

火成岩的10年研究进展和未来的挑战

杨经绥¹⁾, 吴才来¹⁾, 夏林圻²⁾, 樊祺诚³⁾, 徐义刚⁴⁾, 徐夕生⁵⁾

- 1) 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京, 100037;
2) 西安地质矿产研究所, 西安, 710054; 3) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029;
4) 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州, 510640;
5) 南京大学成岩成矿作用国家重点实验室, 地球科学系, 南京, 210093

内容提要:文中简要列举了近年在火成岩领域的研究进展及今后发展方向, 主要涉及7个方面内容: ①新元古代末期大陆裂谷火山作用与 Rodinia 超级联合大陆裂解; ②中亚石炭纪—早二叠世大规模裂谷火山事件的深部地球动力学背景及其与古特提斯裂解和晚古生代中亚大规模成矿事件的关系; ③中—新生代东亚火山作用与岩石圈巨量减薄; ④新生代印度—亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应; ⑤大火成岩省和地幔柱; ⑥花岗岩与地球动力学环境; ⑦铁镁—超铁镁岩与蛇绿岩。提出在下一个10年里, 需要继续开展岩浆成因和演变、岩浆作用和构造环境的关系, 变质岩石的 $P-T-t$ 轨迹, 以及变质作用、岩浆作用和大地构造的关系等方面的研究; 需要研究更深层次的地壳和上地幔, 以了解岩浆形成和运移的过程; 海洋钻探有可能取得深部地壳或上地幔的样品, 大陆钻探将钻到10 km 及更深; 将使用地震层析来描述地壳和上地幔的结构, 确定俯冲带或地幔柱的位置, 以及部分熔融的分布面积, 等等。此外, 分析和测试等方面的高新技术的开发和运用, 以及实验岩石学的发展都对岩石学领域的发展起到至关重要的作用。

关键词: 火成岩; 大火成岩省; 地幔柱; 花岗岩; 超铁镁岩; 蛇绿岩

火成岩又称岩浆岩, 是组成固体地球的主要岩石, 包括火山岩(喷出岩)和侵入岩, 两者区别是结晶成岩作用, 前者发生在地表, 后者在地下。

火山活动是地球形成以来一直存在的一种地质作用, 它参与了地球各圈层的形成和演化, 强烈的火山喷发会造成严重灾害, 但是火山喷发也为人类提供了许多重要的矿产资源, 火山喷发还将地球内部的碳氢氧及其化合物带至地表, 从而为地球上生命的起源和演化提供了物质基础。火成岩也是透视地球内部的窗口, 其携带的各种岩石捕虏体就是来自地球内部的使者。通过火成岩的岩石学和地球化学的研究, 可以追踪和揭示地球内部物质组成及其演化过程。矿产资源作为一种特殊的岩石类型组合, 是一定地质事件的产物。一套矿产资源组合反映一定的地质环境, 它们的区域分布规律与地球动力学演化过程中某些特殊事件密切相关。无论是成矿理论研究还是资源勘查始终将大陆动力学演化和矿产资源形成环境的探索放在首要的位置, 代表不

同地质年代和不同构造环境下生成的不同种类的岩石则是研究大陆动力学成因的重要信息载体。

最近20年来的地质、地球物理及地球化学理论与技术的研究揭示了仅仅用简单的刚性板块或简单的碰撞模型很难解释大量的大尺度构造问题, 如①地质学长期观测表明稳定大陆克拉通的边缘是长期活动的宽达1000 km 构造活动带, 这些活动带覆盖了几乎大陆总面积的1/4, 确定这些活动带的成因以及为何长期活动, 已成为当今大陆动力学的前沿课题; ②大多数大陆碰撞型造山带都具有远远高于经典板块构造理论所预测的热流值, 大陆碰撞造山带热的来源是其中的构造问题。对这些问题的深入理解要求我们重新审视大陆形成、结构、演化及动力学过程。美国最近实施的 EARTHSCOPE 计划意在详细地揭示北美大陆岩石圈和地球深部构造, 提高对地震、火山等地质灾害预警能力, 提升对地球内部的认知程度, 并通过新的观测技术来确定大陆变形的动力学特征, 尤其是对大陆地块边界弥散性应

注: 本文为中国地质调查局基础项目(编号 1212010711816)的成果。

收稿日期: 2009-02-26; 改回日期: 2009-03-26; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 杨经绥, 男, 1950年生。于加拿大 Dalhousie 大学获博士学位。现为中国地质学会岩石专业委员会主任, 中国地质科学院地质研究所研究员, 主要从事青藏高原和造山带板块边界的蛇绿岩、超高压变质岩和地幔岩的研究。Email: yangjingsui@yahoo.com.cn。

变特征的动力学成因解译。建立新理论。建立大陆形成、结构、变形和演化的新理论体系,离不开对岩石学的深入探讨。

总之,当前的资源、环境与人类社会可持续发展,是摆在地球科学工作者面前的重要使命,而火成岩的研究是其中不可或缺的一环。

本文是代表中国地质学会岩石专业委员会写的一篇综述,是各作者从各自的研究领域总结出的一些体会和思考中的一些问题,写成文字,供读者参考。显然本文总结的内容不可能涵盖火成岩的所有方面,不足之处和没有包括的内容只能留给其他的作者总结。

1 火成岩岩石学研究进展与动向

近 30 年来,国际火山岩研究的重大进展主要反映在对现代大洋及岛弧区、大陆边缘活动带、大陆内部活化断陷盆地和裂谷系中生代及中生代之后的火山岩和火山作用研究方面。利用火山岩研究数据反演诱发火山作用的深部地球动力学过程,探索地球不同圈层(壳—幔—核)相互作用对于火山岩形成的贡献,进而重塑不同地质历史时期中板块构造体制与火山岩浆作用的关系,乃是 20 世纪 70~90 年代世界火山岩岩石学界研究的主流趋势。这些研究也从一个侧面极大地丰富了现代板块构造理论,促进了它的发展和成熟。

自上世纪 90 年代以来,随着大陆动力学研究的兴起,国际火山岩岩石学界除了继续致力于现代大洋、岛弧、大陆边缘活动带和大陆内部裂谷系的研究外,开始更为关注大陆内部地质历史时期中一些重大火山事件、大裂谷火山岩省或大火成岩省的研究,认为它们往往是地质历史时期中曾经存在过的超级联合大陆裂解事件的前奏或响应,并相继提出地幔柱—超级地幔柱假说来解释它们的成因。上世纪末至本世纪初这种新的全球构造观——“地幔柱构造”的提出,在很大程度上是全球火山岩研究和全球 P-波地震层析研究联合的产物。它应当是板块构造理论的延伸和发展,对大陆地质和大陆动力学研究以至地球动力学研究的进一步深化起着推动作用。最近,Ernst 等(2005)总结提出了当代国际大火成岩省(LIP)研究的四大前缘领域,它们是:对地球历史中曾经产生或出现过的大火成岩省和大火成岩省群加以鉴别和特征化:包括单个事件(包括喷出和侵入事件)的大小、熔体产生的速率、使得岩浆在地壳中侵位和分布的输送系统的几何形态、地幔源区的地球

化学性质和位置、与大规模成矿事件的关系;确定地球上大火成岩省在时间上(从太古宙至现代)和空间上(指对古大陆恢复、重建之后的状况)的分布,对大火成岩省活动和超大陆裂解、新生地壳诞生、气候变化和生物灭绝、地球磁场反转的频率变化间的关系进行评估;调查研究和检验有关大火成岩省成因的地幔柱和非地幔柱假说;将地球上大火成岩省的特点、成因和分布与缺乏板块构造的金星、火星、水星和月球上的大火成岩省进行对比,以便更好地了解行星内部地幔中的对流作用。

1.1 新元古代末期大陆裂谷火山作用与 Rodinia 超级联合大陆裂解

自 20 世纪 90 年代以来,随着 Grenville 造山事件全球性概念的建立,McMenamin 等(1990)首先提出 Rodinia 超级联合大陆的概念以来,这个推测在新元古代早期形成的超级联合大陆正在被众多地质学家从不同角度进行的研究所认可,对其具体组成的复原正在不断地进行探索。联系到南华纪—震旦纪冰碛岩和寒武系底部的含磷沉积在我国华南、华北、西北、中亚及西伯利亚的广泛分布,确实暗示着在元古代末期应当存在有一个包括中—东亚在内的 Rodinia 联合古陆。这一时期中,许多中外地质学家除致力于 Rodinia 古大陆的重建研究,也将注意力投向了对该大陆解体事件的探索。这方面,对于新元古代末期在中亚—东亚(包括中国中—西部和华南)、澳大利亚、北美、非洲南部和南极分布的新元古代裂谷盆地和裂谷岩浆(火山岩、岩墙群)事件的研究可以作为代表,新元古代广泛发育的裂谷火山事件的研究对于查明 Rodinia 古大陆的裂解及古亚洲洋的开启可以提供重要的约束,同时,对于探索这一时期诸多超大型矿床(如中国金川的超大型镍矿床等)形成的地质背景也具有重要的指向性意义。有的学者甚至已经提出用地幔柱、超级地幔柱假说来解释新元古代末大陆裂谷岩浆活动和 Rodinia 古大陆裂解的地球动力学机制。但是,总的说来,目前对于这套新元古代末期裂谷火山岩系的研究只是处于起步阶段,特别是有关我国中—西部新元古代裂谷火山岩系的分布范围、确切性质和精确时限尚存在许多疑点和不确定性,应当进一步研究查明。

