

# 1999~2002 年地震预报研究进展<sup>\*</sup>

张晓东 傅征祥 张永仙 牛安福

黄辅琼 彭克银 卢 军

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

**摘要** 回顾了中国在 1999~2002 年开展地震预测、预报研究的进展, 重点回顾了在此期间利用地震学、形变、电磁、流体和综合 5 类学科方法开展中短期地震预报研究的成果, 以及这些成果在地震预报实践中的探索性应用。

**关键词** 地震预报 地震学 形变 电磁 流体 综合分析

**中图分类号:** P315.75 **文献标识码:** A

## 1 长期地震预测研究

长期地震预测是确定某断层段或某地震带上地震的重复时间, 预测未来几十年内地震发生的概率。长期地震预测广泛地应用于地震学、地质学和大地测量学的非前兆资料, 估计地震重复时间和未来地震发生的概率, 同时, 也应用于长期地震活动性图象(如“空区”)

在时间-震级可预测模型中(Papazachos, 1989), 需要估计地震源或地震带的年地震矩率。邵辉成等(1999)提出应用不同精度和完整性地震资料, 以至古地震的资料去估计地震矩率的方法; 同时, 金学申等(1999)提出使用断层滑动速率估计地震矩率的方法。他们的研究成果应用在时间-震级可预测模型中, 对中国华北和西南地震区作了长期预测。易桂喜和闻学泽(2000)分析了中国西部南北地震带中 39 个孕震区的历史强地震重复发生的特性, 初步构筑了时间-震级可预测的统计模型。研究表明, 该 39 个孕震区中的 5 个区, 在未来 30 年中重复发生的条件概率超过 0.4。

傅征祥等(2001)分析了华北北部张家口—蓬莱地震带历史和近代地震活动的时间过程以及 G-R 震级-频度经验关系, 并应用泊松模型计算了张家口—蓬莱地震带东、西两段上强震在 2010 年前发生的条件概率。

基于 Vere-Jone(1978)提出的原地震应力释放模型, 刘杰等(Liu *et al.*, 1999)发展了地震活动时间依从的随机耦合应力释放模型, 该模型考虑了不同地震亚区之间的地震相互作用和应力转移。模型应用在华北地区 1480~1996 年震级大于 6.0 的历史地震目录分析中, 根据 Akaike 信息判据(AIC), 研究结果表明耦合应力释放模型优于原模型, 证实不同地震亚区之间存在长程相关。

<sup>\*</sup> “十五”国家科技攻关项目《强地震短期预测》课题资助。  
2003-04-14 收到初稿, 2003-06-12 收到修改稿, 2003-06-17 决定采用。

黄福明和易志刚(2000)研究了 1955 年以来中国 31 次强震前中等地震视应变(Wyss, 1970), 结果表明, 地震视应变异常区与未来 1.5 年内强震发生的地点之间存在较好的相关. 黄玮琼和吴宣(2000)研究了中国南北地震带中 5 个亚区中强震发生时间与累积频度之间的关系, 表明它们服从一种指数或幂函数分布, 强震发生的时间间隔在几年至几十年之间变化.

为了研究中国大陆活动断层上地震分段破裂的复发特性, 闻学泽(1999a, b)定量分析了 19 个断层段上的历史地震多重复发的资料. 结果表明, 其中 9 条断层段具有准周期地震复发性质, 12 条断层显示出时间可预测地震复发性质. 由上述二类地震复发性质建立起经验的地震复发间隔分布, 它们都很好服从正态复发间隔, 与环太平洋带的结果(N-B 模型)没有显著的差异. 其研究结果对于中国大陆活动断层长期地震概率预测是重要的.

郭良迁等(2001)描述了中国大陆地壳垂直形变梯度、地震构造与地震活动性之间的关系, 并且在 GIS 平台上, 由中国大陆垂直形变图(1951~1990)得到中国大陆垂直形变梯度分布. 梯度变化可能反映地壳垂直剪切的大小, 1990~1997 年, 一些强地震发生在高梯度带上, 例如 1990 年共和 7.1 级、1996 年丽江 7.0 级、1996 年包头 6.4 级和 1998 年张北 6.2 级等地震. 所以, 垂直形变速度梯度与强震活动关系可能会应用在长期预测中.

UtSu(1977)、Aki(1981)、Kenji 和 Akio(1990)等都曾研究过地震预测的时间概率综合模型. 王晓青等(2000)研究了时空综合概率增益长期地震预测模型, 该模型不仅考虑强震发生与长期前兆异常的时间过程(地震活动性、地壳形变等), 而且考虑地质构造、活动断层表现和地球物理场等的空间异常分布. 该模型已应用在华北长期地震预测中.

## 2 中、短期地震预测研究

### 2.1 地震学在地震预报中的进展

地震学方法是地震中长期预报的基础. 1999~2002 年地震学方法的进展主要体现在对地震触发现象、地震学多种参数、非线性理论与方法及数字化资料应用等方面的研究.

在地震触发现象研究方面, 主要从日月引潮力对地震的触发作用和强震的触发作用两方面进行. 刘桂萍等(1999)研究了日本 1995 年 1 月 17 日兵库县南部 7.2 级大地震触发的区域地震活动时空特征. 结果表明, 1995 年 1 月 17 日兵库县南部 7.2 级主震触发了 10 个子区显著的地震变化, 这些子区中最远的距主震震中约 280 km, 认为区域地震活动触发的可能机制是主震引起的区域应力变化. 傅征祥和刘桂萍(1999)研究了二维粘弹性介质中平行走滑断层的相互力学作用及其对地震活动性的影响. 当一条断层发生滑动, 将导致平行断层面上剪应力减小, 因而可能推迟平行断层发生滑动. 彭克银等(2000)引入中国大陆构造应力场资料, 结合区域构造及断层运动特征, 对走滑断层、正断层和逆断层 3 种断层运动形式, 推导了有效剪应力表达式, 提出了新的加卸载判定. 常克贵和高立新(1999)用加卸载响应比理论为包头西  $M_s 6.4$  地震前加卸载响应比随时间的变化进行了较详细的研究. 结果表明, 震前加卸载响应比有较明显的上升异常. 张晓东和秦保燕(2000)从研究震前大范围的调制比异常出发, 定义调制块比的概念, 并研究了国内的某些震例. 结果表明, 调制块比异常对 7 级以上地震显示为高值异常特点. 另外, 调制块比可反映部分地震前的中期地震活动性异常. 李丽和张国民(2001)分析了台湾及邻近地区地震活动与月相角的关系, 结果显示地震频次高于均值的 2 倍标准偏差的月相角大约与上弦、望及下弦偏离  $50^\circ$ .

