



地壳形变与地下水动态异常特征研究进展

陆明勇¹, 牛安福², 鲁德顺³, 张秀葵³

(1. 中国地震局综合观测中心, 北京 100039;

2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036;

3. 铁法煤业(集团)有限责任公司, 辽宁 铁法 112600)

摘要:地壳形变与地下流体之间既相互联系又相互影响。地壳形变异常是地壳构造活动最直接的表现, 是物理含义最为明确的地震前兆之一; 地下流体异常能够提供多种型式的构造活动过程(包括地震)的前兆信息。两类异常以不同的方式和特点反映出地震孕育过程中伴随的前兆信息, 从而成为地震预报的重要手段。本文综述了有关地壳形变与地下水动态异常特征方面的研究成果, 从机理和前兆特征方面归纳了两种异常的相互关系。

关键词:地壳形变; 地下水; 异常特征; 相互关系

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)01-0089-07

The Progress of Research on Anomalous Characteristics of Crustal Deformation and Under-ground Water Behavior

LU Ming-yong¹, NIU An-fu², LU De-shun³, ZHANG Xiu-kui³

(1. Comprehensive Observation Center, CSB, Beijing 100039, China;

2. Center for Analysis and Prediction, CSB, Beijing 100036, China;

3. Tiefu coal industry(Group)Limited liability Company, Tiefu Liaoning 112600, China)

Abstract: The mutual relation and influence between the crustal deformation and the subsurface fluid are present obviously. The abnormality of crustal deformation is the most direct reflection of crustal tectonic change, and also is one of the most definite seismic precursor on physical meaning, and the anomaly of subsurface fluid can provide polytype precursory information on tectonic active process (as well as earthquake). This two types of anomaly can reflect precursory information in the development process of earthquake by different ways and features, therefore become the important methods of seismologic prediction. In this paper, the research achievements of anomalous characteristics is summarised, the interrelation of two types of anomaly is concluded from their mechanism and precursory anomalous characteristics.

Key words: Crustal deformation; Under-ground water; Anomalous characteristics; Mutual relation

0 引言

众所周知, 地震是地壳运动中岩石应变积累、释放这一对矛盾相互消长的结果。地震的孕育过程通

常包括弹性变形和非弹性变形两个重要阶段, 其中非弹性变形将引起岩石物理性质的显著变化以及地壳形变、地下水等非线性、非均匀性的变化^[1-4]。在

收稿日期: 2004-05-08

基金项目: 地震科学联合基金项目[104009].

作者简介: 陆明勇 (1965—), 男(汉族), 四川江油人, 高级工程师, 主要从事地震活动性、地球动力学、地形变和地震预报等研究。

地震孕育阶段,往往能观测到显著的地形变和地下水异常变化,如 1976 年唐山 7.8 级大地震、1998 年张北 6.2 级地震、2001 年四川雅江—康定之间 6.0 级地震和 2002 年甘肃玉门 5.9 级地震前,在震源区附近都观测到大幅度的地下水及地形变异常。因而地形变和地下水位动态异常已成为地震预报的重要手段。经过三十多年广泛深入地研究,在地壳形变与地下水异常特征研究方面取得了显著的进展,本文综述了这些方面的研究成果,以期对地震前兆以及地震预报的深入研究有所裨益。

1 地壳形变、地下水位动态异常特征研究

1.1 地壳形变异常特征

地震是地壳形变的直接结果,所以长期以来国内外地震工作者高度重视地壳形变前兆的研究。1990 年中国地震局大地形变测量清理攻关小组归纳总结了之前对地形变前兆异常特征的研究成果^[5]:(1)大面积地形变的分布形态与地质构造符合很好;(2)与地震有关的地形变有明显的阶段性(大致可分为长期缓慢形变、震前快速形变、震时突变和震后调震四阶段);(3)震前的快速形变阶段持续时间可能较长,无固定标准,表现为形变速率显著增高,出现加速、反向,突跳等现象;(4)各种地震前形变异常的强度(持续时间、范围、速率、梯度等)相差悬殊。

在之后的十几年中,对于地壳形变异常特征的研究无论在广度还是在深度上都取得了可喜的进步。现将目前的认识按长、中、短临前兆异常归纳整理如下。

长期异常特征:(1)异常分布范围广大,如 7 级以上地震的孕育形变场分布范围不小于 300 km^[6];(2)异常的时间早和持续时间长,如张北地震从 1991 年就开始出现异常^[7],而唐山地震则在 1967 年以前出现异常^[8];(3)异常变化是趋势性的,异常活动形态连续而又缓慢,不与单个地震一一对应^[6]。

