

五十年来中国花岗岩研究的回顾与展望

董中保

(北京大学)

一、花岗岩研究综述

自 Hutton 的《Theory of the Earth》(1795) 问世以来, 花岗岩的研究至今未衰。近代研究表明, 花岗岩是在大陆地壳形成和演化过程中, 由多种地质作用和它们之间的相互作用所形成的, 其主要控制作用则是地壳和地幔的相互作用 (Crustal and Mantle Interaction), 该作用的研究是近代岩石圈动力学研究领域中的一个重要方面。

花岗岩的研究发展过程与一般自然科学研究的相仿, 是在揭示其内在矛盾的基础上, 通过观察、解剖、分析、模拟、推理和反馈的反复过程, 逐渐接近其本质上的壳、幔相互作用的理解。它的研究历史可分为:

1. 地壳和地幔之间的相互排斥阶段 (1850—1960 年)

表现为地幔岩浆分异与由地壳直接重熔 (包括狭义的花岗岩化) 形成的岩浆学派和混合学派之争, 见 Bowen (1948) 和 Read (1948) 的论文。在讨论花岗岩系列时, Read (1949) 曾认为, 对于大多数花岗岩来说, 它们在成因上与基性岩浆无联系。而 Bowen (1948) 则认为玄武岩浆分异说仍有较大的远景。

2. 地壳和地幔之间的相互结合的阶段 (1960—1980 年)

花岗岩的重熔实验 (Winkler, 1965; Wyllie, 1983; Johannes, 1985) 标志这一阶段的进展。通过这些实验成果的取得, 花岗岩基本上是在地壳中重熔 (Anatexis) 而形成的观点获得了较为普遍的承认。同时, 幔源岩浆的参与, 包括地幔热流、地幔流体和岩浆本身的加入, 对于某些花岗岩类型, 包括由超变质作用 (Ultrametamorphism) 形成的花岗岩, 也是不可缺少的和必要条件。对于花岗岩的源区和源岩来说, 既有幔源的加入, 也有形成过程中地幔热流和不相容元素的加入, 以至幔源岩的混熔 (Mixing) 也经常存在。地幔与地壳的对立的坚冰已开始溶解, 但它们之间的相互作用及转化的内在因素仍未得到澄清。在这一阶段中, 对立的论争已在地壳重熔为主的前提下, 发展为地壳重熔的残留体假说 (Residue Hypothesis, Chappell, *et al.*, 1987) 和发展中的混熔学说 (Mixing Hypothesis, Vernon, *et al.*, 1988; Didier, 1991) 的论争。他们是在壳、幔相结合的基础上探讨花岗岩形成的原因, 为今后深入研究提供了方向性的探讨。

3. 地壳和地幔之间的相互作用的阶段 (1980 年至今)

近代的岩矿测试技术的发展, 特别是同位素和微量元素的地球化学研究, 导致了对花岗岩成因中地壳和地幔的相互作用的进一步认识。地球化学和其他方面的证据表明了花岗岩经常是融化的地壳组分和地幔组分 (包含已经形成的地壳岩石) 的混合产物, 并形成一个从以地幔组分为主到以地壳组分为主的谱系, 预示着深部的壳源和幔源在一个一定演化环境中的

