

青藏高原地质研究的回顾与展望

莫宣学

(地质过程与成矿国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 青藏高原是世界上最高最大最年青的高原, 被国际地学界公认为世界上研究大陆动力学最理想的天然实验室。特提斯的形成演化及高原的隆起是青藏高原地学研究的两大主题, 包含了众多引人入胜的重要科学问题。笔者对其中 8 个科学问题进行了回顾与展望, 它们是: 青藏高原的前身——特提斯的形成演化; 印度-亚洲大陆碰撞; 青藏高原壳幔结构与物质组成; 青藏巨厚地壳的成因; 青藏高原深部物质的横向流动; 地幔柱; 高原隆升与生长; 成矿作用。

关键词: 青藏高原; 特提斯; 碰撞; 隆升; 地质学研究; 回顾展望

中图分类号: P53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-0841-13

青藏高原是世界上最高最大最年青的高原, 号称世界的“第三极”, 被公认为世界上研究大陆动力学最好的天然实验室, 一直受到国际地学界的密切关注和青睐。从 19 世纪中叶 Strachey(1851)^[1]首次地质旅行和 20 世纪 30 年代 Heim & Gansser (1939)^[2]在高原南部较详细的地质考察至今近两个世纪中, 对青藏高原的研究热情从未减少过。青藏高原的崇山峻岭与湖泊河流中保存着数十亿年来的丰富地质记录, 包含着许多具有重大意义的地球科学问题。笔者拟从中选取自己稍微熟悉一点的 8 个科学问题进行简要的回顾与展望, 希望对今后研究工作有所裨益。

1 青藏高原的前身——特提斯的形成演化

特提斯 (Tethys) 最早由奥地利地质学家休斯 (Suess, 1893)^[3]提出, 定义为 250~65 Ma 期间横贯欧亚的宽阔海洋, 它自苏门答腊、帝汶经河内、云南、喜马拉雅、帕米尔、兴都库什, 直到小亚细亚, 通向欧

洲。后来, 随着研究的进展, “特提斯”概念的内涵, 有了很大的拓宽和变化。不同的学者提出了不同的名词系统。如 Sengor(1984^[4], 1989^[5])的“古特提斯”、“新特提斯”; 黄汲清与陈炳蔚(1987)^[6]的“古生代特提斯”、“中生代特提斯”、“新生代特提斯”。此外, 还提出了“经典特提斯”、“原特提斯”等概念。

特提斯洋是青藏高原的前身, 特提斯的形成演化与高原隆起是青藏高原研究的两个主题。特提斯洋闭合所形成的特提斯造山系是横贯欧亚大陆南部的陆间山系, 它与环太平洋造山系(陆缘山系)是当今世界上两大巨型造山系。特提斯巨型成矿带是全球最大的金属成矿带之一。特提斯对全球石油及天然气资源也有举足轻重的影响。因此, 以特提斯为主题的重大国际合作研究项目以及在特提斯域进行的重大勘查项目, 一直没有中断过。

中国西南是东特提斯记录比较完全的地区。特提斯构造域在中国主要包括青藏高原及其邻区(特别是金沙江-澜沧江-怒江流域, 即“三江”地区), 以及贵州、广西、甘肃、陕西的小部分地区。西南“三

收稿日期: 2010-07-20; 改回日期: 2010-08-15

基金项目: 国家基础研究计划项目(2009CB421002, 2002CB412600), 国家自然科学基金重点项目(40830317)与面上项目(40873023, 40672044, 40503005, 40572048, 40473020), 中国地质调查局重大项目(1212010610104), 国家 111 计划项目(B07011), 国土资源部青藏专项计划(200101020401)资助。

作者简介: 莫宣学, 男, 1938 年生, 教授, 中国科学院院士, 岩石学专业, 长期从事岩浆-构造-成矿研究及教学工作;

E-mail: moxx@cugb.edu.cn; moxx38@yahoo.com.

江”地区是中国古特提斯记录最完整的地区,西藏是新特提斯记录最完整的地区。

经过多年对特提斯的研究,中国学者在许多问题上取得了共识^[7-9]。原特提斯洋大致发育在新元古代—早古生代时期,遗迹保存程度相对较差,研究程度也相对较低。古特提斯洋自晚泥盆世—早石炭世开始打开,形成3个主要洋盆(修沟—玛沁洋、金沙江—哀牢山洋、澜沧江—昌宁孟连洋),及稍晚形成的较小洋盆(甘孜—理塘洋),至早二叠世扩张到最大规模后开始俯冲消减,逐渐缩小,至晚三叠世末—早侏罗世初洋盆闭合,使冈瓦纳古陆的前缘与劳亚古陆的前缘发生碰撞。形成了4条蛇绿混杂岩带(接合带)夹持着若干岩浆弧+微陆块的空间格局。在这些接合带中,龙木错—双湖—昌宁孟连带及修沟—玛沁带两条对接带,代表两个基本对等的陆块(构造域)最后拼合的界线。新特提斯洋大致在晚三叠世或更早的时间打开,同时形成班公湖—怒江洋(北支)及雅鲁藏布洋(南支),大致于早—中侏罗世之交扩张到最大规模,然后开始消减、缩小。北支班公湖—怒江洋大致在早白垩世末(100 Ma左右)完全闭合,完成了拉萨地块与羌塘地块的碰撞拼合。南支雅鲁藏布洋闭合较晚,在白垩纪/古近纪之交(65/70 Ma左右)印度大陆开始与拉萨地块(即欧亚大陆南缘)碰撞,经过约20 Ma(即到40/45 Ma)完成了同碰撞过程,新特提斯洋全部消失,从而奠定了产生青藏高原的基础^[9]。

特提斯问题之所以一百多年来一直成为国际地质研究的中心问题之一,因为它不但对于阐明全球动力学,而且对于资源与环境的研究,有极其重要的意义。然而,对特提斯的性质、规模、演化模式、界线等重大科学问题,一直存在着不同的见解,远未达成一致。

蛇绿岩是大陆上保存着的洋壳残迹。在青藏高原中的地质调查中已发现有近20条不同时代、不同规模的蛇绿(混杂)岩带,为研究特提斯的演化提供了宝贵的材料,但目前的研究程度还很不够。特别需要指出的是,在蛇绿岩研究中存在着一些误解。例如,认为一条蛇绿岩带(如雅鲁藏布蛇绿岩带、班公湖—怒江蛇绿岩带)的形成与定位时间、构造环境在整条带都是一样的,认为青藏高原内所有蛇绿岩带都代表同样级别、规模的洋盆(或都是大洋,或都是小洋盆),没有看到蛇绿岩的复杂性;又如,脱离区域

地质背景,仅根据蛇绿岩中某些岩石的岩性与某些元素地球化学特点来划分蛇绿岩的类型(SSZ型或MOR型),然后据此简单化地推断洋盆的规模与构造环境。这些认识对蛇绿岩和特提斯的研究是有害的。

2 印度—亚洲大陆碰撞

印度—亚洲大陆碰撞是形成青藏高原的直接动力。确定印度—亚洲大陆碰撞的时限是青藏高原形成演化研究中最基础的地质科学问题之一。当前,国际上对此还存在着激烈的争论,分歧甚大(从>70 Ma到~34 Ma的认识都有)。例如,Yin & Harrison(2000)^[10]认为碰撞开始于70 Ma左右;Jaeger et al.(1989)^[11]认为起始于~66 Ma;Burtman(1994)^[12]、Liu & Einsele(1994)^[13]认为开始于晚白垩世—古新世;Leech et al.(2005)^[14]根据所测得的喜马拉雅西部榴辉岩时代认为碰撞开始于58 Ma;Garzanti et al.(1987)^[15]认为开始于古新世/渐新世(E₁/E₂)之交(56 Ma左右);Searle et al.(1987)^[16]也认为碰撞开始于始新世;Dewey et al.(1989)^[17]、Rowley(1998)^[18]认为碰撞开始于中始新世(40 Ma左右);Aitchison et al.(2007)^[19]认为碰撞起始于早渐新世(~34 Ma)。Chung et al.(2005)^[20]认为在~60 Ma印度—亚洲发生软碰撞,到~40 Ma发生硬碰撞。需要指出的是,中国西藏南部冈底斯带和喜马拉雅带,是印度—亚洲大陆的主碰撞带,延伸达1500 km以上。然而,国际文献中对这一重要地区有关碰撞的研究却很不足。

