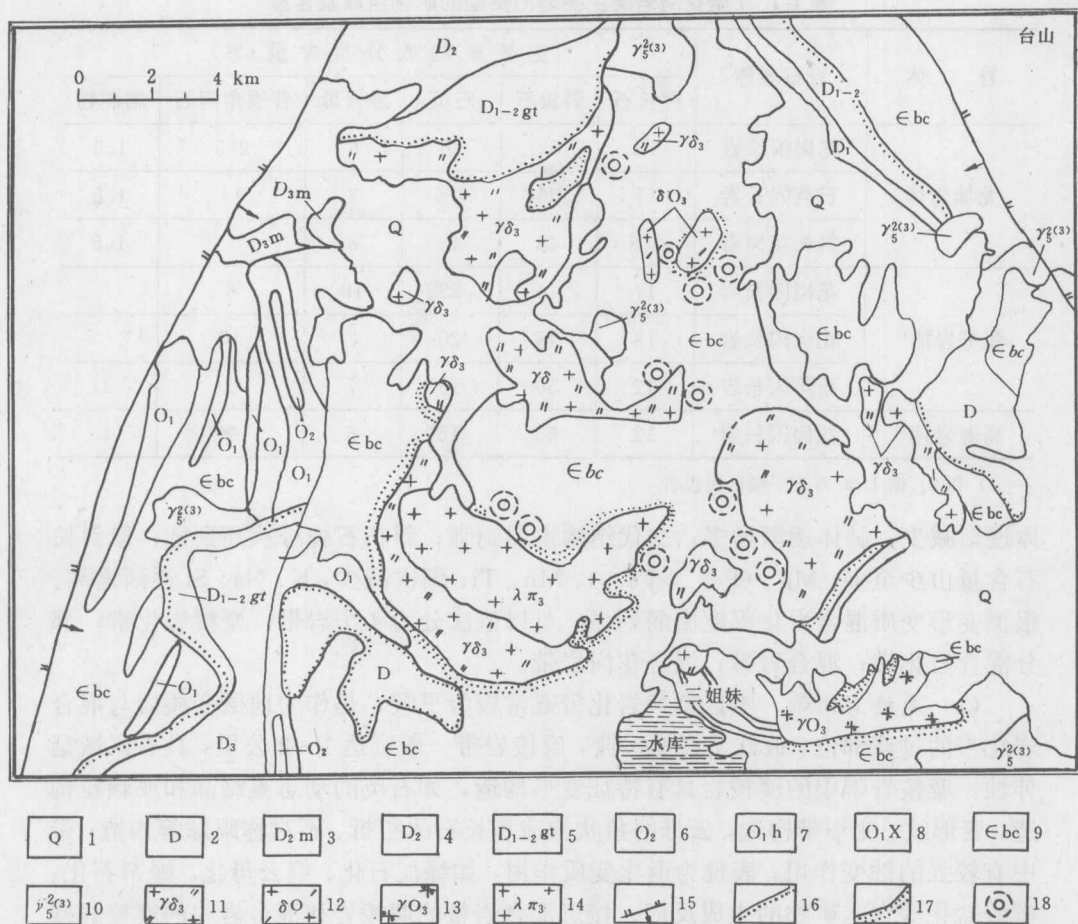


图 1-2 广东开平、台山地区地质略图

1 第四系；2 泥盆系；3 上泥盆统帽子峰组；4 中泥盆统；5 中一下泥盆统桂头群；6 中奥陶统；7 下奥陶统虎山组；8 下奥陶统新厂组；9 寒武系八村群；10 燕山期花岗岩；11—13 早古生代龙塘岩体（花岗闪长岩、斜长花岗岩、石英闪长岩）；14 早古生代火山岩（安山岩、英安岩、流纹岩）；15 断层；16 不整合；17 接触变质晕；18 硅化（根据广东地质局 1/20 万开平幅区测报告改编）

岩石中脉体含量增高，但变化范围较大，至 20~80% 之间。根据岩石的构造和形态的不同，主要岩石类型可分为下列几种：①片麻状混合岩，具片麻状构造，显微镜下见交代斑状、交代蚕食、交代蠕英石、交代穿孔等各种交代结构，主要由石英、微斜长石、黑云母、白云母、更长石以及夕线石等组成。②条带一条纹状混合岩，呈灰色、肉红色，基体和脉体彼此平行，交替出现，构成深浅相间的条带状构造。条带的宽度变化较大，一般在几毫米到几厘米；有时条带变细在一毫