中期异常特征:(1)异常出现具有同步或准同步性^{[9]~[10]};(2)异常形态各异,有趋势异常、年异常;(3)异常相对变化幅度以水平量最大^[9];(4)异常出现时间、幅度与震中距有一定关系;(5)强震前异常多出现在震前半年以上;(6)异常范围缩小,相对震中集中;(7)异常表现“有序性”^[9],在震源体周围形成下陷区和隆起区,并呈四象限分布^[11],它可作为地震危险区预测的地域标志。进入短期的异常标

志是中期异常出现转折或反向^[8]。

短临异常特征:(1)趋势异常转折或反向、加速^[8],且初期较快^[12];(2)异常一般出现在半年到 1 个月左右,异常在发震前一般都恢复,发震时间一般在出现恢复 1 个月以内;(3)震级与异常幅度之间无明显数量关系^[12];(4)异常范围进一步缩小^[11],这便是短期异常前兆的一些特征。对于临震异常,高福旺等^[13]研究认为,是在短临异常的背景下再次出现转折,时间大约在 1 个月至几天,同时伴有畸变、阶跃、脉冲、波动等现象;这些“显著的突变”短临异常的测点距震中较近;地震发生的地点通常在趋势背景呈现压缩区的区域。因此,异常速率变化、异常形态变化、地面倾向变化、断层活动速率合成值变化、强震前震源区相对闭锁等,可以作为短临预报指标^[9]。乔子云等^[14]进一步运用统计方法对多个震例进行研究后表明,地震应力—应变异常形态的时间特征呈现“出现、下降、转折、恢复及结束”的变化过程,依据异常的“出现、转折、结束”等特征,得出了异常的转折可作为应力—应变的短期预报指标、应力—应变异常结束可以作为地震短临预报指标,并给出经验公式以及异常时间与震级和震中距的关系。

另外,人们还从不同侧面,运用不同方法对形变异常特征做了研究。如牛安福等^[10]对地震前地壳形变异常分布的非均匀性进行了研究,认为:震前出现异常空区,它可能是未来的地震危险区,且形变空区在震前有一定强化或补偿现象。进一步研究表明^[15~16],地震前地壳形变持续加速变形(持续时间、变形速度、变形幅度及持续加速变形结束时间)与地震发生有关,持续加速变形以后,地震等待时间均在半年之内,并集中发生在变形速度最大值后的 3~4 月内,给出了一种定量识别持续加速变形的办法(AF 值法),并定义了寻找前兆性持续加速变化与非前兆性加速变化间速度的临界值 K—SLOPE。地震前地壳变形的突变性是短临异常特征,可以作为短临异常指标,并定量地给出了表达式。

陈绍绪等^[17]对地震组的地形变异常的基本特征研究后认为:(1)异常时间跨度大,最少两年以上;(2)异常分布范围广,可达数百公里,但仍具有相对集中性;(3)异常以群体形式出现;(4)异常形态一种是速度异常,比平静高许多倍,另一种是形态变异。同时还通过理论求解讨论了地震前兆形变场特点^[18],提出:隆起区与下降区相伴而生;构造力的大小是决定形变幅度的基本因素,构造力越大形变幅

度亦越大,反之则越小;力源的深度是决定形变幅度的另一因素,它与形变幅度成反比,与影响范围成正比;力的方位角和倾角是决定形变场形态的基本因素,倾角为正(向下),形变中心区下降;倾角为负(向上),形变中心区隆起。

陆明勇等^[11]从断层活动本身出发探讨了断层在中强地震前地壳形变短临异常演化特征,给出了明确的强震中短期阶段断层异常活动时空演化特征。许昭永等^[19]通过实验研究了岩石破坏前短临应变前兆的特征,认为在断层即将开始滑动时,断层活动分布范围有所扩大,主要表现为应变出现了突变或扰动,但并非任何时间和地点都有突变或扰动,它仅在极临近主破裂时的一些灵敏点上才出现。

1.2 地下水动态异常特征

地下水是地壳中十分活跃而又重要的组成部分。由于地下水的普遍性、流动性和对应力一应变变化响应的灵敏性,使它成为重要的前兆手段之一。我国自1966年邢台地震后便开展地下水动态监测,经过近40年的努力,建立了分布广泛的观测网,积累了丰富的资料,并开展了多方面的研究。

