

冯 强 王 健 主编

722082

第二届构造物理学 学术讨论会文集



14

地震出版社



第二届构造物理 学术讨论会文集

马 瑾 王绳祖 主编

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书是1987年9月11日至14日在甘肃武都召开的第二届构造物理学术讨论会论文集。其中共选编了25篇论文,汇集了近几年来国内在构造应力场及其驱动力、构造变形和发展条件、实验构造物理方面的研究成果。这些论文主要涉及:我国区域应力场的测定及分析,滑脱构造与底部牵引,构造活动波及其在地震研究中的应用,断层分形几何及其与地震活动的关系,地震的失稳过程和突变模式,断层泥力学性质以及岩石破裂、扩展、声发射、失稳条件、电阻率的实验研究等。

本书可供构造地质学、构造物理学以及地震科学领域的研究人员、大专院校有关专业的师生参考。

第二届构造物理学术讨论会文集

马瑾 王绳祖 主编

责任编辑:李树青

责任校对:李 珏

地质出版社出版

北京复兴路63号

机工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13.25 印张 339 千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数 001—800

ISBN 7-5028-0267-3/P.170

(655) 定价:7.00元

序 言

全国第二届构造物理学术讨论会于1987年9月11日至14日在甘肃武都举行。来自地矿、煤炭、地震等系统及中国科学院、高等院校的近90名代表聚集一堂，对第一届讨论会（1985年3月，北京）以来我国构造物理学的进展情况进行了交流。同时，这次会议宣布了我全国构造物理学术组织——中国地震学会构造物理专业委员会的成立，这标志着我国构造物理学研究进入了一个新的发展阶段。

这次会议共收到论文110余篇，其中会议交流近80篇。论文涉及面较广，其中包括地壳应力场及驱动力源，高温高压下岩石和断层物质的力学性质，岩石破裂和摩擦滑动的性状、机制及物理响应，区域构造变形与地震发生条件、成矿作用及热资源等。但由于许多论文已经被有关刊物接受以及出版经费等问题，本文集仅收集了其中的25篇。这部分论文通过野外观察和测试、实验室试验及理论分析等手段，就构造变形的驱动力源、应力场、变形性状和机制以及物理响应等问题进行了研究和论述，反映了最近两年来我国构造物理研究新进展的部分成果。

构造物理学是研究相当于地壳上地幔环境条件下各种尺度构造变形的物理本质，探索和解决与此有关的理论及实际问题的一门新兴学科。它在构造地质、地球物理和岩石力学等学科的基础上不断吸收数学、力学及物理学其它分支学科的理论 and 现代测试、计算技术，逐渐形成了独特的理论和方法。构造物理研究的特点可概括为：浅部变形与深部变形相结合，形变与质变相结合，宏观变形性状与微观变形机制相结合，实验室研究与野外研究相结合，定性描述与定量分析相结合。事实上，构造物理学之所以能在学科如林的局面下诞生且逐渐成为地球科学最活跃的学科之一，并能在资源开发、灾害防治和环境保护工作中发挥重要作用，很大程度上是因为它具有上述不同于其它学科的特点。因此，在科学研究和生产实践中坚持并发扬这些特点，对构造物理学的发展是至为重要的。从这届学术讨论会的论文内容来看，我国构造物理工作者在注意发挥上述特点及引进吸收新理论、新方法方面有了可喜的进展。但是，我们也清醒地认识到，无论从深度上还是从广度上来看，我们在上述几个结合方面有待进行的工作还很多，各方面的进展也不平衡，还不能适应地球科学的发展及国民经济建设对本学科的需要。我们希望构造物理专业委员会的成立以及本文集的出版将有助于促进构造物理工作者发挥本学科的优势，进而推动我国构造物理学在理论和应用两方面的进一步发展。

本文集委托国家地震局地质研究所编辑，马瑾、王绳祖两同志任主编，马胜利、洪汉净、孙君秀等同志参加了编辑工作。本文集在编辑、出版过程中得到论文作者、审稿人、地震出版社和中国地震学会的支持，特致谢意。

中国地震学会
构造物理专业委员会
1988年6月8日

目 录

青藏高原地壳厚度变化对中国大陆地壳应力场的影响	罗焕炎 孔祥红 (1)
实际地壳均衡论与地壳构造运动、地震活动的关系	游永雄 (9)
滑脱构造与底部牵引	洪汉净 (18)
隆起的挤压是控制构造体系的决定因素	田景瑞 (27)
构造活动波及其在地震研究中的某些应用	冯德益 聂永安 郭瑞芝 (34)
华北东南部及邻近地区现今构造应力场的初步探讨	汤有标 曹定男 (42)
利用超声波井下电视测定构造应力场方向	翟青山 魏庆云 毛吉震 梁海庆 李方全 (50)
鲜水河断裂带断层几何与地震活动性	马 瑾 马胜利 雷兴林 (58)
河西走廊盆地断裂构造与形变特征	王之俊 袁铭 (68)
红河断裂带的断层几何特征及其与地震活动的关系	金邓辉 马瑾 (75)
对断裂发育规律的探讨	岳石 (85)
几种非稳态构造运动的突变模式及其对地震发生条件研究的意义	刘鼎文 王静瑶 王咏娟 (92)
地壳岩石的脆延性转变、失稳型式及浅源强震震源深度的估计	王子潮 王绳祖 王威 (103)
浅源强震的失稳过程是破裂扩展抑或摩擦错动	王绳祖 (113)
应用图象识别方法对沙土液化进行综合判定和预测	窦毅强 尹兆民 (120)
岩石及其它脆性材料中非穿透裂纹扩展的实验研究	尹祥础 李世愚 李 红 (128)
三轴实验测定岩石剪切破裂能的几个问题	张流 高平 李彪 (137)
震源区断层构造与破裂错动及停止特点的实验研究	荣代路 贺玉亭 金铭 耿大玉 蒋续媛 高中强 (146)