变化历史,并反映出与之有关的热流扰动(Thermal Perturbation)及其变迁的轮廓。在这一基于地球化学的岩石、矿物、化学组分的共生组合(Paragenetic Association)的基础上,近代研究着重于它们形成时的大地构造环境的联系,并试图从这一方面来追溯它们形成时的大地构造环境的踪迹及原因。一时,这一研究以壳源、幔源和它们的混合源为框架,以某一特征的岩石、矿物和地球化学元素或其集合为标志,对应于某些大地构造环境成为重要方向之一,并形成若干分类(Barbarin, 1990)。它们体现出地壳和地幔不同影响下的花岗岩系列的矿物和地球化学共生组合与大地构造环境的联系,其中的 Pitcher (1992) 的分类可作为代表。目前,近代花岗岩研究与大地构造结合尚处于一个不很完善的阶段。Pitcher 就曾说过:由于多种因素和作用的相互联系,包括不同源岩和大地构造的运行,很难准确定位。任何成因分类只能看成一种哲学抽象,有些人则会说,它们较之导致深入了解,更易阻碍其进展(大意。Pitcher, 1992)。但是,这一研究可认为是壳、幔相互作用方面已从定态(Steady State)转向动力状态(Dynamic State)的一个中间阶段。它们正朝着综合性,而非单一性的判据上加以完善,同时,并在大地构造及其阶段上,在地质环境沿革(Geological Context)上认真分析和归纳。最终将建立一个以经验式的以地球化学判据为主要依据的观察模拟(Observed Modelling),为今后的热流传递的热模拟(Thermal Modelling)提供基础。

花岗岩的研究历史说明它在大陆地壳形成和发展过程中的地壳和地幔的相互作用中,已由二者相互对立走向互相结合,由量化走向与大地构造相联系,目前正朝着动力学方向发展。它的研究可认为是地质科学的一个重要方向,正如 Hutton (1785) 所说:是一个使人去理性认识自然界体系的相关性,既能获得信息又能受益的课题。

目前,对花岗岩的特征有如下的认识:

(1) 花岗岩基本是在地壳环境中,经过重熔,在相当广泛的 P - T 的条件下由多种地质作用相互制约而形成的。它的总体演化过程可认为是所发生的源区、源岩与它们在发生和发展时的演化过程的总和,基本可用重熔实验来模拟其进程。

(2) 在重熔过程中,地幔的参与经常是存在的,并以底板垫托(Underplating)释放出来的高温热流、地幔去挥发作用的流体直至地幔岩浆所形成的混熔作用等不同方式对原有地壳岩石(包括已形成的地幔岩)的重熔起着不同程度的影响。

(3) 由于深部热流传递的机理不完全相同,花岗岩可分为以热流传导体制(Conductive Regime)为主的超变质作用(Ultrametamorphic)型和以热流对流体制(Conductive Regime)为主的深部整体混熔(Bulk Mixing)型。岩浆与混合花岗岩之间在某些条件下也可互相转化。例如在一些递增变质地区,在晚期上升时的绝热减压阶段中,混合岩化花岗岩可变为分离结晶(Fractional Crystallization)为主的岩浆,而处于某一深度的岩浆,当其塑变状态(粘度差, Viscst)与围岩相近时,结晶状况亦可类似混合花岗岩,出现边缘混合岩化。

(4) 近代残留体及混熔假说代表花岗成因中壳、幔相互作用中两个端元型(Endmember),它们之间的过渡型似较普遍。看来,与残留体学说相反,花岗岩中仍有较多的分离结晶作用。而没有大量的基性岩浆的参与,混熔亦难达到较完善的化学混熔阶段。捕虏体(Enclave)研究是一个重要研究手段,需要进一步在地质环境的背景下结合本身的结构、构造及化学组分的整体配合,以确定其混熔的可能和其程度。二者的研究将导致壳、幔相互作用的深入了解。

(5) H_2O 及其他挥发组分以及一些活动的碱金属元素,在花岗岩成因研究中具有重要意义。在地壳重熔的起始状态中, H_2O 的存在及其数量起着关键作用;在脱水熔融反应中能增

大其数量；在岩浆的结晶过程中， H_2O 在开放和封闭体系下，近液相线（Subliquidus）的条件还可改变其结晶进程，并出现交代结构。

（6）近代研究还表明：在地壳的物质组分的共生组合（Paragenetic Association）的基础上，某些花岗岩的特征的岩石、矿物和地球化学的数据可作为判据来确定其大地构造环境，并将进一步发展成为观察模式来反映其深部热流传递的热模拟。

