

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

青藏高原北部隆升的深部构造物理作用

——以“格尔木-唐古拉山”地质及地球物理综合剖面为例

许志琴 姜 枚 杨经绥

(中国地质科学院,北京)



青藏高原北部(东昆仑山-唐古拉山)新生代以来的构造变动,可能是印度板块与欧亚板块碰撞后产生强大板内变形扩展的结果。主要表现为强烈的上隆,在 σ_1 垂直作用下的水平伸展与挤压作用的交替,盆-山体系的形成,裂谷型火山活动及大规模纵行走滑作用造成的块体逐一向东挤出。利用天然地震对岩石圈进行探测,发现岩石圈下部(下地壳及岩石圈地幔,60—120 km)存在高、低速层紧密相间的水平分带及具左行走滑的岩石圈断裂。综合地质与地球物理资料,本文提出了高原深部地幔底辟作用,建立了高原北部隆升的深部构造物理作用动力源的新模式。

关键词 青藏高原北部 地球物理 隆升 地幔底辟

本文的宗旨是将陆-陆碰撞以来的青藏高原腹地北部(昆仑-唐古拉地区)所发生的构造事件^[1],结合天然地震方法所获得的岩石圈探测资料,探讨青藏高原北部隆升的深部构造物理作用及其动力源(图1)。

本文所利用的资料包括:“格尔木-唐古拉山”地质走廊的新成果,天然地震转换波对岩石圈结构的研究、剪切波的各向异性及地震层析分析等,并参考了曾融生先生等研究成果^[2]。

1 青藏高原北部新生代构造变动

青藏高原北部的新生代变形是陆-陆碰撞之后板内变形扩展的结果,伴随隆升主要变形特征及构造-岩浆-沉积作用分述如下。

1.1 陆相拉分盆地形成

大量始新世—渐新世陆相断陷盆地沿纵向断裂分布,由湖相砂岩及泥岩组成,厚达2km以上。根据西藏安多一带第三纪盆地的研究表明,盆地现存形态并非初始形态,原始盆地方向为NE向,或ENE向,反映其为纵向断裂左行扭动所形成的拉分盆地(图2,3)。

1.2 新生代的碱性火山活动

新生代火山活动主要发生在可可西里地区,即金沙江缝合带两侧,大致分为南北两带,北

注:本文为地质矿产部、国家科委国际合作司及法国宇宙科学研究所支持中法“东昆仑及邻区岩石圈缩短机制”项目第一阶段地质与地球物理综合成果,参加工作的还有国家地震局地壳应力所的赵国光、青海省地质矿产局赵荣理以及中国地质科学院李海兵、史大年、薛光琦、曲景川、吕庆田、钱方、马开义等。

本文1995年10月收到,1996年3月改回,王毅编辑。

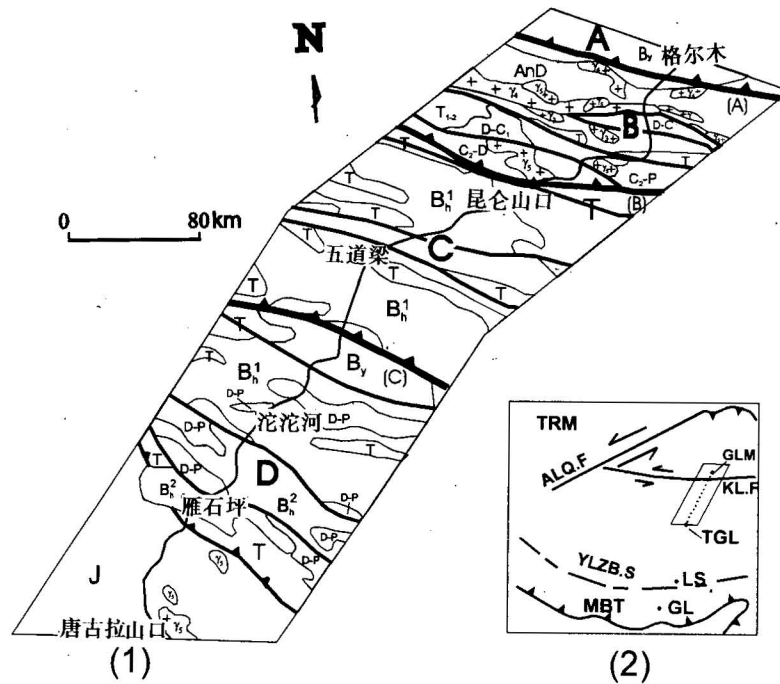


图1 昆仑-唐古拉地区地质走廊(1)及地质-地球物理剖面图(2)

Fig. 1 A geological corridor in the region of the Kunlun and Tanggula Mts. (1), and location of the geological and geophysical profile (2)

(1)地质走廊:A 柴达木地体;B 昆仑地体;C 巴颜喀拉地体;D 羌塘地体;(A)昆北缝合带;(B)昆南(阿尼玛卿)缝合带;(C)金沙江缝合带;By 白垩纪陆相红色盆地;B₁ 老第三纪以来盆地;B₂ 新第三纪以来盆地;(2)剖面位置:TRM 塔里木盆地;ALQ.F 阿尔金断裂;YLZB.S 雅鲁藏布江缝合带;MBT 主边界冲断层;KL.F 昆仑山断裂;GLM 格尔木;TGL 唐古拉山口;LS 拉萨;GL 嘎拉

(1)Geological corridor;A Qaidam terrain;B Kunlun terrain;C Bayanhar terrain;D Qiangtang terrain;(A)North Kunlun suture belt;(B)South Kunlun (Anyemaqen) suture belt;(C)Jinshajiang suture belt;By Cretaceous continental facies red basin;B₁ Eogene basin;B₂ basins since Neogene;(2)location of profile;TRM Tarim basin;ALQ.F Altyn Tang fault;YLZB.S Yarlungzangbo suture belt;MBT main boundary thrust;KL.F Kunlun fault;GLM Golmud;TGL Tanggula Shankou (pass);LS Lhasa;GL Gala

