

中国岩石圈三维结构雏型

袁学诚¹ 李廷栋²

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:根据岩石圈的流变习性, 可以将中国岩石圈分成 3 层, 即: 弹性上地壳、塑性下地壳和岩石圈地幔。它们的构造各不相同, 并且各层间呈现复杂的关系。在新疆地区, 上地壳推覆叠置形成以三山四盆为特点的盆山构造, 驮伏在一系列东西走向的条带状背型构造与向型构造的下地壳之上。在强烈隆升中的西藏地区, 它的周边是差异隆升, 但它的腹部地区的弹性上地壳完整未遭破坏。这是因为它的腹部的下地壳和岩石圈地幔发生局部熔融, 上地壳被局部熔融的下地壳和岩石圈地幔顶托, 以液压的方式整体抬升。华北地区, 则是软流圈上升破坏了岩石圈地幔, 形成新生地幔与残留地幔并存的蘑菇云岩石圈地幔构造。并由于软流圈的上升, 使地壳拉张减薄形成裂谷盆地。中国大陆除了东北吉辽地区太平洋板块向大陆俯冲外, 东部其他地区都没有发现太平洋板块俯冲的证据。中生代以来中国东部发生的岩石圈巨变不是太平洋板块向中国大陆的俯冲而造成的, 而是软流圈物质上涌的结果。因此, 中国大陆当今的构造动力, 是西部由印度板块俯冲推挤和东部东亚-西太平洋软流圈上升构成的二元系统。这两个动力系统的分界是南北地震带。在南北地震带以西整体处在压缩环境中; 南北地震带以东, 则处在拉张环境中。正是由于应力场由压缩转变成拉张产生的剪应力造成了南北地震带。华北地区所以成为地震活动地区是因为它的岩石圈地幔已被强烈的改造成为蘑菇云构造, 热流上升, 弹性层急剧减薄, 弹性极限下降所致。

关键词: 岩石圈; 三维结构; 新疆叠置盆山构造; 西藏液压抬升; 东部蘑菇云构造; 南北地震带

中图分类号: P544 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)01-0029-24

经典的板块构造理论认为, 地球的刚性外壳是由驮伏在软流圈上的离散的运动板块所组成, 这种板块的组合就定义为岩石圈。板块川流不息地在洋脊处形成, 沿俯冲带沉入地球内部。

一个理想的岩石圈板块是指一个围绕着通过地心的想象的旋转轴旋转, 在它的内部没有变形的区域^[1]。这个想象的旋转轴称为尤拉(Euler)轴, 它与地表相交的两个点称为尤拉(Euler)极(图 1)。

对于一个真实的地球, 刚性的板块只能是一个近似。因为通常我们都不考虑沿断层的应变, 也都没有注意到板内非弹性应变。

最近, Bird^[2]应用多种最新成果对板块的边界作了新的划分, 发表了一个板块边界的数字升级模型, 他按 Morgan 的定义, 将全球划分成 52 个板块(图 2)。这样划分后的板块已接近板块是刚性块体

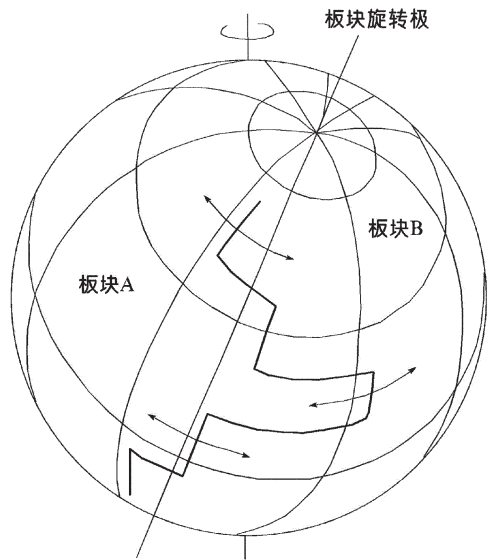


图 1 理想的板块和它的尤拉轴
Fig.1 Ideal plate and its Euler axis

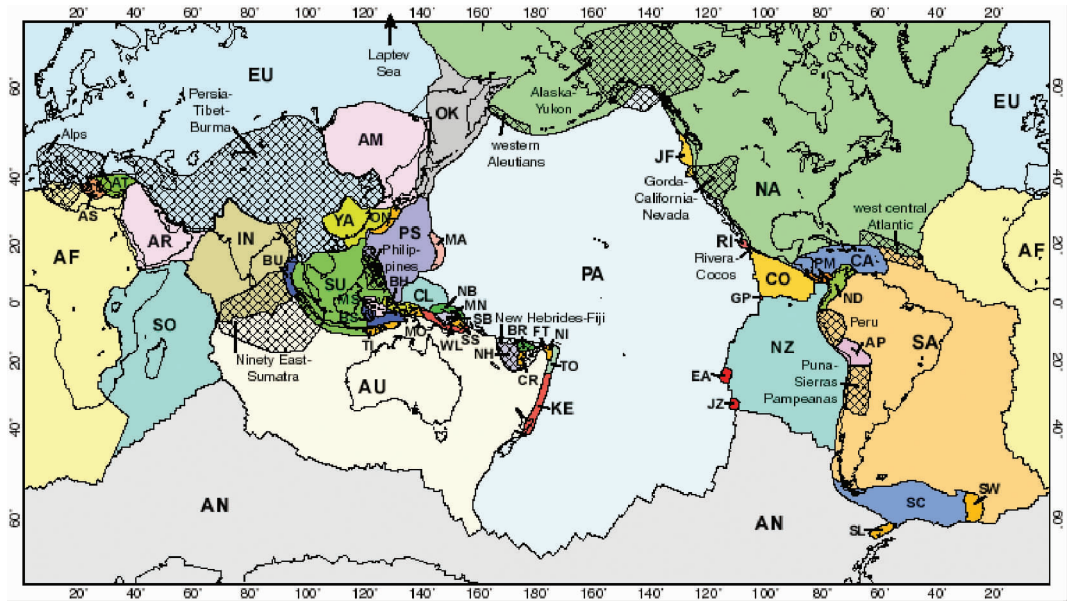


图2 全球板块构造边界新模型^[2]
(图中斜方块示造山带)

AF-非洲板块;AM-黑龙江板块;AN-南极洲板块;AP-阿尔提普兰诺板块;AR-阿拉伯板块;AS-爱琴海板块;
 AT-安纳托利亚板块;AU-澳大利亚板块;BH-鸟头板块;BR-巴莫拉尔礁板块;BS-班达海板块;BU-缅甸板块;
 CA-加勒比板块;CL-卡罗林板块;CO-科克斯板块;CR-康威礁板块;EA-复活节板块;EU-欧亚板块;FT-富图纳板块;
 GP-加拉帕戈斯板块;IN-印度板块;JF-胡安德富卡板块;JZ-胡安弗兰德兹板块;KE-克马德克板块;MA-马里安纳板块;
 MN-马努斯板块;MO-毛珂板块;MS-摩鹿加海板块;NA-北美板块;NB-北俾斯麦板块;ND-北安第斯板块;
 NH-新赫布里底板块;NI-纽阿福欧板块;NZ-纳兹卡板块;OK-鄂霍次克板块;ON-冲绳板块;PA-太平洋板块;
 PM-巴拿马板块;PS-菲律宾海板块;RI-里维埃拉板块;SA-南美板块;SB-南俾斯麦板块;SC-苏格兰;SL-设得兰板块;SO-索
 马里板块;SS-所罗门海板块;SU-巽他板块;SW-三维治板块;TI-帝汶板块;TO-汤加板块;WL-伍德拉克板块;YA-扬子板块

Fig. 2 New model for boundaries of global plate tectonics^[2]
(cross-hatched areas signify orogens)

AF-Africa plate;AM-Amur plate;AN-Antarctica plate;AP-Altiplano plate;AR-Arabia plate;AS-Aegean Sea plate;AT-Anatolia plate;
 AU-Australia plate;BH-Birds Head plate;BR-Balmoral Reef plate;BS-Banda Sea plate;BU-Burma plate;CA-Caribbean plate;
 CL-Caroline plate;CO-Cocos plate;CR-Conway Reef plate;EA-Easter plate;EU-Eurasia plate;FT-Futuna plate;GP-Galapagos
 plate;IN-India plate;JF-Juan de Fuca plate;JZ-Juan Fernandez plate;KE-Kermadec plate;MA-Mariana plate;MN-Manus plate;
 MO-Maoke plate;MS-Molucca Sea plate;NA-North America plate;NB-North Bismarck plate;ND-North Andes plate;
 NH-New Hebrides plate;NI-Niuafou'ou plate;NZ-Nazca plate;OK-Okhotsk plate;ON-Okinawa plate;
 PA-Pacific plate;PM-Panama plate;PS-Philippine Sea plate;RI-Rivera plate;SA-South America plate;
 SB-South Bismarck plate;SC-Scotia plate;SL-Shetland plate;SO-Somalia plate;SS-Solomon Sea plate;SU-Sunda plate;
 SW-Sandwich plate;TI-Timor plate;TO-Tonga plate;WL-Woodlark plate;YA-Yangtze plate

的假设。他认为即使将板块看成是一个近似不变形的块体,但有的地区,仍然很难定义板块,这些地区,无论从地震、地质或是大地测量都可以证明它们是非弹性的。Bird 将这些地区称为造山带。在他的板块图中 共厘定 13 个造山带。包括阿尔卑斯—波斯—西藏,菲律宾群岛,秘鲁安第斯,加利福尼亚—内华达带等。其中中国大陆及其毗邻海域占有最大的一片(图2)。

Bird 的板块构造模型是全球构造的一大进步,

它不但使厘定的板块(至少其地表部分)基本上符合刚性块体的前提,并且将造山带和板块并立成为全球构造中的一级构造。将全球构造由一元论(只有板块一种构造单元)提升到二元论(既有刚性的板块也有非刚性的造山带)。对立统一的法则是宇宙中所有事物都应该遵循的基本规律。

美国自然科学基金委员会在网上发表的白皮书^[9]更是认为板块构造模型不适合大陆地质。他们认为作为固体地球的统一理论的板块构造是从观察大洋

洋底中孵化出来的。大洋板块是刚性板块,它们的变形、地震以及火山活动都发生在它们的边界上。但是,大陆造山带内部广泛的变形及复杂的构造说明,大陆决非是刚性的。相对于大洋板块来说,大陆是较柔性的,根据 GPS、地震学和地层学的研究,在大陆岩石圈内部和其边界上都有显著的变形。这一流变的习性是大陆造山作用的特征,表现在各个方面,包括大陆的汇聚、离散和转换断裂。为了改进对大陆构造的了解,就需要详细全面地研究大陆地壳和地幔岩石的流变学。

1 岩石圈的流变学力学性质

地质学中的流变学研究在外力作用下岩石流变习性及其变形。

在外力作用下,有 3 种具有不同习性的形变,它们是:弹性形变、塑性形变和粘性形变。

当作用在物体上的外力未超过弹性极限时,物体发生弹性形变。弹性形变服从虎克定律,应力正比于应变,形变与时间无关:

$$\sigma = Ee$$

其中 σ 为应力

e 为应变

E 为杨氏模量

外力消失后,弹性体的形变瞬间恢复。

当作用在物体上的应力大于弹性极限时,发生塑性形变,外力消失后,形变无法恢复,为永久变形(图 3)。继续加大作用力,物体破裂(图 3, F 点)。

外力作用在粘性物体上时产生粘性形变,服从牛顿定律,应力正比于应变速率:

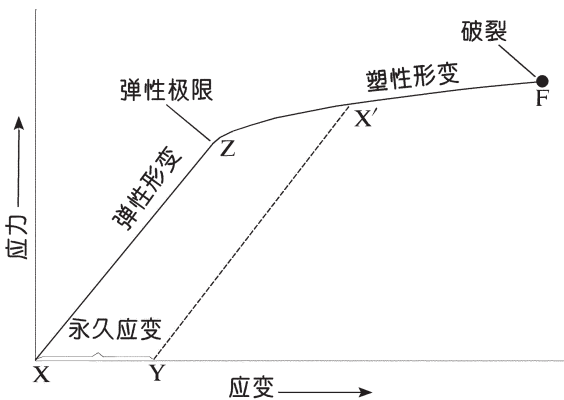


图 3 弹性形变与塑性形变

Fig.3 Elastic deformation and plastic deformation

$$\sigma = \eta \frac{de}{dt}$$

其中 σ 为应力

η 为粘滞度

e 为应变

当物体发生粘性形变时,应力消失后物体不能恢复原状,为永久形变。例如用注射针筒去抽取粘滞的机油,位移与外力同时发生,停止抽动,位移仍然存在,就是粘性形变的一个实例。

弹性、塑性与粘性的不同程度的结合可形成其他流体。如:

粘塑性(viscoplastic)体:是兼具塑性和粘性特征的物体。当应力低于屈服应力时,不流动。当应力高于屈服应力时,流动与牛顿型流体一样。

粘弹性(viscoelastic)体:是兼具弹性和粘性的特征的物体。在静态环境下,粘弹性有应力松弛与蠕变。所谓应力松弛是指它的内应力随着时间的延长而减小的现象。所谓蠕变是说它的变形随着时间的延长逐渐增加的现象。

马克斯韦尔(Maxwell)液体:或即液态粘弹性物体。由弹性和粘性两种成分组成的物体。其中弹性成分不成为骨架而埋在连续粘性成分中,这种物体对短时间尺度来说像一个弹性固体,但对长时间尺度来说,像一个粘性流体。

开尔文(Kelven)固体:或即固态粘弹性物体。由坚硬骨架及填充于空隙的粘性液体所组成。

地球是一个复杂的组合体,很难用学术术语作精确的描述。近似的来说,地壳上部近似弹性体。地壳下层近似于塑性或粘性。地幔可以看成是一个马克斯韦尔体,它对于短时间尺度的地震波的传播来说像一个固体,但对于长时间尺度的地幔对流来说像一个流体。在岩石中有部分熔融层时,可以看成是一个开尔文体。

流行的大陆岩石圈强度流变模型是果冻三明治模型(图 4)。这种模型认为地壳上部富含石英,为脆性层,它的变形特征是粘滑或脆性破坏,剪应力与正应力具线性关系,服从 Byerlee 摩擦定律。随着深度的加大,岩石的强度也越来越大。深度的进一步加大,温度和围压都急剧加大,地壳下部变得越来越具塑性,服从石英-辉绿岩流变律。从莫霍界面过渡到岩石圈地幔,塑性的长英质下地壳变为主要由脆性橄榄石组成的岩石圈地幔,强度便出现由弱到强的

