21世纪初花岗岩成因研究的几个重要前沿

肖庆辉

国土资源部信息中心,北京,100812

摘　要：近十多年来，人们已认识到大多数花岗岩浆的发育和演化受对流地幔物质向岩石圈地壳输入作用过程的制约，开创了把壳-幔相互作用研究与花岗岩形成演化紧密结合的新方向，这个新的研究方向的科学前沿主要是花岗岩形成与大陆生长和深部过程的关系；花岗岩形成的深熔作用和热源以及花岗岩的成因类型与构造环境。这些前沿研究试图从大陆生长及大陆动力学的层次去认识花岗岩成因，以期能建立起一个它们之间相互关联的框架，并进一步通过这一框架追索它们形成时热能传递的机理及其体制。因此，研究花岗岩不仅可以获得花岗岩物质来源和构造环境的信息，而且可以获得壳幔物质运动的状态、过程、动力学等问题的本质、深部能量(热能)的传导、转化的重要信息。探索和解译这些信息，对于认识大陆生长具有纲举目张的作用，是解决当今大陆地质演化，建立大陆动力学关键问题之一，是继花岗岩物质来源、构造环境研究的花岗岩研究的第三个里程碑的开始，因而具有重要的战略意义。

关键词：花岗岩、大陆地壳生长、深溶作用　构造环境

70年代以来地质学家在认识花岗岩成因方面先后经历了三个认识层次。第一个层次是1974年chappell和white发现[1]，花岗岩成因受成岩物质源岩控制，将花岗岩划分为I型和S型，在花岗岩研究中掀起了研究花岗岩源岩的思潮；第二个层次是1979年Pitcher[2]根据板块构造理论，把按源岩划分的不同成因类型花岗岩与不同构造环境结合，提出了花岗岩形成的构造环境分类，使花岗岩研究深入到探索构造环境的阶段。第三个层次是1993年美国制定大陆动力学计划时[3]，地质学家认识到花岗岩、成矿作用实际上是大陆生长过程的产物，是对流地幔物质向地壳输入的过程，因此壳-幔相互作用，特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统相互作用对花岗岩、成矿作用有重要的控制作用（邓晋福等，1999；肖庆辉等，2003），因此把花岗岩的形成与软流圈地幔物质向地壳输入控制大陆生长联系起来，从软流圈地幔物质向地壳输入的新视角研究花岗岩形成过程与大陆生长关系已成为重要研究方向（肖庆辉等，2003；邓晋福等，2003）。提出岩浆的形成、运移和侵位是大陆生长的基本过程，使人们认识到大多数花岗岩浆的发育和演化受软流圈作用过程的制约。从此，开创了把壳-幔作用研究与花岗岩形成演化紧密结合的新方向。这个新的研究方向产生了许多科学前沿，下面就几个比较重要的谈一些个人看法。

一、花岗岩形成与大陆生长和深部过程的关系

大陆的生长和演化是地球科学长期研究前沿问题之一，也是大陆动力学研究的八个重要科学问题之一。近年来的研究发现，花岗岩在大陆生长与地球深部过程中扮演了重要角色，为大陆形成演化和花岗岩研究都开辟了一条全新的研究思路和新的研究领域。

大陆生长是指地幔物质通过各种作用进入地壳，导致地壳物质数量增加和体积增大。因此，大陆壳生长方式是探讨地幔物质输入地壳的多少以及改造地壳过程方式。花岗岩的物质来源可反映出地壳物质来源地幔、下地壳和上地壳多少以及改造地壳过程，即对流地幔物质输入地壳多少以及改造地壳过程、。因此，大陆壳生长与否可以通过研究花岗岩的物质来源方式探讨是否具有地幔物质输入地壳、输入多少、过程等进行判断。

花岗岩在大陆生长中主要通过两种方式使大陆增生。一种方式是主要通过幔源与壳源岩浆的混

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

合作用使大陆发生增生，即以幔源岩浆为载体的地幔物质通过岩浆混合作用形成混源花岗岩这种方式为大陆生长提供了物源。例如，西欧海西造山带，由壳、幔源岩浆混合形成的花岗闪长岩分布广泛，它是在造山作用中大量幔源物质通过形成巨量的花岗闪长岩加入到地壳，造成一次重要的地壳生长。这种生长是广泛的底侵(underplating)基性岩浆与地壳物质(岩浆)之间的相互作用形成[4,5]。这一地壳生长事件在尺度上可与元古代地壳生长事件类比，并与主造山作用同期，即地壳生长主要发生在造山过程中。又如，在阿拉巴－努比亚地盾，在 790Ma 的裂谷活动到 740Ma 的碰撞造山过程中，花岗岩浆中 LIL 元素富集的早期演化阶段被高度地幔熔融作用所打破，意味着地幔柱的到来，代表了一次地壳生长事件[6]。在安第斯山脉地壳生长中，中生代花岗岩也提供了重要的物质贡献[7]。在中国，昆仑和秦岭造山带，大量后碰撞花岗岩属壳-幔混合成因，也显示有源于地幔的物质组分，代表了一次重要的陆壳垂向生长。据王涛估算，秦岭造山带核部在晋宁期和加里东-海西期，通过壳幔岩浆混合作用形成的混合型花岗岩浆进入地壳的幔源物质质量可能分别约 630km^{3}和 4400km^3[8]。中国东南沿海一带大量的 I 型花岗岩的形成也与地幔源基性岩浆的底侵及壳幔相互作用有关。这些实例说明，幔源物质通过壳-幔混源岩浆形成花岗岩进入地壳也是一次重要的大陆生长事件。因此，除了板块会聚造成的地壳的水平增生外，幔源物质通过形成壳-幔混合花岗岩进入地壳引起大陆内部体积增大也是一个很重要的大陆生长作用，特别是在造山作用期间。随着对岩浆混合成因花岗岩的不断研究和幔源组分的识别，相信这种方式造成的大陆生长将得到进一步重视。另外，壳-幔混源型花岗岩的大量发育也可作为识别壳幔相互作用及幔源岩浆底侵的标志之一。

