

花岗岩研究进展

徐夕生, 贺振宇

南京大学 成岩成矿作用国家重点实验室, 南京 210093

摘要:花岗岩的起源、形成的物理化学过程、结晶和分异、矿物-化学成分多样性、时空演变等是当前花岗岩研究的主题。矿物微区原位同位素分析,特别是锆石原位微区 U-Pb 和 Hf-O 同位素分析,以及岩浆作用的物理过程实验模拟是重要的研究手段。近年来,不同类型花岗岩起源和演化过程认识的深入,得益于对与花岗岩及其伴生的其它相关岩石研究的突破,以及锆石原位 U-Pb 和 Hf-O 同位素分析技术的应用。本文结合国内外花岗岩研究进展,综述了我国东南部华夏陆块上花岗岩研究中的一些问题。

关键词:花岗岩;研究进展;地壳演化;华南

中图分类号:P588.12*1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)03-0205-05

Progress in Granite Studies

XU Xi-sheng, HE Zhen-yu

*State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences
and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

Abstract: The main themes of current granite studies include the origin of granitic magmas, physical and chemical processes in their formation, crystallization and differentiation in their evolution, chemical-mineralogical varieties and spatial-temporal evolution of the magmas. The key approaches in granite studies are in-situ isotope measurements, especially the in-situ isotope measurements of U-Pb, Lu-Hf and O isotopes in zircons, and experimental modeling of physical processes of magmatism. Benefit from comprehensive studies of granites and genetically related other rocks and by application of in-situ analyses of U-Pb, Lu-Hf and O isotopes in zircons, a great progress has been achieved recently in better understanding of the origins and the magmatic processes of granites. On the basis of the new progresses of granite studies, this paper tentatively discusses the petrogenesis of granites in the Cathaysia block of southeastern China.

Key words: granite; research progress; crust evolution; South China

花岗岩是大陆地壳的主要组成,记录着陆壳形成、壳-幔相互作用和岩石圈演化的丰富信息。不同成因类型花岗岩及共生岩石组合反映不同的构造环境和地球动力学背景,众多大型-超大型金属矿产的形成还与花岗岩的形成演化密切相关。因此,长期以来,它是地质科学的主要研究对象之一,它的成因和成矿等问题也一直是重要的前沿研究课题。随着人们对花岗岩成岩成矿认识的不断深入,一些问题被明确解答,同时又提出了新的问题。

近十余年来,岩石地球化学和同位素地球化学分析方法以及技术的革新为花岗岩研究注入了新的活力,高精度、高准确度的分析数据为解析花岗岩成因演化提供了重要保障,使人们对花岗岩-火山岩起源、地球动力学背景及其与成矿关系方面的认知更为深刻。

我国科学工作者长期重视花岗岩的研究,在上世纪 80 年代,华南花岗岩的研究曾达到国际水平^[1]。在我国科学基金资助下,花岗岩及相关岩石

研究在本世纪初形成了新的热潮。国家自然科学基金委员会在过去 10 年间资助了多项有关华南花岗岩研究的重点项目。国家科技部、中国科学院资助强度更大,使华南花岗岩成岩成矿研究愈来愈多地受到国际地学界的关注。本文结合国内外花岗岩研究进展,综述了我国东南部华夏陆块上花岗岩研究中的一些问题。

1 花岗岩及相关岩石成因演化研究取得突破

四年一次的“Hutton 国际花岗岩及相关岩石成因学术讨论会”在国际地质学界有重要影响,第 7 届 Hutton 国际花岗岩研讨会将花岗岩形成的物理和化学过程、矿物化学成分多样性、时空演变、花岗质岩浆的结晶和分异等列为讨论的主题。花岗岩与大陆地壳的形成与演化、花岗岩成因与成矿依然是研究热点,矿物微区原位同位素分析和岩浆作用的物理过程实验模拟是花岗岩研究的重要手段^[2]。花岗质岩浆的演化是第 7 届 Hutton 国际花岗岩研讨会引人关注的重要内容。大陆地壳的总体成分是安山质,然而原生的幔源岩浆一般是玄武质,大陆上地壳的主要岩石为花岗质岩石,因此,共生的幔源镁铁质岩石和花岗岩的成因联系成为理解大陆地壳形成和演化的关键。Laurent 等^[3]报道了南非 Bulai 岩体的研究结果,通过地球化学模拟认为 Bulai 岩体由含水的幔源岩浆经分离结晶形成,而且仅有微弱的地壳混染,反映大陆地壳的存在并不是花岗岩形成的先决条件,这一机制可以用来解释一些具有“新生”的同位素特征的大型花岗岩基的形成与地壳生长作用。Ulmer 等^[4]报道了模拟下部大陆地壳条件下(0.7~1.5 GPa)的实验岩石学结果,表明可以由玄武质岩浆演化形成英云闪长质至花岗闪长质的岩浆,随着后期斜长石的分离结晶,岩浆向弱过铝质和过铝质转化。Annen 等^[5]曾提出中酸性岩浆成因的深部地壳热带模式(Deep crustal hot zone),幔源岩浆侵入下地壳中,并呈席状分布,中酸性岩浆由玄武质岩席分异产生的熔体和地壳岩石部分熔融产生的熔体混合形成,这一模式目前被广泛接受^[6~7]。

