

# Summary and Current Status of the Research Models for the Tibetan Plateau Uplift

Qinzhong Ma

Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai  
Email: mqz1234@sina.com

Received: May 9<sup>th</sup>, 2016; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2016; published: May 31<sup>st</sup>, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

For more than half a century, many geoscientists at home and abroad have carried out multi-disciplinary research on the formation and evolution of the Tibetan Plateau. Various views and hypothesis of the tectonic formation models appeared successively. With the development of science and technology as well as the steady accumulation of the latest data, some existing models constantly are challenged and corrected, and new models unceasing put forward. In this paper the tracks of eleven models are followed and reviewed concisely, and the problem of the lack of some patterns and questions also are introduced briefly. The research status about the tectonic evolution and deformation models are also teased. It is hoped to benefit to comprehensively understanding the tectonic evolution and deformation models of the Tibetan Plateau.

## Keywords

Tibetan Plateau, India Plate, Eurasian Plate, Uplift Mechanism

---

# 青藏高原隆生演化变形模式研究进展

马钦忠

上海市地震局, 上海  
Email: mqz1234@sina.com

收稿日期: 2016年5月9日; 录用日期: 2016年5月24日; 发布日期: 2016年5月31日

文章引用: 马钦忠. 青藏高原隆生演化变形模式研究进展[J]. 自然科学, 2016, 4(2): 229-241.  
<http://dx.doi.org/10.12677/ojns.2016.42028>

## 摘要

多半个世纪以来国内外许多地球科学家对青藏高原的形成和演化进行多学科研究,各种构造变形模式的观点和假设相继出现,随着科学技术的发展和最新资料的不断积累,已有的一些模式不断被质疑、修正,新的模式不断出现。本文对11种模式进行追踪梳理、简洁综述,对一些模式的不足和质疑问题也予以简介,并对青藏高原构造演化变形模式研究现状进行了梳理,以期对全面认识青藏高原构造演化变形模式研究的过程有所裨益。

## 关键词

青藏高原, 印度板块, 欧亚板块, 隆升机制

## 1. 引言

当始新世中晚期(约40 Ma)印度板块经过长期漂移与欧亚大陆终于发生印-欧板块碰撞后,特提斯残海消失,青藏地块完全形成,青藏高原地壳不断缩短、加厚,造就了全球构造上独特的地壳结构类型和统一的封闭构造系统。青藏高原隆升的研究吸引了全世界大量著名地球科学家的注意,它被人们视为探索地球奥秘、研究地球表面各圈层运动相互联系规律及建立大陆板块构造模式的关键地区。青藏高原就其高度和规模来说都是大陆上最宏伟的构造,它的隆升和陆壳增厚是岩石圈演化的最终结果,是现今地球动力学,特别是岩石圈变形过程的反映。新生代青藏高原的隆升过程及相伴随的重大地质事件倍受世界关注[1][2],各国学者从不同角度围绕青藏高原成为统一整体的时间、隆升阶段性和空间差异性、青藏高原作为高海拔高原形成的时间、青藏高原隆升的动力机制等重大事件进行了深入的研究,都把构造变形形式的研究作为探讨青藏高原陆壳增厚和隆升机制的关键。因此全面完整地认识和理解青藏高原隆升演化变形模式及其研究过程是很重要的。

## 2. 青藏高原构造演化变形模式研究概况

### 2.1. 双地壳模式

早在1924年,为了解释西藏地壳为什么比正常地壳厚一倍的问题,瑞士地质学家 E. Argrand [3]根据大陆漂移理论就提出了印度大陆的一部分滑潜到西藏地壳之下的观点。魏格纳的理论混淆了陆壳和岩石圈板块,因此 Argrand 设想,印度大陆的一部分滑潜到原地的西藏地壳之下,因而在西藏存在着相叠加的两个正常陆壳,此观点即为最早的俯冲模式,以后几十年间断续有人赞同。1973年, C. Powell 和 Conaghan [4]又继续完善了俯冲模式,他们认为印度大陆向青藏高原地壳下面的俯冲作用导致了西藏双陆壳结构的形成和均一海拔厚度的模式,这就是双地壳模型(图1)。

这个模式认为,青藏高原的隆升是由印度板块俯冲到青藏高原地壳之下所致。自从该模式提出后极大地促进了人们对青藏高原隆升机制的认识,为进一步研究高原隆升演化机制起到了有力的推动作用。但在该模型中他们并没有提供一种力学过程来支持他们的模型。后来,利布特里[5]认为由于正常的大陆板块亦包括地幔很厚的一部分,按双地壳模型的话印度板块应该滑潜到亚洲岩石圈内的壳幔之间,但从力学的观点看这是不可能的,另外,根据深部探测,青藏高原之下的上地幔 S 波低速区与冷的印度陆壳俯冲到高原之下的存在是不一致的[6]。

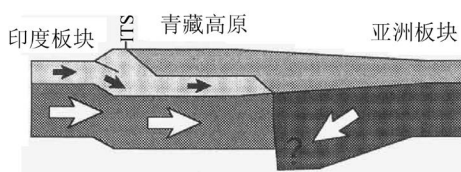


Figure 1. The double crust model for the formation of underthrusting of the Indian lithosphere under the Tibetan plateau  
图 1. 青藏高原构造变形双地壳模型

## 2.2. 地壳挤压缩短模式

与双地壳模式截然不同的另一理论就是地壳挤压缩短模式(图 2)。1973 年, J. Dewey 和 K. Burke [7] 提出整个青藏高原发生着南北向均匀的塑性收缩, 认为青藏岩石圈在第三纪之后大规模地缩短, 甚至缩短到 50%, 并由此产生了近乎比正常地壳厚一倍的厚地壳, 比如, 每年缩短量为 3 cm, 则地壳经过 35 Ma 即可以加厚一倍, 这就导致了青藏高原的地表隆升。后来, 这一模式相继得到了 England、Mckenzie [8] 及 Vilotte 等人[9]的支持, 他们也认为由于印度板块和欧亚大陆板块碰撞后整个青藏地区大陆岩石圈以相当连续的方式缩短增厚。

