

文章编号: 1009-3850(2005)04-0027-06

印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的新模式 及其对青藏高原构造演化的影响

周征宇, 廖宗廷

(同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092)

摘要: 青藏高原南部与北部的断裂带走滑方向不同, 断裂带在高原东、西两侧的展布规律和构造运动方式也存在极大的差异。通过高原南缘横向地球物理特征的对比, 发现该地区东、西两侧深部岩石圈结构存在明显不同, 表明印度次大陆向欧亚大陆俯冲碰撞的方式和强度在横向上差异明显。在充分利用高原地质研究最新成果的基础上, 提出印度次大陆向欧亚大陆碰撞前地壳增厚及斜向碰撞是造成上述地质现象的根本原因, 并由此对青藏高原构造演化的一些特点作了新的解释和探讨。

关键词: 印度板块; 欧亚板块; 板块碰撞; 青藏高原

中图分类号: P542

文献标识码: A

大陆岩石圈结构的复杂性, 使得陆-陆碰撞并不像传统的板块构造理论所描绘的洋-陆俯冲那样简单, 宏大的喜马拉雅造山带及其透入性变形充分说明了这一点。不少学者已发现起源于对大洋洋底的观察基础上而发展起来的板块构造理论, 在解释某些大陆地质问题时显得障碍重重^[1], 但正是这种障碍触发了我们的思考: 洋壳俯冲消亡后, 紧随其后的大陆壳究竟是怎样运动的? 缝合带两侧的陆壳在碰撞前后又是怎样响应的? 这些都是目前争论较大的问题。本文在充分利用前人资料的基础上, 通过对高原及其周边地区断裂带展布特点的研究, 结合地质、地球物理等研究的最新发现, 针对上述问题提出了新特提斯消亡及印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的新模式, 并由此试对青藏高原构造演化的一些特点进行了探讨。

1 高原断裂带的展布特点

青藏高原是一个集隆升造山和剥蚀夷平、挤压皱缩和伸展塌陷、俯冲推覆和剪切走滑为一体的复

杂构造体, 而断裂带的形成及其展布形式又是上述地质作用的集中体现。不仅各地质体间, 即使是各地质体内的不同区域, 其断裂带的展布也有着不同的特点:

(1) 高原从南到北展布着多条东西向大型缝合带及断裂带: 雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带、南昆仑断裂带等。大型走滑断裂大致沿主要构造分界线展布, 并在高原东部明显向北凸起, 预示着与高原西部相比, 这里遭受的向北挤压力更强。同时高原南部断裂带表现为右旋走滑, 北部则为左旋^[3](图1)。

(2) 高原南缘展布着一系列南北向峡谷, 跨度只有10~15km; 峡谷边缘的抬升范围也相应较窄, 只有30~40km^[4]。如此短的隆起波长要求弯曲的刚度很低, 而低刚度的实现有两种途径——整个地壳变软或产生变形的地壳变薄。