突变。这样,岩石圈便成为由强度较大的上地壳和岩石圈地幔夹持强度较低的下地壳相互叠置而成的结构。称为果冻三明治结构^[4]。

Jackson J^[5]对这种模型提出质疑。他以印度和西藏的碰撞缝合带为例,重新计算得到更为精确的震中深度分布和重力资料,认为地壳内的发震层是唯一发生地震的地段,是强度大的层位。上地幔不是一个发震层,不是一个强度大的层位,而是相对弱的层位。大陆的构造和力学性质主要受控于上地壳,而不是地幔。但是,Jackson 叫停果冻三明治模型似乎资

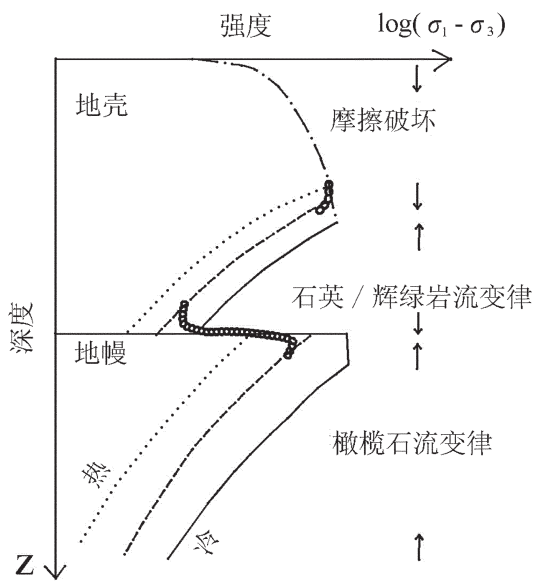


图4 岩石圈果冻三明治模型

当地温为低(实线)、中(虚线)、高温(点线)条件下的地壳和地幔相对于深度的力学强度变化曲线。曲线的上部为粘滑或脆性破坏,在剪应力与正应力之间具线性关系且服从 Byerlee 摩擦定律。下地壳和上地幔的强度各服从下地壳与上地幔的流动律。圆滑虚线代表在脆性转换带和壳幔转换带处可能是渐变的。两个地震活动层在有些地区与上地壳与地幔顶部的相对 σ_D 极大相对应,而无地震的下地壳则与 σ_D 的极小相对应^[4]

Fig.4 Jelly sandwich model of lithosphere

A schematic diagram of the variation of the mechanical strength of the crust and uppermost mantle with respect to depth for cold (solid curve), intermediate (dash curve), and warm (dotted curve) geotherms. The upper part of the curve represents stick slip or brittle failure behavior and is based on a linear relationship between the shear stress and normal stress and Byerlee's law for friction. The strength in the lower crust and upper mantle is controlled by flow laws of crustal and mantle materials, respectively. The dash curve is smoothed to indicate possible gradual changes of strength in the brittle transition zone and the crust-mantle boundary^[4]

料尚嫌不足。深入地幔的大洋俯冲带同时是一个地震带,可见地幔内地震是可以发生的,但它们没有余震,这又说明幔内地震发震机制与壳内不同。此外,Jackson 分析地震发生的部位是以印度板块俯冲到西藏地块之下的模型为参考的。但印度和西藏的碰撞存在变数。现有资料说明,印度板块的俯冲是从雅鲁藏布缝合带处近垂直向下,而不是以低角度插入到西藏地块之下的。此外,宽角反射地震和近垂直反射地震普遍发现上地幔顶部是一个与下地壳截然不同的高速高密度层。重力资料也证实这个高密度界面的存在,很难用 Jackson 的模型解释。中国东部坚硬岩石圈地幔的崩溃导致中国形成时间最老也是最坚硬的华北克拉通上地壳的破碎,它并没有像 Jackson 所推论的那样,控制住大陆的构造和力学性质。在中国的大部分地区岩石圈强度模型应该还是果冻三明治。但也存在非果冻三明治模型,它们可以看成是一个特例。

2 中国岩石圈三维构造区划

中国岩石圈构造区划已发表不少文献^[6-13],每个方案都有他们独到的见地。

在《中国岩石圈三维结构》项目启动时,李廷栋^[14]遵循岩石圈各单元应该具有地壳表层地质构造的雷同性;具有相似的岩石圈结构构造;具有统一的地球物理场特征;具有统一的构造应力场特征;具有相似的地球化学场特征;具有明显的构造界线等原则,将中国岩石圈划分为中亚岩石圈构造域和东亚岩石圈构造域两大构造域。中亚岩石圈构造域又分成西域岩石圈块体和青藏岩石圈块体。东亚岩石圈构造域又细分为松辽岩石圈块体、华北岩石圈块体、华南岩石圈块体和南海岩石圈块体等 6 个二级构造单元(图 5)。

这个区划方案也是《中国岩石圈三维结构》项目的专题组分组工作模型。

本文在总结《中国岩石圈三维结构》项目已取得的丰硕成果的基础上,继承将中国岩石圈分成二域六块的划分方案,并将它升级。升级方案不同于以前方案的主要点是在垂向上以强度为基础,按岩石圈的果酱三明治模型,分成弹性地壳(上地壳)、塑性地壳(下地壳)与岩石圈地幔等 3 巨层,利用地震活动性,不同阶次卫星重力异常和地震层析等地球物理资料构制出这 3 层的各自构造特征。得到一个岩石



图 5 中国岩石圈区划图^[4]

I - 中亚岩石圈构造域: I₁-西域岩石圈块体; I₂-青藏岩石圈块体; II - 东亚岩石圈构造域;
 II₁-松辽岩石圈块体; II₂-华北岩石圈块体; II₃-华南岩石圈块体; II₄-南海岩石圈块体

Fig.5 Division of lithosphere of China^[4]

I -Mid-Asia lithospheric tectonic domain: I₁- Western Regions lithospheric block;
 I₂-Qingzang lithospheric block; II -East-Asia lithospheric tectonic domain;
 II₁-Songliao lithospheric block; II₂- North China lithospheric block;
 II₃-South China lithospheric block; II₄-South China Sea lithospheric block

圈三维构造雏型。

研究岩石圈区划时,笔者还注意到岩石圈区划与国内流行的大地构造区划的不同。大地构造区划往往以所研究地质体的形成与演化为划分的主要标准,而在对岩石圈进行区划时笔者着重研究当今岩石圈的结构状态,淡化组成当今大陆的块体在年代和成分上的种种差别,将这个中生代已形成的中国大陆看成是

一个整体,力求阐明在外力作用下,当今岩石圈结构、力学性质与状态的变化。因此,笔者得到的岩石圈区划图与大地构造区划图会有重大差别。

将岩石圈按果冻三明治模型垂向上三分时,下地壳与岩石圈地幔之间的分界面是没有争议的,那就是莫霍界面。在莫霍面以上的地壳和莫霍面以下的岩石圈地幔在岩石密度和速度上均有显著差异。

莫霍界面同时是反射地震的强反射面，在宽角反射剖面上往往可以得到特征的 Pn 波。

但弹性地壳的厚度就不是那样容易确定，通常认为弹性地壳如受到外力作用，其强度超过弹性极限时，很快就到达破裂点，岩层即遭破坏而发生断层。压性的断层使岩层叠置，产生正地形，张性的断层使岩层分离，产生负地形，扭性的断层使岩层发生位移。岩层的破坏引发地震。在这个意义上，弹性层也是发震层 (Ts)。

另一个常用来描述近地表岩石圈弹性层划分的参数是有效弹性厚度 (Te)。但有效弹性厚度 (Te) 与发震层 (Ts) 是两个不同概念的参数。

有效弹性厚度源自地壳均衡。

有两类不同的均衡：局部地壳均衡与区域地壳均衡。

局部地壳均衡认为，地表巨大山脉之所以能稳定地保持在现在的状态，是由于在深处得到补偿。假设地球深处处在静水力学 (流体静力学) 平衡状态，当对地壳进行局部均衡补偿时，地表地形的起伏或是被地壳厚度补偿 (Airy 均衡补偿) 或是被地壳密度所补偿 (Platt 均衡补偿)。Airy 地壳均衡假说认为，山脉是靠它的地壳有更多部分沉入地幔产生浮力来支撑的。因而，山脉处的地壳厚度要厚于海洋和平原，或者说山脉下有山根。Platt 地壳均衡假说则认为，深处的均衡面是一个平面，地壳的均衡是靠地壳的密度不均匀而达到的。在高山处密度轻，而在海洋和平原处则密度大。

区域均衡则考虑到，岩石圈受到两个不同重量岩石圈柱之间产生的水平压力梯度时，岩石圈发生挠曲以支持外部差应力。一个常用的区域补偿模型是 Vening Meiesz 模型。实质上，Vening Meiesz 均衡补偿是在壳幔密度差产生的浮力加上弯曲岩石圈板块挠曲刚度 D 产生的浮力共同产生的均衡力 (图 7)。当岩石圈挠曲刚度 D 等于零时，便是 Airy 补偿。

如岩石圈板块连续、均匀且具弹性时，岩石圈挠曲刚度 D 与有效弹性厚度 Te 之间有下列关系：

$$D = \frac{ETe^3}{12(1-\nu^2)}$$

其中 E 为杨氏模量

ν 为泊松比

有很多方法可以用来计算有效弹性厚度。

袁柄强等 [16,17] 应用 Forsyth 提出的相关技术计算了泉州—黑水地学断面岩石圈有效弹性厚度，得到从凤凰到泉州有效弹性厚度为 4~8 km；从凤凰到黑水，有效弹性厚度为 11~32 km。赵俐红等 [18] 计算得到青藏高原地区的岩石圈有效弹性厚度平均为 30 km，塔里木盆地的有效弹性厚度为 40~50 km，南、北天山的岩石圈有效弹性厚度分别为 10~15 km 和 30 km 左右。

Maggi 等 [19] 认为，Te 和 Ts 的数值是差不多的，并且 Te < Ts。Watts (2003) 综合了各方研究结果，得到大洋的 Ts 为 0~40 km，而大陆的 Ts 则约为 0~25 km (图 6)。认为 Ts 反映近地表发生断层和地震的脆性层的深度，大洋与大陆的 Ts 是相近的。但大洋与

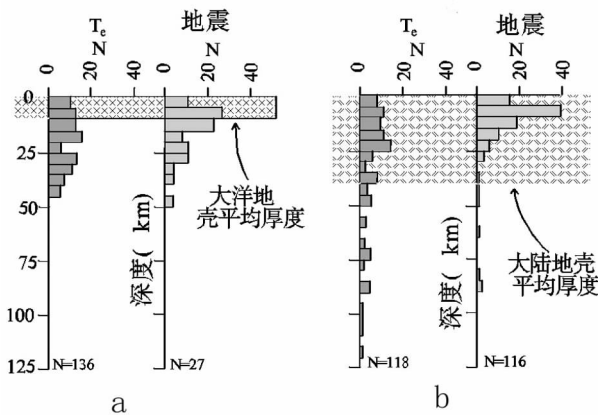


图 6 全球弹性厚度 Te 和发震层厚度 Ts 统计图 [15] a—大洋;b—大陆

Fig. 6 Histograms of global compilations of elastic thickness, Te, and seismogenic layer thickness, Ts [15] a—Oceans; b—Continents

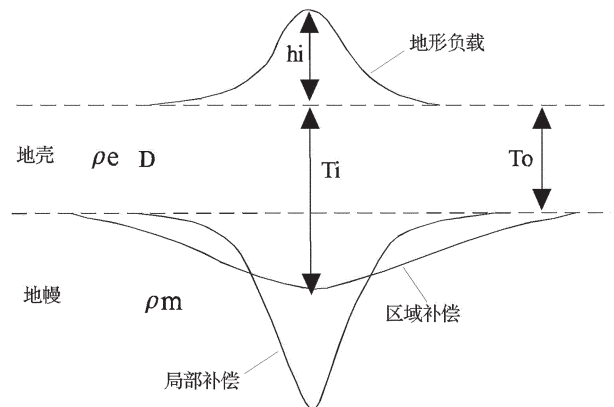


图 7 Vening Meiesz 均衡补偿

ρe—地壳密度; ρm—地幔密度

Fig.7 Vening Meiesz isostasy

ρe—Density of the crust; ρm—Density of the mantle

大陆的 T_e 有较大差别。大洋的 T_e 为 2~50 km, 主要决定于板块及负载的年龄。大陆的 $T_e > 80$ km, 反映整个岩石圈的总体强度^[20]。

在我们的岩石圈分层模型中的弹性地壳指的是发震层厚度 T_s 而不是有效弹性厚度 T_e 。

在 Bird^[2]的板块边界升级模型中, 中国的东北和内蒙古的东部隶属于黑龙江板块, 华南大部分、华南北部的一部分、台湾、东海和部分南海地区隶属于扬子板块, 南海大部分及其邻区隶属于巽他板块。而中国西部和华北地区则均划归为造山带(图 8~9)。

这个板块划分方案与中国传统大地构造划分方案有很大差异。传统大地构造划分方案被划分为晚中生代褶皱带的东北地区被 Bird 认定为稳定的黑龙江板块的一部分, 它的尤拉极与菲律宾海板块的尤拉极相同, 约位于 160°E, 50°N。被划分为早古生代褶皱带的华夏地块和东海划归扬子板块, 它的尤拉极约位于 130°E, 30°N, 而一直都被认为是塔里木—中朝克拉通

重要组成部分的塔里木和华北两个块体反倒统统都被划成为造山带。但是, 如果我们只考虑地表显示的二维构造, 摒弃地质体的年代辈分, 摒弃地质体越老越硬越应该是刚性板块的观念, 承认已形成为刚性块体的后期演化可以受到破坏改造, 变成为造山带; 承认 Morgan 的板块定义; 承认一个理想的岩石圈板块的内部应该没有变形; Bird 的板块边界升级模型对中国板块的划分是可以被接受的。但如果将板块的定义严格锁定在垂向上它应该包括从地表到软流圈顶部的整个岩石圈, 则 Bird 的划分方案是否适用中国地区的板块构造, 尚待商榷。

图 8~9 中的图例和外语译文:

Bird 将边界分为七类, 它们是: CCB 陆陆汇聚边界, CTF 大陆转换边界, CRB 大陆裂谷边界, OSR 大洋扩张脊, OTF 大洋转换边界, OCB 大洋汇聚边界, SUB 俯冲带。Geodetic Velocity 测地速度, Model Velocity 模型速度, Recent volcano 现代火山, Euler

