

震源物理学研究概况和进展

陈运泰

(国家地震局地球物理研究所,北京)

摘 要

本文根据四年来发表于国内、外学术刊物的论文,概述了这个时期内中国在地震震源物理研究方面,特别是在地震震源机制和构造应力场、地震孕育过程和地震前兆机制、地震破裂过程的资料分析和地震震源参数的测定、地震破裂力学和震源物理的实验研究五个方面的基本情况和进展。

关键词 震源物理, 构造应力场, 震源机制, 地震前兆。

地震震源物理学研究的是地震发生的机制、成因及其物理过程,这项研究对于实现地震预报及减免地震灾害的重要意义日益受到重视。四年来,中国在震源物理研究方面开展了许多工作,以下从地震震源机制和构造应力场、地震孕育过程和地震前兆机制、地震破裂过程的资料分析和地震震源参数的测定、地震破裂力学和震源物理的实验研究等五个方面对此加以概要地介绍。

一、地震震源机制和构造应力场

地震 P 波初动资料仍广泛地被运用于地震震源机制和构造应力场的研究中⁽¹⁻⁶⁾。利用 1976 年 7 月 28 日至 1979 年 12 月 31 日唐山地震序列中所有 $M_s > 4.0$ 地震的初动资料得到的 167 次地震的断层面解,显示了唐山地震序列的应力释放—调整过程,表明了唐山地区构造应力场的周围环境因素没有因为发生唐山 M_s 7 级地震而改变⁽¹⁾。不同类型地震序列在震源机制上的差异亦通过分析我国 14 次地震序列的主要地震的断层面解得到了研究⁽²⁾。文献[3—5]的作者对利用地震节面解推断地壳应力场的现行的分析方法作了一些改进,并将该方法运用于华北地区、唐山地震余震区和东北、华中、华南地区的地震构造应力场的统计推断,认为控制地震活动差异的主要因素可能是构造差异而不是力场的差异。对于诸如福建、台湾地震的震源机制资料,也进行了较系统的汇集和修订工作⁽⁶⁾。

本文1987年9月18日收到。

二、地震破裂过程的资料分析和地震震源参数的测定

1966年邢台 M_S 7.2级地震之前的 $M_S > 4.6$ 地震的破裂方向和地震活动的时空分布图象,被用于探讨该地震之前在地震破裂方向上的可能的障碍体⁽⁷⁾。强震破裂过程与地震活动的关系,通过研究发生于鲜水河断裂带上的强震的震源机制、破裂过程、余震分布、地震迁移和地震的宏观现象而得到了探讨⁽⁸⁾。一些作者运用 P 波形资料⁽⁹⁾、广义瑞利波方向性函数⁽¹⁰⁾和地震波的频谱⁽¹¹⁾,分析了一些大地震的破裂过程,确定了地震的震源参数。在广东新丰江水库区的小震震源的研究中,运用了小震震源参数和震源机制的联合测定法⁽¹²⁾。地震应力降的意义及其与实验室内岩石粘滑及脆性破裂的应力降的关系,在文献[8]中亦作了分析。

三、地震孕育过程和地震前兆机制

文献[14]的作者从地震发生的断层成因说出发,运用三维应力圆和纳维-库仑强度理论,提出了一种定性描述孕育地震过程的应力图象,并用于估计地震危险性的增减,说明地震前兆异常的多样性。文献[15]的作者对异性介质内嵌椭圆在远场应力作用下的应力场公式作了修正,并提出了关于孕震过程的包体总崩溃理论。许多作者对于孕震过程中重力和倾斜负荷潮的变化、震前断层滑动中倾斜和水平的变化、重力的变化以及伴随断层蠕动传播的准静态变形等问题,从理论上进行了探讨^(16—22)。为避免断层边缘的应力奇异性,文献[23]的作者采取了特殊的处理方法,估算了三维地震位错模式的地震压磁效应,指出压磁场是一种微弱的场,观测这种弱场的变化比以往所预期的要困难得多。

震前地温增高等特殊现象日益为许多研究者所重视。地热变化与地震孕育的关系已有一些探索性的工作^(24—26),例如用有限单元法计算含断层地块因温度变化引起的破裂危险性⁽²⁴⁾,用线弹性断裂力学分析裂纹前沿周围的热应力和应力强度因子的分布特征及其与介质性质的关系⁽²⁵⁾,而文献[26]的作者则从应力场角度分析了1976年唐山地震发生的可能力源,指出震前唐山地区受到附近的热力源的作用,并指出华北地区近年发生的几个大地震,如邢台、河间、渤海、海城地震以及1937年发生的山东菏泽地震均位于热应力高值地带,表明了这些地震的孕育和发生与热力源作用的关系。

四、地震破裂力学

为研究地震系列的特性,文献[27—29]的作者分析了具有滑动弱化区的静态剪切裂纹的平衡问题,推广了计算有效剪切破裂能的公式以计及滑动弱化区尺度的效应⁽²⁷⁾;同时研究了具有滑动弱化区的剪切裂纹在标准线性粘弹性介质中的准静态扩展⁽²⁸⁾;当把地震系列模拟为剪切裂纹在非均匀应力作用下在粘弹性介质中的复杂扩展过程时,可以解释地震序列的多样性、震前蠕动、无震滑动等现象⁽²⁹⁾。震源参数的经验关系也通过滑动弱化模式予以分析⁽³⁰⁾。运用变形体力学的方法,也探讨了断裂带内介质的软化特性和地震的非稳定模型,澄清了地震力学中的某些概念⁽³¹⁾。还通过分析平面剪切裂纹的失稳扩展与

缓慢蠕裂的关系,阐述了孕震过程中震源应力场的演变过程及与其相应的前兆变化⁽³²⁾。对于地震前短期和临震阶段孕震断裂的预扩展(亚稳态扩展)以及震前产生长周期波的可能性及其传播特性亦作了分析⁽³³⁾。突变理论在地震研究中得到了应用⁽³⁴⁾。运用一个简化的岩体系统的突变理论模型,文献[34]的作者定量地描述了引起运动失稳的应力条件,探讨了小量级的垂直应力的变化触发高震级地震的可能性。

在简化了的二维力学模型的基础上,文献[35]的作者提出了一个三维力学模型,在理论上进一步分析了唐山地震的破裂过程,解释了较大余震多数发生在主断裂两端并与主断裂偏离 80° 左右的扩展分支上的观测事实。为研究地震的动态破裂过程,文献[36]的作者提出了求解二维反平面剪切裂纹自然扩展过程的数值方法,计算并分析了应力降和内聚模量的非均匀性对地震断层的自然扩展、收缩、停止和愈合的控制作用,以及复杂的破裂过程和愈合过程对地震辐射的影响。类似问题也用有限差分法作了模拟计算⁽³⁷⁾。

五、震源物理的实验研究

为研究应力途径对岩石力学性质的影响,用真三轴试验机对砂岩的岩石力学性质作了实验⁽³⁸⁾,通过单独减小最小主应力和单独改变中等主应力引起的岩石破坏,表明了岩石破坏实验中增大最大主应力与减小最小主应力时中等主应力的效应是一致的,探讨了中等主应力变化引起地震⁽³⁹⁾、甚至应力减小引起地震⁽⁴⁰⁾的可能性。平面应力状态下单轴压缩加载过程中岩石变形的局部化现象通过光弹贴片法、声发射技术和电视录像等方法进行了观测⁽⁴¹⁾。