带西起布喀达板峰以南,可可西里湖以北至二道沟,长400km;南带在乌兰乌拉湖以南,经沱沱河至玉树西南的杂多,长1000km,南北火山岩带均呈WNW-ESE向展布。火山岩以岩被形式盖在渐新世及更老地层之上,其上被第四系下更新统覆盖,构成火山岩台地地貌。

可可西里北带火山岩属橄榄安粗岩组合(图3)。主要岩性包括安粗岩、橄榄安粗岩、粗安岩及粗面岩等,Baker(1982)^[3]称这类岩石为富钾安粗岩,此外还有SiO₂含量较低的碱性玄武岩。

二道沟以北风火山以西的芷麻希孔粗面岩火山颈年龄为32Ma^[4],南带火山岩更偏碱性,属于石榴石钾镁煌斑岩-粗面岩系列,伴随正长岩及碱性岩侵入,年龄为30Ma^[5]。大量火山岩年龄为20Ma至今。

橄榄安粗岩组合被解释为远离板块边界的裂谷型的火山弧,这种含碱较高的安山岩浆一般被认为主要来源于壳幔边界的局部熔融,形成深度较大,并且在岩浆房内经历了长时间的分

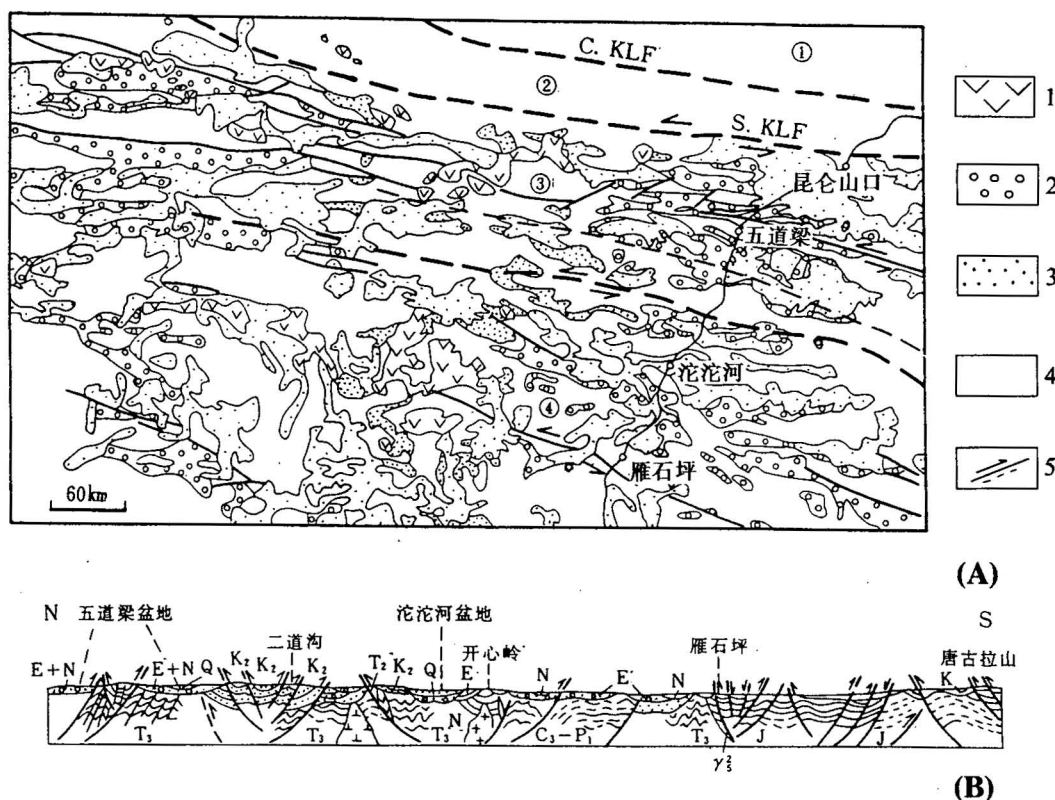


图2 青藏高原北部(可可西里地区)新生代陆相火山及沉积盆地图示
 Fig. 2. Distribution of Cenozoic continental facies volcanic and sedimentary basins in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau (the Hoh Xil region)

(A): 1. 火山岩; 2. 早期第三纪陆相盆地; 3. 中晚第三纪—第四纪陆相盆地; 4. 前新生代基底; 5. 走滑断层;
 ①昆北地体; ②昆南地体; ③巴颜喀拉地体; ④羌塘-唐古拉地体; (B) 五道梁-唐古拉构造剖面图;
 (A) 1. Volcanic rocks; 2. Eocene continental facies basins; 3. Neogene to Quaternary continental facies basins;
 4. Pre-Cenozoic basement; 5. strike-slip fault; ① North Kunlun terrain; ② South Kunlun terrain; ③ Bayanhar terrain;
 ④ Qiangtang-Tanggula terrain; (B) Wudaoliang-Tanggula structure section

异,促使碱金属不断富集^[6],而碱性玄武岩直接来自于地幔的局部熔融。

1.3 走滑作用及块体向东挤出

新生代以来大规模剪切作用使高原北部发生了块体的相对位移,主要的走滑断裂有如下几条(图3):

阿尔金断裂 ENE向,以左旋走滑为主,逆冲分量占1/10—1/20。第四纪走滑累计位移39—50km,平均滑移速率为13—16.7mm/a^①。

昆仑断裂(库赛湖-玛曲断裂) WNW-ESE向,长1000km,由一系列左行系列断层组成,沿带发育一系列宽谷、拉分盆地和隆起构造。第四纪累计左旋75km,近2—3万年累计水平位

① Zhao Guoguang. Quaternary faulting in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau; their roles in the evolution of the Kunlun mountain orogenic belt. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte—France, September, 1995; 50.