真三轴应力条件下大理岩破裂过程中的 P 波 Q 值变化

.....许昭永 韩明 包一峰 (151)

受压岩(土)体电阻率变化的原地实验及大地震前后地电异常的初步分析

.....陆阳泉 王玉祥 温新民 (158)

受力条件下大型标本和现场岩体视电阻率、弹性波和声发射的实验研究

.....陆阳泉 钱家栋 刘建毅 (169)

阿尔金断裂带断层泥的力学性质

.....耿乃光 刘晓红 方亚如 蔡戴恩 郝晋升 李纪汉 (177)

断层泥波速的实地测量

.....施行觉 谢端 吴斯远 (181)

实验室岩石声发射三维定位及标本波速场联合反演: 理论及方法

.....雷兴林 马瑾 (186)

摩擦滑移角对岩石失稳型式的影响

.....石桂梅 王威 王绳祖 (196)

Contents

Effect of crustal thickness of Qinghai-Tibet Plateau on tectonic stress field within China Continent	Loo Huanyen, Kong Xianghong (1)
The relation between the theory of isostasy and tectonic movement, earthquake activity in the crust.	You Yongxiong (9)
Detachment structure: a mechanical model produced by deep-seated dragging	Hong Hanjing (18)
The compression of uplift body is a decisive factor for controlling geologic structure	Tian Jingrui (27)
Tectonic-movement wave and its application in earthquake research	Feng Deyi, Nie Yongan, Guo Ruizhi (34)
Preliminary study on modern tectonic stress field in the southeastern region of North China and its vicinity	Tang Youbiao, Cao Dingnan (42)
The orientation of tectonic stress field determined by ultrasonic borehole televiewer	Zhai Qingshan, Wei Qingyun, Mao Jizhen, Liang Haiqing, Li Fangquan (50)
Fault geometry and its relation with seismic activity in the Xianshuihe Fault System	Ma Jin, Ma Shengli, Lei Xinglin (58)
Fault belt structure and deformation characteristics in Hexi Basin	Wang Zhijun, Yuan Ming (68)
Geometric Characteristics of fault and its relation to seismic activity in the Red River fault system	Jin Denghui, Ma Jin (75)
Approach to the regulation of fault development	Yue Shi (85)
Some theoretical models of non-steady state tectonic movement and their significance to studying earthquake generation condition	Liu Dingwen, Wang Jingyao, Wang Yongjuan (92)
Brittle-ductile transition, instability modes of rocks in the Earth's crust and the depth of strong shallow earthquake	

-Wang Zichao, Wang Shengzu, Wang Wei (103)
- Seismogenic process of strong shallow earthquake: The rupture propagation
or frictional sliding?
-Wang Shengzu (113)
- Prediction of liquefaction of sandy soils by a pattern recognition method
-Dou Yiqiang, Yin Zhaoming (120)
- Experimental study on propagation of non-penetrating crack in rock
and other brittle materials
-Yin Xiangchu, Li Shiyu, Li Hong (128)
- Some problems in measurement of shear fracture energy of rocks by
triaxial experiment
-Zhang Liu, Gao Ping, Li Biao (137)
- Experimental study on relation between the structural form of fault in
earthquake source region and the features of fracture and its stop
-Rong Daifu, Huo
Yuting, Jin Ming, Geng Dayu, Jiang Xuyuan, Gao Zhongqiang (146)
- Variation of P-wave Q-values in fracture process of marble under
true triaxial compression
-Xu Zhaoyong, Han Ming, Bo Yifeng (151)
- In-situ experiments of electrical-resistivity variation in pressed
rock and earth and preliminary analysis of geoelectrical anomalies
before and after earthquake
-Lu Yangquan, Wang Yuxiang, Wen Xinmin (158)
- Experimental studies of apparent electrical resistivity, elastic wave
and acoustic emission in fracturing process of large scale samples
and in-situ rock masses
-Lu Yangquan, Qian Jiadong, Liu Jianyi (169)
- The mechanical properties of gouge in Aerjin fault
-Geng Naiguang,
Liu Xiaohong, Fang Yaru, Cai Daien, Hao Jinsheng, Li Jihan (177)
- In-situ measurement of longitudinal wave velocity of fault gouge
-Shi Xingjue, Xie Duan, Wu Siyuan (181)
- Simultaneous inversion of 3-dimensional location of acoustic emission
and velocity structure of rock sample in laboratory: Theory and method
-Lei Xinglin, Ma Jin (186)
- The effect of frictional sliding angle on instability mode of rocks
-Shi Guimei, Wang Wei, Wang Shengzu (196)

青藏高原地壳厚度变化对中国大陆 地壳应力场的影响

罗焕炎 孔祥红

(国家地震局地质研究所)