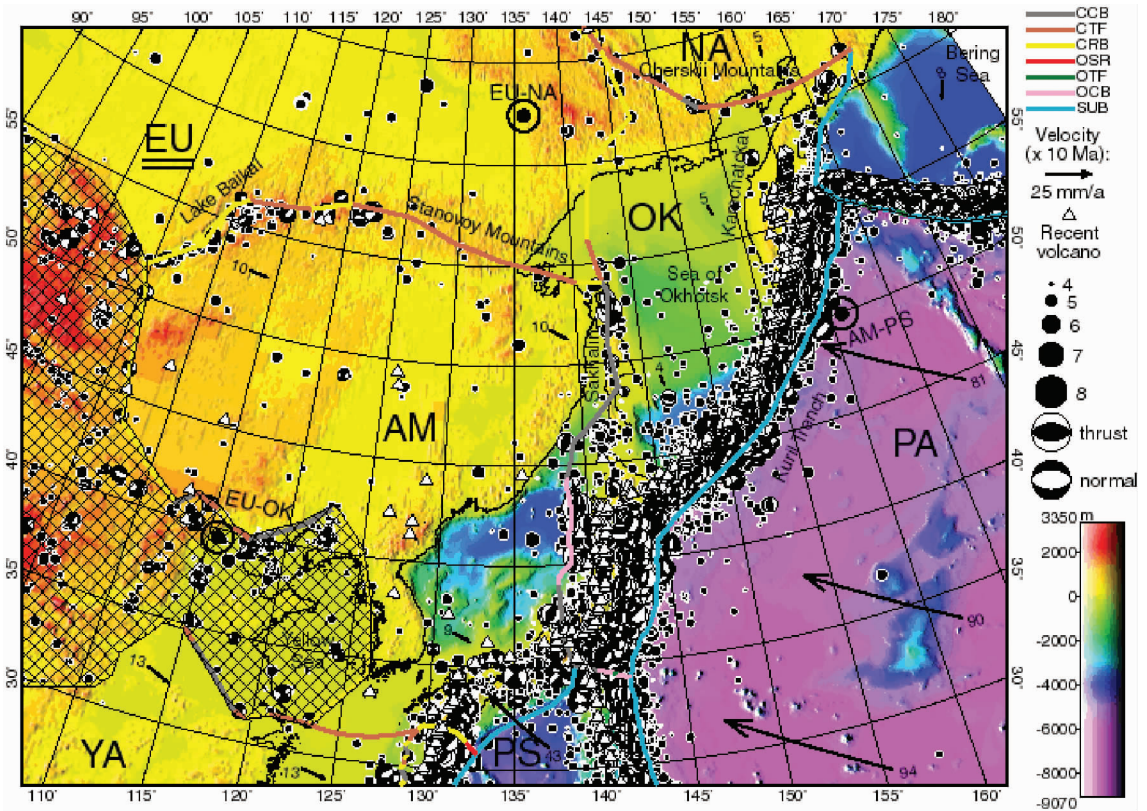


图 8 扬子板块(YZ)和冲绳板块(ON)的边界 其周边板块包括巽他板块(SU)菲律宾海板块(PS)及黑龙江板块(AM)^[2]

Fig.8 Boundary between Yangtze (YZ) and Okinawa (ON) plates, with surrounding plates including Sunda (SU), Philippine Sea (PS), and Amur (AM) plates^[2]

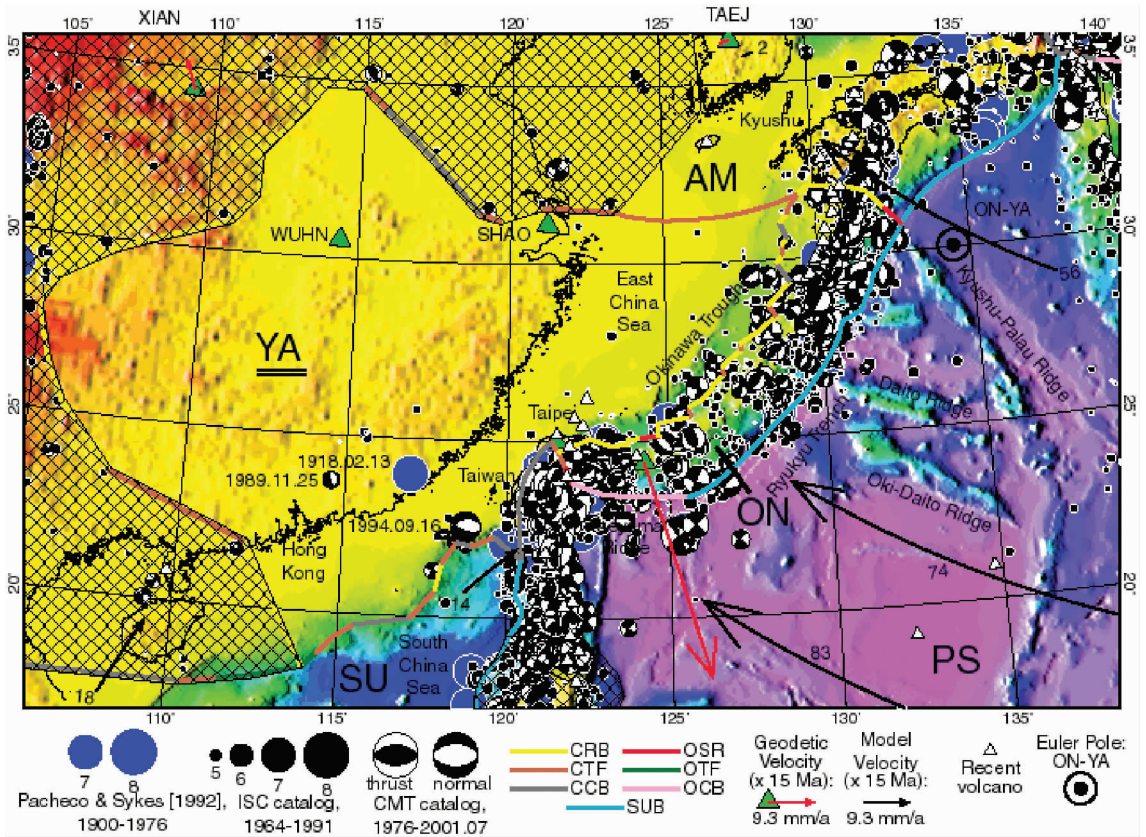


图9 巽他板块(SU)缅甸板块(BU)的边界
 其周边板块包括印度板块(IN)澳大利亚板块(AU)及扬子板块(YA)^[2]
 Fig.9 Boundary between Sunda (SU) and Burma (BU) plates, with surrounding
 plates including India (IN), Australia (AU), and Yangtz plates (AM)^[2]

pole 尤拉极。Thrust 逆冲断层(地震), normal 正断层(地震)。交叉斜线区为造山带。底色表示地形高度。白色三角形为陆上喷发现代火山。黑色矢量为模型的速度(mm/a), 黑色圆圈为尤拉极(旁注板块表示前面板块相对于后面板块顺时针方向旋转)。

3 南北地震带

李廷栋^[14]将中国岩石圈划分为中亚岩石圈构造域和东亚岩石圈构造域等东西两大部分, 它们的分界线是南北地震带。

南北地震带是指从宁夏, 经甘肃东部、四川西部直至云南纵贯中国大陆, 走向大致为南北的地震密集带。它是中国 3 大强震带(天山, 台湾, 南北构造带)之一。强震迁移显示出 3 种方式: 由北往南大致等时距的迁移、由南往北多样式的迁移和一个时段内全带范围内的成组强震群发活动^[21]。它还是地震

频度和地壳活动性的分界线, 在南北地震带以西, 地震频发, 地壳具有很强的活动性; 以东, 除华北外, 地震要平静得多, 活动性锐减(图 10~11)。南北地震带同时也是一个重力梯级带, 在它的西部地壳厚度大而东部则较小^[21-23]。但南北地震带的最本质的特点还是在于它的两侧的宏观应力场的巨大差异。在南北地震带以西, 整个岩石圈处于印度板块与西伯利亚板块之间的南北挤压环境中, 岩石圈未达均衡。在南北地震带以东, 岩石圈处在西太平洋扩张的东西拉张环境中, 基本上已经达到均衡。图 12^[23]中暖色表示正均衡异常, 意味着补偿不足, 地壳还应该上升才能保持地壳均衡。其中尤其是西部喜马拉雅山、横断山、天山等地区是均衡补偿严重不足的地区。冷色表示负均衡异常, 意味着补偿过度, 这些地区地壳应该下沉才能保持地壳均衡。在南北地震带上则可以识别出存在一条正弱均衡异常, 是一个补偿稍

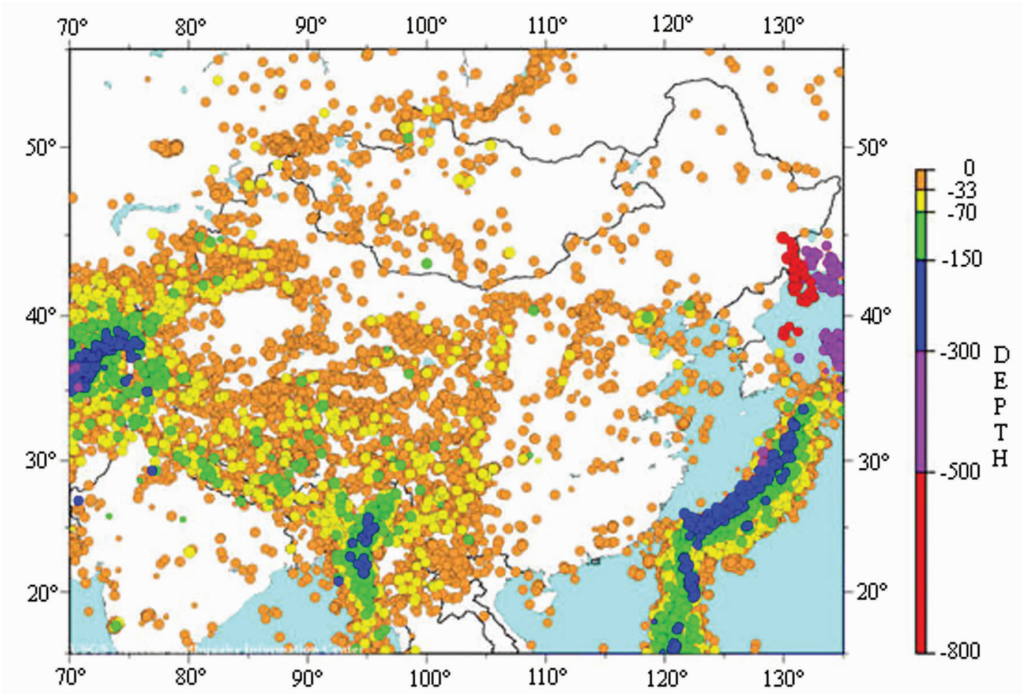


图 10 中国及其邻区的地震震中分布图

Fig.10 Distribution of epicenters in China and its neighboring areas

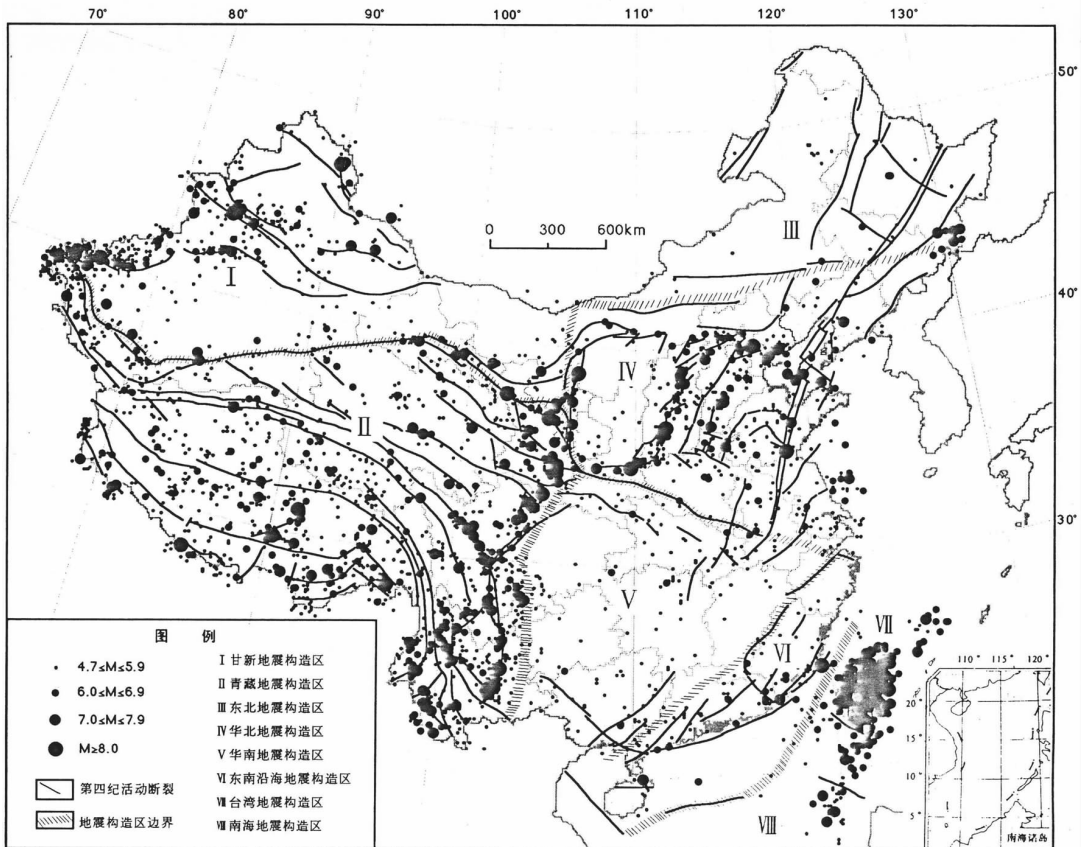
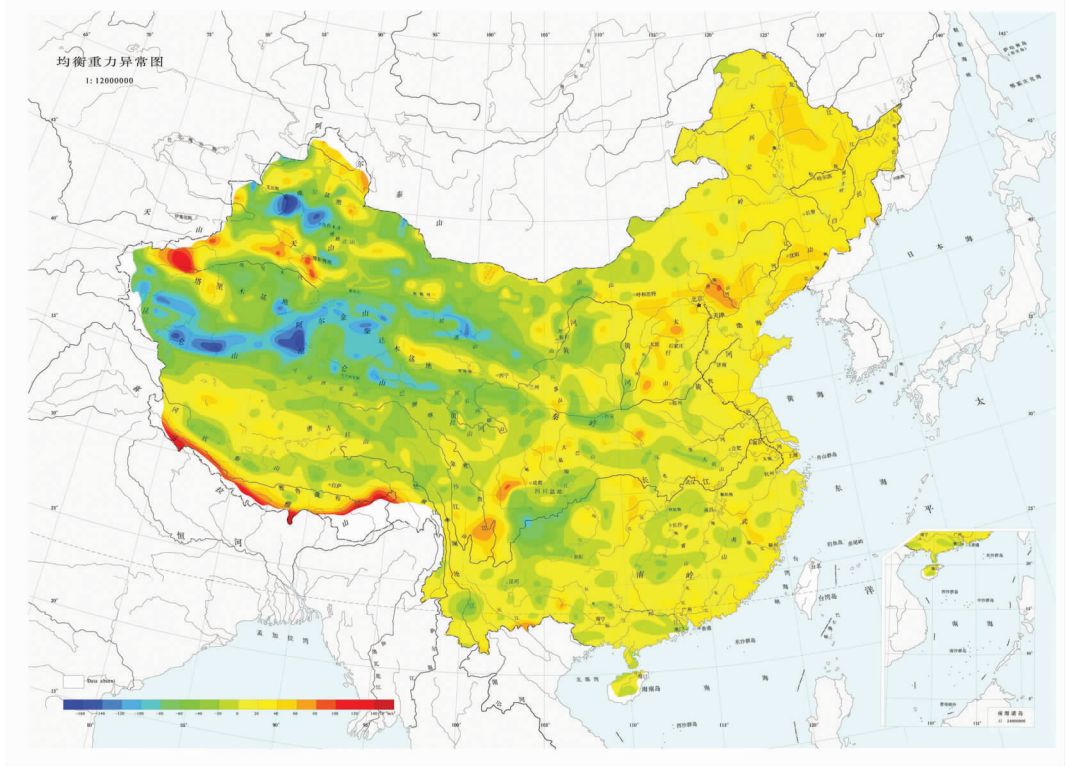