二、50 年来中国花岗岩研究简述

花岗质岩石在中国分布广泛，自前寒武纪太古代始至喜马拉雅期止，都有其特征的花岗岩系列。从其空间分布看，从特提斯-喜马拉雅区到滨太平洋区都有其分布。它们往往处于大地构造单元相接触处或产于深断裂带体系中，并在一些重要的构造地区中形成不同构造期次花岗岩体所组成的复式岩体（Gregarious Batholith），同时，在一个构造运动旋回中还可分出若干不同阶段（Tectonic Niche）的类型。它们也是与之有直接或间接关系的所谓的“岩浆期后热液矿床”的源泉，我国很多的重要矿床都与之有关。总的来看，可以认为中国的花岗岩是研究地壳演化中的构造-岩浆体制（Tectono-magmatic Regime）的较系统和全面的地区，其代表面之广，其他地区很难与之相媲美。

中国的花岗岩的研究始于 20 世纪初，自 20 年代开始时，中国东部的中生代的燕山运动被认为是中国的重要的构造运动以后，它的同时代的岩浆作用因之成为重要研究对象，而以花岗岩的研究为尤胜。藉助于当时矿业的发展，与花岗岩有关的矿床，如华南的 W、Sn 和华北的矽卡岩型的 Cu、Fe 矿床，由于它们的分布有着明显的不同，当时成为花岗岩研究中的一个重要对象，引发了不少讨论，并促进了对花岗岩的认识。苦于那时工作条件差，实验及测试手段缺乏，花岗岩的研究仅限于地质调查范畴，很少有专题研究，在理论上更鲜有建树。其代表著作有叶良辅及喻德渊（1937）的《宁镇山脉的火成岩地质史》、何作霖（1927）的《房山花岗闪长岩之特殊斑状结构》以及《山西的碱性岩》（新常福，1947）、《济南的侵入岩》（巴博尔，1923）等。由于当时条件的束缚和在理论视野上的局限性，有关花岗岩成因的探讨往往以传统的岩浆分异学说的结晶分异作用的 Heidelberg 学派理论为指导，既不了解国际间的花岗岩成因的大论争，也没有掌握全国花岗岩的大致轮廓，所得的成果甚微。

20 世纪 50 年代以后，随着经济建设的需求，地质工作得到大力发展。全国性的区域地质调查、普查找矿和勘探工作的开展特别是 1：20 万的区域地质测量及以后各省在此基础上编写的区域地质志为全国的整体地质框架及基本素材提供了可靠的数据，为开展有关的地质研究奠定了比较巩固的基础。花岗岩的研究在这一背景下，特别是它与有关的矿床的成因结合方面有了较广泛的开展并取得了显著的成就。50 年来所获得成就分述如下：

1. 花岗岩研究的奠定阶段（1950—1965 年）

在这一时期，由于区域地质测量和找矿勘探工作的全面展开，花岗岩的研究初步摆脱了过去片面的单方面的岩相学的认识，参与了混合与岩浆花岗岩的讨论，在基本地质图件中标示了不同类型花岗岩的地质产状；并且在进一步填图工作中，发现了二者之间的相互联系以及它们的中间类型，如边缘混合花岗岩，扩大了对花岗岩成因的全面认识。同时，在与之有关的矿床上，提出了混合花岗岩矿床的概念（程裕淇，1947；谢家荣，1963）。

花岗岩的专题研究有了较大的开展，通过东南沿海的花岗岩类分布特征的研究，徐克勤等（1963）开始提出了华南多旋回花岗岩的侵入时代以及它们可以形成复式岩体的特性，并

进一步指出这一地区的花岗岩存在着两种成因系列,包括铝过饱和的地槽沉积物改造型和浙闽沿海燕山晚期岩浆型花岗岩。这一论点标志着我国花岗岩研究与大地构造环境相结合的开始。另外,在两广地区,以莫柱孙为首的两广区域地质工作者通过对本区的花岗岩的研究,总结出有关加里东期—海西期的同源的由混合岩化花岗岩发展成为岩浆型堇青石-紫苏辉石深成-火山杂岩体的花岗岩系列,代表着我国一个完整的造山运动旋回中从超变质作用开始到运动瓦解(Orogen Collapse)后受局部伸展构造所控制的岩浆花岗岩所形成的花岗岩系列。这一工作基本反映出Read(1955)的花岗岩系列(Granite Series)的原义,但其实质似较西欧海西期或英国的加里东期花岗岩更为丰富。