中国地质学家们注意到横亘于西藏南部的一条1200 km长的区域性巨大角度不整合带^[21-22]。不整合面上、下岩层无论在岩性、岩相、化石面貌还是变形样式与变形程度上,均发生了突变。不整合面之下出露的地层有二叠系与上白垩统,均为海相沉积,强烈褶皱;不整合面以上的地层为陆相,产状近水平,主要是厚达数千米的林子宗火山岩系(图1)。用林子宗火山岩底部的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄限定了该区域性不整合的最晚时限,在林周盆地典型剖面为64.5 Ma,沿不整合带走向变化于59~70 Ma。这表明,在59~70 Ma期间发生了一次重大的地质事件。Wan et al.(2002)^[23]通过对西藏岗巴、仲巴、吉隆等地白垩纪与古近纪界限(俗称K-T界限)附近详细的地层、古生物及构造研究,指出K-T界限是一个大的不整合,古近系陆相砾岩及砂岩层不整合于上白垩统浅



图 1 横亘西藏南部的区域性巨大角度不整合,不整合面之下为强烈褶皱的海相上白垩统设兴组,之上为近水平的古近纪陆相林子宗火山岩系(地点:拉萨以北马区)

Fig.1 A huge regional unconformity lying across southern Tibet, showing that the strongly folded submarine upper Cretaceous Shexing Formation is unconformably overlain by the sub-horizontal terrestrial Paleogene Linzizong volcanics (photo taken at Maqu, north of Lhasa)

海台地相碳酸盐岩之上,穿过 K-T 界限时,沉积相及微古生物群发生了重大改变。Ding et al.(2005)^[24]发现了约 65 Ma 的藏南前陆盆地及蛇绿岩仰冲等碰撞证据。对沿藏南冈底斯带走向延伸超过 1200 km 的林子宗火山岩系(年龄 70/65 Ma~40 Ma)和南冈底斯花岗岩(年龄峰值为 50 Ma)的详细研究表明,二者均属于同碰撞性质。特别林子宗火山岩系是印度-亚洲大陆碰撞全过程(同碰撞期)的记录。在 45/40 Ma 后,青藏高原开始出现具有明显后碰撞性质的钾质-超钾质火山岩类,说明同碰撞性质的林子宗火山岩在 45~40 Ma 已被后碰撞钾质-超钾质火山岩所取代。李国彪(2004)^[25]厘定藏南最高海相层在晚始新世 Bartonian 早期(约 40 Ma),可以认为是新特提斯洋完全闭合的最晚时限。根据以上证据我们提出,在藏南主碰撞带内,印度-亚洲大陆碰撞

开始的时间为 70~65 Ma,完成的时间在 40 Ma 左右,这个时期称为同碰撞期,40 Ma 之后转入后碰撞期^[21-22,26-28]。中国学者依据对西藏南部印度-亚洲主碰撞带内各种证据研究所获得的这个认识,与 Yin & Harrison (2000)^[10],Jaeger et al.(1989)^[11],Burtman (1994)^[12],Liu & Einsele(1994)^[13],Leech et al. (2005)^[14], Chung et al.(2005)^[20] 等相近,而与 Aitchison et al. (2007)^[19]则相差甚大。

关于印度-欧亚大陆碰撞时限的分歧,在很大程度上可能是由于不同作者的事实依据及所论的地点不同,或是对这些证据所代表的含义的认识不同。要解决这个问题,需要积累多学科、多方面、多角度的证据,而不是单一的证据,需要对整个碰撞带完整的,而不是零星的、支离破碎的证据,需要对全部证据的科学分析。

以印度-亚洲碰撞时间为坐标,可以将青藏高原中-新生代构造-岩浆活动划分为3个阶段^[29]:(1)碰撞前新特提斯洋板块俯冲阶段(~70/65 Ma 以前);(2)同碰撞阶段(70/65~40 Ma):指印度和亚洲两个大陆从开始接触到完全接触(两大陆之间的洋盆和洋壳消失)的时间;(3)后碰撞阶段(~40 Ma 至今):指同碰撞期之后的陆内运动阶段,在印度-亚洲两个大陆继续挤压下,陆内不同块体之间发生相对运动(俯冲、推覆、走滑、伸展等)。笔者所用的同碰撞与后碰撞概念同 Liegeois(1998)^[30]。

3 青藏高原壳幔结构与物质组成

对青藏高原现今壳幔结构与组成的探测、研究是揭示青藏高原形成演化的基础,而探测研究地球深部结构及物质组成的有效途径,是地球物理探测与岩石学-地球化学方法(即“岩石探针”方法)的结合。通过中国科学家及中外科学家合作研究,已经完成了青藏高原许多地区的地震、大地电磁、航磁、重力等地球物理探测与研究,勾画出了青藏高原现今壳幔深部结构的基本轮廓。通过多年来“岩石探针”的研究,从各种岩浆岩及其所携带的壳幔深源岩石包体及深源岩石的地表露头中,获得了日益增多的关于青藏壳幔物质组成和演化的信息。

对青藏高原后碰撞幔源岩浆的研究揭示出,高原岩石圈地幔至少存在3种地球化学端元^[26,31]:(1)新特提斯大洋岩石圈端元,以雅鲁藏布蛇绿岩及其中的MORB为代表,与现今印度洋地幔域相似^[32];(2)印度陆下岩石圈端元;(3)新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元。它们之间的同位素组成及地球化学特征有着明显的差别。这3种地球化学端元以不同比例存在于高原的不同地域,并发生着相互作用,青藏高原岩石圈具有明显的不均一性。

根据大量地质及地球物理资料,可以识别出青藏高原现今存在3种岩石圈结构类型^[33-35]:第一种,增厚的岩石圈,以帕米尔构造结的岩石圈为代表,可达300 km以上,显示巨厚的岩石圈根^[36-37],东构造结的岩石圈也与此相似,但厚度略小。第二种,减薄的岩石圈,以冈底斯-念青唐古拉的岩石圈为代表,厚度只有120 km左右^[38-39],其中70~80 km为地壳,该地区只有浅源地震,岩石圈Q值低,存在高电导体^[40],清楚地表明了软流圈的上隆。第三种,加厚-减薄-再加厚的岩石圈,以羌塘岩石圈为代表,大地电

磁测深资料表明其岩石圈厚度约200 km,但同样只有浅源地震,电导率、地表热流值也比较高,而Q值较低^[40-41]。这种情况很象由于软流圈上隆而减薄了的岩石圈后来再因软流圈的下降而增厚,厚度虽然增加了,但热状态尚未来得及调整。这三类岩石圈的发展顺序似乎是,从第一种岩石圈发展到第二种岩石圈,再发展到第三种岩石圈,但这一顺序还需更多的证据来证实。

