

## 青藏高原地壳的伸缩及其力学性质

崔作舟

**摘要：** 根据青藏高原地壳厚度，采用平衡剖面法对地壳伸缩量进行了粗略的计算，表明其水平缩短约1400km，垂直方向伸张约30km或25km。如此巨大的地壳伸缩量证明了青藏高原地壳为弹粘性体，绝非所谓的刚性板块。

**关键词：** 青藏高原；地壳伸缩；弹粘性体；非弹性形变；刚性板块

**中图分类号：** P551

**文献标识码：** A

### CRUSTAL EXTENSION-SHORTENING OF QINGHAI-TIBET PLATEAU AND MECHANICAL PROPERTIES IMPLICATIONS

CUI Zuo-zhou

(562 Comprehensive Institute of CAGS, Sanhe Hebei 065201, China)

**Abstract:** The amount of extension and shortening of the crust of the Qinghai-Tibet plateau is roughly calculated from its thickness using the method of balanced section. The results show that it has shortened about 1400km in the N-S direction and extended 25 ~ 30km in the vertical direction. Such a tremendous shortening and extension may indicate that the crust of Qinghai-Tibet plateau behaves as a elasto-viscous rather than rigid body.

**Key words:** Qinghai-Tibet plateau; Crustal shortening-extension; Elasto-viscous body; non-elastic deformation; rigidity plateau

1966年H·杰弗里斯提出：为什么这么多的重要山系都出现在中国西部或其附近？许多中外地球科学家围绕这一问题在我国的青藏高原进行过考察或观测。自1980年中-法喜马拉雅山国际合作以来，又连续开展了中-美、中-英、中-德、中-法等一系列国际合作，同时，我国的地球科学家也进行了大量的实地调查与研究，亚东—格尔木及格尔木—额济纳旗地学断面综合调查研究是其中的一部分。这些成果给探讨青藏高原的形成提供了线索或依据。

地球科学家们依据有限的资料，按照各自不同的学术观点，对青藏高原的形成作过各种推测。早期的观点可以归纳为两类：一类认为垂直运动是原生的和主导的；另一类则认为水平运动是主导的，垂直运动是派生的。已有文献指出，垂直运动说的重力均衡理论已不能解释高原的隆起，因为喜马拉雅带为正的重力均衡异常，处于补偿过剩状态，地壳理应下沉，但实际上那里正以大约15 ~ 50mm/a的速度上升；恒河平原

为负重力均衡异常，处于补偿不足状态，地壳理应抬升，而那里实际上仍在拗陷。这些现象说明青藏高原目前不是处于重力均衡调整阶段，而是处在水平构造力持续作用状态之中。但是，这并不能否定重力均衡在地壳变动中的作用。

二十世纪后期崛起的板块构造理论早期认为板块为刚体，只能用印度板块向青藏板块之下低角度俯冲并构成“双地壳”导致高原地壳增厚和地面的隆升来解释。Warsi W E X(1977)等提出：恒河盆地和喜马拉雅大型负重力异常是印度板块以 $15^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 的平缓角度沿印度缝合线、中心(央)逆掩断层和主边界断层发生俯冲，从而使喜马拉雅在横向上缩短了300km~400km。陈炳蔚(1979)提出：由南向北的强大的挤压作用引起的是刚性块体的整体上升而不是褶皱造山，但他没有解释青藏高原地壳为什么比正常的陆壳增厚近一倍的事实。中-法喜马拉雅山合作的深地震测深结果表明不存在“双壳结构”。A Hirn指出：地壳厚度的倍增不是两个完整的地壳相互叠置的结果，而更象是上地壳和下地壳分别倍增的结果。C J Allegre等提出了因大陆逆冲作用而使岩石圈缩短的可能性。P Tapponnier等(1981)曾认为：西藏高原可以不同于手风琴式的地壳缩短和增厚的方式而抬升……。他们承认高原的抬升与地壳的缩短和增厚有关。根据青藏高原深地震测深成果，用平衡剖面法计算证实了青藏高原地壳的巨大伸缩及其组成岩石的力学特性。