黎凯武(2000)研究了 1966~1976 年华北地震的时间特性及其相关触发因素,认为这些地震与地球自转和日月引潮力关系密切。张国民等(2001)探讨了中国大陆  $M_s \geq 7.0$  地震的成组活动和引潮力的调制触发关系。赵根模等(2001)采用 Morishita(森下)指数  $I_0$  方法,分析中国地震昼夜和季节分布特点。结果表明,中国内陆大地震主要集中在夜间发生。

地震学多种参数的时空扫描研究也取得了部分进展。刘桂萍和傅征祥(1999)以及王伟等(2001)使用华北地区地震资料进行地震非均匀度  $GL$  值空间扫描。结果表明,中强地震前 1~3 年,震中周围开始出现明显的  $GL$  值异常。宋治平和梅世蓉(1999)通过对 85 次 6 级以上地震前地震活动增强区的深入研究表明,强大地震前出现的地震活动增强区具有一定的普遍性,并具有一定的力学基础。焦远碧和丁鉴海(2000)通过对发生在我国大陆及边境地区 24 次 6 级以上地震的分析研究表明,80% 的强震主震前在震源区及附近有中等地震活动增强的过程,其可以作为中短期地震预报判据。周翠英等(2000)使用由地震记录  $P$  波初至波符号求取的小震综合机制解资料,分析研究了华北地区 4 次中强地震前震源区及其附近小震应力场的动态变化,综合归纳了中、强地震前震源区及附近应力场的动态演变特征,并尝试给出了小震综合机制解参数预报地震的判据指标。

非线性理论与方法在地震学中也得到了进一步应用和研究。柯善明等(1999)利用现代非线性物理理论及震源理论,并结合地震活动的特点,建立了地震活动的愈渗模型。敖力布(1999)研究了震级-频度关系式中非线性项产生的原因,得出了新的含有非线性项的震级-频度关系式。杨马陵和曲延军(1999)利用  $M$  估计的稳健回归方法,选取  $\phi$  函数为正态密度型函数,计算震级-频度关系中的  $b$  值,并讨论了稳健估计方法与最小二乘估计所得结果的差异,认为由稳健估计得到的  $b$  值更加符合震级-频度关系中的大小比例。周仕勇和朱令人(1999)从分析地震能积累的动态方程入手,推导出了估计强震复现时间的分形估计法,并通过实例对其可靠性和实用性进行了研究。邵辉成和金学申(2000)应用 Morlet 小波,对近年来华北地区几次引人注目地震所在区的地震能量序列进行了动态周期分析,发现地震活动既有长期较稳定的活动周期,也存在一定时限的短期活动周期;另外,他们用动态优势周期对未来地震活动趋势进行了估计,结果表明地震都发生在“特征值”高值附近。裴韬和周成虎(2002)将变差函数分析方法引入地震时间相关性研究,并对比了松潘地震的前震与余震序列时间相关性的差异。蔡强和周成虎(2002)应用分形理论,对华北地区的地震时间分布进行了多重分形谱计算,并对几次较大地震的地震序列进行了分析,认为其结果具有一定的预报意义。周蕙兰等(1999)以单健群(single-link-cluster)分析方法为基础,提出了一种从地震目录中识别强震和余震并形成序列目录的新方法。

此外,在数字化地震资料应用研究方面,吴忠良(2001)比较了 NEIC 宽频带地震辐射能量目录与哈佛矩心矩张量(CMT)目录,给出了关于视应力的一些可能有意义的结果。

总的来看,地震学在地震预报中的应用研究,目前主要集中在地震活动时、空、强信息的分析和提取上。地震调制和触发研究明显增多,除注意小震调制现象以外,对强震的调制现象更加注意。同时,对一次地震的发生对另一次地震的触发研究进展较为明显。此外,需要引起注意的是非线性科学在地震研究中的应用比以前有了深入的发展,已经不仅仅局限在计算震情一些时空分维的变化。一个需要注意的现象是目前数字化地震波资料在地震预报中的应用尚不丰富,估计随着数字化资料和震例的积累会有长足的发展。

## 2.2 形变学科在地震预报中的进展

### 2.2.1 中国大陆地壳运动与应力、应变场的研究

根据各地区 GPS 的观测结果,许多专家学者对中国大陆板块的运动趋势进行了研究。刘序俨和邵占英(1999)、周硕愚和郭逢英(2000)、周硕愚等(2001)等应用 GPS 观测结果,研究了福建沿海地壳运动的特点及其与 1999 年 9 月 21 日台湾 7.8 级地震的关系;江在森和张希等(2000a, 2001)对青藏块体东北缘及华北地区近期水平运动与变形进行了研究;王琪和丁国瑜(2000)用 GPS 研究了南天山地区现今地壳变形;帅平和吴云(1999)以及顾国华等(2001)给出了中国大陆 1998~1999 年地壳运动观测结果,并对中国大陆现今地壳水平运动基本特征进行了研究。

应力应变场的模拟得到了较广泛的关注。黄立人和宋惠珍(1999)根据 GPS 观测结果解释了华北部分地区水平变形的力学机制;何振和牛安福(2000)初步研究了地壳块体应力场动力学演变的仿真过程;陈宇坤和聂永安(2001)对坚固体模型近地表形变场、应力场时空分布动态进行了模拟研究;江在森和张希(1999, 2000b)利用非连续变形数值方法,研究了块体运动及其应力场。

总的来看,目前大地测量观测主要应用于对地壳运动及形变场的研究方法上,由于 GPS 观测时间较短,地壳形变在地震预测中的应用还主要是研究地震前后形变速率时间、空间的异常变化及中、长期地震危险性预测方法等。

### 2.2.2 形变前兆与对地震孕育过程的研究

最近几年,应用连续变形观测在地震孕育过程及地震短期预测方法方面取得了较显著的进展。其研究成果主要有以下几个特点。

1) 地震孕育过程及相关形变前兆场得到重点研究。孟国杰和黎凯武(1999)研究了张北 6.2 级地震前的地壳形变特征;牛安福(1999, 2002)探讨了张北 6.2 级地震前中短期倾斜形变的阶段性及地壳变形的突变性与地震短期预测之间的关系;牛安福和刘祖荫(1999)对地震前地壳形变异常分布的非均匀性特征进行了研究;王绍晋和龙晓帆(1999)研究了全国环境剪应力场动态变化与强震活动的关系;肖兰喜和朱元清(2000)对邢台地震前地壳形变异常的可能性物理机制进行了探讨;车兆宏和谢觉民(1999)对张北 6.2 级地震前后地形变前兆演化特征进行了异常分析;张晶和孙柏成(2001)以及祝意青和胡斌(1999)分别探讨了张北 6.2 级和永登 5.8 级地震前后的重力场动态图象特征及异常机制。

2) 连续形变前兆与地震构造相结合。许多专家对活动块体与地震的关系进行了深入的研究,做了大量有益的工作。杨国华和王秀文(1999, 2000)以及杨国华和谢觉民(2001)分析了华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制;薄万举和郭良迁(2001)依据断层垂直形变研究了华北活动块体边界的特征,并绘制了首都圈断层形变空间信息合成图象;孙少安等(2001)对位于云南省的鲜水河断裂带的重力场变化特征进行了研究;牛安福和王琪(2000)对未来地震危险性估计和计算活动断层参数提出了最优化定量方法。