1.2 中亚石炭纪—早二叠世大规模裂谷火山事件的深部地球动力学背景及其与古特提斯裂解和晚古生代中亚大规模成矿事件的关系

以天山为中心的中亚地区石炭纪—早二叠世大规模裂谷火山事件的综合确定和提出(Xia Linqi

等,2003),是近年来亚洲区域火山岩研究的一项重大进展。初步估算,这套在古亚洲洋闭合之后发生的大规模裂谷火山事件的产物,即裂谷火山岩系的分布范围至少有 1500000km^2 ,连同与其同期侵位的层状基性—超基性岩和大范围花岗岩可以统称为“天山(中亚)大火成岩省(Large Igneous Province)”。该大规模裂谷火山事件似乎不应当简单地归之为由于古亚洲洋闭合—碰撞造山—地壳增厚—岩石圈拆沉诱发软流圈上涌—减压熔融而产生的被动式碰撞后裂谷火山事件。它可能有着更为深刻的全球动力学背景。也就是说,石炭纪—二叠纪时在亚洲大陆[即劳亚古陆(Laurasia)]之下是否存在有一个具有全球尺度的地幔柱—超级地幔柱?是否是它的活动引发了大火成岩省事件和同时期的中亚大规模成矿事件(中亚地区已知许多大一超大型Cu、Fe、Au、Ni、V、Ti、稀土矿床均形成于石炭纪—二叠纪),并与“古特提斯”的裂解有着密不可分的关系?这是涉及到亚洲大陆(乃至整个欧亚大陆)地质演化的重大地质问题。要解决这一问题,前述天山(中亚)大火成岩省的研究显然起着关键性作用。

然而,过去很长的时间内,对于天山及邻区广泛分布的石炭纪火山岩系的产出环境,一直有不同的认识:将它们当作是岛弧火山岩系或活动陆缘火山岩系,从而得出中亚古生代洋盆在石炭纪时仍未闭合的看法;认为西天山产于伊犁陆块之上的石炭纪火山岩盆地是发育于大陆裂谷环境;中天山在石炭纪时也应当是大陆裂谷环境;天山东段北部博格达地区则应当是石炭纪陆内裂谷或裂陷槽、坳拉谷,最近还进一步提出博格达石炭纪裂谷的形成是与古亚洲洋在石炭纪时向东南准噶尔—吐鲁番—哈密陆块斜向俯冲引起的弧后撕裂有关;天山东段南部觉罗塔格地区为石炭纪岛弧—弧间盆地或石炭纪裂陷槽。王方正等(2002)报道他们在天山以北的准噶尔盆地腹地陆梁隆起区也发现了具大陆裂谷特点的石炭纪双峰式火山岩系。应当指出,即便是持后一种认识(裂谷或裂陷槽)的学者,也只是认为天山及其相邻地区的晚古生代陆内伸展裂陷作用应当是始于晚石炭世,至于造成这种伸展裂陷作用的成因机制则还没有完全解决。前人对于天山石炭纪火山岩系的形成环境出现相当分歧的认识,主要还是由于石炭纪火山岩系本身研究程度较低所造成。现有的资料表明,天山地区石炭纪(包括早二叠世)火山岩系长期以来并没有受到应有的重视,它表现为:迄今为止,缺乏足够的精确定年数据;大部分火山岩系的

喷发序列、相和旋回不清;以往,绝大部分火山岩系的微量元素分析不是运用中子活化分析或ICP-MS测定,从而无法对比、利用;缺乏Sr、Nd同位素分析数据,Pb、O同位素地球化学研究基本上是空白。

近年来,随着天山大规模石炭纪—早二叠世裂谷火山事件的确定,和天山(中亚)大火成岩省的提出,相关研究工作已经开始,但仍处于初始阶段,诸如:该大火成岩省内裂谷火山岩系的区域时空喷发序列,裂谷火山作用开始和结束的时间的精确定年,各火山喷发幕的规模、特点和性质,与表层火山事件同期的深成侵位事件(层状基性—超基性岩、花岗岩)对于大火成岩省的贡献,地壳、岩石圈地幔和软流圈地幔(地幔柱)等不同圈层在大火成岩省形成中的作用,以及大火成岩省与大规模成矿作用的内在联系等重要问题还只是刚刚被涉及,其本质内涵尚未查明。因此,有必要对中亚大火成岩省及其成矿地质背景意义开展更进一步深入系统的研究,它必然会使我们获得许多新的重要科学信息,发展、丰富和深化我们对亚洲大陆地质的认识。

1.3 中—新生代东亚火山作用与岩石圈巨量减薄

上个世纪80年代是我国新生代火山岩研究的鼎盛时期,研究内容涉及岩浆的起源、演化等基础性问题;90年代以来,火山岩的研究工作主要包括以下3个方面:①中国启动了活动火山的研究计划,开展了包括火山岩在内的多学科对全新世以来活动火山的综合探索;②岩浆活动与壳幔相互作用,特别是围绕华北岩石圈减薄开展的中新生代火山岩的研究;③二叠纪(三叠纪)峨眉山大火成岩省火山岩的研究。

上世纪末,国际岩石圈计划研究中的一个重要成果是确认了我国东部大陆岩石圈地幔自显生宙以来曾发生过巨厚减薄,其依据是古生代金伯利岩与新生代玄武岩及其捕虏体的对比研究得出(Menzies et al.,1993;Griffin et al.,1998)。近些年围绕与华北岩石圈减薄有关的中新生代火山岩研究取得重要进展。Zhang Hongfu等(2002,2003,2004)和张宏福等(2004)对辽西阜新碱岩含地幔橄榄岩捕虏体碱性玄武岩(105.5 Ma)和碱岩附近的乌拉哈达离高镁玄武安山岩(142 Ma)、山东临沂方城含地幔橄榄石及辉石岩捕虏体的玄武岩(125 Ma),以及汤艳杰等(2006)对太行山地区繁峙—应县、鹤壁、左权、昔阳—平定的含地幔橄榄岩捕虏体中、新生代玄武质岩石,开展了较系统的年代学与岩石地球化学研究,提供了岩浆上升过程中熔体与地幔橄榄岩的反

应关系,从岩浆上升对岩石圈地幔的熔蚀作用讨论岩石圈的减薄过程。杨岳衡等(2006)还开展了碱锅、方城、昌乐—临朐地区中新世玄武岩的 Hf 同位素研究,结果显示 Hf 同位素与 Nd 同位素具有很好的相关性,并且具有更好的岩浆源区示踪效果。Gao Shan 等(2004)通过对辽西晚侏罗世高镁中酸性火山岩研究认为,下地壳与岩石圈地幔的拆沉作用导致华北岩石圈的减薄。

Xu Yigang 等(2004)对汉诺坝、阳原、繁峙、大同和丰镇地区的新生代玄武岩及其捕虏体的研究发现,重力梯度带以西地区的新生代岩石圈经历了逐渐减薄的过程,这与东部新生代岩石圈的增生过程形成鲜明对比,显示了华北地区岩石圈演化的时空不均一性。张辉煌等(2006)对华北东部晚中生代—新生代伊通—大屯拉斑玄武岩—碱性玄武岩,根据地幔动态熔融模型计算获得的玄武岩最终形成深度由约 50 km 变深至 110 km,推测该区晚白垩纪以来岩石圈厚度逐渐增厚。岩石圈在板内岩浆作用中所担当的不同角色:古近纪—新近纪时,岩石圈并没有在物质上直接参与岩浆作用,但岩石圈对上涌软流圈起到了机械阻挡作用;而在晚白垩世岩浆作用中,岩石圈的间接和直接作用都得到了体现。张文慧等(2006)对华北西部内蒙古集宁地区四个新生代玄武岩剖面进行了 K-Ar 年代学及岩石地球化学的系统研究,主要喷发期在晚渐新世至中新世,可分为三个喷发旋回:约 33Ma、22.8 ~ 22.1Ma 和 12.2 ~ 9.4Ma。玄武岩由拉斑玄武岩和碱性玄武岩组成。三个喷发旋回的共同特点:每一旋回底部拉斑玄武岩,向上变为碱性玄武岩,提出集宁地区在这一时期曾发生过岩石圈减薄,可能是软流圈热物质上涌,对岩石圈产生底蚀作用的结果。

最近根据火山岩年代学和岩石地球化学研究认为,天池火山经历了早更新世粗面玄武岩造盾(2.0 ~ 1.2Ma)、中(晚更新世粗面岩造锥(约 1Ma—几万年)和全新世碱流质岩浆爆破喷发。岩浆转型的时间:早更新世晚期(约 1Ma)粗面玄武岩向粗安岩、粗面岩演化,晚更新世(约 0.1Ma)粗面岩向碱流岩演化。进一步揭开了天池火山之下存在地幔岩浆房与地壳岩浆房的奥秘,由于来自地幔粗面玄武质岩浆持续向地壳岩浆房补给,所以天池火山是一座长寿命的火山,第四纪时期地幔岩浆房与地壳岩浆房的岩浆喷发活动此起彼伏。岩浆的结晶分异作用和混合作用是天池火山岩浆演化的两个最重要过程,前者形成天池火山双峰式火山岩分布特征,后者成