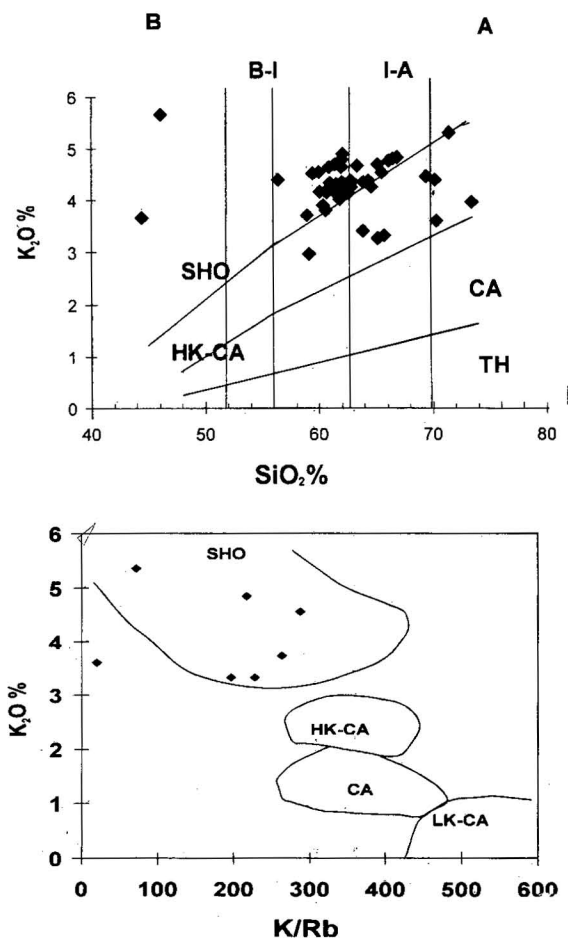


图3 可可西里新生代陆相火山岩的分类图

Fig. 3 The composition of Cenozoic volcanic rocks in the Hoh Xil region

SHO 橄辉安粗岩组合;HK-CA 高钾钙碱系列;CA 钙碱系列;TH 拉斑系列;LK-CA 低钾钙碱系列;B 基性系列;I: 中性系列;A 酸性系列;(B-I) 中基性系列;(I-A) 中酸性系列

SHO Shoshonite association; HK-CA high-K calcic-alkaline series; CA calcic-alkaline series; TH tholeiitic series;LK-CA low-K calcic-alkaline series; B basic series; I intermediate series;

II acid series; B-I intermediate-basic series;I-A intermediate-acid series

错量 200 m,全新世水平滑动速率各段不一,西大滩 11.5mm/a,东大滩 9.3 mm/a,花石峡 11.5 mm/a,玛曲 7.0mm/a^①。

鲜水河弧形断裂 位于巴颜喀拉-松潘甘孜带中,在昆仑山口与昆南断裂相交,呈 NW-SE 向延伸,至四川康定转为南北向。其形成时代为 20 Ma^[7],由于东南部抬升较高,以韧性剪切带形式出露于古生代及前寒武纪变质岩系中;而西北部为脆性断层,位于三叠系西康群及巴颜喀

① Zhao Guoguang. Quaternary faulting in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau; their roles in the evolution of the Kunlun mountain orogenic belt. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte—France, September, 1995;50.

拉群复理石岩系中,沿断层发育新生代断陷盆地,近代有强震活动。该断层具左行走滑性质,累计走滑量 60—80 km,估算炉霍地区的平均速率为 16 mm/a,道孚为 14 mm/a,乾宁 12 mm/a,康定 10 mm/a^①。

玉树-金沙江弧形断裂 西起乌鲁格-木孜塔格山经玉树往南拐至金沙江,形成于三叠系,为古特提斯洋壳残存的蛇绿混杂岩带。新生代以来表现为左行平移性质,在断裂东南端的哀牢山糜棱岩带,其形成时代为 15—20Ma。

班公湖-澜沧江弧形断裂 根据沿断裂的始新世—渐新世陆相拉分盆地分布,揭示该断裂亦具有左行走滑的特点。特别提出的是沿该断裂东段分布一系列南北向含矿花岗斑岩体(50—10 Ma),它与强烈左行走滑作用有关。

上述表明,青藏高原腹地存在大型左行走滑断裂系,它使南侧块体自西向东逐一挤出。与此同时,昆仑山断裂以南的巴颜喀拉及唐古拉地区产生一系列弧形逆冲断裂系,使中生代地层盖在第三系盆地之上,其形成时代可能为 15—12Ma。

地壳上隆 上新世至早更新世是高原北部地壳强烈隆升期,根据本区出现了 3 期砾石层沉积,表明有 3 次强烈上隆^②:(1)60—50Ma:强烈抬升形成断陷盆地及下伏地层不整合;(2)15—12Ma:褶皱,推覆构造及不整合出现,上升速率约 13—50 mm/a;(3)5—4Ma:断裂,褶皱及不整合,上升速率约 1.5—22.7 mm/a;估计 60Ma 以来高原北部平均上升至少 4000m。

2 青藏高原北部的岩石圈探测

中法合作天然地震探测剖面,即格尔木-昆仑山口-安多-拉萨-日喀则-定日剖面,全长 2000km,设有 110 台地震仪。依据 SKS,PKS 及 PS 等模波分裂特征,作出了青藏高原岩石圈地幔的各向异性图,利用层析技术给出 400 km 内的速度图象,通过天然地震转换波研究,还获得格尔木-温泉的岩石圈结构剖面(图 4)。