这一时期与区域性研究相比,花岗岩的岩石学研究似较少。《燕山西段南口花岗岩》(池际尚等,1963)可作为其中的代表作之一。南口花岗岩的研究是在1:50 000地质填图的基础上,进行了系统的岩相学、矿物学(包括主要矿物的化学组分的测定)和岩石化学组分(包括部分微量元素Cu、Pb、Zn、Cd、Ga、Ge、Zr、Mo)等方面的工作,并通过不同的岩石图解反映出其侵位条件和形成时的岩浆分异状况,特别是在岩浆分异作用下对围岩的同化混染作用做了较详尽的分析,划分出各种混染和分异类型以及它们在结晶过程中所起的作用。一般来说,这一方面与国际间的水平,特别是与当时的苏联花岗岩研究水平相接近。

总的看来,由于这一时期地质工作的迅速发展,花岗岩的研究借助于全面地质研究的框架的建立,有关岩、矿、地球化学数据的积累亦有较大的发展。但是在有关基础理论和实验室工作中仍有较大的差距和空白。

2. 花岗岩研究的发展时期(1980年至今)

这一时期的特征是板块构造理论的引入以及其他流行的欧美学派的介入和尖端测试技术、特别是同位素测试技术的引入,从而引起以地球化学为主要研究方向的建立。花岗岩研究在中国出现了前所未有的蓬勃发展景象。

80年代以来,各省、自治区(台湾除外)在1:20万区域测量的基础上,相继出版了各省区域地质志以及以程裕淇为主编的《中国区域地质概论》(1994),从而形成了中国地质的基本框架,为各个地质领域的研究奠定了基础。与此同时,花岗岩研究借助于尖端测试技术的发展,也在几个重要地区主要如闽浙(王德滋等,1996)、南岭(莫柱孙等,1980)、胶辽地区(林景仟等,1992)、秦巴地区(尚瑞钧等,1988)以及与矿床密切有关的岩浆岩地区如长江中、下游(常印佛等,1991)等进行了重要的区域性的深入的探讨。这些工作大都放在区域构造分布格局和花岗岩的产状上,对花岗岩系列做了大量的岩石、矿物和地球化学元素分析,包括同位素及稀土元素及其他微量元素分析,并在这一基础上进行了构造-岩浆演化的推理兼及有关矿床的形成探讨。这些区域性的研究辅以某些重点地区的花岗岩石学的工作如燕山地区(郁建华等,1994);北方地区(李之彤,1991)、新疆与内蒙古地区(Han, *et al.*, 1994)、阿尔泰地区(庄育勋,1994)、藏南地区(邓晋福等)、冀东地区(贺同兴等,1992)、鲁西地区(曹国权等,1996),基本覆盖了中国花岗岩(台湾除外)的整体面积,初步形成了花岗岩成因类型的时空分布及其与大地构造环境之间某些联系的基本框架,所获得的素材和数据为它们的动力学研究的经验性的判据打下一个良好的基础。

华南地区是中国花岗岩研究程度最高的地区。徐克勤等(1986)曾在前人大量研究的基础上,将花岗岩类分为三个成因系列,陆壳改造型、同熔型和幔源型,并在岩石化学和地球化学特征的基础上,结合花岗岩的构造位置、源区、物质来源和成矿关系等做了总体成因的推理,在国内获得广泛的关注。王德滋等(1996)在中国东部中生代花岗岩的研究中,进一

步提出了由改造型发展成为 S 型的深成-火山杂岩体、中生代火山岩系中的橄榄粗玄岩系 (Shoshonite Series)、富钾钙碱性岩系和富钾钙碱性岩系的同熔型花岗岩等。这一研究强调了中国大陆边缘的花岗岩成因类型和一般的岛弧型花岗岩的不同之处以及它们可能形成的大地构造环境。