摘 要

青藏高原周围地区是中国大陆内部地震活动最强烈的区域。本文从大地构造演化的角度出发,用三维有限单元方法模拟青藏高原隆起、地壳增厚对周围地区应力场的影响。

印度洋板块的推挤是促使欧亚板块上升的动力,但上升后的下沉则是重力均衡的结果。在地壳厚度有一定侧向差异后,在侧向密度差异和水平推挤的双重因素作用下,地壳本身既有浅部上升,也有深部下降的加厚趋势。可见青藏高原的形成过程具有阶段性。在喜马拉雅运动第三幕后的相对平静期(更新世以来),青藏高原与周围地区之间存在的地壳厚度和侧向密度差异引起的重力均衡调整是产生高原周围浅震的主要原因。

一、引 言

在地质历史上曾发生过多大的构造运动或构造旋回。在这些构造运动中,地壳物质发生强烈变形,产生各种构造现象。很明显,在这些构造运动之间存在构造运动的相对平静期。如果将构造运动看作是板块间相对运动产生的,就可以认为板块的相对运动并不是以不变的速度和强度进行的,也应该具有一定间歇性的相对平静期。如果把喜马拉雅造山构造运动看作是印度洋板块与欧亚板块间相互作用的结果,那么印度洋板块与欧亚板块间的这种相互作用也同样存在活跃期与相对平静期。在构造运动活跃期,两板块间相互强烈作用,使得青藏地区从始新世晚期到渐新世早期开始隆起抬升,经过上新世以来的强烈上升,形成现今世界上规模最大、地势最高、地壳最厚的青藏高原。在此期间,大陆内部的应力场固然主要是受板块间相互作用的直接影响,但青藏高原现处在喜马拉雅运动第三幕后的相对平静期^[1],且现今中国大陆内部的浅源地震主要分布在青藏高原的边缘地区。这些地震活动的主要能量是从何而来,一直是地学工作者感兴趣的问题。有的认为青藏高原周围地区的构造活动仍是直接受印度洋板块向北推挤的影响^[2-4],导致高原物质沿东西方向移动,从而产生中国西部地区的构造变动与地震活动^[3, 5, 6]。另一些研究者则认为青藏高原周围地区的地震活动与构造变动主要是由于地壳厚度的较大变化所产生的重力均衡调整的结果^[7]。

作为上述不同观点的一个讨论,我们将在分析高原及周围地区的地壳结构、地质构造和地震活动特征等的基础上,应用三维有限单元方法来探讨影响青藏高原周围地区现今构造应力场的主要因素。

二、青藏高原及其周围地区的构造和地震活动

青藏高原位于印度洋板块与欧亚板块接触带的欧亚大陆一侧。在其周围有恒河平原,扬

子地台和塔里木盆地等相对稳定的地块（图1）。高原主体的平均厚度为70公里〔8〕。高原周围地区地壳厚度为40多公里，两者间的地壳厚度相差近30公里（图2）。在高原与相对稳定地块的相邻部位地壳厚度变化梯度较高原的其它边缘上的变化大得多。在高原的西部边缘，东北和东南边缘，地壳厚度变化梯度较小，地壳等厚线有自高原向外国扩展的趋势。