第二种方式则是通过软流圈上涌部分熔融形成的幔源玄武岩浆底侵作用的热源使下部大陆壳发生重熔及部分熔融形成花岗岩而使大陆地壳发生改造和垂向生长。在冰岛人们发现，灰色片麻岩的奥长花岗岩-英云闪长岩源岩是早先已存在的玄武岩堆积体受到新的玄武岩浆底侵作用的影响而发生脱水部分熔融形成的。这就是说，大量的花岗类岩石是通过软流圈上涌的热源引起地壳底部的玄武岩堆积部分熔融而形成的。那么，这种软流圈上涌部分熔融形成的玄武岩浆底侵的空间范围及其热源有多大？它们又通过什么方式与中下地壳发生相互作用形成花岗岩？这是 21 世纪花岗类岩石研究的一个很重要的新方向。

地球物理资料表明，前寒武地盾或地壳岩石圈厚度要比年轻的古生代或中生代造山带厚得多，而且其下地壳的反射特征有别于较年轻的地壳反射特征，表明在大陆碰撞以后有一种或多种作用使较老的地盾岩石圈或地壳向下生长长大。这种作用是否是幕式的软流圈上涌部分熔融形成的岩浆底侵作用，这种底侵作用是否给广泛的元古宙非造山花岗岩-流纹岩，特别是代表岩石圈生长的环斑花岗岩提供了物质和热源。最近研究还表明，软流圈或上地幔上涌从空间上来看，往往控制岩浆底侵和拆沉作用，现在需要解决的是软流圈或上地幔上涌如何控制和转变成底侵岩浆？它们之间成因联系是什么？这是 21 世纪花岗类岩石研究的另一个很重要的新方向

人们根据许多巨量的花岗质岩浆来源于下地壳这一认识普遍认为，相当大量的幔源岩浆以底侵方式屯积在地壳底部附近形成岩浆池(pond)。这种屯积作用带来的地幔热源引起下部地壳大规模变质作用和深熔作用，形成巨量花岗岩使大陆物质发生循环增生，并因此引发和维持了地壳岩浆系统。据 Brown 研究[9]，从花岗岩与大陆生长关系来看，造山带可区分为两种类型：一类是造山作用造成的地壳加厚作用使地温增加，随后的剥蚀减压导致加厚地壳岩石的脱水熔融形成花岗岩浆；另一类是由于岩石圈发生拆沉减薄，软流圈上涌导致玄武岩浆的底侵作用，使大陆中下地壳发生改造重熔形成花岗岩。

花岗岩与大陆生长关系的另一个研究方向是大陆地壳主体是何时生成的？传统的大陆生长模型认为，大陆地壳主体主要形成于地球历史的早前寒武纪，以太古代最为重要，显生宙大陆地壳生长可以忽略不计，并认为大陆地壳生长主要通过发生在会聚板块边界上的弧岩浆作用和弧杂岩增生来实现，即以水平增生为主。然而，我国新疆北部、内蒙、东北大兴安岭及哈萨克斯坦、蒙古、俄罗斯远东—即中亚造山带广泛分布的晚古生代-中生代的巨量花岗岩，它们以正 εNd 为鲜明特色，反映了显生宙发生重要的地壳生长事件，对传统地壳生长观点提出了挑战。Sengor 曾提出古生代的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Altaid Tectonic Collage(即中亚造山带)大陆增生面积达 $5.3\times10^6km^2$，其中地幔来源的新生陆壳物质几乎占了一半[10]。显生宙陆壳生长在加拿大科迪勒拉[11,12]和北美东北部[13,14]亦有重要显示。毋庸置疑，显生宙大陆地壳生长非常重要，中亚造山带是地球上显生宙大陆生长的最重要地区。显生宙大陆地壳生长已引起了国际地学界普遍关注，联合国教科文组织从 1997 年开始设立了国际地质合作项目 IGCP-420(显生宙地壳增生—来自中亚的证据)。2000 年在巴西召开的第三十一届国际地质大会专设了显生宙地壳增生的专题讨论会。

自 IGCP-420 对比计划开展以来，人们已把花岗岩 Nd 同位素研究与地壳生长联系起来。但是，对于这些花岗岩的成因和地壳生长关系至今仍在探索争论中，提出了一系列模型。诸如由新生的新元古代地壳深熔形成古生代-中生代“花岗岩洋”[15]；高度分异的幔源岩浆与古老地壳物质混合；新生的基性地壳物质与古老地壳物质混合[16,17]；幔源基性岩浆同化地壳物质并同时发生结晶分异[18,19,20]；幔源岩浆底侵作用和直接分异[21]等。随着新的观察事实的积累，将对这些模型提供更多制约，最终达到比较正确的认识。

