

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.11.11

大陆边缘弧岩浆成因与大陆地壳形成

朱弟成^{1,2}, 王 青¹, 赵志丹¹, 牛耀龄^{1,3}, 侯增谦⁴, 潘桂棠⁵, 莫宣学¹

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室; 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083
2. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越研究中心, 北京 100101
3. 杜伦大学 地球科学系, 英国 杜伦 DH1 3LE
4. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100029
5. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610059

ZHU Dicheng^{1,2}, WANG Qing¹, ZHAO Zhidan¹, NIU Yaoling^{1,3}, HOU Zengqian⁴, PAN Guitang⁵, MO Xuanxue¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences; Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China
3. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK
4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
5. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China

ZHU Dicheng, WANG Qing, ZHAO Zhidan, et al. Magmatic origin of continental arcs and continental crust formation.
Earth Science Frontiers

Abstract: How the continental crust is formed has long been a fundamental scientific question for the international academic community. Magmatic origin and density filtering of arcs at active continental margins are crucial to understanding formation and evolution of continental crust. The Cretaceous Cordilleran continental margin arc in North America may have formed through partial melting of lower crust and magma mixing associated with mantle-derived magmatic underplating, or two-stage compositional differentiation of mantle-derived initial basaltic magma. The vertical crustal compositional section dominantly granitic in the Nevada region of North America is most likely related to the delamination of eclogite facies residues or cumulates. It is currently not clear that why the Mesozoic Gangdese arc in southern Tibet is characterized by the occurrence of a large amount of hornblendites and the presence of an arc crust with basaltic andesitic composition in average at ca. 200 Ma and ca. 90 Ma. This problem may be resolved more or less by exploring the magmatic origin, vertical crustal compositional profile, and crustal formation mechanism of the Mesozoic Gangdese arc.

Key words: crustal formation; Mesozoic Gangdese arc; Cretaceous Cordilleran arc; Southern Tibet; North America

摘要: 大陆地壳如何形成是国际学术界长期关注并正在持续攻关的一个重大基础科学问题。活动大陆边缘弧的岩浆成因和密度分选过程是理解大陆地壳形成机制和演化过程的关键。北美白垩纪 Cordilleran 大陆边缘弧的形成可能经历了与底侵慢源岩浆有关的下地壳部分熔融和岩浆混合, 或慢源初始玄武质岩浆的两阶段成分分异过程, 以花岗质成分为主的北美内华达地区垂向地壳成分剖面结构可能与榴辉岩相残留体或堆晶岩的拆沉作用密切相关。目前并不清楚亚洲大陆南部以约 200 Ma 和约 90 Ma 两个时间断面为代表的中生代冈底斯弧, 为何出现大量角闪石岩并具有玄武安山质的平均成分。探究中生代冈底斯弧的岩浆成因、地壳垂向成分结构和地壳形成机制可能有助于或多或少地解决这一问题。

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-11-10

基金项目: 国家自然科学基金委“特提斯地球动力系统”重大研究计划重点支持项目(91755207); 国家重点研发计划深地资源勘查开采项目(2016YFC0600304); 教育部、国家外国专家局高等学校学科创新引智基地项目(B18048)

作者简介: 朱弟成(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩浆作用与青藏高原形成和特提斯演化研究。E-mail: dchengzhu@163.com

关键词:地壳形成;中生代冈底斯弧;白垩纪 Cordilleran 弧;青藏高原南部;北美

中图分类号:P542.1 文献标志码:A

0 引言

大陆上地壳是长英质的(酸性),下地壳是偏镁铁质的(偏基性),因此平均大陆地壳成分是安山质到英安质的 $w(\text{SiO}_2) = 60.6\%^{[1]}$ 或 $65.2\%^{[2]}$,这是地球有别于太阳系其他行星的独特特征。理解大陆地壳的形成过程是重建地球演化历史的基础,但大陆地壳如何形成仍然是国际学术界长期关注并正在持续攻关的一个重大基础科学问题^[3-7]。早期研究

认为,大陆地壳主要形成于洋内弧和随后的弧-陆碰撞,火山弧岩浆过程对大陆地壳的形成发挥了关键作用^[8-9]。但火山弧环境下的大洋地壳是玄武质的($\omega(\text{SiO}_2) < 52\%$),明显不同于安山质到英安质的平均大陆地壳成分。相反,对北美 Cordilleran 活动大陆边缘岩浆弧^[10](图 1)的研究表明,其侵入岩和火山岩的平均成分是安山质到英安质的(表 1),非常类似于平均大陆地壳成分^[1-2]。因此,准确刻画活动大陆边缘弧的岩浆成因和成分分异过程,对揭示大陆地壳的形成机制和演化过程具有重要意义。

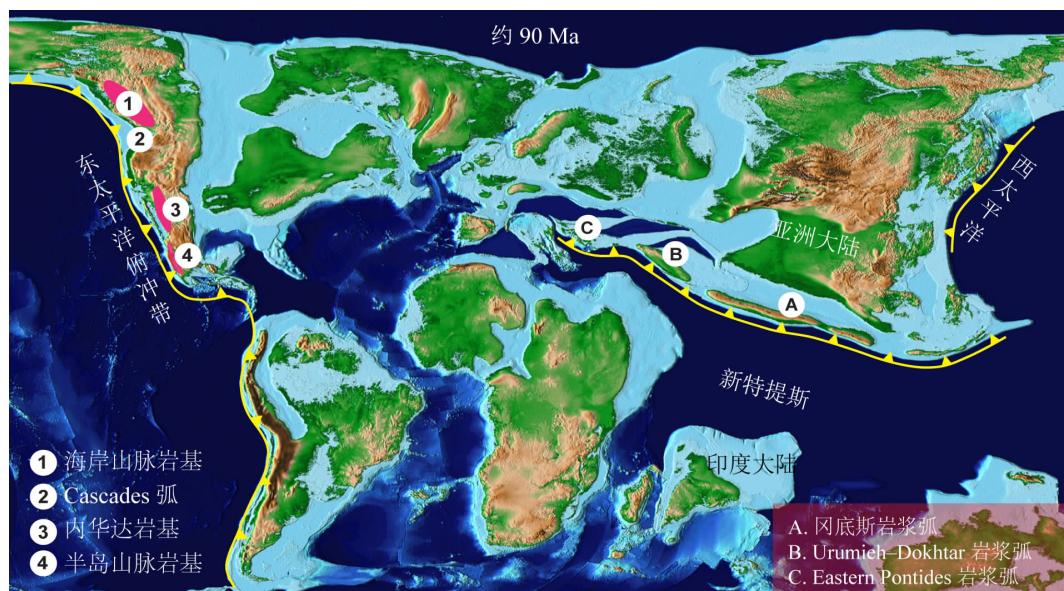


图 1 白垩纪时期(约 90 Ma)地球上的主要活动大陆边缘弧
(修改自 <http://www.scotese.com>)

