Are there earthquake precursors that can lead to useful predictions?

“是否存在有助于预报的地震前兆”的讨论

刘杰^{①*}, 张国民^②

① 中国地震台网中心, 北京 100045;

② 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

* 联系人, E-mail: liujie@seis.ac.cn

2016-02-17 收稿, 2016-04-01 修回, 2016-04-01 接受, 2016-06-12 网络版发表

国家自然科学基金(41404043)资助

摘要 经过几十年地震预报探索实践, 已发现了很多地震前兆异常, 其中部分前兆还通过了优秀地震前兆标准的检验, 并分析总结了前兆异常的群体特征. 但用这些前兆异常, 通过经验性统计方法进行地震预报成功率很低, 其根本原因是地震孕育、发生的空间尺度较大, 前兆异常的挑选较为困难; 地震复发周期较长, 已积累的震例资料不足于研究地震孕育发生的规律; 地震的孕震环境复杂, 与周边的动力、构造环境密切相关, 不同地震之间前兆异常差异较大; 前兆观测分布在地球表面, 只是地下应力、应变的间接反映, 所获取的异常与地震前兆关系有待深入研究. 在目前情况下, 下一次地震完全按统计得到的共性特征演化明显是不可能的. 地震前兆观测应从单点观测向直接观测地下应力、应变场过渡, 地震预报从经验性统计预报向基于地球物理场动态观测的物理预报过渡.

关键词 地震前兆, 前兆的遴选与评价, 统计预报, 物理预报

美国 *Science* 杂志在创刊125周年之际, 公布了125个最具挑战性的科学问题, 发表在2005年7月1日出版的专辑上, 其中第55个问题是“是否存在有助于预报的地震前兆?”. 该问题指出: 20世纪70年代以来, 人类一直期望能发现临震的前兆, 虽然对断层的研究取得了进展, 但日常地震预报并没有取得实质性突破.

经过几十年地震预报探索实践, 国内外已发现了很多地震前兆现象, 尤其是震后对震前各种观测资料的分析^[1-3], 但是这些前兆现象能否在以后的地震预测中应用却是另一个问题. 利用观测到的前兆异常进行地震预报研究和实践经历了高潮到低潮的过程, 这是一个充满争议、失败和少量成功的过程^[4,5], 而且, 社会需求强烈, 从事地震预报的人员精神压力很大. 本文不准备对具体的观测现象或事件是否是地震前兆进行讨论, 而从整体角度对地震

前兆现象进行解读, 在此基础上探讨地震前兆用于地震预报存在的困难和问题.

1 地震前兆的遴选与评价

地震前兆(earthquake precursor)是指地震前出现并预示地震将要发生的现象. 对地震前兆的含义目前有不同的理解: 一种理解地震前兆是确定性的, 应来自震源, 称为狭义前兆; 另一种理解认为地震孕育、发生是一个复杂过程, 影响因素很多, 伴随这一过程有许多异常现象, 把这些与地震孕育、发生相关联的有别于正常变化背景的异常变化称为地震前兆(或广义前兆). 广义前兆包含有狭义前兆, 本文讨论广义地震前兆.

迄今已观测到的震前异常现象并在实际预报中试验的前兆方法至少有数十种, 并且新方法仍在增加^[6-9]. 大致可分为如下几类. (1) 地壳形变(包括重

引用格式: 刘杰, 张国民. “是否存在有助于预报的地震前兆”的讨论. 科学通报, 2016, 61: 1988–1994

Liu J, Zhang G M. Discussion on “Are there earthquake precursors that can lead to useful predictions?” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1988–1994, doi: 10.1360/N972015-01261