地震的发生与活动断层有密切的关系,而断层泥对断层运动有重要的影响,因此,断层泥力学性质的实验研究受到一些研究者的重视。作为对红河断裂综合研究的一个方面,在高压条件下对红河断裂带、小江断裂带等五条大断裂带上的断层泥的基本力学性质进行了实验测定,包括断层泥的体积压缩模量、杨氏模量、泊松比、单轴抗压强度、粘滞系数、单轴抗剪强度、弹性波速等基本力学参数^(42—46)。还对红河断裂南段与北段断层泥力学性质的差异进行了对比⁽⁴²⁾,对含水量对断层泥力学性质的影响作了分析⁽⁴⁵⁾。对于华北地区九种典型岩石的密度和弹性波速度随压力的变化关系,亦利用高压三轴容器在10kbar压力下进行了测定⁽⁴⁶⁾。对影响波速异常的两种因素——应力途径和断层的存在——也利用超声脉冲法对完整岩石样品和拼合样品进行了测量⁽⁴⁷⁾。对温度变化对岩石的弹性波速和声发射的影响,也开展了初步的实验研究⁽⁴⁸⁾。文献[49]的作者用显微镜对三轴实验后花岗岩样品内部的微破裂进行了观测,认为脆性岩石体积膨胀的各向异性效应是由微破裂的各向异性引起的,并对上述效应的微观机制作了解释。

文献[50]的作者进行了不同的压力、温度和孔隙压力下不同断层泥标本的强度试验。结果表明,碎屑型断层泥对压力很敏感,对温度无反应,对孔隙压力的反应符合有效压力定律。粘土类断层泥则对温度和孔隙压有明显的响应。

地震的发生与地磁变化关系的研究并不限于观测和理论研究,在实验室中也对强磁性岩石标本在破坏前后的磁化率变化特征进行了研究⁽⁵¹⁾。磁化率的变化只是其应力值的函数,与体积变化过程、微裂膨胀过程关系甚微。

为解释作为一种地震前兆的震前地电阻率的异常变化,对单轴压缩下多裂隙含水岩样

在轴向和径向的电阻率变化进行了实验研究,得到了含水岩样在膨胀阶段电阻率升高的实验结果⁽⁵²⁾。在1.2kbar围压下进行饱和岩样的压缩实验表明,含水岩样膨胀后电阻率下降主要是由于表面电导作用增强的结果⁽⁵³⁾。

为了探索震源体在临震阶段及发震时产生电磁脉冲信号的可能性,利用花岗岩洞的爆破实验⁽⁵⁴⁾和大型的人工地下爆破试验,用记录电磁波异常的仪器装置,记录到了花岗岩破裂过程中的电磁脉冲信号和爆炸时产生的电磁脉冲^(54,55)。

岩石的突然破裂和沿原有断层面的粘滑,是浅源地震的可能机制。在高压或高温高压条件下,利用单轴或三轴装置开展了许多岩石破裂实验,从微观机制上探讨地震的成因和可能出现的地震前兆。文献[56]的作者用激光全息干涉法,观测了单轴压缩下大理石岩样表面的变形位移场和裂隙的发展过程。文献[57—59]的作者则根据高温高压下三轴压缩实验的结果,提出岩石的剪切破裂和摩擦滑动都各有渐进和突发两种方式。文献[60—64]的作者则在高围压下对含有切口的岩石试件进行了破裂过程和摩擦滑动特征的实验研究,指出张裂纹扩展长度受到围压的控制,岩石的切口结构和岩性变化对破裂迹线的空间展布和主破坏机制有重要影响。在岩石力学实验中也采用了声发射技术,系统地观测不同雁行式断层变形失稳的时空动态过程及“人”字形断层的声发射特征^(65,66),对于断层交汇区附近的变形特点和声发射特点也取得了一些实验结果⁽⁶⁷⁾。

在实验研究中,已有一些作者对岩石剪切破裂能、断裂韧性开始加以研究^(68,69);对于近年来研究较多的 b 值模拟实验亦有了比较系统的总结⁽⁷⁰⁾。

参 考 文 献

- (1) 李钦祖、刁桂苓、戴英华,唐山地震序列的应力释放调整过程,地球物理学报, 26, 224—236, 1983。
- (2) 刘蒲雄、黄德瑜、杨慧源、张立明,地震类型与震源机制,地球物理学报, 26, 237—248, 1983。
- (3) 许忠淮、阎明、赵仲和,由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向,地震学报, 5, 268—279, 1983。
- (4) 汪素云、许忠淮,中国东部大陆的地震构造应力场,地震学报, 7, 17—32, 1985。
- (5) 许忠淮,用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场,地震学报, 7, 349—362, 1985。
- (6) 卓秀榕、陈光树,闽台震源机制和区域应力场,地震学报, 5, 397—411, 1983。
- (7) 刘万琴,1966年邢台地区7.2级地震前地震破裂方向上的可能障碍物,地震学报, 5, 116—125, 1983。
- (8) 林邦慧、陈天长、潘晓红、刘万琴、彭美宜、张卫平,鲜水河断裂带强震的破裂过程与地震活动,地震学报, 8, 1—20, 1986。
- (9) 束沛楹、李幼铭、铁安、姚振兴,利用远震 P 波波型反演渤海地震的震源参数,地球物理学报, 26, 31—38, 1983。
- (10) 刘万琴,一些地震的震源参数的研究,地震学报, 6, 增刊, 544—557, 1984。
- (11) 成尔林、林邦慧、庞明虎、李桂芳,1981年1月24日道孚6.9级地震的震源参数,地球物理学报, 26, 140—148, 1983。
- (12) 周克森,小震震源参数与震源机制的联合测定,地震学报, 7, 237—253, 1985。
- (13) 臧绍先,地震应力降与岩石破裂应力降,地震学报, 6, 182—194, 1984。
- (14) 王文镜,孕震过程的应力图象和前兆异常,地震学报, 6, 425—428, 1984。
- (15) 蔡乃成、刘文泰,地震孕育的包体总崩溃理论(一)——异性介质内嵌椭圆的应力场,地震学报, 6, 429—439, 1984。

