

青藏高原隆升机制新模式

李德威

(中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074)

摘要: 作为创建大陆动力学理论体系的最佳野外实验室的青藏高原,涉及当代固体地球科学前沿和热点的许多重大科学问题. 迄今为止,包括板块构造在内的众多模式不能合理地解释青藏高原重要的地质和地球物理现象. 本文从下地壳与中上地壳、造山带与沉积盆地的耦合作用出发,对青藏高原及邻区进行分尺度、分层块、分阶段的构造解析,提出青藏高原隆升的下地壳层流构造模式,认为青藏高原地壳增厚和构造隆升是晚新生代由于锡瓦利克盆地、塔里木盆地和四川盆地地壳的热软化岩石大量流向青藏高原造成的.

关键词: 隆升机制;下地壳;层流构造;大陆动力学;青藏高原.

中图分类号: P542 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)06-0593-08

作者简介: 李德威(1962—),男,博士,教授,博士生导师,从事地质构造和深部构造的教学和研究. E-mail: dewei89@163.com

青藏高原面积大、地壳厚、块体多、隆升快、时代新、变形强、现象典型,是国际地学界正试图建立大陆动力学这一全新地球科学理论体系的最佳野外实验室. 尽管国内外众多地质和地球物理学家在该区进行了大量卓有成效的调查和研究,但是,仍存在许多重大科学问题尚未得到解决,特别是青藏高原的隆升机制仍是一个谜.

众所周知,青藏高原发育一系列蛇绿岩带,对这些蛇绿岩产出的构造环境有洋中脊、(多岛)小洋盆、弧后盆地、陆间海盆、边缘海盆等多种认识,其中哪一条蛇绿岩带代表冈瓦纳大陆与欧亚大陆的界线至今无法确认,始新世以前特提斯的封闭和板块碰撞与晚新生代形成的青藏高原存在较大时差,主体近东西走向线性分布的蛇绿岩带与呈面状展布的青藏高原难以发生成因联系. 而年轻的青藏高原巨厚地壳显示不均一性和分层流变性,壳内普遍发育低速层和低阻层,特别是在下地壳. 20Ma 以来地壳巨量增厚的青藏高原上地壳因强烈剥蚀而不同程度地减薄,在其周边的喜马拉雅、昆仑、龙门山等造山带核部由于强烈的揭顶作用出露中、下地壳岩石,下地壳增厚更显著,相应地青藏高原大量的剥蚀物充填到

相邻的地壳较薄的沉积盆地之中. 显然,青藏高原晚新生代构造隆升、岩石圈分层流变、地壳深部物质巨量汇聚不是用刚性岩石圈板块运动能够解释的.

青藏高原复杂的构造格局不是由某一个动力学过程一次完成的,也不能用一个模式解释青藏高原及其邻区所有地质和地球物理现象. 青藏高原现今构造面貌应该是在基底形成之后,经过青藏特提斯开合演化和青藏高原构造隆升这 2 个不同性质、不同尺度的构造过程叠加而成的,前者是以板块构造为核心的岩石圈动力学过程,后者是以盆山耦合、圈层作用为核心的大陆动力学过程. 本文侧重讨论青藏高原的大陆动力学过程,试图从岩石圈解体、下地壳物质流动、造山带与盆地熔合的思路出发,分尺度、分层块、分阶段研究青藏高原的地质和地球物理特征,探讨青藏高原的隆升机制.

1 青藏高原地壳结构

1.1 平面分块结构

从宏观上看,整体强烈隆升的青藏高原基本上被相对沉陷的四川盆地、塔里木盆地和锡瓦利克盆地所围限,盆地之间以东昆仑—西秦岭、帕米尔和横断山等 3 个构造结进行调节(图 1). 青藏高原与周边盆地之间的边界断层主要是大规模的倾向腹陆式