在上世纪80年代,贾化周等^[3]、汪成民等^[4]分别对地震前地下水位异常的形态进行了研究,归纳为7种类型:①下降型,②上升型,③阶变型,④脉冲型、方波型及振荡型,⑤固体潮畸变,⑥气压效应异常,⑦井孔记震能力的变化。汪成民等总结了地震地下水位动态异常的特征^[4],表现为:(1)异常普遍性;(2)异常形态的多样性;(3)异常时间分布的阶段性和同步性、集中性;(4)异常分布广而不均匀;(5)异常时空转移性;(6)异常幅度与震级、震中的关系复杂。

经过实用化攻关研究,梅世蓉等^[8]总结出了地震地下水动态异常特征与地震震级、时间、地点的关系,提出地震三要素的判据:(1)震级的判据:震级的大小与异常持续时间、变化幅度、井点数量、形态类型以及时空转移特点等有关。其中,与震级大小有关的最重要的特征量是异常的分布范围和形态类型。(2)发震时间的判据:发震时间与异常的出现时间、时空转移、井数量、形态、变化速率与幅度等特征量有关。(3)发震地点的判据:对发震地点,主要依据异常的空间分布图象、数量与密度、变化的剧烈程度、形态类型、时空转移、井孔水位异常对应地震方向性以及是否为震后效应异常区等来判断。

实用化攻关之后的十多年中,地下水动态异常特征研究又取得了比较大的进展。发现地下水前兆

异常发展也具有阶段性,且与地壳形变异常发展阶段相类似。

地下水长期异常特征:(1)地下水前兆异常分布范围广大,且零星成丛^[7],并受区域构造格局控制^[20],统计表明7级以上地震的分布范围平均为900 km^[21],而文献[8]和[22]认为异常范围通常可达1 000 km;(2)异常变化一般表现为缓慢的趋势性上升或下降,变化幅度和速率都较小,异常形态以趋势转折、破年变为主;(3)长期异常主要出现在大震前,而5~6级地震前很少见到这种趋势异常,5级以下地震更少见;(4)异常时间早和持续时间长,如张北地震前地下水位1994年就开始出现长期异常^[23],而1976年唐山大地震则从1972年开始地下水位在以往多年基本平稳的背景上,出现趋势性缓慢下降^[8]。

地下水中期异常特征:(1)以缓变类为主,突变类异常亦时有发生,其幅度与短临相比较小、与长期相比比较大,有加速趋势;(2)中期异常表现为趋势性的转折、年变异常和阶变异常^[23];(3)异常空间总体上表现由外围向震中收缩,由长期向中期收缩的特点^[23],表现为呈条带^[23];(4)异常井数较长期增多^[23]。

地下水短临异常特征:(1)长期趋势异常、中期异常的继续转折或结束,出现突升、突降、脉冲式异常;(2)新的突升、突降、阶变、突跳等异常出现;(3)异常数量随发震时间的临近而增多^[8],但临震略有减小^[7];(4)异常出现明显加速,幅度增大;(5)异常前兆异常空间分布的非均匀性增强^[24];(6)异常继续向未来震中区转移,并表现出集中性^[7],构造是前兆空间分布的主要控制因素^①;(7)短临异常的强度、临震异常形态的差异性与地震强度和构造有关^[20],与地震有关的异常因观测井不同而不同^[22];(8)异常主要集中于短临阶段^[7-8]。

除此以外,人们还对异常特征某一方面进行了研究。如刘耀炜等^[25]从时空方面研究认为,地下流体前兆信息特征主要表现在:出现时间上的阶段性、加速性和空间分布的群体性和配套性等方面;进一步通过对流体异常特征提取方法和相应异常指标的优化研究认为^[26],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