- (16) 毛伟建, 孕震过程中重力和倾斜负荷潮的变化, 地震学报, 6, 241—248, 1984。
- (17) 李兴才, 唐山地震前的断层滑动及有关的倾斜和水位变化, 地震学报, 5, 73—78, 1983。
- (18) 沃尔什, J B, 黄庭芳, 粘弹性半空间断层活动的重力效应(讨论), 地震学报, 5, 169—171, 1983。
- (19) 张超, 压扭性断裂的震前应力场与地应力变化异常, 地震学报, 5, 185—194, 1983。
- (20) 张超, 伴随断层蠕动传播的准静态变形——模型理论分析及唐山地震前孕震断裂运动过程的讨论, 地震学报, 6, 29—40, 1984。
- (21) 张超, 过家元, 谢新生, 陈连旺, 鲜水河断裂带上两次强震之间的断层蠕滑及其传播特征的模型研究, 地震学报, 8, 229—239, 1986。
- (22) 黄福明, 王廷福, 多段断层均匀滑动的应力分布特征, 地球物理学报, 26, 增刊, 678—692, 1983。
- (23) 郝锦绮, Hastie, L M, Stacey, F D, 三维位错模式的地震压磁效应, 地震学报, 6, 增刊, 558—573, 1984。
- (24) 许寿椿, 李海王, 含断层地块因温度变化引起的破裂危险, 地球物理学报, 26, 94—97, 1983。
- (25) 安镇文, 朱传镇, 地热与地震关系的研究(一)——弹性介质椭圆盘状裂纹尖端附近的热应力分布, 地震学报, 6, 211—222, 1984。
- (26) 张之立, 唐山地震热热源的研究, 地震学报, 7, 45—56, 1985。
- (27) Chen, Y T, and Knopoff, L, Static shear crack with a zone of slip — weakening, *Geophys J R astr Soc* 87, 1005—1024, 1986
- (28) Chen, Y T, and Knopoff, L, The quasistatic extension of a shear crack in a viscoelastic medium, *Geophys J R astr Soc* 87, 1025—1039, 1986
- (29) Chen, Y T, and Knopoff, L, Simulation of earthquake sequences, *Geophys J R astr Soc* 91, 693—709, 1987
- (30) Niu, Z R, Estimates of fracture parameters of earthquakes, *Pure and Appl Geophys* 122, 645—661, 1984 / 1985
- (31) 殷有泉, 张宏, 断裂带内介质的软化特性和地震的非稳定模型, 地震学报, 6, 135—145, 1984。
- (32) 庄昆元, 沈建文, 失稳破裂与蠕裂, 地球物理学报, 26, 增刊, 668—677, 1983。
- (33) 潘琴龙, 冯德益, 孕震断裂的预扩展(亚稳态扩展)及震前长周期波的探讨, 地球物理学报, 26, 增刊, 693—700, 1983。
- (34) 康仲远, 岩体准静态运动失稳的Cusp型突变模型, 地震学报, 6, 352—361, 1984。
- (35) 张之立, 唐山地震破裂过程的三维分析, 地震学报, 6, 22—28, 1984。
- (36) Chen, Y T, Chen, X F, and Knopoff, L, Spontaneous growth and autonomous contraction of a two-dimensional earthquake fault *Tectonophysics*, 144, 5—17, 1987
- (37) 余洋, 梅世蓉, 庄灿涛, 模拟震源动力学破裂过程的数值方法研究, 地球物理学报, 29, 567—577, 1986。
- (38) 耿乃光, 许东俊, 应力途径对砂岩力学性质的影响, 地球物理学报, 26, 401—403, 1983。
- (39) 许东俊, 耿乃光, 中等主应力变化引起的岩石破坏与地震, 地震学报, 6, 159—166, 1984。
- (40) 耿乃光, 应力减小引起地震, 地震学报, 7, 445—451, 1985。
- (41) 郑捷, 姚孝新, 陈颀, 岩石变形局部化的实验研究, 地球物理学报, 26, 554—563, 1983。
- (42) 陈颀, 姚孝新, 耿乃光, 红河断裂带断层泥基本力学性质的初步研究, 地震学报, 7, 91—99, 1985。
- (43) 耿乃光, 姚孝新, 陈颀, 小江断裂带断层泥的基本力学性质, 地震研究, 8, 495—503, 1985。
- (44) 耿乃光, 姚孝新, 陈颀, 中国五条断裂带断层泥力学性质的初步研究, 中国地震, 1, 4, 60—65, 1985。
- (45) 耿乃光, 郝晋昇, 李纪汉, 刘晓红, 蔡戴恩, 方亚如, 断层泥力学性质与含水量关系初探, 地震地质, 8, 3, 56—60, 1986。
- (46) 郝晋昇, 刘晓红, 李纪汉, 华北地区典型岩石在1万巴压力下的密度和弹性波速度的实验研究, 地震学报, 7,

276—284, 1985.

- (47) 刘晓红、赖德伦, 影响波速异常的因素, 地震学报, 8, 50—56, 1986.
- (48) 李纪汉、刘晓红、郝晋昇, 温度对岩石的弹性波速和声发射的影响, 地震学报, 8, 293—300, 1986.
- (49) 姚孝新、耿乃光、许东俊, 两类三轴实验花岗岩的微破裂对比研究, 地震学报, 6, 455—458, 1984.
- (50) 马 瑾、Moore, D.E., Summers, R., and Byerlee, J.D., 温度、压力、孔隙压力对断层泥强度及滑动性质的影响, 地震地质, 7, 1, 15—24, 1985.
- (51) 高龙生、李松林, 单轴应力作用下两种不同方法研究岩石磁化变化的结果, 地震学报, 7, 285—299, 1985.
- (52) 金 耀、张天中、华正兴、徐明发、黄平章, 单轴压缩下多裂隙含水岩样电阻率变化与体积应变, 地震学报, 5, 99—106, 1983.
- (53) 张天中、华正兴、徐明发, 1.2千巴围压下岩样破裂和摩擦滑动过程中电阻率变化, 地震学报, 7, 428—433, 1985.
- (54) 钱书清、张以勤、曹惠馨, 花岗岩洞爆破时伴随岩石破裂的电磁辐射, 地球物理学报, 26, 增刊, 887—893, 1983.
- (55) 钱书清、张以勤、曹惠馨、吕 智, 岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究, 地震学报, 8, 301—308, 1986.
- (56) 王 仁、赵豫生、陈 颢、阎 红, 大理岩试件中裂缝的逆向共轭剪破裂, 地震学报, 8, 191—196, 1986.
- (57) 王绳祖、张 流, 剪切破裂与粘滑——浅源强震机制的研究, 地震地质, 6, 2, 63—72, 1984.
- (58) 王绳祖、施良琪, 岩石错动面凹凸不平及两种突发失稳, 地震地质, 7, 3, 73—80, 1985.
- (59) 王绳祖、施良琪、张 流, 震源错动带端部的刚度效应, 西北地震学报, 7, 1, 20—28, 1985.
- (60) 李建国、吴秀泉、张渤涛、刘天昌, 在围压条件下切口岩石破裂过程的实验研究, 地震地质, 6, 2, 75—80, 1984.
- (61) 张渤涛、李建国、刘天昌、吴秀泉, 在围压条件下结构岩体模型应力、应变关系的实验研究, 地震地质, 6, 3, 39—48, 1984.
- (62) 李建国、张渤涛、吴秀泉、刘天昌, 花岗闪长岩切面在0.7—3.2 kb围压下的摩擦滑动特征, 地震科学研究, 5, 1—4, 1984.
- (63) 李建国、张渤涛、吴秀泉、刘天昌, 花岗闪长岩切面在70—320兆帕围压下的摩擦滑动特征, 现代地壳运动研究, 2, 100—105, 地震出版社, 1986.
- (64) 张渤涛、刘天昌、吴秀泉、李建国, 粘滑应力降的实验研究, 现代地壳运动研究, 2, 106—112, 地震出版社, 1986.
- (65) 刘力强、马 瑾、吴秀泉, 雁行式断层变形与失稳过程的实验研究, 地震学报, 4, 393—403, 1986.
- (66) 杜异军、马 瑾, “人”字式断层声发射 b 值及震级—频度关系的物理意义, 地震地质, 8, 2, 1—20, 1986.
- (67) 马 瑾、张渤涛、许秀琴、王宝生, 断层交汇区附近的变形特点与声发射特点的实验研究, 地震学报, 5, 195—206, 1983.
- (68) 许昭永、包 峰、李忠富, 裂缝尺度对剪切破裂能的影响, 地震学报, 6, 362—368, 1984.
- (69) 韩德华、姚孝新、陈 颢, 用双扭方法研究岩石的断裂韧性, 地震学报, 5, 207—216, 1983.
- (70) 耿乃光, b 值模拟实验的进展和我国 b 值模拟实验的开端, 地震学报, 8, 330—333, 1986.