图 11 中国地震震中分布图^[36]

Fig.11 Distribution of epicenters in China^[36]

图 12 中国均衡重力异常图^[25]Fig.12 Isostatic gravity anomaly of China^[25]

嫌不足的地区,它具有上升的趋向。

南北地震带的形成多数学者归因于印度板块的向东向南挤出的远程效应。笔者对这种解释提出质疑。第一,如果是印度板块挤出的远程效应,这个挤出效应应该环绕青藏高原的边界分布,尤其在青藏高原的北界阿尔金山一带应该是最强的地区,为什么这个强地震带不是环绕青藏高原分布,而是分布在青藏高原东侧的南北经线方向上?第二,既然是由于印度板块的挤压,为什么与南北地震带正交的中部和北部,GPS速度很小(图13)?笔者提出另一个可能的解释,即是认为印度板块的持续向北推压,使南北地震带以西的岩石圈受到挤压、缩短、加厚和北移。从西部挤压加厚的岩石圈过渡到东部拉张减薄的岩石圈之间将产生强剪应力,它将使岩石圈发生破裂。但是南北地震带的南部与青藏高原相邻,青藏高原的直接挤压效应也是不可忽视的。南北地震带还是区分GPS速度特征不同的一个界限。南北地震带以西,GPS的主要运动方向为北东,运动速度达到约40 mm/a。南北地震带以东,运动方向转变为东偏南,速度降至约10 mm/a^[13]。

最近,四川汶川发生8级强烈地震,造成生命财产的巨大伤亡和损失。地震区位于南北地震带中段的龙门山。震中及余震分布(图14)在映秀与青川之间北东向近360 km的一个狭长地带,震中深约19 km,倾角约69°。

正如对南北地震带的发震机制的解释一样,汶川地震的发震机制被认为是青藏高原向东侧流动和挤压,龙门山构造带主边界断裂映秀—北川断裂由西向东逆冲运动的结果。上面已经述及,这种解释首先与GPS的结果相悖。如果汶川地震是由自西而东的逆冲断层所引发,应该有强劲的推动力,为什么在GPS图上这个地区的GPS速度为如此之小?其次,与地震的破裂面产状相悖。映秀—北川断裂是中生代的缓倾断裂,当今的汶川地震破裂面近于直立,两者并不符合,它可能是一个与老断层无关的新的破裂面。第三,与地表考察结果相悖,地表观察不到在地震中映秀—北川断裂的重新位移和复活,但观察到西侧地面有明显抬升。这一切都说明,汶川地震的发生极可能是南北地震带在映秀—青川地段西侧的缩短、隆升所引起,发震机制可能不是断层错动而是岩石破裂。由于推力来自南

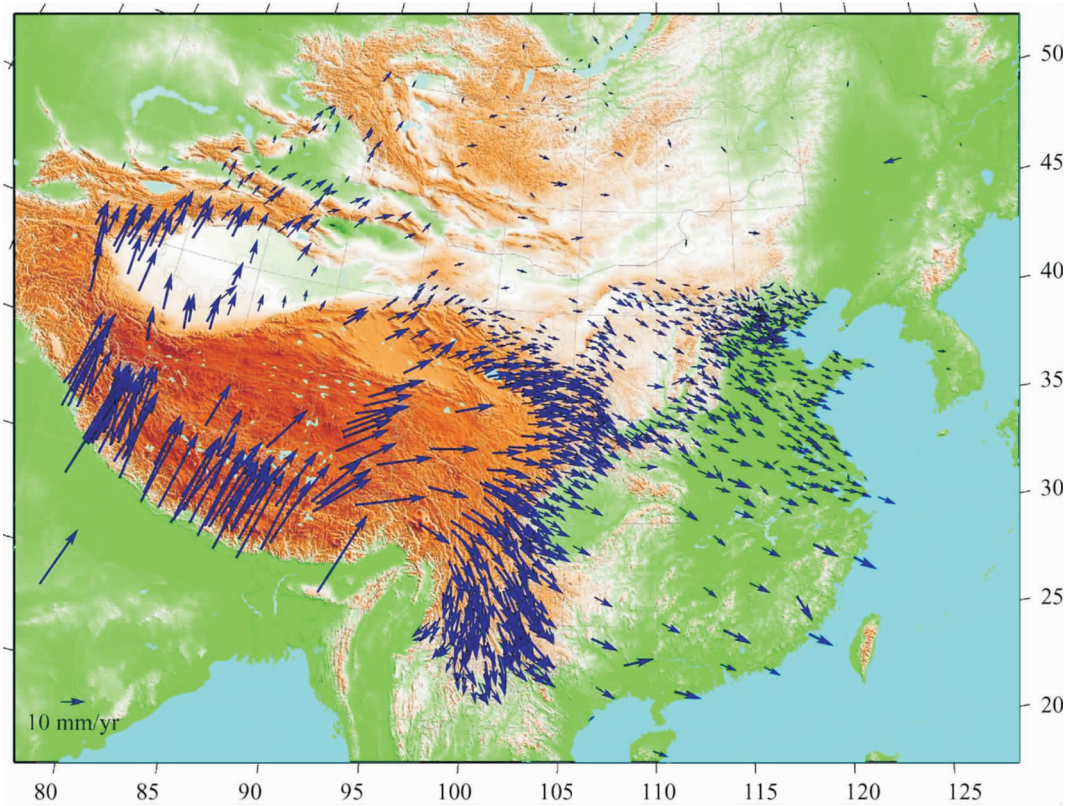


图 13 中国 GPS 图

Fig.13 GPS map of China

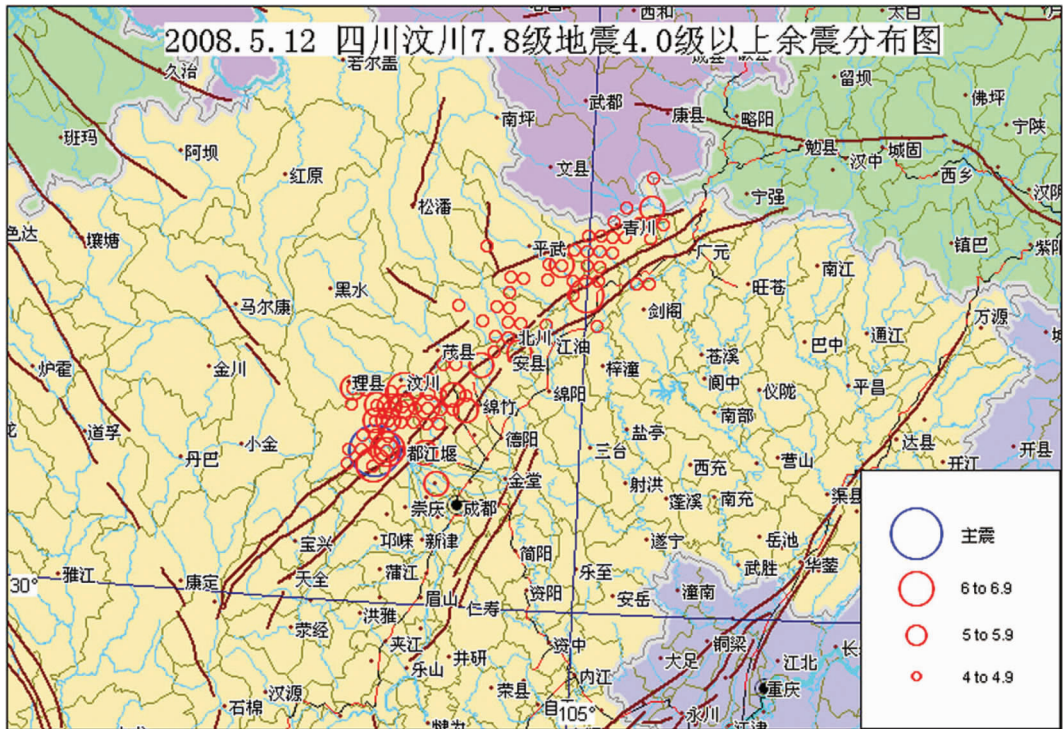


图 14 汶川地震及其余震分布

Fig.14 Epicenter and aftershocks of Wenchuan earthquake

方,它必然同时发生右旋走滑运动。南北地震带西侧的地壳缩短是不均匀、无序地、分段进行的。这一次,缩短发生在映秀—青川之间。若干年后,它可能会在南北地震带的别的地段发生。

4 中国岩石圈弹性上地壳结构(图 15)

在印度板块的强挤压力的作用下,在南北地震带以西形成了宏观面貌相对是正地形的青藏高原和

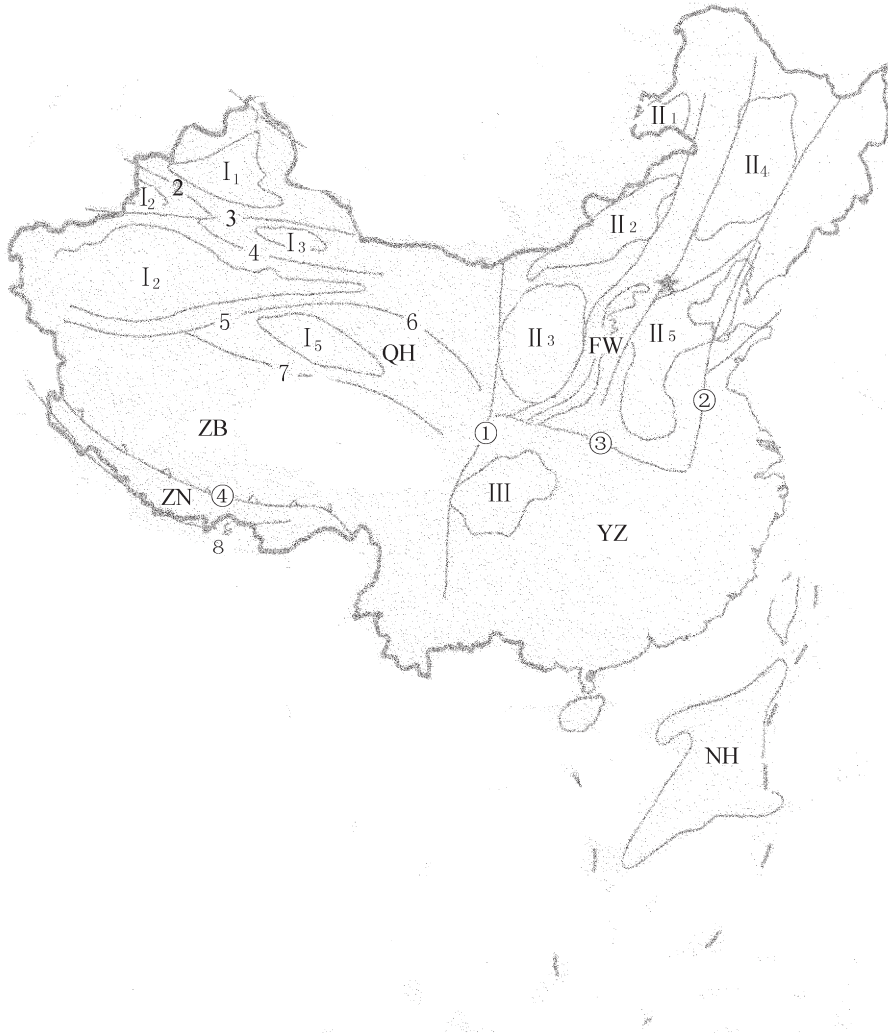


图 15 中国岩石圈弹性上地壳结构

山脉:1—阿尔泰山;2—西天山;3—天山;4—库鲁克塔格山;
5—阿尔金山;6—祁连山;7—昆仑山;8—喜马拉雅山;不连续面:①—南北地震带②—郿庐断裂
③—商丹断裂④—雅鲁藏布缝合带;盆地: I—挤压盆地: I₁—准噶尔盆地; I₂—塔里木盆地; I₃—吐哈盆地;
I₄—伊宁盆地; I₅—柴达木盆地; II—拉张盆地: II₁—海拉尔盆地; II₂—二连盆地; II₃—鄂尔多斯盆地;
II₄—松辽裂谷盆地; II₅—华北裂谷盆地; III—四川前陆盆地; QH—青海高原; ZB—藏北高原;
ZN—藏南高原; YZ—扬子地块 FW—汾渭裂谷 NH—南海新生洋盆

Fig.15 Structure of the elastic upper crust of lithosphere in China

Mountain ranges:1-Altay Mountain;2-West Tianshan Mountain;3-Tianshan Mountains;4- Kuruktag Mountain;5-
Altun Mountain;6-Qilian Mountain;7-Kunlun Range;8-Himalayan Mountain; Discontinuities: ①-North-south
earthquake zone; ②-Tan-Lu fault; ③-Shangdan fault; ④-Yaluzangbu suture.basins: I-compression basins: I₁-
Junggar basin; I₂-Talim basin; I₃-Tuha basin; I₄-Yining basin; I₅-Qaidam basin; II-Extension basins:
II₁-Hailar basin; II₂-Erlian basin; II₃-Ordos basin; II₄-Songliao rifting basin; II₅-North China rifting basin;
III-Sichuan foreland basin; QH-Qinghai plateau; ZB-North Tibet plateau; ZN-South Tibet plateau;
YZ-Yangtze block; FW-Fenwei rift; NH-South China oceanic basin