① 刘耀炜,李丽,张慧,等,“十五”国家科技攻关项目—流体短期前兆的机理研究(02-02-03)的进展汇报,2003。

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。群体异常频次的累加值曲线在地震前表现为指数加速变化图形,流体短临前兆出现明显的起伏加剧和层次现象^[27]。而地下水异常形态多种多样^[7],按速率可分为缓变型与阶变型,按动态变化方向可分为上升型与下降型,按起伏形态与特征可分为平稳型、脉冲型、振荡型等;平建军等^[28]从短期异常特征发展形式上分为复合型(转折型)和单一型(突发型)。对异常形态统计结果看,阶变型^[7]、上升型^[7]、单一型^①等异常在各自分类中占大多数;平稳型占多数^[7];缓变型异常多在中长期、中期出现;阶变型多在短临阶段出现。地下水位异常变化不仅在封闭含水层而且在部分封闭含水层和未封闭含水层井也有,变化符号和大小随着它到断层的距离而变化,且断层上下盘地下水位异常符号可能不一致^[29]。

在降水、地下水诱发前兆异常方面,王吉易等^[30]研究认为,降水、地下水可以诱发前兆异常,并得出诱发前兆异常具有7个主要特征,即种类的多样性、与降水及地下水变化关系的非线性、发生的周期性和季节性、变化的层次性、时间分布的成丛性、空间分布的大区域性以及多种手段异常变化的时空关联性等,并拟定出了5个诱发异常的判据。

2 地壳形变与地下水动态异常的相互关系研究

大量观测和研究表明,地壳形变与地下水的前兆异常之间具有某种直接的成因联系,为此,这里主要从机理和特征两方面来论述地壳形变与地下水动态异常的相互关系。

2.1 前兆异常机理相互关系

地震是地壳运动中岩石应力一应变不断积累、增强,当其超过岩体破裂强度时所发生的岩体突然破裂。因此,在应力一应变长期积累过程中,岩石出现微小破裂和裂缝串通,一方面导致岩石体积膨胀,产生地壳变形;另一方面为地壳中包含的各种流体开通其活动和流通的渠道,从而使水等流体位置发生变化,产生地下水位等异常。

进一步研究地壳变形如何影响地下水及地下水如何影响地壳变形。地震孕育过程中若首先出现地壳变形异常,随地应力不断增加,将出现压缩区和张性区。压缩区水位会逐渐抬升;张性区水位会逐渐下降。尤其是地壳局部区域在地应力作用下遭受破坏,发生变形或加速位移,以及由岩层破坏而引起水

的贯通,都会使水位产生急剧的上升(或下降)运动。而若地下水先出现显著的变化,将产生孔隙压力,动水压力,化学腐蚀,载荷等作用,使岩石强度下降和结构破坏,致使岩石弱化,进而对区域变形产生影响。车用太等通过一系列理论、实验与观测分析^[8],明确提出:“地下水微动态形成可分为两种过程:岩土力学过程与水动力学过程。岩土力学过程指含水层岩土受力作用发生地壳变形破坏,并由此引起孔隙压力变化的过程。水动力学过程指含水层内由孔隙压力发生变化之后,其信息在含水层—井孔系统中或通过压力的传递(能量传递),或通过流体介质的迁移(质量传递)反映到观测井中来的过程”。而Ge等^[31]从地震诱发的应力—应变场与地下流体动力学间存在强烈耦合且这种耦合通过水井中的水位变化反映出来入手,建立模型研究应力—应变场与地下流体的关系。刘耀炜^①等对异常机理给出了解释,认为:测点外围断层蠕动以及小裂隙串通形成大裂隙时,其压力明显小于测点压力,流体迅速流向这些部位,出现测点水位的突降;孔隙压力的变化改变岩石的渗透性,使水位出现转折下降。陆明勇^[32]曾通过对已有的孕震模式进行深入研究,获得了地壳裂缝、孔隙如何在地震孕育过程中的变化,以及它们与地下流体之间的相互作用、相互影响,给出了地壳变形和水位变化在地震孕育过程中的演化图像。车用太等^[33]对井水位对地壳应力—应变响应灵敏度研究后认为,井水位对各类作用力的响应灵敏度与作用力的作用面积、作用频率等有关:对低频的大面积作用力响应灵敏度度高,对高频的局部作用力的响应灵敏度小。地下水位的变化可能与地震造成的孔隙率变化有关,一些水井对地震的灵敏响应可能与含水层/阻水层系晃动的近临界条件有关,响应灵敏度随时间而变化,震后灵敏度降低^[22],所以地震前能观测到异常是由于观测井对地震具有较高的灵敏度,其原因是因为水井所在的区域达到了蓄水渗水系统的临界状态,在此临界状态下,局部地震会使该区地下渗水层迅速产生裂缝,导致水位变化被观测到^[22];而观测井对不同远近地震的响应与地震相关的透过性变化有关,所以观测到的水位水压变化不能用无序多孔弹性断层模型下的静态应变计算结果来解释^[22]。Stato等^[34]进一步对同震泉流变化研究认为,水流速度迅速增大可能是地震造成含水层的水力扩散率(渗透率)提高所致。