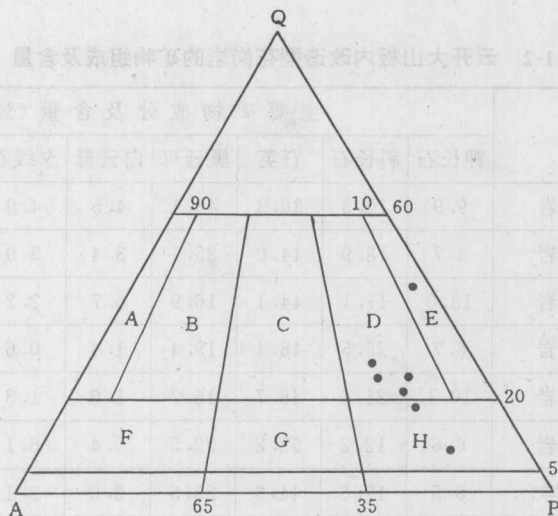


图 1-3 I 型花岗岩在 Q-A-P 三角分类图中的位置

A 碱长花岗岩；B 普通花岗岩；C 二长花岗岩；D 花岗闪长岩；
E 斜长花岗岩；F 石英正长岩；G 石英二长岩；H 石英闪长岩

米左右而成为条纹状混合岩。有时基体条带变得更细而且数量很少，则成为条痕状混合岩。本类岩石的基体主要为黑云母片岩，脉体成分为长英质、花岗质；镜下各种交代结构发育，基体与脉体呈过渡关系。③眼球状混合岩，以具眼球状构造为特征。岩石呈灰白色、浅肉红色；基体为夕线石黑云母片岩类；脉体为眼球状，大小不一，小者如蚕豆状约 5×3 毫米，大者可达 2×1 厘米，其长轴多平行片理、片麻理；脉体的成分主要为微斜长石变斑晶、斜长石变斑晶，变斑晶内含有石英、黑云母、斜长石等包裹体。此外这种的岩石压碎现象较普遍。除了以上 3 种岩石外，本岩带中还可出现阴影混合岩、斑杂状混合岩、团块状混合岩，这些岩石的矿物成分、交代结构与上述 3 种岩石相似，只是在构造形态上有所差别。

(4) 混合花岗岩带 本带为混合岩化最强的岩石，出露宽度也最大。组成该带的岩石为混合花岗岩、均质混合岩。有时含有特征性的富铝变质矿物如夕线石、堇青石、红柱石等。岩石多呈肉红色，具片麻状构造、斑杂构造，部分为块状构造。主要矿物成分为微斜长石、更长石、石英、黑云母。多数矿物是交代作用生成的。硅质、碱质交代甚为发育。本带与混合岩带无明显界线，两者呈渐变过渡。

综上所述，S 型花岗岩无论在岩体产状、岩石类型，还是在矿物成分上与板缘 I 型花岗岩相比都有显著差别。此外，S 型花岗岩体中未发现暗色包体，而存在不少变质岩残留体，残留体的片理产状与岩体外围变质岩、糜棱岩的面理产状一

致。表 1-2 列出了 S 型花岗岩类的矿物组成及含量，图 1-4 是它们在花岗岩分类图上的位置。

表 1-2 云开大山板内改造型花岗岩的矿物组成及含量

序号	岩石名称	主要矿物成分及含量(%)							
		钾长石	斜长石	石英	黑云母	白云母	夕线石	红柱石	堇青石
1	条带状混合岩	9.9	10.3	30.3	40.1	4.5	4.9		
2	片麻状混合岩	4.7	18.9	44.0	25.1	3.4	3.9		
3	片麻状混合岩	13.0	17.1	44.1	16.9	6.7	2.2		
4	条痕状混合岩	6.7	25.5	46.4	19.4	1.4	0.6		
5	条纹状混合岩	10.1	21.6	48.7	16.7	1.6	1.3		
6	片麻状混合岩	6.6	12.2	52.2	22.5	0.4	6.1		
7	混合岩(平均)	8.5	17.6	44.3	23.5	3.0	3.1		
8	混合花岗岩	39.8	7.6	34.9	9.3	少	0.2		8.0
9	混合花岗岩	19.2	21.6	36.9	15.7	少	2.5		4.1
10	混合花岗岩	29.4	9.9	38	12.9	少	2.8		6.9
11	混合花岗岩	20.4	19.2	38.9	11.1	2.5	7.9		
12	混合花岗岩	24.9	10.4	39.7	17.6	少	1.9	5.4	
13	混合花岗岩	18.5	13.9	40.1	15.1	少	3.0	9.3	
14	混合花岗岩	17.4	15.0	40.5	19.6	2.3	5.2		
15	混合花岗岩	20.4	9.3	43.0	19.2	2.6	5.5		
16	混合花岗岩(平均)	23.5	13.4	39.2	15.1	0.9	7.9		