由图2可以看出，青藏高原及周围地区的地震主要分布在高原的边缘地带，其中在高原西缘的兴都库什地区，东南边缘的缅甸滇西地区和东北边缘的川甘青地区浅源地震最为集

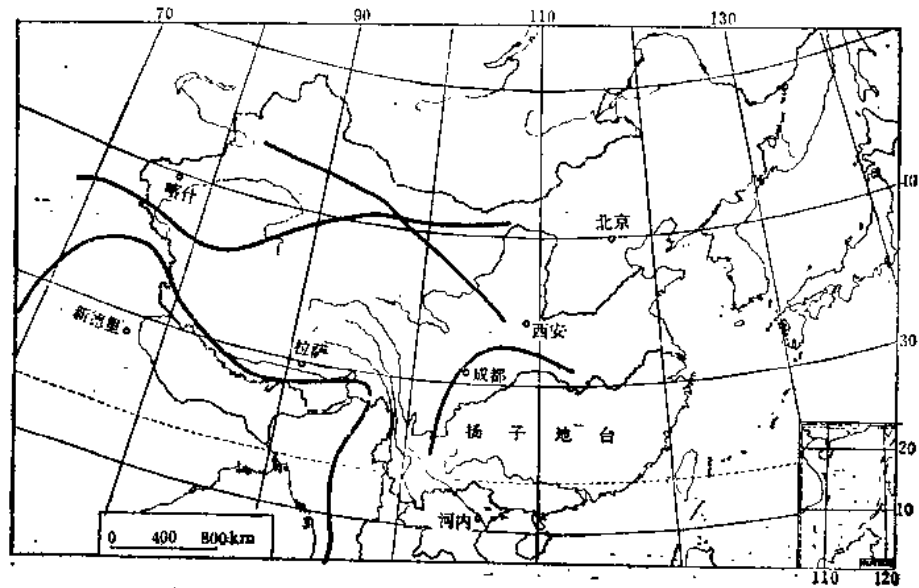


图1 青藏高原地区构造示意图

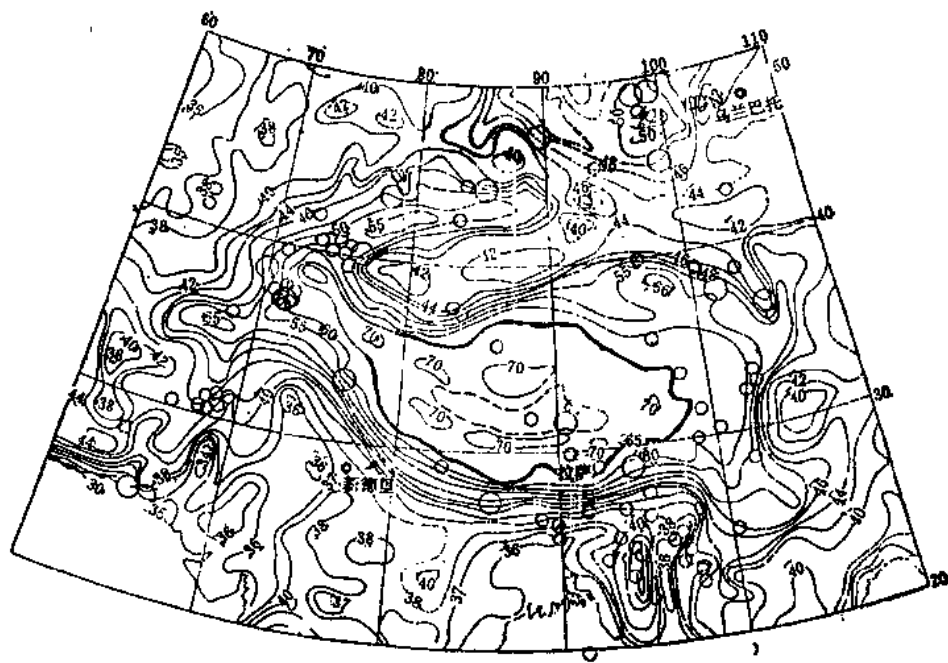


图2 青藏高原及邻区地壳厚度（公里）和震中分布图（据王遵亲等改编）〔10〕

中。而这三个地震集中区正好与上述三个地壳等厚线外突区一致或相邻。值得注意的是位于印度洋板块与欧亚板块接触边缘的喜马拉雅弧形构造带,除了两端位于上述二个地震相对集中区,地震较多外,弧形构造带的中段浅源地震相对较少,甚至比位于中国大陆内部的高原东部边缘的地震还要少得多。这就提出了一个问题:如果说现今青藏高原及周围地区的地震是印度洋板块与欧亚板块碰撞挤压的直接作用产生的,那么为什么在板块边缘的地震反而比大陆内部的少?彭万里等〔9〕用印度洋板块不均匀地向北顶撞,在喜马拉雅弧形带东西两个端部作用较强来解释这一现象。但从他们的实验结果可以看出,喜马拉雅弧形带中的应力并不比高原东部边缘的少。因而仍不足以解释上述现象。

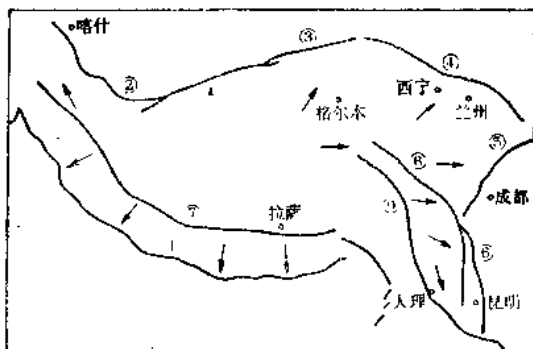


图3 青藏高原周围主要断层分布及应力场示意图

图上粗线表示深断裂走向;箭头表示断块移动方向。

- ①主边界断裂;②西昆仑断裂带;③阿尔金断裂带;
④祁连山断裂带;⑤龙门山断裂带;⑥安宁河-小江
断裂带;⑦雅鲁藏布江断裂带;⑧鲜水河断裂带;⑨
金沙江-红河断裂带

在高原边缘发育着一系列深大断裂(图3)。在高原西北边缘有走向北西的西昆仑北缘断裂,该断裂为一右旋平移-逆断层带〔4〕。

而高原北部边缘和东北边缘的断裂主要以左旋-逆冲的方式运动,如北东东走向的阿尔金断裂带〔10〕,走向北西的祁连山北缘断裂带〔4〕等。但其中北西向的海原断层从更新世以后活动性质从压性变为张性〔11〕。在该断层通过的宁夏西海固(西吉、海原、固原)地区,震源机制解表明大多数地震断层为平推正断层,或者是纯正断层〔12〕。在高原的东北边缘大致以西海固地区为界,在其以北地区(包括西海固)大多数地震断层为平推正断层,在其以南地区大多数地震断层为逆断层。其中1920年的海原8.5级地震,断层面向南倾斜,以左旋正断方式运动,表明断层的南盘下沉而北盘上升。

在高原的东部边缘主要有龙门山和鲜水河两条较大的断层。其中龙门山断裂为逆断层或逆掩断层,并兼有右旋走滑。鲜水河断裂的走向北西,以左旋错动为主,并兼有挤压。它构成康滇菱形块体的东北边界。其东北边是青川块体。由于扬子地台相对地阻挡了青川块体向东运动,使得断层两侧产生较大的相对差异运动,表现为强烈的左旋走滑〔13〕。

康滇菱形块体位于青藏高原的东南边缘,其边界均由活动断层构成。除上述左旋走滑的鲜水河断裂外,有走向北西的红河断裂,近南北向的安宁河断裂、小江断裂等。这些边界断裂,除红河断裂为右旋错动外,其它断裂带均为左旋错动。这反映了康滇菱形块体向南东方向运动的趋势〔5,6〕。在红河断裂以西,发育一条北西向的马登断裂。这条断裂在第四纪以来虽有不同程度的活动,但远不如红河断裂活动显著〔14〕。从红河断裂往西,向东南方向的运动有减弱的趋势。康滇菱形块体向南东运动的力源可能并不是直接来自板块边界,而是来自大陆内部。