这一模式认为, 在青藏地体之下并没有吸收印度次大陆的地壳, 印度板块的作用就好像是有一个锯齿形末端的刚性块体向北推挤。但后来又有人提出反对意见, L. 利布特里[5]认为在拉萨附近, 覆盖在二叠纪和早侏罗世海相褶皱灰岩之上的红色砂岩层及安山熔岩(年龄 60 Ma)并未显示任何挤压痕迹。而 Harrison 等人[10]认为指示藏北大陆碰撞后地壳垂直运动的风火山始新世粗粒红层的存在是与一种随着时间均匀向北迁移的地壳增厚机制不一致, 而且他们还认为这种模式不能解释曾在大陆碰撞期间表现为重要变形形式的逆冲和走滑断层的出现, 认为该模式要求在青藏高原之下所有深度上的岩性都是低强度的, 但这是不切合实际的。

## 2.3. 大陆灌入模式

W. Zhao 和 W. J. Morgan 于 1985 年[11]和 1987 年[12]提出另一种青藏高原构造变形模式, 称其为大陆灌入说(图 3)。该模式认为在青藏高原的下地壳存在着一种粘滞性相当低的流体, 印度板块向北推进并逐渐地灌入到了这种非常弱的西藏下地壳中, 在这一灌入过程中不需要在脆性的上地壳中产生大量的逆冲运动, 因此, 整个青藏高原就会在印度板块的灌入过程所产生的液体压力作用下均匀地隆升, 该过程就类似于液压千斤顶的工作原理。

后来也有人认为该模式只要求在印度大陆贯入的地方岩性是低强度的, 况且青藏高原大部分隆起和剥蚀发生在个别的时段里, 而非发生在新生代以来的均匀时段里。李吉均等1979年研究表明, 青藏高原的隆起有三个特征,即高原隆起的整体性、差异性和阶段性[13], 后续青藏高原隆生时代研究的大量地质与地貌学证据[14]-[19]均显示高原隆起的时间段是不均匀的且存在着差异性。

## 2.4. 大陆挤出模式

Tapponnier 等人[20]-[25]于上世纪80年提出了大陆挤出模式(图4), 该模式认为印度板块与欧亚大陆碰撞之后, 流变学强度较小的亚洲大陆挤压缩短了近1500~2000 km, 形成了厚度几乎是正常大陆地壳(35~40 km)两倍的青藏高原增厚地壳(60~70 km)。当青藏高原隆起到一定的海拔高度后就再也不能继续上升了, 原因是处于高温高压条件下的深部地壳在其上覆岩石的重力载荷下已作韧性流动, 青藏高原下面深部地壳的物质在差应力作用下不得不向东(太平洋方向)侧向运动, 离开青藏高原的腹地向高原的边缘涌进, 以便在印度板块前进的道路上腾出空间, 从而使青藏高原随时间推移不断向北、向东北、向东和东南扩展。

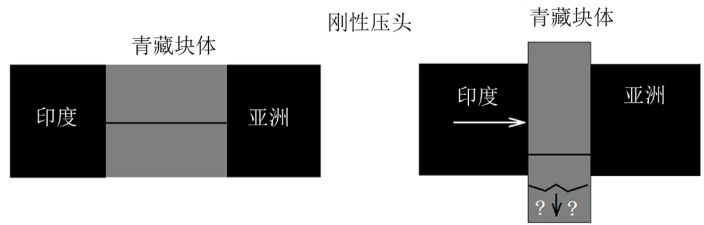


Figure 2. The rigid indenter model for the formation of the Tibetan Plateau  
图 2. 青藏高原构造变形地壳压缩短模式

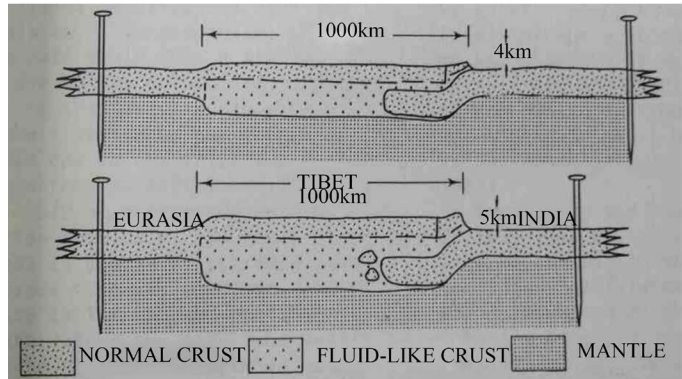


Figure 3. Injecting and hydraulic uplifting model for the formation of the Tibetan Plateau (according to W. Zhao *et al.* [11])  
图 3. 青藏高原构造变形大陆灌入模式(根据 W. Zhao 等[11])

青藏高原深部地壳高温塑性物质推拥着高原周边的地块向压力低的地方侧向逃逸。与此同时，青藏高原内部一系列近东西向的断裂带的性质也从原先的挤压推覆转变成侧向走滑。

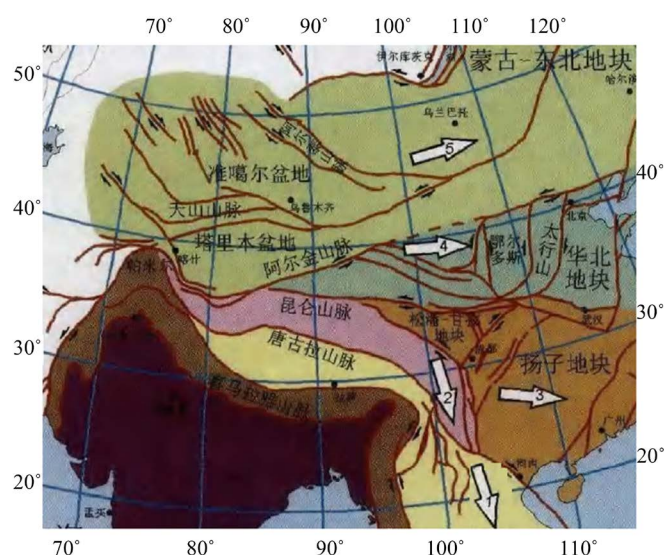
该模式认为印度板块向北汇聚量的 40%~60% 是由水平面应变 - 变形作用集中在走滑断层系，导致汇聚地块大规模横向挤出而引起的。他们估计自大陆碰撞以来，在第三纪中期仅红河断裂带的左旋运动也许就已挤出了欧亚大陆总缩短量的 15% [27]。但利布特里认为，从 1911 年到 1967 年，青藏高原南北向挤压量得平均值为每年 2 cm，垂直伸张量的平均值近乎于此相等，而东西向伸张量不足垂直伸张量得十分之一，南北向的挤压特别引起的是垂直方向的伸张量[5]。另外，Harrison 等人认为简单的物质质量平衡计算将挤出作用对汇聚量的贡献限制在不超过大陆总汇聚量的三分之一[10]。

