

青藏高原——造山的高原

许志琴

大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院, 北京, 100037

青藏高原是世界上最高、最大、最厚、最新的高原, 是一个正在快速隆起的大陆地块。她具有特殊的几何形体和地貌景观, 内部是广阔平坦的地域, 一望无垠, 周缘为高耸起伏的山链, 构成了一堵与外界隔绝的屏障。青藏高原被称之为“世界屋脊”, 是全球地学的瑰宝, 是大陆动力学研究的理想场所。

穿越时空的隧道, 青藏高原经历了晚元古代以来至今的长期地质演化: (1) 500-200Ma 东特提斯早期洋盆的开合、条带状微陆块群的多次聚敛、增生、碰撞和造山, 铸成青藏高原的前身——“始-古特提斯复合碰撞造山拼贴体”; (2) 170-60Ma 印度/亚洲碰撞的前夜, 与地幔柱成因有关的新特提斯洋盆的俯冲、消减、弧-陆碰撞、洋盆闭合以及蛇绿岩的构造侵位; (3) 60-50Ma 以来印度/亚洲碰撞, 印度陆块俯冲在亚洲大陆之下, 导致喜马拉雅山崛起, 青藏高原形成, 以及物质向东(东南)大逃逸的新生代最壮观的地质事件。最终构成由始特提斯、古特提斯和新特提斯复合地体和造山拼贴体组成的“造山的高原”——青藏高原。

1 青藏高原的前身

重塑地球早期的古地理和追溯青藏高原的前身发现, 冈瓦纳超大陆形成(570-520Ma)之后, 在环冈瓦纳大陆北缘形成早古生代早期(530-470Ma)的北印度造山带, 与始特提斯大洋相接, 青藏高原南部及东南部(喜马拉雅、拉萨、羌塘-三江地体)保存早古生代早期(470-534Ma)的花岗岩浆、火山、变质和构造事件记录, 揭示这些地体曾是北印度造山带的一部分, 代表青藏高原前身的初始位置在南半球的冈瓦纳大陆的北缘。

青藏高原的地体构架显示, 早古生代以来的始特提斯和晚古生代-三叠纪的古特提斯体系中诸多的条带状微陆块(地体)被“始-古特提斯”洋盆包围: 其中包括始特提斯域的四条微地体: “阿尔金-祁连”、“北昆仑-柴达木”、“北帕米尔-南昆仑”, 和古特提斯域的五条微地体: “巴颜喀拉-松潘甘孜”、“中帕米尔-塔什库尔干/甜水海-北羌塘-思茅”、“南羌塘-保山”、“北拉萨-腾冲”和“南拉萨”。微地体之间的洋盆在消减过程中产生与始-古

特提斯洋盆俯冲相伴随的诸多“岛弧-增生”系列, 形成早古生代的“北阿尔金-北祁连”和“南阿尔金-柴北缘”两条高压-超高压变质带, 以及晚古生代-三叠纪的“金沙江-红河”、“龙木措/双湖-澜沧江”和“松多-墨竹工卡”三条高压变质带。微地体之间的洋盆的先后两次闭合形成由 8 条蛇绿岩带残片组成的缝合带, 并致使微地体群先后两次碰撞, 形成“阿-祁-昆始特提斯(早古生代)复合造山系”和“松潘-羌塘-三江-拉萨”古特提斯(印支)“T”型复合造山系”, 阿尔金左行走滑断裂自 240-220Ma 以来将阿尔金和祁连地体左行错位 400km。

青藏高原前身的奠定经历了 300Ma 的演化、“多洋盆、多地体、多岛弧、多俯冲、多碰撞、多造山”的动力学过程, 使来自冈瓦纳大陆周缘的地体群的两次聚敛, 先后对接至“劳亚大陆”的南缘, 形成青藏高原的前身——“始-古特提斯造山拼贴体”(许志琴等, 1992, 1994, 1999, 2001, 2006, 2007, 2009), 杨经绥等(Yang J S et al) (1996, 1997, 1998, 2000, 2002), 李海兵等(Li haibing et al) (1996, 2001), 张建新等(Zhang J X et al) (1998, 2000)。