综上所述,青藏高原周围地区的构造活动与外围的相对稳定地块的分布有关。在与稳定地块相邻的部位,断层活动主要以逆冲为主,走滑分量较小。例如与扬子地台相邻的龙门山断裂带与塔里木盆地相邻的阿尔金断裂的东段。而远离稳定地块的断裂则以走滑错动为主要运动特征。表现出在远离稳定地块的部位高原物质向外运动较为明显,这与地壳等厚线反映

的趋势是比较一致的。

由上述的断裂活动特征及前人的研究成果[4, 5], 青藏高原周围应力场的主压应力方向呈放射状指向高原周围(图3)。在高原的西北边缘主压应力方向是北西向, 到北部边缘主压应力方向变为南北向或北北东向。从高原的东北边缘到东南边缘, 主压应力方向逐渐由北北东, 北东向转为南东和近南北向。

三、三维数值模拟结果

由于板块间的相互作用, 使得大陆内部的地壳和上地幔物质发生大规模的变形, 造成地壳和上地幔物质的密度分布很不均匀。这种侧向密度上的分布不均匀必然偏离最小势能(重力均衡)状态, 从而在地壳和上地幔内部产生相应的构造应力和变形。在这种构造应力作用下, 地壳和上地幔物质将再恢复到原来势能最小的状态。Ramberg(1968)[21]、Van Bemmelen(1976)[22]和Barrows(1981)[24]等都认为这种构造应力确实存在, 并且在一定条件下对地壳构造运动起着主要作用。王子潮等[15]和Tsen等[25]所做的岩石蠕变实验表明, 在相当于地下10公里以下的压力和温度条件下, 岩石将表现为稳态滑动。在一定力的长期作用下岩石的变形将以一个大致常定的应变率持续进行下去, 在达到平衡以前不会停止。因此, 由于密度不均匀产生的应力确实会长期地影响构造变形。

地壳厚度变化所产生的构造应力可以定义为:

$$\{S_g\} = \{\sigma\} + \{S_e\}, \quad (1)$$

式中 $\{\sigma\}$ 表示由于地壳厚度变化所产生的总的应力状态, $\{S_e\}$ 为地层均匀分布时, 即最小势能状态时的应力矢量。地壳和上地幔物质的流变特性可用牛顿流体的纳维耶尔-斯托克斯方程表示:

$$\mu \nabla^2 v - \Delta P + \rho g = 0, \quad (2)$$

其中, μ 为粘滞系数, v 为速度矢量, P 为压力, ρ 为密度, g 为重力加速度。一般来说, 构造变形是十分缓慢的, 因此可用静态不可压缩的虎克弹性体来代替式(2)所描述的牛顿流体[21]。这时未知数 v 变为位移矢量 u , 并将粘滞系数改为剪切弹性模量, 本文的计算中将用不可压缩的虎克体来模拟地壳和上地幔的变形。取泊松比为0.499来近似表达介质的不可压缩性。

利用侧向边界物性约束的有限单元平衡方程[16],

$$\int [B]^T \{\sigma\} dv + \int [N]^T [n] \{\sigma\} dS = \int [N]^T \{x\} dv + \int [N]^T \{T\} dS, \quad (3)$$

式中 $[B]$ 为应变矩阵, $[N]$ 为形函数矩阵, $\{x\}$ 为体力矢量, $\{T\}$ 为边界面力矢量, v 为变形体的体积, S 为变形体边界面积, $[n]$ 为边界的方向余弦矩阵。将式(1)改写为:

$$\{\sigma\} = \{S_g\} + \{S_e\}$$

代入上式,

$$\begin{aligned} & \int [B]^T \{S_g\} dv + \int [N]^T [n] \{S_g\} dS \\ & = \int [N]^T \{x\} dv + \int [N]^T \{T\} dS - \int [B]^T \{S_e\} dv - \int [N]^T [n] \{S_e\} dS \end{aligned} \quad (4)$$

先求出均匀层分布时的 $\{S_e\}$ ，利用上式就可求解由于地壳厚度变化产生的应力状态。

为了简化和减少计算量，设想一个三维有限元计算模型（图4）。考虑到青藏高原地壳厚度为70公里左右的分布特征，我们在模型中取一个长方形的范围做为地壳厚度发生变化的地区。在这个范围内取地壳厚度为70公里，其它地方取地壳厚度为40公里。在高原东边和北边的几个单元的弹性常数取得较大以模拟高原周围几个相对稳定地块。模型的顶面均为自由表面，底面为零位移约束。