迄今为止,在青藏高原已经发现的出露于地表的地球深部岩石及火成岩所携带的深源岩石包体有,在西昆仑碱玄岩中的尖晶石二辉橄榄岩包体^[42],在甘肃礼县钾霞橄黄长岩中的石榴石二辉橄榄岩与石榴石二辉岩包体^[43],在西藏冈底斯带中南段超钾质火山岩中的含金云母的尖晶石二辉橄榄岩与二辉岩包体^[44],在羌塘后碰撞火山岩中所含的幔源岩石捕虏体^[45],在云南马关附近发现的尖晶石二辉橄榄岩包体^[46-47],在西藏羌塘地区钾玄质火山岩中发现的下地壳麻粒岩包体^[48]。此外,还在西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿体中发现来自上/下地幔过渡带的标志矿物^[49],在冈底斯带东段发现晚二叠世松多榴辉岩^[50-51]。在喜马拉雅西段多处也发现榴辉岩等超高压岩石^[14]。在东构造结,还发现了下地壳麻粒岩出露^[52]。这些深源岩石,为研究青藏高原的下地壳和上地幔组成提供了直接的“标本”,是极为宝贵的。但是,与中国东部相比,其发现的数量还比较少,研究的深度也有待于提高。而且,正是由于样品的稀缺,更要求在研究方法和手段上有所创新。

总体来说,尽管对青藏高原的壳幔深部结构与组成的研究已有很多进展,但是还有大量的问题没有弄清楚。诸如,高原各部分的岩石圈厚度分布;高原各部分壳幔的综合柱状剖面(结构与物质组成等);高原壳、幔的热状态;高原壳、幔内的流体类型、分布与交代作用;青藏岩石圈地幔随时间的变化及引起变化的原因,高原岩石圈有没有发生过大规模的加厚/减薄,等等。

此外,为了更深刻地了解青藏高原壳幔深部结构与组成,还应大力加强实验岩石学与实验矿物学的研究。青藏高原有很多很有意义的岩石类型,能够为发展中国的实验岩石学和实验矿物学做出重要贡献。

4 青藏巨厚地壳的成因

双倍于正常厚度的巨厚地壳,是青藏高原最显

著的特点之一。青藏高原巨厚地壳的成因是大陆动力学研究十分重要的科学问题。已有地震学资料表明^[53-55],西藏南部的地壳厚度平均为 70 km 左右,在拉萨地体最大可达 80 km。在西藏南部的厚地壳中还发现了 1 层约 20 km 厚的低速带($V_s=3\sim 3.1$ km/s)和 1 层 14~20 km 厚的高速下地壳($V_p=7.2\sim 7.5$ km/s)^[53]。沿东-西方向地壳厚度变化于 60~80 km。

根据冈底斯花岗岩的 Nd-Sr 同位素和锆石 Hf 同位素组成,可以识别出拉萨地体存在两类地壳^[29,59]:(1) 初生地壳(juvenile crust),主要分布在冈底斯带的南带和北带。这里的花岗岩具有正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(+1.64~+5.21)和正的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+6.3~+14.7),Nd 与 Hf 同位素模式年龄年青($T_{DM}<500$ Ma; $T_{DM}=137\sim 555$ Ma, $T_{DMC}=178\sim 718$ Ma),说明地幔物质在花岗岩成因中有重要的贡献。(2) 经过多次再循环形成的成熟的古元古代—中元古代地壳,主要分布在冈底斯中带。这里的花岗岩类以负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-5.3~-17.3)为特征,Nd 模式年龄 T_{DM} 有两组值:1.2 Ga 及 2.0~2.5 Ga,表明这里具有古元古代—中元古代基底,在花岗岩成因中,地壳组分具有主要贡献。总之,再循环的古元古代—中元古代地壳,大致分布在冈底斯带的中部,可能代表拉萨地块的基底;而初生地壳则主要分布在冈底斯带南、北两侧,可能是由于俯冲和碰撞而增生在原拉萨地块之上的。

地壳加厚的机制是国际上争论的重大问题。过去多数模型都认为,构造作用对地壳加厚起主导作用,例如,双层地壳叠置模型^[57-58];碰撞挤压缩短增厚模型^[59-61]等。然而,一系列证据证明,地幔物质对青藏高原地壳增厚的贡献也是非常重要,不能忽视的^[62]。在同碰撞时期发生了大规模的幔源基性岩浆的底侵作用及其与壳源酸性岩浆的混合作用,地幔物质可能以这样的方式进入地壳,造成下地壳的加厚及其成分趋基性化、中-上地壳的熔融、幔源组分进入中-上地壳。已经认识到,青藏巨厚地壳是由于构造增厚及地幔物质注入(通过岩浆作用)增厚两种机制形成的。估算得到这两种机制对地壳增厚的贡献率大致为 4:3。根据多种因素限定,碰撞以来藏南地壳加厚应主要发生在 50~25 Ma^[62]。

然而,以上主要是对印度-亚洲主碰撞带地壳成因的认识,“两类地壳,两种机制”的认识是否符合高原其他部分的实际情况,还有待于对青藏高原更广大范围内地壳(厚度与性质)的分布情况的调查

和研究。对于高原地壳增厚的主要时间和演化阶段,可能还有不同认识,也需要进一步研究。

5 青藏高原深部物质的横向流动

研究表明,青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成活动具有明显而有规律的时空迁移^[20,26,63](图 2)。同碰撞的林子宗火山活动在 70~65 Ma 始于冈底斯南部,标志印度-亚洲大陆碰撞的开始;于 45~40 Ma 火山活动向北迁移到羌塘—“三江”北段,在那里开始了后碰撞火山活动;然后自内向外迁移,即,北向可可西里,南向冈底斯(在冈底斯带内部又自西向东),东向西秦岭迁移;最后(6 Ma 以来),再分别向高原的西北角(西昆仑)、东北角(礼县、玉门)、东南角(腾冲、三江东南部)方向迁移。这些事实,是否暗示着青藏高原深部的横向物质流动?如果是,那么涉及到哪些圈层,是下地壳、或中上地壳的物质流动,还是也涉及到上地幔(软流圈)?流动方式是“隧道流”还是大面积的“片流”?这种物质流动影响的范围有多大,是只限于青藏高原内部,还是流向了相邻的中国东部?都是值得深入思考的问题。

众所周知,青藏高原是被围限在塔里木、鄂尔多斯、扬子及印度几个克拉通块体之间的。面对印度地块对青藏高原自南向北的挤压和北部稳定地块的阻挡(挤压),青藏高原壳幔各圈层必定要作出调整。这种调整可能发生在两个方向上:垂向的增厚,及横向(水平方向)的运动。大量深部地球物理及 GPS 资料也提供了青藏高原深部不同层次物质流动的证据与约束。已经提出了许多模型,例如强调地壳缩短-增厚的粘性薄板模型^[55,60,64]、沿巨大走滑断裂的岩石圈“逃逸”模型^[65-66]、下地壳流动模型^[67-69]、地幔“挤出”模型^[35,70-72]、“多元驱动力”模型^[73],来探讨青藏高原深部物质流动这样一个重要而引人入胜的科学问题。然而,要真正解决这一科学难题,还有大量研究工作要做。

对青藏高原深部物质的横向流动的研究,还涉及中国东、西两个性质不同的火成岩省之间的关系,进而涉及以新生代印度-亚洲碰撞为主导的中国西部与以太平洋板块俯冲为主导的中国东部的构造交接关系,涉及南海打开的动力学机制等许多重要的科学问题。正如张国伟(2006)指出的:“中生代中国大陆东、西部地质、构造的差异演化及其效应与深部动力学过程,不但是中国、东亚,而且也是中新生