力、GPS)异常. 主要包括变形方式和力学状态异常, 监测手段包括水准、基线、GPS、重力、应力和应变等观测. 地震是地壳形变发展到一定阶段的结果, 地壳运动所产生的, 无论是水平位移还是垂直位移, 都可能与地震有关, 但震前各阶段的形变表现并不一样, 最显著的现象是形变速度的增加和方向的改变. (2) 地震活动和地震波参数异常. 地震活动异常主要包括地震活动在时间、空间和强度方面显示的异常, 其依据观测台网记录的地震, 常见异常有地震空区、背景性地震活动增强或减弱、前震活动、 b 值等; 地震波参数异常主要是显示震源和介质物性的异常变化, 是通过地震记录提取的震源和介质参数变化, 常见有震源机制一致性、介质波速和尾波 Q 值异常等. (3) 电磁和卫星遥感异常. 电磁异常包括两类: 一类是电磁属性的异常, 如电阻率等; 一类是场量异常, 如地电场、地磁场以及与地震有关的电磁扰动场的异常等. 卫星遥感异常是基于卫星观测资料得到的异常, 如热红外异常等. (4) 地下水位和化学成分异常. 由于地下水对地壳应力场变化比较敏感, 所以地震前后地下水出现的异常情况很多, 包括地下水位、泉水流量、水温 and 地下水化学成分异常. 此外, 由于地下水变化, 可以引起一些宏观现象, 如井、泉、河水面上涨和下降, 甚至干枯; 水发浑、冒泡、变味等; 可能引起植物反常变化或树木干枯等. (5) 地声、地光异常. 地声包括人耳听到的和仪器记录到的, 主要是由于岩石的结构、构造及其所含的地下流体、气体运动变化造成声音; 地光主要是指地面或低空由于地壳运动造成的自然发光现象. (6) 动物习性异常. 动物异常的原因很多, 地声、地下水、气压、地温、电场、磁场、空气电离等变化都是可能的原因. 由于上述这些异常与地震间关系不是一一对应的, 所以并非必然是地震前兆, 而只是可能的地震前兆, 需要通过大量地震前观测的对比来判断.

为在全球推动地震预报、地震前兆以及地震孕育过程等研究的深入, 在“国际减灾十年”活动(1990~1999年)中, 国际地震学和地球内部物理学联合会(International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior, IASPEI)发起征集、推荐和评选优秀地震前兆震例的活动^[10-12]. 该活动分别在1991和1997年进行了两轮征集, 共对40项提名的前兆现象评审. 这项活动给出的优秀地震前兆标准.

(1) 确切的判据. 提出的前兆必须满足下述判

据: ① 观测到的异常必须和应力、应变或导致地震的机制有关; ② 异常必须在多于一个仪器或一个地点上观测到; ③ 观测到的异常幅度必须与主震距离有关. 假如在靠近主震处没有异常, 而异常在远处观测到, 则必须提出灵敏点观测的独立证据; 假如在一个对前兆特别灵敏的地点观测到异常, 那么它必须充分地观测到潮汐或其他形变. ④ 为估计研究方法的有效性, 需要讨论危险区(异常区)与整个监视区, 在时空尺度的比例关系.

(2) 资料. 为支持候选前兆所提供的资料, 必须包括: 所有有关观测点的严格位置, 观测到异常的时间以及与前兆有关的主震位置、时间、震级和机制; 仪器安装和运行条件的细节; 观测点上有关的环境条件记录(温度、大气压力和降水等)、仪器标定和测量到的构造信号必须有说明力. 要详细提供说明异常的原始或简化过的资料和图表. 如有必要, 要提供原始记录或复印件. 要明确解释资料处理的步骤. 还应注明建台、仪器特征变化和环境变化的日期. 要解释由于资料收集和分析疏忽引入的可能误差估计, 资料不连续的原因以及资料处理的准则; 需要提供长期资料记录, 以便评估长期的讯号和噪声.

(3) 异常检测. 要精确指出异常的定义, 建台后的正常值, 正常值和异常的差别要定量表达; 要讨论信噪比. 对负证据(例如在近地震震中处反而没有观测到异常)要加以讨论.

(4) 异常与其后主震的关系. 要严格指出一个假设异常和假设地震相联系的原因或判据. 异常的定义和相关判据应从观测资料组中获得, 否则, 也可用物理理论去定义异常及相关的判据. 要讨论虚报(类似的异常没地震发生)和漏报(类似大小的地震前没有异常)的次数. 要比较前兆异常与同震异常的大小及原因; 要给出靠近观测点发生的重要地震的完整目录, 以便评估与其他地震关系.

经过两轮评估, IASPEI下属地震预报分会给出了5项接受的前兆异常, 其中前3项是地震活动图像: 前震(震前数小时至数月)、前兆地震(震前数月至数年)和强余震前的地震平静. 第4项是地下水性质: 地下水的氢含量增高和温度降低. 第5项是地壳形变: 地下水位上升(由水位标识的地壳形变).