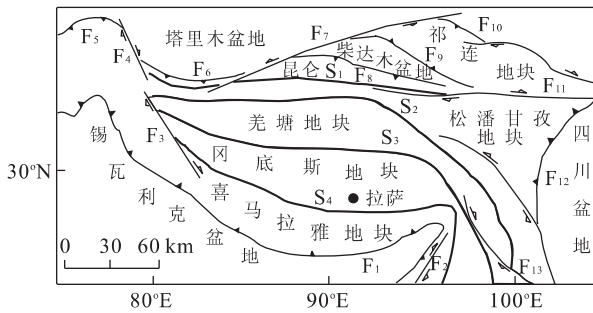


图 1 青藏高原构造略图

Fig. 1 Simplified tectonic map of Qinghai-Tibet plateau
 S₁. 南昆仑蛇绿岩带; S₂. 拉竹龙—金沙江蛇绿岩带; S₃. 班公湖—怒江蛇绿岩带; S₄. 雅鲁藏布江蛇绿岩; F₁. 主边缘逆冲断层; F₂. Sagaing 走滑断层; F₃. 喀喇昆仑走滑断层; F₄. 西昆仑走滑断层; F₅. 帕米尔逆冲断层; F₆. 西昆仑北缘逆冲断层; F₇. 阿尔金走滑断层; F₈. 柴南缘逆冲断层; F₉. 柴北缘逆冲断层; F₁₀. 祁连山逆冲断层; F₁₁. 东昆仑走滑断层; F₁₂. 龙门山逆冲断层; F₁₃. 鲜水河—红河走滑断层

叠瓦状逆冲断层系,部分区段以大型走滑断层系进行转换。青藏高原内部则由不同时期的蛇绿混杂岩分割成条块结构。

1.2 垂向分层结构

1.2.1 地质特征

青藏高原不同区带出露的岩石类型不同,综合起来大致能反映地壳的分层结构。最明显的、较小尺度的地壳分层表现在基底与盖层上,青藏高原边缘的喜马拉雅、龙门山造山带及内部的中羌塘隆起带、念青唐古拉隆起带基底与盖层之间发育大规模的滑脱拆离断层^[1~4],强烈变形变质的基底变质岩系与弱变质或未变质的层状沉积地层以拆离断层直接接触,原始的角度不整合关系被彻底改造,发生韧性转换。

青藏高原周边造山带相继发现代表大陆下地壳的榴辉岩和麻粒岩^[5~8]。据笔者最近研究,喜马拉雅造山带中段的高压基性麻粒岩产于韧性剪切带中,具有塑性变形、部分熔融、岩石相变、降压反应等特征,保存了地壳深部高温高压塑性变形的面貌。

1.2.2 地球物理特征

地球物理场能够较好地反映新生代的物性状态和构造活动。综合前人资料,青藏高原主要的地球物理特征是:(1)青藏高原显示与其范围一致的“重力盆地”^[9],总体呈现似盆状地壳结构,具有双倍的地壳厚度,但不存在双地壳结构,显示上、中、下 3 层地壳结构。例如在青藏高原腹部的措勤—三个湖一带,地壳厚度从南边的 78 km 变化到北边的 68 km,其中上地壳厚 25~31.5 km(包

括 9~11 km 的沉积盖层),中地壳厚 11~22 km,下地壳厚 27~36 km^[10];(2)青藏高原壳内存在强地震反射带^[11],特别是出现反射下地壳,可能是异常热状态导致岩石热软化,引起部分熔融和塑性流动。在藏南出现多层向北缓倾的地震反射,地壳底部为新生的莫霍面反射,特提斯喜马拉雅 30~40 km 连续的反射层可能是由喜马拉雅南缘逆冲断层系根带的韧性剪切带引起的,而最上部 10 km 左右的反射层基本上代表了藏南拆离系延伸至深部的伸展性韧性剪切带;(3)青藏高原壳内低速层十分发育^[10~12],青藏高原南部一般出现 2 个低速层,一个分布在下地壳,深度在 50 km 左右,厚度较大,P 波速度主要在 7.2~7.4 km/s,上部低速层深度为 15~25 km,一般厚 3~6 km,P 波速度主要在 5.6~5.7 km/s;青藏高原北部往往只有一个低速层;(4)青藏高原发育壳内高导低阻层^[10,13~15],并与壳内低速层的分布范围和分布规律基本相同,大致以中羌塘为界,青藏高原南部出现多层低阻层,而北部只有一个低阻层;(5)青藏高原存在异常热结构,总体而言,青藏高原具有大陆活动区的热结构,但是内部存在明显的差异,青藏高原南部为热壳冷幔型地温场,青藏高原中部为热壳热幔型地温场,青藏高原北部为冷壳冷幔型地温场^[16];(6)青藏高原具有明显的剩余重力异常^[9],在喜马拉雅造山带达 $69.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,说明地壳下部存在剩余质量,而青藏高原周边沉积盆地显示重力负异常;(7)青藏高原地壳下部具有低 Q 值、低泊松比特征^[17],可能与基性成分增多、热活动较强、岩石粘度较低有关。

1.2.3 地震特征

青藏高原地震震源深度分布具有规律性,表现为大多数地震为浅源地震,震源深度集中在 15~40 km 范围内^[12],是壳内多震层。藏南的震源面略向北倾斜,藏北的震源面略向南倾斜,而且,下地壳地震震源极少(图 2)。青藏高原地震震源