(3) 通过简单运算, 笔者发现围限高原北部柴达木盆地的祁连山断裂和东昆仑断裂的走滑速度之和正好与西昆仑断裂的走滑速度相等, 似乎预示着整

收稿日期: 2005-02-28

第一作者简介: 周征宇, 1978年生, 博士生, 主要从事大陆边缘构造与盆地分析研究。

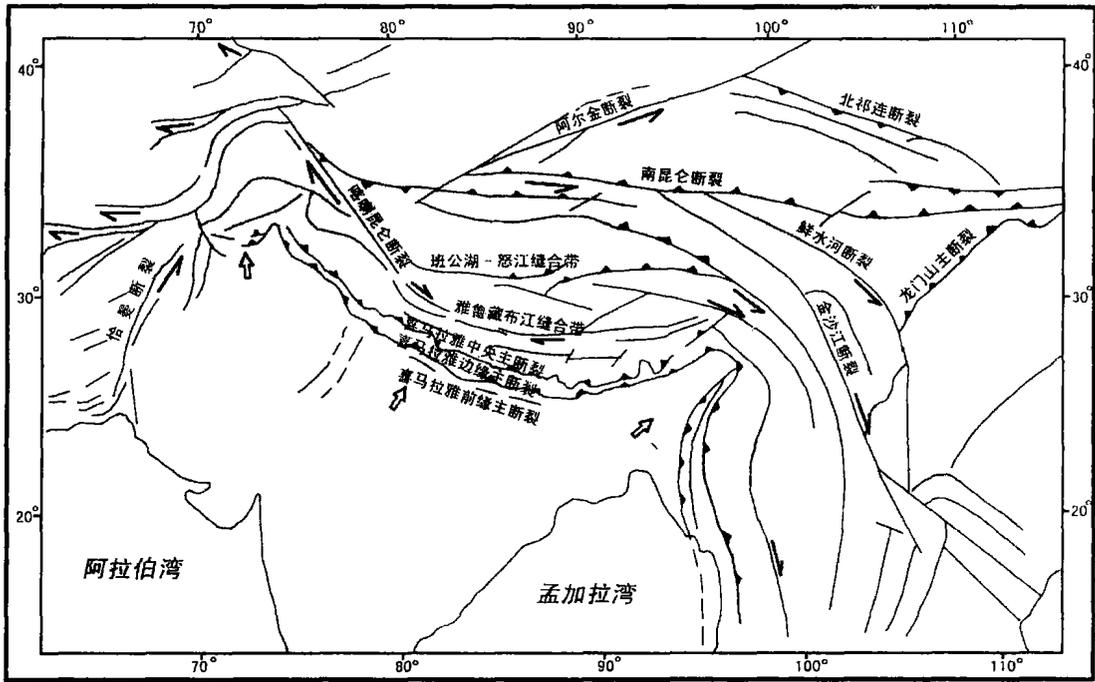


图1 高原及邻区构造断裂带展布简图(据文献^[2],有删改)

Fig.1 Distribution of the faults on the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas (modified from Li Tingdong, 1995)

个柴达木盆地地壳正以 $20\text{mm}/\text{yr}$ 的速度相对西伯利亚向东南侧滑出。阿尔金断裂南侧有多条与主断裂成 40° 交角的马尾状断裂,向东年龄趋小^[5~7],可能正是地壳沿东南向被拉薄甚至拉裂的结果。

2 前人的研究认识

一般认为青藏高原的形成是印度与欧亚板块大约 $65\sim 50\text{Ma}$ 以来的碰撞及随后的陆内汇聚的结果^[8,9]。目前提出的高原形成模式较多、分歧较大,总结起来大致可分为两种基本观点:一是认为板块碰撞后的强烈挤压导致地壳水平方向的皱缩和垂直方向的增厚,甚至导致了岩石圈地幔的负重脱落(拆沉),主要包括薄粘滞体模式^[10,11]、挤压模式^[12]等。这一类模式通常把青藏高原的地壳看成是一个塑性体,而显然忽视了东西向横贯高原以及南北向纵切山脉的多条断裂带,它们的存在恰恰表明刚性仍然是大陆地壳的特点。二是认为俯冲地壳下插垫托于上覆地壳的底部,导致地壳增厚,主要包括双地壳模式^[13]、注入模式^[14]等。同时,数值模拟印度-欧亚大陆碰撞过程的结果显示若俯冲地壳的浮力(与其厚度和密度有关)大于俯冲消亡的大洋岩石圈产生的拖曳力,大陆地壳将与地幔岩石圈解耦拆离,并以地壳流形式拆沉入冷重的欧亚大陆岩石圈中^[15]。然而在模拟过程中,欧亚大陆地壳被设定为纯刚性

不变形,这显然与实际不符;同时,这一类模式普遍认为欧亚大陆岩石圈中存在着有利于印度大陆地壳插入的软弱层,甚至认为印度大陆北部边缘岩石圈中也应当同样存在着有利于壳-幔拆离的相对软弱层。现今高原地壳中软弱层的存在已经为地球物理研究所充分证实^[16],然而地震波研究又显示低速带仅在地壳加厚的地区存在^[5,6]。因此值得思考的是,在印度板块碰撞前,软弱层是否已经存在?换言之,碰撞带两侧大陆边缘的地壳是否已经增厚?这一点在前人的文献中鲜有论及。