### 2.5. 小尺度地幔对流模式

还有一种假说认为地壳不用变厚也能引起高原隆升。1981 年 Houseman 等人认为[28]青藏高原的部分岩石圈地幔被更热的、密度更小的软流圈物质剥离和取代(小尺度地幔对流作用)，这就会减少高原岩石圈柱体的质量，消除负浮力的作用，并因此而使地壳均衡抬升，其隆升高度可达 1~3 km 之高。后来 P. Molnar 于 1993 年也认为[29]青藏高原突然隆升的过程应该是高原岩石圈下部不稳定的地幔热对流对岩石圈下部的剥离作用所导致的。但他认为如果地壳缩短和增厚会导致(5.5 km)，因此，小尺度地幔对流是高原隆升的主要机制。同时他也认为地幔热对流不稳定的产生与大量的地壳水平缩短增厚有关，且有较长的时间滞后(图 5)。

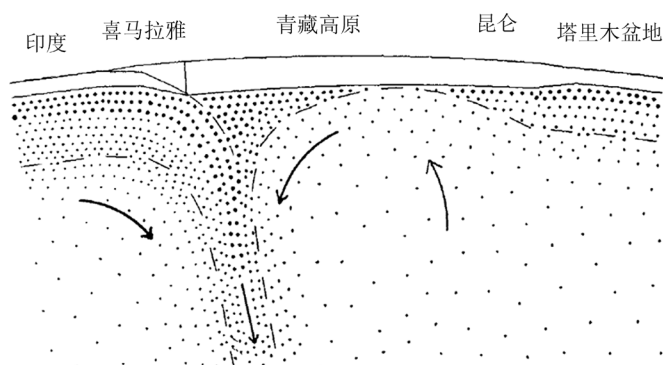
### 2.6. 欧亚大陆俯冲的模式

1994 年 S. D. Willett 等人提出了又一模式[30]，既欧亚大陆俯冲的模式。该模式认为在印度大陆与欧亚大陆碰撞以后欧亚板块的岩石圈地幔向南俯冲到青藏高原之下，并且俯冲的岩石圈地幔没有与地壳一



**Figure 4.** Continental extrusion model for the formation of the Tibetan Plateau, the movement direction of each block is indicated by an arrow in which the number identifies the stage of lateral extrusion (according to Ji S. C., *et al.* [26])

**图4.** 青藏高原构造变形大陆挤出模式, 箭头代表各地块运动方向, 箭头中数字代表构造逃逸的期次(据嵇少丞等改编 [26])



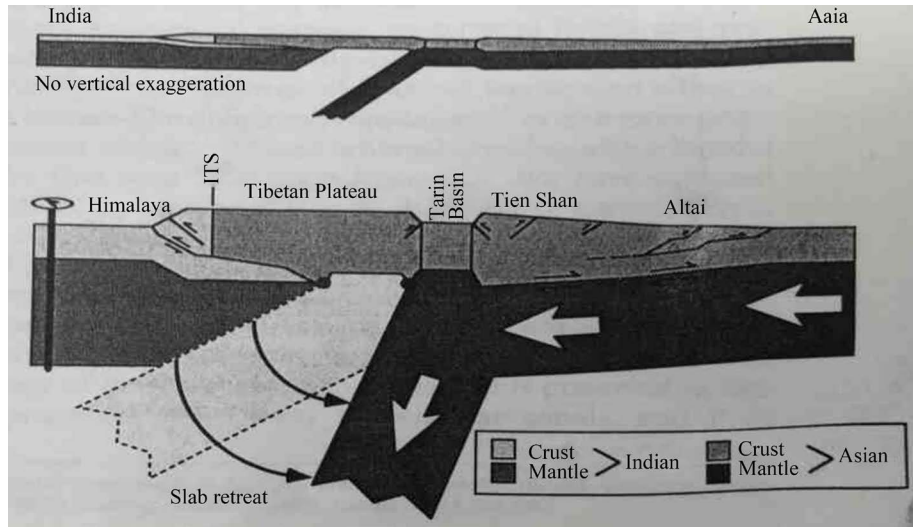
**Figure 5.** Small Scale mantle convection model for the formation of the Tibetan Plateau (According to Molnar, *et al.* [29])

**图5.** 青藏高原构造变形小尺度地幔对流模式(据 Molnar 等 [29] 改编)

起变形, 而且在汇聚和俯冲期间地幔块体退到了高原北部昆仑山之下现在的位置(类似于海洋俯冲带的过程), 这也必然在高原北部地下深处为软流圈物质的上涌打开了通道。在此过程中, 印度地壳沿着中、下地壳的滑脱面缩短并在喜马拉雅地带形成了背向逆冲断裂带; 在昆仑山北部(包括塔里木和柴达木盆地的刚性块体)则形成了一宽广的变形传播前楔地带和缩短可达到西伯利亚板块的地带。这一模式主要是以数值模拟为基础的、并结合地质和地球物理资料而提出的。这一观点将印度板块向北推挤作用放在了次要的地位, 而主要将青藏高原的隆起归因于欧亚大陆板块向南的俯冲上(图 6)。

## 2.7. 陆内汇聚 - 地壳分层加厚——重力均衡调整的模式

“陆内汇聚 - 地壳分层加厚——重力均衡调整”的模式[31]是认识青藏高原隆升演化的又一假说, 该假说认为由于印度板块持续向北漂移推挤且由于高原四周刚性地块的阻挡, 产生了强烈的陆内汇聚作用, 这一方面产生沿各个构造缝合带或断裂带的陆内俯冲, 另一方面产生多层次的拆离、滑脱, 上、中、下



**Figure 6.** Subduction model of Asian lithospheric mantle for the formation of the Tibetan Plateau (According to S. D. Willett, et al. [30])

**图 6.** 青藏高原构造变形欧亚大陆俯冲的模式(据 S. D. Willett 等[30])

地壳以不同机制分层加厚、缩短，导致了高原抬升，上地幔大幅度沉降，形成“高原山根”；后来当挤压作用大为减弱时在山根作用下，产生强烈的均衡调整，使高原快速隆升。这一观点认为地壳均衡作用是青藏高原后期整体快速隆升的主要原因。