## 1 青藏高原的地质构造与地壳结构

### 1.1 青藏高原的地质构造轮廓

青藏高原以昆仑山北缘近EW向断裂带为界，南侧为西藏—青南高原，北侧为青—甘高原。西藏—青南高原以中生代地层及岩浆岩为主，古生界与前古生界地层及岩浆岩只出露在局部地带。主体构造(以褶皱和逆冲断层为主)在高原中部地段多近EW向，与其配套的为NE-SW及NW-SE向断面较陡的两组扭性断层，以及近S-N向的张性断裂。向东主体构造渐转为SE方向，向西则渐转为NW方向，总体呈一横卧的“S”型构造，中部宽两端变窄，似成一胃形，表明在新生代该区地壳曾遭受过近SN方向的强烈挤压作用，并导致地壳的明显缩短和地面的抬升。

青—甘高原与前者略有差别，以古生代及新生代地层及岩浆岩为主，前古生代及中生代地层只出露在局部地带。本区主体构造为NWW-SEE走向，与西藏—青南高原主体构造线呈明显的斜接关系。它的配套断裂构造主要为NNW-SSE向的压扭性断裂系，以及NE-SW走向的张扭性断裂系。青—甘高原由祁漫塔格隆起带、柴达木盆地、祁连山隆起带及河西走廊山前盆地构成。河西走廊为青藏高原北部的边缘构造带，或者说是新生代年轻造山带与中生代以来的稳定地块之间的过渡带。柴达木盆地为青—甘高原年轻造山带内的山间盆地。该区的地质构造现象表明，在新生代的喜马拉雅运动时期，该区曾遭受过NNE-SSW方向的相对挤压导致地壳的缩短及地面的隆升或拗陷。