很多研究实例表明花岗质岩浆可以演化形成不同化学和矿物组成的花岗岩,而且高演化的花岗岩常常与稀有金属成矿有关。Canosa 等^[8]报道了伊比利亚半岛的华力西期高演化的细粒淡色花岗岩,与低演化的端元相比, Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 、Li、Be、Rb、As、Nb、Ta、Sn 和 Cs 含量较高, CaO、MgO、

TiO_2 、Ba、Sr、Zr、Pb 和 Th 含量较低。锆石的 Hf 含量高, Zr/Hf 比值低。南岭地区广泛发育与稀有金属成矿作用有非常密切关系的燕山早期花岗岩,以弱过铝质黑云母二长花岗岩和黑云母钾长花岗岩为主,并和一些规模较小的含角闪石花岗岩和含白云母的淡色花岗岩密切共生。李献华等^[9]对这些花岗岩的岩石化学特征和 SiO_2 - P_2O_5 相关关系进行了系统的分析研究发现两者呈明显的负相关,反映了南岭燕山早期花岗岩主要为准铝质-弱过铝质的 I 型/分异 I 型花岗岩演化系列。

当然,共生的不同类型花岗岩也可以是不同的岩浆起源。例如,He 等^[10]对赣南地区的一套花岗岩-正长岩-辉长岩岩石组合进行了研究,其中燕山早期的花岗岩类型复杂,包含 S 型、I 型和 A 型花岗岩;S 型花岗岩岩浆起源于华夏地块新元古代地壳,它们的古元古代 Hf、Nd 模式年龄(1.7~2.1 Ga)是新元古代地壳中古老的、不同时代的地壳物质成分混合的结果;而 I 型花岗岩岩浆由软流圈地幔来源的熔体和新元古代地壳部分熔融的岩浆混合形成;A 型花岗岩与 I 型花岗岩有相似的岩浆起源方式,但是岩浆中亏损地幔来源的岩浆比例更高。通过这一研究认识到不同比例幔源岩浆与地壳重熔岩浆混合是南岭中生代共生的 I 型和 A 型花岗岩岩浆起源的可能方式。

2 原位 U-Pb 和 Hf-O 同位素分析技术注入活力

越来越多的研究表明,幔源岩浆在花岗岩形成过程中发挥了重要作用,A 型花岗岩的形成一般都有幔源岩浆的参与,I 型、甚至 S 型花岗岩在其形成过程中也有幔源岩浆作用的贡献,包括热量或物质,或两者兼有的贡献^[11~14]。大面积分布的花岗岩可以是多次幔源岩浆底侵或内侵,促使上覆的地壳物质发生部分熔融形成花岗质岩浆的结果。这些研究进展主要得益于与花岗岩及其伴生的其它相关岩石研究的突破,以及锆石原位 U-Pb 和 Hf-O 同位素分析技术的应用。

全岩分析得到样品的平均组成,难以揭示岩浆混合或同化混染作用过程和机理。而岩石中副矿物锆石 Hf 含量很高, Lu/Hf 比值很低(通常 <0.001),放射性成因的¹⁷⁶Hf 极少,尤其是年轻的锆石,其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值可以代表锆石形成时的比值;此外,不同来源的锆石其内部结构和 Hf 同位素组成不同,进而示踪岩浆起源和岩浆源区中软流圈地幔、岩石圈