ADVANCE ON STUDIES OF PHYSICS OF THE EARTHQUAKE SOURCE IN CHINA

Chen Yun-tai

(Institute of Geophysics State Seismological Bureau Beijing)

Abstract

This paper reviews the progress on studies of physics of the earthquake foci in China during the period of 1983—1987, with special emphasis on the focal mechanism and tectonic stress field, seismogenic process and earthquake precursor, data analysis of earthquake rupture process and determination of seismic source parameters, mechanics of earthquake rupture and laboratory experiment on physics of seismic source

Key words Physics of earthquake source, Tectonic stress field, Mechanism of earthquake foci, Earthquake precursors

中国的应力、应变及地球动力研究

高龙生

(国家地震局地球物理研究所, 北京)

摘 要

本文简介了近年来基于应力应变资料来分析中国地区的地球动力学问题的研究进展。从有关地质研究报告中可以注意到两个重要的有吸引力的中心思想: 中国大陆的统一应力场及若干区域内构造运动的张性特征。从历史大地震的记载资料可看出, 最近数千年来华北地区的大地震和现代资料所给出的统一应力场是相一致的, 因此可认为造成中国地震的发震应力场是长期恒定而又规则的, 只是在大地震后一个短暂时期内, 震中附近的小震震源机制呈不很规则的图象。此不规则期持续不久, 然后又回归到一个规则状态之中。

应力应变的张性特征主要是来自大地测量及地质资料。根据张性特征分析则有很多关于裂谷问题的讨论。

关键词 中国, 统一应力场, 区域构造运动的张性特征。

近年来, 在中国构造的动力学研究中有两个特征性的课题吸引着地球物理学家的注意: 在中国大陆上的统一应力场图象和若干区域构造运动的张性特征。但这两个主题是混杂在大量的第一手资料分析及不同思路的不同结论之中的。

一、中国大陆上的统一应力场图象

自 70 年代在中国进行系统的大地震的震源机制研究以来, 从板块碰撞的角度来解释这些震源机制的结果的学者, 至少有两个观点: 一种认为中国的应力场是由周围所有的板块, 诸如太平洋板块、菲律宾海板块和印度板块, 从各方面共同向内推挤而形成⁽¹⁾; 另一种观点仅用印度板块向北推挤来解释⁽²⁾。基于第一种观点, 曾假设了各板块对中国大陆有不同程度的挤压, 并进行了有限元分析⁽³⁾, 它说明印度板块向北的推挤是诸因素中的主要因素。

在华北, 历史上大地震的等震线具有两个优势方向: 它们的长轴集中分布在 $N25^{\circ}E$ 和 $N65^{\circ}W$, 这是一组互相垂直的共轭线, 表明最近数千年来华北地区的大地震几乎是在完全相同的构造应力场中进行的⁽⁴⁾。利用小地震的初动方向来分析中国的应力场也表现出其规则图象。如把研究区域分割成若干子区域, 并对每个子区域的小地震作综合的震源机制解, 大量小地震的统计结果表明, 上述的由大地震求出的华北之规则的应力场特征