Fig.1 Active continental margin arcs on Earth during the Cretaceous (ca. 90 Ma). Modified from [10]

表 1 不同地质体的平均主量元素成分 (wt.%)

Table 1 Average contents of major elements in different geological objects

本文概略性地总结了当前在北美白垩纪 Cordilleran 大陆边缘弧岩浆成因、大陆地壳形成机制和演化过程研究中取得的已有认识,并通过对青藏高原南部中生代冈底斯弧两个关键时间断面岩浆成分的分析,建议应加强对中生代冈底斯弧的岩浆成因、地壳垂向成分结构和大陆地壳形成机制 3 个科学问题的深入研究,以提升对大陆边缘弧岩浆成因和大陆地壳形成机制的理解和认知水平。

1 北美白垩纪 Cordilleran 大陆边缘弧

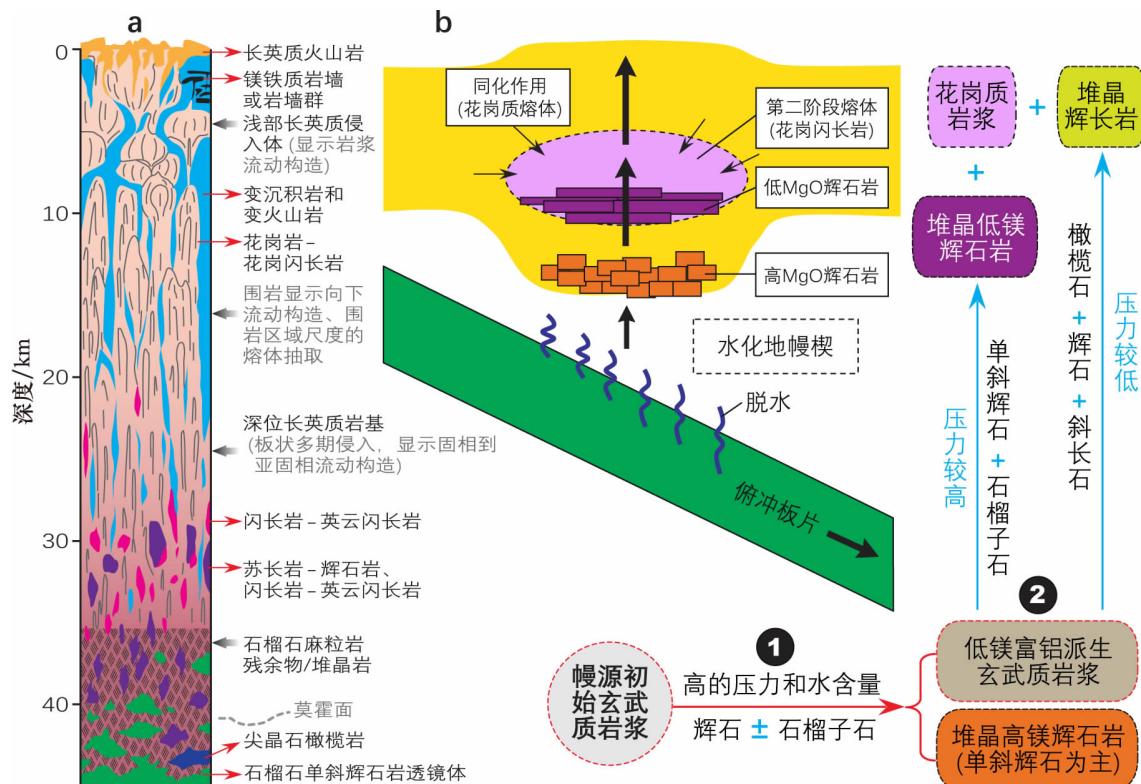
1.1 弧地壳的剖面结构和成因

内华达岩基(Sierra Nevada Batholith)、半岛山脉岩基(Peninsular Ranges Batholith)和海岸山脉岩基(Coast Range Batholith)是北美 Cordilleran 大陆边缘弧的典型代表^[10](图 1),其中内华达岩基的研究最为系统和深入。内华达岩基岩浆作用的持续时间为 250~80 Ma,周期性的岩浆峰期集中在 230~210 Ma、180~160 Ma 和 115~85 Ma^[13]。内华达岩基现今地壳厚度约 33~42 km^[14-16]。根据下地壳包体和侵入岩矿物压力计计算结果,内华达岩

基地壳剖面从下向上分别为石榴子石麻粒岩、石榴子石辉石岩、辉长苏长岩、堆晶辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩和英云闪长岩、淡色花岗岩和花岗斑岩,主体由巨厚的花岗岩类组成^[4,11,17-19](图 2a)。内华达地区这种以花岗质岩石为主的垂向地壳分剖面结构,与其经历的特殊岩浆过程和深部动力学机制密切相关。

有两种流行观点来解释内华达岩基的形成过程:

(1)部分熔融和岩浆混合,幔源岩浆底侵到下地壳底部,形成热区(hot zone)^[20],发生分离结晶和同化混染,并诱发下地壳发生部分熔融(即 MASH 过程^[21])。地壳熔体与基性岩浆混合,混合岩浆侵位到中上地壳(并可能伴随着分离结晶),形成内华达花岗质岩基^[22]。实验岩石学研究表明,当下地壳含水镁铁质岩石在超过 1.0 GPa 深度发生部分熔融时,将产生 Cordilleran 型花岗质岩基,残余物的矿物组合以石榴子石+单斜辉石为主(榴辉岩相)^[17]。(2)两阶段成分分异过程,①在相对高的压力和水含量条件下(相对于低压下拉斑玄武岩晶出橄榄石的条件),幔源初始玄武质岩浆发生辉石土石榴子石的



a—白垩纪北美 Cordilleran 大陆边缘弧的地壳成分结构^[11];b—白垩纪北美 Cordilleran 大陆边缘弧花岗质岩基的形成过程^[4]。

图 2 北美 Cordilleran 大陆边缘岩浆弧地壳成分结构和花岗质岩基的构建过程
Fig.2 Vertical profile of crustal composition and reconstruction process of granitic batholith from the Cretaceous Cordilleran continental margin arc in North America