地幔、地壳的各自贡献及作用方式^[15,16]。

近年来,一系列岩相学和地球化学资料表明花岗岩可能是由壳、幔源岩浆混合而成。但在岩浆混合作用过程中,全岩同位素与主量元素、微量元素会发生解耦,基性岩浆和酸性岩浆的 Sr、Nd 同位素很容易达到均一化,很难利用全岩 Sr、Nd 同位素甄别岩浆混合作用。Yang 等^[16]对花岗岩及其镁铁质包体(MME)中锆石进行了原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析,结合全岩地球化学资料,提出花岗岩岩浆源区的多元性(亏损地幔、富集地幔和下地壳物质)和岩浆混合成因机制,有效地识别出亏损地幔物质 $[\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0]$ 参与了花岗岩的形成。邱检生等^[17]研究了福建沿海四个 I 型花岗岩岩体的 Nd-Hf 同位素组成, Nd 同位素组成较均一 $[\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.2 \sim -5.5]$, 而锆石 Hf 同位素变化范围较大 $[\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.6 \sim 4.5]$, 指示岩体中存在壳、幔等不同来源物质。

然而,也有一些花岗岩,甚至 A 型花岗岩,在其形成过程中没有幔源物质的参与。Huang 等^[18]研究了湖南九嶷山花岗岩岩体锆石的 Hf-O 同位素,其锆石 $\delta^{18}\text{O}$ (8.0‰ ~ 9.8‰) 远远高于“地幔锆石”的氧同位素组成, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-6.2 ~ -2.3) 明显低于“地幔锆石”的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。结合全岩主量元素化学成分和 Sr-Nd 同位素 ($I_{\text{Sr}} = 0.7151 \sim 0.7181$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.4 \sim -6.6$) 特征, 认为九嶷山 A 型花岗岩可以由麻粒岩相变质沉积岩高温熔融形成。铝质矿物(如铁铝尖晶石和堇青石)作为残留矿物,解释了九嶷山 A-型花岗岩低 Al_2O_3 含量的特征。

3 陆内造山与巨量花岗岩侵位研究得到重视

大火成岩省(Large igneous provinces, 缩写为 LIPs)是指连续的、体积庞大的(出露面积通常超过 100 万 km^2)、快速形成的(一般小于 10 Ma)、由镁铁质火山岩及伴生的侵入岩所构成的岩浆建造,岩石种类以玄武质熔岩为主,可有少量苦橄岩、霞石岩、流纹岩共生。如印度德干高原、西伯利亚和中国峨眉山溢流玄武岩等。火成岩省的成因用板块构造理论已难以解释,它们往往与来自深部的地幔柱活动有关,是地幔柱岩浆活动的直接产物。

长英质大火成岩省可由酸性、中酸性熔结凝灰岩及与之有成因联系的花岗岩构成,体积一般小于镁铁质大火成岩省,岩浆活动一般与地幔柱活动无关,且岩浆活动是多期次的,活动时间大于 10

Ma^[19]。如南美洲南端的巴塔哥尼亚(Patagonia)是一巨大的长英质火成岩省^[20],火山岩以侏罗纪流纹质熔结凝灰岩为主,夹有少量玄武岩,出露总面积超过 20 万 km^2 ,按平均厚度 1 km 计,体积达 23.5 万 km^3 ,是全球最大的长英质火成岩省之一。

在我国东南部的华夏陆块上,有巨量花岗岩的出露,使国内不少同行将之与“大花岗岩省”相联系。Sheth^[21]在 2007 年提出了 Large Granitic Provinces (LGP) 的概念。他提出,无论是大花岗岩省、大玄武岩省还是大流纹岩省,其分布面积要大于 5 万 km^2 。但他并未对大花岗岩省花岗质岩浆活动的时限提出看法。硅质大火成岩省(即 Sheth 定义的“大流纹岩省”)喷发时间可以延续 40 Ma^[22]。但是,正如 Sheth 指出,大花岗岩省、大流纹岩省与大玄武岩省不同,它并没有构造上的意义。而国内外关于大花岗岩省成因机制的研究,仅仅是开始。

在华夏地块出露 J_2 - J_3 (大约 40 个 Ma) 时期花岗岩的面积达到 62,700 km^2 ^[23], 这是否为大花岗岩省? 显然,华夏地块中生代地质特征有别于狭长的带状展布的碰撞造山带特征^[24], 是多个碰撞造山带的并联? 还是不同走向碰撞造山带的复合? 或是某种特殊的陆内地质过程? 在过去的三十年中,研究人员提出了俯冲碰撞、地幔柱、构造域转换和多板块相互作用等多种模式或观点^[25-29], 但对华夏地块面状分布的中生代花岗岩的成因及其与成矿作用的耦合性依然没有澄清。