2.1 天然地震转换波对岩石圈结构的研究

利用 1993 年中法合作在青藏高原布设的地震三分量台站,进行了天然地震转换波的研究,获得格尔木-温泉 PS 转换波到时差剖面(图 4)^③,提供了研究岩石圈结构的基础。

岩石圈层状结构 根据高低速转换界面相互交替的特点可将岩石圈结构分为三部分:(1)上部地壳:位于 20—30km 深度,横贯全区的格尔木-温泉低速带,为向南缓倾(5°—10°)的主滑脱界面,其上部存在两条滑覆界面,即格尔木-昆仑山口-五道梁盆形滑覆带(5—10km 深)及二道沟-温泉滑覆带(10—25km 深,北倾 30°)。此两带将上部地壳划分为三个自北往南滑覆叠置岩片;(2)中部地壳内高低速带呈稀疏交替;(3)下地壳-上地幔:以水平的高、低速转换界面的

① Zhao Guoguang. Quaternary faulting in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau: their roles in the evolution of the Kunlun mountain orogenic belt. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte—France, September, 1995:50.

② Qian Fang. A magnetic stratigraphic section of Pliocene-Pleistocene age and quantitative study on the uplift of the Qinghai-Xizang plateau. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte—France, September, 1995:30.

③ Xue Guangqi, Su Hepin, Shi Danian, Poupinet G. Studies on deep-seated structures in Tibet plateau using converted waves. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte—France, September 21—22, 1995:45.

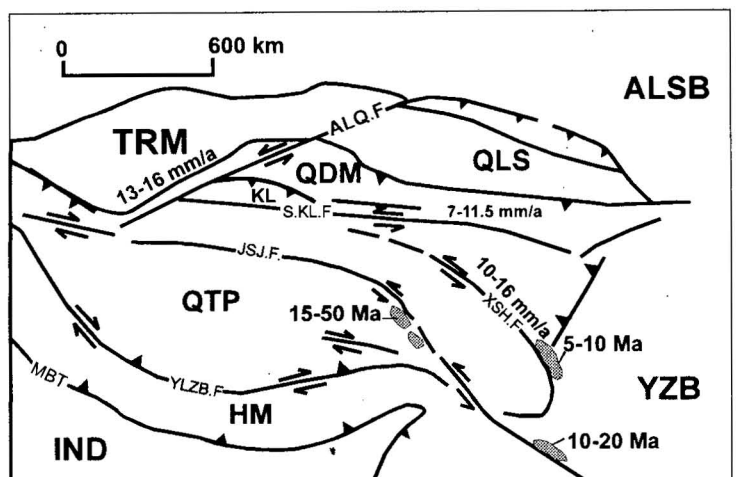


图4 青藏高原北部岩石圈剪切作用图示

Fig. 4 Diagram showing the lithospheric shearing in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau

HM 喜马拉雅前陆逆冲带; QTP 青藏高原腹地; QDM, TRM 柴达木、塔里木后陆盆地; QLS 祁连山后陆逆冲带; ALSB, YZB, IND 阿拉善、扬子及印度地块; KL 昆仑山; ALQ. F. 阿尔金断裂; S. KL. F. 昆南断裂; XSH. F 鲜水河断裂; JSJ. F 金沙江断裂; YLZB. F 雅鲁藏布江断裂; MBT 主边界逆冲断裂;

1. 逆冲断裂; 2. 走滑断裂; 3. 花岗岩; 4. 走滑速率; 5. 花岗岩时代

HM Himalaya forland thrust belt; QTP hinterland of the Qinghai-Tibet plateau;

QDM Qaidam backland basin; TRM Tarim backland basin; QLS Qilianshan

backland thrust belt; ALSB Alashan terrian; YZB Yangzi terrain;

IND India terrain; KL Kunlun Mountains; ALQ. F. Altyn

fault; S. KL. F south Kunlun fault; XSH. F Xianshuihe fault;

JSJ. F Jinshajiang fault; YLZB. F Yarlungzangbu fault;

MBT main boundary thrust; 1. thrust fault; 2. strike-slip

fault; 3. granitoid rocks; 4. displacement rate;

5. age of the intrusions

相互交替为特征,莫氏面上下有两条贯穿全区的低速带(深度 60—65km 及 75km),其下出现一系列断续的低速带,组成厚达 80km 以上的岩石圈下部结构。

岩石圈流变学 岩石圈流变学是研究组成岩石圈物质的变形与流动行为及其机制的边缘学科,是根据岩石圈物质变形规律而确定的。

岩石圈中上部以低温弹性-脆性或弹性-塑性流变占主导地位,而下部地壳则以塑性-粘性及高温稳态流动为特征($t \geq 10^3 a$)。大陆造山带中的岩石圈流变学典型剖面一般是以“三明治”结构为特征,但本剖面中出现频繁高低速带的交替,表明岩石圈特别是下部具“多明治”结构特征。格尔木-温泉地震转换波到时差剖面显示了 4 条岩石圈断裂的影象:(1)格尔木往南倾斜的阶梯状断错带(相当于昆北断裂带的位置),该断裂在地表上显示昆仑山往北叠覆在柴达木盆地

上的逆冲断层,而深部则表现为正断特征;(2)昆仑山口不连续带,相当于昆仑-阿尼玛卿缝合带及左行走滑断裂位置;(3)昆仑山口南的阶梯状断裂带相当于昆南断裂的位置;(4)五道梁及沱沱河之间的不连续带相当于金沙江缝合带的位置;上述表明,古特提斯缝合带由于后期改造而变陡,可达 100 km 的深度。

2.2 剪切波各向异性及岩石圈下部运动学

中法地球物理考察队(1993—1994年)根据格尔木-定日天然地震 SKS 与 PKS 波的研究,确定了各向异性的方向及强度(图 5)^①。笔者在此基础上进一步划分 5 个各向异性域: 1. 喜

① Shi Danian, Dong Yingjun, Jiang Mei, Ma Kaiyi, Poupinet G, Hirn A, Nercessian A. Shear wave anisotropy beneath the Qinghai-Tibet plateau. Symposium on uplift, deformation and deep Structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte-France, September 21-22, 1995;34.