3) 新的理论和方法在地震预测研究中得到了一定的应用。张永志和王文萍(1999)利用小波分析方法,对形变和应力场变化与地震活动的关系进行了研究;张昭栋和王秀芹(1999)提出在体应变固体潮中应用加卸载响应比的方法;骆鸣津和顾梦林(2000)讨论了用固体潮观测资料将钻孔应变变化换算为地层的应力变化的方法。

综上,应用连续形变开展短期预测方面的方法及成果都较突出,且对个别地震进行了

较成功的短期预测, 但某些研究结果尚缺少相应的试验和理论检验, 同时数值模拟方法在形变前兆方面的应用较欠缺。

### 2.3 地震电磁学在地震预报中的进展

在我国, 有近 100 个地震地电监测台站, 主要分布在地震活动带(区)、重要的大城市和经济发达地区周围。

赵玉林等(2001)论证了唐山等大地震地电阻率中期下降系压缩应变积累所致, 并被基线缩短、井水位下降资料所支持。Lu 等(1999)通过对台站地下电性结构与观测装置的灵敏度分析, 表明唐山震前电阻率下降不可能是由地下水位下降引起的。换句话说, 若从电阻率下降资料中消除地下水干扰的影响, 电阻率下降异常幅度将会更大。

近年来, 开展了通过岩石地电阻率变化的各向异性, 探测岩石破裂前兆与确定主破裂扩展方向实验研究(陈峰等, 2000a, b), 以及对地电阻率变化的各向异性与地震关系的探讨(毛桐恩等, 1999; 杜学彬等, 2001; 阮爱国等, 2000; 阮爱国, 赵和云, 2000; 冯志生等, 2000); 进一步研究电阻率的中短期地震异常(王志贤等, 1999; 杜学彬, 谭大诚, 2000; 杜学彬等, 2000); 给出了电阻率异常的若干震例(王志贤等, 1999; 孙晓丹等, 1999; 强科瑜, 1999; 张昭栋等, 2000; 高立新等, 1999; 高立新, 2000; 白长清等, 2001; 田山等, 2002; 张学民, 武有文, 2000; 张学民等, 2002); 改善电阻率资料的处理与评价(赵和云等, 1999; 毛先进, 钱家栋, 2001; 赵桂林, 1999); 分析了干扰电阻率观测的影响因素(刘允秀等, 1999; 高曙德等, 1999; 田山等, 2000)。

地电场、电磁波和大气电场等观测取得了长足的进步(席继楼等, 2002; 赵和云和阮爱国, 2002; 郝建国等, 2000; 凌芝, 2000; 阮爱国, 赵和云, 2000; 郑洪等, 2000; 唐天明, 1999; 陈有发等, 1999; 赵明等, 1999; 郝建国, 1999; 关华平等, 1999; 杨少峰, 杜爱民, 2002)。

### 2.4 地下流体学科在地震预报中的进展

地下流体不仅能作为前兆手段反映地震, 同时还可作为重要因素参与地震孕育过程。作为前兆手段, 其研究进展仍然表现在异常信息识别提取和异常机制的讨论方面, 研究方法日趋统一; 作为参与孕震的重要因素, 其研究进展表现在利用地震深度与流体热活动所建立的一些假设, 研究方法尚有待拓展。

1) 前兆异常信息识别与提取方法。地下流体作为映震手段, 对观测资料的处理与异常识别以及异常信息的提取方法的研究是近年来国内开展较多的研究工作之一。深入充分的研究工作已经产生了地震地下流体观测资料处理与中短期和短临异常识别及其信息提取的系统方法, 建立了基于统计理论的地下流体预报地震的中短期判别指标体系与短临判别指标体系。

通过对异常提取方法和相应的异常指标的优化研究认为: 异常加速指标是孕震进入中短期阶段的重要标志, 而描述这种特征的方法主要有幅度加速和高频异常频次加速。加速异常主要集中在孕震区的调整单元或断层活动地段。描述动态变化指标的方法以相对变差率(变化率)为主(刘耀炜, 施锦, 2000)。利用最大变化率法, 根据不同数据取样频率可以提取不同时间尺度的异常信息。实例资料表明: 最大变化率演化与发震时间之间存在良好的统计关系。这种方法对水化学与水位观测资料处理都适用(王吉易等, 1999; 王雅灵, 王安滨, 1999)。

从非线性过程来理解地下流体异常变化过程,如果把地下水位系统作为混沌系统,计算所得系统的自由度在 3~16 之间;地震短临阶段系统有降维减熵现象,这种降维减熵现象可被看作强震前的一种前兆信息(李强等,1999)。

地下流体异常时空演化过程与地震孕育阶段有明显的对应关系。强震前地下流体前兆信息特征主要表现在前兆异常出现时间上的阶段性、加速性和空间分布上的群体性和配套性等方面。对异常的阶段性与配套性特征的深入研究,是揭示地震孕育过程,进而对潜在震源区及发震时间给以较准确预报的关键问题(刘耀炜等,2000)。短临地震前兆异常空间分布的非均匀性增强(陈学忠等,2000;杨明波等,2000),中短期异常点在空间上与地震空区、弱震条带、 $b$  值异常区有明显关系;在时间上与小震活动频度与  $b$  值、 $\eta$  值等也有密切的联系(刘耀炜等,1999)。

异常空间分布特征不仅与震级、震中距有关,还与区域构造应力场及震源与测点之间的介质环境有关。例如处于不同应力场及介质环境中的水汞观测点,其震前异常特征有明显差异(康春丽等,1999),而且异常与地震的关系具有区域性特征(和宏伟等 1999;曹玲玲,刘耀炜,1999),从而进一步说明了地下流体异常判别指标具有区域性差异的特征。

源兆与场兆的判别一直是识别的难点。统计分析结果认为,大地震前水化学观测源兆出现得较早,场兆出现得晚;源兆所占的比例高,场兆所占的比例低(张慧,王长岭,1999)。但同时又有统计结果认为,远场测点主要出现中短期异常而近场测点出现短临异常(曹玲玲,刘耀炜,1999)。上述结果似有矛盾之处,还需要进一步研究。

2) 前兆异常机制。关于前兆异常机制和干扰异常机制的研究仍然持续,研究途径通过实验模拟、数值模拟和观测结果的统计分析或定性分析等。实验模拟发现脉冲状化学异常信息在含水层中的迁移传递受迁移距离和含水层受力状态不同的影响(鱼金子等,2000)。基于固体孕震模式的地下流体异常的时空演化过程的数值模拟结果表明,在孕震的早期阶段,地下流体异常不明显;在孕震中期阶段,地下流体异常主要集中在震源区;中短期阶段,异常范围不断扩大,震源区异常继续发展。以上结果说明源兆出现早,场兆出现晚(张慧,梁子彬,2000),而且含水层系统的封闭状态和渗透性能对水位的映震效果有很大的影响(赵利飞,尹京苞,2000;李炳乾等,2000)。统计分析结果认为,硫化物异常形成明显受孔隙压力的影响(高小其等,2001)。地下水位异常与构造位置的关系表现为隆起区为正异常,凹陷区为负异常(邵永新等,2000)。异常形态差异的机制源于前兆性质(源兆、场兆和远兆)的不同(高小其等,2002)。目前对抽水干扰(吴富春等,2000)、河水荷载效应(黄维有等,1999)、降雨的渗流与荷载效应(张凤楼等,2001)等机制的研究仍然属定性分析。