华夏地块中生代大规模花岗质岩浆作用,导致大陆地壳物质的强烈分异重组,半个多世纪的研究,初步揭示了岩浆作用的类型和时空分布框架。但对大规模地壳重熔的热源和机制、深部地球动力学过程的认识,分歧很大。解决这一难题的关键是:

(1) 加强华夏地块中生代地幔的组成、结构和热状态研究。这个时期幔源基性岩浆岩出露较少,难以了解地壳重熔热源和物源。但可以结合地球物理的方法,研究是否存在玄武岩/辉长岩底侵或内侵作用,从而研究大陆地壳的热状态,地幔岩浆是否为大规模地壳重熔提供了热源,是否参与了大花岗岩省的形成。

(2) 综合运用地质、地球物理、地球化学和新的探测分析技术,在宏观上研究大花岗岩省的形成对大陆地壳物质的改造,包括改造前后的地幔与地壳的结构特征、改造过程中成矿元素的迁移与富集等。从而深入揭示华夏地块中生代大花岗岩省形成的动力学机制及其成岩成矿效应。

(3)关注华夏地块周边的地质研究进展,华夏地块中生代花岗岩的时空演化和多板块相互作用的动力学过程。

参考文献 (References):

- [1] 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238. (in Chinese with English abstract)
- [2] Molina J F, Scarrow J H, Bea F, Montero P (eds.). Seventh hutton symposium on granites and related rocks[C]. Abstracts Book with Attendees Addresses, 2011.
- [3] Laurent O, Martin H, Moyen J F, Doucelance R. Origin of high-K calc-alkaline granodiorites; Insights from geochemical modeling on the late-Archaeon Bulai pluton (Central Limpopo Belt, South Africa), Seventh hutton symposium on granites and related rocks[C]. Abstracts Book with Attendees Addresses, 2011: 86.
- [4] Ulmer P, Müntener O. Derivation of granitoid magmas by deep crustal crystallization differentiation of basaltic parental magmas: An experimental perspective, Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks[C]. Abstracts Book With Attendees Addresses, 2011, 150.
- [5] Annen C, Blundy J D, Sparks R. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(3): 505-539.
- [6] Jagoutz O, Müntener O, Ulmer P, Pettke T, Burg J P, Dawood H, Hussain S. Petrology and mineral chemistry of lower crustal intrusions; The Chilas Complex, Kohistan (NW Pakistan)[J]. Journal of Petrology, 2007, 48(10): 1895-1953.
- [7] Charlier B, Wilson C. Chronology and evolution of caldera-forming and post-caldera magma systems at Okataina volcano, New Zealand from zircon U-Th model-age spectra[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(5): 1121-1141.
- [8] Canosa F, Martín-Izard A, Fuertes-Fuente M. Strongly differentiated granites in the northern sector of the Ollo de Sapo antiform (Galicia, NW Spain), Abstracts Book with Attendees Addresses, 2011, 29.
- [9] 李献华,李武显,李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981-991.
Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1873-1885. (in Chinese with English abstract)
- [10] He Z Y, Xu X S, Niu Y L. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China[J]. Lithos, 2010, 119: 621-641.
- [11] Clemens J. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth Science Reviews, 2003, 61(1-2): 1-18.
- [12] Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal sources A review[J]. Lithos, 2004, 78(1-2): 1-24.
- [13] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Paterson B A, Foster G L, Kinny P D, Whitehouse M J, Maas R. Exploring the plutonic-volcanic link: A zircon U-Pb, Lu-Hf and O isotope study of paired volcanic and granitic units from southeastern Australia[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 2006, 97(4): 337-355.
- [14] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, Paterson B A, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from hafnium and oxygen isotopes in zircon[J]. Science, 2007, 315: 980-983.
- [15] Hawkesworth C, Kemp A. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution[J]. Chemical Geology, 2006, 226(3-4): 144-162.
- [16] Yang J H, Wu F Y, Simon A Wilde, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2006, 153: 177-190.
- [17] 邱检生,肖娥,胡建,徐夕生,蒋少涌,李真. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2468-2484.
Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2468-2484. (in Chinese with English abstract)
- [18] Huang H Q, Li X H, Li W X, Li Z X. Formation of high $\delta^{18}\text{O}$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, Southern China. Geology[J]. 2011, 39: 903-906.
- [19] 王德滋,周金城. 大火成岩省研究新进展[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 1-8.
Wang Dezi, Zhou Jincheng. New progress in studying the large igneous provinces[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [20] Pankhurst R J, Leat P T, Sruoga P, Rapela C W, Marquez M, Storey B C, Riley T R. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province[J]. J Vol. Geoth. Res, 1998, 81: 113-136.
- [21] Sheth H C. 'Large Igneous Provinces (LIPs)': Definition, recommended terminology, and a hierarchical classification[J]. Earth Science Review, 2007, 85: 117-124.
- [22] Bryan S E, Riley T R, Jerram D A, Stephens C J, Leat P T. Silicic volcanism: An undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. in Menzies M A, Klempner S L, Ebinger C J, Baker J, eds. Volcanic rifted margins; Boulder, Colorado[J]. Geological Society of America Special Paper, 2002, 362: 99-120.
- [23] Zhou X M, Sun T, Shen W, Shu L, Niu Y. Petrogenesis of Meso-