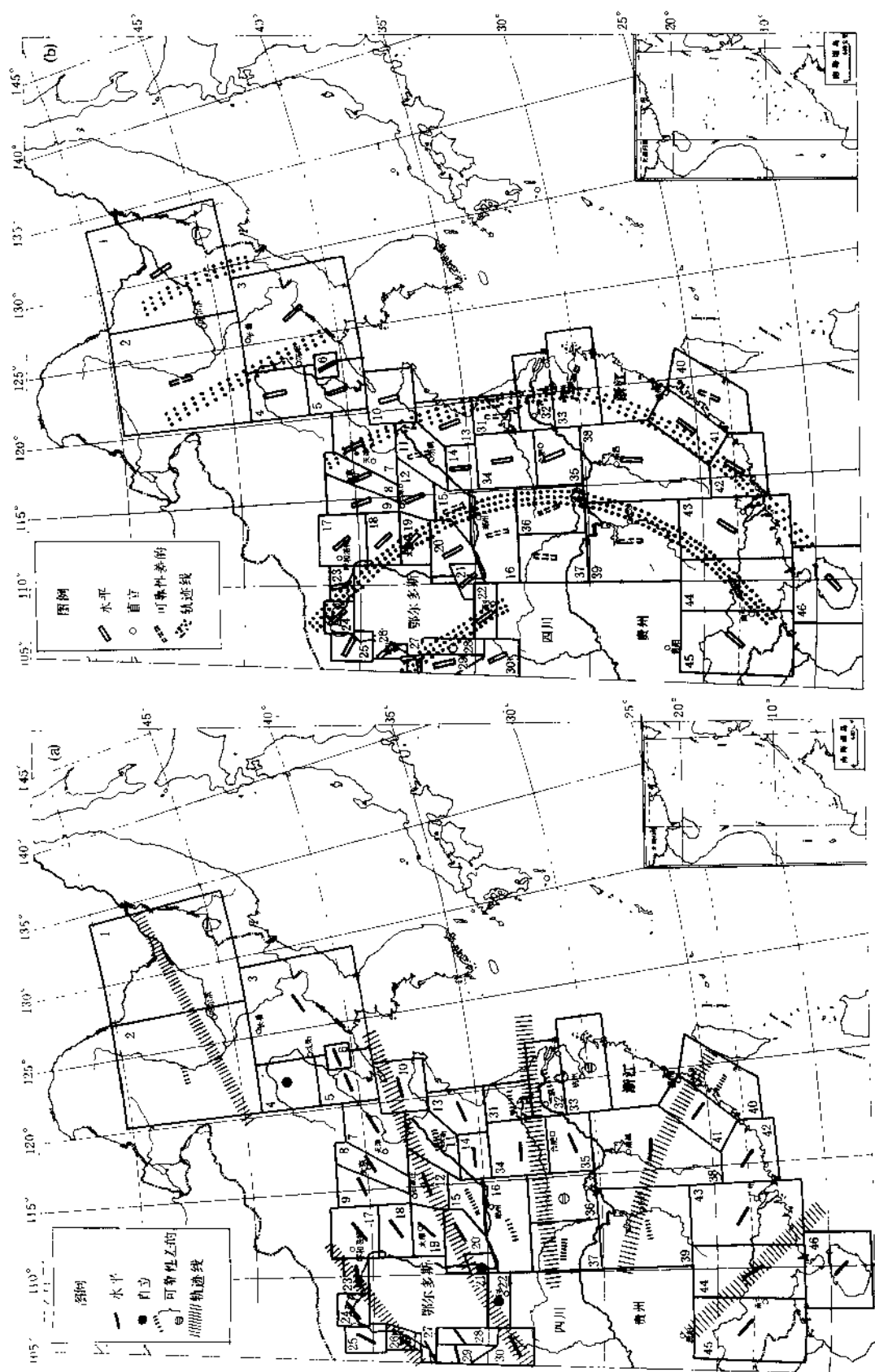


图 1 中国东部 P 和 T 轴的轨迹线

同样也体现在小地震的震源机制上,汪素云和许忠淮等人的工作表明在整个中国东部地区应力方向具有很规则的图象^[5,6]。主压应力轴的水平投影具有整体性的轨迹,近似地呈辐射状(图1)。将此种方法延伸到中国的西南地区^[7],也大体符合上述图象。已发表的一些局部地区,如四川、安徽地区^[8,9]的震源机制的详细研究,均可归纳到中国大陆的统一应力场之中。

除了应用震源机制的分析来研究应力场外,原地应力的测量工作亦正在进行之中,逐渐积累起来的资料已开始给出一些有意义的结果。

李方全和刘光勋总结了一部分原地应力测量结果^[10],他们提出在华北地区,太行山是一个重要界线,其两侧应力场的状况很不相同。太行山以东,主压应力轴近乎东西;而在太行山以西,主压应力轴则变为北南。此结果是根据50m以上的浅部应力解除的实测结果,它和前述综合震源机制解所给出的结果不完全一致。根据现已取得的原地应力实测资料来看,除唐山地区以外,实测水平主应力的方向随深度变化很小;而在唐山地区,情况较特殊,不仅在方向上,而且在应力大小上,150m以上和以下是很不一样的。

刘建中和李自强^[11]以及丁健民^[12]分析了华北地区由油田所搜集到的水压致裂资料。刘建中等根据华北一些地区在深度 Z 实测的最小主应力 S_h 小于垂向应力 S_z (估计由上覆岩层的重量引起)的泊松效应所引起的应力,即 $S_h < \frac{\nu}{1-\nu} S_z$,其中 ν 为泊松比,因而推想在华北的构造活动中存在某些张性特征。但上述关系仅为浅部结果:在京津唐 Z 为300m,在惠民地区 Z 为500m。他们进一步假设唐山大地震可能是由于最小有效水平主应力的减少所引起。

陈家庚和高龙生^[13]分析了已公布的一些水压致裂的应力数据,根据已取得的水平主应力随深度变化的梯度,加上不同地区的高程校正,对比了全国各处在海平面以下4000m深度处的最大水平主应力的值。结果表明,最大水平主应力自西向东逐渐降低:距离欧亚板块和印度板块的边界愈远,应力值就愈低。此结果支持中国构造动力主要来自中国西南部的思想(见图2)。

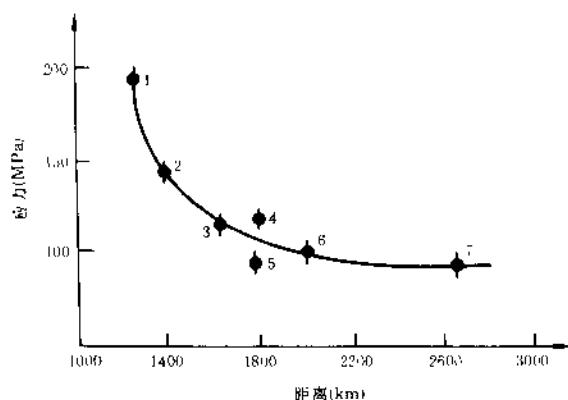


图2 中国大陆上最大水平主应力值
与测点对拉萨间距离的关系^[13]

丁国瑜和卢演传总结了百余个观察段上的活断层的平均滑移速率资料^[14]指出:我国大陆内可分成若干块体,如图3所示,以南北地震带(约 104°E)为界,西部块体边界上的平均水平滑动速率一般为 $5-10\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,块体内通常为 $1-3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 或更小些;东部各块体边界上的通常为 $1-4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,块体内则往往小于 $0.5-1.0\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。丁还指出^[15],中国东部断层的主要类型为正断层或张性走滑,而西部则为走滑或逆冲。

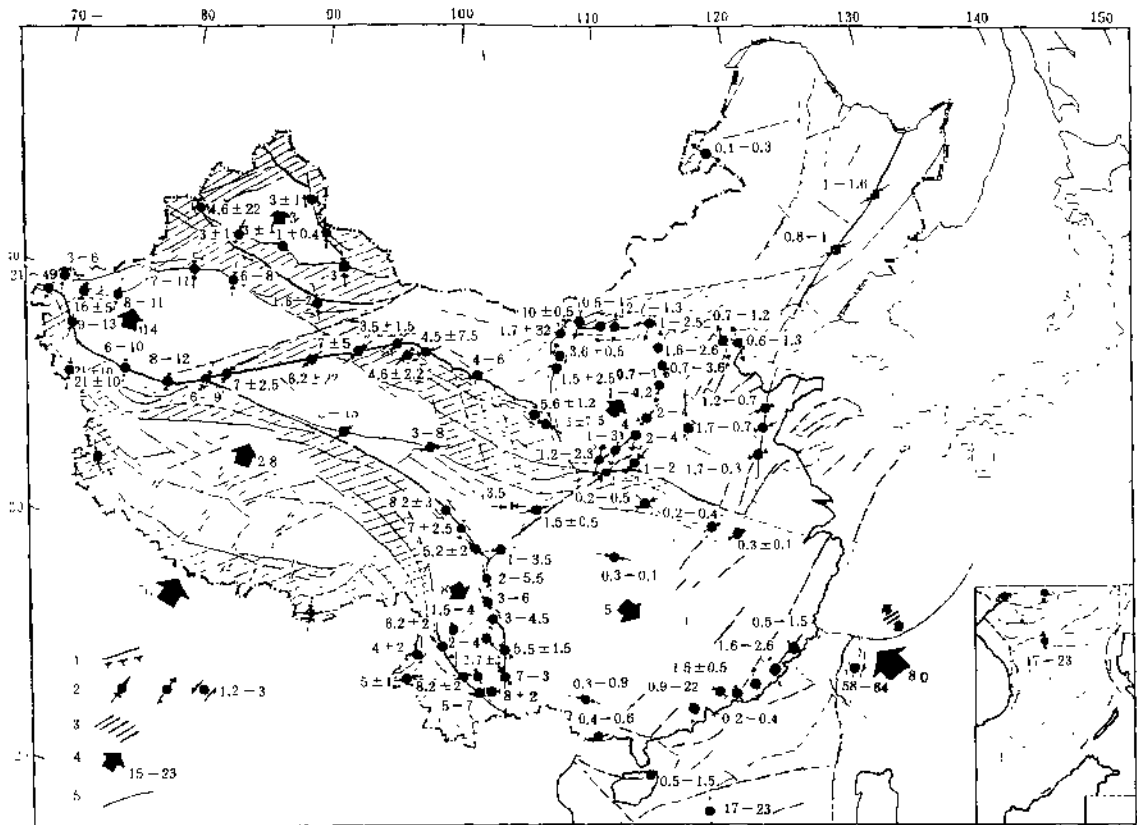


图3·中国活断层平均水平滑动速率分布图

1. 活断层; 2. 活断层平均水平滑动速率(水平投影值 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)及方向, 逆冲、引张及走滑;
3. 褶皱带(新造山带); 4. 褶皱带及块体运动方向及滑动速率; 5. 主要块体边界。