3 碰撞前的特点:地壳增厚

冈底斯地块上广泛发育的浅色花岗岩揭示了 130Ma 的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄^[17]。丁林等(2003)认为该岩体是地壳加厚过程中中下地壳部分熔融的产物,因此冈底斯地壳早在碰撞前就已经增厚隆升。高喜马拉雅及特提斯喜马拉雅地区广泛发育的浅色花岗岩也被普遍认为在其形成过程中伴有大规模地壳缩短增厚^[18~20]。纵观美洲大陆西海岸,安第斯山脉的高地形及厚地壳仅仅是太平洋板块 $27\sim 25\text{Ma}$ 以来快速俯冲(约 $150\text{mm}/\text{a}$)的结果^[21,22];宽阔而绵延数千里的科迪勒拉山脉就像太平洋洋中脊在大陆的延伸,似乎也预示着它的形成与大洋中脊的俯冲息息相关。因此,不仅陆-陆碰撞,洋壳及洋脊的俯

冲也可能造成地壳的增厚。晚侏罗—早白垩世,新特提斯洋的大洋岩石圈快速消减(约120mm/a)到冈底斯之下^[2],大量物质下插,亚洲大陆的南缘可能类似于现今南美大陆西缘的安第斯山脉(图2a, b)。随着俯冲的继续,特提斯洋洋脊与欧亚大陆发生碰撞,但由于洋脊绝对高程大,俯冲困难,同时洋脊作为软流圈物质上涌处,岩石圈厚度最薄,浮力最大,因此俯冲角度逐渐趋小,水平挤压力逐渐增大,导致大陆地壳因强烈褶皱、逆冲、叠覆等而增厚,类似于现今北美的科迪勒拉山脉(图2b)。现有研究表明,加厚地壳的底部(大于40km)将熔融出埃达克岩^[23, 24],形成相对刚度较低的软弱层(图2b, c)。始新一中新世,印度大陆和欧亚大陆终于碰撞,由于古印度大陆地壳密度低浮力大,加上俯冲洋壳的不断加长,向下的拖曳力也逐步加强,发生壳-幔拆离,印度地壳遂沿薄弱层注入欧亚大陆地壳底部(图2d, e)。

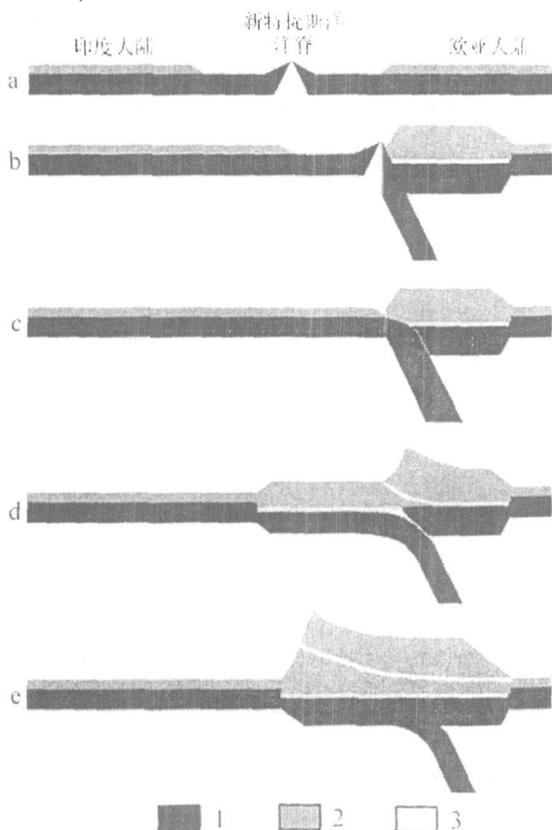


图2 碰撞前大陆边缘地壳的增厚及软弱层的形成

1. 岩石圈地幔; 2. 地壳; 3. 软弱层(增厚地壳底部部分熔融的低刚度层)