分离结晶,形成堆晶高镁辉石岩(单斜辉石为主),产生低镁富铝派生岩浆^[4-5,23](图2b)。由于高镁辉石岩的SiO₂与初始岩浆近似,该阶段的分异不会改变派生岩浆的SiO₂含量,仅使得其MgO显著降低。②如果这些低镁富铝派生岩浆继续在较高压力下发生石榴子石+单斜辉石的分离结晶,则形成堆晶低镁辉石岩;如果这些派生岩浆侵位到中地壳(压力更低),则形成矿物相为橄榄石+辉石+斜长石的堆晶辉长岩^[4](图2b)。由于低SiO₂含量的石榴子石和橄榄石的晶出,派生岩浆将向高硅方向演化,形成内华达花岗质岩基。

特殊的深部动力学机制。质量平衡计算表明,部分熔融残余或堆晶岩应该是花岗质岩基的1到2倍^[24]。因此,要形成现今厚达35~30 km的内华达长英质岩基^[15,25],当时在岩基之下部分熔融的残留体(restite)或岩浆分异形成的堆晶岩(cumulate;包括高镁辉石岩、低镁辉石岩和堆晶辉长岩等)也应该至少有35 km,这意味着在当时地壳厚度已经达到约70 km。火山岩中榴辉岩相石英岩包体的最大压强(2.5 GPa)^[24]证实了这一厚度。因此,学术界普遍认为,这部分消失了的榴辉岩相残留体或堆晶岩,被拆沉再循环进入了下伏地幔^[4-6,11,16-17,24,26]。

1.2 弧地壳的形成机制和过程

对位于内华达岩基南部半岛山脉岩基^[10](图1)的研究表明,西部半岛山脉岩基的成分更加原始,常见辉长岩、闪长岩、英云闪长岩和二长花岗岩侵入体,与新生的Cascades弧成分十分接近,原始母岩浆以橄榄石+斜长石+普通辉石的分异为主,形成堆晶橄榄辉长岩^[5];而东部半岛山脉岩基的成分更加演化,以英云闪长岩到二长花岗岩为主,很少出现辉长岩和闪长岩,并以辉石+石榴子石的分异为主,形成堆晶石榴子石辉石岩^[5]。地幔捕虏体^[4]和岩体高Gd/Yb特征指示东部岩石圈厚,在这种压力较高(>1.0 GPa)的含水条件下,辉石优于橄榄石结晶^[27],有利于东部岩基堆晶石榴子石辉石岩的形成,这些榴辉岩质石榴子石辉石岩正是大陆弧阶段岩石圈拆沉作用的关键^[28]。因此,岩石圈拆沉作用可能只发生在东部半岛山脉岩基^[5]。西部半岛山脉岩基的岩石圈薄,岩浆分异形成以橄榄辉长岩为主的堆晶岩,可能未发生拆沉作用^[5]。

北美内华达岩基和半岛山脉岩基的研究表明,大陆地壳的形成经历了多阶段过程,包括岛弧形成、岛弧增生和最后的大陆弧岩浆作用。分异成长英质

地壳和镁铁质石榴子石辉石岩下地壳仅仅出现在岛弧增生之后的大陆弧阶段,因此,镁铁质组分的拆沉作用出现在大陆弧阶段或大陆弧之后,而不是出现在岛弧发育阶段^[5]。通过拆沉作用,北美Cordilleran弧地壳转换为类似于平均大陆地壳成分的安山质到英安质成分^[5,11](表1)。

根据北美Cordilleran成熟大陆弧与全球平均大陆地壳成分的相似性,一些研究者认为,Cordilleran地壳的形成过程在时间和空间上可能具有普遍性,是通过其他大陆边缘弧来研究大陆地壳形成机制和形成过程的可比较对象^[5]。