80 年代以来, S、I、A 型以及 M 型花岗岩及其大地构造环境在花岗岩研究中受到普遍的重视, 其中 A 型花岗岩的研究成为它们中的一个重要方面。中国的 A 型花岗岩有着不同的类型和多种地质意义, 主要有中生代晚期的含晶洞花岗岩分布于东南沿海的漳州-厦门 (周珣若等, 1992)、青岛崂山 (赵广涛等, 1997)、燕山地区 (许保良等, 1994) 以及小兴安岭、张广材岭 (李之彤等, 1991); 海西期 A 型花岗岩, 成弧状分布于新疆准噶尔-内蒙古-大兴安岭延至俄罗斯及蒙古 (洪大卫等, 1991), 喜山期 A 型花岗岩分布于云南哀牢-金江带 (涂光炽等, 1986) 以及前寒武纪中、晚元古代的环斑花岗岩 (郁建华等, 1994; 张本仁等, 1994)。这些类型, 在地球化学组分上往往表现不同, 它们形成的地质环境从碰撞后到裂谷型亦各异。这一方面的研究已开始为国际所关注, 它们的进一步的研究将在国际间为揭示 A 型花岗岩及其内在原因提供重要信息。

以地球化学元素特别是同位素地球化学的应用为主体的花岗岩的研究, 在近代中国花岗岩研究中具有一定的代表性。大多是以同位素组合如 Sr, Sm-Nd, Pb 等为主线, 对地壳源区和部分地幔源区进行分类, 计算其部分熔融时的壳、幔比例, 在此基础上, 结合某些地质构造特征包括部分的地球物理资料来讨论其构造-岩浆分异特征, 兼及矿床成因。其中张理刚等 (1995) 对中国东部的岩石特别是花岗岩做了较多 Pb 同位素, 并搜集了大量的其他同位素的材料, 从基底岩石同位素地球化学入手, 与地壳的构造相对应, 提出了一个“花岗岩类岩石构造同位素地球化学分类”。这一观点强调了地壳本身的重熔特点, 而比较忽视了不同时代、不同大地构造环境中以混熔为主导的壳、幔相互作用, 因而与国际间流行的在深部整体混熔作用中的 MASH 假说 (Hildreth and Moorbath, 1988), 即从一个深部的熔融 (M)、同化 (A)、储存 (S) 和均匀化 (H) 的岩浆中心, 上浮发展成为另一喷发中心并具有一定的同位素标志的 AFC (同化 A、分融 F 和结晶 C) 的序列有明显的不同。这一差异仍应在观察和理论反馈中加以解决。

对于花岗岩的成因演化过程中混熔 (包含分异作用) 和残留体 (包括超变质作用) 假说, 仍然有着争论, 在同一岩体中看法也未能取得一致。分歧的产生可能和花岗岩的露头观察、产状和岩相学包括捕虏体的研究的削弱有关, 推理的反馈不及时, 同时, 近代关于混合岩化研究中的工作诸如结构 (Ashworth and McLellan, 1985)、局部质量平衡 (Local Mass Balance) 逼近法 (Olsen, 1983) 等的确认, 重熔实验的论证以及塑变理论知识的贫乏等有关, 因而妨碍了这一工作的开展。

此外, 早期前寒武纪的灰色片麻杂岩体在几个克拉通内都有所论述 (贺同兴等, 1992)。一般认为它们相当于英云闪长岩系列, 是由早期具有原始地壳特征的基性火山岩及火山碎屑岩经地幔高热流影响下的传导体制的重熔作用形成的。

三、回顾和展望

50 年来中国花岗岩研究的发展是比较迅速的, 基本上是广大地质工作者从我国地质实际出发持久而不懈工作所得的结果。目前, 他们已在中国的花岗岩类型的时空分布及其与某些大

地构造环境的关系上概略地建起一些格架,在花岗岩成因上积累了一定的岩、矿、地球化学数据;对个别重要的花岗岩类型进行了深入的推理,把国际流行的学说引进并应用于中国地质实际,进一步加深了这一方面的认识,丰富了其内涵。