3) 地下流体在孕震过程中的作用。地下流体作为参与地震孕育的重要因素已成为国内外研究热点之一(Zhao *et al.*, 1996;徐常芳,1997)。通过研究地壳内不同部位的流体存在与地震活动的关系,发现上地壳的热流体活动与中小地震活动深度之间密切相关:同一个地区温泉水循环的底界面与中小地震的多震层基本吻合;中下地壳中,强震多发生在高导低速层(即流体活动层)顶面埋深适中的地区;而在断裂带上,地震活动的水平与周期取决于断裂带的流体活动与水岩相互作用。模拟实验表明,岩石在有水作用下,其应力值不高时就可发生破裂,即水能促震,但震级变低(车用太等,2000b)。基于上述研究,车用太等(2000a)提出了板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设。

通过研究张家口南部地热活动区的水热活动特征及地震活动性认为, 由于地下流体对断裂及其围岩的化学、物理作用, 使断裂强度降低, 且随着流体温度的增高、循环深度的加深, 这种作用将愈加强烈. 表明地下流体在地震的孕育和发生中起着显著的作用(王基华等, 2000). 通过计算山西地震带每个热水点的年热释放量, 分析热释放量与地震活动的关系, 发现热释放量低值区中小地震不活跃, 高值区强震不活跃而中小地震活跃; 在山西地区地壳活动所积累的能量, 每年以热能形式释放的能量相当于一个 7.3 级地震(张淑亮等, 2002). 从山西地震带地震发生的实况来看, 这样的热释放可能推迟或减少了强地震的发生.

综上所述, 充分研究地下流体在地震孕育过程中的作用(映震与孕震), 不仅有助于地震的短期与短临预测, 而且有助于理解地震发生的过程. 地下流体参与孕震的过程应当作为未来研究的重点.

### 3 地震综合预报进展

近几年来, 地震综合预报的进展体现在 3 个方面.

#### 3.1 地震综合预报科学思路

对于地震综合预报的思路, 朱令人(2002)、张国民(2002)等在中国 30 多年地震预报实践基础上进行了总结. 认为地震综合预报需要积累大范围、长时间、多手段的前兆连续观测, 探测正常背景上的异常变化, 分析异常群体的时空强综合特征及其演化过程; 需要应用从大量震例经验和理论、实验研究取得的对孕震过程阶段性发展的认识, 以及各阶段中异常群体特征的综合判据与指标, 对孕震过程进行追踪分析, 并对地震发生的时间、地点和强度进行以物理为基础的概率性预报. 强调长、中、短、临渐进式预报思想, 场兆、源兆思想, 源的过程追踪与场的动态监视相结合思想, 块、带、源、场、兆、触、震思想及系统演化思想. 提出在预报过程中要注意大范围相关与小尺度全过程的结合; 前兆(异常)的时空离散性特征, 场的动态监视与源的过程追踪相结合; 以物理为基础的概率性预报, 随机性与确定性互补, 地震群体与单个地震相结合; 渐进式与跨越式相结合; 多手段的综合预报; 大范围动态监视与小区域临时台网监视相结合. 这是对中国地震预报实践经验的总结与提炼, 对中国的地震预报实践具有指导意义.

#### 3.2 地震综合预报理论

地震综合预报理论建立在地震孕育模式的基础上. “九五”期间, 梅世蓉(1999)根据人工地震与天然地震测深成果, 提出了邢台地震孕育发生的概念模型. 根据震源区的深部构造特征, 探讨了邢台地震的成核过程, 进而讨论了邢台地震的直接前震、地形变、地下水位 3 项主要前兆的形成机制. 王妙月等(1999)为探讨用数值方法模拟地震孕育、发生、发展动态过程的途径, 从线性流变体介质内制约质点运动的运动方程出发, 导出了模拟地震孕育发展动态过程的三维有限元方程及程序, 还给出了模拟进程中地震孕育、发生、发展过程的约束条件, 使得可以用同一个程序完整地模拟地震孕育、发生、发展的全过程, 为地震过程本质的认识以及物理预报的实现提供了一个潜在新手段. 张永仙和刘桂萍(2000)、张永仙和尹祥础(2000)、张永仙等(2000)利用数值模拟方法, 研究了孕震过程中短期阶段热物质上涌过程及地震前兆异常演化, 提出地震前兆演化与地震孕育过程密切相关, 在不同的阶段前兆表现形式各异, 可通过对前兆特征的识别来逐步认识地震孕育阶段

及前兆与未来地震的关系。以上研究试图从理论上对地震前兆的演化与地震孕育和发生过程之间的物理关系进行定量研究,但由于建立的模型过于简单(原因是地下的物理参数及边界条件不确定),因此所给出的定量结果距实际情况尚有较大差距。

### 3.3 地震综合预报方法

限于资料的局限性和不完备性,基于地震孕育模式,既考虑地震活动性、又考虑前兆观测异常的真正意义上的综合预报方法尚未出现。近年仍在继续对地震活动性和前兆资料分别进行一些综合信息的提取工作。

在地震活动性综合预测方法方面,赵翠萍等(1999)应用基于 PP 回归理论的数值型地震综合预报软件系统,选择了  $b$  值、 $C_b$  值、 $A_b$  值等 15 个测震学参量,建立了它们与响应变量的 PP 模型,对新疆 4 个主要地震区分别给出了各区的建模函数及综合预报模型,回顾检验及实际预报结果均表明该模型的预报效果是较为理想的;宋治平等(1999)利用最大熵谱方法,对 24 次 6 级以上地震的地震活动增强区内地震活动度的周期谱特征进行了研究,认为正常时段的周期谱长周期与短周期并存,而震前阶段只存在短周期(平均为长周期的 43% 左右),长周期消失;柯善明等(1999)利用现代非线性理论及震源理论,结合地震活动的特点,建立了地震活动的逾渗模型;王峥峥等(2000)在华北及其西部地区用描述地震分布时、空、强基本特点的空间集中度  $C$ 、地震危险度  $D$ 、地震强度因子  $M_f$  进行交汇寻找综合异常区预报强震,预测震中位置在  $1.5^\circ$  半径之内;陈立军等(2000)运用地震学异常度预测法,对由地震频度  $N$  值、蠕变值、缺震值、 $m$  值和  $G_L$  值等地震学预报参量进行空间扫描所得出的进行综合异常判定,得出了近几年的综合预测图;王伟和宋先月(2000)、王伟等(2000a, b)将 BP 神经网络用于地震中期预报,该方法具有较好的中期预报效果;秦保燕和刘耀炜(2000)由短期、长距离、线性震中迁移线交汇得到的稳定交汇区进行强震地点预报,方法称为线性震中迁移交汇法,认为存在由源向场的迁移、由场向源及过源迁移 3 种类型;刘红桂和王伟(2000)从大震前中小地震活动有个增强的过程和大地震常常发生在异常区外围的现象出发,提出用描述地震分布时、空、强基本特点的空间危险度  $D$  和地震强度因子  $M_f$  进行交汇预测未来震中位置;曹志华(2000)对 1970 年以来南北地震带上 6 次强震前中长期地震活动非均匀度  $C_v$  值与地震活动关系进行分析,结果显示了地震活动群集程度变化与地震孕育和发生过程存在密切关系。此外,戴英华等和刘永强(1999)把故障诊断法应用于地震预报;陈化然和陈文兵(2002)研究了中国大陆强震时空关联特征及应用。