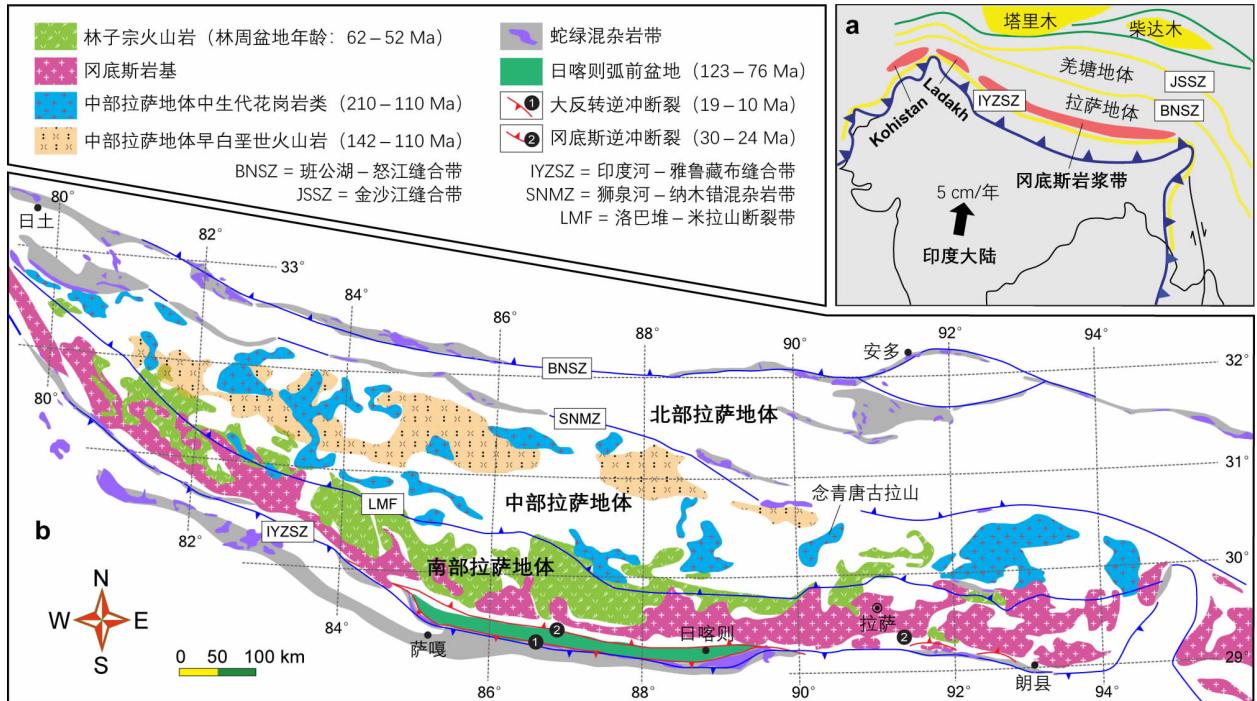
2 青藏高原南部中生代冈底斯弧

横跨地球中纬度地区东西绵延约6 500 km,由特提斯洋壳俯冲形成的欧亚大陆南缘岩浆弧(包括藏南冈底斯岩浆弧、伊朗Urumieh-Dokhtar岩浆弧和土耳其东部Eastern Pontides岩浆弧)^[10](图1),其规模可比于北美Cordilleran岩浆弧(约6 200 km),可能是检验北美Cordilleran大陆边缘弧岩浆成因、大陆地壳密度分选机制和形成过程的理想地区。

2.1 中生代冈底斯弧的成分特征

冈底斯岩浆弧位于青藏高原南部的拉萨地体,由拉萨地体南部的冈底斯岩基和对应的火山岩组成^[29](图3a和3b)。冈底斯岩基东西延伸约1 500 km,宽度变化于80~10 km,侵位于早古生代变沉积岩、石炭纪早期片麻状花岗岩和三叠纪—白垩纪火山沉积岩中^[29]。已有大量锆石U-Pb年代学数据显示,冈底斯岩基主要侵位于210~14 Ma,形成约(200±5) Ma、(90±5) Ma、(50±3) Ma和(15±2) Ma共4个岩浆高峰期^[30-31]。

本文主要聚焦冈底斯岩基中生代时期的两期((200±5) Ma和(90±5) Ma)大规模岩浆活动。与北美Cordilleran大陆边缘弧岩浆活动相比,这两期大规模岩浆活动具有以下特点。(1)岩浆成分连续,但未见更酸性组分,在加查北部崔久村出露的(200±5) Ma岩浆记录,数百米的露头尺度内可见角闪辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩,缺少更酸性的二长花岗岩和花岗岩,同时还出露了大套角闪石岩和辉石角闪石岩,另见少量淡色花岗岩脉(图4a和4b);米林西部里龙—余松报道的(90±5) Ma岩浆活动,岩性包括含石榴子石变质辉长岩、苏长岩、角闪辉长岩、闪长岩、

图3 青藏高原南部拉萨地体的构造单元和冈底斯岩浆弧位置^[28]Fig.3 Tectonic subdivision of the Lhasa Terrane and the location of the Gangdese arc in southern Tibet^[28]

英云闪长岩,同样缺少更酸性的二长花岗岩和花岗岩,堆晶岩包括大套角闪石岩和少量纯橄榄岩、异剥橄榄岩^[34-35],见少量淡色花岗岩脉(图4c和4d)。两个时期的这种岩性组合均不同于北美内华达岩基和东部半岛山脉岩基,但却类似于西部半岛山脉岩基^[5]和Cascades弧^[36]。(2)出现大量角闪石岩堆晶岩,未见石榴子石辉石岩,无论是加查崔久(200±5)Ma还是米林余松(90±5)Ma时期的岩浆活动,堆晶岩中均出现了大量角闪石岩,在(90±5)Ma时还出现了石榴子石变质辉长岩^[35],但未见石榴子石辉石岩。这既不同于以堆晶石榴子石辉石岩(未见角闪石岩)为特征的内华达岩基^[4],也不同于仅仅在下部辉长岩单元才能偶见小规模豆荚状角闪石岩的阿拉斯加南部侏罗纪Talkeetna洋内弧^[36-37]。(3)玄武安山质(辉长闪长质)的平均成分,米林西部里龙岩基(95~82 Ma)的变质辉长岩和闪长岩具有大陆岩浆弧环境下新生地壳的地球化学特征,显示岩浆分异趋势,其中的辉长岩为堆晶岩,闪长岩是演化岩浆的结晶产物,里龙岩基的平均成分被认为是安山质($w(\text{SiO}_2)=57.0\%$, $w(\text{K}_2\text{O})=1.42\%$, $\text{Mg}^{\#}=50$),并存在58.0~56.5%的成分间断^[35]。但对桑日—米林一带更多98~86 Ma冈底斯岩基样品(97件,不包括规模极小的淡色花岗岩脉)的统计结果表

明,这种成分间断可能并不存在,并且 SiO_2 和 K_2O 含量更低($w(\text{SiO}_2)=55.4\%$, $w(\text{K}_2\text{O})=1.20\%$, $\text{Mg}^{\#}=54$;表1)。加查59件(200±5)Ma样品(不包括规模极小的淡色花岗岩脉)^[31,39]的平均成分($w(\text{SiO}_2)=54.7\%$, $w(\text{K}_2\text{O})=1.09\%$, $\text{Mg}^{\#}=59$;表1)与(90±5)Ma非常类似,均为玄武安山质(辉长闪长质)。不同于北美Cordilleran大陆边缘弧的主体花岗岩基,接近于北美Cascades弧的平均成分^[11](图4e)(表1)。

2.2 中生代冈底斯弧的研究方向

显然,青藏高原南部的中生代冈底斯弧,与北美Cordilleran大陆边缘弧既有相似性,也有差异性,这就为检验和完善大陆边缘弧的岩浆成因和地壳演化机制与过程提供了难得机会。要实现这一科学目标,尚需进行以下3个方向的研究。

2.2.1 中生代冈底斯弧的岩浆成因:聚焦堆晶角闪石岩的成因

岩浆弧下角闪石堆晶岩的形成控制了弧岩浆的成分和含水下地壳的形成,这些下地壳堆晶岩可能由于高温原始熔体($>1110\text{ }^{\circ}\text{C}$)的加入而发生周期性的重熔,使得下地壳堆晶岩中的硫化物再循环进入上升的岩浆系统并最终有助于成矿^[40]。同时,地壳剖面中的英云闪长岩可由辉石角闪石岩和角闪石