毋庸讳言,我们的研究水平与国际间高水平比较还有着不小的差距。更重要的是在研究工作的自身建设中还存在着严重的缺陷和障碍。从长期发展上看,花岗岩成因的研究仍然处于表象观察中准定态(Quasi-steady State)阶段,不能从反映大地构造的具体地质环境沿革(Geological Context)上,确定其动态特征的岩石、矿物、地球化学元素组合。工作中不能把岩石、矿物和地球化学组合融为有机的整合,并根据其组合特点,来共同反映出物质组分的动态变化规律。野外观察、显微镜岩石学包括组构(Fabrics)、捕虏体和化学元素推断之间有所减弱或脱节,甚至过于简单地仅用某一些元素组合及其相关的地球化学元素图解不加评论地来确定其大地构造环境。截至现在为止,我们还没有自己的任何可靠的重熔实验数据,而元素组合缺少这些材料,只能看成是粗略的一般性的材料,不可能以之来发展可以依赖的理论。化学动力学和流变学基本未进入研究领域。在这种缺乏理论准备的情况下,我们很难从工作实际上上升成为成型的理论,即使有些已形成的某些推论也缺少认真的反馈和检验,因而不能达到进一步的抽象。

目前研究工作中出现一种严重的风气,表现为摹仿国际间的流行学说用以唯一地说明我国花岗岩成因,在区域性的研究上更是如此,例如用板块构造的沟-弧-盆体系泛泛地解释我国各个时代的花岗岩的分布,或是用成因中的某些端元类型来解释自然界中的时间长河中变化着的各种相互作用影响的花岗岩演化类型。这种非科学的作风在地质研究思维上有着深层次的传统基础,从地质科学的发展史上看,它是从静止或稳定状态研究到随时间变化而运动的动力状态的过渡中经常遇到的一种逆向的形而上学的思维的反映,必须经常加以警惕。

看来,把花岗岩的形成和发展归之为岩石圈动力学研究中地壳和地幔受热流传递的影响所发生的多种地质作用所制约的产物的研究仍处于一个起步的阶段。以各个地区的花岗岩系的岩石、矿物、地球化学元素的共生组合为经验判据,通过热力学包含其动力学理论的印证并与大地构造相结合形成成为动态的经验式的地质观察模拟,并逐步变成以热流传递的理论的热模式仍不失为今后的一个研究方向。

50 年来的经验说明,在克服上述的缺陷的同时,我们完全有条件通过中国花岗岩研究,在世界方面做出我们应有的贡献。

主要参考文献

- 巴博尔 G B, 济南侵入岩. 地质学报, 1923, 2 (1、2): 35~78
- 曹国权等, 鲁西早前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1996
- 常印佛、刘香培、吴言昌, 长江中下游铜、铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991
- 程裕淇, 中国东北部辽宁-山东等省前震旦纪鞍山式条带状磁铁矿中富矿的成因问题. 地质学报, 1947, 37 (2)
- 程裕淇主编, 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994
- 池际尚、李兆鼎等, 燕山西段南口花岗岩, 见: 池际尚论文集. 北京: 地质出版社, 1997
- 邓晋福等, 白云母/二云母花岗形成与陆内俯冲作用. 地球科学, 1994, 19: 139~1470
- 何作霖, 房山花岗岩闪长岩之特殊斑状结构. 地质学报, 1937, 16 (1): 417~420
- 贺同兴、林强、方占仁等, 冀东太古宙花岗岩成因. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992
- 洪大卫、王式洸等, 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. 中国科学 (B 辑), 1995, 25 (4): 418~425