根据近年来对大陆岩石圈三维结构的研究发现，上述两种陆壳垂向生长的物质和热源不仅与壳-幔相互作用有关，而且与更深部的来自上地幔岩石圈和软流圈的及与以及与软流圈物质上涌有关。如在幔隆或软流圈上涌的地方，壳、幔物质往往可以发生大面积的相互作用。美国盆岭省 50%的地壳是镁铁质的，其中 25%是由幔隆或软流圈上涌的这种方式形成的[22]，澳大利亚昆士兰陆壳的 20%(约 8km)也是由这种作用形成的[23]。这些作用大多发生在由幔隆引起的伸展构造活跃的地区，是探讨大陆岩石圈演化的重要地区。中国东部是中生代以来构造岩浆作用十分活跃的地区，大多数花岗岩的形成是也是研究软流圈上涌导致岩石圈和软流圈相互作用最好的天然实验室。

总之，现代花岗岩成因理论认为，大多数花岗岩的形成是壳-幔相互作用结果，而壳-幔相互作用往往又受软流圈上涌控制。通过对花岗岩的研究能追踪壳-幔相互作用和软流圈上涌与岩石圈相互作用的演化轨迹，进而研究大陆生长、演化的历史，这已经变成花岗岩研究的一个重要前沿，成了今后研究探索花岗岩与大陆生长和深部过程的基本内容。在这种情况下，今后要解决花岗岩的成因，首先要解决大陆岩石圈和软流圈深部三维结构和演化过程，查明花岗岩形成的物质来源和热源。在这方面今后需要解决的科学前沿问题是：花岗岩岩浆在哪里生成？当它们通过地壳上升时是如何演变的？花岗岩浆的产生如何受软流圈或岩石圈地幔控制，包括与地幔结构(垂向的)的关系和与构造环境(水平向的)有怎样的关系？板块构造理论已使我们认识到，一部分地壳曾进入地幔再循环。这一认识与麻粒岩地壳岩石几十亿年都保持不循环的认识相悖。花岗岩形成以后是否发生过进入地幔的再循环。以捕虏体和岩浆岩化学分析为基础，可以研究不同时代花岗岩再循环的可能性，辨别出有多少物质是再循环和有多少物质是新生的。此外，玄武岩浆的底侵作用如何及何时形成，它们与花岗岩岩浆形成有什么关系。另外，以底侵方式添加到地壳中的初始岩浆绝大部分是基性的，而大陆地壳的平均成分却是中酸性的。基性岩浆如何转化成中酸性岩浆，这一涉及大陆生长机制的基本问题始终困扰着地学界。通常认为，这些起源于地幔的基性地壳的分异和再改造在大陆地壳形成过程中必然是个重要的过程。问题是基性地壳后来是通过什么方式和过程转化成中酸性地壳的，而且，在何种时间尺度上？是什么机制促成这种转化？近些年，拆沉和底侵作用对大陆地壳增生(特别是垂向增生)的意义受到高度关注。一些学者提出，大量中酸性花岗岩(富钠)是由于幔源岩浆底侵引起基性下地壳物质再次发生部分熔融而形成，熔融残留体(含石榴石斜长角闪岩或榴辉岩)可能通过拆沉的方式重新返回地幔，从而使大陆地壳不断生长分异并趋于成熟而克拉通化[24,25,26]。这一模式得到一些学者对基性岩的熔融实验的有力支持：基性岩经过 20～40%的部分熔融可形成富钠的中酸性熔体(英云闪长岩-花岗闪长岩)，但熔体的地球化学特征与熔融压力和含水条件(决定源区是否有石榴石和斜长石等残留)有密切关系。如何用实验去检验这一实验结果并科学评价上述模式的地质意义也将成为科学家们关注的前沿[26,27]。

总之，要解决花岗岩成因问题，要从以往偏重于岩性和地球化学研究，扩宽到应用物理学知识和手段研究花岗岩，即通过花岗岩地质、地球化学特征和地球物理相结合，揭示地球动力学过程。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而且要把花岗岩形成和演化与相应的区域构造形成与演化以及动力学环境结合起来，这样才能使花岗岩研究真正成为《岩石大地构造学》，在理论上有所创新。

二、花岗岩形成的深熔作用和热源

提出深熔作用(anatexis)概念已有近百年历史了。虽然不同人、不同时间对这一概念的表述有所不同，但长期以来，人们对引起深熔作用的原因是来自深部花岗岩汁，还是岩石变质或超变质作用仍争论不休。争论的焦点主是要是引起深熔作用的热源是来自深部的岩汁热还是超变质作用产生的热，争论双方都很少考虑到软流圈或上地幔上涌带来的热源壳引起底侵作用以及壳幔相互作用。

但近10多年研究发现，许多花岗岩都是软流圈或上地幔上涌引起底侵作用以及壳幔相互作用带来的热源引起地壳深熔作用的产物。近代技术的发展，特别是地球物理方面的成就，包括物探测量，诸如热流与地震和重力等资料相结合的总结，在理论方面提供了许多有关地壳热能传递的讨论，包括热流与岩浆作用、深部热流扰动(perturbation)和松驰(relaxation)及其与地壳表面大地构造的联系初步的总结和探讨。80年代中期，变质作用 P-T-t 轨迹的研究把热流传递中以传导作用为主与造山带中地壳加厚相结合建立的有关理论模式 (theoretical modeling)，岩浆作用与热流的联系的若干发展，地幔对流作用在岩浆成因中所起的作用的基本论述，以及某些花岗岩体的热模拟(theoretical modeling)等，都为研究地幔热源引起花岗岩形成的热传输机理的研究提供了知识基础。现在人们已普遍认识到地幔热源引起地壳重熔或深熔作用是花岗岩的形成重要方式，而深熔作用的方式不仅包括超变质作用，也包括残留体的熔融，结晶分异作用和混熔作用等等[9,28]，凡此种种都与深部的地幔热扰动和热松驰有关，即引起深熔作用的热源主要来自软流圈或岩石圈地幔。