卫星重力资料的分析有助于理解中国地震及构造活动的可能根源。假设岩石圈平均厚度为 100km, 黄培华和傅容珊⁽¹⁶⁾ 给出了中国的地幔对流图象, 如图 4 所示。此图显示了地幔对流的流向有一个重要的变化带, 它位于中国中部, $100^{\circ}-105^{\circ}\text{E}$ 的地区, 该处是一个原型剪切带, 即中国西部的泰提斯—喜马拉雅带和中国东部滨太平洋构造单元的地质构造边界。此种岩石圈以下的剪切带是与南北地震带相对应的, 而南北地震带则可看作是存在于地壳上部的断裂系统。

基于卫星重力资料以及应力集中方面的考虑, H.S.Liu⁽¹⁷⁾ 提出了解释唐山大地震的一种发震模型。此模型考虑华北的北东方向的压应力和北北西方向的张应力系由地幔对流产生, 它有别于构造应力系由约 3000 km 以外的印度—欧亚板块间的碰撞所产生的理论。可以看出, 目前至少有两种传导应力的思想: 一种是通过岩石圈板块; 另一种是上地幔中的对流拖带, 把应力经下地壳传递到上地壳。上地壳被看作是板内地震的发震层, 此层大体浅于 20—25 km。考虑到下地壳是无震层, 作为一个流变层而很可能无法传递较高的剪切应力。因此, 上述两种传递应力的思想都分别遇到不同的困难: 一个是怎样越过数千公里的远距离, 一个是怎样越过无震的蠕变层。

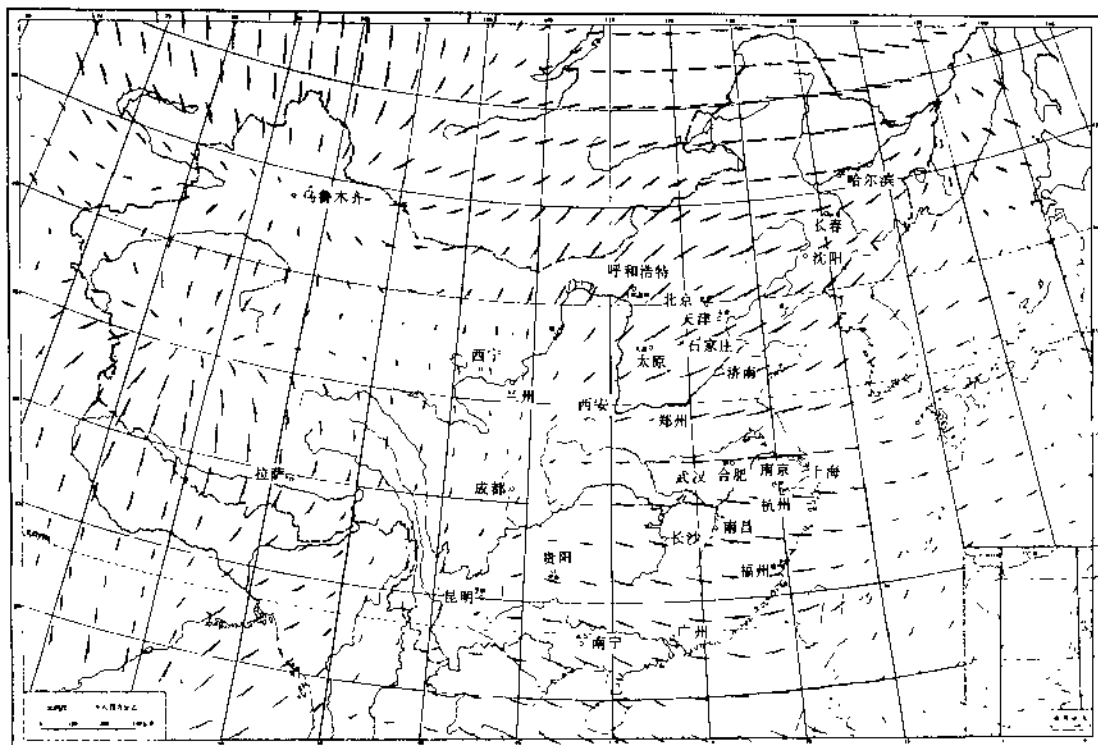


图4 中国岩石圈下的地幔对流图象^[16]

二、 区域性应力应变的张性特征

与应力测量工作同时进行的有地表之形变测量。在华北，渤海湾的海湾区，现代构造变形主要是在北北东、北东和东西方向上的构造上进行的^[18]。实测的水平形变资料表明，本区是以张性应变为主。海城地震区、唐山地震区以及辽东半岛与胶东半岛之间的渤海地区均显示上述特征。这种形变是比较一系列大震后与大震前的实测资料得到的，因此它反映了长时间的应变积累过程后由大地震所导致的应变释放；且系本区构造活动的基本的和持续的特征。

华北区的垂直运动由第四纪以来的继承性运动所控制：整个的辽东半岛在上升，山东半岛向渤海方向倾斜。沿着海湾区，由辽宁西部到河北东部在显著上升；而辽宁东部和莱州半岛则正在下沉。整个的渤海是在持续的下沉。

近年来中国的地质学家发表了一系列文章讨论中国的裂谷问题。近4年来讨论得较多的是华北裂谷^[19]和位于南北地震带上的攀西裂谷。华北裂谷有可能和华北地区的大地震有关，而此区由于其高人口密度而使地震危险性问题的备受关注。中生代开始的华北地区的扩张是整个中国东部断裂运动的一个部分，大兴安岭—太行山—武陵山一线是一个分界：此线以西为沉降区，而此线以东为上升区^[20]。

高名修⁽²¹⁾把震源机制所给出的 T 轴作为张性应力轴的方向,指出本区最大的张伸作用是在北西—南东方向;徐杰⁽²²⁾分析了华北平原自新生代以来的运动过程及其演化,根据一系列地质学证据估计出本区近6000万年来伸张形变达10—20%。周玖和黄修武从另一角度来认识华北应力场⁽²³⁾。他们认为由于地壳厚度(包括高程上)的差别,在华北存在着由南西往北东方向的、由地壳物质重力作用形成的水平扩展作用力。

考虑到在唐山地区有18%的地震是发生在浅于5 km的上地壳中⁽²⁴⁾,在此深度上已经有一些原地应力实验资料,高龙生指出⁽²⁵⁾本区的实测应力值既不足以使岩石破坏,也不足以使破坏的岩体克服摩擦阻力相互运动。然而,由原地实测应力值所推断出的唐山地震前后的应力差是和由地震波分析或地表大地测量反演所得出的应力降是一致的。若是承认实测出的应力场确实是和地震的发生有关,就有必要对低应力环境下的地震成因予以认真考虑。