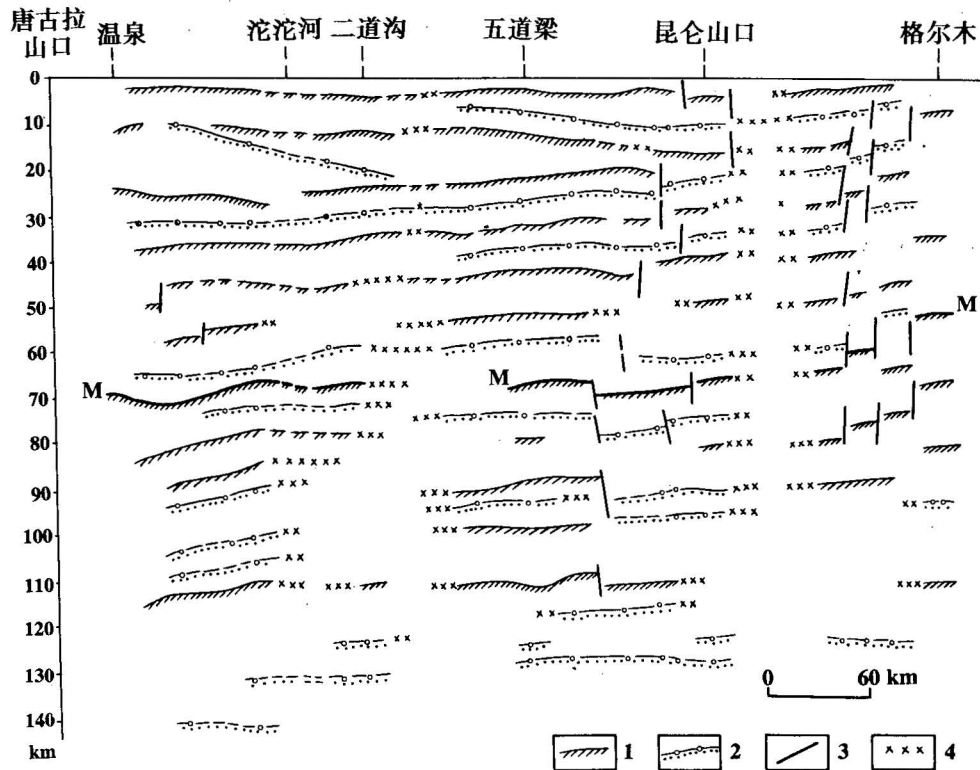


图 5 利用转换波获得的格尔木至唐古拉推断的地壳剖面

Fig. 5 Interpreted crustal profile from Golmud to Tanggula obtained using the converted wave

1. 高速转换界面; 2. 低速转换界面; 3. 推断断层; 4. 不连续带

1. Converting interface of high velocity; 2. converting interface of low velocity;

3. inferred fault; 4. zone of discontinuity

马拉雅域; II. 拉萨域; III. 安多-那曲域; IV. 昆仑山-唐古拉山域; V. 格尔木域. 涉及本剖面的为 IV 与 V 域. IV 域(即研究区)的各向异性方向(φ)以 NE 方向为主,各向异性强度大; ($\delta=0.59-1.4s$)根据公式计算各向异性厚度平均为 70.07 km; V 域各向异性方向为 WNW,强度也较大($\delta=0.4-1.28$),厚度为 58.17 km. 很多学者倾向于各向异性是代表上地幔橄榄石晶体的优选方位^[8]. 笔者认为,地震波各向异性可能代表下地壳与上地幔各向异性的总和,其主要理由是:上地幔橄榄石存在很强地震各向异性,[100]与[010]的纵波速差 25%,横波速差 10%. 下地壳斜长石也存在较强地震波各向异性,[010]与[100]纵波速差 14%—17%,横波差 11%—12%. 根据本区转换波获得地壳结构资料,厚达 70km 以上的地震波各向异性层恰好对应于上述的“多明治”结构带(厚度约 70 km). 表征着各向异性层(低速带)与各向同性层(高速带)的总和. 在各向异性层内,斜长石(下地壳)的[010]轴与橄榄石(上地幔)的[100]轴平行,在昆仑-唐古拉区中呈 NNE 向排列,在柴达木地区呈近东西向排列. 各向异性实质上代表岩石圈下部拉伸线理方向,因此各向异性层可能为深部的滑脱层、熔融层和韧性(或韧粘性)剪切层.

2.3 地幔底辟

研究区地震层析资料表明^①, 岩石圈 100km 以上的羌塘-唐古拉地体为低速区, 与岩石圈结构剖面(图 4)中多低速层有关, 巴颜喀拉(即扬子地体)为高速区, 与较少的低速层有关。

在可可西里 200—360km 深处出现一个大的低速异常体, 呈“心脏形”(图 6, 7), 宽达 250km, 厚度达 160km, 其北界位于昆仑山口以南, 南界位于沱沱河以北, 其上部周缘出现一系