为天池火山喷发的触发机制(樊祺诚等,2006)。镜泊湖十余座全新世火山的喷发时代距今约 5.0ka (张招崇等,2002;樊祺诚等,2005),火山岩包括粗面玄武岩、碧玄岩和响岩质碱玄岩三种不同的火山岩类型,是一套富钾火山岩,推测高度的地幔化学非均一性导致岩浆的多样性。根据北部湾周边的雷州半岛、海南岛、涠洲岛火山的火山岩中砂岩捕虏体的热释光、光释光年龄和射气岩浆激浪堆积中贝壳¹⁴C 年龄测定(樊祺诚等,2004,2006),从年代学上确定了琼北雷虎岭、马鞍岭火山喷发为距今约 10ka 年左右的全新世,涠洲岛火山最新喷发距今约 30ka 年左右。雷虎岭和马鞍岭火山岩分属橄榄拉斑玄武岩和石英拉斑玄武岩,它们都是来自地幔源区经历了不同程度结晶分异的岩浆,橄榄拉斑玄武岩是相对原始的地幔岩浆,它经历约 10% 的橄榄石分离结晶形成石英拉斑玄武岩。涠洲岛早晚两期火山岩分别为碱性橄榄玄武岩和碧玄岩。

1.4 新生代印度—亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应

自上世纪 70 年代以来,从相继进行的青藏高原科学考察和中—法、中—美国际合作研究开始,直至本世纪即将完成的我国 1:25 万青藏高原空白区地质填图工作,已经基本查明,随着新特提斯洋盆的闭合,印度大陆向北漂移与欧亚大陆碰撞以来,在该碰撞带的北部发生了强烈的火山活动,自南向北,从冈底斯—羌塘—可可西里—昆仑直至祁连山西北的玉门和塔里木盆地北缘的广大区域内程度不同地分布着新生代(65 Ma—现代)火山岩。虽然中外学者已从不同角度发表了许多论文讨论这些新生代火山岩的特点和成因(Arnaud et al., 1992),但迄今为止,对于这些新生代火山岩尚没有一份总体性的归纳和总结,而且对它们的成因也存在着地幔柱,初始裂谷,板内俯冲和碰撞构造派生的走滑断裂控制,以及印度向亚洲大陆俯冲、碰撞诱发的软流圈地幔流的侧向挤出,并在其前进方向形成一系列软流圈上隆诱发火山活动等多种认识。毫无疑问,对于青藏高原及相邻地区分布的新生代火山岩研究数据进行系统的归纳和总结,可以深化我们对于印度—亚洲大陆碰撞效应(包括岩浆效应、成矿效应、环境效应等)的理解和认识。

1.5 大火成岩省和地幔柱

大火成岩省(LIPs)通常指的是在较短的时间内以镁铁质成分为主的喷出岩和侵入岩在地壳内的巨量侵位,与洋中脊海底扩张和消减作用有关的大

规模岩浆事件不属于大火成岩省的范畴。国际地学界通过多年的研究,目前认为大火成岩省包括有大陆溢流玄武岩、火山裂谷边缘、大洋台地(oceanic plateaus)、大洋盆地溢流玄武岩、海岭(submarine ridges)、洋岛和海山链(Ernst, 2005)。此外,某些大火成岩省,也可以主要由长英质岩石组成。大陆溢流玄武岩通常是与火山裂谷边缘相伴(Menzies et al., 2002)。大多数 LIPs 是在小于 10 Ma 的时间内侵位,其主体岩浆作用在小于 1 Ma 的时间内完成;但是,某些情况下,大火成岩省的岩浆活动可以持续几千万年;活动时间最长的,如加拿大的 Keweenaw 大火成岩省,可以延续 0.11~0.12Ga (Ernst, 2005)。通常认为 LIPs 的形成与地幔柱活动有关(Xia Linqi et al., 2003; Xu Yigang et al., 2001),但某些情况下,一些研究者还提出用非地幔柱模式来解释大火成岩省的成因。通常,大陆大火成岩省至少在其喷发序列中显示有岩石圈[包括地壳和岩石圈地幔(CLM)]卷入的成分证据。大量的研究表明,除去地壳混染作用不谈,在大火成岩省的形成中,除了来自深部地幔的地幔柱物质外,岩石圈地幔也起着重要的作用。当然,也还有一些研究者,始终反对岩石圈地幔在大火成岩省的岩石成因中有重要贡献。

到 20 世纪末,亚洲地区已被国际地学界公认分布有 4 个大火成岩省,它们是俄罗斯的 Siberian 暗色岩(248~253Ma)、中国的峨眉山溢流玄武岩(251~253Ma)(Chung et al., 1995; Xu Yigang et al., 2001)、印度的 Deccan 暗色岩(63~69Ma)和印度的 Panjal 火山岩(P_2-P_3)。除了印度的 Panjal 火山岩由于自然地理条件的制约,研究程度极低之外,Siberian 和 Deccan 暗色岩都已经进行了大量研究。亚洲地区除了上述 4 个大火成岩省之外,天山大火成岩省在本世纪初已被识别和正式提出(Xia Linqi, 2003),也已经开始引起国际地学界的重视。

二叠纪是全球大火成岩省(LIP)的高峰期之一,中国的峨眉山玄武岩是全球二叠纪三个大陆溢流玄武岩省之一。张招崇等(2002)在丽江地区发现了峨眉大火成岩省中具有原始岩浆特点的苦橄岩(MgO 约 22%),同时计算了苦橄岩的液相线温度和熔融时的深度分别为 1600℃和 135km,为峨眉山玄武岩是地幔柱成因提供了有力的证据。Xu Yigang 等(2001)将峨眉山玄武岩划分为高 Ti 型($Ti/Y > 500$)和低 Ti 型($Ti/Y < 500$)两类,认为高 Ti 型是由地幔石榴子石橄榄岩稳定区 1.5%部分熔

融产生,低 Ti 型是在尖晶石—石榴子石橄榄岩过渡带地幔源区 16%部分熔融产生。He Bin 等(2003)研究发现,峨眉山大火成岩省喷发前岩石圈存在千米级的隆升,为 ELIP 的地幔柱成因提供了新的证据。攀西地区存在着一系列的镁铁—超镁铁质岩体,已经证明这些层状岩体的形成时代(256~258Ma, Zhou Meifu et al., 2002)和峨眉山玄武岩(251~253Ma, Lo et al., 2002)同期,因而认为层状岩体也与峨眉山玄武岩一样均是大火成岩省的重要组成部分,两者在成因上有密切的联系,均与地幔柱有关(如 Chung et al., 1995)。我国的峨眉山玄武岩虽然研究程度相对偏低,但近年来已经引起中外地学界的关注,研究工作投入开始大量增加。对于 Siberian、Deccan 和峨眉山这三个大火成岩省,已发表了许多论文,相继讨论了大火成岩省形成与地幔柱活动、大火成岩省活动与二叠纪—三叠纪、白垩纪—古近纪界线上的生物灭绝事件及大火成岩省活动与超大型 Cu—Ni 硫化物矿床和 V—Ti 磁铁矿矿床成矿作用间的关系。

1.6 花岗岩与地球动力学环境

花岗岩是大陆造山带的主要组成部分之一,了解造山带的构造演化就需要研究花岗岩的成因(Klotzli et al., 2001; 王德滋等, 2003)。近 30 年来,花岗岩研究大体上经历了 3 个里程碑:一是 1974 年 Chappell 和 White 以成岩物质来源为依据,将花岗岩划分为 I 型和 S 型,引发了一股花岗岩的研究热潮;二是 1979 年 Pitcher 将花岗岩的形成与构造环境联系起来,提出花岗岩的构造环境分类,后又进一步作了补充,这是花岗岩研究的第二个里程碑;三是 1989 年美国以 Phinney 为首的一些固体地球科学家提出的一个跨世纪的大陆动力学计划,将壳幔作用引入花岗岩的形成机制,标志着花岗岩研究的第三个里程碑的开始(王德滋等, 2003)。因此,花岗岩的物质来源或源岩性质、构造环境或背景、成因机制与构造运动的关系,构成了现代花岗岩研究的三个基本问题。

在威尔逊造山旋回过程中,有三个可能的构造环境形成花岗岩,一是大陆地壳裂解和大洋形成过程中产生的非造山花岗岩类,二是大洋开始闭合时沿大陆边缘形成岩浆弧内的钙碱性花岗岩类,三是碰撞加厚和/或造山带伸展滑塌过程中陆壳间产生的花岗岩类(Kinny et al., 2003)。许多研究者把花岗岩成因类型与不同的构造环境结合起来,发表了许多重要成果(Rogers et al., 1990; Pitcher, 1997;

王德滋等,1999,2003;洪大卫,1995;董申保等,2001;林广春等,2003;许文良等,2002,2003;马昌前,2003;)。王德滋等(1999)把岩浆作用、构造作用和构造环境结合起来,提出了全面的、系统的五种构造—岩浆组合类型:①俯冲(B型俯冲)消减型,包括与蛇绿岩套有成因联系的幔源型花岗岩(M型)以及与岛弧和活动大陆边缘有关的I型花岗岩类,②碰撞型(A型俯冲),主要是过铝质S型花岗岩;③陆缘伸展减薄型,包括双峰式火山岩与后造山A型花岗岩;④陆内断裂拗陷(类裂谷)型,出现I型和A型花岗岩;⑤裂谷型,主要是板内A型花岗岩。然而,岩浆作用如何响应多块体的汇聚和拼合作用?不同的块体在花岗岩成分中的烙印是什么?如何通过花岗岩类的研究,识别地块的边界和聚散历史?等等,这些问题的解决都需要以花岗岩类岩石为主要研究对象,开展全面的、系统的深入研究。