相对是负地形的新疆地区,它们组成了一个长波长孪生盆山构造。

在新疆地区内部形成了以 3 山(阿尔泰山、天山、阿尔金山)4 盆(准噶尔盆地、塔里木盆地、吐鲁番-哈密盆地、伊宁盆地)为主要特点的次一级短波长孪生盆山构造。

青藏高原则可以以昆仑造山带和雅鲁藏布缝合带为界分成 3 个区域^[26]。在昆仑造山带以北是青海高原。青海高原的重力高和重力低交替出现,卫星磁异常强度接近正常值,隆升幅度比其南的西藏高原略小,比其北的新疆地区又略高。它应该是横贯中国的中央造山带^[27]的一部分。昆仑造山带和雅鲁藏布缝合带之间为藏北高原。这个地区的隆升幅度大,且为整体隆升。它的自由空气重力异常呈现为规模和幅度均很巨大的重力高。意味着物质的大量积聚。它在卫星磁异常图上处在一个规模和幅度均很巨大的负异常内^[28],意味着它处在炽热的环境中,磁性构造层已遭破坏。在雅鲁藏布缝合带与喜马拉雅造山带之间为藏南高原。它是新生代增生在欧亚板块上的印度板块分布的地区。

青藏高原和新疆地区上述山系,都是在燕山运动中开始形成,在喜马拉雅运动中强烈隆升所造成。正是它们的隆升,彻底改造了中国西部中生代的平坦地形和构造面貌,形成了当今的复杂盆山构造。

在南北地震带以东的东亚岩石圈构造域,又可分成南北 3 段,即东北—华北地区、华南地区与南海地区。

东北—华北地区的表壳构造主体为呈 NNE 向隆拗相间并列的盆山体系,伴以同方向的断裂带和构造—岩浆岩带;中新世—中更新世有广泛的碱性玄武岩及拉斑玄武岩喷发。可以分成 6 个构造带,由西到东为:鄂尔多斯—二连—海拉尔高原;大兴安岭—山西山地;松辽—华北拗陷带;长白山—辽东—鲁东隆起带;黄海拗陷带和琉球岛弧隆起带。

鄂尔多斯—二连—海拉尔高原包括鄂尔多斯盆地、二连盆地和海拉尔盆地,是燕山期下沉喜马拉雅期隆升的高原拉张盆地。松辽和华北凹陷为燕山期开始至今仍持续沉降的拉张型裂谷盆地。而大兴安岭—山西山地和山东—辽东—长白山山地则均为燕山期开始至今持续上升的山地。

华北是中国大陆最早形成克拉通的地区,按道理应该还是比较稳定的。但是由于中新世代的构造活动,地壳破碎减薄,断裂发育,地震活动强烈而频繁,是中

国东部新构造运动和地震活动最强烈的地区。华北地区重要的裂谷和断裂有:鄂尔多斯西缘裂谷(南北地震带)、汾渭裂谷、邢台—唐山裂谷和郟庐断裂,它们都是强地震带。汾渭裂谷从秦岭北麓的渭河地堑,斜穿山西,终止于北京的北郊。邢台—唐山的地震裂谷隐伏于黄土下,1966 年的邢台地震和 1976 年的唐山地震曾给中国带来巨大人员伤亡和财产损失。

为什么华北会形成如此强烈的地震带?通常的解释也认为是由于印度板块俯冲的远程效应。但这个解释难于说明既然中国东部都受到印度板块俯冲的远程效应的影响,为什么在南北地震带以东唯独只有华北发育强烈地震带?笔者提出另一个解释,认为华北地区之所以成为强烈地震带是由于这个地区软流圈物质上涌,温度剧升^[29],从而使得弹性上地壳减薄(图 4)。弹性地壳厚度的减薄使得它的强度锐减,弹性极限下降,不能抵抗外力的作用,导致地壳的大面积破碎。

华南块体北与华北块体相邻,南以滨海断裂带为界与南海块体相邻,西抵川滇南北向构造带,向东包括东海。地壳较稳定,构造活动及地震活动微弱。可能它是中国大陆上唯一一块可以称得上是板块的块体。

南海块体的范围基本上与南海海域相一致,总面积约 210 万 km²,北邻中国东南沿海地区,南界加里曼丹岛,西邻中南半岛,东靠菲律宾群岛。南海是一个近南北向的大陆边缘海盆,水深 3500~4200 m,南、北两侧大陆架都很宽阔,东西两侧陆架较窄且不对称。南海四周地质构造差异较大。

南海地区岩石圈结构比较复杂,地壳分 3 种类型:陆壳、过渡壳与洋壳。陆壳展布于大陆架地区,地壳厚度 22~30 km,地壳底面起伏平缓,总体向大陆倾斜;过渡壳分布于大陆坡与海底高原,厚度 14~22 km,由大陆坡向深海盆地地壳逐渐减薄,地壳底面起伏大;洋壳见于深海盆地,厚度 5~12 km。地壳底面比较平坦,上地幔顶部地震纵波速度 7.90~8.45 km/s。从陆壳到过渡壳和从过渡壳到洋壳之间,莫霍面和重力梯度变化都很大。南海海盆热流值和地温梯度都较高,例如南沙中部海域热流值 1~3HFU,地温梯度 3.0~4.5°C/100 m,属中—高热异常和中—高地温梯度区^[14]。

5 中国岩石圈塑性下地壳结构(图 16)

中国大陆地壳的下部是塑性或粘性地壳,它的

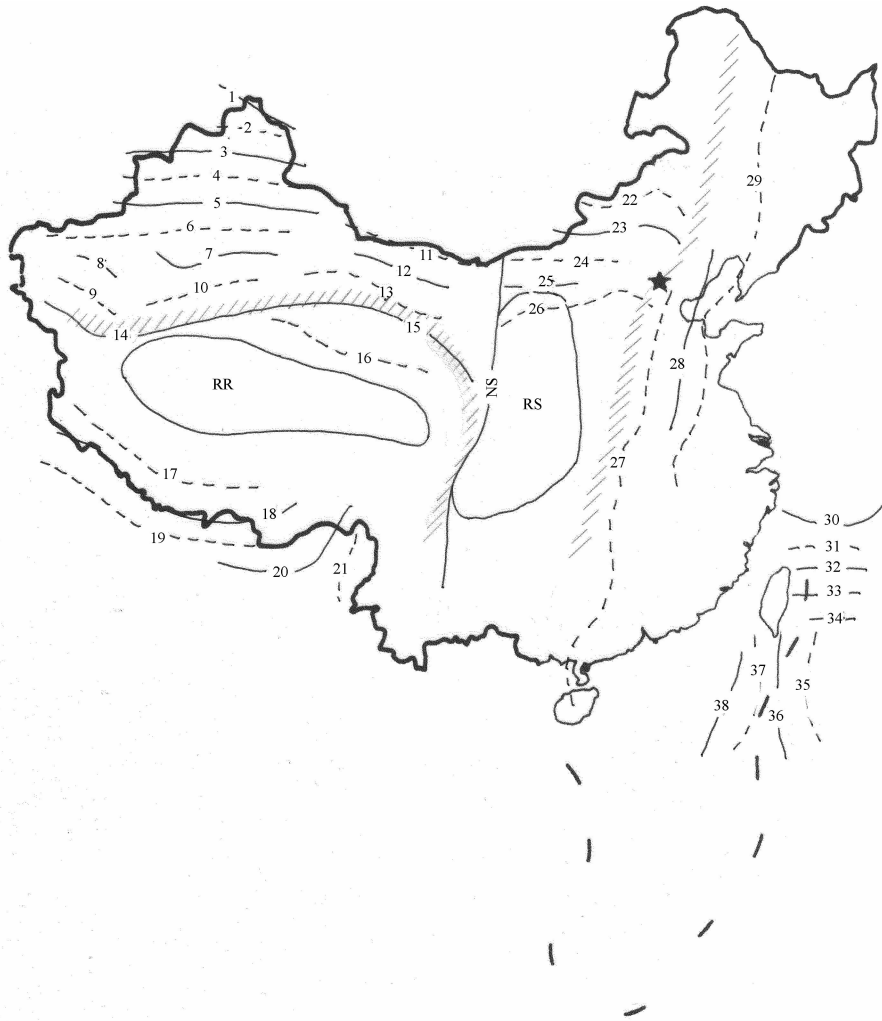


图 16 中国岩石圈塑性下地壳结构图

短斜线—重力梯级带,红色实线—重力高(背型构造),红色虚线—重力低(向型构造);

- 1—阿尔泰重力高;2—额尔齐斯重力低;3—淮北重力高;4—天北重力低;5—天山重力高;6—天南重力低;
 7—库鲁克塔重力高;8—巴楚重力高;9—和田重力低;10—且末重力低;11—淖毛湖—乌力吉重力低;12—北山重力
 高;13—河西走廊重力低;14—阿尔金重力高;15—祁连重力高;16—柴达木重力低;17—冈底斯重力低;18—喜马拉雅
 重力高;19—恒河重力低;20—德干高原重力高;21—孟加拉重力低;22—红格尔—西乌珠穆沁旗—奈曼旗重力低;
 23—二连—锡林浩特—赤峰重力高;24—白云鄂博—白乃庙—多伦重力低;25—临河—包头—呼和浩特重力高;
 26—乌海—河曲—大同重力低;27—天津—石家庄—固阳—随阳店—岳阳—衡阳—玉林重力低带;
 28—朝阳—淄博—徐州—武汉重力高带;29—沪北—大庆—沈阳—盖县—潍坊—郯城—淮南重力低带。

RR—西藏下地壳局部熔融分布地区;RS(random strikes)—重力异常走向不规则地区

Fig.16 Structure of the plastic lower crust

- Short oblique line—Gravity gradient belt;Red line—Gravity high (synform structure);Red dotted line—Gravity low (antiform structure);1—Altay gravity high;2—Ertix gravity low;3—Gravity high to the north of Juggar;4— Gravity low to the north of Tianshan;5—Tianshan gravity high;6—Gravity low to the south of Tianshan;7—Kuruktag gravity high;
 8—Bachu gravity high;9—Hetian gravity low;10—Qiemo gravity low;11—Naomaohu—Oljit gravity low;12— Beishan gravity high;13—Hexi Corridor gravity low;14—Altun gravity high;15—Qilian gravity high;16—Qaidam gravity low;17—Gandise gravity low;18—Himalaya gravity high;19—Ganges gravity low;20—Deccan plateau gravity high;
 21—Bengal gravity low;22—Hoggor—Xi Ujimqi Banner—Naiman Banner gravity low;23—Eren—Xilinhot—Chifeng gravity high;24—Bayan Oba—Boin Sum—Duolun gravity low;25— Linhe—Baotou—Hohhot gravity high;26—Wuhai—Hequ—Datong gravity low;27—Tianjin—Shijiazhuang—Guyang—Suiyangdian—Yunyang—Henyang—Yulin gravity low;
 28—Chaoyang—Zibo—Xuzhou—Wuhan gravity high;29—Lubei—Daqin—Shenyang—Gaixian—Weifang—Tancheng—Huainan gravity low;RR—Partial melting lower crust in Tibet;RS—Random strikes of gravity anomalies

上部为弹性地壳,地壳之下为岩石圈地幔。

南北地震带仍然是划分这一巨层的重要分界线。在南北地震带以西的中亚岩石圈构造域的下部地壳可以以阿尔金—祁连山重力梯级带划分成新疆和西藏等两部分。

101-180 阶卫星重力异常图 (图 17)^[30] 根据 Bowen 近似公式推算^[31], 勘探深度大致为 36~65 km, 描绘出下地壳的构造特征。在这个图中的新疆地区, 出现一系列走向大致为东西的等间距线性重力高与重力低。反映在高围压下塑性下地壳受到南北向挤压, 强烈褶皱变形, 形成了一系列背形构造与向形构造^[32]。

新疆地区的下地壳褶皱引起的重力异常带由北向南依次为: 阿尔泰重力高带、额尔齐斯重力低带、北准噶尔重力高带、天北(天山北缘)重力低带、淖毛湖重力低带、天山重力高带、天南(天山南缘)重力低带、塔中(巴楚—库鲁克塔格—北山)重力高带、塔南(塔里木盆地南缘)重力低带、塔南重力低带由和田重力低、且末重力低、罗布泊重力低和河西走廊重力低(红柳园—金昌)等 4 个重力低组成。它们是青藏

块体与塔里木块体碰撞造成的前陆盆地带。

巴楚—库鲁克塔格—北山重力高由巴楚重力高、库鲁克塔格重力高、公婆泉—巴丹吉林重力高(北山重力高)等 3 个重力高组成。地表地质对这 3 个地区的构造归属存在分歧。巴楚和库鲁克塔格比较普遍的认为是塔里木盆地内的隆升块体, 但北山则既非属于中朝克拉通, 也不属于塔里木, 认为它是一个独立的块体。卫星重力显示, 在地壳深部, 巴楚、库鲁克塔格和北山同属一条横亘在新疆和甘肃地区的塔里木盆地内的隆起带。

天南重力低从阿克苏, 经库尔勒、焉耆盆地到吐哈盆地, 地表地质几乎都认为库尔勒盆地、焉耆盆地和吐哈盆地是隶属于不同构造背景的盆地。库尔勒和焉耆是塔里木盆地北缘的天山山前盆地, 而吐哈盆地是天山山间盆地。但卫星重力却显示, 在下地壳, 它们可能是一个相连的盆地带。

淖毛湖—哈日熬日布格重力低, 约从淖毛湖, 经额济纳旗到呼和浩特, 沿中蒙边境分布。

天北重力低, 西从伊宁盆地开始, 经奎屯、准噶尔盆地内昌吉凹陷, 到哲金。

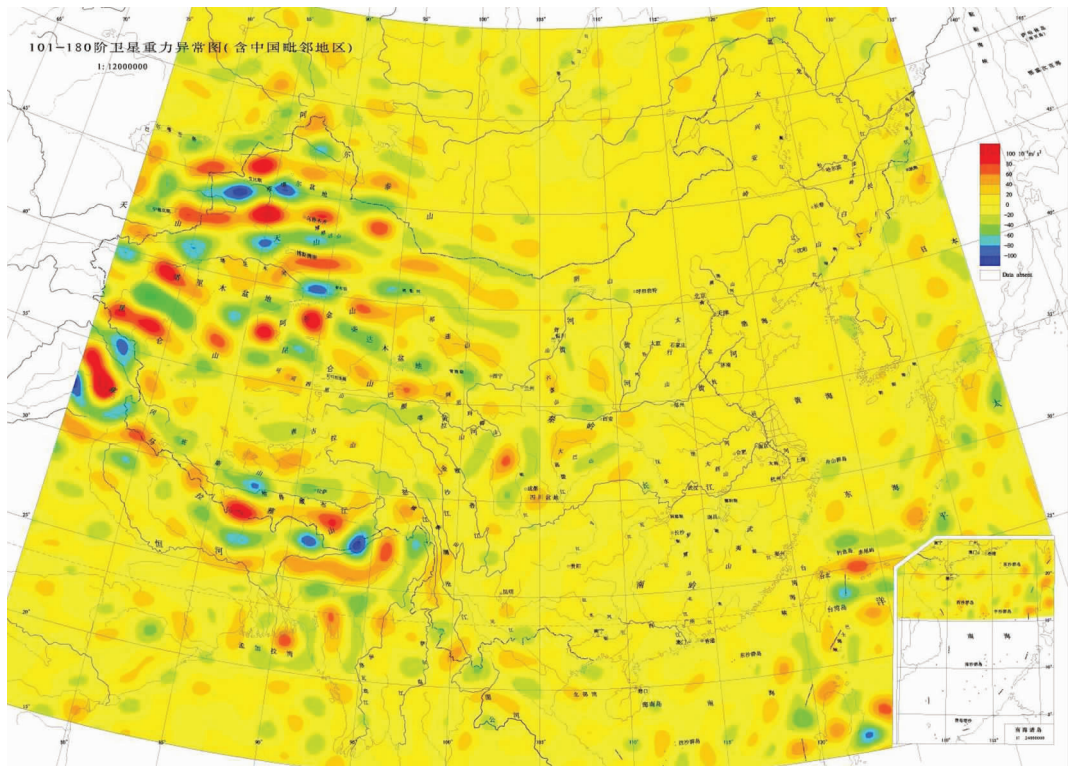


图 17 101-180 阶卫星重力异常图^[30]
Fig.17 Map of 101-180 satellite gravity anomaly^[30]