随后又有一种观点认为[32] 45 Ma 以来，印度板块持续向北推挤，使青藏高原岩石圈均匀增厚和垂向隆起，在 25~18 Ma 期间大陆岩石圈可能不再明显增厚，整个高原厚壳厚幔的岩石圈结构已基本形成。约 5 Ma 以后，青藏高原南侧边界继续受到印度板块推挤，岩石圈下部的物质缩短受到周围地块的限制和浮力作用，正在俯冲的密度小的大陆岩石圈板片和已经俯冲下去的密度大的大洋岩石圈板片之间发生断裂，导致岩石圈底部软流圈物质上涌而出现重力失稳和不均衡，从而导致高原快速隆升。在高原北部，刚性的塔里木板片沿喀喇昆仑-昆仑山断裂带向南俯冲，因负浮力的作用导致俯冲板片断裂，使上部板片迅速回弹，引起软流圈上拱，岩石圈地幔发生部分熔融，形成壳幔混合层。昆仑山一带的快速抬升可能与此有关。

### 2.8. 双向俯冲模式：

1986年 Mattauer. M 认为[33]青藏高原的隆生是在南部印度板块和北部塔里木板块的双向陆内俯冲作用下形成的。

1998年，曾融生先生等[34]根据 INDEPTH 项目提供的资料，对双向俯冲模式进行了新的解释。认为拉萨块体南部地壳内存在的三个向北倾斜的构造带(断裂带)和拉萨地体北部地壳内存在的两个向南倾斜的构造带(断裂带)在冈底斯下地壳及上地幔相遇的特点不能用成层的物质界面来解释。拉萨南部的三个构造带被认为是在印度大陆与欧亚大陆刚碰撞不久后，印度地壳沿雅鲁藏布缝合带向拉萨块体的下部地壳俯冲，到达冈底斯后不再向北方的下部地壳俯冲。而北方邻区的地壳沿拉萨北部的两个冲断层向南俯冲挤入拉萨块体下地壳，在印度板块向北推移挤入拉萨地体使其地壳缩短的同时，印度与拉萨块体一同向北推移，又使拉萨块体以北的羌塘地体受到挤压而缩短。这样，就在地壳中形成双向俯冲的现象。这一模式认为在印度板块向北推移挤入拉萨地体使其地壳缩短的同时，印度与拉萨块体一同向北推移，又使拉萨块体以北的羌塘地体受到挤压而缩短。而印度地壳和欧亚大陆地壳是整个地壳还是仅仅上部地壳向拉萨块体的地壳挤入目前仍然不能确定(图 7)。

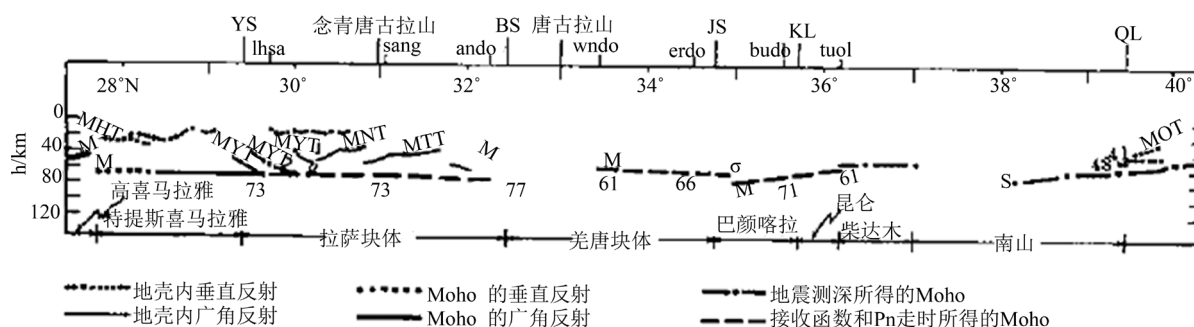


Figure 7. Comprehensive crustal structures map from Himalaya to Qilian (according to Zeng R. S, *et al.* [34])

图 7. 喜马拉雅 - 祁连山的综合地壳构造图(引自曾融生等[34])

到目前为止, 根据近年来对青藏高原的研究, 印度板块在高原南部向北俯冲的作用已为人们普遍接受, 但这种俯冲的范围、作用过程、高原北部的动力过程仍然处在假说之中。

## 2.9. 构造板下作用的模式

1997年, T. J. Owens 和 G. Zandt 根据对青藏高原地壳特征变化的分析后提出了构造板下作用的模式[35]。该模式认为印度板块的俯冲是由一系列通过地壳向下渐近迁移的对冲逆断层来进行的, 这样就由构造板下作用加厚了拉萨地体, 而下伏于拉萨地体之下的印度地壳厚度由于这一地壳传输机制的作用向北逐渐减小, 印度大陆岩石圈向青藏高原之下大约俯冲到了班公缝合带, 并沿这条北倾的俯冲带向下俯冲到羌塘地体之下的软流圈中。这一解释的部分根据是班公缝合带以南拉萨地体之下的下地壳存在着高速层, 他们认为这一高速层是冷的印度克拉通地壳的痕迹。这一机制在作用效果上就将一系列印度上地壳俯冲块体输送到亚洲大陆的边缘之下, 并使均匀的印度地壳增生到了亚洲大陆南部边缘。在班公缝合带北部的下地壳缺乏明显的高速层, 而且泊松比高, 地壳厚度小, 上地幔温度高, 因此高原北部广泛存在着部分熔融的下地壳。他们认为俯冲的印度岩石圈正在把先前存在的厚度薄、强度弱的欧亚板块上地幔剥掉并使之重新循环到地幔中去; 而在俯冲的印度板块前部和古老的欧亚大陆岩石圈末端之间的软流圈就受到了挤压, 并由此而产生了软流圈被动的侧向流动, 因而产生了强烈的各向异性组构(图 8)。

此后 1999年 G. Kosorew 和 R. Kind 等人[36]认为 Owens 和 Zandt 的模式还缺少对俯冲的印度岩石圈地幔几何形态的约束。他们用修正了的接收函数法重新处理了目前所具有的青藏高原测深资料, 对印度岩石圈地幔的形态给出了更完善的解释。他们认为印度板块俯冲的一个北倾界面开始于雅鲁藏布缝合带以北约 50 km 处的地下莫霍界面深度(80 km 深), 并向北延伸到班公缝合带之下的 200~250 km 深处, 而在班公缝合带以北存在着一个向南倾斜的界面, 该界面自不冻泉至格尔木之间的莫霍界面下向南下延到班公缝合带以北 50~100 km 之处并在此处 200~250 km 的深度上与俯冲下来的冷印度岩石圈地幔相遇。该南倾界面被认为是在破坏和俯冲过程中欧亚大陆岩石圈地幔的图像, 他们认为这一破坏和俯冲过程仍在进行。同时他们还发现在青藏高原之下 410 km 和 660 km 深的间断面在高原北部(班公以北)是不规则的, 分析认为在青藏高原北部的上地幔和该间断转换面之间存在着广泛的质量转换(图 9)。