### 1.2 青藏高原的地壳结构 [1, 2]

青藏高原的地壳结构与新生代的地质构造相呼应。昆仑山北缘断裂带两侧的地壳结构既有共性又有差异(图1)。归纳如下：

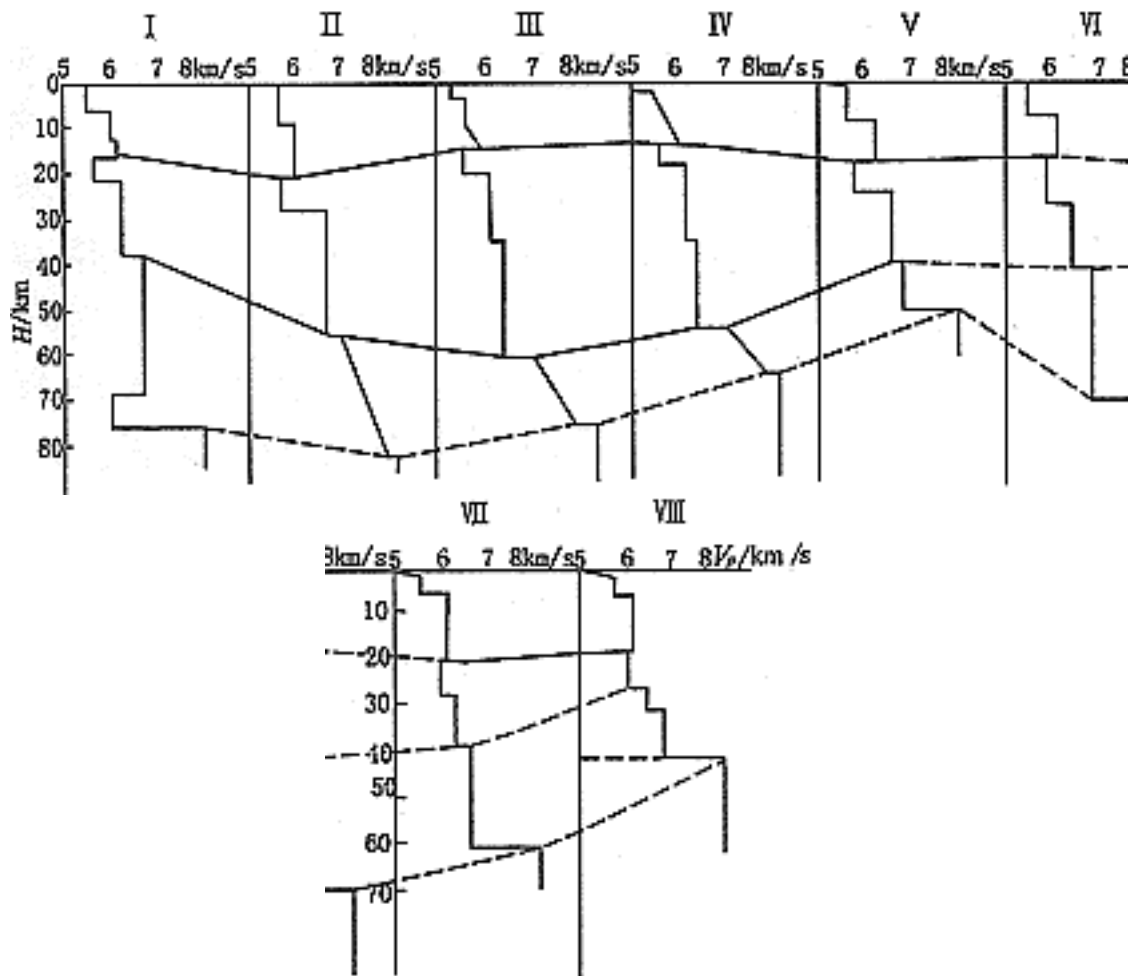


图1 青藏高原地壳速度结构示意图 [1,2]

Fig.1 Sketch of crustal velocity structure in Qinghai-Tibet plateau

喜马拉雅构造带； 冈底斯构造带； 巴颜喀拉构造带； 昆仑构造带； 柴达木盆地； 祁连山隆起带； 河西走廊边缘构造带； 北山及阿拉善地块

(1) — 区的地壳都比正常大陆地壳厚得多。柴达木盆地的地壳较薄(52km ~ 60km)；冈底斯构造带地壳最厚，可达80余公里；祁连山可达70余公里，其北部边缘构造带为50km ~ 60km，几乎都比正常大陆地壳约厚一倍左右。

(2)根据速度结构对比，可将 — 区的地壳划分为三层：上地壳的波速  $V_p < 6.3\text{km/s}$ ；中地壳含5.5 ~ 5.9km/s的低速层或  $V_p < 6.10\text{km/s}$ 的速度逆转层，以及  $V_p = 6.4 \sim 6.6\text{km/s}$ 的常速层；下地壳可以是波速  $V_p = 6.6 \sim 7.0\text{km/s}$ 的匀速层，也可以是  $V_p = 7.0 \sim 8.0\text{km/s}$ 的梯度层。它们都含有壳内低速层，使中\上地壳具有较强的活动性。

(3) — 区的中地壳相对较厚，唯有 带中地壳厚度小于下地壳； — 区的中地壳厚度相对稳定，而下地壳厚度都大于中地壳。下地壳的增厚主要表现在莫霍面埋藏深度的变化上，其中唯有 区下地壳厚度比中地壳厚度还小，所以地壳的总厚度也较小。

(4) — 区的下地壳速度相对较高，平均速度为6.8 ~ 7.0km/s，一般都含有7.0 ~ 8.0km/s的梯度层，属壳-幔过渡带，其中只有 区例外；而 — 区的下地壳速度都较

低，平均速度为6.8km/s。

值得注意的是西藏—青南高原的下地壳较薄，但速度值相对较高；而青—甘高原的下地壳较厚，但速度值相对较低。这些现象可能说明，前者下地壳有地幔物质的渗入。而后者下地壳虽有明显增厚，但没有地幔物质的参加。

## 2 青藏高原地壳的伸缩

前述表明，青藏高原的地壳受S-N及NNE-SSW向挤压而缩短并增厚，地壳结构表明青藏高原的隆升与地壳缩短及增厚密切相关，实质是青藏高原地壳受压后的伸与缩。作者曾在《青藏高原速度结构和深部构造》<sup>[1]</sup>一书中明确提出，青藏高原地壳的增厚与在SN方向上高原地壳的缩短密切相关。