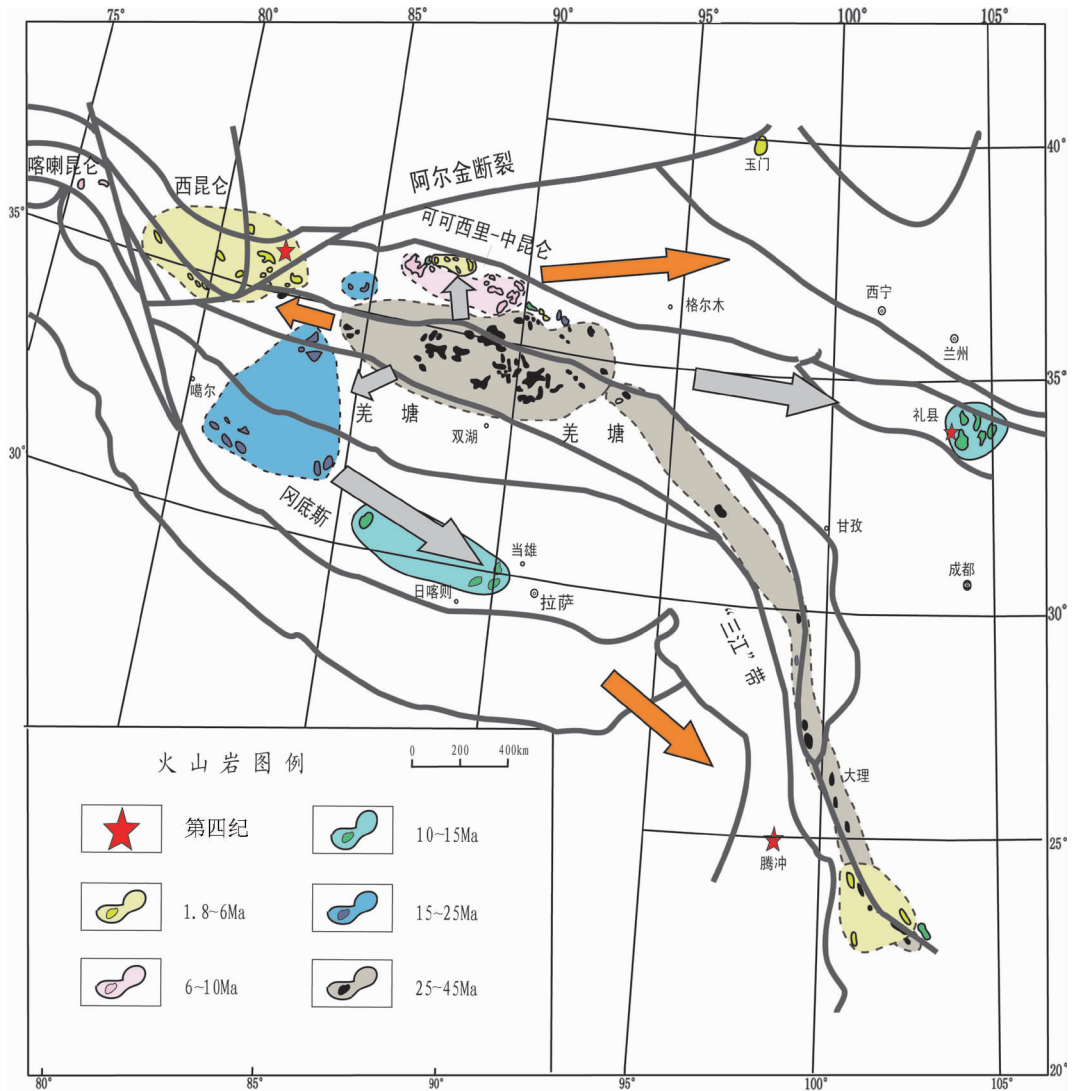


图2 青藏高原新生代火山岩的时空迁移^[29]

(灰色箭头表示第二阶段(25~6 Ma)后碰撞火山活动随时间的迁移趋势;橙红色箭头表示第三阶段(6 Ma~近代)后碰撞火山活动的迁移趋势)

Fig.2 Sketch map showing migration paths of the Cenozoic volcanism with time in the Qinghai-Tibet Plateau^[29]

代全球发生的重大事件,具有全球重要科学意义。”(2006年南京全国岩石学与地球动力学研讨会特邀报告)。如果在青藏高原钾质岩省向东部玄武岩省的过渡带,选择横穿两个岩省的剖面,进行系统的野外地质、以及不同类型岩浆岩的岩石学、矿物学、元素与同位素地球化学和岩石成因的系统研究,鉴别岩石的源区组成和形成深度,反演岩石圈和软流圈地幔的性质,揭示两个岩省之间的关系,就可以为鉴别大陆碰撞引起的岩石圈或软流圈层次物质流动与块体之间的相互作用提供岩浆作用约束,同时也可以加深对中国东部与西部、濒太平洋域与特提斯域

在大地构造与深部过程方面的相互关系的认识。

6 地幔柱

地幔柱是地球核/幔相互作用的产物,是地球内部运动的重要形式。地球内部运动从整体上控制着地球的演化,自然也控制着浅部圈层的运动和演化。对地幔柱的深入研究,将会使我们从更深层次上认识大陆聚散、特提斯开合、青藏高原形成的根本动力。

峨眉山溢流玄武岩是中国西南在二叠纪—三叠纪喷发形成的一个大火成省,靠近青藏高原。根据岩相学、主量和微量元素、Sr-Nd同位素资料,徐义刚

等(Xu et al., 2001)^[74]将峨眉山玄武岩划分为两个主要的岩浆类型:低钛型(LT)和高钛型(HT)。在可以对比的 $Mg^\#$ 值下,后者以其高钛含量(~3%)与前者相区别。关于玄武岩的成因,他们认为,LT 与 HT 熔岩的化学成分的变化不能用同一母岩浆的分离结晶作用来解释,而可能是起源于不同的地幔源区和不同的熔融条件,以后又受到明显的分异和混染作用。通过 REE 反演计算表明,HT 岩浆可能起源于石榴石稳定区地幔源区的低程度部分熔融(~1.5%);然后又在浅部遭受了辉石与长石的分离结晶作用,造成了化学成分很大的变异。相反,LT 原生岩浆则起源于尖晶石-石榴石过渡带地幔源区的较高级度的部分熔融(16%),其成分演化受控于橄榄石+单斜辉石的分离结晶作用。他们认为,峨眉山玄武岩可能是初始的地幔柱的产物,后来被上地壳和岩石圈地幔的混染所复杂化。资料表明,峨眉山玄武岩省内部存在着地球化学的时空变异。LT 主要分布在岩省的西部,厚度大,可能是溢流玄武岩喷发的主幕。而体积较小的 HT 则可能代表地幔柱活动的衰落期。实际上,HT 玄武岩是岩区边部的主要岩石类型。此种幔源岩浆起源较深,熔融程度较低,可能是较厚的岩石圈和较低的地温梯度的产物。

关于西藏境内与地幔柱有关的岩浆作用,过去未见前人报道。朱弟成等^[75-76]注意到,特提斯喜马拉雅带东部一部分白垩纪火成岩分布在浪卡子—拉康村—错那—隆子—琼结一带的椭圆形区域,现今覆盖面积约 40 000 km²。可靠的锆石 U-Pb 年代学数据表明,岩浆活动时间集中在 130~134 Ma,加权平均年龄为 (131.5±0.8) Ma。考虑到印度-欧亚碰撞过程中发生过明显的缩短以及遭受了强烈的深位侵蚀,这些白垩纪火成岩的原始侵位面积应该更大,很可能超过严格意义上的大火成岩省的最小面积 (100 000 km²)^[77]。Zhu et al.(2009)^[76]将其命名为藏南早白垩世措美大火成岩省。在澳大利亚西南部出露的 Bunbury 玄武岩,也侵位于大约 132 Ma^[78-79]。考虑到这些 132 Ma 左右岩浆活动的地理分布,Zhu et al.(2009)^[76] 将它们联系起来作为一个统一的 Comei-Bunbury 大火成岩省。措美大火成岩省中的镁铁质岩显示 OIB、N-MORB 及介于二者之间的过渡型等 3 种地球化学类型,其中 OIB 型镁铁质岩可能与含石榴石的陆下岩石圈地幔与 OIB 型地幔源区物质的相互作用有关,无论是微量元素还是 Sr-Nd 同位素^[80-81]以及