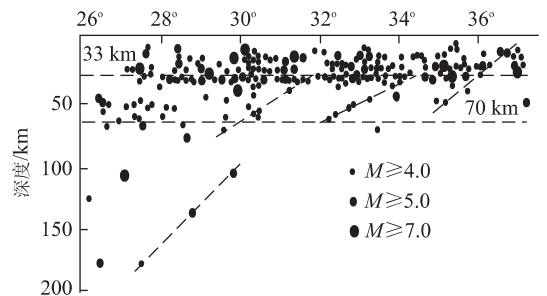


图 2 青藏高原震源深度^[12]

Fig. 2 Focal depth of Qinghai-Tibet plateau^[12]

不是沿着某一个俯冲带分布,而是沿着中上地壳脆性层与下地壳韧性层之间的脆—韧性过渡带分布,下地壳处于高温固态流变状态而发生非地震式蠕变,长期的应力积累导致地壳上部摩擦滑动域与地壳下部韧性变形域通过近水平的脆—韧性剪切带发生解耦。

2 青藏高原构造演化

青藏高原现今构造格局是由基底形成阶段、特提斯裂解与聚合阶段和青藏高原隆升阶段的构造痕迹复合叠加而成。每个构造发展阶段所处的地质背景和构造体制不同,应该存在不同的动力学机制。

2.1 基底形成阶段

青藏高原周边造山带和内部隆起带不同程度地出露前寒武纪基底。青藏高原北部的古元古代金水口岩群、德令哈杂岩、阿尔金山岩群都是一套中、深变质岩,以花岗质片麻岩为主,不同程度地出露代表大陆下地壳的麻粒岩和榴辉岩;中—新元古代的小庙岩群、万宝沟群、达肯大坂群等以大理岩、石英岩、片岩为主。青藏高原南部的聂拉木岩群和南迦巴瓦岩群主体也是花岗质片麻岩,最近笔者等将聂拉木岩群中含少量表壳岩系和高压麻粒岩的正片麻岩分解出来,称为马卡鲁杂岩,片麻岩锆石 SHRIMP 年龄为 1.8 Ga 和 2.2~2.5 Ga^①;其上的江东岩组为石英岩、大理岩和片岩组合。青藏高原内部的念青唐古拉岩群片麻岩中也获得 2.5 Ga 左右的年龄^②,在念青唐古拉东南的鲁玛拉一带出露一套与小庙岩群、江东岩组可对比的大理岩、石英岩和片岩岩石组合。青藏高原基底的岩石组合、变质作用、形成时代有一定的可比性,说明青藏高原各块体曾经在一个统一的超大陆内,Rodinia 超大陆的裂解与聚合造成青藏高原南部与北部基底的差异改造。超大陆形成与演化受全球动力学制约,可能与地球外核熔融流体层的热散集过程及与核处系统的耦合作用有关。

2.2 青藏特提斯裂解与聚合阶段

青藏高原存在多条蛇绿混杂带,对于哪条缝合带作为冈瓦纳古陆与欧亚古陆之间的边界一直争论不休。青藏高原不存在一个主导的或统一的古板块

边界,青藏特提斯的演化应该是由北向南迁移的,大致可分为 4 个转换期,即原特提斯消减与古特提斯同步扩张期、古特提斯消减与中特提斯同步扩张期、中特提斯消减与新特提斯同步扩张期和新特提斯消减与印度洋扩张期。

潘裕生等^[10]在西昆仑发现青藏高原第五缝合带,提出青藏高原北缘存在原特提斯,于加里东期闭合。与碰撞有关的榴辉岩的全岩—金红石—石榴石—绿辉石 Sm—Nd 等时线年龄为(500±10)Ma、锆石 U—Pb 年龄为(503.9±5.3)Ma^[18]。

古特提斯反映在青藏高原北部及东北部龙木错—金沙江、阿尼玛卿等多条蛇绿岩带上,在古生代裂解,具多岛小洋盆性质^[19],至晚三叠世封闭。

在古特提斯消减和羌塘地块北移并拼贴到欧亚古陆之上的同时,班公湖—怒江构造带在石炭—三叠纪稳定浅海盆地的基础上相应地发生岩石圈伸展和裂隙,形成具有活动性质和蛇绿岩组合的中特提斯活动海盆。主要活动时间为晚三叠世—早侏罗世,于晚侏罗世至早白垩世封闭。