这样,近年来对地壳深熔和热源认识和研究，正从地壳层次扩展到软流圈或岩石圈地幔层次，地幔的热如何控制和影响地壳的深熔作用成了花岗岩成因研究的另一个重大前沿，从而使地壳深熔作用及其热源研究具有了全新的方向和研究内容。在这一思想指导下，当前花岗岩研究正在走向以地壳和地幔相互作用为主线，以地壳深熔作用为突破口的花岗岩成因研究，并以此为基点探索软流圈或岩石圈地幔热源传递的机理及其可能发生的原因，摆脱了过去狭隘的岩浆与混合岩化之争以及岩浆作用和热液作用的对立。

正如上面所述，目前普遍认为，大多数花岗岩是相当大量的幔源热岩浆屯积在地壳底部使地壳熔融和与之混合而产生的。但目前人们对这种屯积作用的机制和结果是什么？什么控制因素决定着幔源岩浆是在地下屯积还是向上喷发？对于幔源岩浆和壳源岩浆来说，熔融体分离作用的物理学仍然了解不够。熔融体从它的源区分离出来需要多大程度的熔融？高粘性的花岗质岩浆怎样才能脱离其部分熔融的源区而发生运移？

岩石实验研究表明，花岗闪长质岩到钙碱性花岗质岩浆是大陆地壳成分在780℃脱水熔融形成的[24,29,30]，而镁铁质地壳源岩在水不饱和条件下部分熔融需要超过1100℃的温度[24,29,30]。这就导致许多研究者提出，来自地幔的热输入到地壳引起地壳深熔形成花岗岩。如玄武质岩浆底侵于花岗岩之下，不但向地壳提供了幔源物质，而且还提供了热能。同时，镁铁质岩如闪长质到辉长质作为微粒包体产在长英质寄主岩中或作为独立的侵入体产出，也表明地幔的化学物质直接加入到地壳，因为暗色微粒包体是来源于地幔的基性岩浆与地壳部分熔融的酸性岩浆混合形成的，另外，在中生代的火山岩中也发现了深源包体[31] 。可见，造山带花岗岩无论是在热源方面还是在物质组成方面，都存在着地幔的贡献[32]。但问题是，在碰撞造山带花岗岩的形成过程中，幔源岩浆的热贡献究竟有多大？中地壳到下地壳的部分熔融形成的熔体如何传输到上地壳，引起大陆地壳成分的化学分异[33] ，特别是它们所涉及到的物理过程仍存在争议。因为，在部分熔融的源区，只有大量的熔体与残余体发生分离，才能形成花岗质岩浆，搞清这种过程是确定造山带大陆地壳形成演化的关键。在部分熔融区，熔体和残余体的分离也许是完全的、单一的过程，象低度深熔混合岩中的浅色岩[28] ，也许分离是不完全的、多阶段的，产生具有大量残余体的岩浆，象在高度深熔混合岩中见到的一样[34,35]。然而，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在下地壳形成的深源岩浆如何演化成侵入到上地壳的花岗质岩浆也不清楚，因为，很少见到从部分熔融源区到上地壳侵入体的连续剖面。相反，大多数地壳剖面显示了浅层次的侵入体或较深的深源岩石。即使花岗岩岩浆具有残余体成分，当岩浆上升到浅处时，残余体也会大大减少。因此，这种分离作用在何处和如何发生的仍不清楚。总之，源岩－混合岩－花岗岩过渡的性质和深熔期间产生花岗质岩浆的过程是什么[36] ？什么作用控制源区之外的岩浆成分？

此外，高温高压实验表明，地幔橄榄岩的部分熔融不能直接产生花岗岩类岩浆，只能形成玄武质岩浆；而玄武质岩石的部分熔融可产生英云闪长质－奥长花岗质－花岗闪长质的岩浆组合，英云闪长质－奥长花岗质岩石的部分熔融可产生花岗质岩浆[37] 。同时，压力不同，玄武质岩石部分熔融产生花岗质岩浆后，源区的残留物不同。一般来说，在较低的压力(≤1.0GPa)下，残留下麻粒岩相的矿物组合[24,38,39]，在较高的压力(≥1.5GPa)下，残留下榴辉岩相矿物组合[24,38]。岩浆液相线多元矿物饱和实验也表明，在 1.5Gpa 的压力条件下，英云闪长岩～奥长花岗质岩浆与榴辉岩相矿物组合平衡，证明其源岩是玄武质的，而不是地幔橄榄岩[40]。中国超高压带上的花岗岩类组合可分为两大类，一类是闪长岩－石英闪长岩－花岗闪长岩－黑云母花岗岩，另一类花岗闪长岩－二云母/白云母花岗岩－含电气石正长花岗岩，它们由玄武质岩石部分熔融形成并残留下榴辉岩吗？或是由玄武质岩浆分异形成？这些不同类型花岗岩类与榴辉岩和片麻岩类究竟有什么关系？形成这些花岗岩类的构造背景是什么？这些 都是 21 世纪初尚待研究的前沿。

在这样的背景下，深入剖析软流圈或岩石圈地幔的热输入到地壳引起地壳深融过程，研究混合岩、深熔作用和花岗岩之间的关系；追踪地壳深熔过程，探索记录这种过程的岩石学、岩石组构变化和地球化学标志；追踪软流圈或岩石圈地幔来源岩浆和地壳来源岩浆的相互作用过程，及热传输机理及其体制，探寻壳-幔岩浆相互作用中的岩石学和地球化学标志，成了深熔作用和热源的基本研究内容。