该模式认为印度岩石圈地幔和欧亚岩石圈地幔不同的滑脱形式是由于它们具有不同的组成成份和受到不同的浮力所引起的。

## 2.10. 双层楔板模式

1999年滕吉文等认为喜马拉雅碰撞造山带和青藏高原隆升的复杂格局是在南、北双向挤压力系作用

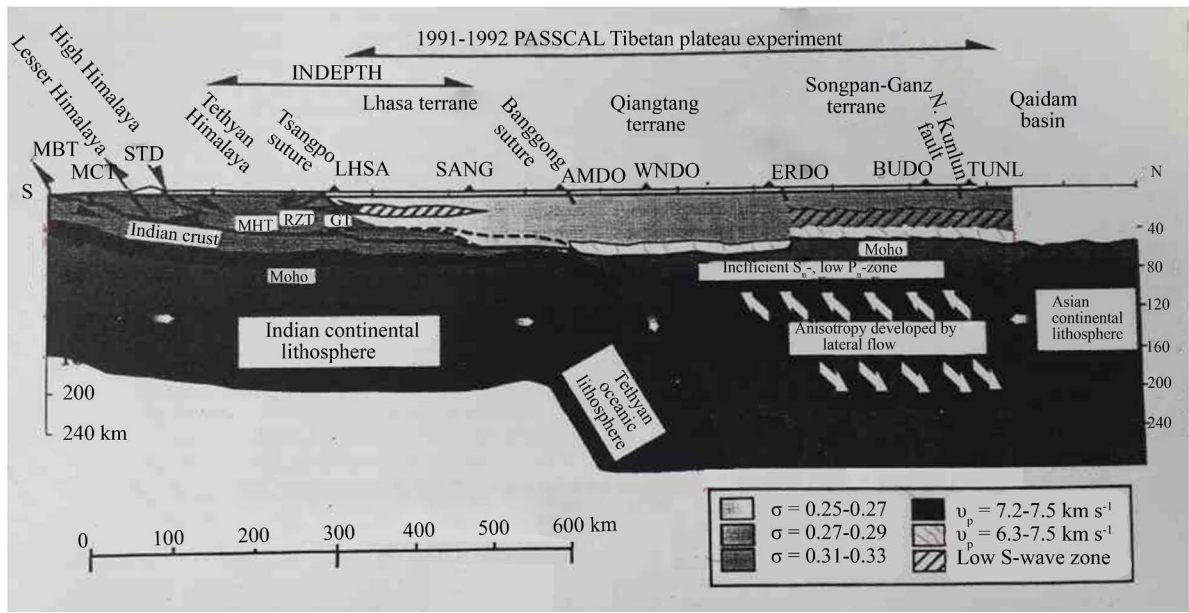


Figure 8. Tectonic underplating interpretation model for the formation of the Tibetan Plateau (According to T. J. Owens, *et al.* [35])

图 8. 青藏高原构造变形构造板下作用的模式(据 T. J. Owens 等[35])

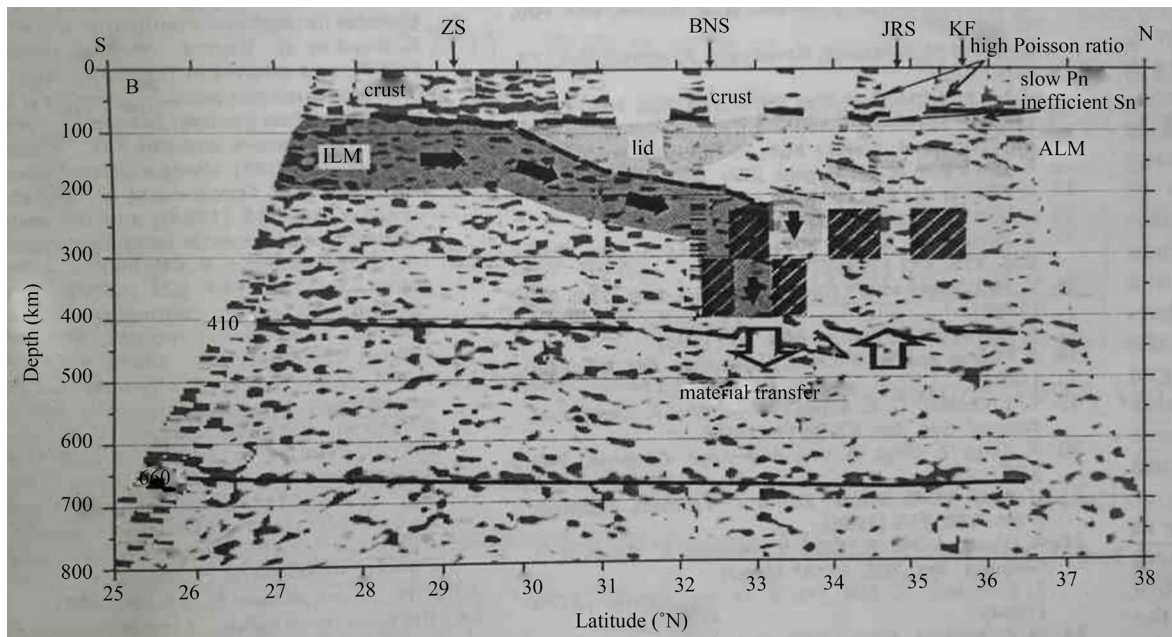


Figure 9. Receiver function image of the eastern Tibetan Plateau (according to G. Kosorew, *et al.* [36])

图 9. 青藏高原东部接收函数影像(据 G. Kosorew 等[36])

下，印度板块和上地幔物质向北运动，分别在不同档体阻隔作用下终止于不同部位而形成的[37]。第一楔板为中上地壳 - 莫霍界面上部物质，它由南向北运动，由于受到雅鲁藏布江高角度断裂的阻隔而终止于雅鲁藏布江断裂地带。第二“板”以莫霍界面上部低速层底面和地幔低速层顶面为上下滑脱面。在强大的碰撞与挤压动力系统作用下，待应力积累到一定程度后上界面便会向北运动，突破雅鲁藏布江断裂根部的局部阻隔，直抵昆仑山和阿尔金山地带(图 10)。