锆石 Hf 同位素,均与澳大利亚南西 Bunbury 玄武岩、印度北东部 Rajmahal 玄武岩和代表白垩纪印度洋 Kerguelen 地幔柱头部的玄武岩非常相似。通常认为 Kerguelen 地幔柱的活动时间在 120 Ma 左右。但 Comei-Bunbury 大火成岩省的侵位时间比 Rajmahal 玄武岩和 Kerguelen 高原玄武岩要老 10 Ma,Zhu et al.(2008)^[80] 认为它是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物,Kerguelen 地幔柱的早期活动可能在大印度从澳大利亚裂离出来并导致东印度洋开启过程中发挥了重要作用。与此同时发生的事件,还有大印度和南西澳大利亚之间最老的海底磁异常(大约 130.9 Ma^[82]),具有全球意义的 Weissert 大洋缺氧事件^[83],以及白垩纪温室气候的开始^[84]。

今后除了要对地幔柱本身的证据、特点、时限与成因机制继续进行更深入的研究外,还应加强地幔柱与超大陆聚散、特提斯开合、青藏高原形成之间关系、地幔柱与地球各圈层间的相互作用等的研究。

7 高原隆升与生长过程

高原隆升的时限、方式、机制及对气候的影响是青藏高原研究的基本科学问题之一,是国际地学界始终关注和讨论的热点。这里仅根据近年来的研究进展作简要的回顾和讨论。

方小敏和李吉均(2003)^[85]将前人对青藏高原隆升的认识概括为 3 种主要观点,并提出了自己的新认识:

(1)第一种观点^[86-87]认为,印度-欧亚大陆碰撞导致青藏高原地壳和岩石圈连续缩短和增厚,由高原南部(碰撞前沿地带)开始,传到中部与北部,然后产生拆离,导致高原均衡反弹上升,隆起的高原由于重力作用向东西方向扩展,在 8 Ma 或更早^[87-88]发生高原“崩塌”,引发了印度季风、东亚季风、全球变冷和亚洲干旱化。

(2)第二种观点^[60]认为,高原变形与隆升并不是地壳和岩石圈连续缩短增厚及随后的均衡反弹上升过程,而是由于印度板块向欧亚板块的斜向碰撞,主要沿高原边缘深大剪切断裂发生变形,首先高原南部(唐古拉山以南)于始新世隆起,并向南东挤出;然后其北面羌塘地块、可可西里、昆仑山在渐新世与中新世相继隆起;最后是高原东北部(昆仑山以北、祁连山以南)在上新世和第四纪相继隆起。

(3)第三种观点以中国学者为主^[89-91],提出“三

期隆升与两次夷平”的认识:第一期早始新世冈底斯为中心的隆升及其后的夷平(一级夷平面);第二期中新世以喜马拉雅为中心的隆升,上新世末的夷平(二级夷平面);第三期上新世末第四纪初高原发生大幅度整体的块体上升,又分3个剧烈上升阶段,自上新世以来青藏高原累计上升了3500~4000 m。

(4)方小敏和李吉均(2003)^[65]的新认识:青藏高原隆升的方式可能是上述第一种和第二种观点的组合,变形通过青藏高原各块体间已存的大断裂和块体本身迅速传到高原的最北部(在40 Ma已传到祁连山北部);青藏高原北部边缘经历了4个显著的隆升阶段和3期夷平。4个隆升阶段是45~40 Ma、33~30 Ma、23~22 Ma、8~7 Ma;3次夷平是33 Ma、23 Ma、8~7 Ma。最后1个隆升阶段(8~7 Ma以来)具有强烈的整体性,造成现代青藏高原大地貌,又可分为若干小阶段,其中以3.6 Ma及1.8~0.8 Ma的构造隆升最重要。

邓晋福等(1996,2004)^[33,35]根据岩浆岩(主要是钾玄岩类与含白云母花岗岩类)的时空分布提出以冈底斯—羌塘为中心向南北双向扩展的“三阶段”青藏高原生长模型,第一阶段(渐新世)高原南、北分别以雅鲁藏布缝合带及沱沱河—金沙江缝合带为界,第二阶段(中新世)高原的南北边界分别为MCT及昆南缝合带,第三阶段(更新世)高原的南北边界达到MBT及阿尔金断裂。并认为,上述高原的生长方式,应当用印度—塔里木汇聚模型来解释。

王成善等(2008)^[92]根据对青藏高原中部和北部盆地的磁性地层学、沉积学、古流向测量、⁴⁰Ar/³⁹Ar及裂变径迹等研究提出,在约40 Ma时青藏高原中部(拉萨、羌塘地块)就已经隆升到现在的高度(4~5 km),称为“原青藏高原(Proto-Tibetan Plateau)”。随着印度—亚洲大陆碰撞的继续,高原逐渐向南北两个方向扩展。向南,喜马拉雅山在新近纪隆起,向北,可可西里盆地在约20 Ma时隆起到现今高度,至晚新生代祁连山隆起,形成了现在的青藏高原。

最近完成的中国地质调查局青藏高原基础地质调查成果集成和综合研究项目,根据系统的低温热年代学、沉积和构造变形记录划分出60~35 Ma(古新世—始新世)、25~17 Ma(渐新世—早中新世)、12~8 Ma(藏南18~13 Ma)(中新世中晚期)和大约5 Ma以来(上新世以来)4个主要强构造隆升剥露阶段,并提出以冈底斯为核心的青藏高原的扩展生长

过程模型(张克信,王国灿等,2010,个人通信)。

由以上简要的回顾可以看出,近些年来关于高原隆升的研究有了显著进展,得到了一些共同认识,例如,高原隆升是分阶段的;高原是逐渐扩展长大的;在7~8 Ma以来高原发生了整体性的隆升;高原的边缘山系是在晚新生代才崛起的,等等。但是,在高原隆升的时限和阶段划分、各阶段各部分隆起的高度、高原生长扩展方式和方向等许多重要问题上,仍然存在着分歧,有待研究解决。

8 成矿作用

青藏高原的形成演化过程是长期而复杂的,因而青藏成矿作用也是长期而复杂的。揭示青藏高原成矿作用的规律,不仅对于推动矿产勘查与开发,满足国家经济、社会对矿产资源的迫切需求有重要的现实意义,而且发展成矿理论有重要的科学意义。青藏高原蕴藏着极为丰富的矿藏,早就受到国家和科学家们的重视。

从“七五”开始,青藏高原东南的“三江”地区就被确定为潜在的新的国家级金属矿产资源基地加以勘查开发。除了系统的基础地质调查与物化探工作外,原地矿部门、国土资源部门、科技部都在此部署与实施过多个以查清“三江”成矿规律为目的的科技攻关与研究计划。十几个特大型、甚至超大型矿床相继被发现,至今还在不断发现,显示出巨大的找矿潜力。已经认识到,西南“三江”成矿的基本特点是在特提斯(原特提斯、古特提斯、新特提斯)成矿的基础上,叠加了印度—亚洲碰撞成矿作用;因而“三江”成矿受到地壳基底与地幔不均一性、特提斯事件、印度—亚洲碰撞事件3个基本要素的控制,或者可以概括为:“两个成矿系统的叠加复合;三个基本要素控矿”的基本规律^[29,93-94]。同时,产生了旨在揭示特提斯成矿规律的“多岛弧盆成矿论”,及旨在阐明印度—亚洲碰撞成矿规律的“陆内转换成矿论”等理论概括^[95-97]。