Fig. 2 Thickening of the continental crust before collision and the formation of the thin molten low crust

1= lithospheric mantle; 2= Earth's crust; 3= molten low crust

4 碰撞阶段的特点: 斜向碰撞

4.1 地球物理研究的启示

地球物理是研究岩石圈结构的有力手段,是高原演化动力学研究的基础。综合现有资料,并将高原南缘东西两侧地球物理特征进行对比,发现存在着较大差异,主要体现在:

(1) 区域磁异常研究发现 88°E—89°E 间磁场有一突变台阶,喜马拉雅东西分段界线以西以正异常梯级带为其主要特征,以东负异常条带为其主要特征^[25]。

(2) 地震资料显示: 藏南西部的地壳厚度要比东部至少小 6km^[26]; 藏南喜马拉雅地体内,莫霍界面从西向东倾斜^[27]。

(3) 高原西部吉隆—冈玛错剖面地面磁场观测资料与东部亚东—格尔木剖面磁异常处理结果对比研究揭示东部构造活动相对极为活跃,而西部地区构造活动相对较弱^[28]。

(4) 高原东部雅鲁藏布江缝合带以北地区未出现双高导层^[25],表明印度板块向北的俯冲并非是齐头并进的,东西部向北挤入的速度和距离均不相同。

(5) 叶城—噶尔大地电磁测深研究发现壳内高导层北倾梯度较缓^[28],说明在高原西部印度地壳是以低角度注入欧亚板块内。

(6) 磁变研究证实格尔瓦剖面存在一条沿北东—南西向横贯喜马拉雅的脊状导电构造^[29]。有学者提出该脊状导电带的形成与软流圈物质向上侵入有关。

(7) 东南“大拐弯”地区重力低值达到-160mGal,该低值区向西南延伸与喜马拉雅山系以南的印度北部重力低值区相接,但仍以该低值区的-160mGal为最低^[25, 30]。

综上所述,高原南缘喜马拉雅地区东、西两侧重、磁、电等地球物理特征均存在着巨大差异;同时显示这种差异并不仅仅体现在构造运动的强度上,运动方式也可能截然不同。

4.2 印度板块的斜向碰撞及其对亚洲大陆地壳变形的制约

综合分析,笔者认为斜向碰撞可为上述问题和现象提供一个合理的解释模式:

晚古生代,印度洋开始扩张,相应带来的推动力和地幔流的托、推作用力,致使印度板块脱离非洲向北漂移,同时发生逆时针旋转^[31]。碰撞前印度大陆东侧漂移线速度稍大,因此是一种斜向碰撞(图3,