很多研究者对于这些异常机理进行了数值模拟。如张慧等^[35]利用数值模拟研究了有流体作用

下的孕震过程,结果表明:孕震早期,即弹性积累和非线性阶段,地下流体缓慢变化,异常不明显,孔隙压力增大;中期阶段,即硬化及局部膨胀阶段,震源区出现膨胀,地下流体异常主要集中在震源区,源兆出现得早,场兆出现得晚,孔隙压力继续增大;进入中短期阶段,即大范围膨胀阶段,震源区异常继续发展,异常区不断扩大,在震源区以外出现新的异常值较大地区,此时段孔隙压力减小。孙君秀等^[36]通过研究渗流场和应力场相互作用表明,岩石的抗剪强度及摩擦阻力随孔隙压力的增大而降低,但剪切应力随孔隙压力增大,孔隙压力使应变分布和幅度发生变化,应变的加速变化促使孕震过程加剧和地震发生。所以地下水对断层的滑动以及对震源区的应力、应变场起着重要的控制作用。刘五洲等^[37]通过三维数值模拟方法研究表明,地下水的存在,不单增加了前兆应力场时空演化的流变性,并促使应力向断裂带聚集,而且还增加了震前的破裂水平,尤其是短临阶段,这种作用更加显著,但随深度的增加,地下水对应力场的影响作用逐渐减弱。Kitagana等^[38]从实际地震出发,根据地下含水层的地下水对地壳应变和打气压的响应具有不同的频率依赖关系,模拟了同震地下水变化机理,其结果与实际基本一致。

对于深部流体(物质)对浅层作用而产生地震的异常机理研究方面,刘耀炜^①认为:在地震孕育过程中,特别是在中期(扩容)以后,震源体开始非弹性变形,裂隙增生,破裂产生,导致膨胀区内孔隙压力迅速降低,流体流向压力低的地方,使水位迅速降低;另外,由于扩容区不断增大,当使产生的裂缝到达下方的深部流体处时,由于其压力相对高于扩容区上方和周围流体压力,因此深部物质侵入,孔隙压增大,水位升高,所以在岩体扩容和深部物质上涌到扩容的过程,扩容区压力的变化经历了下降、回升过程。车用太等^[39]从孕震机理方面提出板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设的模型,认为地壳中存在上下两大流体活动,其间发育有中地壳硬夹层,该层是地壳应力积累并孕育地震的层位。当其中某些部位积累的应力达到屈服强度时,则进入微破裂—膨胀(扩容)阶段并形成震源体。被扩容的震源体在真空吸泵作用下,由下层流体系统把流体吸渗到其内,在震源体内引起剪切力增强与抗剪力减弱的两个过程同步发展,并最终因剪切力达到抗剪力而导致震源体的破裂而发生地震。张永仙^[40]曾对深部热物质进行三维数值模拟并探讨其运移在

地震孕育过程中的作用,发现在地震发生前几年时间尺度的孕育阶段,热传导的作用可以忽略不计,而热物质的流动起重要作用;提出在地震孕育过程中,当地壳介质非均匀部位的应力积累扩容时,由于扩容区的孔隙压降低并且裂隙增生和相互串通,使扩容区下部的相对高温流体涌入扩容区,即热物质的上涌最初是被动的;一旦热物质涌入扩容区,其所带来的热力学效应一方面使地表浅层产生一些前兆现象(如地壳浅层裂隙的张性活动、地表的隆起、水位下降—回升等),另一方面使介质强度降低,扩容区孔隙压回升而加剧孕震过程的发展。

在降水、地下水诱发前兆异常及其机理研究方面,王吉易等^[30]研究表明,降水、地下水诱发浅层前兆异常,其原因是降水等因素造成地下水动态变化,产生一种作用于地壳岩石的附加流体力;地震前,通过多种流体力作用,引起已经积累较高应力的地壳应力—应力场调整变化,并使岩石强度改变,从而促使与诱发浅层地壳的构造变动,其结果是派生或伴生出地形变、地应力、水化学及地电阻率等多种浅层前兆异常。在降水、地下水的多种周期变化成分中,只有那些能与地壳应力—应变过程产生力学耦合的周期变化,才能调制与诱发出异常。