对于青藏高原主体部分的找矿工作与成矿规律研究,自新中国成立以来一直受到重视,积累了大量基础地质与物化探资料及科研、找矿成果,终于在近10年来取得了重大突破。覆盖整个青藏高原空白区的基础地质调查的完成,是青藏地质工作史上一个划时代的事件。一系列大型—特大型铜矿床、铅锌矿床、金矿床、富铁矿床、盐湖矿床的新发现,一系列重

要成矿带(如冈底斯成矿带、班公湖—怒江成矿带、东、西昆仑成矿带,等等)的确定,使国内外看到了青藏高原矿产资源的巨大前景,也确立了青藏高原作为国家矿产资源新基地的地位。中国学者在这样一个得天独厚的地区,发展了大陆碰撞成矿理论,发现印度—亚洲大陆经历三段式碰撞过程,造就了 3 种重要成矿构造环境(即主碰撞陆陆汇聚、晚碰撞构造转换、后碰撞地壳伸展);相应地,在深部分别发育俯冲板片断离、软流圈上涌和岩石圈拆沉过程,提供异常热能驱动大规模成矿作用;产生不同类型的岩浆—流体系统,分别控制了大型斑岩型 Cu 矿床、云英岩型 Sn—W 矿床、造山型 Au 矿床、类 MVT 型 Pb—Zn—Cu—Ag 矿床、岩浆杂岩型 REE 矿及热泉型 Cs—Au 矿的形成^[98-99]。

应当说,前一阶段在青藏高原成矿作用的理论研究和矿床勘查开发上已取得了很大的成绩,但要充分满足国家经济建设与社会发展的需求,还需不懈地努力。对每个重要成矿带还需要加强区域成矿条件和规律的研究,加强典型矿床的解剖,并将这种研究贯穿于勘查工作的全过程。要及时总结推广成功经验,选用对自己工作区有效的新技术及方法技术组合。

最后还需要说明,笔者并没有打算、也不可能包括青藏高原地质研究的全部问题,还有许多重要科学问题,诸如青藏高原的重要构造带和构造变形、青藏高原隆升对亚洲及全球气候的影响与互馈、青藏高原的自然灾害与防灾减灾等等,都没有涉及。所以,笔者只是挂一漏万,抛砖引玉,希望引起的各位同仁对今后如何进一步深入青藏高原地质研究的思考,贡献宝贵的意见。

致谢:衷心感谢《中国地质》编辑部邀请撰写此文,衷心感谢国家自然科学基金委、科技部、国土资源部、中国地调局以及教育部、外专局的长期资助和指导、各省(区)政府、国土资源与地勘部门的领导与专家、同事们的长期支持和指导,还要感谢李小伟、黄兴凯、李勇对本文参考文献的斧正。

今年恰逢我国著名区域地质学家、青藏高原地质研究主要学术带头人之一、中国科学院院士李廷栋研究员的八十华诞。《中国地质》出版专刊以为庆贺。我作为长期跟随李廷栋院士、肖序常院士等著名科学家从事青藏高原地质研究的老兵,谨撰此文向先生表示衷心的祝贺与感谢。

参考文献(References):

- [1] Strachey R. On the geology of the Himalaya Mountains and Tibet [J]. O. J. G. S., 1851, 4:292-310.
- [2] Heim A, Gansser A. Central Himalaya, geological observation of the Swiss expedition 1936, Mem [J]. Soc. Helv. Sci. Nat., 1939, 73(1): 1-195.
- [3] Suess E. Are great ocean depths permanent?[J] Nat. Sci., 1893, 2: 180-187.
- [4] Sengor A M C. The Cimmeride orogenic and the tectonics of Eurasia[J]. GSA Special Publ, 1984, 165:1-82.
- [5] Sengor A M C. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana land. In Gondwana and Tethys [J]. GSA Special Publ, 1989, 37:19-81.
- [6] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京:地质出版社, 1987:1-105.
Huang Jiqing, Chen Bingwen. The Evolution of the Tethyan Seas in China and Adjacent Regions [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1987:1-105(in Chinese).
- [7] 钟大赉. 川滇西部古特提斯造山带[M]. 北京:科学出版社, 1998, 1-231.
Zhong Dalai. Paleo-Tethyan Orogenic Belt in Western Sichuan and Western Yunnan [M]. Beijing:Science Press, 1998:1-231 (in Chinese).
- [8] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. “三江”特提斯火山作用与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1993:1-267.
Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, et al. Sanjiang Tethyan Volcanism and Mineralization [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:1-267(in Chinese).
- [9] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成:构造—岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):43-51.
Mo Xuanxue, Pan Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (6):43-51 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan - Tibetan orogen. In: Jeanloz R, Albee A L and Burke K C. Annual Reviews of Earth and Planet Sci., 2000, 28:211-280.
- [11] Jaeger J-J, Courtillot V, Tapponnier P. Paleontological view of the ages of the Deccan Traps, the Cretaceous/Tertiary boundary, and the India-Asia collision[J]. Geology, 1989, 17:316-319.
- [12] Burtman V S. Meso-Tethyan oceanic sutures and their deformation[J]. Tectonophysics, 1994, 234:305-327.
- [13] Liu G, Einsele G. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas[J]. Geol. Rundsch, 1994, 83:32-61.
- [14] Leech M, Singh S, Jain A K, et al. The onset of India-Asia continental collision: early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 234:83-97.
- [15] Garzanti E, Baud A, Mascle G. Sedimentary record of the