在前兆综合预测方法方面,张国民等(2000)通过研究应变积累速度(即地壳应变速率)与地震活动的关系,探讨了从地壳应变场中寻找近期强震危险区的方法。从近几年地震实况的初步检验看,应用大地测量中垂直形变速率梯度判定强震危险区,具有较好的效果和可喜的前景。李文英等(2000)基于大震前主破裂潜在变化的过程中产生出小震活动、地壳形变异常以及伴随地壳形变而产生出的地下水、水化学、地电阻率等前兆现象化显示出的动态异常图象,依据河北省及周围地区 1970~1988 年的中强震前的前兆异常资料的研究,提取出了 9 个前兆异常因子的异常变化规律及特征,并建立了五因子的概率预报模型,同时计算出相应的前兆发生后不同时段内地震发生的概率。车兆宏和张鹤(2000)完善了累积危险度的强震危险地点跟踪预测方法,并对 1989 年以来首都圈及邻近地区累积危险度的演化进行了分析。结果表明,两次 6 级地震前,均出现累积危险度数值增大,震后扩散一



消退; 累积危险度高值区及其边缘地区可能为发震地点。平建军等(2000)用地震异常前兆信息量综合数学表达式的方法, 系统计算提取了 1980~1997 年华北地区各种前兆观测资料的异常信息, 并逐月研究了其地震信息场的空间分布特征, 给出了地震中短期综合预测指标和方法。

## 参 考 文 献

- 敖力布. 1999. 关于地震震级-频度关系式及其非线性项的讨论[J]. 西北地震学报, **21**(1): 94~98
- 白长清, 方晓祥, 李春城, 等. 2001. 北京平谷地震台地电阻率前兆异常特征[J]. 地震, **21**(2): 105~108
- 薄万举, 郭良迁. 2001. 首都圈断层形变空间信息合成图像[J]. 地震, **21**(3): 98~103
- 蔡强, 周成虎. 2002. 华北地震时空多重分形的时空演化特征研究[J]. 地震, **22**(2): 74~80
- 曹玲玲, 刘耀炜. 1999. 西北地区地震地下流体观测网综合评价[J]. 西北地震学报, **21**(1): 60~66
- 曹志华. 2000. 地震活动非均匀度  $C_V$  值在南北地震带强震前的中长期趋势异常特征[J]. 地震, **20**(2): 89~93
- 常克贵, 高立新. 1999. 加卸载响应比理论在包头西  $M_s 6.4$  地震预报中的应用[J]. 西北地震学报, **21**(4): 350~355
- 车用太, 鱼金子, 王基华, 等. 2000a. 地壳流体与地震活动关系及其对地震预测探索的启示[J]. 地震, **20**(增刊): 91~97
- 车用太, 刘五洲, 鱼金子, 等. 2000b. 板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设[J]. 地震学报, **22**(1): 93~101
- 车兆宏, 谢觉民. 1999. 张北 6.2 级地震地形变前兆演化特征[J]. 地震, **19**(4): 315~322
- 车兆宏, 张鹤. 2000. 累积危险度的动态演化及其与强震的关系[J]. 地震, **20**(2): 1~6
- 陈峰, 修济刚, 安金珍, 等. 2000a. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究[J]. 地震学报, **22**(2): 210~213
- 陈峰, 修济刚, 安金珍, 等. 2000b. 用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩石破裂前兆和确定主破裂扩展方向[J]. 地震学报, **22**(3): 310~318
- 陈化然, 刘文兵. 2002. 中国大陆强震时空关联特征及应用[J]. 地震, **22**(1): 25~31
- 陈立军, 周霞, 陈晓峰. 2000. 地震学异常度预测法在天山及周边地区的应用[J]. 内陆地震, **14**(2): 105~115
- 陈学忠, 王晓青, 李志雄, 等. 2000. 强震前水氢异常台站时空分布非均匀性变化特征[J]. 地震, **20**(1): 38~44
- 陈有发, 马钦忠, 张杰. 1999. 震前自然电场的前兆及其可能机理[J]. 华南地震, **19**(3): 26~34
- 陈宇坤, 聂永安. 2001. 坚固体模型近地表形变场、应力场时空分布动态模拟研究[J]. 西北地震学报, **23**(2): 105~111
- 戴英华, 刘永强. 1999. 故障诊断法在地震预报中的应用[J]. 地震学报, **21**(2): 218~221
- 杜学彬, 谭大诚. 2000. 地电阻率 1 年度异常时空丛集现象与地震活动性[J]. 中国地震, **16**(3): 283~292
- 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 2001. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, **23**(3): 289~297
- 杜学彬, 薛顺章, 郝臻, 等. 2000. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, **22**(4): 368~376
- 冯志生, 王建宇, 孙寿祥. 2000. 海安台地电阻率各向异性变化与地震[J]. 地震学刊, **20**(4): 39~42
- 傅征祥, 刘桂萍. 1999. 平行走滑断层相互作用的粘弹模型和减震作用[J]. 地震, **19**(2): 127~134
- 傅征祥, 刘杰, 刘桂萍. 2001. 张家口-蓬莱断裂带的中长期强地震危险性研究[J]. 中国地震, **16**(4): 334~341
- 高立新. 2000. 山西大同-阳高 6.1 级地震前的地电阻率异常[J]. 山西地震, (3): 18~21
- 高立新, 黄根喜, 阎海滨. 1999. 张北-尚义 6.2 级地震(1998-01-10)前倾斜与地电阻率前兆异常[J]. 地壳形变与地震, **19**(4): 88~90
- 高曙德, 严正, 康好林, 等. 1999. 埋设地下光缆对武都地电影响的分析[J]. 西北地震学报, **21**(4): 433~435
- 高小其, 王道, 许秋龙, 等. 2001. 硫化物的映震特征及其映震机理的研究[J]. 地震, **21**(1): 91~97
- 高小其, 许秋龙, 王道, 等. 2002. 地下流体中强震源兆、场兆和强震远兆特征及其物理成因[J]. 地震, **22**(3): 81~88
- 顾国华, 申旭辉, 王敏, 等. 2001. 中国大陆水平运动的一般性特征[J]. 地震学报, **23**(4): 362~369
- 郭良迁, 薄万举, 杨国华. 2001. 中国大陆的垂直形变速率梯度及地震活动[J]. 地震地质, **23**(3): 347~356
- 关华平, 张洪魁, 鲁跃, 等. 1999. 怀来台震前超低频电场与地震关系研究[J]. 地震, **19**(2): 142~148
- 黄福明, 易志刚. 2000. 地震视应变场的演化与强震发生地区的关系[J]. 地震学报, **22**(6): 577~587
- 郝建国. 1999. 地震及其前兆的观测研究与地震预测[J]. 地震地磁观测与研究, **20**(6): 45~50