一些主震前在震中区会发生前震或前震序列(如1975年辽宁海城7.3级地震的前震序列), 震中区附近会出现前兆地震(或称为前兆震群), 地下水也会出现

一些变化,这些前兆现象在震后的震例总结时是比较明确的,也可以通过上述标准进行验证.但正如地震预报分会主席Wyss教授指出的,如果未来再出现类似现象,如何用这些前兆异常进行地震预报?此外,不是每次地震前都出现类似前兆现象,以前震序列为例,在主震前出现的百分比为10%左右,即大部分主震前无前震序列.地下水异常在主震前有很多震例中观测到,但即使是对同一个地震的观测,一些观测点的地下水出现异常,而与其相邻的其他同样观测却没有发现异常.因此,地震预报分会报告指出:不能保证已接受的前兆能被用于地震预报,同样,一些没被接受的前兆在地震预测中不一定不能应用.目前我们对地震前兆及其在预报中的应用尚在探索之中.

与提取单个优秀前兆同步进行的是前兆异常的群体分析^[13,14],各国科学家通过建立的地震、形变、电磁、地下流体观测台网,积累了大量震前异常,仅中国大陆就有数百个5级以上地震震例和数千条前兆异常.基于大量实际资料的积累和一系列震例总结,对前兆异常一些共性特征取得如下认识.

(1) 两种不同形态的前兆异常:一种是持续时间在数月至几年的趋势性异常,它具有缓慢而稳定变化的特点;另一种是在震前短时间内(数小时至十多天)出现的突发性异常,它具有快速变化的特点.前者被称为中长期异常,后者被称为短临异常,IASPEI挑选的前兆大多数是后者.

(2) 前兆异常的明显程度随震级增高而增大.震级越大,则震前的前兆异常种类、异常项目越多,异常百分比越大,异常范围越广,且趋势异常的持续时间越长.一般来说,异常的持续时间、范围与震级呈统计上的对数关系.

(3) 前兆异常空间分布的不均匀性.既在震中附近有一定的集中性,又受发震构造的影响,沿构造带分布.由于异常空间分布的构造影响,故异常幅度与震中距关系比较复杂,但总体上仍有震中附近异常大,并随震中距加大而衰减的趋势.异常幅度与震级关系更复杂,多数情况下震级大异常幅度也大.

(4) 前兆异常的时空转移特征.在部分7级以上大震前,中期趋势前兆异常有震中向外扩展的趋势,短临前兆异常有外围向震中迁移的趋势.

(5) 前兆异常特征与地震的成因类型相关.含有较多破裂成分的断错型地震比沿均匀构造发生的黏

滑型地震的异常多、数量大、异常范围广.

不论是单个前兆的遴选还是前兆异常的整体分析,20世纪80~90年代地震学界的相关研究是比较活跃的,对基于前兆观测应用经验性统计方法进行地震预测比较乐观,在日本、中国还出现一些标准化的程式用于实际地震预测工作^[14~16].但进入21世纪以来,发生了一系列地震,造成大量人员伤亡和巨额经济损失,这些地震几乎都是在毫无预报的情况下发生的,而在科学家预测的一些地区,地震却迟迟没有发生.正如前美国地震学会会长、加州地震预报评估委员会主席克拉伦斯·艾伦在评定地震预报进展情况时所说,地震预报的进展比初期预料的缓慢得多,地震预报的科学难度要比原先预料的困难得多.地震前兆的遴选虽然是开放的,但进入21世纪后国际上尚未组织过相关活动^[17~19].

2 地震前兆预报地震存在的困境

(1) 地震孕育、发生的空间尺度较大.地震发生后给出的震中位置是指地震破裂起始点的位置.地震破裂是有一定大小的,震级与破裂尺度是对数关系,如6级地震破裂尺度为几十公里,7级地震上百公里,8级地震可达数百公里.一般情况下,地震前兆所位于的地震孕震区是破裂尺度的2~3倍.这样对大地震来说,涉及的范围就相当大,仅在震中附近寻找前兆异常是不合适的,如2008年四川汶川8.0级地震,发生在龙门山断裂带中、北段,地震造成的震源破裂尺度可达300 km.虽然在龙门山断裂带发现的前兆异常数量很少,但在川滇交界地区出现的大量异常是否与汶川地震有关,就是一个值得讨论问题.而2001年青海昆仑山口西8.1级地震的震源破裂尺度超过400 km,可能整个青藏高原观测到的异常都与之有关.在如此大范围震前是可以找到相当多的前兆异常,但在震前用这些异常进行地震预报是十分困难的.由于震中破裂区出现较强闭锁,前兆现象往往出现在外围,考虑到大震的孕震尺度较大,这常导致将一个前兆以集中区为标志分解成2个或多个中强地震的前兆异常来考虑,如汶川地震前将前兆异常分别归到南部的川滇交界东部危险地区和北部的川甘青交界危险地区,而前兆异常较少的龙门山地区没作为危险地区,导致汶川地震的预测失败.