三、一些特殊地区的研究

有一些特殊地区受到中国地球物理学家的特殊注意:束沛镛⁽²⁶⁾讨论了印、巴、阿、苏、中之间的边界地域中的喀喇昆仑地区的构造应力场,其地震数据来自一个英、巴、中的联合探测项目,结果表明本区主要为水平压应力,而且方位上变化很小。

卓秀榕分析了福建—台湾地区大地震震源机制所反映的区域应力场⁽²⁷⁾,表明大部分主压应力轴垂直于大断裂带的走向,本区的构造活动与菲律宾海板块有关。

鄂尔多斯地台是一个特殊地质区,该地台被地震活跃带所包围而本身是无震区。有一些工作研究了本区的地球动力特征^(28,29),鄂西地区的应力场分析对长江三峡地区的开发有重要意义⁽³⁰⁾;滇西北是国家地震局的一个地震预报实验场,且与美国有合作项目,近年来已做了不少应力方面的工作^(31,32);同样的,郯庐断裂被看作是地震危险区,也有一些应力场方面的研究⁽³³⁾。

四、与大地震有关的应力变动及其它

中国的地震学家对与大地震有关的应力场的变化十分注意。李钦祖对唐山地震全系列的震源机制进行分析⁽³⁴⁾,结果表明,在主震前地震应力场是一个稳定态(或可称有序态),主震后不久又恢复到一个相近的稳定态,两个应力场的方向大体一致。但是中间有一个紧接着大地震的极端不稳定期。这说明,虽然在大震后曾经历过短暂的应力调整期,但整个区域应力场的主要特征在大地震前后并无变动,因而类似的地震事件还可能在未来重演。阙荣举报告了另一个震例⁽³⁵⁾,在云南龙陵地震后的6个月内, P 波初动的优势方向消失,矛盾符号比高达30%。由此看来,在与大地震有关的应力场变化问题上,区域性特征是很重要的。曹新玲等⁽³⁶⁾认为在唐山地震前,用油田水压致裂的资料计算的原地应力大小曾有明显的变化。这些油井距发震震中仅有百余公里。

在考虑大地震动力的局部特点时,张之立提出唐山地区受热应力的影响⁽³⁷⁾。以渤海湾为中心的高温区及它对沧东断裂产生的温度梯度使得唐山地区成为地下热应力的一个应力集中点。基于模型计算,张提出在高温区的边缘,水平热应力达最高,其数值可达数十MPa。

有些作者使用有限元方法来估计地下应力,例如张小平基于重力和温度效应进行了三维有限元模型计算^[38]。计算中考虑了地壳在三维上的非均一性,得出的结论表明,地壳中压应力占绝对优势,张应力主要存在于板缘和板内的很少几个点上。由计算估计了全球各处应力数值,看来没有超过 500MPa 的地方。

参 考 文 献

- [1] 时振梁、环文林,我国强震活动和板块构造,地质科学,4, 281—293, 1973.
- [2] Molnar, P. and Tapponner, P. Relation of the tectonics of eastern China to the India-Eurasia collision: Application of slip-line field theory to large-scale continental tectonics, *Geology*, 5, 212—216, 1977.
- [3] 汪素云、陈培善,中国及邻近地区现代构造应力场的数值模拟,地球物理学报,23, 35—45, 1980.
- [4] 李钦祖、靳雅敏、于新昌,华北地区的震源机制与地壳应力场,地震学报,4, 55—61, 1982.
- [5] 汪素云、许忠淮,中国东部的地震构造应力场,地震学报,7, 17—32, 1985.
- [6] 许忠淮等,由多个小震推断的华北地区构造应力场的方向,地震学报,5, 268—279, 1983.
- [7] Xu Zhonghuai, Wang Su-yun, Huang Yu-rui, Gao Ai-jia, Direction of mean stress axes in southwestern China deduced from microearthquake data, *Gerlands Beitr. Geophysik*, Leipzig 95, 5, S, 1986.
- [8] 成尔林,四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征,地震学报,3, 231—241, 1981.
- [9] 夏端良,安徽区域地震应力场的分布特征,地震地质,3, 13—22, 1985.
- [10] 李方全、刘光勋,中国现今地应力状态及有关问题,地震学报,8, 156—171, 1986.
- [11] 刘建中、李自强,从水压致裂结果讨论华北地区构造应力场,地震地质,8, 75—81, 1986.
- [12] 丁健民、梁国平、唐山、天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量,地震学报,7, 363—373, 1985.
- [13] 陈家庚、高龙生,原地应力、岩层原地强度及中国大陆之应力场,地震学报,11, 142—152, 1989.
- [14] 丁国瑜、卢演传,对我国现代板内运动状况的初步探讨,科学通报,31, 1412—1415, 1986.
- [15] Ding Guoyu, Recent crustal rupture field in China and the problem of strong earthquake prediction, *J. phys. Earth*, 34, Suppl. S265—S278, 1986.
- [16] Huang Pei-hua and Fu Rong-shan, The mantle convection pattern and force source mechanism of recent tectonic movement in China, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 28, 261—268, 1982.
- [17] Liu Hanshou, Convection-generated stress concentration and seismogenic models of the Tangshan earthquake, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 19, 307—318, 1979.
- [18] 应绍奋、沈永坚、郭良迁,渤海沿岸地区的现代构造运动,中国地震,2, 29—34, 1986.
- [19] 刘国栋,华北平原新生代裂谷系及其深部过程,现代地壳运动研究,1, 国家地震局地质研究所编,地震出版社,1985.
- [20] 马杏垣,中国地质历史过程中的裂陷作用,现代地壳运动研究,1, 国家地震局地质研究所编,地震出版社,1985.
- [21] 高名修,华北块断构造区的现代引张应力场,地震地质,1, 1—12, 1979.
- [22] 徐杰、洪汉净、赵国泽,华北平原新生代裂谷盆地的演化及运动学特征,现代地壳运动研究,1, 国家地震局地质研究所编,地震出版社,1985.
- [23] 周玖、黄修武,华北地壳物质重力水平扩展运动的基本特征,地震地质,7, 13—18, 1985.
- [24] 曾融生等,唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨,地震学报,7, 125—142, 1985.
- [25] Gao Longsheng, The magnitude of stress field and its implication for occurrence of earthquakes in the mainland of China. *Earthquakes Research in China*, English edition, accepted, 1987.