- 郝建国, 潘怀文, 毛国敏, 等. 2000. 准静电场异常与地震——一种可靠短临地震前兆信息探索[J]. 地震地磁观测与研究, **21**(4): 1~166
- 和宏伟, 和国文, 李永莉, 等. 1999. 云南地区水氡前兆异常动态演化与地震关系研究[J]. 地震研究, **22**(4): 365~371
- 何振, 刘安福. 2000. 地壳块体应力场动力学演变过程仿真的初步研究[J]. 地壳形变与地震, **20**(1): 1~7
- 黄立人, 宋惠珍. 1999. 华北部分地区水平变形的力学机制——三维有限单元计算和 GPS 复测结果[J]. 地震学报, **21**(1): 50~56
- 黄玮琼, 吴宣. 2000. 川滇地区强震分区时间分布规律及在中长期预报中的意义[J]. 地震学报, **22**(4): 345~351
- 黄维有, 王立海, 刘宏伟. 1999. 通辽 CK9 井水位的河水荷载效应[J]. 地震, **19**(3): 288~290
- 江在森, 张希. 1999. 利用地形变观测量求解地壳水平应变场的方法[J]. 地震, **19**(1): 41~48
- 江在森, 张希. 2000a. 华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征[J]. 地球物理学报, **43**(5): 657~665
- 江在森, 张希. 2000b. 地形变资料求解应变值的尺度相对性问题研究[J]. 地震学报, **22**(4): 352~359
- 江在森, 张希, 陈兵, 等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, **44**(5): 636~644
- 焦远碧, 丁鉴海. 2000. 中等地震活动增强作为强震标志的研究[J]. 地震, **20**(2): 15~19
- 金学申, 刘志辉, 邵辉城, 等. 1999. 时间-震级可预测模型在未来地震危险中的应用[J]. 活动断裂研究, (7): 34~39
- 康春丽, 杜建国, 李圣强. 1999. 中强地震活动中采的异常特征[J]. 地震, **19**(4): 352~358
- 柯善明, 顾浩鼎, 翟文杰. 1999. 地震活动的逾渗模型及临界状态的研究[J]. 地震学报, **21**(4): 379~386
- 黎凯武. 2000. 中国大陆成组强震与强震调制比分析[J]. 地震, **20**(增刊): 44~50
- 李炳乾, 尹京苑, 钱家栋, 等. 2000. 含水层渗透性能变化对水位影响的数值模拟研究[J]. 地震, **20**(3): 60~66
- 李丽, 张国民. 2001. 台湾及邻区  $M_b \geq 4.0$  地震受月相调制的时空统计研究[J]. 中国地震, **17**(2): 210~220
- 李强, 徐桂明, 黄耘. 1999. 地下水位的混沌和多重分形特征演化及其中短期预报意义[J]. 地震, **19**(3): 274~280
- 李文英, 张清荣, 平建军, 等. 2000. 震情过程追踪与发震时间的综合概率预报[J]. 华北地震科学, **18**(2): 1~11
- 凌芝. 2000. 河北张北 6.2 级地震前的电磁辐射异常[J]. 山西地震, (1): 47~48
- 刘桂萍. 1999. 地震非均匀度方法在华北地区中强地震中期预报中的应用[J]. 地震, **19**(1): 52~58
- 刘桂萍, 傅征祥. 1999. 日本 1995 年 1 月 17 日兵库县南部 7.2 级地震触发的区域地震活动[J]. 地震学报, **21**(3): 250~257
- 刘红桂, 王炜. 2000.  $C, D, M_i$  值综合异常交汇区在华东地区中强地震前的中期异常[J]. 地震, **20**(1): 32~38
- 刘序俨, 邵占英. 1999. 福建沿海地壳运动与 GPS 测量结果初步分析[J]. 地壳形变与地震, **19**(3): 40~47
- 刘耀彬, 施锦. 2000. 强震地下流体前兆信息特征[J]. 地震学报, **22**(1): 102~107
- 刘耀彬, 施锦, 曹玲玲, 等. 2000. 水化学参量中短期异常识别方法及效能评价[J]. 地震, (增刊): 98~106
- 刘耀彬, 范世宏, 曹玲玲. 1999. 地下流体中短期异常与地震活动性指标[J]. 地震, **19**(1): 19~25
- 刘允秀, 陈华静, 程瑞年, 等. 1999. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J]. 中国地震, **15**(2): 184~189
- 骆鸣津, 顾梦林. 2000. 用固体潮观测资料将钻孔应变变化换算为地层的应力变化[J]. 地壳形变与地震, **20**(1): 73~78
- 毛桐恩, 胥广银, 范思源, 等. 1999. 地电阻率各向异性的动态演化图象与地震孕育过程[J]. 地震学报, **21**(2): 180~186
- 毛先进, 钱家栋. 2001. 前兆地电阻率资料处理的“剥皮”法[J]. 地震学报, **23**(6): 645~650
- 梅世蓉. 1999. 邢台地震孕育发生模型及其前兆机理探讨[J]. 地震, **19**(1): 1~10
- 孟国杰, 黎凯武. 1999. 张北 6.2 级地震前的地壳形变特征[J]. 地震, **19**(3): 261~266
- 牛安福. 1999. 张北 6.2 级地震前中短期倾斜形变的阶段性及其实验解释[J]. 地震学报, **21**(1): 106~112
- 牛安福. 2002. 地壳变形的突变性与地震短期预测[J]. 国际地震动态, (2): 10~12
- 牛安福, 刘祖荫. 1999. 地震前地壳形变异常分布的非均匀性特征[J]. 地震, **19**(2): 149~154
- 牛安福, 王琪. 2000. 断层活动的最优化定量方法研究[J]. 地壳形变与地震, **20**(2): 30~37
- 裴韬, 周成虎. 2002. 基于变差函数分析的地震时间相关性定量估算[J]. 地震, **22**(2): 17~21
- 彭克银, 尹祥础, 王海涛, 等. 2000. 基于构造应力场资料的加卸载响应比方法研究[J]. 中国地震, **16**(2): 190~196
- 平建军, 罗兰格, 曹肃朝. 2000. 华北地区地震异常前兆信息场演化特征及其与地震关系的研究[J]. 中国地震, **16**(3): 221~231