在班公湖—怒江构造带收缩过程中,雅鲁藏布江构造带同步扩张。大约在晚侏罗—早白垩纪,随着拉萨地块的快速北移,新特提斯在稳定大陆边缘基础上发生岩石圈伸展裂隙,形成雅鲁藏布江蛇绿岩。中特提斯的关闭阻止了拉萨地块进一步向北运动,新特提斯随之向北俯冲消减,形成巨大的冈底斯火山岩浆岛弧带。在新特提斯消减初期(110~80 Ma),俯冲作用造成冈底斯南侧形成大量的石英闪长岩和花岗岩。在消减晚期(70~40 Ma),碰撞作用造成冈底斯中部和北部发育石英二长岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩和林子宗组火山岩。喜马拉雅东、西构造结 55~40 Ma 峰期变质的榴辉岩和高压麻粒岩是板块碰撞的结果^[20~21],而喜马拉雅中段高压基性麻粒岩 30 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄说明这一区段存在较晚封闭的残余海盆^[22]。新特提斯的消减可能与印度洋的同步扩张有关。

青藏特提斯自北而南的开合演化是造陆运动,导致冈瓦纳古陆北缘分裂的一系列微陆块相继拼贴在欧亚古陆的南缘,造成欧亚古陆南缘侧向增生,地壳发生恢复作用。由特提斯域过薄地壳恢复到正常地壳厚度,是在板块体制下完成的岩石圈动力学过程,受地幔软流层的制约。

2.3 青藏高原隆升阶段

青藏高原整体具有一个巨大宽缓的壳根,根带

①李德威,张雄华,廖群安,等. 1:25 万定结县幅、陈塘区幅区域地质调查报告,2003. 1—389.

②江万,胡道功,吴珍汉,等. 拉萨地块结晶基底的年龄问题讨论. 青藏高原及邻区地质与资源环境学术讨论会,2003. 53.

在青藏高原的腹部,周边为昆仑、龙门山、喜马拉雅等造山带,内部有念青唐古拉、中羌塘等隆起带,它们整体隆升,可以当作是一个巨大的复合造山带。大量资料表明,这个复合造山带主体结构是在晚新生代形成的。

2.3.1 隆升速率 不同学者从不同角度、采用不同方法获得青藏高原不同时期的隆升高度和隆升速率,一致认为青藏高原的构造隆升主要发生在 20 Ma 以后^[23,24]。据肖序常和王军^[24]研究,青藏高原的隆升由慢变快,各种资料显示至 20 Ma 为止,青藏高原的海拔高度一般不超过 600 m,25~11 Ma 隆升速率在 0.13~0.62 mm/a 之间,10~3 Ma 隆升速率在 0.30~2.05 mm/a 之间,更新世至全新世为快速隆升期,隆升速率在 1.6~5.35 mm/a 之间,近期(0.5 Ma 以来)隆升极快,速率为 4.5 mm/a(喜马拉雅可达 10~12 mm/a 之间)。

2.3.2 隆升响应 青藏高原晚新生代的构造隆升现象典型,形迹多样,主要有:(1)青藏高原不仅与周边的四川盆地、塔里木盆地和锡瓦利克盆地形成巨大的地貌反差,而且在青藏高原内部产生大量冰蚀地貌、湖积阶地、河流阶地、夷平面等构造地貌。(2)青藏高原及邻区出现多级盆山体系,青藏高原周边造山带隆升与外侧前陆盆地沉降同步,并在时空结构、物质运动、构造作用等方面显示出明显的耦合关系(图 3)。造山带快速隆升、强烈剥蚀和揭顶作用形成近距离的山麓堆积和盆地边缘巨厚的磨拉石建