需要特别强调的是，这里所说热传输的机制，包括传导和对流。它们既受介质本身物理性质的影响，又受因构造环境变化所导致的热扰动的影响。目前这方面的研究正从热力学条件的研究(温度、压力的测定)向动力学方向(热机制随时间演化)转化，虽然刚刚起步，却有巨大的发展潜力。

根据上述可见，花岗岩的成因，包括源岩和热流机制两个不可缺的方面。80 年代以来花岗岩的研究重心是它的源岩，现在则正在将花岗岩的形成过程和热流机制结合形成一个既有起始状态又有演化过程的总体进程，其核心正是热能的来源和转化。将源岩和热能的演化过程结合起来进行研究，尤其是开展热流机制的研究，是 21 世纪初期花岗岩成因研究所面临的新的、复杂的前沿问题[41,42,43]。

三、花岗岩的成因类型与构造环境

花岗岩的成因类型和构造环境一直是地球科学研究中具有重要理论和实际意义的问题，长期以来，观点分歧，争论激烈。早期仅从岩相学意义上的产出深度进行分类。后来，人们开始将花岗岩类的形成和分布与区域大地构造演化联系起来。如以海德曼为代表，从历史大地构造学(槽－台学说)的角度，把花岗岩类划分为地槽造山和非造山二大类。七十年代左右，花岗岩类的分类从花岗岩成岩物质的来源的角度进行划分，其代表主要有 Chappell 和 White 划分的 I 型和 S 型分类以及后来的 M 型和 A 型分类。我国的徐克勤等则分出陆壳改造型、同熔型和幔源型。九十年代以来，由于越来越多的证据表明，S 型和 I 型花岗岩在化学成分、同位素成分上发生重叠，而且这两种类型花岗岩中均存在岩浆型包体[44,45]，表明有许多的镁铁质岩浆和/或其他火成源的岩浆卷入了两类花岗岩浆。因此，Castro 等[4]提出了混源(H)型花岗岩的概念，建议用 H 型花岗岩来代替 I 型花岗岩。八十年代的研究还发现，不同成因类型的花岗岩的形成离不开一定的构造环境，为此不少研究者把这种按源岩划分花岗岩成因类型与不同构造环境结合起来，例如，英国地质学家 Pitcher[46]基于“不同成因类型的花岗岩代表不同的活动带”的观点，把不同成因类型的花岗岩与不同的构造环境结合，根据板块构造理论，提出了花岗岩形成构造环境的分类方案，把花岗岩划分为海洋岛弧型(M 型)、

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

活动大陆板块边缘型(科迪勒拉Ⅰ型)、造山期后隆起区型(加里东Ⅰ型)、克拉通褶皱带和大陆碰撞带型(S型)、稳定褶皱带和克拉通的隆起－裂谷型(A型)。Pitcher这种分类的实质是建立在动力学构造环境与源区类型存在固定对应关系的简单化假设的基础上，而对不同历史演化阶段对花岗岩类源区类型及形成方式有不同的控制作用，特别是对目前广为人知的花岗岩与软流圈或岩石圈地幔的热输入到地壳引起地壳深融，岩石圈减薄与伸展环境注意不够，因此，关于花岗岩成因类型同构造环境的关系[52]远不是过去设想的那样简单，引起了热烈的争议，受到众多质疑。

正如上面所述，九十年代以来人们已认识到大多数花岗岩是软流圈或岩石圈地幔的热输入到地壳引起地壳和地幔相互作用的产物，地幔可以从派生热流、释放挥发性流体、和地幔来源物质的混合，直到地幔的部分熔融等多种形式参与花岗岩的形成；地幔同地壳相互作用也可以是底侵(underplating)、拆沉(delamination)或俯冲等多种形式[47,48]。所以，花岗岩形成与大地构造环境的关系，实际上反映了大地构造演化某一阶段与壳幔相互作用的联系。此外，人们也认识到花岗岩是造山带的基本组成之一，它们的成分变化除受构造环境影响以外，还受以下主要因素制约：①不同的源岩成分；②不同的熔融条件；③基性和酸性组分之间的化学和物理反应；④地壳混染[49]；⑤岩浆演化机理等。

基于上述考虑，花岗岩成因类型及构造环境研究，仍然是当代花岗岩研究的前沿，但新一代的构造环境分类不仅要考虑源岩和经典的板块构造动力学类型，而且应该在软流圈或岩石圈地幔的热输入到地壳更宽的范围和时间演化上去认识花岗岩形成的构造环境。应该强调的是，花岗岩是多种地质因素及其相互作用产物，但是，总体上受软流圈或岩石圈地幔的热输入引起地壳和地幔相互作用的控制尤其重要，因此，应该把区域性花岗岩成因与壳-幔相互作用、岩石圈三维结构与演化、软流圈上涌以及岩浆源区、局部熔融条件以及岩浆演化机理等相结合。这样才能建立起一个它们之间相互关系的框架，并通过这一框架追索它们形成时的构造环境以及热流传递的机理及其体制[7,9]。