- (26) 束沛镛、林邦佐, 喀喇昆仑地区构造应力场的基本特征, 地球物理学报, 26, 446—458, 1983.
- (27) 卓秀榕, 闽台震源机制和区域应力场, 地震学报, 5, 397—411, 1983.
- (28) 牛志仁、张逸, 鄂尔多斯周邻地区地壳应力场——一个简化的力学模型, 地震学报, 8, 93—98, 1986.
- (29) 薛宏运、郎家全, 鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场, 地球物理学报, 27, 144—152, 1984.
- (30) 李善川, 鄂西江汉地区的现代引张应力场, 地球物理学报, 29, 302—306, 1984.
- (31) 刘光勋、李方全、李桂荣, 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, 1—14, 1986.
- (32) 向宏发等, 滇西北地区的现代构造应力场, 地震地质, 8, 15—23, 1986.
- (33) 许寿椿、朱正, 从应力解除资料反演中国东部郯庐断裂带区域应力场方向, 地震学报, 5, 412—417, 1983.
- (34) 李钦祖、刁桂岑、戴英华, 唐山地震序列的应力释放调整过程, 地球物理学报, 26, 224—236, 1983.
- (35) 阙荣举等, 龙陵地区大地震前后平均应力轴取向的时间变化, 地球物理学报, 26, 564—573, 1983.
- (36) 曹新玲、李自强、刘建中, 唐山地震前后的应力变化, 地震学报, 6, 405—413, 1984.
- (37) 张之立, 唐山地震热力学源的研究, 地震学报, 7, 45—56, 1985.
- (38) 张小平、邵建国, 由三维有限元分析求出的地壳水平应力状态, 地震学报(待发表)。

STRESS, STRAIN AND GEODYNAMICS IN CHINA

Gao Long-Sheng

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing)

Abstract

This article briefs the progress in research on geodynamics in China based on the analyses of stress and strain data obtained in recent years. Relevant works can be summerized into two important attractive ideas: the uniformity of stress field in China mainland and the tensile characteristics in several regions. Large earthquakes recorded in history of thousands of years were under the same stress field as obtained from the analyses of data of the present time. Thus the stress field which controls the occurrences of earthquakes in China can be thought of stable and unitary. After large earthquakes there were short periods which the mechanisms of small earthquakes in the vicinities of epicenters showed a disorder pattern, then the stress field restored to its regular state.

Tensile features of stress and strain in several regions were identified by geodetic data measurements and geologic data. There were active discussions on rifting in China based on these tensile features.

Key words China, Uniformity of stress field, Tensile characteristics in several regions.

地震灾害的减轻与地震预报

朱传镇

(国家地震局地球物理研究所,北京)

摘 要

本文扼要概述自 1983 年第 18 次 IUGG 大会以来,中国在地震预报和地震灾害减轻研究工作中所取得的主要进展。侧重于从地震活动性图象、地震前兆和综合分析方法等方面,探讨了短期地震预报的现状和发展前景,与此同时,简要综述了地震的长期预报、地震区划以及地震对策等问题。

关键词 地震预报, 地震前兆, 地震危险性评定。

中国是一个多地震的国家,特别是世界上板内地震最多的国家。本世纪 60 年代和 70 年代,中国大陆地区发生了一系列强烈地震,1976 年唐山 7.8 级地震,是最突出的一次,使人民的生命财产遭到极大的损失,人们至今记忆犹新。从另一个角度看,这一系列大地震又为大地震工作者认识地震和研究地震预报提供了难得的反复实践的机会,从而推进了中国的地震预报和地震灾害的减免工作。海城和松潘等大地震在不同程度上的预报成功,正是从一个侧面反映了这方面取得的进展。毋庸置疑,现今我们取得的成功是极其有限的,对地震这一复杂的自然现象,认识还十分肤浅,离掌握地震孕育发生规律尚有很大距离。

本文将扼要概述自 1983 年第 18 次 IUGG 大会以来,中国在地震灾害减轻和地震预报研究工作中所取得的主要进展和对今后工作的展望。

一、 近期地震预报

地震预报是减轻地震灾害、采取最佳地震对策的基础,而近期地震预报,系以报出某一次大地震的三要素(地点、时间、强度)为其主要任务,又是使地震预报收到实际经济效益和社会效益的关键,所以历来成为社会广大人民群众关注的中心。

为了使我国地震预报工作建立在更加可靠的观测资料和科学理论的基础上,并提高近期地震预报水平,1983 年以来,在国家地震局统一组织下,对涉及地震、地形变、地下水、水化学、地磁、地电、重力、地应力八个方面的前兆手段,以及综合预报方法进行了

全国系统的清理和研究,内容包括:台址和观测条件,仪器精度和稳定性,干扰的识别,资料的可信度,分析预报方法及其效能。

实现近期预报,主要依赖于对地震前兆现象的认识和运用,即根据震前异常现象的种类数目和异常特征(如幅度大小、持续时间的长短以及空间分布范围等)对地震三要素作出预测。经过对各种观测方法的资料所出现的全部异常进行分析和再研究,加深了我们对地震前兆现象及其在预报上应用的认识。现将取得的主要进展概述如下:

1. 前兆性地震活动的观测与实验研究

(1) 地震活动图象

地震空区是前兆性地震空间分布中最引人注目的图象,尽管目前对空区的认识还不完全清楚,但比较倾向性的看法认为,空区现象确实存在,并具有一定预测地震的能力。近几年来,为寻求客观地勾画和辨别前兆空区的判据,陆远忠等^[1](1983)提出两条半定量标准:(a)随着前兆空区的形成,空区邻近区域的地震应变释放明显加速;(b)前兆空区内外,地震频度之比随时间进程应出现极大值。按此条件,统计了1970年以来中国大陆地区23次 $M>6.0$ 的地震,发现有96%的地震在1—10年前均出现空区。他们还研究了正问题,即根据不同时间窗和起算震级,在一定区域内,用计算机作出震中分布图。先是直觉勾画出地震空区,再用判据(a)、(b)筛选出前兆空区,结果表明这样做能够大大减少在勾画前兆空区上的任意性。据统计,按此方法,华北地区发生的5次六级左右地震(1970—1982)均可报出,报准率为21%,但虚报率仍达79%。

此外,为研究空区的出现是否带有随机性,做了随机点模拟的震中分布图,发现当随机点数较少时,形成假空区的可能性较大。但如对比空区内外频数,则随机地震较平稳,而天然地震的频数比有较显著的涨落。

总的来说,空区与大地震不是一一对应的关系,空区出现与否,与构造环境、地震类型的关系不大。在判定空区时应进行严格检验,排除由地震个数不足造成的假空区,这样空区可提出一定程度的前兆信息。

地震条带是另一个具有一定前兆意义的空间分布图象,据统计,1970—1983年华北地区可勾画出地震条带25次,其中有16次对应强地震。大震的条带长度较稳定,一般在500km左右。不随震级变化(刘蒲雄^[2],1984)。值得注意的是,大震前条带(或共扼条带)的出现常与大范围地震活动的平静相伴随,这一点对识别前兆性地震活动条带是十分重要的。

为了定量描述地震活动空间分布的聚散特征,王玮^[3]研究了华北地区小震的空间分布,认为它们服从幂函数分布,即

$$N(k) = A / (1 + k)^C,$$

$N(k)$ 为有 k 次地震的单位面积数, A 、 C 为常数, C 表征了地震空间分布的集中度, C 愈大,地震空间集中程度愈高。他发现,在华北 $M>6.0$ 地震前半年至一年, C 值经历显著增大的过程,异常持续时间有随未来地震震级的增大而增大的趋势。朱传镇等^[4]基于耗散结构理论的思想,将地震孕育过程作为一个开放系统来考虑,为描述地震空间分布从无序向有序过渡,引进归一化熵值 Q^N 的概念,其定义为