笔者认为,上述各种机理观点虽不相同,但这些科学假说都是富有启示性的;还存在这样的可能性,即在不同的层位、部位及孕震阶段,其前兆异常有不同的形成机理。

2.2 前兆异常特征相互关系

在前兆异常特征研究方面,一般认为:具有物理基础的各类前兆之间在空间和时间上应有必然的关系,即前兆之间具有协调性;各种前兆一般具有地震越大震前异常越多、分布越广、持续时间越长、异常幅度也较大的共性^[41];相对较深的地震在较远处产生的应变引起的地下水位变化比其它因素引起的水位变化大^[42]。在前兆异常特征时间研究方面,牛安福^[16]研究认为,地震在短临阶段有突变性前兆产生;进一步分析各种突变性前兆特征时指出:突变性变形前兆往往发生在地下流体之前,且不同地区、不同类型地震之前突变性前兆异常的时间具有差异性。突变之后地震发生的等待时间依此临近地震。在前兆异常特征空间研究方面人们认为:地震前兆异常的迁移性在孕震中普遍存在。宋治平等^[43]通过对长期、中短期及短临前兆异常过程迁移的研究,发现长期、中短期、短临前兆异常分别以每年10、100、1 000 km的量级向震中迁移,异常迁移速率不

是线性增加,而是非线性递增;另外,在地震前短临阶段的地表水位异常与震中区的形变特征相一致,且集中在震中附近,如张北地震的地下水宏观异常中,井水位上升与下降或泉水流量增大与减小乃至干枯的井点分布很有规律性,而且地下水位升降方向不同区的分界线,大体上与形变的隆起与沉降分界线吻合,唐山7.8级地震前也观测到类似的情况。在降水、地下水诱发前兆异常方面,王吉易等^[30]研究认为,地下水可以诱发出地形变、地电阻率等前兆异常,且多种诱发异常具有种类的多样性、与降水及地下水变化关系的非线性、发生的周期性和季节性、变化的层次性、时间分布的成丛性、空间分布的大区域性以及多种手段异常变化的时空关联性等特性。在对地下流体异常时空演化数值模拟方面,模拟认为^[35],地震孕育中期阶段,震源区出现膨胀,地下流体异常主要集中在震源区,源兆出现得早,场兆出现得晚;进入中短期阶段,震源区出现大范围膨胀,震源区异常继续发展,异常区不断扩大,在震源区以外出现新的异常值较大的地区。

3 结语与讨论

通过上面对地壳形变与地下水动态异常特征和机理研究方面取得的研究成果进行综述,可以看出,两种异常特征和机理具有一些相同点:如(1)异常过程具有阶段性且时间较长;(2)异常空间广而不均,受构造控制;(3)异常具有时空转移性;(4)异常形式多样;(5)产生异常因素相互作用且相互影响,异常之间具有一定关系。除了这些相同点外,它们也有差异:即(1)地壳形变异常范围较地下水动态异常小;(2)地下水动态异常形式较地壳形变异常样式形变丰富、多样且两者形态不一样;(3)地下水的长期异常主要出现在大震前,而地壳形变异常这种现象不明显;(4)地下水短临异常比地壳形变丰富且明显。

由于地震预报的特殊性以及这些成果大都是定性的和经验性的;同时研究过程中大多是单学科进行的,而与地震有关的前兆异常却是来自于同一物理基础——地壳受力运动,这使得以往的研究成果具有一定的局限性。为此我们认为,在今后的一段时期内,地壳形变与地下水动态异常研究应在以下几方面得到发展:

(1)地壳形变与地下水动态前兆异常都是地震孕育过程中,孕震体受力而产生的前兆现象;这些异常又都是通过地壳而间接反映孕震体孕震信息,如

果只利用单手段异常进行地震预报,就可能出现虚报。所以,加强各学科联系,开展综合异常特征研究就能对各手段异常是否为前兆异常进行相互佐证,大大消除干扰,降低前兆异常的复杂性,获得与地震孕育过程有关的信息,提高前兆异常识别可靠度。