- 强科瑜. 1999. 兰州地电台地电阻率逐时值日变化分析[J]. 西北地震学报, **21**(3): 321~325
- 秦保燕, 刘耀炜. 2000. 线性震中迁移交汇法和强震位置预报机理讨论[J]. 地震, **20**(1): 17~26
- 阮爱国, 李清河, 赵和云. 2000. APE 理论与地电阻率前兆[J]. 西北地震学报, **22**(3): 209~216
- 阮爱国, 赵和云. 2000. 提取地震地电场异常的垂直极化方向投影法[J]. 地震学报, **22**(2): 171~175
- 邵辉成, 金学申. 2000. 小波分析在地震趋势预测中的应用[J]. 中国地震, **16**(1): 48~52
- 邵辉成, 金学申, 杜兴信, 等. 1999. 区域时间和震级可预测模型在华北及西南地区的应用[J]. 地震学报, **22**(3): 291~296
- 邵永新, 李君英, 李一兵, 等. 2000. 地下流体动态异常分布与构造的关系[J]. 西北地震学报, **22**(3): 281~287
- 帅平, 吴云. 1999. 用 GPS 测量数据模拟中国大陆现今地壳水平速度场及应变场[J]. 地壳形变与地震, **19**(2): 1~8
- 宋治平, 梅世蓉. 1999. 强大地震前地震活动增强区及其力学研究[J]. 地震学报, **21**(3): 271~277
- 宋治平, 梅世蓉, 尹祥础, 等. 1999. 地震前地震活动周期谱特征及其应用[J]. 地震学报, **21**(4): 387~393
- 孙少安, 贾民育, 李辉, 等. 2001. 鲜水河断裂带的重力场变化特征[J]. 地壳形变与地震, **21**(1): 72~78
- 孙晓丹, 马世贵, 曹卫东. 1999. 新疆乌鲁木齐台地电阻率变化及震兆特征[J]. 山西地震, (2): 39~41
- 唐天明. 1999. 太阳活动、磁暴与震前大气电气异常关系研究[J]. 地震地磁观测与研究, **20**(4): 30~39
- 田山, 郑文俊, 关华平, 等. 2000. 地电阻率年变化与气象因素及水位的关系[J]. 地震, **20**(4): 45~49
- 田山, 郑文俊, 程瑞年, 等. 2002. ZD8 仪地电阻率整点值短临异常研究[J]. 地震, **22**(2): 104~110
- 王吉易, 郑云贞, 张素欣, 等. 1999. 用水氢最大变化率法对强震时间作中短期预报[J]. 华北地震科学, **17**(4): 1~6
- 王基华, 林元武, 刘成龙, 等. 2000. 地下流体在地震孕育与发生中的作用——以张家口南部地热活动区为例[J]. 地震, **20**(增刊): 113~118
- 王妙月, 底青云, 张美根, 等. 1999. 地震孕育, 发生, 发展动态过程的三维有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, **42**(2): 218~227
- 王琪, 丁国瑜. 2000. 用 GPS 研究南天山(伽师)地区现今地壳变形[J]. 地震学报, **22**(3): 263~270
- 王绍晋, 龙晓帆. 1999. 全国环境剪应力场动态变化与强震活动研究[J]. 地震, **19**(3): 239~244
- 王炜, 宋先月, 王峥峥. 2000a. 人工神经网络在地震中期预报中的应用[J]. 地震, **20**(1): 10~16
- 王炜, 吴耿锋, 宋先月. 2000b. 神经网络在地震学方法综合预报中的应用[J]. 地震学报, **22**(2): 189~193
- 王炜, 宋先月. 2000. 人工神经网络在地震中短期预报中的应用[J]. 中国地震, **16**(2): 149~157
- 王炜, 宋先月, 谢端, 等. 2001. 地震非均匀度在华北地震中期预报中的应用[J]. 中国地震, **17**(3): 263~270
- 王晓青, 傅征祥, 张立人, 等. 2000. 中长期时空增益综合预测模型及其初步应用[J]. 地震学报, **22**(1): 45~53
- 王雅灵, 王安滨. 1999. 水头梯度变差值演化图象及强地震危险区预测方法研究[J]. 华北地震科学, **17**(4): 11~15
- 王峥峥, 王炜, 刘红桂, 等. 2000.  $C$ ,  $D$ ,  $M_f$  值综合异常交汇区在华北及其西部地区中强震前的中期异常变化[J]. 地震学刊, **20**(1): 1~9
- 王志贤, 白云刚, 李洪流, 等. 1999. 华北北部 6 级地震前后的地电阻率变化[J]. 山西地震, (2): 42~45
- 王志贤, 张学民, 李永庆, 等. 1999. 地电中期前兆异常特征及其对强震中期趋势的判断[J]. 地震学报, **21**(2): 187~193
- 闻学泽. 1999a. 中国大陆活动断裂段破裂地震复发行为[J]. 地震学报, **21**(4): 411~418
- 闻学泽. 1999b. 中国大陆活动断裂段破裂地震复发间隔的经验分布[J]. 地震学报, **21**(6): 616~622
- 吴富春, 景北科, 李炳乾, 等. 2000. 西影井水位大幅度异常成因的调查分析[J]. 地震, **20**(3): 106~112
- 吴忠良. 2001. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及地震学意义[J]. 中国地震, **17**(1): 8~15
- 席继楼, 赵家骝, 王兰伟, 等. 2002. 地电场观测技术研究[J]. 地震, **22**(2): 67~73
- 肖兰喜, 朱元清. 2000. 邢台地震前地壳形变异常的可能性物理机制[J]. 地球物理学报, **43**(5): 646~656
- 徐常芳. 1997. 壳内流体演化及地震成因(三)[J]. 地震学报, **19**(2): 139~144
- 杨国华, 谢觉民, 韩月萍. 2001. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制[J]. 地球物理学报, **44**(5): 645~653
- 杨国华, 王秀文. 1999. 山西地震带近期水平运动状态及活动性[J]. 地壳形变与地震, **19**(4): 50~55
- 杨国华, 王秀文. 2000. 应用 GPS 技术监测山西断裂带的水平运动[J]. 地震学报, **22**(5): 465~471
- 杨马陵, 曲延军. 1999. 地震前兆数据的稳健回归与建模[J]. 西北地震学报, **21**(4): 399~406