I型和S型花岗岩为造山花岗岩,可简称为O型花岗岩;其中,I型花岗岩是科迪勒拉型山系形成和后造山抬升过程中的产物,其花岗岩源区可能为下地壳和上地幔物质混合成因,I型花岗岩的岩石化学特点是钠含量相对较高,K/(K+Na)比值较低,钙含量也比较高,过铝比值一般 <1.10 。S型花岗岩是大陆碰撞的产物,一般来源于上地壳物质。A型花岗岩则为非造山花岗岩,属偏铝类型,大多数 SiO_2 含量高,碱含量也高。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,两种类型的花岗岩中均存在岩浆型包体(Collins,1996,1998;Alvar,2000),表明更多的镁铁质岩浆和/或其他火成源的岩浆卷入了两类花岗岩浆。因此,Castro等(1991)提出了H型花岗岩的概念,建议用H型花岗岩来代替I型花岗岩。而Defant等(1990)又厘定出一种新的火成岩——埃达克岩(adakite),张旗等(2001,2002)将埃达克岩(Adakite)的研究引入国内,并提出了O型和C型埃达克岩的分类方案,两种类型的埃达克岩具有不同的岩石成因(朱弟成等,2002;罗照华等,2002)。众所周知,花岗岩类成分的变化主要是由于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(Petford et al.,1996;Poli et al.,1996)。研究表明,英云闪长质到花岗质钙碱性岩浆是大陆壳成分在 780°C 时脱水熔融形成的(Wolf et al.,1994;Rapp et al.,1995;Patino et al.,1996,1998),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°C 的温

度(Rapp et al.,1995;Patino et al.,1998)。大陆碰撞带压力—温度—时间($P-T-t$)轨迹的计算表明,在大陆地壳内超过 780°C 的温度需要特殊的构造环境,如缓慢的剥蚀和长时间的加热(Patino et al.,1998;Anthi et al.,1999)。这就导致许多研究者提出,来自地幔的热加入到地壳(Huppert et al.,1988;Bergantz,1989;Roberts,1993;Von Blanckenburg et al.,1998;Fernando et al.,2003)。如玄武质岩浆底垫于花岗质地壳之下,不但向地壳提供了幔源物质,而且还提供了热能。地震探测、岩石探针和同位素示踪可以确定这种底侵作用的存在(金振民,1996)。Viebe等(2004)通过实验和计算得出, $1\text{g}1200^\circ\text{C}$ 玄武质岩浆冷却到 775°C 时产生的热量足以形成含熔体80%的3.5g花岗质岩浆。可见,基性岩浆的底垫作用足以使其上部的地壳发生大规模的部分熔融形成花岗质岩浆。同时,基性岩浆随时可以注入到上部部分熔融形成的花岗质岩浆中,并形成暗色微粒包体,这也是幔源物质加入到地壳的直接证据(徐夕生等,1999),因为大多数微粒包体是由幔源的基性岩浆与地壳部分熔融的酸性岩浆混合形成(周新民等,1992;马昌前等,1992;许文良等,1999,2003;吴才来等,2001,2004)。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(Rainer et al.,2000;Defant et al.,2001)。

高温高压实验表明:地幔橄榄岩的部分熔融不能产生花岗质岩浆,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(Johannes,1996)。同时,压力不同,玄武质岩石部分熔融形成花岗质岩浆后,源区的残留物不同。一般来说,在较低的压力($\leq 1.0\text{GPa}$)下,残留麻粒岩相的矿物组合;在较高的压力($\leq 1.5\text{GPa}$)下,残留榴辉岩相的矿物组合(Rapp et al.,1991;Winther et al.,1991;Wolf et al.,1994;许文良等,2002,2003;马昌前等,2004)。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(Johmston et al.,1998)。在深度为 $75\sim 85\text{km}$ 时,大洋板块的部分熔融可形成埃达克质岩浆(Defant et al.,1990;Prouteau et al.,2001;张旗等,2002;Pablo et al.,2002;Bourdonl et al.,2002)。埃达克岩岩石类型有石英

闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、角闪花岗岩、二长花岗岩,岩石中普遍含有角闪石,属I型花岗岩。因此,埃达克质花岗岩是俯冲板片部分熔融和壳幔岩浆混合形成的(苏建平,2004b)。

Pitcher等(1997)认为“不同成因类型花岗岩类代表不同的活动带”,也即特定的构造环境将产生特定的花岗岩,其花岗岩成因的构造环境分类为:①海洋岛弧(M)型,以大洋岛弧型斜长花岗岩为主;②活动大陆边缘型(科迪勒拉I型),以大量辉长岩、石英闪长岩为代表;③造山期后隆起型(加里东I型),以花岗闪长岩和花岗岩为主;④克拉通褶皱带和大陆碰撞带型(S型),为过铝质花岗岩组合;⑤稳定褶皱带和克拉通穹隆和裂谷型(A型),为碱性花岗岩组合。

此外,许多地球动力学环境并不是以单一的花岗岩类型为特征,而是具有几种类型花岗岩的组合,某些情况下,它们具有很好的空间分带性(Barbarin,1999)。首先必须对花岗岩类进行正确定名和准确定年,并与构造地质资料相结合来进行构造环境解释;而经过仔细研究的花岗岩类可成功应用于地球动力学标志。当前,对花岗岩的特征有如下基本认识:①花岗岩基本上是经过地壳重熔,在广泛的温压条件下由多种地质作用相互制约而形成的,大体上可用重熔实验来模拟;②花岗岩实际上可能是一种地壳来源和地幔来源之间的连续谱系,由于不同来源的混合程度有别及经历的过程不尽相同,造成了花岗岩类岩石的多样性;③导致地壳熔融形成花岗岩浆的过程中,地幔提供的热能起了十分重要的作用;④由于热流传递机理不完全相同,花岗岩可以分为以热流传导体制为主的超变质作用型(混合花岗岩)和以热流对流体制为主的深熔型(花岗岩)两种类型,在一定条件下它们之间也可以相互转化;⑤H₂O及其它挥发份对花岗岩浆的物理性质和状态、化学性质有重要影响,因而也对花岗岩浆的形成起重要的控制作用;⑥花岗岩的形成同它所处的构造环境有密切的联系。

虽然花岗岩类与地球动力学环境之间的联系仍有许多疑问,但是花岗岩类型与地球动力学环境之间的关系也越来越明显。

1.7 铁镁—超铁镁岩与蛇绿岩

由于日益增多的地球物理和实验资料的增加,20世纪末期,对于地球结构已有较充分的认识。地球是垂向分层的,地表0~100 km地段为硬的岩石,100~250 km基本上为软流圈,100~400 km区

间为上地幔,400~700 km为过渡带,700~2900 km为下地幔,2900~5000 km为液态的外地核。上地幔是由橄榄岩组成的,过渡带推断是由Mg₂SiO₄成分的β-尖晶石和γ-尖晶石组成的。超镁铁质的岩石橄榄岩常常以玄武岩、金伯利岩等火山岩包体状态出现在地表,并大规模地以蛇绿岩的地幔岩形式出露于地表,为20世纪的岩石学创造了研究深部地幔岩的机会。实验表明原始地幔岩的局部熔化可以产生玄武岩,而残余物为地幔橄榄岩。玄武岩包体、金伯利岩包体、蛇绿岩地幔岩以及榴辉岩—石榴子石—辉橄岩研究表明,它们形成深度都在上地幔范围内。实验得出的过渡带和下地幔超高压矿物,如γ-尖晶石到MgSiO₃—钙钛矿都没有在地球上发现。只有在少数金伯利岩金刚石中发现四方石榴子石、镁方铁矿等,被推断产生于下地幔。实验证明,在下地幔上部的温压条件下,γ-橄榄石分解为MgSiO₃组分的钙钛矿+方镁石(MgO)。由于MgSiO₃可以分解成方镁石和斯石英,上世纪60年代初,Ringwood、Major、Akimoto和Fujisawa就已经完成近似的实验。根据这些实验推断地球下地幔组成,但并没有发现真正下地幔物质。

迄今,地球科学家尚不知下地幔是由什么成分组成的,即便是MgO、FeO、SiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、CaO等这些矿物来自下地幔,根据实验它们只能被推断来自下地幔上部或过渡带,真正下地幔的物质是什么?这一重要物质有待去探索发现。最近在西藏蛇绿岩套的地幔橄榄岩的豆荚状铬铁矿中,发现一个由60~70种矿物组成的地幔矿物群,其中包含有硅尖晶石[Mg,Fe,Ca,Na]₂(Si,Al)₃O₈],方镁石(MgO),方铁矿,Al₂O₃,Cr₂O₃,Fe₂O₃,硅金红石(Ti,Si)O₂,自由SiO₂,Si_xFe_y等矿物(白文吉等,2001,2004;杨经绥等,2002,2004);并在江苏东海超高压变质的橄榄岩中也发现一批异常地幔矿物(杨经绥等,2005)。实验表明方镁石和方铁矿在压力极高(相当于2900km深度)时仍保持稳定;在大于15GPa(相当于大于400km深度)和1000℃温度下,MaAl₂O₄尖晶石才分解成刚玉和方镁石,由此可见西藏蛇绿岩的地幔活动深度可达过渡带和下地幔上部。