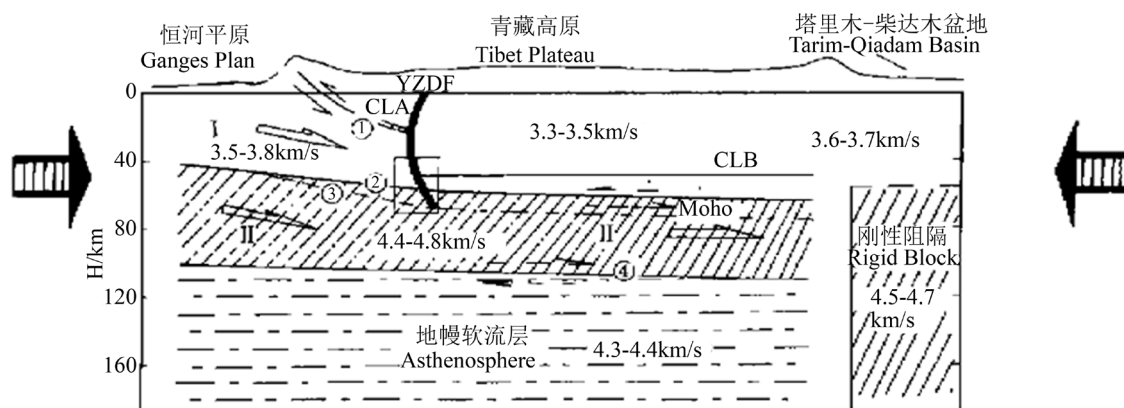


Figure 10. Sketch map of new model for two layer Wedge plates of synchronous movement in collision orogenic zone of Himalaya (according to Teng J W, *et al.* [37])

图 10. 喜马拉雅碰撞造山带的碰撞挤压与同步移动的“双层楔板”模式示意图(据滕吉文等[37])

### 2.11. 许志琴等青藏高原隆升的新模式

许志琴等提出另一新模式[38]:“青藏高原南部印度岩石圈板片的陆内超深俯冲,北缘克拉通的陆内深俯冲,腹地深地幔羽构造,超岩石圈范围的“右旋隆升”及物质向东挤出。”她们认为:印度大陆岩石圈的巨厚俯冲板片以 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 倾角向北插入唐古拉山下 $300\text{ km}$ 深处,并被高热物质组成的地幔剪切带分开,印度岩石圈板块的喜马拉雅-印度断续高速异常带以极缓的倾角俯冲至雅鲁藏布江缝合带以北 $400\text{ km}$ 之远的唐古拉山下面 $200\text{ km}$ 深处,比曾融生等[34]和Kosarev等[36]认为印度板块前缘到达班公湖-怒江缝合带还要远。该模式认为南塔里木高速异常带为塔里木岩石圈向南陆内俯冲于西昆仑山之下 $400\text{ km}$ 的“化石”残片;东塔里木高速异常带可能代表了塔里木地块岩石圈向南东陆内俯冲的“化石”残片,青藏高原南缘的陆内超深俯冲与北缘的陆内浅俯冲对高原产生南北向挤压及东西向拉伸,深部挤压环境导致物质熔融和地幔羽的形成,以及物质在地幔中的向东运动,浅部东西向拉伸环境造成南北向裂谷及腹地的火山喷发。这一模式也是一种缘于多因素作用结果(图 11)。

### 3. 青藏高原构造演化变形模式研究现状

在本文所述的这 11 种青藏高原构造隆生演化模式中,它们都是建立在青藏高原地壳厚度在 $60\text{ km}\sim 70\text{ km}$ 的巨厚地壳这一共识基础之上的。为了解释这种高原巨厚地壳是如何形成的,在诸多地球科学家中产生了仁者见仁、智者见智的认识和观点,而每种模式都深刻地反映出各自学科研究成果为主的倾向,如大地构造学、地质学、地貌学、地球物理学。但每种模式都是随着时间的发展而参考最新地球物理测深资料的研究成果。如在上世纪 20 年代“双地壳模式”提出后极大地提高了人们认识青藏高原形成机制,但随着研究的深入和更新资料的积累,利用该模式对一些现象的解释不合理,因此在上世纪 70 年代又出现了“地壳挤压缩短模式”。随着对青藏高原问题研究的不断深入和其逐渐成为全球地球科学研究的热点问题,当“地壳挤压缩短模式”也受到越来越多的新质疑时,在上世纪 80 年代地球科学家相继提出了“大陆灌入模式”、“大陆挤出模式”、“小尺度地幔对流模式”、“双向俯冲模式”,这些模式的出现极大地丰富了人类对青藏高原隆生机制的认识。随着深部地球物理勘探工作的不断深入,新的测深资料和研究结果不断涌现。在上世纪 90 年代以后“欧亚大陆俯冲的模式”、“陆内汇聚-地壳分层加厚——重力均衡调整的模式”、“构造板下作用的模式”、对“双向俯冲模式”的修正、“双层楔板模式”及许志琴等“青藏高原隆升的新模式”也相继被提出,这些新模式是伴随着地球物理勘探、地质学、地貌学、大地构造学等学科的新发现而被提出的,因此在解释青藏高原隆生机制方面更加全面。

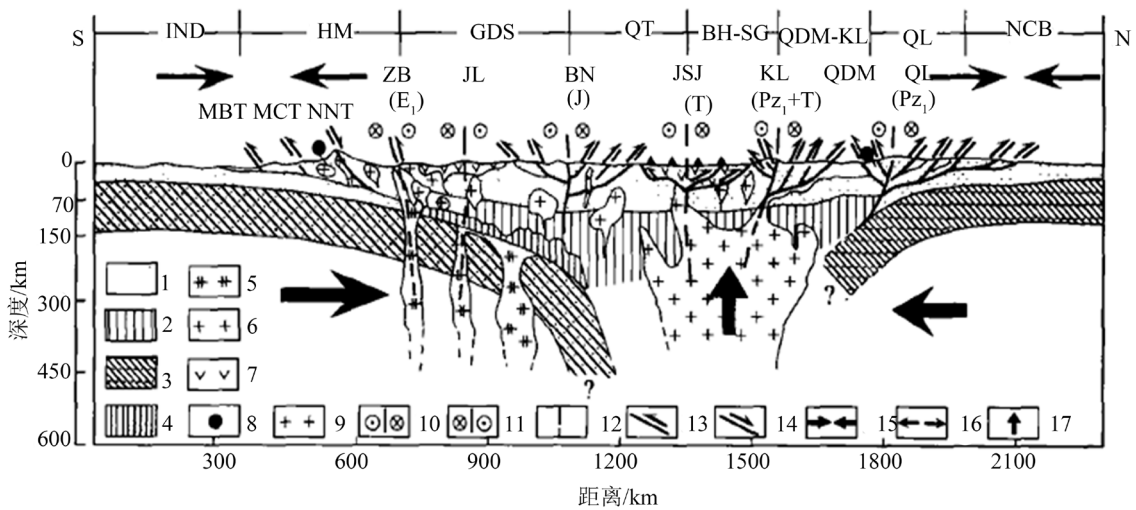


Figure 11. Collision dynamic model for the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau (according to Xu Z Q, *et al.* [38])