在花岗岩成因类型和构造环境划分和鉴别方面，现在愈来愈多的人认识到火成岩岩石化学与地球化学特征直接依赖于源岩的性质、局部熔融条件与岩浆演化机理。因此，不同地区同类岩石之间有较大的地质地球化学差异，基于某一区域(甚至经典区域)建立的若干分类指标，尤其地球化学鉴别指标及其图解，不可教条地套用于其他地区。J. R. Cann 和 J.A. Pearce 是应用痕量元素判别图解划分构造环境的先驱，自70年代以来，他们的图解得到广泛运用。但是，随着研究的深入，发现它不是惟一的。单一地依赖于痕量元素判别图解有时会造成古构造环境的错误判断[50]，为此 J.A. Pearce 1987 提出一个“专家系统”，把地球化学特征与多种地质学和岩石学约束配合起来去推演古火山岩的构造背景。这一新的研究趋势近年来得到了发展，例如 Barbarin 综合考虑了花岗岩类的矿物学、岩石学和地球化学特征[41]，以海西造山带演化为基础，将花岗岩形成的构造环境划分为白云母过铝质花岗岩类(MPG)、堇青石过铝质花岗岩类(CPG)、富钾钙碱性花岗岩类(KCG)、含角闪石钙碱性花岗岩类(ACG)、岛弧拉斑玄武质花岗岩类(ACG)或大洋中脊拉斑玄武质花岗岩类(RTG)、过碱质碱性花岗岩类(PAG)。

四、结 论

20 世纪 90 年代以来，受大陆动力学及大量新的实验测试技术与研究方法的推动，花岗岩成因地质研究已从过去以岩相学和地球化学为主逐渐转入到从构造观入手探索花岗岩地球动力学的新阶段。这一阶段的前沿是从大陆生长及大陆动力学的层次进行花岗岩成因地质研究。围绕这一重大前沿问题当今国际花岗岩成因地质研究一个主要方向是把区域性花岗岩成因和大陆生长相结合，以期能建立起一个它们之间相互关联的框架，并进一步通过这一框架追索它们形成时热能传递的机理及其体制。因此，研究花岗岩不仅可以获得花岗岩物质来源和构造环境的信息，而且可以获得软流圈或岩石圈地幔的热输入过程，状态、动力学，和它们引起的地壳和地幔相互作用的壳幔物质运动的状态、过程、动力学等问题的本质。探索和解译这些信息，对于认识大陆生长具有纲举目张的作用，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是解决当今大陆地质演化，建立大陆动力学关键问题之一，也是21世纪初花岗岩成因研究导向趋势[42, 43, 50]，是继花岗岩物质来源、构造环境研究的花岗岩研究的第三个里程碑的开始[50]，因而具有重要的战略意义。

中国花岗岩在空间和时间上的分布是世界其他地区不可比拟的。它们形成于从始太古代到新生代的各个不同地质时期和不同构造域、不同构造演化阶段。花岗岩成因同大地构造演化的关系以及同成矿作用的关系都具有相同的踪迹可寻。解放以来，特别是改革开放以来，花岗岩研究有了飞跃的发展，不仅完成了全国大部分地区的1∶20万区域地质调查，出版了大量的专题性和区域性总结，积累了丰富的资料，研究水平也有了很大的提高。不少学者已瞄准花岗岩与大陆生长关系等前沿开展研究，并取得了许多新成果，新认识[50, , 52, 5354]。但是，不容忽视的是，我国花岗岩研究的总体水平，仍停留在岩石学与地球化学研究阶段，与国际先进水平相比仍有很大的差异[5055, 56]，与我国这样一个花岗岩大国的地位不相称，也与当前地质大调查的要求不适应。我们认为，只要立足于中国花岗岩的实际，瞄准当代花岗岩成因研究的前沿踏踏实实、艰苦奋斗、锐意进取、开拓创新、提倡多学科交叉渗透，中国花岗岩地质学家是有能力也有条件在中国大陆生长与演化方面做出自己的贡献的。

参 考 文 献

[1] Chappell B.W. and Wh ite A.J.R Two Contrasting granite type. Pacific Geol. 1974 8:173～174

[2] Pitcher w.s. Comments on the geological environments of granites. In origin of granite batholiths: geochemical evidence. Shiva publishing Limited, 1979 1～8

[3] NSF, U.S.A. A National program for Reseach in Continental Dynamics. 1993 The IRIS Consortium p.72

[4] Castro A. H-type (Hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite type classification and nomenclature. Earth Science Reviews, 1991. 31: 237～253

[5] Castro A. De la Rosa J. D, Fernàez C and Moreno-Ventas I. Ustable flow, magma mixing and magma-rock dedormation in a deep-seated conduit. The Gil-Mquez complex, Southwest Spain. Geologische Rundschau, 1995. 84: 350～374

[6] Bateman R, Man M P and Castro A. Mixing of cordieritgranitoid and pyroxene gabbro, and fractionation, in the Santa Olallatonalite (Andaluc). Lithos, 1992. 28: 111～131

[7] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 1999.46: 605～626

[8] WANG Tao, studies on granites and Continental dynamics, 2000. Vol.7, suppl. Earth Science Frontiers, p.137～146 [王涛，花岗岩研究与大陆动力学，地学前沿，2000年vol.7 增刊 p.137-146]

[9] Brown M. The generation, Segregation, as cent and encplacement of granite magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in lhickende orogens. Earth Science Review. 1994. 36:83～130

[10] Senglor et al. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 1993, 364: 299～307

[11] Samson S D et al. Evidence from neodymium isotopes for mantle contributions to Phanerozoic crustal genesis in the Canadian Cordillera. Nature. 1989, 337: 705～709

[12] Samson S D et al. Nd and Sr isotopic characterization of the Wrangellia terrane and implications for crustal growth of the canadian Cordillera. J. Geol., 1990, 98: 749～762

[13] Foland K A et al. Nd and Sr isotopic signatures of Mesozoic plutons in northeastern North America. Geology, 1988, 16: 684～687

[14] Foland K A et al. Magma sources for Mesozoic anorogenic granites of the White Morntain magma series, New England, USA. Contrib, Mineral Petrol., 1991, 109: 195～211