蛇绿岩形成环境的探索尚没有重要结果,大多数人认为形成于洋中脊的蛇绿岩基本俯冲殆尽,所残存的蛇绿岩多为弧后盆地的产物。以蛇绿岩的火山岩地球化学特征为鉴别标志,进行探索蛇绿岩形成地理位置的方法还在普遍应用,因为迄今尚没确

定新的标志。因而确定蛇绿岩的形成环境仍然是今后研究方向。

在蛇绿岩的地幔岩内发现下地幔条件下生成的超高压矿物组合,表明地球的大洋地幔活动来自很深部位。一部分实验表明这些超高压矿物可能来自核—幔边界。核—幔边界的化学反应提出了地幔活动的热动力。地球物理资料显示,在地幔深部乃至核—幔边界存在俯冲板片。而热地幔柱,金伯利岩、玄武岩,可能还有蛇绿岩地幔岩反映出地幔柱的深部作用使地球产生表层的板块运动。俯冲和地幔柱为共轭的运动。今后应在蛇绿岩中研究地幔柱的岩石学和矿物学证据,寻找地球板块运动的动力学。

板块构造理论和地幔柱学说是当今全球构造理论体系的主要内容,前者用以解释地球上 90% 以上岩浆活动的分布规律、不同块体离散—拼合以及造山带的形成;后者则可以解释板内大规模岩浆活动和岩石圈变形—裂解。重建板块运动史和厘清地幔柱事件及其动力学本质是地球科学研究最根本的任务之一,也是当今国际地学界最热点的领域。板块运动和地幔柱活动是两种相互独立的地幔对流系统的体现,在不同的时间尺度上均会产生大量的性质迥异的铁镁质岩浆活动。例如,在威尔逊循环的不同阶段形成的岩浆具有不同岩石组合和性质,具地幔柱成因的大火成岩省和板内岩浆也有各自独特的性质。这些岩浆活动在记录地球演化历史的同时,还保留了不同时代地核、地幔、岩石圈相互作用的信息。又例如,板块运动的历史实际上就是超大陆形成、裂解和多个超大陆之间的不断更替过程。各超大陆的形成与裂解和大火成岩省或一系列铁镁质岩浆活动有直接或间接的联系。同样重要的是,一些铁镁质岩浆中含有地壳和地幔包体,为研究深部岩石圈提供了直接的样品;铁镁质岩石的剩磁可以用来研究岩浆结晶时的地磁场强度,从而为地核的演化提供制约;大规模的铁镁质岩浆活动因释放巨量气体而改变全球环境,影响生物的演化甚至导致生物灭绝;铁镁质岩浆与铜、镍、钛、铂、钯、银、金等我国紧缺矿产关系密切。综上所述,系统地研究不同时代的铁镁质岩浆(包括侵入体)不仅可以帮助恢复岩浆产出构造背景,重建板块运动历史,也能在成矿理论,全球变化和生命灾变等国际前沿领域提供重要的基础资料。

2 未来研究方向和内容

下一个 10 年,岩浆成因和演变、岩浆作用和构

造环境的关系,变质岩石的 $P-T-t$ 轨迹,以及变质作用、岩浆作用和大地构造的关系等方面的研究将会延续下去。其中一个方向是研究更深层次的地壳和上地幔,以了解岩浆形成和运移的过程;海洋钻探有可能取得深部地壳或上地幔的样品;大陆钻探将钻到 10 km 及更深,岩石学家的巨大兴趣是使用地震层析来描述地壳和上地幔的结构;地球物理学家通过使用这种方法可以提供一系列信息,包括俯冲带或地幔柱的位置的确定,及部分熔融的分布面积,等等。此外,分析、测试等方面的高新技术的开发和运用,以及实验岩石学的发展都对岩石学领域的发展起到至关重要的作用。

2.1 火山岩方面

全新世活动火山方面,年轻火山岩的定年始终是个难题,必须在方法和技术上有所突破,国际上已开发出 Be—Cl 方法,值得重视;从岩浆时空演化研究火山的喷发机制是活动火山预测研究的重要内容,包括理论和实验研究;火山喷发的岩浆和挥发分气体对环境气候的效应。中—新生代火山活动与壳幔相互作用、岩石圈演化的研究,重点针对中—新生代火山岩浆转型的时限和深部过程:中生代中酸性钙碱性岩浆如何演变成玄武质岩浆?构造背景和深部过程是什么?俯冲的西太平洋板块起了什么作用?作为大火成岩省的峨眉山玄武岩的时限(2.62~2.51Ma,大火成岩省一般在 <3Ma 形成)、时空演化轨迹、喷发量恢复和成矿作用的研究仍显不足,需要加强玄武岩的研究工作。另外面对地幔柱和大火成岩省在我国的分布有扩大之势,需要发挥火山岩学科特长,结合岩石学和地球化学、地质学和地球物理学,开展综合研究加以识别。

近 30 年来,特别是上世纪 70~90 年代,中国的地质学家对于环太平洋西带的中—新生代火山岩开展了大量的地质调查研究工作,并由其反演的中—新生代东亚岩石圈巨量减薄,已被国内外学术界公认为是中国东部(以至东亚)地质演化的基本事实(Menzies et al., 1993)。然而,对于岩石圈减薄的具体时间、机制及其控制因素仍有很大分歧。虽然已经提出诸多方案,如用印度板块同欧亚板块碰撞、扬子板块和华北板块拼合、地幔柱和太平洋板块向东俯冲等多种机制来解释岩石圈减薄,但至今还没有一种机制被得到普遍认同。原因是证据不足,甚至所提出的假说与已有的地质事实相抵触。要想解决这一重大地质问题,应当首先对下述四个关键问题予以关注:一是中生代大规模火山活动开始时间

的准确限定,它有助于准确限定岩石圈减薄的开始时间,并相应作大尺度的区域性甚至全球性对比,促进对于岩石圈减薄机制的准确判别;二是有效的地球物理地震层析数据的支撑;三是注意了解中生代全球的地球动力学状态,如全球中白垩世超级地幔柱的研究及其与东亚燕山期大规模成矿活动的关系;四是中生代和新生代火山事件的相互关系,是转折关系,还是连续继承关系?

2.2 花岗岩研究

由于国际大陆动力学计划的提出和实施,赋予花岗岩研究以新的活力,标志是将花岗岩的形成与壳幔作用联系起来,这将是21世纪前20年重点研究的问题之一。我国在包括花岗岩在内岩浆岩石学研究逐步走向与国际接轨,花岗岩的研究进入一个更深的层次,今后应着重研究壳—幔作用及其对花岗岩形成的影响,如上所述,花岗岩的研究必须把地质背景、花岗岩的源岩性质、岩浆成因机制与构造运动的关系结合起来,才能获得较可靠的成因信息。而那种简单地根据花岗岩的地球化学特征(图解)来判别花岗岩起源、形成的构造环境是不可靠的,起码是片面的。因此,必须把花岗岩的地球化学特征与具体的地质背景、构造环境及成岩机制结合起来,才能较为准确地确定花岗岩形成的构造环境,进而确定地质构造演化的过程及花岗岩形成的动力学阶段,这是今后花岗岩研究的一个大的方向。

大陆造山带的形成和演化仍是现代地球科学研究的一个前沿课题,而造山带花岗岩形成的构造环境是该前沿课题中最关键的问题之一。尽管花岗岩与构造环境的关系比较复杂,但花岗岩带的发展演化与大陆造山带的发展演化有着密切的成因联系。花岗岩是造山带构造演化中最好的测年对象之一(马昌前等,2003;吴才来等,2006)。研究表明,不同造山带花岗岩类岩浆作用的强度和规模并不相同,例如,欧洲华力西造山带、澳大利亚东南的拉克兰褶皱带、高北喜马拉雅带和华南褶皱带是花岗岩类岩浆作用特别强烈的地区,其中,法国中央地块50%的面积为花岗岩体占据(Didier et al., 1991);而挪威西部的加里东造山带、中新生代的比利牛斯山、中—西阿尔卑斯带,是缺少花岗岩类岩浆作用的典型例子(Rogers et al., 1990; Pitcher, 1997; Von Blanckenburg et al., 1998)。但不管如何,在研究造山带构造演化方面,越来越多的研究者把花岗岩的成因研究及其精确的定年作为最好的方法和手段。当然,还有许多问题尚未很好地解决,如造山带

上花岗岩浆侵入是如何获得占位的空间?岩浆侵入如何影响板块的流变学结构和构造体制的转换?等等,这样一些重大的地球科学问题,需要今后在全球范围内对不同造山带的花岗岩浆作用进行对比分析才能给予合理的解释。