北准噶尔重力高,向西延伸到阿拉套山,到哈萨克斯坦的萨尔坎德。向东经二台,到蒙古的布尔干。

额尔齐斯重力低带,在中国境内仅有布尔津到富蕴盆地一小段。

阿尔泰重力高带,在中国境内,只有纳雷姆山到科布多一小段。

在阿尔金—祁连山重力梯级带以南的青藏地区的下地壳,和它的上地壳一样,可以分成青海高原、藏北高原和藏南高原等3个单元。青藏高原的莫霍界面深达60~70 km,甚至更深,海拔高度约为5.5 km。青海高原的莫霍界面深度则为48~54 km,海拔高度约为3.0 km。

在藏北高原内部,莫霍界面深度由南而北逐步减小,泊松比逐步变大。Owens等^[33]研究远震SV波产生的转换波发现,在藏北高原地壳的泊松比异乎寻常的高,并认为这是由于高温产生部分熔融的原因。部分熔融的北部界线到达青海高原与西藏高原的分界线^[34]。McNamara^[35]对西藏及其邻区地幔顶部剪切波(Sn)分布的研究(图18)发现,藏北地区地幔顶部剪切波(Sn)低值的南部边界约为班公湖缝合

带,其北部界线到达阿尔金,低速区部分覆盖青海高原的西部。低值区的中心位于羌塘地体内。剪切波在固体中可以很好地传播,但不能在液体中传播。藏北Sn低值的分布提供了一个在藏北地区岩石圈地幔顶部发生局部熔融的另一个重要证据。

INDEPTH计划的反射地震资料以及20世纪80年代中法合作完成的宽角反射地震剖面都显示,藏北地区的上部地壳内深度为15~20 km的低速层广泛存在,埋藏深度平坦稳定,可能含大量水质流体,是藏北地壳内最富于流变性能的局部熔融层。结合McNamara圈出Sn波难于传播的地区,推测极可能在地壳内15~20 km以下,藏北下地壳大范围出现网络状局部熔融。

在南北地震带以东的东亚岩石圈构造域,101~180阶卫星重力异常几乎消失,重力场变得异常平坦。但如果画出重力异常零值线(图19),分析正负异常的分布所体现的微弱重力异常,仍可以认辩出在大兴安岭重力梯级带以西的地区,存在近东西向排列的微弱线形异常带,并且能够可靠地与新疆地区下地壳线形卫星重力异常带相连接。异常带由北

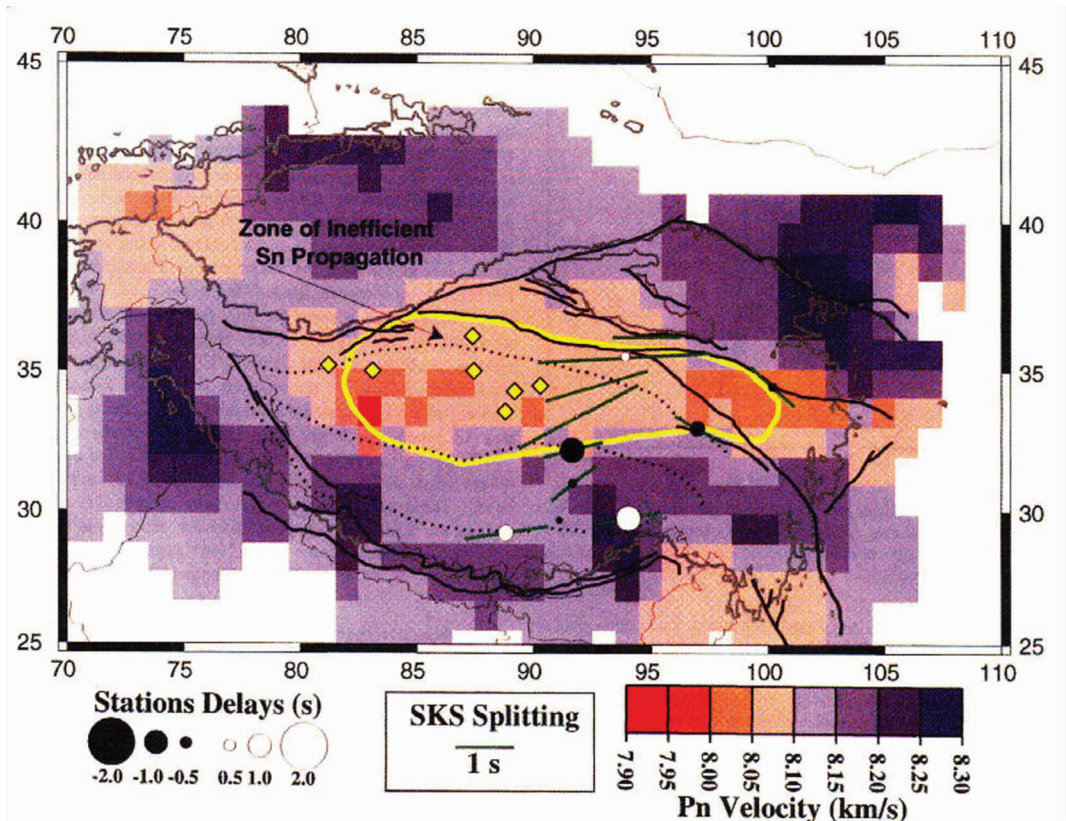


图18 根据Pn波旅行时层析得到的青藏高原上地幔速度结构^[35]

Fig. 18 Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan plateau from Pn travel time tomography^[35]

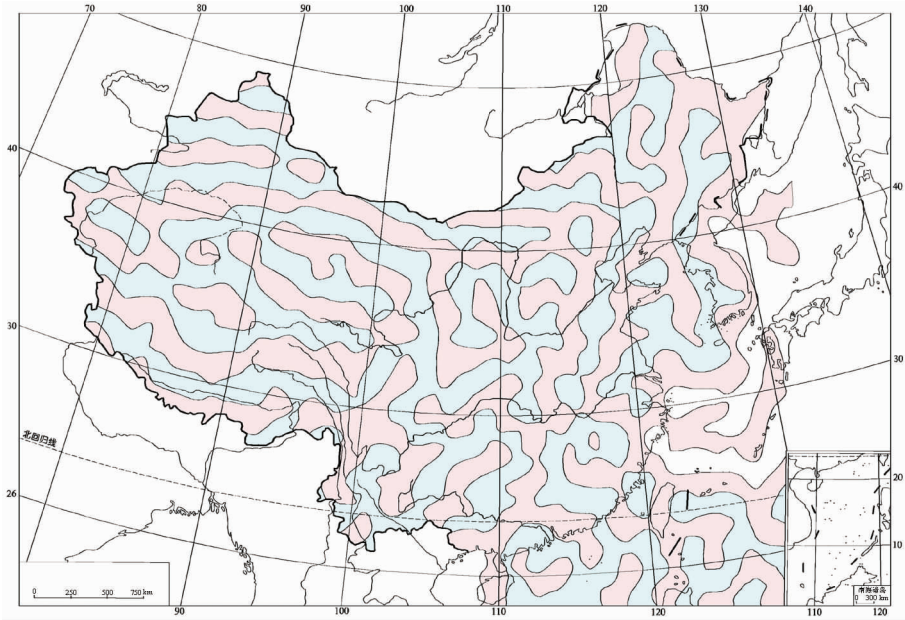


图 19 101-180 阶卫星重力零值线图

Fig.19 Zero contour diagram of 101-180 satellite gravity anomaly

向南依次为:

红格尔—西乌珠穆沁旗—奈曼旗重力低

二连—锡林浩特—赤峰重力高带

白云鄂博—白乃庙—多伦重力低带 (淖毛湖重力低带的延伸)

临河—包头—呼和浩特重力高带 (塔中重力高的延伸)

乌海—河曲—大同重力低带 (塔南重力低的延伸)。

在大兴安岭重力梯级带以东,微弱卫星重力异常走向变为北北东向。可以识别出 3 条异常带。从东到西,它们是:

泸北—大庆—沈阳—盖县—潍坊—郟城—淮南重力低带

朝阳—淄博—徐州—武汉重力高带

天津—石家庄—固阳—随阳店—岳阳—衡阳—玉林重力低带

因为在南北地震带以东的异常过于微弱,它们的可靠性远不如南北地震带以西的中亚构造域。

在鄂尔多斯地区,是走向无序排列的异常。

6 中国岩石圈的岩石圈地幔结构

根据 Bowin 近似公式^[5],2-49 阶卫星重力异常

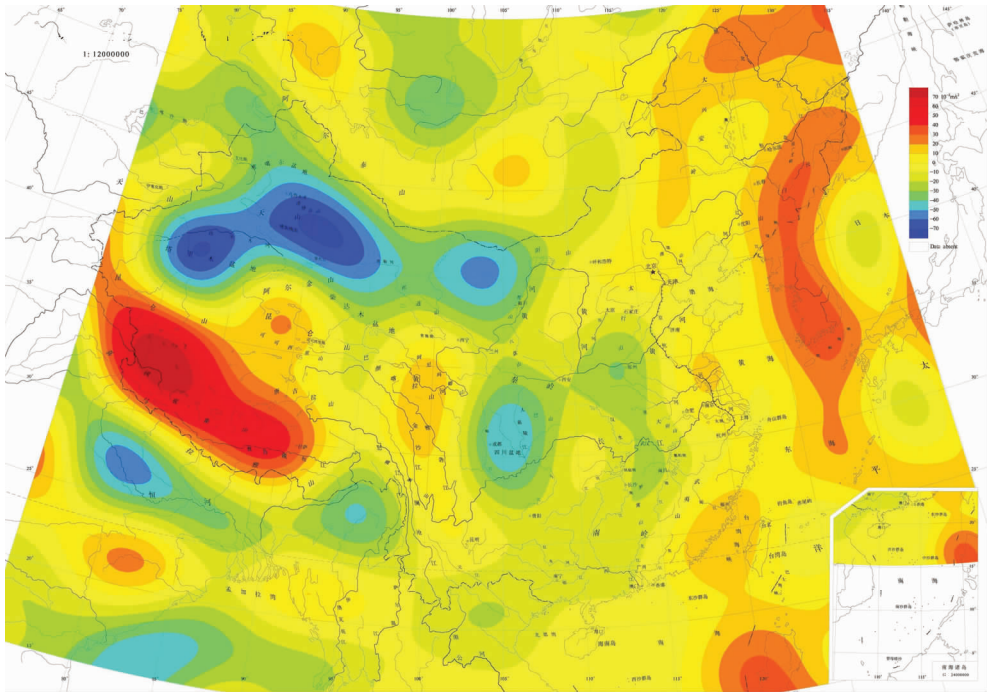
的勘探深度为 6400~130 km。考虑到 Bowin 近似公式中,假设的场源是点源,并且地幔的速度比较均匀,2-49 阶卫星重力异常近似地反映岩石圈地幔,部分反映更深处地幔的不均匀性。

根据 2-49 阶卫星重力异常(图 20),笔者将中国大陆及其毗邻地区岩石圈地幔分成 5 个区:新疆—阿拉善地区(图 21, I),青藏地区(图 21, II),印度地区(图 21, III)、孟加拉地区(图 21, IV)、岩石圈地幔稳定的中部地区(图 21, V)和东亚西太平洋蘑菇云岩石圈地幔发育地区(图 21, VI)。

中国的岩石圈地幔的东西两部分仍然存在明显差别。它们的分界线仍然在南北地震带附近,只不过界线的北部离开南北地震带向东偏离,而其南部则偏向西部,分界线走向为北北东。

在西部,可以分出以重力低为特点的新疆岩石圈地幔和以重力高为特点的西藏岩石圈地幔。在西藏地区的东南部有一个特别显眼的重力高(图 21, II₂),它是冲入岩石圈地幔内的印度冷板块的反映。

将印度板块(图 21, III)与冲入岩石圈地幔的冷板块的图像结合在一起考虑,可见印度板块的俯冲并不是分布在从帕米尔到南迦巴瓦峰整个西藏高原的南部边界,而是局限于亚东—拉萨以西,帕米尔构造结和西藏西部。向东北方向以高角度冲入岩石圈

图 20 2-49 阶卫星重力异常图^[7]Fig. 20 Map of 2-49 satellite gravity anomaly^[37]

地幔。这与流行的认识有很大落差。

流行的有关印度板块俯冲和青藏高原的隆升的模型主要有两类。一类是叠置,另一类则为缩短。所谓叠置,即印度板块向西藏陆块下俯冲,形成西藏陆壳在上,印度板块在下的双层构造,使西藏高原的地壳增厚了一倍,高原隆升了 5 km。有的学者认为印度板块俯冲前缘直达天山。在塔里木盆地、松潘甘致和整个西藏下面都是由上部是中国大陆、下部为印度板块组成的双层地壳。美国地球物理学家所创导的 INDEPTH 计划在一定程度上想验证他们主张的双层地壳的设想。有些主张地壳叠置的地质地球物理学家,虽然不认为印度板块可以俯冲到天山,但认为至少可以俯冲到班公湖—怒江,或更远。缩短论者则认为由于印度板块的俯冲,导致西藏岩石圈受到强烈挤压,它的上地壳、下地壳和岩石圈地幔分别缩短,高原隆升。如果俯冲大陆板块具有刚性的品质,叠置论可能是正确的。东太平洋刚性洋板块向美洲大陆俯冲的地震层析成像提供了大洋板块可以俯冲到大陆深处的证据。但是由于大陆不是刚性的,限制了大陆不可能长驱直入地钻入另一个大陆下面。