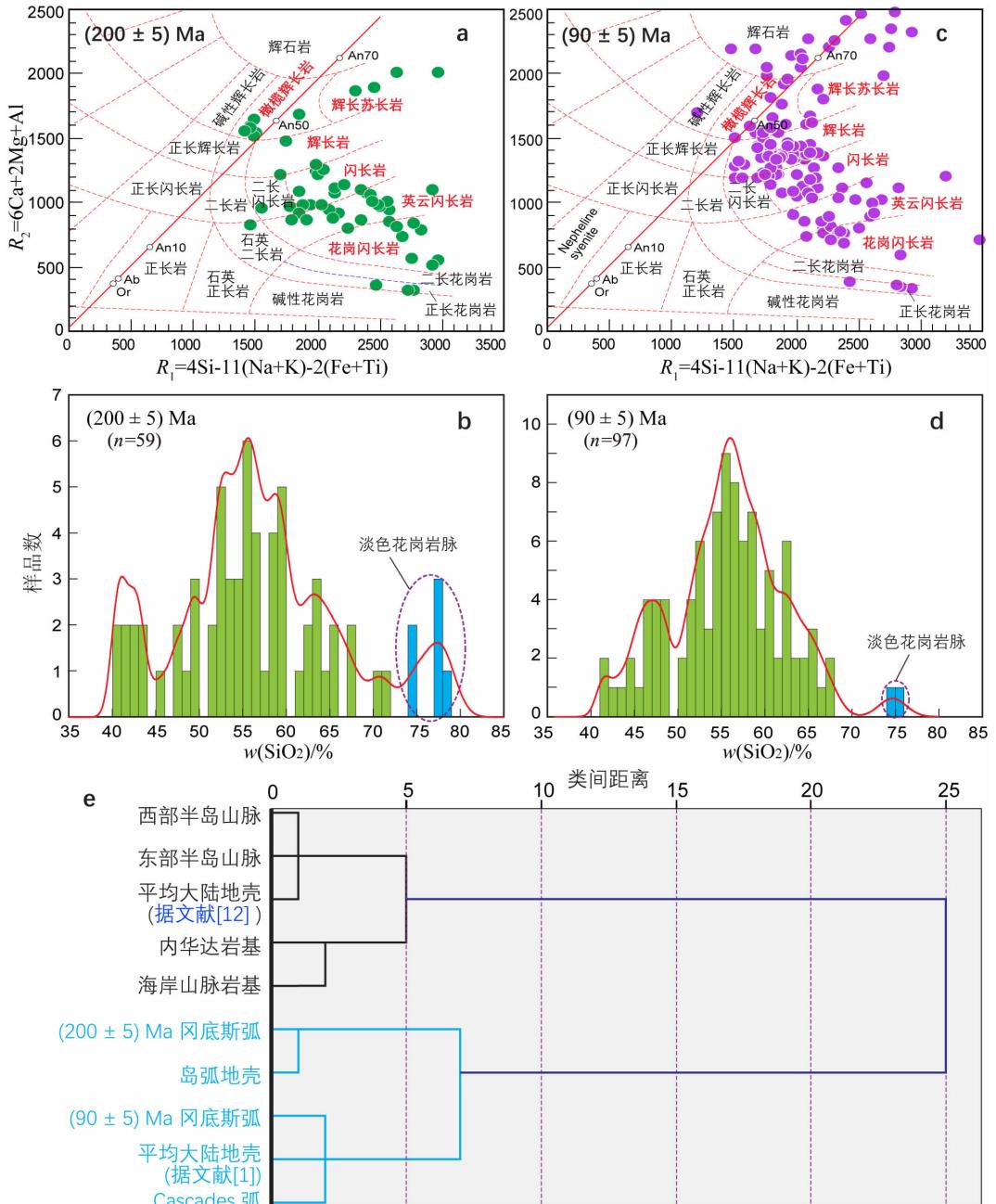


图4 青藏高原南部中生代冈底斯弧约 200 Ma 和约 90 Ma 岩浆成分
Fig.4 Magmatic composition of the Mesozoic Gangdese arc (ca. 200 Ma and ca. 90 Ma) in southern Tibet

岩为主的原始岩浆分异形成^[36],如约 10% 的角闪石堆晶即可使派生岩浆往富硅方向演化^[3]。因此,查明中生代冈底斯弧角闪石岩成因,不但对解释新生代大规模 Cu-Mo 成矿金属的来源,而且对理解冈底斯弧的壳幔物质循环、形成机制和演化过程,以及其他造山带角闪辉长岩(未见辉石,如北部拉萨地体、昆仑造山带)大量出现的原因,均具有重要科学意义。

地球上研究程度较高的岩浆弧剖面中,堆晶角闪石岩并不多见,仅出露于巴基斯坦西北部的 Kohistan 弧^[41] 和北美 Cascades 弧的北部^[36]。在 Kohistan 弧剖面中,堆晶辉石岩顶部、石榴子石辉长岩之下可见约 1~2 km 的角闪石岩和石榴子石岩层,石榴子石辉长岩中也发育规模可达几百米的角闪石岩透镜体^[3,41]。Cascades 弧北部的超基性堆晶岩由角闪石岩、辉石岩、橄榄二辉石组成,不同岩

性之间的接触关系复杂,很难像 Kohistan 弧那样估算不同岩性的规模^[42],但地球化学模拟表明堆晶角闪石岩占据主导地位^[36]。

角闪石岩有堆晶和交代两种成因^[36,40],鉴别两者的关键在于区分角闪石究竟是来源于富水母岩浆的堆晶作用^[3,36-37],还是形成于早期堆晶橄榄石^[22,43]或单斜辉石^[40]与熔体的反应。Kohistan 弧和北 Cascades 弧地壳剖面中出露的角闪石岩,均为富水岩浆发生角闪石堆晶作用的产物,具明显的堆晶结构^[3,36]。弧剖面的堆晶岩序列、实验岩石学和地球化学研究表明,分异形成堆晶角闪石岩的母岩浆,为经历了早期辉石岩堆晶作用的演化岩浆^[3,44],矿物分异序列为橄榄石→单斜辉石/斜方辉石→角闪石→斜长石^[36,41]。能否形成堆晶角闪石岩的关键因素为岩浆的水含量^[3,36],因为富水岩浆会促进角闪石的结晶,抑制斜长石的结晶^[44-45]。内华达岩基和海岸山脉岩基西侧温哥华岛剖面中的橄榄石角闪石岩,嵌晶结构和地球化学特征均表明,角闪石为早期堆晶橄榄石与熔体反应的产物^[22,43],反应中橄榄石并没有将完全被消耗,橄榄石角闪石岩中的橄榄石含量至少在 10% 以上^[43]。西太平洋所罗门群岛 Savo 岛火山岩中的角闪石岩,是早期形成的单斜辉石与残余熔体反应的结果^[40]。