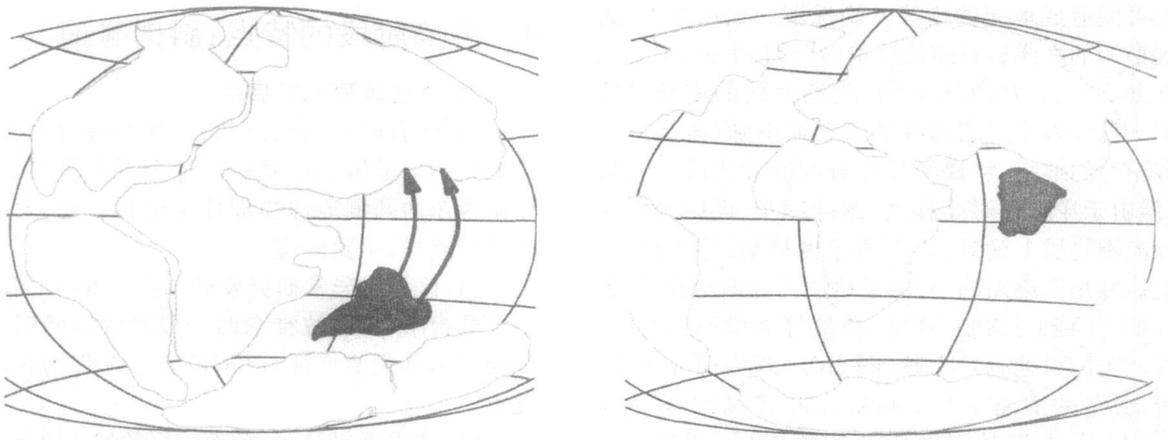


图3 印度大陆漂移

Fig.3 The drift of the Indian continent

图4)。它造成板块两端碰撞在时间及强度上均不相同, 东侧早而强烈; 同时板块斜向运动的强大惯性导致碰撞中北北东向主压应力场中叠加了一个逆时针方向的扭应力场。这造成高原南部一系列南北向为主的构造带的形成, 并以中部活动构造带为中心, 以东各活动构造带逐渐向北东向偏转, 以西则向北西向偏转^[25]。

高原东侧, 特别是印度大陆与欧亚大陆最先接触的尖角部位, 碰撞最为强烈。地壳受挤迅速增厚, 当部分熔融形成的岩浆抽离后便在深部形成大比重的榴辉岩。加厚的岩石圈地幔本身也比软流圈地幔冷而密度大, 因此岩石圈地幔将与部分地壳一道沉入软流圈地幔成为东南“大拐弯”地区的重力低值, 并导致地壳减薄, 喜马拉雅地区一系列短波长的峡谷正是地壳减薄的产物。同时因该地区印度板块俯冲速度快, 地壳的横向皱缩无法在短时间内消弥大量的汇聚物质, 而只能依靠大角度的俯冲。而印度板块北东向的强烈撞击则造成高原内东西向断裂带在东部明显北凸(图1, 图5), 并限制了断裂带的走滑量越往东越小^[7, 32, 33]; 同时造成柴达木地块的侧向移出。

印度大陆东侧碰撞后, 因欧亚大陆的阻挡, 逆时针的惯性旋转大为削弱; 而此时印度大陆西侧尚未与欧亚大陆碰接, 依然保持着较大速度的惯性旋转, 由此印度大陆北缘岩石圈将被拉薄, 软流圈物质上涌, 形成脊状导电带。同时东侧的碰撞已消弭了大量的能量, 因此西侧的碰撞远不如东侧强烈。由于板块移动的速度缓慢, 印度大陆地壳逐渐增厚而与地幔拆离, 继而注入欧亚大陆地壳底部的软弱层中, 因此以低角度俯冲为特征, 俯冲的水平距离也较远。

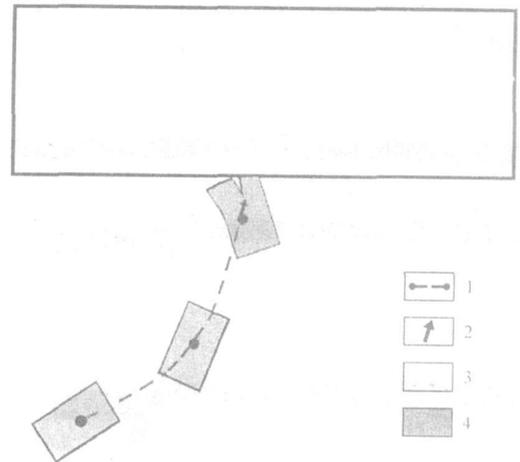


图4 印度大陆漂移和碰撞

1. 印度大陆漂移轨迹; 2. 碰撞方向; 3. 亚洲大陆; 4. 印度大陆
Fig.4 The drift and collision of the Indian continent with the Eurasian continent

1= wandering path for the Indian continent; 2= collision direction; 3= Asian continent; 4= Indian continent

与此同时, 印度板块的逆时针旋转以及持续的推挤产生一近北西西向的侧向分压(图5之箭头2), 形成现今高原西缘外侧一系列呈扇形发散的走滑断裂带(图1, 图5), 与高原东部相反, 北侧为右旋, 南侧为左旋, 而且由南向北走滑速度趋小, 这似乎表明高原岩石圈物质不仅在向东南侧挤出, 同时也有着向西侧的侧向挤出。