Owens 等^[33]研究远震 SV 波在壳内界面和地表产生的 P 波(包括 S_p 波, S_sP_{mp} 波和 $S_sP_{ms}P_{mp}$ 波),也发现西藏高原的中东部 P 波速度稳定,平均 P 波波速为 6.0~6.2 km/s,而在西藏西部的南北方向上地壳结构则有较大差别。

岩石学研究发现,新生代末期钾质火山岩仅在冈底斯西部,雄巴火山岩(18~23 Ma)明显具有喜马拉雅沉积物加入。东部的超钾质火山岩,年龄晚到约 10 Ma 仍然看不到沉积物俯冲,说明隆格尔—拉萨东西向约 700 km 在 10~16 Ma 时,在东部地区没有印度板块的俯冲。

从 GPS 测量结果来看(图 13),在雅鲁藏布缝合带以南,西藏的西部和东部, GPS 结果很不一样,在西藏西部矢量的数值很大,方向北东。印度板块快速向北东方向推进,一过雅鲁藏布缝合带, GPS 矢量的数值锐减,意味着印度板块以高角度冲入地幔深处。但仍能保持向北的前进方向。在西藏东部, GPS 矢量围绕着昌都—玉树稳定块体调头,转向东南。

地震层析显示出印度板块的俯冲没有在西藏形成双层地壳的直观图像。图 22 所展示的 3 条地震层析剖面,南从赤道北到阿尔泰山,穿过西藏高原

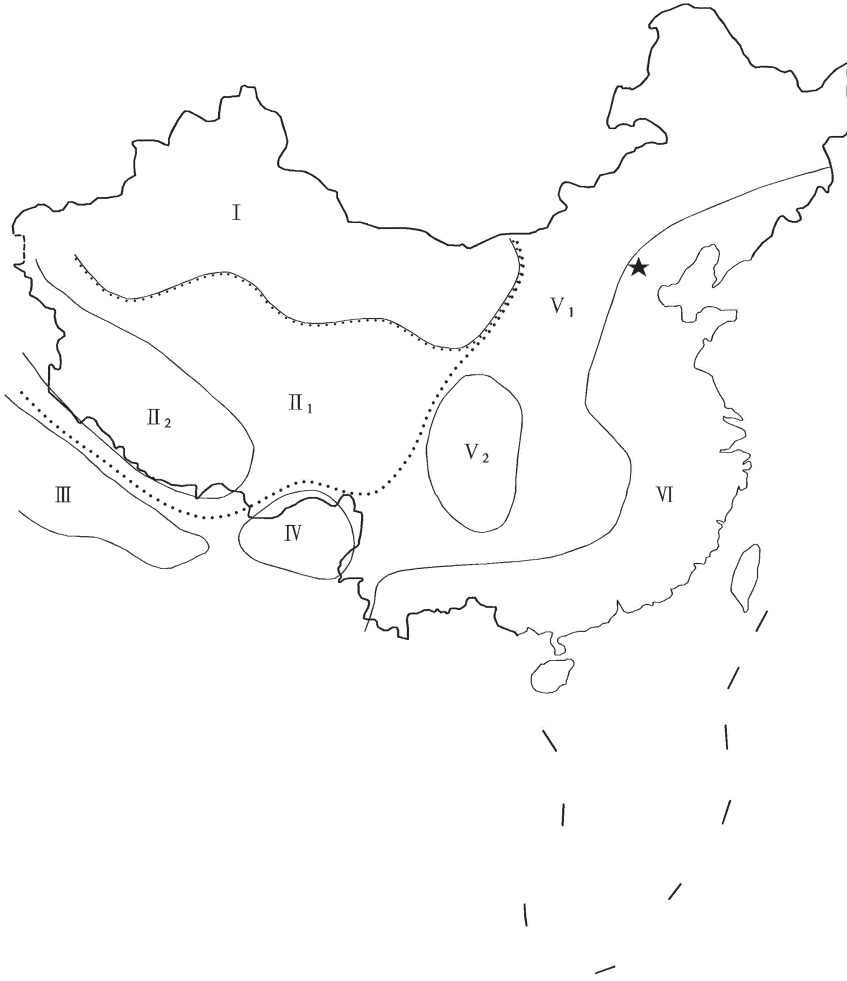


图 21 中国岩石圈地幔结构图

I—新疆—阿拉善岩石圈地幔; II₁—青藏岩石圈地幔; II₂—俯冲到岩石圈地幔中的印度冷板块;
 III—印度板块岩石圈地幔; IV—孟加拉地块岩石圈地幔; V₁—未被改造的中国岩石圈地幔;
 V₂—四川地块岩石圈地幔; VI—东亚西太平洋蘑菇云岩石圈地幔

Fig. 21 Lithospheric mantle structure in China

I—Xinjiang—Alashan LID; II₁—Qingzang LID; II₂—Cold Indian plate subducted in the mantle; III—India LID;
 IV—Bengal block LID; V₁— Undeformed China LID; V₂—Sichuan LID;
 VI—Mushroom structure LID in Southeast Asia and Western Pacific Ocean

的西部。剖面很好地揭示,印度板块与沿雅鲁藏布缝合带向西藏地块的俯冲是近垂直方向向下的,并在660 km 转换带下的上地幔内安营扎寨,占据了很大一个空间。

在中国东部,笔者分出了一个东亚西太平洋蘑菇云岩石圈地幔分区^[40]。这个分区不只是包括华北、东南沿海及南海地区,它的范围要广阔得多(图23)。它是中生代以来中国东部和西太平洋地区软流圈物质上涌所形成的。岩石圈地幔蘑菇云构造是指软流圈物质的上涌使岩石圈地幔成为新生地幔与残

剩地幔并存的结构,岩石圈被激活,稳定的克拉通地壳褶皱变形,地壳减薄,地震频发,岩浆活动活跃,地面沉降,并形成广袤的西太平洋边缘海。蘑菇云地幔发育的地区覆盖整个东南亚西太平洋地区。包括中国东北的中东部、华北的东部、华南的东南缘、马来半岛、印尼、菲律宾、日本海、黄海、东海、南海,加罗林盆地和菲律宾海盆。

图 21 中 V 分区从中国东北向西南延伸到云南西部,这个地区的岩石圈地幔既未受到印度板块的影响,也未受到东亚西太平洋岩石圈蘑菇云构造的

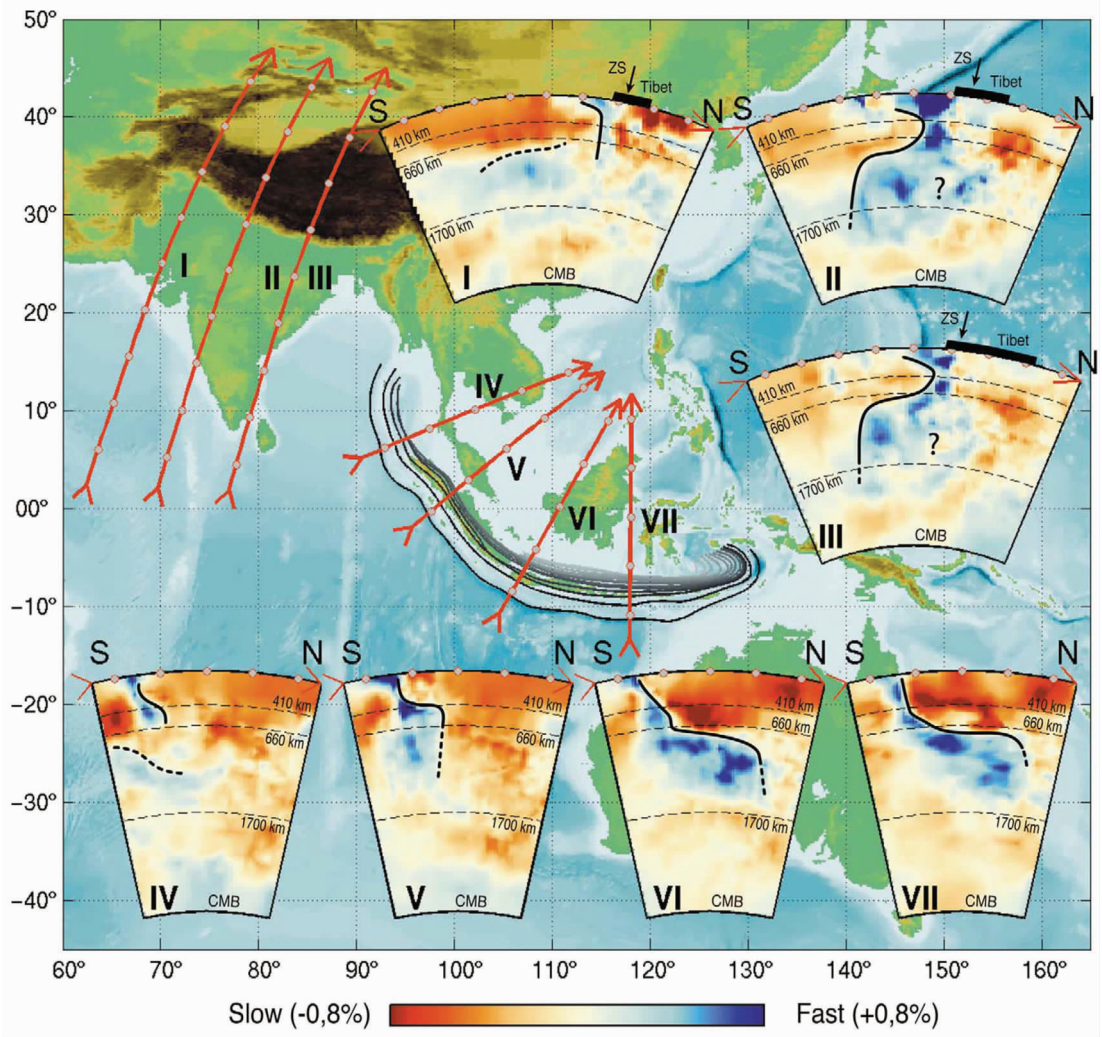


图 22 穿过青藏高原及其毗邻地区的地震层析剖面^[38]

Fig.22 Seismic tomographic profile across the Qinghai-Tibet plateau and its neighboring areas^[38]

影响。它是中国最稳定的地区。

7 结论

(1) 岩石圈具有分层流变的结构特点。各层间的结构有巨大差别,相互间有着不同的控制关系。如新疆式岩石圈具有古老的克拉通基底和与克拉通基底同时生成的岩石圈地幔。在南北两方的挤压下基底褶皱缩短,形成东西向条带状背形构造与向形构造。喜马拉雅期构造运动期间,弹性上地壳与下地壳脱耦,并发生推覆叠加,形成西天山,与同时强烈隆升的库鲁克塔格和南天山一起,将新疆上地壳分割成当今的3山4盆构造格局。又如,西藏式岩石圈是印度与西藏两个陆块相碰撞形成的特殊岩石圈。印度

板块沿雅鲁藏布缝合带近垂直向下俯冲。在羌塘处岩浆上涌,致使 S_n 缺失,完整未被破坏的弹性上地壳被局部熔融的下地壳和岩石圈地幔以液压的方式整体抬升。又如,华北式岩石圈,由于软流圈上升形成蘑菇云地幔构造,引发在壳内形成裂谷盆地。并由于弹性地壳的减薄,弹性地壳的弹性极限点下降,使华北由稳定克拉通变成地震多发的活动带。

(2) 中国大陆当今的构造动力,是西部由印度板块俯冲、推挤和东部由东亚—西太平洋软流圈上升形成的二元系统。中国大陆除了东北吉辽地区太平洋板块向大陆俯冲外,东部其他地区大陆下都没有太平洋板块俯冲的痕迹。中生代以来中国东部发生的岩石圈巨变不是太平洋板块向中国大陆的俯冲而

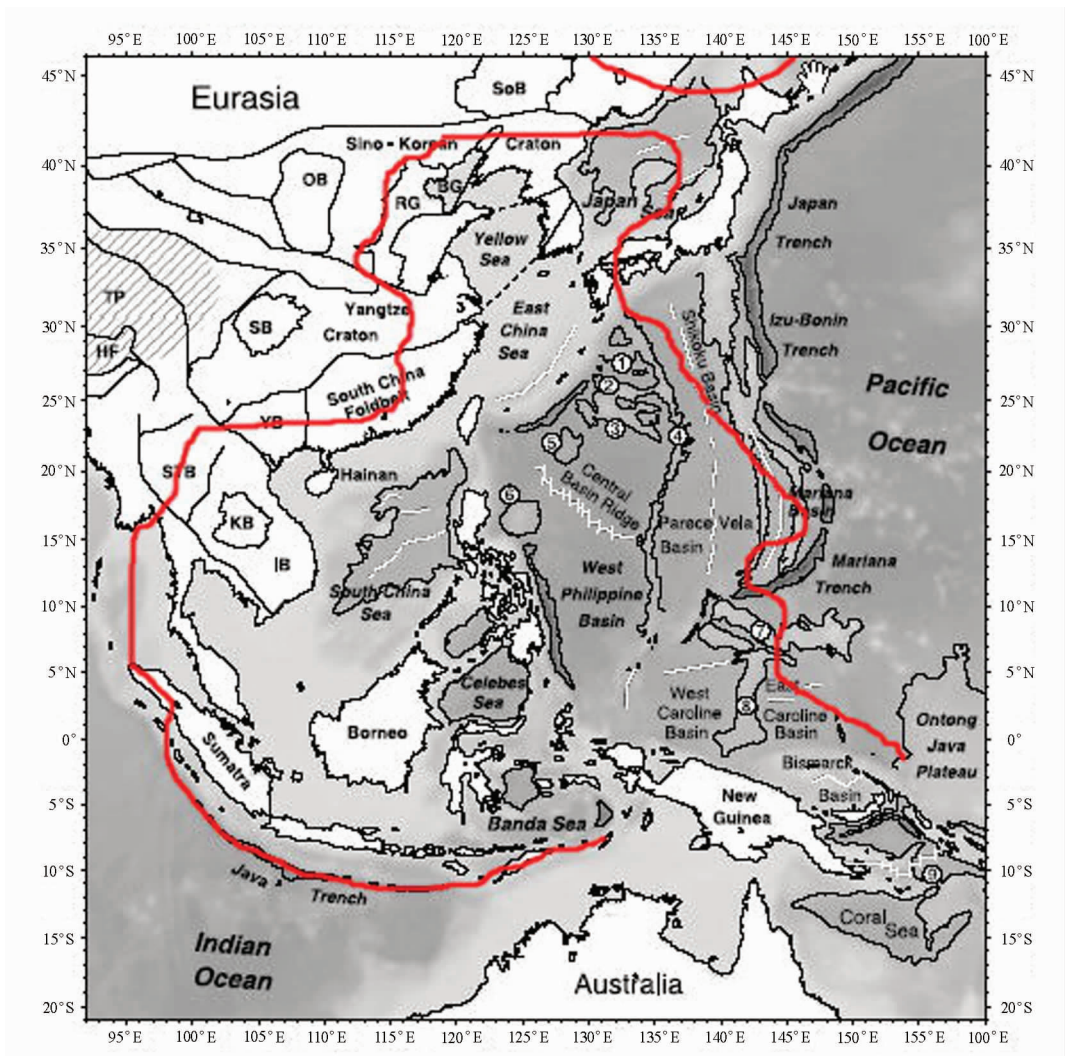


图 23 东亚-西太平洋低速岩石圈范围(构造底图引自文献[39])