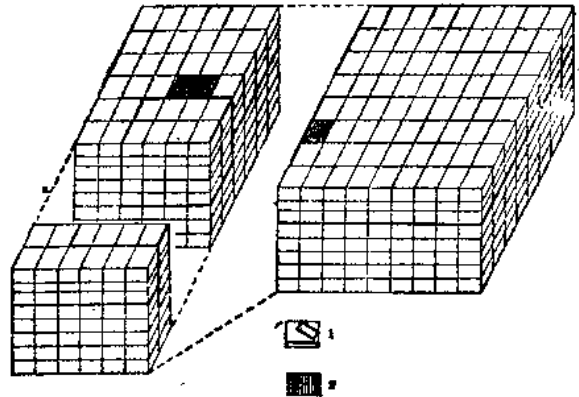


图4 有限元计算网格

1,2 表示地壳厚度不同的部分，具体厚度见正文

为了便于对比，分别利用以下三种不同边界条件进行对比计算。

1. 在模型南边界的西半部施加向北的位移，以模拟印度洋板块的向北运动。在模型中不存在地壳厚度差异，即整个模型的地壳厚度都是40公里。其它侧面均为物性约束。
2. 只考虑平静期地壳厚度差异的影响。不考虑南部边界推移的影响，四个侧面均为物性约束。
3. 前两种边界条件的迭加。

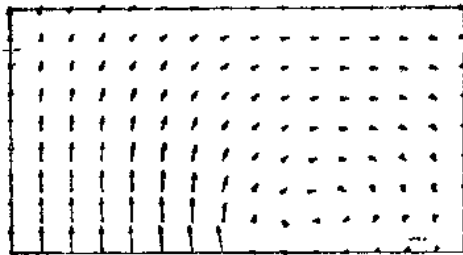


图5a 位移矢量图（平面）

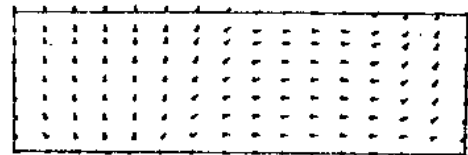


图5b 位移矢量图（剖面）

图5和图6分别是边界条件1的位移矢量和主应力分布图。在相当于印度板块向北推挤的作用下，大陆内部的物质主要向北移动，这种移动在板块边界最为强烈（图5a），并有上升趋势（图5b），其中上地壳的向上位移最大。这反映了青藏地区上隆的初期，印度板块的向北运动对高原形成起着主导的作用，这种作用在板块边界最明显，地壳的加厚和上升也主要发生在板块边界。因此整个高原的形成并不是板块的一次碰撞就能完成的，这已为青藏地区的构造演化资料所证实^[17]。这时模型西部的主压应力基本上是近南北向、往东逐渐变化为北东到近东西（图6）。反映了印度洋板块

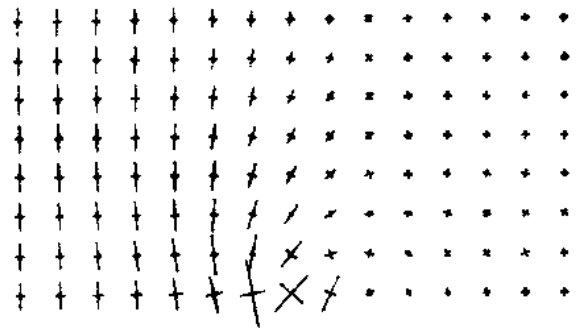


图6 主应力分布图（平面）

向北运动对中国东部应力场影响的特征。

对于只考虑地壳厚度变化的情况，从平面上看，地壳物质由厚度最大的地方向四周扩散（图7a）。从剖面上看，高原区地壳下沉，而平原区地壳上升，物质由高原区向平原区移动（图7b）。这种地壳厚度不均匀对东部的影响比较大。最大主压应力也是由高原指向四周（图8）。这与青藏高原周围的应力场分布比较一致（图3）。

当模型既有地壳厚度变化，在部分边界上同时施加向北的位移时，模型西半部的位移向北，往东有向东偏转的趋势，且位移值较之只有边界推挤时的大（图9a）。在模型的东半部位移方向逐渐变为北东向，再往东甚至转向东南。与边界1的结果不同的是在加位移的边界上位移值不如模型内部地壳厚度最大的部位大。这是因为在边界附近，地壳厚度变化产生的位移与边界推挤产生的位移相反，两者相互抵消。而在内部两者产生的位移方向相同，加强了向北的运动。在剖面上，高原下的物质也有向下和向平原迁移的趋势。但主要发生在模型的下部，而高原顶部仍在上升（图9b）。这时的应力分布只是在北部边界与实际地应力一致。在高原的西北边缘主压应力为北北西向，在北部为南北向，到了东北边缘变为北北东向。但在南部边缘的上部出现张应力（图10a），下部为压应力（图10b）。这说明了在南部边界深震多于浅震的原因。