5 结论

通过上文的讨论, 得出以下几点结论:

(1) 高原南缘广泛发育的晚新生代浅色花岗岩

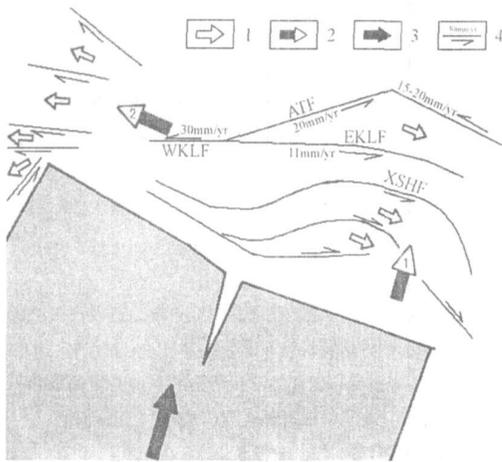


图5 高原物质的迁移及走滑断裂带的形成与形变

ATF. 阿尔金断裂; WKLF. 西昆仑断裂; EKLF. 东昆仑断裂; XSHF. 鲜水河断裂。1. 物质迁移方向; 2. 受力方向; 3. 印度大陆碰撞方向; 4. 断层走滑方向及速度

Fig. 5 Migration of the material from the Plateau and formation and deformation of strike-slip faults

ATF = Altun fault; WKLF = West Kunlun fault; EKLF = East Kunlun fault; XSHF = Xianshuihe fault.

1 = migration direction of the material from the Plateau; 2 = force direction; 3 = collision direction of the Indian continent; 4 = direction and velocity of the strike-slipping of faults

是增厚地壳底部部分熔融的产物,表明在印度次大陆最终碰撞前,由于新特提斯洋洋壳和洋脊的先后俯冲碰撞,该地区地壳已经增厚。这一方面造成东南“大拐弯”地区下地壳和岩石圈地幔的拆沉,成为重力低值区;另一方面在增厚地壳底部形成了有利于印度次大陆地壳注入的相对软弱层。

(2)对高缘南缘横向地球物理特征进行对比研究后发现,东、西两侧深部岩石圈结构存在着明显的差异,表明印度次大陆东、西两侧向欧亚大陆碰撞的方式和强度均不相同:东侧早而且强烈,导致在北北东向主压应力场中叠加了一个逆时针方向的扭应力场。这一方面造成高原内原本大致呈东西向的断裂带展布形式和运动方式发生了重大变革;另一方面也促使高原岩石圈物质同时向东南侧及西侧挤出。

参考文献:

[1] POLLARD D D. New departures in structural geology and tectonics [EB/OL]. <http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSF/>, 2003.

[2] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. 地球学报, 1995, (1):

1-9.

- [3] 潘裕生. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] MASEK J G, ISACKS B L, FIELDING E J et al. Rift flank uplift in Tibet: Evidence for a viscous lower crust [J]. *Tectonics*, 1994, 13(3): 659-667.
- [5] BOURJOT L, ROMANOWICZ B. Crust and upper mantle topography in Tibet using surface waves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, 19: 881-884.
- [6] GRIOT, DA, MONTAGNER J P, TAPPONNIER P. Phase velocity structure from Rayleigh and Love waves in Tibet and its neighboring regions [J]. *Geophys. Res.*, 1998, 103: 21215-21323.
- [7] MÉTIVIER F, GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, MEYER B. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: the Qaidam and Hexi Corridor basins, China [J]. *Tectonics*, 1998, 17(6): 823-842.
- [8] BECK R A, BURBANK D W, SERCOMBE W J et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia [J]. *Nature*, 1995, 373: 55-58.
- [9] ROWLEY D B. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 145: 1-13.
- [10] ENGLAND P C, MCKENZIE D P. A thin viscous sheet model for continental deformation [J]. *Geophys. J. R. ASTRON. Soc.*, 1982, 70: 295-321.
- [11] ENGLAND P C, HOUSEMAN G A. The mechanics of the Tibetan plateau [M]. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 1988, 326, 301-320.
- [12] 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.
- [13] ARGAND E. La tectonique de l'Asie. Proc. 13th [A]. *Int. Geol. Congr. Brussels*, 1924, 7: 171-372.
- [14] ZHAO W L, DAVE A, YUEN. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust: A temperature-dependent discous model [J]. *Tectonics*, 1987, 6(4): 505-514.
- [15] CHEMENDA A I, BURG J P, MATTAUER M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: geopoem based on new modeling, geological and geophysical data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 174: 397-409.
- [16] OWENS T J, ZANDT G. The implications of crustal property variations on models of Tibetan Plateau evolution [J]. *Nature*, 1997, 387: 37-43.
- [17] 丁林, 来庆洲. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约 [J]. *科学通报*, 48(8): 836-842.
- [18] HARRISON T M, MCKEEGAN K D, LE FORT P. Detection of inherited monazite in the Manaslu leucogranite by $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ion microprobe dating: Crystallization age and tectonic significance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133: 271-282.