(2)地壳形变与地下水之间既相互作用又相互影响,因而地壳形变与地下水动态异常之间相互联系,地震孕育过程中伴随的地壳形变将引起地下水动态异常,但地下水动态异常也未必都是由地震孕育过程引起的,地下水动态异常既可以是最直接的宏观前兆异常,也可能是影响地壳形变异常的主控因素。所以,判断地壳形变与地下水动态异常是否为前兆异常特别是短临前兆异常,应该加强产生两种前兆异常因素之间的相互作用与相互影响的研究。

(3)在地下水研究方面,由于地下水动态异常在短临阶段较为明显^[8],以及地震预报的社会现实需求,致使人们特别重视地震前兆短临异常研究,从而使人们忽略了地下水中长期异常和研究。但是在实际震例中,7级以上大地震震前1年或更长时间存在中长期趋势异常^[8],更何况地震的孕育是一个长时间的过程,而地下水动态异常被公认能够灵敏地提供许多构造活动过程的信息。为何7级以下地震震前地下水的中长期趋势异常较小或不明显?为何与地下水具有同一产生基础的地形变前兆异常的中长期趋势异常比较丰富和明显?这是令人费解的。为了回答这些问题,为了更深入地了解地震孕育过程以及成功的进行短临预报,必须加强地下水动态异常机理以及中长期异常特征的研究。

(4)从两种异常的差异可以看出,地下水动态异常范围较地壳形变大,如7级以上地震的孕育形变场分布范围不小于300 km^[6],而相同情况下地下水位前兆异常分布范围平均为900 km^[21],而文献^[8]和^[22]认为异常范围通常可达1 000 km。众所周知,地震是地壳受力运动的结果,异常变化受区域构造格局控制^[20],何况目前在地壳形变测量精度方面还是比较高的。那么为何两者异常范围之间差别这么大,这又是一个令人费解的问题。为了解决令人费解的问题、为了认识异常机理,加强各学科联系,开展综合异常特征及机理研究是至关重要的和必须的。

【参考文献】

- [1] Mogi K. Source location of elastic shocks in the fracturing process in rocks[J]. Bulletin of earthquake research institute