红线为低速岩石圈边界,斜线为青藏高原及其周边山系。BG—渤海湾, HF—喜马拉雅褶皱系, IB—印支地块, KB—呵叻盆地(呵叻海台), OB—鄂尔多斯盆地, RG—华北东部裂谷, SB—四川盆地, SoB—松辽盆地, STB—山寨地块, TP—青藏高原, YB—右江地块。用海底等深线勾画出边缘海盆、海台、海岭及海沟。双线表示活动扩张中心。①—奄美海台, ②—大东海岭, ③—隐歧大东海岭, ④—帕劳九州海岭, ⑤—Urganeta 海台, ⑥—Benham 海隆, ⑦—加罗林海岭, ⑧—欧里皮克海岭, ⑨—伍德拉克海盆

图中其他标注译名: Eurasia—欧亚大陆, Pacific Ocean—太平洋, Indian Ocean—印度洋 Japan—日本, Australia—澳大利亚, Sino-Korean Craton—中朝克拉通, Yangtze Craton—扬子克拉通, South China Foldbelt—华南褶皱带, Hanan—海南岛, Borneo—婆罗洲, Sumatra—苏门答腊, Yellow Sea—黄海, East China Sea—东海, South China Sea—南海, Celebes Sea—西里伯斯海, Banda Sea—班达海, Coral Sea—珊瑚海, Shikoku Basin—四国海盆, Central Basin Ridge—中央盆地海岭, West Phillipine Basin—西菲律宾盆地, East Caroline Basin—东加罗林盆地, West Caroline Basin—西加罗林盆地, Caroline Basin—加罗林盆地, Parece Vela Basin—帕里西维拉海盆, Bismark Basin—俾斯麦盆地, Ontong Java Plateau—翁通爪哇海台, Japan Trench—日本海沟, Izu-Bonin Trench—伊豆-小笠原海沟, Mariana Trench—马里亚纳海沟, Java Trench—爪哇海沟

Fig.23 Low-velocity lithosphere of Southeast Asia and Western Pacific (tectonic basemap from[39])

The red line signifies the boundary of low-velocity lithosphere, whereas the hatched area indicates Tibetan Plateau and surrounding mountain systems. BG— Bohai Gulf; HF— Himalaya fold system; IB— Indochina Block; KB— Khorat Basin (Khorat Plateau); OB— Ordos Basin (Ordos Plateau); RG— Eastern North China rift group; SB— Sichuan Basin; SoB— Songliao Basin; STB— Shan Thai Block; TP— Tibetan Plateau; YB— Youjiang Block. Selected marginal basins and underwater plateaus, ridges, and trenches are outlined with bathymetric contours, specifically chosen for each feature. Double lines indicate spreading centers, active and extinct.

①— Amami Plateau; ②— Daito Ridge; ③— Oki-Daito Ridge; ④— Palau Kyushu Ridge; ⑤— Urganeta Plateau; ⑥— Benham Rise; ⑦— Caroline Ridge; ⑧— Eauripik Ridge; ⑨— Woodlark Basin

造成的,而是由软流圈物质上升所形成的。这两个动力系统的分界是南北地震带。在南北地震带以西地壳被压缩缩短,它产生剪应力造成这个带的强烈地震活动,并使南北地震带发生右旋走滑。

(3)一个刚性板块必须是板块范围内整个岩石圈内都没有变形。Bird的板块边界升级模型只是弹性地壳符合刚性的假设,它没有考虑到深部的结构。

参考文献(References):

- [1] Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73:1959-1982.
- [2] Bird P. An updated digital model of plate boundaries [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4 (3):1-52.
- [3] NSFA. New Departures in Structural Geology and Tectonics [M]. <http://pangea.stanford.edu/~dpollard/NSF/main.html>, 2003.
- [4] Chen W P, Molnar P. Focal depths of intracrustal and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88:4183-4214.
- [5] Jackson J. Strength of the continental lithosphere; time to abandon the jelly sandwich? [J]. *GSA Today*, 2002, 4-10.
- [6] 马杏垣. 中国岩石圈动力学纲要 [M]. 北京: 中国地图出版社 1987.
- Ma Xingyuan. An Outline of the Lithosphere Dynamics of China [M]. Beijing: Sinomap Press, 1987(in Chinese with English abstract).
- [7] 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净. 地球构造与动力学 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2003:1-62.
- Ma Zongjin, Du Pinren, Hong Hanjing. Earth Tectonics and Dynamics [M]. Guangzhou: Guangdong Scientific and Technological Press. 2003:1-62(in Chinese with English abstract).
- [8] 丁国瑜主编. 中国岩石圈动力学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 1991:271-564.
- Ding Guoyu. An Introduction to the Lithosphere Dynamics of China [M]. Beijing: Seismological Press, 1991, 271-564 (in Chinese with English abstract).
- [9] 范承钧, 杨明桂. 中国基本构造格局及其演化 [M]//程裕淇主编: 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994:448-476.
- Fan Chengjun, Yang Minggui. Basic Tectonic Framework and its Evolution in China [M]//Cheng Yuqi (ed.). An Introduction to the Regional Geology of China. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese with English abstract).
- [10] 袁学诚主编. 中国地球物理图集 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Yuan Xuecheng (editor). Atlas of Geophysics in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [11] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1996:1-110.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Roots-Plume Tectonics of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-110(in Chinese with English abstract).
- [12] Sengor A M C, Natal' in BA. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis [M]//Yin A, Harrison TM (eds). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996:486-640.
- [13] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(2):430-441.
- Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2):430-441 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元 [J]. *中国地质*, 2006, 33(4):700-710.
- Li Tingdong. Lithospheric units of China [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):689-710(in Chinese with English abstract).
- [15] Watts A B, Burov E B. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213:113-131.
- [16] 袁炳强, Yvette H P D, 王平, 等. 北冰洋-欧亚大陆-太平洋地学断面东南段岩石圈有效弹性厚度 [J]. *地球科学*, 2002, 27(4):397-402.
- Yuan Bingqiang, Yvette H P D, Wang Ping, et al. Effective Lithospheric Elastic Thickness of Southeastern Part of Arctic Ocean-Eurasia Continent-Pacific Ocean Geoscience Transect [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(4):397-402(in Chinese with English abstract).
- [17] 袁炳强, 王平. 用相关技术计算大陆岩石圈有效弹性厚度 [J]. *西安工程学院学报*, 2002, 24(2):55-58.
- Yuan Bingqiang, Wang Ping. Estimates of the Effective Elastic Thickness of the Continental Lithosphere using the Coherence Technique [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2002. 24(2):55-58(in Chinese with English abstract).
- [18] 赵俐红, 姜效典, 金煜, 等. 中国西部大陆岩石圈的有效弹性厚度研究 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, 29(2):183-190.
- Zhao Lihong, Jiang Xiaodian, Jin Yu, et al. Effective Elastic Thickness of Continental Lithosphere in western China [J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 2004. 29(2):183-190(in Chinese with English abstract).
- [19] Maggi A, Jackson J A, D McKenzie, et al. Earthquake focal depth, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere [J]. *Geology*, 2000, 28(6):495-498
- [20] Burov EV. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere: what does it really means [J]. *JGR*. 1995. 100:3905-3927.
- [21] 汪一鹏, 马瑾, 李传友. 南北地震带强震迁移特征及其与南亚地震带的联系 [J]. *地震地质*, 2007, 29(1):3-16.
- Wang Yipeng, Ma Jin, Li Zhuanyou. The migration characteristics of strong Earthquakes on the North-South seismic belt and its relation with the south Asia seismic belt [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1):3-16(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈学波. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征 [C]//国家地震局

- 科技监测司编. 中国大陆深部构造的研究与进展. 北京:地震出版社, 1991:97-113.
- Chen Xuebo. Crustal Velocity Structure of Two Sides of Longmen Mountain [C]//Science and Technology monitoring China Earthquake Administration edit. Research and progress on Deep structure of China continent. Beijing:Seismological Press, 1991: 97-113(in Chinese).
- [23] 袁学诚, 耶哥洛夫, GEMOC. 全球地学断面第 21 号:北冰洋-欧亚大陆-太平洋地学断面简要说明[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- Yuan Xuecheng, Egorov A S, GEMOC. A Short Introduction to Global Geoscience Transect 21:Arctic Ocean - Eurasia - Pacific Ocean[M]. Beijing:Science Press, 2000.
- [24] 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 2002. 24(1):1-16.
- Wang Chunyong, Mooney W D, Wang Xili, et al. On research of 3-D velocity structure of the crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002. 24(1):1-16(in Chinese with English abstract).
- [25] 左恩. 中国均衡重力异常图 [M]//袁学诚主编, 中国地球物理图集, 地质出版社, 1996.
- Zuo Yu. Isostatic gravity anomaly of China [M]//Yuan Xuecheng (ed.): Atlas of Geophysics of China. Beijing:Geological Publishing House, 1996.
- [26] 袁学诚, 李廷栋, 肖序常, 等. 青藏高原岩石圈三维结构及高原隆升的液压机模型[J]. 中国地质, 2006, 33(4):711-729.
- Yuan Xuecheng, Li Tingdong, Xiao Xuchang, et al. 3d lithospheric structure of Qinghai-Tibet Plateau and its hydraulic pressure machine model of uplift[J]. Geology in China, 2006, 33(4):711-729 (in Chinese with English abstract).
- [27] 殷鸿福, 张克信, 中央造山带的演化及其特点 [J]. 地球科学, 1998, 23(5):437-442.
- Yin Hongfu, Zhang kexin, Evolution and Characteristics of the Central Orogenic Belt [J], Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(5):437-442(in Chinese with English abstract).
- [28] 安振昌, 徐元芳, 王月华. MAGSAT 卫星磁力异常图 [M]//袁学诚主编:中国地球物理图集, 地质出版社, 1996.
- An Zhenchang, Xu Yuanfang, Wang Yuehua. MAGSAT anomaly [M]//Yuan Xuecheng(ed.). Atlas of Geophysics in China. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [29] 王钧, 汪辑安, 2km 深地温图 [M]//袁学诚主编. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996.
- Wang Jun, Wang ji'an . Temperature at a depth of 2km[M]//Yuan Xuecheng (ed.). Atlas of Geophysics of China.Beijing:Geological Publishing House, 1996.
- [30] 宁津生, 李建成, 陈建国, 等. 101-180 阶卫星重力异常图[M]//袁学诚主编, 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996.
- Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 101-180 Satellite Gravity Anomaly[M]//Yuan Xuecheng(ed.). Atlas of Geophysics of China[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996.
- [31] Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the Earth's geoidal undulations and gravity anomalies [J]. Marine Geodesy, 1983, 7(1):61-101.
- [32] 袁学诚. 论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示[J]. 中国地质, 2005, 32(2):1-12.
- Yuan Xuecheng. 3D lithospheric structure of western China and its enlightenment on petroleum prospecting[J]. Geology in China, 2005, 32(2):1-12(in Chinese with English abstract).
- [33] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution[J]. Nature, 1997, 387:37-43.
- [34] Zhu , Helmberger . Moho offset across the northern margin of the Tibetan plateau[J]. Science, 1998, 281:1170-1172.
- [35] McNamara D E, Walter W R, Owens T J, et al. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan plateau from Pn travel time tomography[J]. J. Geophys. Res, 1997, 102:493-505.
- [36] 叶洪, 陈国光, 周永东, 等. 中国大陆地震构造特征及其地球动力学意义[C]//中国地质学会构造专业委员会年会, 1995.
- Ye Hong, Chen Guoguang, Zhou Yongdong, et al. The characteristics of earthquake structure in China and its geodynamic meaning [C]. Structural speciality committee Geological Society of China, 1995.
- [37] 宁津生, 李建成, 陈建国, 等. 2-49 阶卫星重力异常图[M]//袁学诚主编:中国地球物理图集, 北京:地质出版社, 1996.
- Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 2-49 Satellite Gravity Anomaly[M]. Yuan Xuecheng(ed.). Atlas of Geophysics of China. Beijing:Geological Publishing House, 1996.
- [38] Replumaz A, Hrafnkell Karason , Rob D. van der Hilst , et al. 4-D evolution of SE Asia's mantle from geological reconstructions and seismic tomography [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 221:103-115.
- [39] Lebedev S, Guust Nolet. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography [J]. Journal of Geophysical Research. 2003, 108, no. b1, 2048, doi:10.1029/2000jb000073.
- [40] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):737-758.
- Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited [J]. Geology in China, 2007, 34 (5):737-758(in Chinese with English abstract).

A preliminary 3D model of lithospheric structure in China

YUAN Xue-cheng¹, LI Ting-dong²

(1. Center of Development and Research, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: According to rheological behaviors of the lithosphere, the authors have divided the lithosphere of China into three layers. i.e., elastic upper crust, plastic lower crust and lithospheric mantle, and pointed out that they have different structures and complicated relationships. In the Xinjiang area, four basins and three ranges were formed by thrusting and overlapping in the upper crust, overlain on a series of EW-striking antiforms and synforms of the lower crust. The uplifting of the central part of the Tibetan plateau was as a whole caused by the hydraulic pressure due to the partial melting of its lower crust and lithospheric mantle, but the uplifting of the border parts is of the differential nature. In North China, the upwelling of asthenosphere material destroyed lithospheric mantle and formed a mushroom cloud structure in which the new-born mantle and the residue mantle existed side by side, and grabens occurred in the elastic upper crust. There exists no evidence for the subduction of the Pacific plate under the continent of China, except for things in a limited area of northeast China. The violent deformation of eastern China was produced by the upwelling of asthenospheric materials instead of by the subduction of the Pacific plate. So the tectonic forces nowadays in China constitute a dual system which includes the subduction of the Indian plate in the west and the uplifting of the asthenosphere in the east. The boundary of the two different tectonic forces is the north-south seismic belt. To the west of the north-south seismic belt, the lithosphere is under a compression regime, whereas to the east of the north-south seismic belt, the lithosphere is under an extensional regime. The reason for the seismicity of North China is that the elastic crust of this area was thinned by strong geothermal activity, which resulted in the considerable lowering of the elastic limit.

Key words: lithosphere, 3D-structure; Xinjiang basins and ranges structure; uplifting of the Tibet plateau driven by hydraulic pressure; mushroom cloud lithospheric mantle; north-south seismic belt

About the first author: YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, senior engineer, engages mainly in the study of deep geophysics; E-mail: xcyuan@263.net.cn.