- 李之彤主编, 中国北部花岗质岩石及其成矿作用。北京: 地质出版社, 1991
- 李之彤、赵春荆, 小兴安岭-张广材岭花岗岩带的形成和演化, 见: 中国北方花岗岩及其成矿作用论文集。北京: 地质出版社, 1991
- 林景仟、谭东娟等, 胶辽中生代花岗岩。北京: 科学出版社, 1992
- 莫柱孙等, 南岭花岗岩地质学。北京: 地质出版社, 1980
- 尚瑞钧、严阵等, 秦巴花岗岩。武汉: 中国地质大学出版社, 1988
- 涂光炽、张玉泉、赵振华, 华南两个富碱侵入岩带的初步研究, 见: 花岗岩和成矿关系。南京: 江苏科学技术出版社, 1986
- 徐克勤、孙鼎、王德滋等, 华南多旋回的花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨。地质学报, 1963, 1 (2)
- 徐克勤、孙鼎等, 华南花岗岩成因与成矿花岗岩和成矿关系, 见: 国际学术会议论文集。南京: 江苏科学技术出版社, 1986
- 叶良辅、喻德渊, 南京镇江间之火成岩地质史。前中央研究院、所专刊 (乙种), 1934, 第 1 号
- 郁建华、付会芹等, 北京地区岩浆深成作用。北京: 地质出版社, 1994
- 郁建华、付会芹、张凤兰等, 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石。北京: 中国科学技术出版社, 1996
- 张本仁、骆庭川等, 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究。武汉: 中国地质大学出版社, 1994
- 张理刚等, 东亚岩石圈块体地质—上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学。北京: 科学出版社, 1995
- 赵广涛、王德滋、曹钦臣, 崂山花岗岩岩石地球化学与成因。高校地质学报, 1997, 3: 1~150
- 周珣若、吴克隆等, 漳州 I—A 型花岗岩。北京: 科学技术出版社, 1994
- 庄育勋, 中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程。长春: 吉林科学技术出版社, 1994
- Hutton J, Theory of the earth with proof and illustrations. I and II. Edinburg. Creech. 1795
- Bowen N L, The granite problem and the method of multiple prejudices. Geol. Soc. Am. Mem., 1948, 28: 79~90
- Read H H, Granites and granites. Geol. Soc. Am. Mem., 1948, 28: 1~19
- Read H H, A contemplation of time on Plutonism. Quar. Jour. Geol. Soc. London, 1949, 105: 101~56
- Winkler H G F, Die Genese der Metamorphen Gesteine. Springer Verlag, Berlin, 1965, 1~218
- Wyllie P J, Experimental studies on biotite and muscovite-granite and some crustal magnetic sources. In: Migmatites, Melting and Metamorphism (eds.) M P A Therton and C D Gribble, 1983, 12~26
- Johannes W, The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In: Migmatites, (ed.) Ashworth J R, Blackie, Glasgow, 1985, 36~85
- Chappell B W, White A J R and Wyborn W, The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. J. Petrol. 1987, 28: 111~1138
- Vernon R H, Etheridge M A and Wall V J, Shape and microstructures in granitic rocks, indicators of magma mingling and flow. Lithos., 1988, 22: 1~11
- Didier J and Barbarin, (ed.), Enclaves and Granite Petrology. Elsevier, Amsterdam, 1991, 1~6170
- Barbarin B, Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. Geol. J. 1990, 25: 227~238
- Pitcher W S, The Nature and Origin of Granite. Blackie, Glasgow, 1993, 1~316
- Hutton J, System of the earth, its duration and stability. Trans. R. Soc. Edinburgh, 1785
- Read H H, Granite series in mobile belt. Geol. Soc. Am. Special paper, 1955, 62: 409~430
- Han B F Wang S G, *et al.*, Depleted source for the Wungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth, Chemical Geology, 1997, 138: 135~159

- Hildreth W and Moorbath S, Crustal Contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 98: 455~489
- Ashworth J R and McLellan E L, Textures in migmatites (ed.) Ashworth J R, Blackie, Glasgow and London, 1985, 180~203
- Olsen S N, A quantitative approach to local balance in migmatites. In: *Migmatites, Melting and Metamorphism*. (eds) Atherton, M P and Gribble C D, Shiva Publishing Ltd. Nantwich, 1983, 201~233