冈底斯弧在(200±5) Ma 和(90±5) Ma 时期发育的大量角闪石岩,究竟是堆晶成因还是交代成因? 在中生代冈底斯弧迄今未发现大量堆晶石榴子石辉石岩究竟是由于先期结晶的单斜辉石与残余熔体反应消耗掉了,还是因为当时的岩浆很富水,或压カ较低不利于石榴子石辉石岩的形成? 抑或是由于研究程度较低,迄今仍未发现? 如果角闪石岩是堆晶成因,其原始岩浆的成分和性质如何? 经历了什么过程导致了派生岩浆向富硅方向的演化? 这些都是中生代冈底斯弧岩浆成因研究中值得关注的科学问题。

2.2.2 中生代冈底斯弧的垂向地壳成分剖面: 聚焦不同岩性的结晶深度

弧岩浆从产生到冷却结晶的温度和压力条件,可为揭示岩浆起源和侵位的深度范围、地壳厚度和地壳热状态等提供关键约束,构建岩浆弧不同时间断面的垂向地壳成分剖面,能够直观地揭示不同地壳层次侵入体的物理化学性质和地壳演化过程,成为岩浆弧研究的必然选择^[11,17,42,46-47]。

例如,在内华达岩基,通过矿物压力计限定花岗

岩类的结晶压力范围(0.1~0.6 GPa, 主要集中在0.3~0.5 GPa)^[48-49]和变英云闪长岩(0.8~1.1 GPa)、变辉长岩(0.4~0.8 GPa)^[49-50]、闪长质片麻岩的重结晶压力(约 1.1 GPa)^[49]以及英云闪长岩中岩浆成因绿帘石的出现(侵位压力>0.8 GPa)^[51],已经构建了 Cordilleran 弧地壳较为完整的地壳成分剖面^[11](图 2a),并普遍认为其主体成分是花岗岩类^[11,17,25]。类似地,在 Kohistan 弧野外填图基础上,通过矿物压力计限定石榴子石麻粒岩(1.5~2.1 GPa)^[52]、斜长角闪岩(约 1.1 GPa)^[53]、麻粒岩(0.6~1.6 GPa)^[54-55]的重结晶压力和辉长苏长岩(0.6~0.8 GPa)^[53]、辉长岩、闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩的结晶压力(0.2~1.0 GPa)^[47],建立起了非常完整的垂向地壳成分剖面^[47,56]。

冈底斯弧现今保存成分较为连续的(200±5) Ma 和(90±5) Ma 时期的岩浆记录(从超基性到酸性),为构建中生代冈底斯弧不同时间断面的垂向地壳成分剖面提供了天然的研究对象。然而与内华达岩基和 Kohistan 弧相比,冈底斯弧中生代时期的垂向地壳成分剖面尚未建立。例如,虽然目前在冈底斯弧已经报道了(200±5) Ma 岩浆活动,但对此时期垂向地壳成分结构的认识,还是空白。另外,对(90±5) Ma 时期的垂向地壳成分结构,虽然已有研究根据里龙岩基中变质辉长岩(95~82 Ma)经历的麻粒岩相变质作用(900~1 000 °C 和<1.0 GPa),提出其可能位于冈底斯弧下地壳;通过锆石成分和矿物成分限定的温压条件,认为由演化岩浆分离结晶形成的闪长岩和花岗闪长岩可能分别位于冈底斯弧的中部和上部地壳^[35,57]。但由于缺乏详细的岩石成因和岩浆过程分析,迄今仍不清楚(90±5) Ma 时期其他岩性(如纯橄岩、异剥橄榄岩、角闪石岩、苏长岩、角闪辉长岩、英云闪长岩等)在垂向地壳成分剖面中的位置。

2.2.3 中生代冈底斯弧的地壳演化: 聚焦玄武安山质的平均成分

与北美 Cordilleran 大陆边缘弧相比,中生代冈底斯弧的特殊性(发育大量角闪石岩、地壳平均成分为玄武安山质)和岩浆成分较为连续的两个时间断面((200±5) Ma 和(90±5) Ma)的岩浆记录,既为实现活动大陆边缘岩浆成因、大陆地壳形成机制和过程的理论创新提供了难得机会,也为中国科学家在大陆地壳形成演化研究领域、岩石学和地球化学学科方向的创新性研究提供了宝贵的研究对象。

目前已有数据显示,侵位于冈底斯弧早石炭世花岗片麻岩中的(200±5) Ma 和(90±5) Ma 岩浆记录,具有玄武安山质(辉长闪长质)的平均成分(表1)。这种成分不同于北美 Cordilleran 大陆边缘弧大型花岗岩基所具有的安山质到英安质平均成分,而以其更低的 SiO₂、高的 MgO 和 Mg[#] 接近于岛弧地壳和北美 Cascades 弧的平均成分(图4e)。众所周知,在印度-亚洲碰撞前,冈底斯弧位于亚洲大陆南缘,形成于新特提斯洋的北向俯冲^[10](图1),一直被认为是活动大陆边缘的典型代表^[29,58-61]。加查-朗县一带早石炭世((350±5) Ma)S型花岗片麻岩负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(−8 到 −1)和古元古代地壳模式年龄(1.8~1.6 Ga)^[62-64],表明至少在加查-朗县一带存在古老基底物质,支持亚洲大陆南缘是活动大陆边缘,而不是洋内弧的认识。Cascades 弧代表了一个通过地体增生拼贴到北美大陆边缘的新生代大陆弧,可能相当于西部半岛山脉岩基的喷出岩部分^[5],其低硅平均成分被认为是现代伸展型大陆弧的典型特征^[11]。与西部半岛山脉岩基类似,Cascades 弧不具有明显的石榴子石微量元素指标^[65],指示了一个相对低压和薄地壳的伸展背景^[5,11]。

已有研究根据冈底斯弧里龙岩基(95~82 Ma)可能存在的 58.0%~56.5% 分层间断,推论里龙岩基的母岩浆是安山质的,同时根据里龙岩基的平均成分接近安山质,支持大陆地壳生长的“安山岩模型”^[35]。但分析更多数据后发现,这个成分间断似乎并不明显(图4c 和 4d)。那么,冈底斯弧(200±5) Ma 和(90±5) Ma 时期玄武安山质(辉长闪长质)平均成分(表1),是简单的采样偏差? 还是类似于 Cascades 弧低压薄地壳形成背景的反映? 抑或是类似于内华达岩基和东部半岛山脉,也经历了拆沉作用? 或者是浅部层次的长英质岩石被剥蚀了,仅出露了中一下地壳岩石? 这些都是未来研究亟待解决的问题。