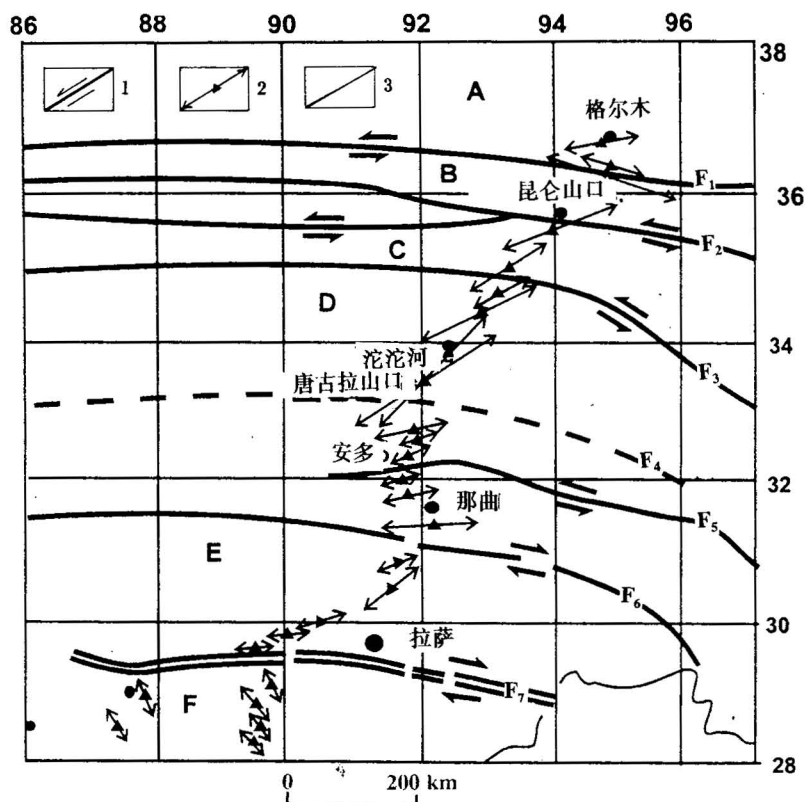


图 6 青藏高原北部的深部剪切波各向异性图

Fig. 6 Diagram showing anisotropy of shearing wave at depth of the northern part of the Qinghai-Tibet plateau

A 柴达木地体; B 昆仑地体; C 巴颜喀拉地体; D 羌塘地体; E 拉萨地体; F 喜马拉雅地体; 1. 走滑断层;
2. 各向异性; 3. 断层; F₁ 昆北断裂; F₂ 昆南断裂; F₃ 玉树-金沙江断裂; F₄ 唐古拉断裂;
F₅ 斑公湖-澜沧江断裂; F₆ 谷露-嘉黎断裂; F₇ 雅鲁藏布江断裂

A Qaidam terrain; B Kunlun terrain; C Bayanhar terrain; D Qiangtang terrain; E Lhasa terrain; F Himalaya terrain; 1. strike-slip faults; 2. anisotropy; 3. fault; F₁ North Kunlun fault; F₂ South Kunlun fault; F₃ Yushu-Jinshajiang fault; F₄ Tanggula fault; F₅ Bangonghu-Liancangjiang fault; F₆ Gulu-Jiali fault; F₇ Yarlungzangbo fault

列的低速异常体, 并沿金沙江断裂直达地表。它们与新第三纪火山岩带部位相当, 根据碱性火

① Lu Qingtian, Jiang Mei, Ma Kaiyi, Hirn A. Nercessian A, Spain S. The crust and upper mantle structure beneath southern Tibet: implication from travel time and tomography inversion. Symposium on uplift, deformation and deep structure of northern Tibet. Abstracts, La Grande Motte-France, September, 1995, 23.

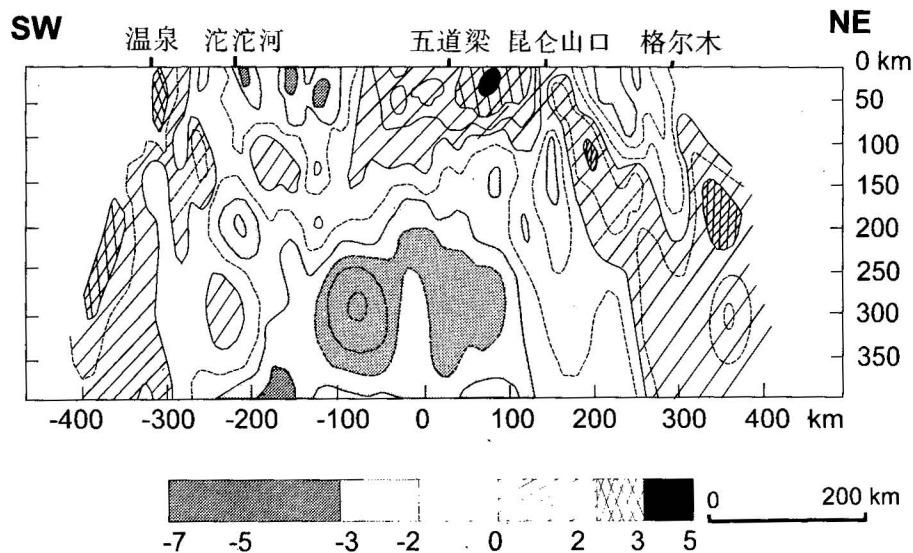


图7 青藏高原北部地震层析图

Fig. 7 A cross-section of the northern Qinghai-Tibet plateau, based on data from seismic tomographic inversion

山岩具有来源上地幔及壳幔边界的特点,因此可以认为,低速异常体代表高热、高导及蠕变强度极低的物理性能,很可能存在地幔热柱体,即地幔底辟,是新生代火山喷发的深部渊源;而其周缘的小低速异常体可看为热点。

3 高原隆升与深部构造物理作用及其动力源

新生代是青藏高原陆壳急剧增厚、强烈隆升和高原形成时期,特别是中、上新世以来,青藏高原内部变形,表现为以 σ_1 垂直应力场下的伸展、挤压及走滑断裂为主,而高原周缘强烈冲断-推覆作用使刚性克拉通(阿拉善,扬子及印度克拉通)楔入高原地壳之中。