造。例如喜马拉雅造山带南麓山前锡瓦利克坳陷带中锡瓦利克群厚度达 6 000 余 m 的磨拉石沉积主要是喜马拉雅造山带中上地壳的剥蚀物。青藏高原内部还有许多次级盆山体系,如念青唐古拉隆起和羊八井地堑。(3)青藏高原隆升山体向外侧向扩展(图 3),在昆仑、龙门山、喜马拉雅等山前形成倾向腹陆式叠瓦状逆冲断层系,如喜马拉雅造山带与锡瓦利克前陆盆地之间的 MCT、MBT 和 MFT,呈前展式扩展,MCT 形成于 15~25 Ma,位移量至少是 140 km^[25];MBT 形成于 11 Ma 左右,MBT 的位移量 15~25 km,位移速率大约为 10 mm/a^[26];MFT 逆冲断到锡瓦利克群磨拉石建造之上,形成时代为 2.1~1.4 Ma^[27]。(4)青藏高原隆升过程中不仅发育挤压构造,而且广泛存在伸展构造^[1~4],伸展构造型式多样,包括高喜马拉雅、拉轨岗日、龙门山、中羌塘等变质核杂岩^[2,3,28],以藏南拆离系为代表的拆离断层^[1],定结—申扎、亚东—羊八井等近南北向大型正断层,伦坡拉、鄂郁等新生代断陷盆地和双湖、羊八井等晚新生代地堑。(5)青藏高原及邻区发育共轭产出的走滑断层(图 3),与青藏高原隆升基本同步^[29~31],构成盆地与青藏高原周边造山带的转换断层,指示盆地与青藏高原楔入。如锡瓦利克盆地外侧与东、西构造结过渡带发育巨型 Sagaing 右行走滑断层和 Chamam 左行走滑断层;塔里木盆地与青藏高原北部通过西昆仑和喀喇昆仑右行走滑断层和阿尔金左行走滑断层进行转换;四川盆地与青藏高原东部则出现显示多期活动的东昆仑走滑断层和红河—鲜水河走滑断层。(6)青藏高原晚新生代火山岩浆活动显著、分区性明显。喜马拉雅造山带只有壳内熔融形成的淡色花岗岩,没有发现中酸性火山岩,大多数花岗岩体以岩基或岩株的形式产于高喜马拉雅和拉轨岗日变质杂岩中,少数沿藏南拆离系呈似板状分布。冈底斯构造带虽然出露晚新生代淡色花岗岩,但相比而言火山岩更为发育,冈底斯南部较广泛的分布以上新世鄂郁群嘎扎村组流纹岩、凝灰岩为代表,最近在冈底斯发现钾质火山岩和碱性正长岩^[32]。到羌塘、可可西里和昆仑,只有大量的晚新生代火山岩,从南向北,火山岩由高钾钙碱性系列变为钾玄岩系列,形成时代也由老变新^[33]。(7)近年来在青藏高原周缘造山带相继发现高压麻粒岩和榴辉岩^[5~8]。它们具有强烈的塑性变形、韧性剪切和退变质现象。喜马拉雅代表下地壳的麻粒岩中一组年轻的年龄数据为大约 11 Ma^[21]和 17 Ma^[22],代表高压

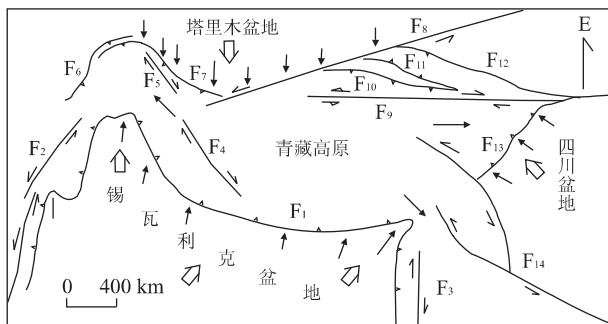


图 3 青藏高原与周边沉积盆地的耦合关系

Fig. 3 Coupling relationship between Qinghai-Tibet plateau and surrounding basins

F₁. 主边缘逆冲断层; F₂. Chamam 走滑断层; F₃. Sagaing 走滑断层; F₄. 喀喇昆仑走滑断层; F₅. 西昆仑走滑断层; F₆. 帕米尔逆冲断层; F₇. 西昆仑北缘逆冲断层; F₈. 阿尔金走滑断层; F₉. 东昆仑走滑断层; F₁₀. 柴南缘逆冲断层; F₁₁. 柴北缘逆冲断层; F₁₂. 祁连山逆冲断层; F₁₃. 龙门山逆冲断层; F₁₄. 鲜水河—红河走滑断层

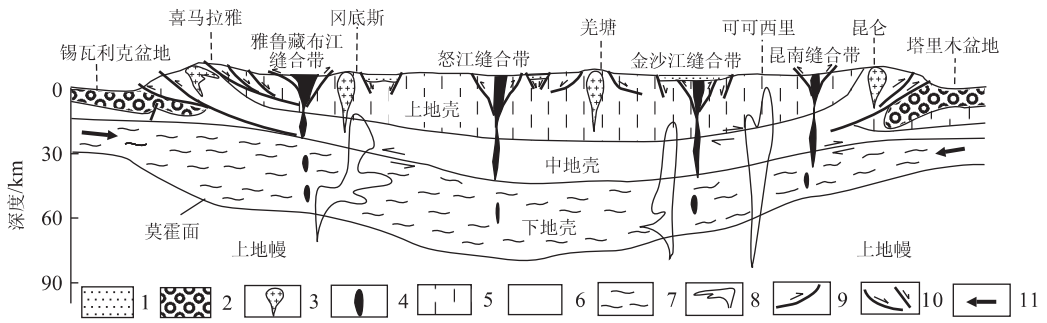


图 4 青藏高原隆升的层流构造模式

Fig. 4 Laminar tectonic model for uplift of Qinghai-Tibet plateau

1. 陆相碎屑岩; 2. 磨拉石建造; 3. 花岗岩; 4. 蛇绿岩; 5. 上地壳; 6. 中地壳; 7. 粘塑性下地壳; 8. 部分熔融; 9. 逆冲断层; 10. 正断层和拆离断层; 11. 下地壳层流方向