图 11. 青藏高原隆起的碰撞动力学模式(许志琴等[38])

青藏高原隆起的过程及其机制特别是主因和导因至今仍然是一个争论的问题。到目前为止,根据近年来对青藏高原的研究,印度板块在高原南部向北俯冲的作用已为人们普遍接受,但这种俯冲的范围、作用过程、高原北部的动力过程仍然处在假说之中。上述不同动力学模型强调了不同的侧面,而对完整地解释青藏高原隆生过程中的各种现象和已有的数据还存在不少疑问,在力学和热力学机制、相互作用的方式、高原内部不同层次地质效应、演化时间和次序等方面存在着不同认识。从现有研究看来,青藏高原形成机制绝非单一模型所能概括,而是多种机制作用的综合,其原因在于印度板块与欧亚板块完成最后拼接经历了复杂的地质过程及其空间上的差异性。

目前为止还存在一些重要的质疑新观点:

1) 肖序常先生认为[39]-[41]从地球物理数据和地球化学数据以及地表地质学数据分析,没有证据认为在青藏高原西北部位的西昆仑山之下存在着塔里木块体向南的俯冲,形成了所谓的双向俯冲模式。他认为在塔里木块体和西昆仑山块体之间主要是以相反方向的水平挤压为相互作用形式,形成“面对面”双向水平挤压,不存在长距离的相互俯冲下插,这就导致了岩石圈增厚缩短和致密化。

2) 下地壳物质向东移动的问题提出近十多年来中外有大量的地质学家、地球物理学家引以为据,并对于青藏高原存在下地壳物质流动进行附和。Clark等[42]首次用基于下地壳流动的“channel flow”模型来解释青藏高原东缘的地貌变化,认为至少从中中新世以来,厚而弱的高原中下地壳发生向东的侧向流动使得青藏高原东缘持续抬升并向东膨胀扩展。这种侧向流动能否引起上部地壳构造地貌的巨大变革,或者区域影响究竟多大,目前也受到较多的质疑。滕吉文认为[43] [46]从实际观测、数值模拟、高温高压物理实验和麻粒岩相的地球化学属性等方面的研究均证明青藏高原的下地壳物质是不会产生侧向流动的,因为它不具备可流动的边界条件和适合的壳、幔结构及其物理属性。

3) 雅鲁藏布缝合带(YZSZ)位于青藏高原南部,在中国境内延展近2000 km,被认为是印度板块与欧亚大陆的分界线[44] [45],滕吉文等最新研究认为雅鲁藏布江不是印度洋板块与欧亚板块两陆一陆板块碰撞的缝合带[46]。

另外,青藏高原隆生机制主要是将高原作为一个整体隆生而进行解释的。实际上青藏高原在作为一个整体在隆起的过程中必定还伴随着差异性隆起,不仅在东西方向高原存在着差异性隆起[18],在南北向也应还存在着差异性隆起,但高原南北方向的差异性隆起其程度如何仍然是需要进一步深入研究的。

## 4. 结语

从青藏高原隆生的各种动力学模式中可以看到高原隆升过程和机制呈现出特别的复杂性, 主要归因于青藏高原岩石圈结构的不均一性。时至今日, 青藏高原隆升演化的构造变形形式还没有一种统一的被大家公认的模式, 它还处在继续探索研究的阶段, 高原的隆升是多种机制联合作用的产物, 具有多阶段、非均一、不等速的特征。随着地球科学家多学科研究的不断深化和新的科学资料的不断丰富和积累, 青藏高原构造变形的假说就会不断逼近真理, 最终会变成人们普遍接受的科学理论。恩格斯说[47]: “只要自然科学思维着, 它的发展形式就是假说。一个新的事实被观察到了, 它使得过去用来说明和它同类事实的方式不中用了。从这一瞬间起, 就需要新的说明方式了——它最初仅仅以有限数量的事实和观察为基础。进一步的观察材料会使这些假说纯化, 取消一些, 修正一些, 直到最后纯粹地构成定律。”人们对青藏高原隆升演化过程的认识就是这样一个过程。随着地球科学家的不断努力, 对青藏高原的研究也必将不断地达到新的水平。

## 基金项目

上海市科委科研项目(12231202700)、国家自然科学基金项目(41090292)和中国地震局星火项目(XH12016)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [2] 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [3] Argrand, E. (1924) In *Comptes Rendus. Congress Geologique International, The Proceedings of the 13th International Geological Congress*, Liege, Belgium, Vol. 1, 171.
- [4] Powell, C.M. and Conaghan, P.J. (1973) Plate Tectonics and the Himalayas. *Earth and Planetary Science Letters*, **20**, 1-12. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90134-9](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(73)90134-9)
- [5] L. 利布特里, 著. 大地构造物理学和地球动力学[M]. 孙坦, 译. 北京: 地质出版社, 1986: 148-152.
- [6] 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴, 等. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造[J]. 地球物理学报, 1980, 23(3): 254-268.
- [7] Dewey, J.F. and Burke, K.C.A. (1973) Tibetan, Variscan and Precambrian Reactivation: Products of Continental Collision. *The Journal of Geology*, **81**, 683-692. <http://dx.doi.org/10.1086/627920>
- [8] England, P. and McKenzie, D. (1982) A Thin Viscous Sheet Model for Continental Deformation. *Geophysical Journal International*, **70**, 295-321. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb04969.x>
- [9] Vilotte, J.P., Daignieres, M. and Madariaga, R. (1982) Numerical Modeling of Intraplate Deformation: Simple Mechanical Models of Continental Collision. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 10709-10728. <http://dx.doi.org/10.1029/JB087iB13p10709>
- [10] Harrison, T.M., Copeland, P., Kidd, W.S.F. and Yin, A. (1992) Raising Tibet. *Science*, **255**, 1663-1670. <http://dx.doi.org/10.1126/science.255.5052.1663>
- [11] Zhao, W.L. and Morgan, W.J. (1985) Uplift of Tibetan Plateau. *Tectonics*, **4**, 359-369.
- [12] Zhao, W.L. and Morgan, W.J. (1987) Injection of Indian Crust into Tibetan Lower Crust: A Two-Dimensional Finite Element Model Study. *Tectonics*, **6**, 489-504. <http://dx.doi.org/10.1029/TC006i004p00489>
- [13] 李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式探讨[J]. 中国科学, 1979(6): 608-616.
- [14] 李吉均. 青藏高原隆起的三个阶段及夷平面的高度和年龄[M]//青藏高原隆升与亚洲环境演变: 李吉均院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2006: 65-70.
- [15] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地, 1999, 19(1): 1-10.
- [16] 李廷栋. 青藏高原地质科学研究的新进展[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 370-376.
- [17] 马钦忠, 李吉均. 晚新生代青藏高原北缘构造变形和剥蚀变化及其与山脉隆升关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 27-34.