位于高原中心的地幔底辟的存在,揭示了深部构造物理作用的重要动力源。据地幔底辟与碱性火山岩有成因联系推断,动力源由粘滞性高热流体组成,驱动力可能为上地幔的放射性及地核释放的热量,因为目前有一种观点强调了上涌的热物质来源于上地幔底部(670km)“D”层的地幔柱,而上涌可能与核幔边界的突变事件有关^[9],从“D”层上来的快速热流使地幔岩石加热,造成局部熔融及地幔对流,并形成地幔底辟及热点。

由于地幔底辟内热流首先可能通过一系列小漩涡方式,即湍流作用而转化为上涌流及下沉流组成的对流系统(图8),一方面沿上地幔及岩石圈下部水平层圈结构侧向流动,形成拉伸扩展的应力场;另一方面,沿古老断裂系统(岩石圈断裂)上升直达地表,形成可可西里大规模的火山喷溢作用。地幔底辟内的湍流及热物质的上涌可能是形成本区岩石圈多层次高、低速带交替的主要原因,因为远离热柱影响区,低速层明显减少。在岩石圈上部(中、上地壳)拆离层及低角度正断层的活动一般控制沉积盆地的形成(从老第三纪开始)。剖面中岩石圈断裂的

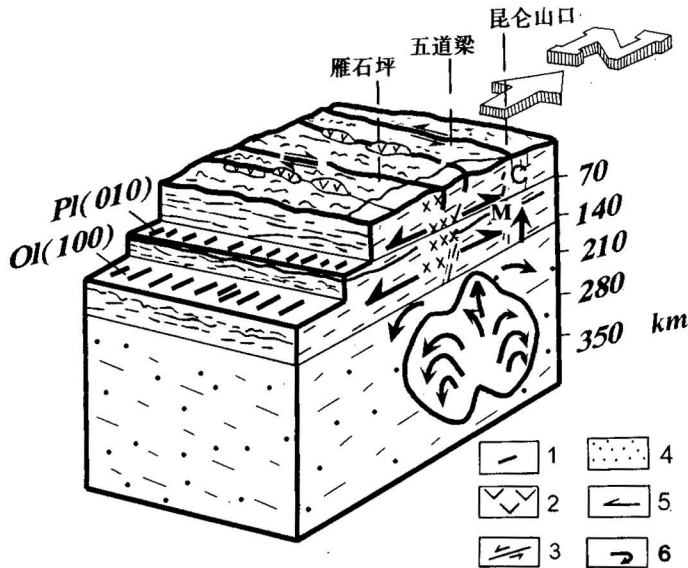


图8 青藏高原腹地上隆的深部热-动力模型

Fig. 8 A deep thermal-dynamic model for the uplift of the hinterland of the Qinghai-Tibet plateau

- 1: 拉伸线理; 2. 碱性火山岩; 3. 走滑断层; 4. 岩石圈断裂; 5. 物质流动方向;
6. 下沉流及上涌流; C 地壳; M 地幔
1. Stretch lineation; 2. alkaline volcanic rocks; 3. strike-slip fault;
4. lithosphere fault; 5. direction of mass flowing; 6. downwelling and upwelling flows; C crust; M mantle

[010]及橄榄石[100]晶体在高温下的定向排列面,其各向异性方向与地幔底辟长轴方向(WNW-ESE)并不完全垂直,这可能与岩石圈剪切作用造成的块体偏转有关。至于昆仑山以北的格尔木域,其各向异性方向突变为WNW-ESE向的原因还有待进一步查明。但是,远离地幔底辟,岩石圈处于挤压应力状态(昆仑山向北推覆在柴达木盆地之上),造成拉伸矢量与南区呈直交方向是可能的(图9)。

综上所述:(1)青藏高原北部(东昆仑山-唐古拉山)新生代以来伴随强烈上隆的构造变形及岩浆、沉积作用,反映了与以(1(最大主应力)垂直为主的应力场作用有关。(2)根据天然地震的资料表明,研究域的南部于200—360km深处存在低速异常的地幔底辟。地幔底辟中流体湍流作用及地幔对流,是形成下地壳及岩石圈地幔70km厚的高低速层相间的多明治结构、剪切波各向异性、岩石圈下部伸展动力学及沿岩石圈断裂新生代碱性火山岩喷发的主要原因。(3)笔者^[6,11-13]曾提出青藏高原隆升的深层热隆扩展的观点,但当时并没有深部资料的证实,根据本文的研究成果,笔者认为青藏高原腹地隆升的主要原因与大陆内部深部热驱动——地幔底辟有关。而周缘地体隆升的原因是多向陆内俯冲。即印度楔体向北俯冲^[10,14-16],阿拉善向南俯冲^[17],扬子地块往西俯冲^[6],而印度板块楔的往北推挤只能造成亚洲大陆南部走滑作用及块体的向东挤出。

形成大部分因循了古老的构造带,如昆南-阿尼玛卿断裂及金沙江断裂均起始于古特提斯俯冲带。鲜水河断裂则形成于20Ma。根据地表构造研究,这些断裂中生代以来均具有左行平移特点,且第三纪走滑速率有自西往东、自北往南增加的趋势,表明了岩石圈左旋剪切作用,使青藏高原北部块体的南部具有相对北部逐一向东挤出的运动学特征。笔者同意P. Tapponnier(1980)^[10]提出的青藏高原岩石圈剪切作用是与印度板块楔体陆内俯冲于欧亚大陆之下的观点。

最后,我们来解释昆仑山口-唐古拉山剪切波各向异性方向为NE-SW向的原因。岩石圈下部,强各向异性代表了沿低速层的拉伸滑移剪切矢量,在地幔及热物质上升造成的拉伸背景下,热物质相背流动的特征,通过下地壳斜长石