[15] Wu Fuyuan, Jahn Bor-ming and Lin Qiang. Isotopic characteristics of the postorogenic granite in orogenic belt of northern China and their implications in crustal growth[J]. Chinese Sci. Bull., 1997.42:2188～2192(in Chinese) [吴福

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

元，江博明，林强，中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义[J]. 科学通报，1997，(42): 2188～2192］

[16] Jahn B.M. Continental growth in the Phanerozoic: Nd-Sr Isotope evidence from the east-central Asian orogenic belt. In: Jahn Bor-ming and Hong Dawei(eds.). 1998, IGCP-420 Frist Workshop Abstract

[17] Jahn B M et al. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia Tectonophysics, 2000, 328: vii-x

[18] Zhao zhenhua，Wang Zhonggang，Zou Tianren et al., The REE，isotopic composition of 0，Pb，Sr and Nd and diagenetic model of granitoids in A1tay region, In:Tu Guangzhi ed.: New improvement of solid geosciences in northern Xinhang[M]. Beijing:Science Press,1993,239～266. (in Chinese) ［赵振华，王中刚，邹天人，等，阿尔泰花岗岩类 REE 及 O, Pb, Sr, Nd 同位素组成及成岩类型。见：涂光炽主编，新疆北部固体地球科学新进展。北京：科学出版社，1993, 239～266］

[19] Zhao zhenhua, Wang zhonggang, Zou Tianren, et al., Study on petrogenesis of alkali-richintrusive rocks of Ulungur, Xinjiang[J]. Geochemistry, 1996, 25: 205～220(in Chinese with abstract) ［赵振华，王中刚，邹天人，等，新疆乌伦古富碱花岗岩成因探讨，地球化学，1996, 25：205～220］

[20] Zhou Taixi, Zhang Xun, Cheng Jiangfeng, et al., Pb isotopc study of granitoids along the Bortala River, Xinjiang. 1997, 18(Sup.):89～91(in Chinese with abstract) ［周泰禧等.新疆博尔塔拉河流域花岗质岩石的 Pb 同位素组成.地质科学，1996, 31：71～79］

[21] Han-Baofu; He-Guoqi; Wang-Shiguang, Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for the basement of the Junggar Basin. Science in China. Series D, Earth Sciences. 1999, 42(2):113～119. ［韩宝福，贺国琦，王式光。后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质，中国科学(D)］

[22] Smithson. S.B. 1988 the nature of the granulitic crust based on Seismic reflection profiling, Terra cognita 8(3): 273

[23] Rudnick R.L. and presper. T. Geochemistry of intermediate-to high-pressure granulites. In: Vielzeuf D and Vidal ph(editors), Granulites and crust evolution. 1990, Kluwer Academic publishers, 523-550

[24] Rapp et al., Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. Precambrian Research. Precambrian Research, 1991, 51: 1～25

[25] Sen et al., Dehydration melting of a basaitic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 Gpa: implications for the origin of adakites. Contrib. Mineral. Petrol. 1994:117: 394～409

[26] Peacock, et al. Partial melting of subducting oceanic crust. Earth Planet. Sci. Lett, 1994, 121: 227～244

[27] Nelson K D. Are crustal thickness variations in old mountain belt like the Appalachians a consequence of lithosperic delamination? Geology, 1992. 20: 498～502

[28] Brown, M., Averkin, Y. AQ., McLellan, E. L. & Sawyer, E.W., Melt segregation in migmatites. Journal of Geophysical research, 1995,100: 15655～15679

[29] Rapp R P, Watson E. B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. J. Petrol., 1995, 36: 891～931

[30] Patino Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 1997, 25: 743～746

[31] Xu Wenliang, zheng changqing and Wang Dongyan. The discovery of mantle- and lower crustderived Xenoliths in Mesozoic Trachybasalts from Western Liaoning, and their geological implication[J]. Geological Review, 1999,45(Sup.): 444～449(in Chinese) ［许文良.辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义.地质论评，1999,45(增刊): 444～449］

[32] Rainer Altherr, Albert Holl, Ernst Hegner, Carola Langer, Hans Kreuzer, High-potassium, cala-alkaline I-type plutonism in the European variscides: northern Vosges(Feance) and northern Schwarzwald (Germany). LITHOS, 2000.50: 51～73

[33] Sawyer, E.W. Formation and Evolution of Granite Magmas During Crustal Reworking: the Significance of Diatexites. Journal of Petrology, 1998.39(6): 1147～1167

[34] Bea, F. Geochemical modeling of low melt-fraction anatexis in a peraluminous system: the Pena Negra

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Complex(central Spain). Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 1859～1874.

[35] Greenfield, J. E., Clarke, G.L., Bland, M. & Clarke, D.J. Insitu migmatite and hybrid diatexite at Mt Stafford, central Australia. Journal of Metamorphic Geology, 1996, 14: 413～426

[36] Robb L J, Armstrong R A and Waters D.J. The history of Granulite-Facies Metamorphism and Crustal Growth from Single Zircon U-Pb Geochronology: Namaqualand, South Africa, Journal of Petrology, 1999, 40(12): 1747～1770

[37] Johannes, Wholtz, Petrogensis and experimental petrology of graniticrocks. 1996, Spring-verlag, Berlin, 335.

[38] Winther K, T. and Newton R, C., Experimental melting of hydrous low-K tholeiiite: evidence on the origin of Archean cratons Bull. Geol. Soc. Den. 1991, 39: 213～228

[39] Wolf, M. B. and Wyllie, J. P., Dehydration`melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. Contrib. Minera. Petrol. 1994. 115: 369～383.