2 印度/亚洲碰撞前夜

印度河-雅鲁藏布江大于 2000km 长的蛇绿岩带代表新特提斯洋盆的残片, 印度/亚洲碰撞使其侵位在缝合带中。在沿印度斯-雅鲁藏布蛇绿岩带的罗布莎、日喀则、普兰、东波和缅甸密支那等 6 个蛇绿岩体地幔橄榄岩和铬铁矿中, 原位金刚石和超高压矿物的首次重要发现, 杨经绥等(Yang J S et al., 2008, 2009, 2010, 2012, 2013)提出“蛇绿岩型金刚石”的新类型, 揭示蛇绿岩可能的深地幔(>300km)成因, 以及新特提斯洋盆形成与地幔柱有关的假设。

喜马拉雅西构造结 Kohistan 岩浆弧和两侧的喀喇昆仑和印度河蛇绿岩带的新的研究表明, Kohistan 岩浆弧是新特提斯洋中的大型洋岛, 提出 150-95Ma 开始形成最终在新特提斯洋内俯冲的动力学背景, 经历 50 Ma 的洋-陆碰撞, 45Ma 以来亚洲/Kohistan 岩浆弧/印度最终碰撞的模式(Burg J.P., 2012)。根据沿印度斯-雅鲁藏布蛇绿岩带中洋岛的普遍发现, 以及蛇绿岩的逆冲板片和推覆体的两种

侵位, 提出逆冲板片的形成与洋内俯冲-折返有关, 而推覆体的形成与洋内仰冲有关(Xu Z Q in press)。通过新特提斯洋盆的洋内俯冲来实现洋盆消减和陆-陆汇聚, 是印度/亚洲碰撞前夜的重要事件。

3 印度/亚洲碰撞的响应和过程

印度/亚洲大陆碰撞之后, 板块之间汇聚收敛并未终止, 印度板块仍以 44-50 mm/a 的速率往北推进, 俯冲到亚洲大陆之下。约有 1500 km 的南北向缩短量由地壳增厚的过程来吸收, 使青藏高原成为 2 倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳体 (平均厚度 70 km), 导致了现今青藏高原南缘喜马拉雅山脉的南北向缩短率为 18 mm/yr, 北缘祁连山脉的缩短率为 16 mm/yr, 高原腹地的东西向伸展速率为 10 mm/a (Avouac et al., 1993), 大量物质向北东、东及东南方向逃逸 (Tapponnier et al., 1976), 形成青藏高原奇特的形貌。

3.1 高喜马拉雅的造山机制

以高级变质、高温韧性变形和深熔作用为特征的高喜马拉雅单元是“热碰撞造山”的典型, 是当今造山机制研究的重心。高喜马拉雅造山事件一直锁定为受主中央冲断裂(MCT)和藏南拆离系(STD) (23-17Ma) 制约的“高喜马拉雅挤出”, 譬如三种挤出的二维构造模式: 楔状挤出 (Burchfiel and Royden, 1985; Grujic et al., 1996)、隧道流 (Beaumont et al., 2001; Hodges et al., 2001; Grujic et al., 2002) 和构造楔 (Yin, 2006; Webb et al., 2007, 2011) 的提出。新的研究表明, 高喜马拉雅单元的上部存在形成于 27Ma 以来的平行 E-W 向造山带的近水平高温韧性伸展剪切带, 由于侧向地壳厚度梯度, 产生平行造山方向的重力裂陷而致 (Xu Z Q et al., 2013)。新的研究还表明, 在高喜马拉雅杂岩中存在 45-36Ma 的岩浆事件, 为高喜马拉雅的初始挤出提供热源 (Zeng L S et al., 2009, 2011); 西尼泊尔-高喜马拉雅中, 还发现大型的向南剪切的韧性高温逆冲剪切带, 形成于 31-26Ma, 具有自北向南扩展迁移的趋势, 揭示了高喜马拉雅的形成经历了 (A) 46Ma 以来的早期局部熔融; (B) 31-26Ma 的高温韧性逆冲剪切 (许志琴等, 2013); (3) 27Ma 的平行伸展式高温剪切 (Xu Z Q et al., 2013); (4) 24-13Ma 的高喜马拉雅韧性挤出的三维动力学过程。