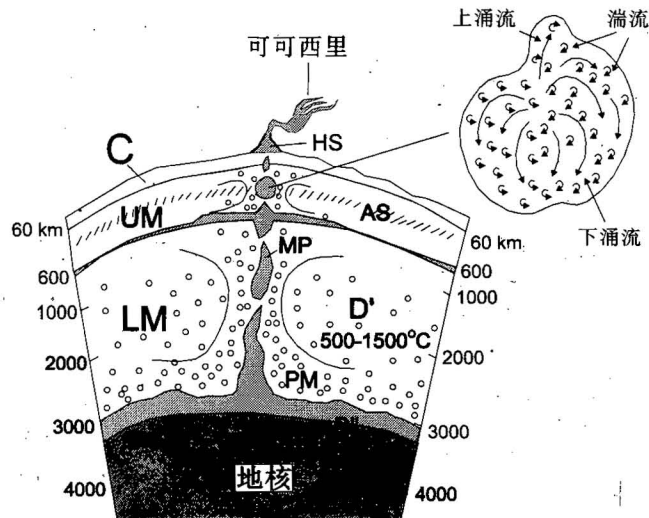


图9 地幔底辟湍流作用的成因假设

Fig. 9 A hypothesis for the genesis of the mantle diapir and torrent

C 地壳; UM 上地幔; AS 软流圈; LM 下地幔; PM 局部熔融; MP 地幔柱; HS 热点;
D' 下地幔主体; D'' 幔核之间热流层

C Crust; UM upper mantle; AS asthenosphere; LM lower mantle; PM partial melting; MP mantle plume;
HS hot spot; D' main part of lower mantle; D'' layer of thermal flow between mantle and core

参 考 文 献

- 1 许志琴, 崔军文. 大陆山链的变形构造动力学. 北京: 冶金出版社, 1995.
- 2 曾融生等. 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型, 地震学报, 1992, 14: 523-533.
- 3 Baker P E. Evolution and classification of orogenic volcanic rocks. In: Andesites, Orogenic Andesites and Related Rocks, edit by R. S. Thrope. John Wiley & Sons. 1982.
- 4 许荣华, Harris N B W, Lewis C L, Hawkesworth C J, 张玉泉. 拉萨至格尔木的同位素地球化学. 青藏高原地质演化, 北京: 科学出版社, 1990.
- 5 张以弗, 郑健康. 青海可可西里及邻区地质概论. 北京: 地震出版社, 1994.
- 6 王德兹, 周新民. 火山岩石学. 北京: 科学出版社, 1982.
- 7 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程, 北京: 地质出版社, 1992.
- 8 Silver P G, Chan W W. Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy. Nature, 1988, 335: 34-39.
- 9 马石庄. 地球深部研究——地球科学发展的挑战与机遇. 地球物理学进展, 1994, (4): 18-29.
- 10 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. Coward, M. P. & Ries, A. C. (eds) Collision Tectonics, Geological Society Special Publication, 1986, (19): 115-157.
- 11 崔军文, 朱红, 武长德等. 青藏高原岩石圈变形及动力学. 亚东-格尔木岩石圈地质学断面综合研究, 北京: 地质出版社, 1992.
- 12 崔军文. 岩石圈深层扩展——青藏高原隆升、岩石圈深层扩展模式初探. 地质论评, 1994, 40(2): 106-110.
- 13 崔军文, 许志琴. 再论青藏高原动力学模式-岩石圈深层热动力扩展模式. 北京: 中国地球物理学会年刊, 1995.
- 14 李廷栋. 青藏高原的深部构造和隆升机制. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论. 地质出版社, 1985.

- 15 吴功建,高锐等. 青藏高原“亚东-格尔木地学断面”综合地球物理调查与研究. 地球物理学报, 1991, 34(5): . 552—561.
- 16 Zhao Wenjin, Nelson K D. Project INDEPTH Team, Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. Letters to Nature, 1993, 557—559.
- 17 吴宣志, 吴春玲, 吴杰, 卢杰. 深地震反射剖面研究. 北祁连-河西走廊地壳细结构. 地球物理学报(增刊), 1995, (38).

**TECTONOPHYSICAL PROCESS AT DEPTH FOR THE UPLIFT OF THE
NORTHERN PART OF THE QINGHAI-TIBET PLATEAU: ILLU-
STRATED BY THE GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL COMPREH-
ENSIVE PROFILE FROM GOLMUD TO THE TANGGULA
MOUNTAINS, QINGHAI PROVINCE, CHINA**

Xu Zhiqin, Jiang Mei and Yang Jingsui

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Abstract

The tectonic activities since the Cenozoic in the region of the Kunlun and Tanggula mountains in the northern part of the Qinghai-Tibet plateau are represented by substantial uplift of the plateau, alternation of horizontal extension and compression due to the σ_1 vertical action, rift-type volcanic activity, formation of the basin-range system, and eastward extrusion of blocks from the plateau caused by the strong intraplate deformation propagation after the collision between the Indian plate and the Eurasian plate. Research on the lithospheric structure through seismic converted waves indicates that in the region the lower crust and lithospheric mantle, at depths between 60—120 km, have a “multi-sandwich structure” which is frequently altered by high-velocity and low-velocity horizontal layers, and have lithosphere faults with a strike-slip sense. The 70 km thick anisotropic layer reflected by the shear wave in the region of the Kunlun and Tanggula mountains is considered to be equal to the alternating high-velocity and low-velocity layers in the lower part of the lithosphere (lower crust plus litho-mantle), representing the directions of the shear vectors. By integrating the geological and geophysical data, the paper proposes a model of mantle diapir to explain the tectonophysics and dynamic source at depth for the uplift of the northern part of the Qinghai-Tibet plateau.

Key words: northern part of the Qinghai-Tibet plateau, geophysics, uplift, mantle diapir

作 者 简 介

许志琴,生于1941年,1964年毕业于北京大学地质系,毕业后于中国地质科学院地质研究所,主要从事构造地质等方面的研究。现任该所研究员及中国科学院院士。通讯处:北京市百万庄中国地质科学院地质研究所,邮政编码:100037。