(2) 地震孕育、发生的时间较长.一个大地震从孕育到发震所经历的时间(也称复发周期)是相当长

的, 发生在我国陆区的7级以上大震的复发周期往往达数百年乃至千年, 汶川8级地震的复发周期达数千年. 据统计, 一个地震的应力积累从线性到非线性, 出现前兆异常的时间可能是其复发周期的百分之几. 如前所述, 一方面, 前兆异常是在基于正常背景变化上挑选的, 对5、6级地震, 由于其复发周期较短, 在数年或十年尺度上还可以通过对比寻找前兆异常, 但对7、8级地震, 其可能从观测资料开始, 就处于异常变化阶段. 这为地震学家对地震孕育、发生全过程的监测和前兆异常的捕捉带来很大难度, 如汶川地震前龙门山断裂带中、北段及附近数年甚至数十年前兆异常现象很少, 这可能与断层已处于高度闭锁状态有关, 显著的异常平静也是一种前兆, 但由于观测资料时间长度所限, 是无法区分其是正常还是异常. 另一方面, 由于大地震复发周期很长, 与实验室里岩石破裂实验观测不同, 在观测资料的时间范围内, 很难观测到同一地区的重复地震; 而不同地区发生的地震, 由于地下介质结构差异较大, 要得到完全类似的前兆现象几乎是不可能的. 因此, 在短期内积累足够多的震例资料并揭示其地震孕育发生的规律也是非常困难的. 我们目前发现的很多前兆异常都是基于中强地震得到的, 对于7级以上大地震前兆现象的积累是不够的, 这也导致我们对中强地震预测有时会有一定察觉, 而对大地震的预测结果就比较差^[13,19].

(3) 地震孕育、发生与周边的动力、构造环境密切相关. 地震的孕育和发生是在复杂的地壳深部环境中, 在复杂的动力作用下, 如其边缘板块的挟持挤压、局部地幔对流及环境动力因子作用, 以及断层带和地质构造地块之间相互作用下的构造活动自组织演化过程. 一个典型现象是一个地震区的强震活动往往呈现整体平静、密集活跃交替出现. 这样, 所观测到的地震前兆变化可能不仅仅是某一个地震孕育、发生的表现, 而是强震成组活动及其相互作用过程的总体显现. 如美国Parkfield地区6级地震复发周期统计平均是22年, 但预计1988年前后发生的地震, 延迟16年于2004年才发生^[20-22]. 一种可能的解释是期间Parkfield周边发生几次较大地震, 它们对Parkfield的应力积累起到一定卸载作用. 由于这种复杂的动力作用, 会给该地区上次地震与这次地震的前兆异常带来差异. 对这种复杂的地球物理过程, 人们还知之甚少, 目前所提出的一些地震成因理论和地震孕

育模式, 都还只是在最简化条件下的物理抽象, 尽管在不同程度上勾画了地震成因的图像, 但离科学揭示地震孕育、发生规律还有很大的距离.

(4) 前兆观测分布在地球表面. 一方面, 地震一般发生在地壳内部10~20 km之下, 目前人类还不能进入地球内部去安装仪器直接观测震源的孕育发展过程及其前兆现象. 当前只能在地球表面及地球浅层利用数量有限、分布相当稀疏的台网进行前兆观测, 通过某些理论推广到地下震源处的, 并没有实际观测资料证明这种推论是否正确. 另一方面, 地震学家一直尝试将前兆观测成网分布, 得到某种地球物理参数的成场分布, 采用类似CT成像方法来进行地震预报. 如利用地震台站得到的P、S波到时数据, 进行地下介质的波速结构分析, 但由于不同时段发生的中小地震位置不同, 所得到的波速结构的差异是否由地震位置引起存在一定争议. 目前还进一步发展用台站对的噪音记录进行面波速度结构成像, 人工可控源主动观测等, 但这些结果的误差现在都比较大, 尚没有较好的震例. 同样的问题也存在GPS和卫星遥感观测中. 但不可否认, 这种将前兆观测网得到的某些具有一定物理含义的参数成场化, 并与地震孕育的应力、应变联系起来, 无疑比直接用前兆观测的时序曲线异常变化报地震, 可能在未来的预测工作中更有价值. 此外, 地震预测急需从震源处得到直接的观测信息, 如天气预测, 如果仅用地表气象台站得到的观测结果, 而没有高空大气中的实际观测和卫星的大范围实时动态资料作支撑, 气象短临预报不可能取得现在的成效. 因此, 目前利用这些在地表获取的很不完善、很不充足、有时还是很精确的资料去探测和反演地壳深部的震源过程、寻找前兆现象显然困难重重.