将以上三种边界条件的计算结果与现今青藏高原周围的应力场资料对比，可以看出其中比较接近实际情况的是只考虑地壳厚度变化的计算结果。因此我们可以认为由于地壳厚度不

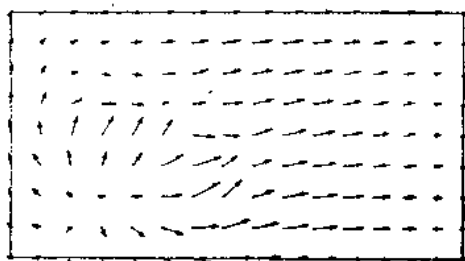


图7a 位移矢量图（平面）



图7b 位移矢量图（剖面）

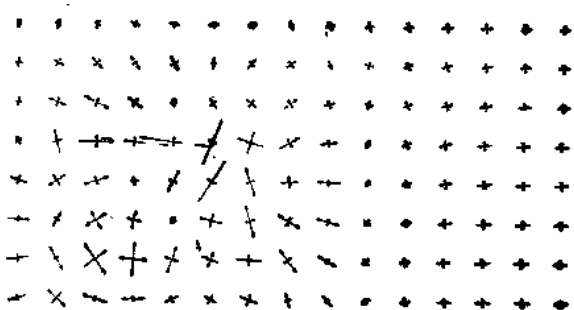


图8 主应力分布图（平面）



图9a 位移矢量图（平面）

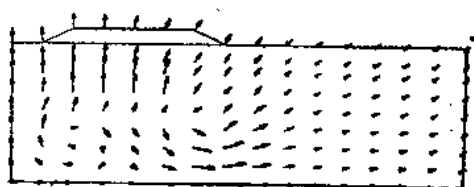


图9b 位移矢量图（剖面）

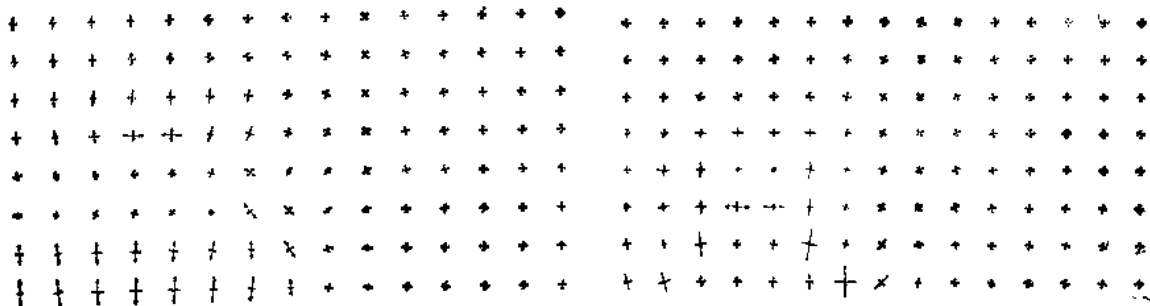


图10 a 主应力分布图 (第一层)

图10 b 主应力分布图 (第四层)

均匀对现今中国大陆内部青藏高原周围的应力场起着重要的作用。但是由于我们所取的模型十分简单, 计算结果只能较粗略地解释典型特点。因此我们只能认为青藏高原隆起后所产生的地壳厚度差异对大陆内部应力场是一个重要的控制因素, 但并不是唯一的因素。

四、讨 论

始新世以来, 由于印度洋板块与欧亚板块间的相互挤压, 使得青藏高原隆起抬升, 地壳加厚, 直到中更新世末期, 形成了现今地壳厚度达70公里的青藏高原。印度洋板块与欧亚板块之间的相互作用开始于中生代末期。两者之间曾发生过多次接触和分离^[17]。这说明两板块间的相互作用所产生的构造运动有相对强烈和相对平静的时期。这种交替的构造运动可以看作是地壳运动源演化过程的反映^[18]。由于地球内部某种作用力 (例如地幔对流和板块运动) 使得地壳发生强烈的构造运动, 破坏了岩石圈的平衡状态, 即最小势能状态。当外来作用力处于相对平静期时, 地壳物质将向重力势能最小的方向变化, 成为影响地壳变动的另一种主要因素。

由于印度洋板块的向北运动与欧亚板块发生强烈作用, 使得青藏地区地壳变厚, 破坏了这一地区的平衡状态。对整个青藏地区来说, 最大量的抬升是发生在第三纪与更新世之间^[19, 20], 正好与晚喜马拉雅旋回的主要褶皱幕一致^[1]。全新世以来两板块间的作用相对较弱, 但在高原与周围地区地壳厚度有一定差异后, 造成较大的侧向密度差异, 促使向最小势能状态变化, 从而周围地区产生重力调整、出现上升后的下降现象。但在水平推力和侧向密度差异的共同作用下, 则出现浅部上升和下部沉降的地壳加厚特征。

因此, 可以认为板块边缘地震活动主要是板块相对运动的产物, 但在远离板块边缘的浅源地震主要是区域重力均衡调整的结果。可见结合板内重力, 形变的监测, 进行构造应力场的数值模拟是中长期甚至短期地震预测的有效方法之一。

参 考 文 献

- [1] 黄汲清、任纪舜等, 1983, 中国大地构造及其演化, 科学出版社。
- [2] 汪一鹏、宋方敏等, 1986, 宁夏北部地震地质的若干特征兼论青藏高原对华北地壳应力场的影响, 现代地壳运动研究, 2, 地震出版社。
- [3] 汪一鹏, 1979, 我国板内地震与中生代应力场, 地震地质, 1卷, 3期。