众所周知,锆石是保存构造演化及成岩信息最好的矿物之一。经历过多期高温地质事件的锆石,其边缘会留下不同的印迹,如边缘环带等等,记录了不同地质事件发生、发展、演化的历史(Hoskin et al., 2000b)。花岗岩中锆石的柱面(100)、(110)和锥面(211)、(101)的相对大小,是不同的物理化学条件下形成的。对不同晶面统计得出的锆石群特征代表了锆石生长的条件变化(Pupin, 1980)。锆石柱面(100)发育,指示锆石在岩浆高温环境下结晶,而柱面(110)的发育则反映锆石在较低的温度下结晶;锥面(211)的发育,反映了岩浆中的Al超过K+Na,而锥面(101)发育,则反映岩浆高含K+Na(谢桂青等, 2001;汪相等, 2001)。高分辨率的离子探针定年技术的应用,促进了国内外学者对锆石成因的研究,并取得了大量的成果(鲍学昭等, 1995, 1998;陈道公等, 2001;方春方等, 2000;简平等, 2001;刘显凡等, 1997;刘埃平等, 1996;汪相等, 1992, 1998, 2000, 2001;许文良等, 2005)。Calvin等(2003)研究了不同成因类型的54个花岗岩侵入体中的锆石,发现富含继承性核的锆石来自熔融温度较低的岩体(小于800℃),而不含继承性核的锆石或含较少的继承性核的锆石来自形成温度较高的岩体(大于800℃),且花岗岩锆石的矿物包裹体成分和组合特征也反映了母岩浆的性质。在不同的温压条件下,锆石具有岩浆溶解、高压溶解和高压增生的边缘(Hanns et al., 2002)。同时,S型花岗岩中含有较多的继承性锆石核(李献华, 1996),I型花岗岩中含有较少的继承性锆石核,而且,两种类型花岗岩中继承性锆石核的特征也不相同。I型花岗岩中继承性的锆石核具有明显的结晶振荡环带,而S型花岗岩中的则没有这种特征(Calvin et al., 2003;许文良等, 2005;吴才来等, 2005, 2006)。因此,通过锆石内部结构的研究,可以判别岩浆的起源、岩浆的物理化学条件和花岗岩的成因类型(Keay, 1999)。此外,锆石的Th/U比值还反映了锆石本身的成因。岩浆型的锆石Th/U比大于0.2(变化于0.2~1.5之间),而变质成因的锆石Th/U比小于0.2(变化于0.1~0.001之间)(Vavra et al., 1999a, 1999b; Hartmannl, 2000; Leo, 2003)。但最近的研究发现,经历过高温(大于

800℃)的变质锆石,其 Th/U 比也可能大于 0.2,与岩浆型的锆石 Th/U 比没有区别(Calvin et al., 2003)。同时,锆石的蚀变可能导致部分或全部的放射性 Pb 的丢失(Pidgeon et al., 1998; Mezger et al., 1977; Vavra et al., 1999a; Geisler et al., 2001a; Armin et al., 2003)。花岗岩中锆石的稀土微量元素丰度对其源岩类型和岩浆结晶条件十分敏感(Belousova et al., 2002)。特别是锆石的核部和边部,稀土元素球粒陨石标准化特征明显的不同。通常,锆石的核部轻稀土相对重稀土强烈亏损,且具有明显的 Ce 正异常和微弱的负 Eu 异常(Hinton et al., 1999; Barbey et al., 1995);而边部的稀土由 La 到 Ga 富集,但重稀土(Gd—Lu)强烈亏损,表明锆石边部结晶时,岩浆中亏损重稀土(Martin et al., 2003)。因此,对花岗岩中锆石核部和边部稀土微量元素丰度的研究,可以了解岩浆结晶过程中微量元素的地球化学行为。因此,花岗岩中锆石学的研究,是今后花岗岩研究向更精确、更微观方面发展的一个重要方向。

2.3 镁铁质岩浆方面

系统研究不同时代铁镁质岩浆的重要性得到了国际学术界的重视。国际火山学和地球内部化学协会(IAVCEI)下属的大火成岩省委员会在 2003~2006 年的工作重点是不同时代大火成岩省(large igneous provinces through time)的厘定,一些大的国际合作计划正在酝酿之中;加拿大正在考虑将不同时代的铁镁质岩浆研究作为未来十年中地学的旗舰项目。我国在基性岩浆岩研究方面有良好的基础,也有开展这一领域研究的地质条件。例如,华北太古带克拉通绿岩带,华北中部元古代岩墙群,晚古生代典型的大陆溢流玄武岩省,中生代众多拉伸盆地形成及相关的双峰式岩浆活动,中国东部新生代弥散性火山岩省,多个时代的碱性杂岩和基性侵入岩,以及与造山带相关的岩浆活动。其中中国东部岩石圈减薄,峨眉山幔柱,大别超高压变质带和青藏造山带都是举世瞩目的地质事件,华北是地球上最古老的陆壳之一,因此开展与上述地质事件和地区相关的铁镁质岩浆的研究有望在以下方面获得新的进展:中国东部新生代弥散型火山岩省的成因及其形成背景;华北克拉通下岩石圈幔的形成,改造和破坏;二叠纪大火成岩省与地幔柱构造;前寒武绿岩带,基性岩墙群的研究与地幔早期演化;典型造山带(青藏、三江、大别)的基性超基性岩浆活动。该领域的研究预期获得一批高精度的年代学数据,建立

中国铁镁质岩浆活动的总体框架及其与重要地质事件的联系,或者为未知地质事件提供线索。

2.4 地幔岩及地幔矿物学研究

近几年,西藏铬铁矿中发现了一批来自深部地幔的矿物群,推测为源自核幔边界的超地幔柱(Superplume)将其带到浅部地幔。该群有可能保留一些压力矿物:硅酸盐矿物、合金矿物及单元素矿物,需通过实验证明其形成环境和深度;另一方面,这些不同的合金矿物如何面向于冶金学也是一个研究新方向。此外,需采用最先进仪器开展铬铁矿、地幔包体和超高压地体中超深含水相和碳酸盐相矿物研究,超深矿物的研究需要与实验研究相结合,证明其来源自下地幔及其形成的温压条件。

2.5 超高压变质作用研究

板块汇聚边缘表壳岩石如何俯冲到深部>100 km 再折返到地表仍然是个持续的超高压变质作用所研究的课题。超高压变质作用的性质和条件以及深部构造作用的产出,低密度的大陆地壳俯冲到高密度的地幔深部,岩浆弧的成因,元素的化学再循环以及这些作用发生的大地构造背景的研究。变质岩石的 $P-T-t$ 轨迹,以及变质作用、岩浆作用和大地构造的关系等方面的研究将会延续下去。为了加快我国高压超高压变质作用研究的发展,应抓住当前国际高压科学迅猛发展的大好时机,根据我国实际情况,加大投入强度,重点发展一些先进的高压实验技术,如金刚石对顶砧、高温高压合成新材料、动态高压和原位测量高温高压实验技术等,建立国家重点地球动力学与高温高压开放实验室,加强我国的实验矿物学和实验岩石学研究。

2.6 行星地质方面研究

推测由于技术的改进,可以激活行星地质这个领域的兴趣,今后 20 年,人造探测器有可能取得行星的样品,以及一些月亮和太阳系的样品,这些方面的研究可以更好地理解地球是如何形成以及它在太阳系中的作用。

2.7 技术方法方面

建立和引进国际先进实验室和仪器设备,为科研第一线人员提供有效科研手段和能与国际接轨的实验研究平台。正像过去 50 年所发生的情况,高新技术的运用,带动了岩石学领域的发展。下一个 10 年,我们有可能在薄片确定某种矿物十分精确的定年、成分和同位素特征。在变质岩石学领域,这意味着可以调查叠加的变质作用以及大地构造和变质作用之间的联系。在火成岩领域,这意味着我们将

有可能追索十分精确的熔融和结晶的轨迹。此外, MC-ICP-MS的技术发展也具有十分大的潜力, 该项技术有可能确定单个的生长环带和带状矿物的年代和同位素特征, 尤其是锆石、钛铁矿和石榴子石。高分辨率的X射线层析将使得岩石检测发生革命化的变化。该方法有可能检测岩石的三维空间关系而不需破坏岩石。SEM-CL将可以鉴定与结晶作用、熔融和融体运移有关的结构特征, 以及进一步被应用于更广阔的领域。

致谢:承蒙中国地质学会秘书处禹启仁等人的约稿和催稿, 白文吉先生和加拿大Robinson教授的有益讨论, 郜源红和贾毅协助增补和整理参考文献, 地质调查基础项目(1212010711816)资助文章的出版, 在此一并致谢。