(5) 前兆与异常的关系. 如前所述, 目前我们所获取的地震前兆是基于对地震成因过程的认识, 通过统计检验得到的地震异常现象. 由于地震成因研究还比较初步, 一般是对提取的前兆异常通过岩石实验、数值模拟等方式进行物理解释, 因此, 异常的统计检验在前兆的确定中占有重要位置. 但满足统计检验的异常与地震是否一定存在关系, 也是值得讨论的, 这正是统计方法的缺陷. 实际上产生这些异常的原因是多因素的, 既有与地震相关的因素, 也有其他的与应力场变化、人为干扰活动等相关的因素. 一些异常变化通过现场核实可以排除与地震孕育有关, 但有些

变化,如应力场扰动引起的前兆异常,是很难与地震应力积累产生的异常区分开的,因此,应用这些异常预测未来地震,其效能非常有限.从另一个角度讲,利用现象研究,而缺乏从物理本质上研究震前的应力、应变场变化,只是地震预报的先期阶段,只有进行更深入探索并揭示地震孕育、发生过程的科学规律,从中提取前兆异常才能使地震预报上一个新的台阶.

3 讨论与展望

经过数十年对大量地震震例分析,发现很多地震前兆异常,但用这些前兆异常,通过经验性统计方法进行正向地震预报,目前虽然有个别成功例子,但大部分地震尤其是大地震的预报,成功率很低.其根本原因是我们对地震孕育发生的科学规律缺乏认识,其中也包括对孕震过程的科学信息(即地震前兆)的认知.地震的孕震环境复杂,包括地震孕育发生的构造条件、动力背景、应力积累途径、震源破裂失稳方式等差异较大,要求下一次地震完全按统计得到的共性特征演化明显是不可能的,因此,依据前兆异常对下次地震预报的成功率就比较低.此外,目前积累的震例多是中强地震,得到的统计规律对预测中强地震较好,而对大地震或复发周期较长的地震偏离较大.对于一些特大地震,目前积累的震例很少,对其规律性认识更少,预报成功的可能性更低.因此,地震预报目前尚处于经验预报的探索阶段,仅能依

靠前兆观测对那些震前前兆异常显现程度较高的地震作出一定程度的预测,地震预报并没有取得实质性突破,实现日常地震预报的路还很长.

对地震孕育、发生过程中地震前兆的观测和研究是地震预报的科学核心之一.地震前兆的研究包括在孕震过程中各学科前兆场动态演化特征及其与未来地震的内在联系,与地震孕育发生的动力学成因、地震破裂失稳的物理力学机制相联系的地震前兆机理等的探索研究.目前基于地表台站观测到的地震前兆只是地下应力、应变的间接反映,而且分布零星,没有统一形成相关物理场的分布,这为前兆异常的解释和地震预报带来很多不确定性.地震前兆观测应从单点观测向直接观测地下应力、应变场过渡,地震预报从经验性统计预报向基于地球物理场动态观测的物理预报过渡.在前兆观测中研发、应用高新技术,实现前兆观测技术的进步是地震前兆研究和地震预报科学发展的基本保证.20世纪末以来,国内外迅速发展的空间对地观测、地震专用卫星、地震数字化观测技术、人工可控震源主动观测技术等为全过程、高密度、大动态、宽覆盖、多学科、多参数的地震前的综合观测提供了重要的技术支撑,也为获取构造变形场、应力-应变场、地球物理场、地球化学场等四维动态图像创造了重要条件,这可能是实现地震预报更好途径.因此,从这一意义上看,地震前兆观测研究和地震预报探索正面临着新的机遇.