麻粒岩的退变质作用年龄,反映喜马拉雅大规模快速隆升过程中伸展绝热降压环境。(8)青藏高原地壳存在地球物理场异常现象,主要表现是巨大的重力负异常、广泛发育的壳内低速层和低阻层、明显的地壳深部低 Q 值和低泊松比^[17]、异常高的大地热流值(特别是青藏高原南部)。

上述地貌、地质和地球物理现象表明青藏高原晚新生代快速隆升、巨量物质中心式汇聚、地壳分层流变、盆山相互作用不是用刚性岩石圈板块碰撞能够解释的,必须引入大陆动力学新思路。

3 青藏高原隆升机制

通过对青藏高原进行上述分尺度、分层块、分阶段的区域构造解剖,从大陆岩石圈解体、下地壳物质流动、造山带与盆地熔合的新思路出发^[34~36],认为青藏高原构造隆升是在青藏特提斯经过开合演化形成镶嵌的欧亚大陆之后,由下地壳层流作用引起盆山作用和圈层耦合^③,形成青藏高原现今构造格局。

青藏高原岩石圈不均一性和分层结构明显,剥露的下地壳深变质岩和地球物理资料一致表明下地壳受热软化而发生韧性剪切和塑性流变,地壳上部被强烈剥蚀却具有双倍地壳的青藏高原与接受巨量沉积而地壳相对减薄的周边盆地之间,不仅存在地表现层的物质机械迁移,而且在地壳下部也存在高温流变物质从周边盆地向青藏高原的横向迁移,构成具有成生联系的物质动态循环体系(图 4)。

在地壳深层次,锡瓦利克盆地、塔里木盆地和四

川盆地的莫霍面相对上凸,地壳底部可能因底侵作用而发生壳幔反应和部分熔融,引起物质软化和流动。幔隆区热流物质处于势能—重力失稳状态,加上顺层剪切应力的作用,低粘度物质沿着下地壳软流层向青藏高原慢坳区汇聚,随着深部巨量物质的迁移,青藏高原地壳增厚的同时下地壳异常增厚,并形成统一的壳根。下地壳的物质顺层流动还改造了先期形成的蛇绿岩带的根部,产生下地壳低速层、低阻层和反射层。盆地地壳持续的层流运动带动盆地刚性中上地壳向青藏高原多向俯冲和侧向楔入,在平面上通过共轭走滑断层进行调整,在剖面上,青藏高原地壳下部挤压收缩、上部侧向扩展,腹部伸展滑脱和拉伸断陷,周边逆冲推覆和重力滑覆,在盆山过渡带形成叠瓦状逆冲推覆构造。造山带的快速隆升提供了降压环境,不仅造成麻粒岩和榴辉岩的退变质,而且为基底变质岩石部分熔融产生酸性花岗岩浆提供了有利条件。伴随中、深变质杂岩上升和淡色花岗岩的侵位,在造山带核部发生热隆伸展,形成厚壳变质核杂岩和剥离断层系。下地壳软流层的韧性流动与上地壳脆性层的断块运动导致顺层拆离和脆韧性转换,下地壳韧性变形域与上地壳摩擦滑动域通过近水平的脆—韧性剪切带解耦,形成壳内多震层。隆升的山体必然遭受强烈的剥蚀,来自青藏高原周边造山带的大量剥蚀物快速搬运到相邻的沉积盆地,在盆地边缘坳陷带形成巨厚的磨拉石建造。

4 结论与讨论

(1)青藏高原现今构造格局的形成是在基底形成的基础上,经历了青藏特提斯构造域开合转换和

③Li Dewei. Continental dynamic model for uplift of the Qinghai-Tibet plateau (abstract). 30th IGC, Beijing, 1996.