二、S 型花岗岩的变形构造特征与花岗岩化阶段联系

I 型花岗岩的结构构造较为简单，具有均匀的块状构造、半自形粒结构或似斑状结构。但是，S 型花岗岩的结构构造往往很复杂，以片麻状构造为主，其他为条带状、条纹状、肠状、眼球状等构造，在部分混合岩化带常保留原岩的片理构造、韧性变形构造。岩石的结构种类更为繁多，既有混合岩化—花岗岩化作用前发生的变质岩的结构，如变晶结构，又有花岗岩化作用中产生的各种交代结构，其中以后者为最显著。此外，在混合岩化—花岗岩化过程中及岩石形成后由于受到多次构造运动的影响，产生了韧性变形结构交代和变形结构的广泛发育，反映了

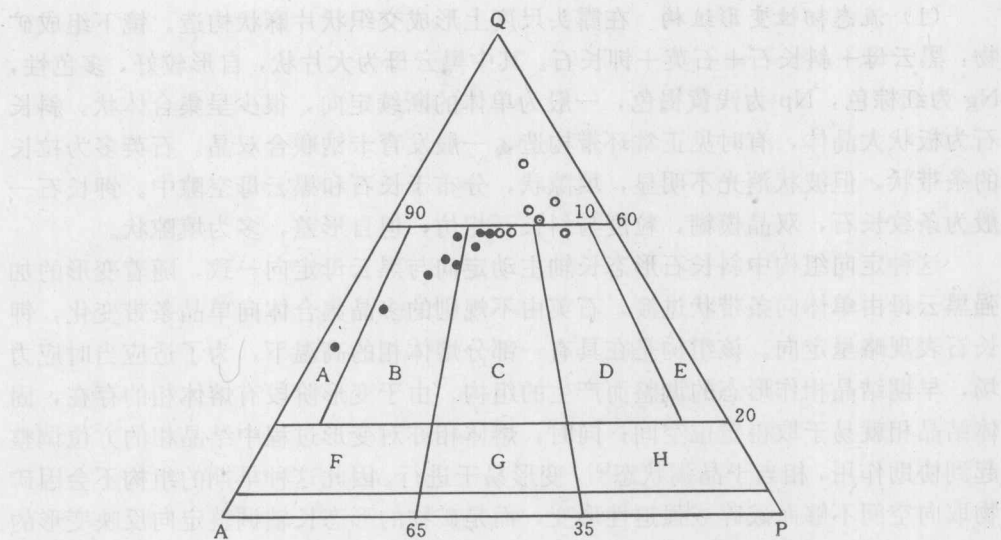


图 1-4 S 型花岗岩在 Q—A—P 三角分类图中的位置
A 碱长花岗岩；B 普通花岗岩；C 二长花岗岩；D 花岗闪长岩；
E 斜长花岗岩；F 石英正长岩；G 石英二长岩；H 石英闪长岩
空心圆为混合岩；实心圆为混合花岗岩

变形和交代作用是 S 型花岗岩的主要成岩方式。

云开大山 S 型花岗岩是多次变形、变质、混合岩化作用的产物，根据综合研究混合岩、花岗岩中各矿物之间的交代关系及互相包裹的现象，交代作用至少可以分为 4 个阶段：

第一阶段为钠-钙质交代。形成斜长石变斑晶（斜长石牌号 An₂₁₋₂₄），其中包裹了圆粒状石英和黑云母、锆石等矿物，呈交代残留结构。这一阶段形成的斜长石常受不同程度的绢云母化。