- 〔4〕 邓起东等, 1979, 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系, 地震地质, 1 卷, 1 期。
- 〔5〕 阚荣举, 1980, 西南地区现代构造应力场与板内强震活动, 地震地质, 3 卷, 3 期。
- 〔6〕 阚荣举, 1987, 本世纪中国西南地区大震活动的三种秩序及其可能的力源, 西北地震学报, 9 卷, 1 期。
- 〔7〕 周玖等, 1986, 我国西南地区现代重力构造运动与震源深度及震中展布的关系, 地震研究, 9 卷, 1 期。
- 〔8〕 王谦身等, 1982, 亚洲大陆地壳厚度分布轮廓及地壳构造特征的探讨, 地震地质, 4 卷, 2 期。
- 〔9〕 彭万里等, 1986, 印度洋板块边界力的不同作用方式对欧亚大陆应力场影响的实验研究, 华北地震科学, 4 卷, 4 期。
- 〔10〕 冯先岳, 1982, 阿尔金断裂带, 中国活动断裂, 地震出版社, 北京。
- 〔11〕 徐叶帮, 1986, 海原活动断裂中断层泥的特征、成因及其对断层滑动性能的影响, 西北地震学报, 8 卷, 1 期。
- 〔12〕 秦保燕等, 1986, 南北地震带北段现今地壳应力场讨论, 华北地震科学, 4 卷, 1 期。
- 〔13〕 闻学泽等, 1985, 鲜水河活动断裂带形变组合与运动特征的研究, 中国地震, 1 卷, 1 期。
- 〔14〕 刘光勋等, 1986, 我国滇西北地震活动区的活动构造与应力状态, 地震地质, 8 卷, 1 期。
- 〔15〕 王子潮等, 1989, 迁安石英岩的实验变形、失稳型式和石英晶体的位错结构, 现代地壳运动研究, 4, 地震出版社。
- 〔16〕 罗焕炎等, 1988, 山西地堑系形成机制的初步数值模拟, 地震地质, 10 卷, 1 期。
- 〔17〕 常承法等, 1982, 青藏高原构造地质, 科学出版社。
- 〔18〕 罗焕炎, 1979, 从大陆地壳动力学观点试论我国地震的成因和机制, 地震地质, 1 卷, 1 期。
- 〔19〕 徐仁, 1981, 大陆漂移与喜马拉雅山上升的古植物学证据, 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题, 科学出版社。
- 〔20〕 崔之久, 1981, 古岩溶与青藏高原抬升, 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题, 科学出版社。
- 〔21〕 Ramberg, H., 1968, Fluid dynamics of layered systems in the fluid of gravity, a theoretical basis for certain global structures and isostatic adjustment, Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 1, p. 63—87.
- 〔22〕 Van Bemmelen, R. W., 1976, Plate tectonics and the updating model, a comparison, Tectonophysics, Vol. 32, p. 145—182.
- 〔23〕 Artyushkov, E. V., 1973, Stress in the lithosphere caused by crustal thickness inhomogenities, J. Geophys. Res., Vol. 78, p. 7675—7708.
- 〔24〕 Barrows, L. and C. J. Langer, 1981, Gravitational potential as a source of earthquake energy, Tectonophysics, Vol. 76, p. 237—255.
- 〔25〕 Tsenn, M. C and N. L. Carter, 1987, Upper limits of power law creep of rocks, Tectonophysics, Vol. 136, p. 1—26.
- 〔26〕 Zienkiewicz, O. C., 1971, The finite element method of engineering science, McGraw-Hill, New York.

实际地壳均衡论与地壳构造运动、地震活动的关系*

游 永 雄

(中国地质大学北京研究生院)

摘 要

本文建立了实际的地壳板块均衡模型,即应用实测的重力值去掉地球椭圆正常重力场得到异常重力场,经空间、层间、地形和莫霍面起伏改正后再经过鉴别高空场与地面场的重力位二阶导数矢量方向差异,选取壳下重力异常的边值,解壳内均衡异常的高阶线性方程组,分离出地壳均衡异常,作为进一步划分地壳各层的均衡重力异常的基础,据以研究地壳均衡状态的破坏与恢复的趋势以及构造运动与地震活动的关系。本文在电子计算机上计算、绘制了华北地区地壳均衡异常的有关图件。

一、引 言

地质学家近些年来一直都在积极探讨地壳运动机制。随着岩石圈动力学计划的执行,又有不少更深入的认识,如Bott与Kusznir于1984年提出地壳均衡状态破坏与恢复不断地在进行,从而引起地壳运动。马杏垣也提出地壳密度不均、重力不稳可作为构造驱动力的观点^[1]。实际资料表明,地球非常接近均衡状态,这是由于地球内部有一层低强度的软流圈,可使上面的岩石圈发生弯曲或断裂而达到均衡。地壳至上地幔变密度的深度和岩石圈强度,是确定均衡的两个重要参数^[2]。均衡异常反映均衡状态被破坏后物质的空间分布,并可据以研究地质构造和矿产预测等问题。均衡异常动态是反映物质的时间分布动态信息,可用来研究均衡破坏与地壳的演化以及新构造运动和地震活动之间的关系。艾里-普拉特地壳均衡假说认为,山区大地水准面之下的地壳质量亏损等于其上可见的地形质量,这种上下补偿关系使得山越高,山根愈深。这个假说长期以来在地质学、地球物理学、大地测量学、地震学等学科领域被广泛引用。但是许多实例并不完全符合艾里-普拉特均衡补偿模式。如在地形十分平坦的莫斯科存在地方吸引力就是一个强有力的例子,莫斯科克里姆林宫大伊凡钟楼与其南面25公里处的垂线偏差子午分量是背向的,其差值竟达15.6"之多^[3]。海拔最高的喜马拉雅山下部地壳并不是最厚的地方。Airy-Pratt把均衡补偿面上部均衡柱体的密度看成是一致的,事实上壳幔都是变密度的圈层,在纵向和横向上密度都存在不均匀性。总之,艾里-普拉特地壳均衡假说在许多地方不符合地球实际情况。因此,需要以实测资料为根据建立实际地壳均衡模型,划分壳幔均衡异常,得到较合理的地壳均衡模型,分离出实际的地壳各层均衡重力异常。

* 国家自然科学基金资助项目。