青藏高原晚新生代构造隆升两大构造发展阶段。前者是板块体制下发生的由地幔软流层(软流圈)驱动的岩石圈动力学过程,导致海陆变迁和大陆增生,后者是板内体制下由地壳软流层(下地壳)驱动的大陆动力学过程,造成壳内物质动态循环调整,青藏高原地壳增厚和快速隆升,周边沉积盆地同步沉降。(2) 青藏特提斯构造域微板(陆)块的相继碰撞是造陆运动,表现为由挤压变形的蛇绿岩透镜体和强烈褶皱的海相岩层组成的增生楔,将一系列微板(陆)块焊接在欧亚古陆的南缘,导致先前岩石圈和地壳强烈减薄特提斯域地壳厚度正常化,产生壳幔混源深成侵入体、弧火山岩和钙碱系列火山岩。(3) 青藏高原隆升是在具有软流层性质的下地壳层流作用下发生盆山作用和圈层耦合的结果。这一板内造山造盆大陆动力学过程与同时进行的更高尺度的岩石圈动力学过程之间应该存在耦合关系,要从太平洋板块和印度洋板块与欧亚板块相互作用的宏观背景进行研究和探索。

参考文献:

- [1] Burchfiel B C, Chen Z L, Hodges K V, et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt [J]. Geological Society of America, Special Paper, 1992, 269: 1—51.
- [2] 李德威. 喜马拉雅造山带的构造不对称演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1992, 17(5): 539—545.
LI D W. On tectonic asymmetrical evolution of the Himalayan orogenic belt [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1992, 17(5): 539—545.
- [3] Yin A, Kapp P A, Murphy M A, et al. Significant Late Neogene east-west extension in northern Tibet [J]. Geology, 1999, 27: 787—790.
- [4] Pan Y, Kidd W S F. Nyainqentanghla shear zone: A Late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan plateau [J]. Geology, 1992, 20: 775—778.
- [5] Pognante U, Spencer D A. First record of eclogite from the Himalayan belt, Kaghan valley, northern Pakistan [J]. Eur J Mineral, 1991, 3: 613—618.
- [6] Zhong D, Ding L. Discovery of high pressure basic granulites in Namjagbarwa area, Tibet, China [J]. China Sci Bull, 1996, 41: 87—88.
- [7] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报, 1998, 43(14): 1544—1548.
YANG J S, XU Z Q, LI H B, et al. Discovery of eclogite at northern margin of Qaidam basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(14): 1544—1548.
- [8] 李德威, 廖群安, 袁晏明, 等. 喜马拉雅造山带中段核部杂岩中基性麻粒岩的发现及其构造意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(1): 80, 96.
LI D W, LIAO Q A, YUAN Y M, et al. Discovery and significance of basic granulites in the complexes in the middle Himalaya [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(1): 80, 96.
- [9] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1—236.
XIAO X C, LI T D, LI G C, et al. Tectonic evolution of the lithosphere of the Himalaya: General principle [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1—236.
- [10] 潘裕生, 孔祥儒. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 1—426.
PAN Y S, KONG X R. Lithosphere structure, evolution and dynamics of Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998. 1—426.
- [11] Zhao W, Nelson K D, Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet [J]. Nature, 1993, 366: 557—559.
- [12] 崔作舟, 尹周勋, 高恩元, 等. 青藏高原速度结构和深部构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1—112.
CUI Z Z, YIN Z X, GAO E Y, et al. Velocity structure and deep-seated structure of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1—112.
- [13] 张胜业, 魏胜, 王家映, 等. 西藏羌塘盆地大地电磁测深研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(2): 198—203.
ZHANG S Y, WEI S, WANG J Y, et al. Magnetotelluric sounding in the Qiangtang basin of Xizang (Tibet) [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(2): 198—203.
- [14] Li D W, Wang J Y, Furlong K P. Crustal structure of Qiangtang terrane in the central Tibetan plateau [D]. AGU, 1998. 79(F795).
- [15] Wei W B, Martyn U, Alan J, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. Science, 2001, 292: 716—718.
- [16] Wu G, Xiao X, Li T, et al. Lithospheric structure and