参 考 文 献 / References

- 白文吉, 杨经绥, Robinson, 方青松, 张仲明, 颜秉刚, 胡旭峰. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究. 地质学报, 75(3): 404~409.
- 白文吉, 杨经绥, 施倪承, 方青松, 代明泉, 熊明, 颜秉刚. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩地幔岩中首次发现超高压矿物方铁矿和自然铁. 地质论评, 50(2): 184~187.
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 颜秉刚, 张仲明, 任玉峰, 施倪承, 马吉生, 代明泉. 2004. 西藏蛇绿岩地幔中的主要自然金属矿物. 地学前缘, 11(1): 179~187.
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 颜秉刚, 张仲明. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿石中的合金成分. 地质学报, 78(5): 676~682.
- 鲍学昭. 1995. 锆石中两种成分变化趋势及其成因标型意义. 矿物学报, 15: 404~410.
- 鲍学昭, 李惠民, 陆松年. 1998. 锆石微区喇曼光谱研究及成因标型意义. 地质科学, 33(4): 455~462.
- 陈道公, 汪相, Deloule E. 2001. 北大别辉石岩成因: 锆石微区年龄和化学组成. 科学通报, 46(7): 586~590.
- 董申保, 洪大卫, 许保良. 2001. 花岗岩拓扑学的研究展望. 地质论评, 47(4): 356~360.
- 杜远生, 朱杰, 韩欣, 顾松竹. 2004. 从弧后盆地到前陆盆地——北祁连山带奥陶纪—泥盆纪的沉积盆地与构造演化. 地质通报, 23(9~10): 911~917.
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化. 岩石学报, 20(3): 533~544.
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 王团华. 2005. 镜泊湖全新世火山岩—岩浆的多样性. 自然科学进展, 15(8): 943~950.
- 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 孙谦, 李霓. 2006. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化. 岩石学报, 22(6): 1449~1457.
- 樊祺诚, 孙谦, 龙安明, 尹克坚, 隋建立, 李霓, 王团华. 2006. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究. 岩石学报, 22(6): 1529~1537.
- 方春方, 陈培荣. 2000. 赣南不同类型花岗岩体的锆石形态群特征及其意义. 地质找矿论丛, 15(4): 299~306.
- 洪大卫. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. 中国科学(D辑), 25: 418~426.
- 简平, 程裕淇, 刘敦一. 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩U-Pb年龄解释的基本依据. 地学前缘, 8(3): 183~191.
- 金振民, 高山. 1996. 底侵作用及其壳幔演化动力学意义. 地质科技情报, 15(2): 1~7.
- 李献华, 刘颖, 涂相林. 1996. S型花岗岩中锆石U-Pb同位素体系的多阶段演化及年代学意义. 矿物学报, 16(2): 170~177.
- 林广春, 马昌前. 2003. 过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述. 华南地质与矿产, 1: 65~70.
- 刘埃平, 金景福. 1996. 牧护关花岗岩中锆石标型特征研究. 地质地球化学, 4: 15~20.
- 刘显凡, 卢秋霞. 1997. 锆石形态标型特征及标型生长机制探讨. 矿物岩石杂志, 16(2): 179~184.
- 罗照华, 柯珊, 谌宏伟. 2002. 埃达克岩的特征、成因及构造意义. 地质通报, 21(7): 436~440.
- 马昌前, 王人镜, 邱家骥. 1992. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志: 包体——以北京周口店岩体为例. 地质论评, 38(2): 109~119.
- 马昌前. 2003. 造山岩套中镁铁质和长英质岩浆的相互作用研究进展. 地质科技情报, 22(3): 1~8.
- 马昌前, 明厚利, 杨坤光. 2004. 大别山北麓的古生代岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据. 岩石学报, 20(3): 393~402.
- 苏建平, 张新虎, 胡能高, 付国民, 张海峰. 2004b. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因. 中国地质, 31(4): 365~371.
- 汤艳杰. 2006. 太行山地区中、新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化. 岩石学报, 22(6): 1657~1664.
- 汪相, Pupin J P. 1992. 法国阿根特拉花岗岩中锆石的微量元素地球化学特征及地质意义. 地质论评, 12(3): 260.
- 汪相. 1998. 锆石形态的定量描述及其动力学分析. 中国科学(D辑), 28(3): 232~238.
- 汪相, Kienast J R. 2000. 微粒暗色包体中锆石的形态演化及其制约机制. 中国科学(D辑), 30(2): 180~187.
- 汪相, 李显武. 2001. {211}型锆石的标型性研究. 科学通报, 46(17): 1472~1476.
- 王德滋, 周金城. 1999. 我国花岗岩研究的回顾与展望. 岩石学报, 15(2): 161~69.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王方正, 杨梅珍, 郑建平. 2002. 准噶尔盆地陆梁地区基底火山岩的岩石地球化学及其构造环境. 岩石学报, 18(1): 9~16.
- 吴才来, 杨经绥, Reland T, Wooden J L, 李海兵, 万渝生, 史仁灯. 2001. 祁连南缘喇嘛山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. 岩石学报, 17(2): 215~221.
- 吴才来, 杨经绥, 杨宏议, Wooden J L, 史仁灯, 陈松永, 郑秋光. 2004. 北祁连东部两类I型花岗岩定年及其地质意义. 岩石学报, 20(3): 425~432.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 岩石学报, 21(3): 846~858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden J L, 陈松永, Mazadab F K. 2006. 北祁连早古生代洋壳双向俯冲的花岗岩证据. 中国地质, 6: 1197~1208.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 蒋国家, 赵军红. 2001. 锆石的成因和U-Pb同位素定年的某些进展. 地质地球化学, 19(4): 64~70.
- 许文良. 1999. 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, 45(增刊): 444~449.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 林景任, 刘晓春. 2002. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩体中榴辉岩类包体的发现及其地质意义. 科学通报, (8): 618~622.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 林景任. 2003. 鲁西中生代闪长岩中两类

- 幔源捕虏体的岩石学和地球化学. 岩石学报, 19(4): 623~636.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 纪伟强. 2005. 辽东前任屯角闪岩形成的时代——锆石 SHRIMP U-Pb 定年证据. 岩石矿物学杂志, 24(4): 273~278.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 68(1): 1~15.
- 徐夕生, 周新民, 王德滋. 1999. 壳幔作用与花岗岩成因——以中国东南沿海为例. 高校地质学报, 5(3): 421~429.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 颜秉刚, 施婉承, 马哲生, 代明泉, 熊明. 2002. 蛇纹岩中的一种超高压矿物——硅金红石, 12: 1220~1222.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 颜秉刚, 戎合, 陈松永. 2004. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英. 地球科学, 29: 651~660.
- 杨经绥, 白文吉, 戎合, 张仲明, 许志琴, 方青松, 颜秉刚, 李天福, 任玉峰, 陈松永. 2005. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔石榴子石橄榄岩中发现 Fe₂P 合金矿物. 岩石学报, 21: 271~276.
- 杨岳衡. 2006. 华北克拉通中、新生代典型火山岩的岩石成因: Hf 同位素新证据. 岩石学报, 22(6): 1665~1671.
- 张宏福, 英基丰, 徐平, 马玉光. 2004. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示. 科学通报, 49(8): 784~789.
- 张辉煌, 徐义刚, 葛文春, 马金龙. 2006. 吉林伊通—大屯地区晚中生代—新生代玄武岩地球化学特征及其意义. 岩石学报, 22(6): 1579~1596.
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr, Nd 同位素制约. 岩石学报, 17(4): 505~513.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 21(17): 431~435.
- 张文慧, 韩宝福. 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩的 K-Ar 年代学和地球化学及其深部动力学意义. 岩石学报, 22(6): 1597~1607.
- 张招崇, 王福生. 2002. 峨眉山大火成岩省中发现二叠纪苦橄质熔岩. 地质论评, 48: 448.
- 周新民, 姚玉鹏, 徐夕生. 1992. 浙东大火山花岩中淬冷包体及其成因机制. 岩石学报, 8(3): 234~242.
- 朱弟成, 段雨萍, 廖忠礼, 潘桂棠. 2002. 两类埃达克岩 (Adakite) 的判别. 矿物岩石, 22(3): 5~9.
- Arnaud N O, Vidal P, Tapponnier P, Matt Ph and Deng W M. 1992. The high volcanism of northwestern Tibet (Xizang): Geochemistry and tectonic implications. Earth and Planetary Science Letters, 111: 351~367.
- Alvar S. 2000. Fractional crystallization of mantle-derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: an example from Lachlan Fold Belt, Australia. London: Journal of the Geological Society, 157: 135~149.
- Anthi L, Dieter G. 1999. Constraining the prograde and retrograde P-T-t path of Eocene HP rocks by SHRIMP dating of different zircon domains: inferred rates of heating, burial, cooling and exhumation for central Rhodope, northern Greece. Contrib. Petrol., 135: 340~354.
- Armin Z, Williams I S, Helene B, Millar I L. 2003. Different age response of zircon and monazite during the tectono-metamorphic evolution of a high grade paragneiss from the Ruhla Crystalline Complex, central Germany. Contrib. Petrol., 135: 340~354.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46: 605~626.
- Barbey P, Alle P, Brouand M, Albaredo F. 1995. Rare-earth patterns in zircon from the Manslu granite and Tibetan Slab migmatites (Himalaya): insights in the origin and evolution of a crustally-derived granite magma. Chem Geol., 125: 1~17.
- Belousova E A, Griffin W L, Suzanne Y O. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib. Petrol., 143: 602~622.
- Bergantz G W. 1989. Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction. Science, 245: 1093~1094.
- Bourdon B, Eissen J P, Monzier M, Robin C, Martin H, Cotton J, Hall. 2002. Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metasomatism beneath the Andem northern volcanic zone. Journal of Petrology, 43: 199~217.
- Calvin F M, Susanne M M and Russell W M. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529~532.
- Castro A, Moreno-Ventas I and De la Rosa J D. 1991. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature. Earth Science Reviews, 31: 237~253.
- Chung S L and Jahn B. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian—Triassic boundary. Geology, 23: 889~893.
- Collins W J. 1996. S- and I-type granitoids of the eastern Lachlan fold belt: Products of three-component mixing. Transitions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences, 88: 171~179.
- Collins W J. 1998. Evolution of petrogenetic models for Lachlan Fold Belt granitoids: implications for crustal architecture and tectonic models. Australian Journal of Earth Sciences, 45: 483~500.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662~665.
- Defant M J, Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. EOS, Transactions American Geophysical Union, 82(6): 65.
- Didier J and Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology. Elsevier, 625.
- Ernst W G. 2005. Alpine and Pacific styles of Phanerozoic mountain building: subduction-zone petrogenesis of continental crust. Terra Nova, 17: 165~188.
- Fernando B, Pilar M and Tatiana Z. 2003. The Nature, Origin, and Thermal Influence of the Granite Source Layer of Central Iberia. The Journal of Geology, 111: 579~595.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892~897.
- Geisler T, Ulonska M, Schleichner H, Pidgeon R T, Bronsijk W V. 2001a. Recrystallization of metamorphic zircon under experimental hydrothermal conditions. Contrib. Petrol., 141: 53~65.
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H and Lee T Y. eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. AGU Geodynamics Series, 27: 107~126.
- Hanns P L, Clark I, Uwe A, Roland O. 2002. Behavior of zircon during high-pressure, low-temperature metamorphism: Case study from the Internal Unit of the Sesia Zone (Western Italian