3.2 青藏高原东南缘物质的侧向逃逸

青藏高原东南缘 (即印度支那陆块) 由四条主要形成于 35-15Ma 的大型近垂直的走滑断裂: 哀牢山-红河左行走滑断裂、澜沧江左行/右行走滑断裂、高黎贡右行走滑断裂和三盖-那邦右行走滑断裂组成, 并使印度支那陆块北部自东向西划分为思茅、保山和腾冲三个侧向挤出地体。研究表明挤出地体

中存在前寒武纪变质基底和早古生代盖层之间的水平滑脱韧性剪切带, 他们的构造产出、运动指向在空间上与两侧的走滑断裂相协调, 在时间上滑脱事件的年龄为 35-20Ma 与走滑事件一致。因此, 笔者认为青藏高原东南缘的物质侧向逃逸不仅受走滑控制, 而且受底面滑脱的制约, 提出“抽屉式”向南东侧向挤出的运动学模式, 来解释印度/亚洲碰撞在青藏高原东南缘发生的物质逃逸的重大事件。

3.3 青藏高原北缘和东缘的隆升机制

3.3.1 西构造结---特提斯与古亚洲体系的对接

研究表明, 青藏高原西北缘的喜马拉雅西构造结受东侧的喀喇昆仑昆仑右行走滑断裂和西侧的左行恰曼走滑断裂制约。在西构造结, 印度/亚洲碰撞最终在 45Ma, 两条走滑断裂形成的初始时间在 35Ma, 24Ma 以来为主要冷却和折返时限, 并造成印度陆块的印度库什地体向北挤推, 形成帕米尔弧形构造, 与南天山古亚洲体系发生对接, 形成典型对冲式逆冲构造。

3.3.2 龙门山的隆升与中下地壳隧道流无关

青藏高原东缘—龙门山的隆升造成与四川盆地 6000m 的高差, 但是 GPS 测量揭示龙门山在近代的缩短速率只有 <3 mm/a。为此, 某些学者用“中下地壳隧道流”观点来解释青藏高原的隆升和汶川地震的发生机制 (Royden L. H. et al., 2008; Burchfiel B. C. et al. 2008)。我们通过新的横穿龙门山精细地震反射剖面及 4 口科学钻探的岩芯研究, 揭示龙门山的深部结构为基底和盖层之间的滑脱和断坪-断坡逆冲的组合构造, 上部为向东的逆冲叠覆构造; 研究表明, 用“中下地壳隧道流”来解释的“龙门山彭灌杂岩”实际上是无根的推覆体构造, 与中下地壳隧道流观点相悖。

3.4 青藏高原-造山的高原

综上所述, 新元古代以来由“多陆块、多岛弧”组成的基本格架和 (始、古) 特提斯洋盆开启和消亡的聚散历史, 显示了“多洋 (海) 盆、多俯冲、多碰撞和多造山”长期的动力学作用过程, 最后构筑了由“阿尔金-祁连-昆仑始特提斯造山系”和“松甘-羌塘-拉萨古特提斯造山系”组成的印度/亚洲前碰撞“巨型复合碰撞造山拼贴体 (许志琴等, 2007)”。因此, 青藏高原的形成是地质历史过程中微板块或地体连续碰撞和拼合的结果, 新特提斯洋盆的开启、消减和闭合, 导致大约 50-60 Ma 前的最后一次印度/亚洲碰撞 (Tapponnier et al., 1986, Molnar, 1988)。因此, 在新元古代以来长期活动、多期造山及新生代最后隆升的基础上形成的青藏高原称为“造山的高原” (Orogenic Plateau) (许志琴等, 2007)。