3 结束语

中生代时期,地球上两条规模宏大的、发育大规模中酸性岩浆岩的活动大陆边缘弧,聚焦研究程度较低并具有独特岩石组成和成分特征的欧亚大陆南缘特提斯大陆边缘弧(包括土耳其 Eastern Pontides、伊朗 Urumieh-Dokhtar、青藏高原冈底斯岩浆弧),通过与北美 Cordilleran 大陆边缘弧岩浆成因与大陆

地壳形成机制的对比研究,不但有望创新和完善活动大陆边缘弧系统的岩浆成因理论和大陆地壳形成与演化理论,而且还可为研究新生代时期冈底斯弧巨厚地壳的形成演化提供关键的初始条件。

研究青藏高原南部中生代冈底斯弧成因和地壳演化的难点之一在于,由于中生代变质记录匮乏,能否通过计算不同岩性的结晶深度(没有变质记录佐证)来建立中生代冈底斯弧的垂向地壳成分剖面,尚需尝试。难点之二在于,由于冈底斯弧海拔高,东部地区又被植被严重覆盖,已有工作主要集中在交通较为便利的公路或乡间小路周边,虽然目前样品的平均成分提供了中生代时期冈底斯弧成分的重要信息,但显然不能利用具有明显采样偏差的平均成分来代表中生代时期冈底斯弧的平均成分。难点之三在于,由于约 200 Ma 和约 90 Ma 岩浆岩只出露在冈底斯弧中东段(东经 89°E 以东)^[29]而中西段罕见,显然不能把冈底斯弧中东段中生代时期的地壳成分结构和岩浆成因解释应用到中西段。

然而,他山之石可以攻玉,通过与地球上研究程度较高的其他大陆边缘弧的深入对比研究,必将从中生代冈底斯弧角度,为揭示大陆边缘弧岩浆成因和安山质大陆地壳的形成机制和演化过程提供重要约束。

参考文献

- [1] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust[M]//Rudnick R L. Treatise on geochemistry. First Edition. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2003: 1-64.
- [2] HACKER B R, KELEMEN P B, BEHN M D. Differentiation of the continental crust by relamination[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 307: 501-516.
- [3] JAGOUTZ O E. Construction of the granitoid crust of an island arc. Part II: a quantitative petrogenetic model[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160: 359-381.
- [4] LEE C T A, CHENG X, HORODYSKYJ U. The development and refinement of continental arcs by primary basaltic magmatism, garnet pyroxenite accumulation, basaltic recharge and delamination: insights from the Sierra Nevada, California[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 151: 222-242.
- [5] LEE C T A, MORTON D M, KISTLER R W, et al. Petrology and tectonics of Phanerozoic continent formation: from island arcs to accretion and continental arc magmatism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 263: 370-387.

- [6] LEE C T A, ANDERSON D L. Continental crust formation at arcs, the arclogite “delamination” cycle, and one origin for fertile melting anomalies in the mantle[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60: 1141-1156.
- [7] KELEMEN P B, BEHN M D. Formation of lower continental crust by relamination of buoyant arc lavas and plutons [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 197-205.
- [8] TAYLOR S R, WHITE A J R. Geochemistry of andesites and the growth of continents[J]. *Nature*, 1965, 208: 271-273.
- [9] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 241-265.
- [10] SCOTESE C R. Plate tectonic maps and continental drift animations. (2002)[2018-11-03]. <http://www.scotese.com>.
- [11] DUCEA M N, SALEEBY J B, BERGANTZ G. The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 299-331.
- [12] KELEMEN P B, HANGHOJ K, GREENE A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[M] // HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on geochemistry. 2 nd. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014: 593-659.
- [13] KIRSCH M, PATERSON S R, WOBBE F, et al. Temporal histories of Cordilleran continental arcs: testing models for magmatic episodicity [J]. *American Mineralogist*, 2016, 101: 2133-2154.
- [14] WERNICKE B, CLAYTON R, DUCEA M N, et al. Origin of high mountains in the continents: the Southern Sierra Nevada[J]. *Science*, 1996, 271: 190-193.
- [15] FLIEDNER M M, KLEMPERER S L, CHRISTENSEN N I. Three-dimensional seismic model of the Sierra Nevada Arc, California, and its implications for crustal and upper mantle composition [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105: 10899-10921.
- [16] ZANDT G, GILBERT H, OWENS T J, et al. Active foundering of a continental arc root beneath the Southern Sierra Nevada in California[J]. *Nature*, 2004, 431: 41-46.
- [17] SALEEBY J B, DUCEA M N, CLEMENS-KNOTT D. Production and loss of high-density batholithic root, Southern Sierra Nevada, California[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1064.
- [18] COLEMAN D S, GRAY W, GLAZNER A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California[J]. *Geology*, 2004, 32: 433-436.
- [19] NADIN E S, SALEEBY J B. Disruption of regional primary structure of the Sierra Nevada batholith by the Kern Canyon fault system, California[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2008, 438: 429-454.
- [20] ANNEN C, BLUNDY J D, SPARKS R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 505-539.
- [21] HILDRETH W, MOORBATH S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98: 455-489.
- [22] SISSON T W, GROVE T L, COLEMAN S D. Hornblende gabbro sill complex at Onion Valley, California, and a mixing origin for the Sierra Nevada batholith[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 126: 81-108.
- [23] LEE C T A. Physics and chemistry of deep continental crust recycling[M] // HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on geochemistry. 2 nd. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014: 423-456.
- [24] DUCEA M N, SALEEBY J B. A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the Sierra Nevada, California[J]. *International Geology Review*, 1998, 40: 78-93.
- [25] DUCEA M N. The California arc: thick granitic batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups[J]. *GSA Today*, 2001, 11: 4-10.
- [26] CURRIE C A, DUCEA M N, DECELLES P G, et al. Geodynamic models of Cordilleran orogens: gravitational instability of magmatic arc roots[J]. *Geological Society of America Memoirs*, 2015, 212: 1-22.
- [27] MÜNTENER O, KELEMEN P B, GROVE T L. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites; an experimental study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141: 643-658.
- [28] HORODYSKYJ U N, LEE C T A, DUCEA M N. Similarities between Archean high MgO eclogites and Phanerozoic arc-eclogite cumulates and the role of arcs in Archean continent formation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256: 510-520.
- [29] ZHU D C, WANG Q, CHUNG S L, et al. Gangdese magmatism in Southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma[M] // TRELOAR P J, SEARLE M P. Himalayan tectonics: a Modern Synthesis. London: Geological Society, Special Publications, 2018: 483. <https://doi.org/10.1144/SP483.14>.
- [30] JI W Q, WU F Y, CHUNG S L, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2009, 262: 229-245.
- [31] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The Lhasa Terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301: 241-255.
- [32] ZHU D C, WANG Q, ZHAO Z D, et al. Magmatic record