- northward flight of India and its collision with Eurasia (Ladakh Himalaya, India)[J]. *Geodinamica Acta* (Paris), 1987, 1(4/5):297-312.
- [16] Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya [J]. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 1987, 98(6):678-701.
- [17] Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India/Eurasia Collision Zone[J]. *Eclogae. Geol. Helv.*, 1989, 82(3): 717-734.
- [18] Rowley D B. Minimum age of initiation of collision between India and Asia north of the Everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain section [J]. *The Journal of Geology*, 1998, 106:229-235.
- [19] Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. When and where did India and Asia collide?[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, B05423, doi:10.1029/2006JB004706.
- [20] Chung S L, Chu, M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth- Science Reviews*, 2005, 68:173-196.
- [21] Mo X X, Zhao Z D, Zhou S, et al. Evidence for timing of the initiation of India-Asia collision from igneous rocks in Tibet. *EOS Trans* [A]. AGU, F1003, Fall Meeting Abstract. S62B-1201, San Francisco, 2002, 83:47.
- [22] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3):135-148.
Mo Xuanxue, Zhao, Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- [23] Wan X, Jansa LF, Sarti M. Cretaceous and Tertiary boundary strata in southern Tibet and their implication for India-Asia collision [J]. *Lethaia*, 2002, 35(2):131-146.
- [24] Ding L, Kapp P, Wan X. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south-central Tibet [J]. *Tectonics*, 2005, 24:1-18.
- [25] 李国彪. 西藏南部古近纪微体古生物及盆地演化特征 [D]. 博士学位论文, 中国地质大学(北京), 2004:1-171.
Li Guobiao. The paleogene microfossils and the evolution of Basins in southern Tibet [D]. Ph.D. thesis, China University of Geosciences, Beijing, 2004:1-171 (in Chinese with English abstract).
- [26] Mo X X, Zhao Z D, Deng J F, et al. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow [C]//Dilek, Y, Pavlides S (eds). *Postcollisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia*. Geological Society of America Special Paper, 2006, 409:507-530.
- [27] Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. 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.
- [28] Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al. Mantle input to the crust in southern Gangdese, Tibet, during the Cenozoic: Zircon Hf isotopic evidence [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2):241-249.
- [29] 莫宣学, 等. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩 [M]. 北京:地质出版社, 2009:1-396.
Mo Xuanxue, et al. *Cenozoic Collision-postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:1-396.
- [30] Liegeois J P. Preface—Some words on the post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 1998, 45: XV-XVII.
- [31] Zhao Z, Mo X, Dilek Y, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet [J]. *Lithos*, 2009, doi:10.1016/j.lithos.2009.02.004.
- [32] Zhang S H, Mahoney J, Mo X X, et al. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-Ocean-type isotopic characteristics[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46:829-858.
- [33] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 大陆根柱构造-大陆动力学的钥匙 [M]. 北京:地质出版社, 1996:1-110.
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. *Continental Roots-Plume Tectonics: A Key to Continental Dynamics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-110(in Chinese).
- [34] Mo X X, Deng J F. Three types of lithospheric structure in the Tibetan Plateau [C]//14th Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop, Kloster Ettal Germany, Terra Nostra, 1999. 2:99-100.
- [35] Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots-plume tectonics'[J]. *Earth Science Reviews*, 2004. 65(3-4):223-275.
- [36] 滕吉文, 孙克忠, 魏斯禹, 等. 中国青藏高原及其边缘地带的地震活动特征[J]. *喜马拉雅地质* 1984, II:311-329.
Teng Jiwen, Sun Kezhong, Wei Siyu, et al. Characteristics of earthquake activities in the Tibetan Plateau and peripheral regions [J]. *Himalayan Geology* 1984, II:311-329(in Chinese with English abstract).
- [37] 宋仲和, 陈国黄, 安昌强, 等. 中国大陆及其海域地壳-上地幔三维速度结构[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 3(2):180-188.
Song Zhonghe, Chen Guohuang, An Changqiang, et al. Three dimensional velocity structure of the crust and upper mantle of Chinese continent and adjacent submarine areas [J]. *Science in China (series B)*, 1993, (2):180-188(in Chinese).
- [38] 吴功建, 高锐, 余钦范, 等. 青藏高原亚东-格尔木断面综合地球物理调查研究[J]. *地球物理学报*, 1991, 34:555-562.
Wu Gongjian, Gao Rui, Yu Qinfan, et al. Comprehensive geophysical investigations of the Yardong-Golmud Geotranssect[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1991. 34: 555-562 (in Chinese with English abstract).
- [39] 肖序常, 李廷栋. 青藏高原构造演化与隆升机制[M]. 广州:广东科学技术出版社, 2000:1-313.

- Xiao Xuchang, Li Tingdong. Mechanism of Tectonic Evolution and Uplift of the Tibetan Plateau [M]. Guangzhou, Guangdong Science and Technology Press, 2000:1-313(in Chinese).
- [40] Wei W B, Unsworth M, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. *Science*, 2001, 292:716-718.
- [41] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet:synthesis of Project INDEPTH results [J]. *Science*, 1996, 274:1684-1688.
- [42] Luo Z H, Xiao X C, Cao Y Q, et al. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau[J]. *Science in China (series D)*, 2001, 44:10-17.
- [43] 喻学惠, 莫宣学, 廖忠礼, 等. 西秦岭石榴石二辉橄榄岩和石榴石单辉橄榄岩包体的温压条件[J]. *中国科学(D)*, 2001, 47(2): 155-161.
Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Liao Zhongli, et al. The temperature and pressure condition of garnet-lherzolite and garnet-websterite from west Qinling, China[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 47(2):155-161(in Chinese).
- [44] 赵志丹, 莫宣学, 孙晨光, 等. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(3):193-202.
Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Sun Chengguang, et al. Mantle xenoliths in southern Tibet:geochemistry and constraints for the nature of the mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3):193-202(in Chinese with English abstract).
- [45] Ding L, Kapp P, Yue Y, et al. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet, [J].*Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254:28-38.
- [46] 夏萍, 徐义刚. 滇东南马关地区新生代钾质玄武岩中幔源包体研究:深部物质组成与动力学过程探讨[J]. *地球化学*, 2006, 35(1): 27-40.
Xia Ping, Xu Yigang. Studies on mantle-derived nodules in the Cenozoic potassic basalts in Maguan, SE Yunnan and implications for deep material composition and dynamic processes [J]. *Geochemistry*, 2006, 35(1):27-40 (in Chinese with English abstract).
- [47] 喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 等. 云南马关地区新生代碧玄岩中地幔包体研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3):621-630.
Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Zeng Pusheng, et al. Studies on mantle xenoliths in the Cenozoic basanites in Maguan, Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3):621-630(in Chinese with English abstract).
- [48] Hacker B R, Gnos E, Ratschbacher L, et al. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet [J]. *Science*, 2000, 287(5462):2463-2466.
- [49] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述)[J]. *地球学报*, 2008, 29(3):263-274.
Yang Jingshui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. A review on UHP minerals and new minerals in chromitites of Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2008, 29(3):263-274(in Chinese with English abstract).
- [50] 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压变质带—青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带 [J]. *地质学报*, 2006, 80(12):3-12.
Yang Jingshui, Xu Zhiqing, Geng Quanru, et al. A potential new HP-UHP belt in China: a discovery of eclogite belt in Lhasa Terrane of the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(12):3-12(in Chinese with English abstract).
- [51] 杨经绥, 许志琴, 李天福, 等. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留?[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1277-1287.
Yang Jingshui, Xu Zhiqing, Li Tianfu, et al. Oceanic-plate-subduction-type of eclogites in Lhasa Terrane of the Tibetan Plateau: the Remains of Paleo-Tethyan oceanic basin? [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10):1277-1287(in Chinese with English abstract).
- [52] 丁林, 钟大赉. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(5):385-397.
Ding Lin, Zhong Dalai. The Characteristics of high-Pressure metamorphism and its implication for structural geology in Namcha Pawa area, Tibet[J]. *Science in China(series D)*, 1999, 29(5):385-397(in Chinese).
- [53] Kind R, Ni J, Zhao W, et al. Evidence from earthquake data for partially molten crustal layer in Southern Tibet. *Science* [J]. 1996, 274: 1692-1694.
- [54] Zhao W J, Nelson K D, Meissner R. Advances of INDEPTH deep profiling study in Tibet and the Himalayas [J]. *Episodes*, 1997, 20: 266-272.
- [55] Molnar P, Houseman G, Clinton C. Rayleigh-Taylor instability and convective thinning of mechanically thickened lithosphere: effects of non-linear viscosity decreasing exponentially with depth and of horizontal shortening of the layer [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 133:568-584.
- [56] Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. The lithospheric architecture of the Lhasa Terrane:Revelation and geodynamic significance [J]. 2010, (to be submitted to *Geology*).
- [57] Argand E. La tectonique de asie [C] //13th International Geology Congress, 1924, 7:171.
- [58] Powell C M. Continental underplating model for the rise of the Tibetan plateau[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 1986, 81:79-94.
- [59] Dewey J F, Bird J M. Mountain belts and new global tectonics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 74:2625-2467.
- [60] England C, Houseman G. Role of lithosphere strength heterogeneities in the tectonics of Tibet and neighboring regions[J]. *Nature*, 1985, 315:297-301.
- [61] Zhao W, Morgen W. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust:a two-dimensional finite element model study [J]. *Tectonics*, 1987, 6:489-504.
- [62] Mo X X, Hou Z Q, Niu, Y L, et al., Mantle contributions to crustal thickening during continental collision:Evidence from