- zoic granitoids and volcanic rocks in south China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29: 26–33.
- [24] Mo X X, Niu Y L, Dong G C, Zhao Z D, Hou Z Q, Zhou S, Ke S. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2008, 250: 49–67.
- [25] Hsü K J, Li J L, Chen H H, Pen H P, Sengor A M C. Tectonics of south China; Key to understanding west Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9–39.
- [26] 谢寰克, 马荣生, 张禹慎. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Xie Douke, Ma Rongsheng, Zhang Yushen. Crust growth and mantle plume tectonics of South China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese)
- [27] Zhou X M, Li W X. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326 (3-4): 269–287.
- [28] Li X H, Li W X, Li Z X. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(14): 1873–1885.
- [29] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, Ji S C, Peng T P, Chen X Y. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, south China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. *Tectonics*, 2007, 26(6): TC6008.
-
- (上接第 204 页)
- [72] Zhang C L, Li X H, Li Z X. A Permian layered intrusive complex in the Western Tarim block, Northwestern China: product of a Ca. 275Ma mantle plume [J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116: 269–287.
- [73] Zhang C L, Li Z X, Li X H. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? [J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 2010, 122: 2020–2040.
- [74] Yang S F, Li Z L, Chen H L. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event [J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2006, 7(suppl. II): 320–324.
- [75] 李勇, 苏文, 孔屏. 塔里木盆地塔中-巴楚地区早二叠世岩浆岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (5): 1097–1107.
- Li Yong, Su Wen, Kong Ping. Zircon U-Pb ages of the Early Permian magmatic rocks in the Tazhong-Bachu region, Tarim basin by LA-ICP-MS [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1097–1107. (in Chinese with English abstract)
- [76] Tian W, Campbell I H, Allen C M. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, 160: 407–425.
- [77] 上官时迈, 田伟, 李献华. 塔北哈拉哈塘流纹岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学: 对塔里木溢流玄武岩主期喷发时代的约束 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(3): 561–564.
- Shangguan Shimai, Tian Wei, Li Xianhua. SIMS zircon U-Pb age of a Rhyolite layer from the Halahatang Area, Northern Tarim, NW China: Constraint on the eruption age of Major Pulse of Tarim Flood Basalt [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(3): 561–564. (in Chinese with English abstract)
- [78] 陈咪咪, 田伟, 张自力. 塔里木二叠纪基性-中性-酸性岩浆岩的年代学及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26: 559–572.
- Chen Mimi, Tian Wei, Zhang Zili. Geochronology of the Permian basic-intermediate-acidic magma suite from Tarim, Northwest China and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26: 559–572. (in Chinese with English abstract)
- [79] Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province [J]. *Lithos*, 2009, 113: 583–594.
- [80] Zhu D C, Chung S L, Mo X X. The 132Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present day southeastern Tibet and southwestern Australia [J]. *Geology*, 2009, 7: 583–586.
- [81] 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点 [J]. *地质学前沿*, 2009, 16 (2): 1–20.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (2): 1–20. (in Chinese with English abstract)
- [82] 裘碧波, 朱弟成, 赵志丹. 藏南措美残余大火成岩省的西延及意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2207–2216.
- Qiu Bibo, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan. The westward extension of Comei fragmented large igneous province in southern Tibet and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2207–2216. (in Chinese with English abstract)