- of India-Asia collision [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14289.
- [33] ZHU D C, WANG Q, CAWOOD P A, et al. Raising the Gangdese Mountains in Southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122: 214-223.
- [34] MA L, WANG Q, LI Z X, et al. Early Late Cretaceous (ca. 93 Ma) norites and hornblendites in the Milin Area, Eastern Gangdese: lithosphere-asthenosphere interaction during slab roll-back and an insight into Early Late Cretaceous (ca. 100 – 80 Ma) magmatic “flare-up” in southern Lhasa (Tibet)[J]. *Lithos*, 2013, 172-173: 17-30.
- [35] ZHANG Z M, DONG X, XIANG H, et al. Metagabbros of the Gangdese arc root, South Tibet: implications for the growth of continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 268-284.
- [36] DESSIMOZ M, MÜNTENER O, ULMER P. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: the Chelan Complex (Washington Cascades)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 163: 567-589.
- [37] DEBARI S M, COLEMAN R G. Examination of the deep levels of an island arc: evidence from the Tonsina Ultramafic-Mafic Assemblage, Tonsina[J]. *Alaska. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94: 4373-4391.
- [38] DEBARI S M, SLEEP N H. High-Mg, low-Al bulk composition of the Talkeetna island arc, Alaska: implications for primary magmas and the nature of arc crust[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103: 37-47.
- [39] 董昕, 张泽明. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因和构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 1933-1948.
- [40] SMITH D J. Clinopyroxene precursors to amphibole sponge in arc crust[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4329-4329.
- [41] BURG J P, ARBARET L, CHAUDHRY N M, et al. Shear strain localization from the upper mantle to the middle crust of the Kohistan Arc (Pakistan)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2005, 245: 25-38.
- [42] MILLER R B, PATERSON S R, MATZEL J P. Plutonism at different crustal levels: insights from the ~5 – 40 km (paleodepth) North Cascades crustal section, Washington [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2009, 456: 125-149.
- [43] LAROCQUE J, CANIL D. The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: the case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 159: 475-492.
- [44] SISSON T W, GROVE T L. Temperatures and H₂O contents of low-MgO high-alumina basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 113: 167-184.
- [45] ALONSO-PEREZ R, MÜNTENER O, ULMER P. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: experimental constraints on andesitic liquids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 157: 541-558.
- [46] GREENE A R, DEBARI S M, KELEMEN P B, et al. A detailed geochemical study of island arc crust: the Talkeetna Arc section, South-Central Alaska[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 1051-1093.
- [47] JAGOUTZ O E, SCHMIDT M W, ENGGIST A, et al. TTG-type plutonic rocks formed in a modern arc batholith by hydrous fractionation in the lower arc crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 166: 1099-1118.
- [48] AGUE J J, BRIMHALL G H. Magmatic arc asymmetry and distribution of anomalous plutonic belts in the batholiths of California: effects of assimilation, crustal thickness, and depth of crystallization[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100: 912-927.
- [49] CHAPMAN A D, SALEEBY J B, WOOD D J, et al. Late Cretaceous gravitational collapse of the Southern Sierra Nevada batholith, California[J]. *Geosphere*, 2012, 8: 314-341.
- [50] PICKETT D A, SALEEBY J B. Thermobarometric constraints on the depth of exposure and conditions of plutonism and metamorphism at deep levels of the Sierra Nevada Batholith, Tehachapi Mountains, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98: 609-629.
- [51] NANNEY M T. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283: 993-1033.
- [52] RINGUETTE L, MARTIGNOLE J, WINDLEY B F. Magmatic crystallization, isobaric cooling, and decompression of the garnet-bearing assemblages of the Jijal sequence (Kohistan terrane, Western Himalayas)[J]. *Geology*, 1999, 27: 139-142.
- [53] YOSHINO T, OKUDAIRA T. Crustal growth by magmatic accretion constrained by metamorphic P-T paths and thermal models of the Kohistan arc, NW Himalayas[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45: 2287-2302.
- [54] YAMAMOTO H. Contrasting metamorphic *p-T*-time paths of the Kohistan granulites and tectonics of the western Himalayas[J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150: 843-856.
- [55] YAMAMOTO H, YOSHINO T. Superposition of replacements in the mafic granulites of the Jijal complex of the Kohistan arc, Northern Pakistan: dehydration and rehydration within deep arc crust[J]. *Lithos*, 1998, 43: 219-234.
- [56] JAGOUTZ O E, KELEMEN P B. Role of arc processes in the formation of continental crust[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 363-404.
- [57] WEN D R, CHUNG S L, SONG B, et al. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*,

- 2008, 105: 1-11.
- [58] ALLEGRE C J, COURTILLOT V, TAPPONNIER P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 1984, 307: 17-22.
- [59] COULON C, MALUSKI H, BOLLINGER C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and Southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79: 281-302.
- [60] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.
- [61] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The origin and Pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1429-1454.
- [62] JI W Q, WU F Y, CHUNG S L, et al. Identification of Early Carboniferous granitoids from Southern Tibet and implications for terrane assembly related to the Paleo-Tethyan evolution[J]. *The Journal of Geology*, 2012, 120: 531-541.
- [63] 吴兴源, 王青, 朱弟成, 等. 拉萨地体南缘早石炭世花岗岩类的起源及其对松多特提斯洋开启的意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3716-3730.
- [64] DONG X, ZHANG Z, LIU F, et al. Late Paleozoic intrusive rocks from the Southeastern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau, and their Late Mesozoic metamorphism and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2014, 198: 249-262.
- [65] LEEMAN W P, LEWIS J F, EVARTS R C, et al. Petrologic constraints on the thermal structure of the Cascades Arc[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 140: 67-105.