[40] Johmston A.D. and Wyllie P.J. Constraints on the origin of Archean trondhjimites based on phase relationships of Nuk gneiss with H_2O at 15 kbar. Contrib. Mineral. Petrol., 1998,100: 35～46.

[41] XIAO Qinghui DENG Jinfu MA Daquan, et al. The way of investigation on granitdids, 2002.Geological publishing House, Beijing, p294. (in Chinese) [肖庆辉,邓晋福,马大铨.花岗岩研究思维与方法.2002, 地质出版社，p294.]

[42] HONG Dawei. Recent developments in granite research. Earth Science Frontiers. 1994. Vol.1, No. 1-2, 79-86(in Chinese) [洪大卫，花岗岩研究的最新进展及发展趋势[J]. 地学前缘, 1994，(1): 79～86.]

[43] Dong Shengbao. A general review on the recent studies of granite[J]. Geological Journal of the china universities，1995,1(2): 1～12. (in Chinese) ［董申保.近代花岗岩的研究回顾[J].高校地质学报，1995,1(2): 1～12］.

[44] Collins, W. J. S-and I-type granitoids of the eastern Lachlan fold belt: Products of three-component mixing. Transations of the Royal Socicty of Edinburgh, Earth Sciences, 1996, 88: 171～179

[45] Alver Soesoo, Fractional crystallization of mantle-derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: an example from Lachlan Fold Belt, Australia. Journal of the Geological Society, London, 2000,157: 135～149

[46] Pitcher W S. The nature and Origin of granite, London. 1997.

[47] Collins, W. J. Evolution of petrogenetic models for Lachlan Fold Belt granitoids: implications for crustal architecture and tectonic models. Australian Journal of Earth Sciences, 1998,45: 483～500.

[48] Castro A, Patino Douce A E, Correge L G, De la Rosa J D, Mohammed E B and Hassan E H. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Iberian massif, Spain: an expermental test of granite petrogenesis, 1999. Contrib. Mineral. Petrol. No.3

[49] Petford, N., Paterson, B., McCaffrey, K., Pugliese, S., Melt infiltration and advection in microdioritic enclaves. Eur. J. Mineral. 1996, 8: 405～412.

[50] Wang Dezi and Zhou Jin cheng. Look back and look forward to granite research[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999.15(2):161～169(in Chinese) [王德滋，周金城，我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报，1999，15(2): 161～169.]

[50] H-J Förster, G. TisChendorf, R. B, Trumbull. A evaluation of the Rb Vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of Silicic igneous rock. Lithos 1997，40, 261～293.

[51] DENG Jinfu. ZHAO Hailing MO Xuanxue et al. Continental roots-plume Tectonics of china.－－key to the continental Dynamics, 1996. Geological publishing House, Deijing, p110. (in Chines) [邓晋福，赵海玲，莫宣学等，中国大陆根-柱构造－－大陆动力学的钥匙，1996，地质出版社，p110]

[52] MO Xuanxue LUO Zhaohua XiaoQinghui et al. 2002 Evidence of magma mixing in granitoids plutons and the way of investigation in the way of investigation on granitoids, 2002. XIAO Qinghui et al ceds Geological publishing House, Beijing, p53-63. (in Chines) [莫宣学.花岗岩类岩石中浆混合作用的识别与研究方法.见肖庆辉，邓晋福，马大铨，花岗岩研究思维与方法，2002，地质出版社，p53～63.]

[53] HONG DaWei WANG Shi-guang XIE xi-ling, et al. Genesis of positives(Ndt) granitoids in the Da Hinggan Mts. － Mongolia orogenic belt and growth of Continental crust. 2000, Earth Science Frontiers. Vol. 7, No.2, p 441-456. (in Chines) [洪大卫，兴蒙造山带 ε (Nd, t)值花岗岩的成因和大陆地壳生长，地学前缘，2002，Vol.7, No.2]

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[54] Wyllie. p. J. petrology: materials science of Universe 2000.Department of Geology Banaras Hindu University.

[55] NRC. U.S.A. Basic research opportunities in the Earth Sciences. 2001. National Academy press. Washington.

major Frontiers on the recent studies of granite formation

Xiao Qinghui

Information center of Ministry of Land and Resources, Beijing, 100812, China;

Abstract: in last ten years, people are cognized that formation of granitic magma and their evolution is controlled by the process of asthenospheric upwelling and lithosphere mantle acting, and inaugurate a new direction that combine closely asthenospheric upwelling and crust-mantle interaction with granitic magma formation and evolution. The scientific front of this new direction primarily is the relationship between granite formation and continent growth and deep process of lithosphere mantle and asthenospheric upwelling; and the granite anatexis with asthenospheric upwelling hot source and granite type and tectonic environment. These fronters try to cognizant the granite genesis from the level of continent growing and the continent dynamics, and hope to establish a associated frame between them, and through this frame further to trace their mechanism and region that thermal energy deliver when they formed. Therefore, study the granite can not only provides the information of granite material source and construct environment, but also can acquire the important information about the innate character of crust-mantle material sport appearance, process, dynamics...etc. problems, and deep a conduction and convection of asthenospheric upwelling energy (thermal energy). Study and translate these information can take on the function of lucid exposition of essential points for cognizing the continent growth, and is one of the key problems for resolving the nowadays continent geology evolution, establishing the continent dynamics. It can be regard as the beginning of the third milestone about granite research after the granite material source, the tectonic environment research, as a result have the important strategy meanings.

Key Words: granite , continental growth, anatexis ,tectonic environment

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net