- [19] ENGLAND P, LE FORT P, MOLNAR P et al. Heat sources for Tertiary metamorphism and anatexis in the Annapurna-Manaslu region, Central Nepal [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 2107—2128.
- [20] GUILLOT S, LE FORT P. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranite [J]. *Lithos*, 1995, 35: 221—234.
- [21] ZHAO W J, NELSON K D, PROJECT INDEPTH TEAM. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet [J]. *Nature*, 1993, 366: 557—559.
- [22] HIRN A, JIANG M, SAPIN M et al. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet [J]. *Nature*, 1995, 375: 571—574.
- [23] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示 [J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248—255.
- [24] RUDINICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and composition of the continental crust: a lower crust perspective [J]. *Rev. Geophys.* 1995, 33: 267—309.
- [25] 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.
- [26] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究 [J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 308—315.
- [27] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理剖面岩石圈结构与动力学 [J]. *科学通报*, 1999, 44(12): 1257—1265.
- [28] 秦国卿, 陈九辉, 刘大建等. 昆仑山脉和喀喇昆仑山脉地区的地壳上地幔电性结构特征 [J]. *地球物理学报*, 37(2): 193—199.
- [29] ARORA B R, MAHADEVAN T M, GUPTA K R. *Indian Continental Lithosphere: Emerging Research Trends* [M]. Geological Society of India, 2003.
- [30] 周国藩, 陈建国, 张健. 青藏高原卫星重力场及所反映的壳幔结构和深部构造特征 [J]. *地球科学*, 1996, 21(2): 191—197.
- [31] 杨振宇. 印度支那地块第三纪构造滑移与青藏高原岩石圈构造演化 [J]. *地质学报*, 1998, 72(2): 112—125.
- [32] TAPPONNIER P, MEYER B, AVOUAC J P et al. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 97: 382—403.
- [33] MEYER B, TAPPONNIER P, BOURJOT L et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibetan plateau [J]. *Geophys. J. Int.*, 1998, 135: 1—47.

The model for the subduction and collision of the Indian plate with the Eurasian plate and its implications for the tectonic evolution of the Qinghai-Xizang Plateau

ZHOU Zheng-yu, LIAO Zong-ting

(*School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: The geological and geophysical studies show that there are large discrepancies for the distribution, strike-slip direction and tectonic styles of the faults in the southern and northern parts of the Qinghai-Xizang Plateau, and for the deep crustal architectures in the eastern and western parts of the southern Plateau. These comparative studies indicate that the horizontal differences become apparent in the styles and strength of the subduction and collision between the Indian continent and Eurasian continent. In the light of new findings in geological studies and recent development in lithospheric delamination theory and numerical modeling experiments, we have come to the conclusion that the above-mentioned differences are caused by the crustal thickening and oblique collision prior to the hitting of the Indian continent toward the Eurasian continent.

Key words: Indian plate; Eurasian plate; plate collision; Qinghai-Xizang Plateau