- [18] 马钦忠, 李吉均. 青藏高原北缘晚新生代的差异性隆起特征[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 590-598.
- [19] 肖序常. 开拓、创新, 再创辉煌——浅议揭解青藏高原之秘[J]. 地质通报, 2006, 25(1): 15-19.
- [20] Tapponnier, P. and Molnar, P. (1976) Slip-Line Field Theory and Large-Scale Continental Tectonics. *Nature*, **264**, 319-324. <http://dx.doi.org/10.1038/264319a0>
- [21] Tapponnier, P. and Molnar, P. (1977) Active Faulting and Tectonics in China. *Journal of Geophysical Research*, **82**, 2905-2930. <http://dx.doi.org/10.1029/JB082i020p02905>
- [22] Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R. and Cobbold, P. (1982) Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, **10**, 611-616. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10<611:PETIAN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611:PETIAN>2.0.CO;2)
- [23] Tapponnier, P., Peltzer, G. and Armijo, R. (1986) On the Mechanics of the Collision between India and Asia. *Geological Society of London Special Publication*, **19**, 113-157. <http://dx.doi.org/10.1144/gsl.sp.1986.019.01.07>
- [24] Peltzer, G. and Tapponnier, P. (1988) Formation and Evolution of Strike-Slip Faults, Rifts, and Basins during the India-Asia Collision: An Experimental Approach. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 15085-15117. <http://dx.doi.org/10.1029/JB093iB12p15085>
- [25] Tapponnier, P. and Molnar, P. (1979) Active Faulting and Cenozoic Tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baykal Regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **84**, 3452-3459. <http://dx.doi.org/10.1029/JB084iB07p03425>
- [26] 嵇少丞, 王茜, 孙圣思, 等. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1644-1667.
- [27] Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P.H., Schärer, U., Zhong, D.L., Wu, H.W., Liu, X.H., Ji, S.C., Zhang, L.S. and Zhong, J.Y. (1990) The Ailao Shan/Red River Metamorphic Belt: Tertiary Left-Lateral Shear between Indochina and South China. *Nature*, **343**, 431-437. <http://dx.doi.org/10.1038/343431a0>
- [28] Houseman, G.A., McKenzie, D.P. and Molnar, P. (1981) Convective Instability of A Thickened Boundary Layer and Its Relevance for the Thermal Evolution of Continental Convergent Belts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **86**, 6115-6132. <http://dx.doi.org/10.1029/JB086iB07p06115>
- [29] Molnar, P., England, P. and Martinod, J. (1993) Mantle Dynamics, Uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, **31**, 357-396. <http://dx.doi.org/10.1029/93RG02030>
- [30] Willett, S.D. and Beaumont, C. (1994) Subduction of Asian Lithospheric Mantle Beneath Tibet Inferred from Models of Continental Collision. *Nature*, **369**, 642-645. <http://dx.doi.org/10.1038/369642a0>
- [31] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, 1995(1): 1-9.
- [32] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学, 1996, 26(4): 289-295.
- [33] Mattauer, M (1986) Intracontinental Subduction, Crust-Mantle Décollement and Crustal-Stacking Wedge in the Himalayas and Other Collision Belts. *Geological Society of London Special Publication*, **19**, 37-50. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.02>
- [34] 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 喜马拉雅 - 祁连山地壳构造与大陆 - 大陆碰撞过程[J]. 地球物理学报, 1998, 41(1): 49-60.
- [35] Owens, T.J. and Zandt, G. (1997) Implications of Crustal Property Variations for Models of Tibetan Plateau Evolution. *Nature*, **387**, 37-43. <http://dx.doi.org/10.1038/387037a0>
- [36] Kosarev, G., Kind, R., Sobolev, S.V., Yuan, X., Hanka, W. and Oreshin, S. (1999) Seismic Evidence for a Detached Indian Lithospheric Mantle beneath Tibet. *Science*, **283**, 1306-1309. <http://dx.doi.org/10.1126/science.283.5406.1306>
- [37] 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆 - 陆碰撞新模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 481-494.
- [38] 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 等. 青藏高原的地幔结构: 地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 329-343.
- [39] Xiao, X.C., Liu, X., Gao, R., Kao, H. and Luo, Z.H. (2001) Collision Tectonics between the Tarim Block (Basin) and the Northwestern Tibet Plateau: New Observations from a Multidisciplinary Geoscientific Investigation in the Western Kunlun Mountains. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **75**, 126-132. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-6724.2001.tb00514.x>
- [40] 肖序常, 刘训, 高锐, 等. 西昆仑及邻区岩石圈结构构造演化[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 63-68.
- [41] 肖序常, 王军. 西昆仑 - 喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 285-294.
- [42] Clark, M.K. and Royden, L.H. (2000) Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow. *Geology*, **28**, 703-706. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<703:TOBTEM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<703:TOBTEM>2.0.CO;2)

- 
- [43] 滕吉文, 宋鹏汉, 毛慧慧. 当代大陆内部物理学与动力学研究的导向和科学问题[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 675-697.
- [44] 张万平, 袁四化, 刘伟. 青藏高原南部雅鲁藏布江蛇绿岩带的时空分布特征及地质意义[J]. 西北地质, 2011, 44(1): 1-9.
- [45] Yang, J.-S., Robinson, P.T., Jiang, C.-F. and Xu, Z.-Q. (1996) Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, **258**, 215-231. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00199-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(95)00199-9)
- [46] 滕吉文, 司芾, 王谦身, 等. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定[J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 103-124.
- [47] 恩格斯, 著. 自然辩证法[M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局, 译. 北京: 人民出版社, 1971.