- Cenozoic igneous rocks in southern Tibet [J]. *Lithos*, 2007, 96: 225–242.
- [63] Wang J H, Yin A, Harrison, T M, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo–Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188:123–133.
- [64] Houseman G, England C. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian–Asian continental collision [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98:12233–12249.
- [65] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82:2905–2930.
- [66] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294:1671–1677.
- [67] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet [J]. *Science*, 1997, 276:788–790.
- [68] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 2000, 28:703–706.
- [69] Searle M P. Crustal flow in Tibet: geophysical evidence for the physical state of Tibetan lithosphere, and inferred patterns of active flow [C]// Law R D, et al (eds.). *Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones*. Geological Society of London Spec. Publ., London, 2006:39–70.
- [70] Flower M F J, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and DUPAL–like asthenosphere in east Asia and the western Pacific[C]// Flower, et al(eds.). *Mantle plume and plate interactions in East Asia*. Geodyn. Series 27. AGU. Washington, 1998:67–88.
- [71] Flower M, Russo R, Tamaki K, et al. Mantle contamination and the Izu–Bonin–Mariana (IBM) ‘high–tide mark’: evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure [J]. *Tectonophysics*, 2001, 333:9–34.
- [72] Russo R, Flower M, Mocanu V. Infiltration history of asthenosphere beneath Indochina: Proposal for an integrated study [A]. 1998 Fall Meeting, San Francisco: Eos (Transactions, American Geophysical Union), 1998, 79:45.
- [73] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原–青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京:地质出版社, 2007:1–458.
Xu Zhiqin, Yang, Jingsui, Li Haibing, et al. *An Orogenic Plateau: Mechanism for Collage of Terranes, Collisional Orogeny and Uplift of the Tibetan Plateau* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1–458.
- [74] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Permo–Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145–168.
- [75] Zhu D C, Mo X X, Pan G T. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous basalts and associated diabases from Cona area, eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and eastern Greater India lithosphere [J]. *Lithos*, 2008, 100:147–173.
- [76] Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. The 132 Ma Comei–Bunbury large igneous province: Remnant identified in present–day SE Tibet and SW Australia[J]. *Geology*, 2009, 37:583–586.
- [77] Bryan S E, Ernst R E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) [J]. *Earth–Science Reviews*, 2008, 86:175–202.
- [78] Frey F A, McNaughton N J, Nelson D R, et al. Petrogenesis of the Bunbury Basalt, Western Australia: interaction between the Kerguelen plume and Gondwana lithosphere? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144:163–183.
- [79] Coffin M F, Pringle M S, Duncan R A, et al. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43: 1121–1139.
- [80] Zhu D C, Mo X X, Pan G T, et al. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous basalts and associated diabases from Cona area, eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and eastern Greater India lithosphere? [J]. *Lithos*, 2008, 100:147–173.
- [81] Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Whole–rock elemental and zircon Hf isotopic geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Early Cretaceous Comei large igneous province in SE Tibet: constraints on mantle source characteristics and petrogenesis (Extended abstract) [A]. *Himalayan Journal of Sciences*, 2008c, 5: 178–180.
- [82] Heine C, Müller R D. Late Jurassic rifting along the Australian northwest shelf: margin geometry and spreading ridge configuration [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, 52:27–39.
- [83] Erba E, Bartolini A, Larson R L. Valanginian Weissert oceanic anoxic event[J]. *Geology*, 2004, 32:149–152.
- [84] Lini A, Weissert, H, Erba E. The Valanginian carbon isotope event: A first episode of greenhouse climate conditions during the Cretaceous[J]. *Terra Nova*, 1992, 4:374–384.
- [85] 方小敏, 李吉均. 高原隆升的阶段性[C]//郑度主编. 青藏高原形成环境与发展. 石家庄:河北科学技术出版社, 2003: 37–48.
Fang Xiaomin, Li Jijun. Stages of Plateau Uplift [C]//Zheng Du. (ed.). *Developments and the Environments of Formation of the Tibetan Plateau*. Shijiazhuang: Hebei Press of Science and Technology, 2003:37–48 (in Chinese).
- [86] England P C, Houseman G A. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau[J]. *J Geophys. Res.*, 1989, 94(B12):17561–17579.
- [87] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. *Science*, 1992, 255:1663–1670.
- [88] Coleman M E, Hodges K. Evidence for Tibet plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east–west extension[J]. *Nature*, 1995, 374:49–52.
- [89] 施雅风, 刘东生. 希夏邦马峰地区科学考察初步报告[J]. *科学通报*, 1964, 10:928–938.
Shi Yafeng, Liu Dongsheng. *Scientific Investigation Reports of Xixiabangma Region*[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1964, 10:928–938.
- [90] 徐仁, 陶君容, 孙湘君. 希夏邦马峰高山栎化石层的发现及其在

- 植物学和地质学上的意义[J]. 植物学报, 1973, 15(1):103-119.
- Xu Ren, Tao Junrong, Sun Xiangjun. A discovery of fossils horizon of alpine oak from the Xixiabangma and its significance in phytology and geology [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1973, 15(1):103-119(in Chinese with English abstract).
- [91] 李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学, 1979, 6:608-616.
- Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, et al. On the timing, scope and styles of the uplift of the Tibetan Plateau [J]. Science in China, 1979, 6:608-616(in Chinese).
- [92] Wang, C S, Zhao X X, Liu Z F, et al. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau [J]. PNAS, 2008, 105 (13): 4987-4992.
- [93] 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等. 三江中南段火山岩—蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998:1-128.
- Mo Xuanxue, Shen Shangyue, Zhu Qinwen, et al. Volcanic Rocks and Ophiolites and Mineralization in middle-southern Sangjiang regions[M]. Beijing, Geological Publishing House, 1998:1-128 (in Chinese).
- [94] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等. 三江造山带火山岩构造组合及其意义[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2):121-138.
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, et al. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang Orogenic Belt, SW China and implication for tectonics[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(2):121-138(in Chinese with English abstract).
- [95] 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003:1-420.
- Pan Guitang, Xu Qiang, Hou Zengqian, et al. Ore-forming systems in Sanjiang multi-island-arc-basin orogenic processes and assessments of mineral resources, SW China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:1-420(in Chinese).
- [96] Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, et al. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S.W. China; Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31:48-87.
- [97] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 西南三江多岛弧盆碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010:1-491.
- Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, et al. Ore-forming Thesis of Multi-Island-Arc-Basin-System and Collisional Orogeny and Exploration Techniques in Sanjiang Region, SW China [M]. Beijing, Geological Publishing House, 2010:1-491(in Chinese).
- [98] Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y, et al. Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: constraints from Re-Os dating of molybdenite[J]. Mineralium Deposita, 2006, 41:33-45.
- [99] 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等. 青藏高原碰撞造山与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2009:1-982.
- Hou Zengqian, Wang Erqi, Mo Xuanxue, et al. Collisional Orogeny and Mineralization in the Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:1-982(in Chinese).

A review and prospect of geological researches on the Qinghai-Tibet Plateau

MO Xuan-xue

(National Laboratory on Geological Processes and Mineralization, School of Earth Science and Resources,
China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is the highest, largest and youngest plateau in the world, known as the best natural laboratory for understanding continental geodynamics. The formation and evolution of the Tethys and the uplift of the plateau constitute two major themes in the study of the Qinghai-Tibet Plateau. Of many scientific problems, eight have been reviewed in this paper, namely, the formation and evolution of the Tethys; Indo-Asia continental collision; the structure and composition of the crust/mantle of the Qinghai-Tibet Plateau; the origin of the extremely thick crust in the plateau; lateral deep crustal and asthenospheric mantle; mantle plumes; uplift and growth of the plateau; mineralization.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Tethys; collision; uplift; studies of geoscience; review and prospect

About the author: MO Xuan-xue, male, born in 1938, professor, academician of Chinese Academy of Sciences, engages in the study of petrology, especially the field of magmatism-tectonics-mineralization; E-mail: moxx@cugb.edu.cn or moxx38@yahoo.com.