- evolution of the Tibetan plateau: The Yadong-Golmud geoscience transect [J]. *Tectonophysics*, 1993, 219: 213—221.
- [17] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution [J]. *Nature*, 1997, 387: 37—42.
- [18] 张建新, 张泽民, 许志琴, 等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm—Nd 和 U—Pb 年龄 [J]. *科学通报*, 1999, 44(10): 1109—1112.
ZHANG J X, ZHANG Z M, XU Z Q, et al. Sm—Nd and U—Pb ages of eclogites in the western Altun [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(10): 1109—1112.
- [19] 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22(4): 339—342.
YIN H F, ZHANG K X. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(4): 339—342.
- [20] De Sigoyer J, Chavagnac V, Toft J, et al. Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the northwest Himalaya: Multichronology of the Tso Moriri eclogites [J]. *Geology*, 2000, 28: 487—490.
- [21] Ding L, Zhong D L, Yin A, et al. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192: 423—438.
- [22] 李德威, 廖群安, 袁晏明, 等. 喜马拉雅造山带中段日玛那麻粒岩锆石 U—Pb 年代学 [J]. *科学通报*, 2003, 待刊.
LI D W, LIAO Q A, YUAN Y M, et al. U—Pb zircon ages of Rimana granulites in the middle Himalaya [J]. *Chinese Sci Bull*, 2003, (in press).
- [23] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet [J]. *Science*, 1992, 255: 1663—1670.
- [24] 肖序常, 王军. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述 [J]. *地质论评*, 1998, 44(4): 372—381.
XIAO X C, WANG J. A brief review of tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geological Review*, 1998, 44(4): 372—381.
- [25] Schelling D. The tectonostratigraphy and structure of the eastern Nepal Himalaya [J]. *Tectonics*, 1992, 11: 925—943.
- [26] Meigs A J, Burbank D W, Bec R A. Middle-Late Miocene (>10 Ma) formation of the Main Boundary thrust in the western Himalaya [J]. *Geology*, 1995, 23: 423—426.
- [27] Pivnik D A, Johnson D G. Depositional response to Pliocene-Pleistocene foreland partitioning in northwest Pakistan [J]. *GSA Bulletin*, 1995, 107: 895—922.
- [28] 李德威, 刘德民, 廖群安, 等. 藏南萨迦拉轨岗日变质核杂岩的厘定及其成因 [J]. *地质通报*, 2003, 22(5): 7—11.
LI D W, LIU D M, LIAO Q A, et al. Definition and significance of the Lhagoi Kangri metamorphic core complexes in Sagya, southern Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(5): 7—11.
- [29] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics [J]. *Nature*, 1976, 294: 319—324.
- [30] Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 2787—2838.
- [31] 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系 [M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1—249.
CUI J W, TANG Z M, DENG J F, et al. Altun fault system [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1—249.
- [32] 马润则, 刘登忠, 陶晓风, 等. 西藏措勒地区发现第三纪富钾岩浆岩 [J]. *地质通报*, 2002, 21(11): 728—731.
MA R Z, LIU D Z, TAO X F, et al. Discovery of Tertiary potassium-rich magmatic rocks in the Coqen area, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(11): 728—731.
- [33] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1—180.
DENG W M. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the northern Qinghai-Xizang plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1—180.
- [34] 李德威. 大陆构造样式及大陆动力学模式初探 [J]. *地球科学进展*, 1993, 8(5): 88—93.
LI D W. The style of continental structure and model of continental dynamics [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 88—93.
- [35] 李德威. 再论大陆构造与动力学 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1995, 20(1): 19—26.
LI D W. On continental tectonics and its dynamics [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(1): 19—26.
- [36] 李德威, 纪云龙. 大陆下地壳层流作用及其大陆动力学意义 [J]. *地震地质*, 2000, 22(1): 89—96.
LI D W, JI Y L. Laminar flow in the lower continental crust and its significance for continental dynamics [J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(1): 89—96.

A New Model for Uplifting Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau

LI De-wei

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet plateau, the best field laboratory for continental dynamics, involves many scientific problems in the frontiers and hotspots of modern earth sciences. Up to now, a lot of models including plate tectonics cannot rationally explain key geological and geophysical phenomena related formation and evolution of the plateau. According to a new idea involving coupling between the lower crust and upper crust, orogens and basins, this paper approaches the lower crust laminar tectonic model for uplifting mechanism of Qinghai-Tibet plateau by tectonic analysis of different scales, levels and blocks, multistage evolution. The crustal thickening and tectonic uplift of Qinghai-Tibet plateau result from the thermal softening rocks in the lower crust flow from the Himalayan foreland basin, Tarim basin and Sichuan basin to the plateau during Late Cenozoic era.

Key words: uplifting mechanism; lower crust; laminar tectonics; continental dynamics; Qinghai-Tibet plateau.

《地球科学——中国地质大学学报》

2004 年 第 29 卷 第 1 期 要目预告

南海 ODP1143 站底栖有孔虫 <i>Cibicidoides</i> 与 <i>Uvigerina</i> 稳定氧碳同位素值的均衡试验	田 军等
南海南部普林虫与“中更新世革命”	徐 建等
长江源区新生代火山岩的系列及成因	魏君奇等
黄陵地区基性岩墙群的地球化学特征及其地质意义	曾 雯等
松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律	廖资生等
渤海湾盆地东营凹陷 S6 界面的构造变革意义	任建业