- 杨明波, 宋治平, 王力, 等. 2000. 水化异常空间非均匀性指标  $C_0$  值的映震效能[J]. 华南地震, **20**(1): 21~27
- 杨少峰, 杜爱民. 2002. 新疆喀什地区 1996 年 11 月震前超低频电磁辐射异常与震源方向的关系[J]. 地球物理学报, **45**(1): 101~108
- 易桂喜, 闻学泽. 2000. 时间-震级可预测模式在南北带分段地震危险性评估中的应用[J]. 地震, **20**(1): 71~79
- 鱼金子, 徐峰, 刘五洲, 等. 2000. 地下水化学异常信息迁移的水动力学模型实验研究[J]. 地震, **20**(1): 90~95
- 张凤楼, 李翠萍, 刘国民. 2001. 大暴雨引起深、浅井水位的异常变化[J]. 地震, **21**(3): 102~108
- 张国民, 李丽, 黎凯武, 等. 2001. 强震成组活动与潮汐力调制触发[J]. 中国地震, **17**(2): 110~120
- 张国民. 2002. 我国地震监测预报研究的主要科学进展[J]. 地震, **22**(1): 2~7
- 张国民, 李丽, 石耀霖. 1999. 地壳应变速率与地震活动关系的研究——从地壳应变场探索强震活动的场源关系[J]. 中国地震, **15**(1): 1~13
- 张慧, 梁子彬. 2000. 固体孕震模式下地下流体异常时空演化的数值模式[J]. 地震学报, **22**(2): 176~182
- 张慧, 王长岭. 1999. 大震水化学参量“场兆”与“源兆”判别指标的研究[J]. 地震, **19**(2): 155~160
- 张晶, 孙柏成. 2001.  $M_s 6.2$  地震前重力异常及异常机制探讨[J]. 地震, **21**(2): 75~78
- 张淑亮, 李冬梅, 马朝辉. 2002. 山西地震带热流体对强震活动的影响[J]. 地震, **22**(1): 83~90
- 张晓东, 秦保燕. 2000. 调制块比在地震中期预报中的应用[J]. 地震, **20**(1): 27~31
- 张学民, 翟彦忠. 2002. 冀蒙交界地区震前地电阻率异常分析与研究[J]. 华北地震科学, **20**(1): 16~24
- 张学民, 武有文. 2000. 河北张北地震前后地电阻异常分析[J]. 山西地震, (4): 21~23
- 张永志, 王文萍. 1999. 华北定点形变的小波分析与地震活动研究[J]. 地壳形变与地震, **19**(3): 48~54
- 张永仙, 刘桂萍. 2000. 张北 6.2 级地震近震区前兆异常特征及时空演化研究[J]. 地震, **20**(1): 53~58
- 张永仙, 尹祥础. 2000. 热物质运移与震前地表垂直形变异常关系研究[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会第八次学术大会论文摘要集[C]. 北京: 地震出版社, 111
- 张永仙, 石耀霖, 刘桂萍. 2000. 热物质上涌与震前重力异常关系初探[J]. 地震, **20**(增刊): 135~142
- 张昭祚, 刘庆国, 冯志军, 等. 2000. 1992 年 1 月 23 日黄海  $M_s 5.3$  地震前青岛地电阻率的短临异常变化[J]. 地震研究, **23**(4): 405~409
- 张昭祚, 王秀芹. 1999. 加卸载响应比在体应变固体潮中的应用[J]. 地震, **19**(3): 217~222
- 赵翠萍, 周仕勇, 朱令人. 1999. 新疆主要地震区 PP 回归综合预报模型研究[J]. 西北地震学报, **21**(1): 37~43
- 赵根模, 张恒, 任峰. 2001. 中国地震昼夜分布和季节分布的统计分析[J]. 地震, **21**(3): 51~56
- 赵桂林. 1999. 地电阻率( $\rho_s$ )变化主轴方向计算与地震预报[J]. 东北地震研究, **15**(2): 40~44
- 赵和云, 丁卉, 韩德胜. 1999. 衡量地电阻率观测资料内在质量的一种方法[J]. 西北地震学报, **21**(2): 156~159
- 赵和云, 阮爱国. 2002. 天祝大地电场异常与 1995 年永登 5.8、1996 年天祝 5.4 级地震[J]. 西北地震学报, **24**(1): 56~64
- 赵利飞, 尹京苑. 2000. 地下水位前兆敏感水力学条件的数值模拟研究[J]. 西北地震学报, **22**(3): 306~310
- 赵明, 刘元壮, 张天中. 1999. 大气电场异常判别及预报效能的统计检验[J]. 地震, **19**(2): 281~287
- 赵玉林, 卢军, 张洪魁, 等. 2001. 电测量在中国地震预报中的应用[J]. 地震地质, **23**(2): 277~285
- 郑洪, 王新蕾, 王春媛, 等. 2000. 深井电极与地表电极的自然电场对比研究[J]. 地震, **20**(1): 85~90
- 周翠英, 陈虹, 王红星, 等. 2000. 中强震前应力场动态演变特征综合分析[J]. 地震, **20**(2): 27~36
- 周惠兰, 刘振, 马延路. 1999. 识别前震余震的单键群方法[J]. 地震, **15**(3): 210~219
- 周仕勇, 朱令人. 1999. 强震复现周期的分形估计法[J]. 西北地震学报, **21**(2): 140~143
- 周硕恩, 郭逢英. 2000. 中国福建及其边缘海域现时地壳运动定量研究[J]. 地震学报, **22**(1): 66~72
- 周硕恩, 吴云, 施顺英. 2001. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究[J]. 地壳形变与地震, **21**(1): 1~14
- 朱令人. 2002. 论中国特色的地震分析预报科学思路[J]. 地震, **22**(3): 2~7
- 祝意青, 胡斌. 1999. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震, **19**(1): 71~77
- Aki K. 1981. A probabilistic synthesis of precursor phenomena[A]. In: Simpson, Richard eds. *Earthquake Prediction—An International Review*[C]. Washington D C: AGU, 566~574
- Kenji M, Akio Y. 1990. A probabilistic estimation of earthquake occurrence on the basis of the appearance times of multi-

- ple precursory phenomena[J]. *J Phys Earth*, **38**: 431~444
- Liu Jie, Chen Yong, Shi Yaolin, *et al.* 1999. Couple stress release model for time-dependent seismicity[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 649~667
- Lu Jun, Qian Fuye, Zhao Yulin. 1999. Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China[J]. *Tectonophysics*, **307**: 397~405
- Papazachos B C. 1989. A time-predictable model for earthquake in Gress[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **79**: 77~84
- Utsu T. 1977. Probabilities in earthquake prediction[J]. *Zisin Ser*, **30**(2): 179~185
- Vere-Jones D. 1978. Earthquake prediction—a statistician view[J]. *J Phys Earth*, **26**: 129~146
- Wyss M. 1970. Apparent stresses estimates of earthquake on ridges compared to apparent stresses of earthquake in trenches[J]. *Geophys J R astr Soc*, **19**: 479~484
- Zhao Dapeng, Kanamori Hiroo, Negishi Hiroaki, *et al.* 1996. Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: evidence for fluids at the hypocenter? [J]. *Science*, **274**: 1 891~1 894.

## STUDIES AND EXPERIMENTS ON EARTHQUAKE PREDICTION DURING 1999~2002

Zhang Xiaodong Fu Zhengxiang Zhang Yongxian Niu Anfu  
Huang Fuqiong Peng Keyin Lu Jun

(Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

**Abstract:** This paper briefly reviewed the research progresses of earthquake prediction and forecasting in China during 1999~2002, especially focusing on mid-short term prediction methods with approaches of seismicity, crustal deformation, electromagnetism, ground water and the analysis by synthesis, and the application of the methods to the practice of earthquake prediction.

**Key words:** earthquake prediction; seismology; crustal deformation; electromagnetism; underground water; analysis by synthesis