- university of Tokyo, 1968, **46**(5): 1 103—1 125.
- [2] Yu S B, Kuo L C, Hsh Y J, et al. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi—Chi, Taiwan, earthquake[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 2001, **91**(5): 995—1 012.
 - [3] 贾化周,等.地下水动态影响因素的清理攻关总结[A].见:地震监测与预报方法清理成果汇编,地下水分册[C].北京:地震出版社,1988.
 - [4] 汪成民,车用太,万迪望,等.地下水微动态研究[M].北京:地震出版社,1988.
 - [5] 大地形变测量清理攻关小组.我国大地形变测量工作的清理研究[A].见:地震监测与预报方法清理成果汇编,大地形变分册[C].北京:地震出版社,1990.
 - [6] 何世海.华北地震场和源地壳形变前兆研究[J].地震,1995, **15**(3): 199—207.
 - [7] 中国地震局监测预报司.1998年张北地震[M].北京:地震出版社,1999.
 - [8] 梅世蓉,冯德益,张国民,等.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993.
 - [9] 李杰,冯志军,马玉香.华北地区跨断层形变中短期异常特征研究[J].地震学刊,2000, **20**(1): 10—18.
 - [10] 牛安福,张雁滨,柯丽君,等.地震前地壳形变异常分布的非均匀性研究[J].地震,1999, **19**(2): 149—154.
 - [11] 陆明勇,牛安福,周峰嵘.强震中短期阶段断层活动时空演化特征的讨论[J].地震,2003, **23**(4): 1—9.
 - [12] 张跃刚,王占勇,李进步.形变有震短临异常的演化特征[J].华北地震科学,2000, **18**(2): 35—39.
 - [13] 高福旺,刘北顺.首都圈体应变变化特征与6级地震的关系[J].中国地震,1999, **15**(4): 370—376.
 - [14] 乔子云,马兴国.应力应变短临跟踪预报方法的研究[J].华北地震科学,2000, **18**(1): 49—52.
 - [15] 牛安福,张晶,高福旺,等.地壳形变加速变形与地震关系的研究[J].大地测量与地球动力学,2002, **22**(1): 29—33.
 - [16] 牛安福.地壳形变的突变性与地震短期预报[D].中国地震局地球物理研究所,2000.
 - [17] 陈绍绪,刘素英.地震组的地壳形变异常[J].地震形变与地震,1993, **13**(1): 47—51.
 - [18] 陈绍绪,张跃刚,平建军,等.地震前兆形变场研究[J].地震,2001, **21**(1): 7—13.
 - [19] 许昭永,杨润海,赵晋明,等.岩石破坏前的短临应变前兆研究[J].地震研究,2001, **24**(3): 191—196.
 - [20] 黄辅琼,邓志辉,顾瑾平,等.张北地震地下流体异常场的研究[J].地震,2002, **22**(4): 114—122.
 - [21] 国家地震局预测预防司.地下流体地震预报方法[M].北京:地震出版社,1997.
 - [22] King C Y, Azuma S, Igarashi G, et al. Earthquake—related water—level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan[J]. J. Geophys. Res., 1999, **104**(B6): 13 073—13 082.
 - [23] 黄辅琼,王吉易,杨文政.张北—尚义地震前地下流体异常特征分析[J].地震,1998, **18**(4): 358—366.
 - [24] 陈学忠,王晓青,李志雄,等.强震前水气异常台站时空分布非均匀变化[J].地震,2000, **20**(1): 38—44.
 - [25] 刘耀炜,施锦.强震地下流体前兆信息特征[J].地震学报,2000, **22**(1): 59—64.
 - [26] 刘耀炜,施锦,曹玲玲,等.水化学参量中短期异常识别方法及效能评价[J].地震,2000, **20**(增刊): 97—106.
 - [27] 刘耀炜,张元生.共和7.0级地震前地下流体前兆的动态演化特征[J].西北地震学报,1998, **20**(1): 59—64.
 - [28] 平建军,张之广,陈建国,等.华北地区地下流体的两类短期前兆异常[J].西北地震学报,2003, **25**(2): 253—257.
 - [29] Chia Y, Wang Y S, Chiu J, et al. Changes of groundwater level due to the 1999 Chi—Chi earthquake in the Choshui river alluvial fan in Taiwan[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 2001, **91**(5): 1 062—1 068.
 - [30] 王吉易,宋贯一,曹志成,等.地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题[J].华北地震科学,2002, 2003, **20**(2): 28—41, **20**(3): 1—13, **21**(1): 1—10.
 - [31] Ge S, Stover S C. Hydrodynamic response to strike— and dip—slip faulting in a half—space[J]. J. Geophys. Res., 2000, **105**(B11): 25 513—25 524.
 - [32] 陆明勇.现有孕震模式的研究及其修正[J].地壳形变与地震,1995, **15**(4): 8—14.
 - [33] 车用太,刘五洲,鱼金子,等.井水位对地壳应力—应变响应灵敏度的研究[J].地震,2003, **23**(3): 113—120.
 - [34] Sato T, Sakai R, Furuya K, et al. Coseismic spring flow changes associated with the 1995 kobe earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 2000, **27**(8): 1 219—1 222.
 - [35] 张慧,梁子彬.坚固体孕震模式下地下流体异常时空演化的数值模拟[J].地震学报,2000, **22**(2): 176—182.
 - [36] 孙君秀,刘五洲,车用太.地下水对震源体应力、应变场的影响——以唐山地震为例[J].地震地质,2000, **22**(2): 179—186.
 - [37] 刘五洲,孙君秀.地下水在地震前兆应力场演化过程中的作用[J].地震,2000, **20**(4): 12—18.
 - [38] Kitagawa Y, Koizumi N. A study on the mechanism of coseismic groundwater changes: interpretation by a groundwater model composed of multiple aquifers with different strain responses[J]. J. Geophys. Res., 2000, **105**(B8): 19 121—19 134.
 - [39] 车用太,刘五洲,鱼金子,等.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,2000, **22**(1): 93—101.
 - [40] 张永仙.热应力三维数值模拟研究及热物质的运移在地震孕育过程中的作用探讨[D].中国地震局地球物理研究所,1999.
 - [41] 焦明若,张国民.地震前兆复杂性成因机理研究的讨论(一)——地震前兆复杂性的表现形式[J].地震,1998, **18**(1): 14—19.
 - [42] Koizumi N, Kitagawa Y, Takahashi M, et al. Changes in ground water level and crustal strain in and around the Kinki district related to the 2001 Geiyo earthquake[J]. Earthquake, 2002, **55**(2): 119—127.
 - [43] 宋治平,尹祥础,梅世蓉.地震前兆异常迁移速率的非线性变化特征及其力学解释[J].地震,1996, **16**(4): 372—376.