- Alps). *Eur. J. Mineral.*, 14: 61~71.
- Hartmann L A, Leite J A D, Silva L C, Remus M V D, McNaughton N J, Groves D I, Fletcher I R, Santos J O S, Vasconcelos M A Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829~844.
- He Bin, Xu Yigang, Long Xiao, Wang Kaimin, Sha Shaoli. 2003. Generation and Spatial Distribution of the Emeishan Large Igneous Province: New Evidence from Stratigraphic Records, 77(2): 194~202.
- Hinton R W and Upton B G J. 1999. The chemistry of zircon; variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenolith. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 3287~3302.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000b. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. metamorphic Geol.*, 18: 423~439.
- Huppert H E and Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J. Petrol.*, 29: 599~624.
- Johannes W. 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin: Springer-verlag, 335.
- Johmston A D and Wyllie P J. 1998. Constraints on the origin of Archean trondhjemites based on phase relationships of Nuk gneiss with H₂O at 15 kbar. *Contrib. Petrol.*, 100: 35~46.
- Keay S, Steele D and Compston C. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: an application to the Lachlan foldbelt. *Contrib Mineral Petrol*, 137: 323~341.
- Kinny P D, Strachan R A, Kocks H, Friend C R L. 2003. U-Pb geochronology of late Neoproterozoic augen granites in the Moine Supergroup, NW Scotland; dating of rift-related, felsic magmatism during supercontinent break-up? London: *Journal of the Geological Society*, 160: 925~934.
- Klotzli U S, Koller F, Scharbert S, Hock V. 2001. Variscan granite petrogenesis; Constraints from zircon typology and geochronology, whole-rock and feldspar Pb—Sr isotope systematics. *Journal of Petrology*, 42: 1621~1642.
- Lo Ching-Hua, Chung S L, Lee T Y and Wu Genyao. 2002. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian—Triassic boundary events. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 449~458.
- Leo A H and Jodo O S. 2003. Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones. *Geology*, 32: 73~76.
- McMenamin M A S, McMenamin D L S. 1990. *The Emergence of Animals: The Cambrian Breakthrough*. New York: Columbia University Press, 1~12.
- Martin J W and John P P. 2003. Dating high-grade metamorphism—constraints from rare-earth elements in zircon and garnet. *Contrib. Petrol.*, 145: 61~74.
- Menzies M A, Fan Weiming, Zhang Ming. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of > 120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, Neary C R. eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. *Geol Soc Spec Publ*, 76: 71~81.
- Mezger K, Krogstad E J. 1977. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages — an evaluation. *Metamorph Geol.*, 15: 127~140.
- Pablo S, Herve M, Claude R, Michel M. 2002. Transition from cala-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30(11): 967~970.
- Patino Douce A E and Beard J S. 1996. Effects of P , f_2 and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes. *J. Petrol.*, 37: 999~1024.
- Patino Douce A E and McCarthy TC. 1998. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction. In: Hacker B R, Liou J G. Eds, *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*. *Petrology and Structural Geology*, Vol. 10. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 27~55.
- Petford N, Paterson B, McCaffrey, Pugliese S. 1996. Melt infiltration and advection in microdioritic enclaves. *Eur. J. Mineral.*, 8: 405~412.
- Pidgeon R T, Nemchin A A and Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircons from Archean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132: 288~299.
- Pitcher W S. 1997. *The Nature and Origin of Granite*. London: Chapman and Hall
- Poli G, Tommasini S, Halliday A N. 1996. Trace element and isotopic exchange during acid—basic magma interaction processes. *Trans. R Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 87: 225~232.
- Poller U, Liebetau V, Todt W. 1997. U-Pb single-zircon dating under cathodoluminescence control application to polymetamorphic orthogneisses. *Chem Geol.*, 139: 287~297.
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, Maury R. 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature*, 410: 197~200.
- Pupin J P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contrib. Petrol.*, 73: 207~220.
- Rainer A, Albert H, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51~73.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and origin of Archean trondhjemites and tonalities. *Precamb. Res.*, 51: 1~25.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust—mantle recycling. I. *Petrol.*, 36: 891~931.
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825~828.
- Rogers J W and Greenberg J K. 1990. Late-orogenic, post-orogenic, and anorogenic granites: distinction by major-element and trace-element chemistry and possible origins. *The Journal of Geology*, 98: 291~309.
- Vavra G, Schaltegger U. 1999a. Post-granulite facies monazite growth and rejuvenation during Permian to Lower Jurassic thermal events in the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contrib. Petrol.*, 134: 405~414.
- Vavra G, Schmid R and Gebauer D. 1999b. Internal morphology, habit and U—Th—Pb microanalysis of amphibolite to granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 380~404.
- Viebe R A, Manon M R, Hawkins D P, Hawkins, McDonough W

- F. 2004. Late-Stage Mafic Injection and Thermal Rejuvenation of the Vinalhaven Granite, Coastal Maine. *Journal of Petrology*, 45(11): 2133~2153.
- Von Blanckenburg F, Kagami H, Deutsch A, Oberli F. 1998. The origin of Alpine plutons along the Periadriatic Lineament. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 78: 55~66.
- Winther K T and Newton R C. 1991. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons *Bull. Geol. Soc. Den.*, 39: 213~228.
- Wolf M B and Wyllie J P. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar; the effects of temperature and time. *Contrib. Petrol.*, 115: 369~383.
- Wu Cailai, Wooden J L., Yang Jingsui, Robinson P T, Zheng Lingsen, Shi Rendeng and Chen Songyong. 2006. Granitic magmatism in the North Qaidam Early Paleozoic Ultra high-Pressure Metamorphic Belt, Northwest China. *International Geology Review*, 48: 223~240.
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 2003. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the North Qilian Mountain, China. *Geological Society of America Bulletin*, 115: 1510~1522.
- Xu Yigang, Chung S L, Jahn B, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos.* 58:145~168.
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Ma Jinlong, Wang Yanbin, Yoshiyuki Iizuka, Xu Jifeng, Wang Qiang, Wu Xiangyang?. 2004. Crust—mantle interaction during the tectonic—thermal reactivation of the North China Craton: constraints from SHRIMP zircon U—Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib. Petrol.*, 147: 750~767.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Yin Jifeng. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, trace-element and Sr—Nd—Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib. Petrol.*, 144: 241~253.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Zhou Meifu, Fan Weiming, Zheng Jianping. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 4373~4387.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Meifu, Fan Weiming, Zhou Xinhua, Zhai Mingguo. 2004. Highly heterogeneous late Mesozoic lithospheric mantle beneath the north China Craton: evidence from Sr—Nd—Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geol Mag*, 141(1): 55~62.
- Zhou Meifu, Malpas J, Song Xieyan, Robinson P T, Sun Min, Kennedy A K, Leshner C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 113~122.

A Decade of Progress and Challenges for the Future in Igneous Petrology

YANG Jingsui¹⁾, WU Cailai¹⁾, XIA Linqi²⁾, FAN Qicheng³⁾, XU Yigang⁴⁾, XU Xisheng⁵⁾

1) *Key Laboratory for Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, 710054;*

3) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029;*

4) *CAS Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;*

5) *State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

Abstract: This paper summarized recent progresses in the study of igneous petrology from 7 aspects. They are ① Continental rifting and volcanism in late Neoproterozoic time and breaking of the Rodinian super-continent; Deep-Earth dynamic background of the Carboniferous—Early Permian extensive rifting and volcanism in Middle Asia, and their relationship with formation of the Paleo-Tethys and plentiful minerogenesis in Late Paleozoic in Middle Asia; ② Mesozoic—Cenozoic volcanism and intense thinning of lithosphere in East Asia; ③ Cenozoic collision between Indian continent and Asian continent and volcanism related to the plateau uplifting; ④ Large igneous province (LIP) and mantle plume; ⑤ Granite and Earth dynamic background; and ⑥ Mafic—ultramafic rocks and ophiolites. In coming 10 years studies will be continued in genesis and movement of magmas, their evolution and tectonic setting, and metamorphic P — T — t path and mechanism of subduction and exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks. Petrologists are extremely interested in deep crust and mantle core samples from IODP and ICDP, and in using tomography data to describe crustal and mantle structures. In addition, development and application of advanced and new technique in sample analysis and measurement, as well as development of laboratory experimental work are critically important for further petrological study.

Key words: igneous rock; large igneous province; mantle plume; granite; ultramafic rock; ophiolite