第二阶段为钾质交代。这一期交代作用强烈而普遍，主要形成微斜长石变斑晶，包裹了早一阶段的绢云母、斜长石，同时呈现交代净边结构、交代蠕英结构，此外还包裹了石英、黑云母、夕线石，有时还有红柱石等。

第三阶段为钠质交代。本期交代作用主要使早期的微斜长石发生条纹长石化。钠长石嵌晶以数量不一，形态不一（细脉状、纤维状、火焰状、云朵状）分布于微斜长石主晶中，形成微斜微纹长石，形成的结构即为交代条纹结构。

第四阶段为硅质交代。这期交代作用非常活跃，可以交代早先形成的各种矿物如长石、黑云母等。交代方式主要为蚕食交代和穿孔交代。

根据云开大山内部 S 型花岗岩的变形组构特点，可以分为流态韧性变形组构

和固态韧性变形组构。

(1) 流态韧性变形组构 在露头尺度上形成交织状片麻状构造。镜下组成矿物：黑云母+斜长石+石英+钾长石。其中黑云母为大片状，自形较好，多色性，Ng 为红棕色，Np 为浅黄褐色，一般为单体的断续定向，很少呈集合体状。斜长石为板状大晶体，有时见正常环带构造，一般发育卡钠联合双晶。石英多为拉长的条带状，但波状消光不明显，填隙状，分布于长石和黑云母空隙中。钾长石一般为条纹长石，双晶模糊，粒度与斜长石相仿，但自形差，多为填隙状。

这种定向组构中斜长石形态长轴主动定向与黑云母定向一致，随着变形的加强黑云母由单体向条带状过渡，石英由不规则的多晶集合体向单晶条带变化，钾长石表现略呈定向。该组构是在具有一部分熔体相的高温下，为了适应当时应力场，早期结晶相作形态的调整而产生的组构。由于变形阶段有熔体相的存在，固体结晶相就易于取得定位空间；同时，熔体相亦对变形过程中结晶相的方位调整起到协助作用，相当于晶粥状态^[3]，变形易于进行。因此这种早期的组构不会因矿物取向空间不够而破碎或强迫性形变，而是矿物的形态长轴调整定向反映变形的应力场特征。这种特征的形变相当于 D. H. W. Hutton 定义的完全结晶前的变形组构^[4]。

(2) 固态韧性变形组构 在野外表现为片麻状构造、眼球状构造、条带状构造，组成叶理的矿物为黑云母+石英+斜长石+钾长石。该组合有别于前一组合的特征，在于矿物为集合体或重结晶团块，所有的矿物都具有晶内变形，两种粒度分级。黑云母呈多色性，Ng 为褐色，Np 为浅黄色；单个大片状少见，多为两端碎化或沿 (001) 解理滑移，常呈黑云母团块，外形条带状或椭圆形，黑云母之间交叉平衡状重结晶。斜长石表现为应力双晶出现，边部碎裂化，形成两种粒度级，随着应力的加强，两种粒度趋于均一，多呈规则等轴状、长形粒状或不规则状，大于 0.02~0.25mm；双晶少见，相互间平直的接触边缘，组成粒状镶嵌状，有时成三边平衡结构；整个长石碎块显然是经过重结晶的改造，碎块集合体之外形呈断续条带状或透镜状，总体平行于叶面定向拉长，有时见石英熔蚀长石颗粒。一部分长石碎块填充晶体裂隙、眼球体的两端压力影部位。石英呈拉长条带或重结晶团块，波状消光强烈，多晶集合体条带内石英颗粒之间三边平衡结构，少量锯齿边接触，有时见熔蚀其他碎裂矿物并包裹现象。钾长石中微斜条纹长石少见，有两种粒度级。大粒的钾长石呈斑状，具有多种包体如黑云母、石英、长石残块等，残块斜长石消光一致，边部多见由斜长石与石英组成蠕虫结构，可能的交代反应：斜长石+钾长石+石英。形态长轴与叶理一致，少见推开叶理，有的大斑晶由多个颗粒组成，各自的包体都不同，双晶亦不连贯不一致。小粒的钾长石清晰格子状双晶，分散的颗粒呈填隙状，有的充填长石裂隙中。集合体状分布的钾长石多呈等轴状、不规划状，且多呈三边平衡结构；集合体主要在眼球体的两端