由于亚东—格尔木及格尔木—额济纳旗两条地震测深剖面的完成<sup>[1,2]</sup>，对青藏高原的地壳结构全貌有了概括的了解，因而有可能对青藏高原地壳的缩短量进行估算。在假定地壳变形前后体积不变的前提下，可以采用T Chamberlin(1910,1919)的平衡剖面法对高原地壳的伸缩量进行估算。此方法是建立在“体积守恒”前提下，而后再转化为“面积守恒”(图2)。

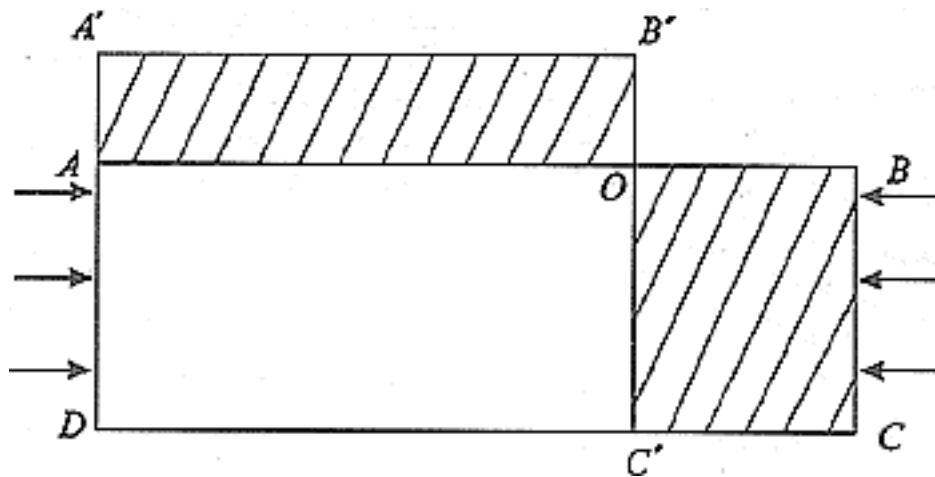


图2 平衡剖面法示意图

Fig.2 Sketch showing the method of balanced cross section

如图2，假定地壳剖面为ABCD，经受相对挤压后，剖面发生了缩短和增厚，变为A'B'C'D'。令AD=BC= $t_0$ (原地壳剖面厚度)；A'D'=B'C'= $t_1$ (现地壳剖面厚度)；AB=DC= $L_0$ (原地壳剖面长度)；A'O=O'B'= $L_1$ (现地壳剖面长度)；则AA'=OB'= $t$ (地壳厚度增量)；CC'=O'D'= $L$ (地壳长度缩短量)。

根据平衡剖面法“面积守恒”的假定，则 $ABCD=A'B'C'D'$ 。

即 $L_0 t_0 = L_1 t_1$ ， $L_0 = L_1 t_1 / t_0$ 。显然，现剖面长度 $L_1$ 及现地壳厚度 $t_1$ 为已知数，而 $t_0$ 虽属未知数，但据高原南北两侧稳定地块的地壳厚度可以给出。南侧印度地盾的地壳厚度为30km~34km，北山及阿拉善地块的地壳厚度为35km~40km，它们与正常大陆地壳

厚度接近。故对青藏高原变形前的地壳厚度可分别取为35km或40km。由此可以计算出原来青藏高原地壳的长度。同时也可以计算出：

$$L=L_0-L_1\cdots\cdots\text{地壳剖面缩短量}, \quad t=t_1-t_0\cdots\cdots\text{地壳剖面厚度增量}。$$

因为青—甘高原下地壳速度值低，说明下地壳的增厚并非为上地幔物质加入所致，故地壳厚度按60km取值。而青南—西藏高原的下地壳有壳幔过渡带速度值较高，可能有上地幔物质渗入，故地壳平均厚度取值应适当减小，取为65km。青南—西藏高原的剖面长度为1180km；而青—甘高原的剖面长度为550km。将上述各项取值代入前列公式，计算结果列于表1。

表1 青藏高原地壳伸缩计算表

Table 1 Extension and shortening of the crust calculated in Qinghai-Tibet plateau

	现长 $L_1$ /km	现厚 $t_1$ /km	原厚 $t_0$ /km	原长 $L_0$ /km	缩短 $L_0-L_1$ /km	压缩率/%
青—甘高原	550	60	40	825	275	33
	550	60	35	942	392	42*
	550	60	30	1100	550	50
	550	55	40	756	206	27
	550	55	35	864	314	36
	550	55	30	1008	458	45
青南—西藏高原	1180	70	40	2065	885	43
	1180	70	35	2360	1180	50
	1180	70	30	2753	1573	57
	1180	65	40	1917	737	38
	1180	65	35	2191	1011	46*
	1180	65	30	2556	1376	53

注：表中有\*号者为作者认为取值适当者

由表1可知，青南—西藏高原地壳在平均增厚约30km的情况下，地壳缩短约1000km；而青—甘高原地壳在平均增厚25km时，地壳缩短近400km。二者垂向伸长分别为85.7%和71.4%；而地壳在近SN的水平方向上分别缩短46%和42%。

### 3 青藏高原地壳的力学性质

对青藏高原地壳的力学性质，除板块理论认为是刚体外，多数地球科学家持不同的见解。板内地震的频频发生和地震波长距离的传播，无疑证实了青藏高原地壳弹性的存在。而大量的地质构造现象如褶皱与断裂并存，不仅证实了地壳具有弹性，而且还具有粘性体的特征，这表明青藏高原地壳绝非刚性体。

青藏高原地壳比正常陆壳增厚将近一倍左右，这早已是众所周知并为后来的大量资料所证实。前述用平衡剖面法求得的地壳缩短量是惊人的。地壳如此巨大的伸缩量，进一步确证青藏高原地壳不仅不是刚体，也不是纯弹性体，只能是弹粘性体，否则就不可能发生如此剧烈的非弹性形变，并有如此巨大的伸缩量。此外，青藏高原地壳低Q值特征也是证据之一；祁连山区壳-幔泊松比较高，也表明了它具有较强的塑性特征。

此外，青藏高原及其周边广阔的地域内，存在大量弧形构造带，山前普遍存在逆掩推覆构造等，都表明地壳表层存在着大量的粘性流动现象。现有的弹粘性理论表明，岩石的形变不仅与岩石自身的组构和力学性质有关，而且还与应力作用持续的时间有关。当应力作用时间比物体的弛豫周期短时，物体将发生弹性形变；但当应力作用时间比物体的弛豫周期长时，则物体发生非弹性形变，其中包括塑性形变和流变等。此外，地壳的力学性质与地壳的温度也有着极为密切的关系。

李四光先生(1961)提出地壳运动主要起源于地球自转角速度的变化。王仁教授(1982)依据这一理论，对轴对称情况下地球自转速率变化引起的全球应力场问题进行了探讨<sup>[3]</sup>，采用分层弹性快速模型及缓变模型计算，结果表明，短周期的快速模型在赤道附近产生的纬向最大正应力量级很小，不足以推动地壳运动。对地壳运动采用长周期( $10^6 \sim 10^7$ a)缓变模型时，如按弹性体计算，若  $\dot{\omega} / \omega$  长期保持一个变化率，则应力可以积累相当大的量级，足以引起地壳的破裂或褶皱，而且计算结果与全球宏观地质构造现象有一定的对应关系。尽管如此，地壳运动的理论问题尚有待进一步研究。

作者简介：崔作舟(1934—)，男，研究员，从事地质力学、地震地质等研究工作。  
作者单位：中国地质科学院五六二综合研究所，河北 三河 065201

## 参考文献

- [1] 崔作舟，尹周勋，等.青藏高原的速度结构与深部构造 [M].北京：地质出版社，1992.
- [2] 崔作舟，李秋生，等.格尔木—额济纳旗地学断面的岩石圈结构与深部构造 [M].北京：地质出版社，1999.
- [3] 王仁，丁中一.轴对称情况下地球自转速率变化及引潮力引起的全球应力场 [J].地质力学论丛，第6号.北京：科学出版社，1982.

收稿日期：1999-07-20