致谢 优秀地震前兆标准出自Wyss(1997)文章,翻译引自傅征祥教授,在此表示感谢.感谢审稿人对本文提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 Compilation Group of 1976 Tangshan Earthquake, State Seismological Bureau. The 1976 Tangshan Earthquake (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1-458 [国家地震局一九七六年唐山地震编写组. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1-458]
- 2 Zhu F M, Wu G. 1975 Haicheng Earthquake (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1-220 [朱凤鸣, 吴戈. 一九七五年海城地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1-220]
- 3 Ma Z J, Fu Z X, Zhang Y Z, et al. Nine Major Earthquakes of China in 1966-1976 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1982. 1-216 [马宗晋, 傅征祥, 张颖珍, 等. 1966-1976 年中国九大地震. 北京: 地震出版社, 1982. 1-216]
- 4 Chen Y T. Earthquake prediction: Retrospect and prospect (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39: 1633-1658 [陈运泰. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1633-1658]
- 5 Hough S. Predicting the Unpredictable: The Tumultuous Science of Earthquake Prediction (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 1-176 [苏珊·霍夫, 著. 梁春涛等, 译. 测不可测: 大起大落的地震预测研究. 北京: 科学出版社, 2015. 1-170]
- 6 Mei S R, Feng D Y, Zhang G M, et al. Introduction to Earthquake Prediction in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 1-498 [梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 1993. 1-498]

-
- 7 Zhang Z C, Zheng D L, Luo Y S, et al. Preliminary research of precursory data in “Earthquake Cases in China” (in Chinese). *Earthquake*, 1990, 10: 9–24 [张肇诚, 郑大林, 罗咏生, 等. 《中国震例》前兆资料的初步研究. *地震*, 1990, 10: 9–24]
 - 8 Kisslinger C, Suzuki Z. *Earthquake Precursors*. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1978. 296
 - 9 Rikitake T. Earthquake precursors in Japan: Precursor time and detectability. *Tectonophysics*, 1987, 136: 265–282
 - 10 Wyss M. Evaluation of Proposed Earthquake Precursors. Washington DC: American Geophysical Union, 1991. 94
 - 11 Wyss M. Second round of earthquake of proposed earthquake precursors. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 3–16
 - 12 Wyss M, Booth D C. The IASPEI procedure for the evaluation of earthquake precursors. *Geophys J Int*, 1997, 131: 423–424
 - 13 Zhang G M. *Selected Research Papers on Earthquake Prediction* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2013. 1–623 [张国民. *地震预测科学研究论文选*. 北京: 地震出版社, 2013. 1–623]
 - 14 Chen Z L, Li Z X. *Scientific Principles and Logical Thought in Earthquake Prediction* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2013. 1–202 [陈章立, 李志雄. *地震预报的科学原理与逻辑思维*. 北京: 地震出版社, 2013. 1–202]
 - 15 Asada T. *Earthquake Prediction Techniques: Their Application in Japan*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1982. 317
 - 16 Press F, Brace W F. Earthquake prediction. *Science*, 1966, 152: 1575–1584
 - 17 Chen Y T. Introduction to earthquake prediction (in Chinese). *J Seismol*, 1993, 10: 17–23 [陈运泰. 地震预报研究概况. *地震学刊*, 1993, 10: 17–23]
 - 18 Ding G Y. Earthquake prediction and active fault segmentation. *J Seismol*, 1993, 10: 8–10 [丁国瑜. 地震预报与活断层分段. *地震学刊*, 1993, 10: 8–10]
 - 19 Zhang G M, Yin J Y. Development prospect on earthquake prediction research (in Chinese). *J Disaster Prevent Mitigat Eng*, 2003, 23: 83–90 [张国民, 尹京苑. 地震预报研究的发展展望. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23: 83–90]
 - 20 Bakun W H, Lindh A G. The Parkfield, California earthquake prediction experiment. *Science*, 1985, 229: 619–624
 - 21 Simpson R W, Schulz S S, Dietz L D, et al. The response of creeping parts of the San Andreas Fault to earthquakes on nearby faults: Two examples. *Pure Appl Geophys*, 1988, 126: 665–685
 - 22 Lindh A G. Success and failure at Parkfield. *Seism Res Lett*, 2005, 76: 3–6

Discussion on “Are there earthquake precursors that can lead to useful predictions?”

LIU Jie¹ & ZHANG GuoMin²

¹ China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

² Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

In the past tens of years, many earthquake precursors were detected in the earthquake prediction exploration. And some of the precursors have passed the evaluation criterion of proposed earthquake precursors. Also the group characteristics for these proposed precursors were summarized. However, the earthquake prediction based on these precursors together with empirical statistical methods is not very successful. We consider that the reasons are as follows: (1) precursors are hard to select for each specific earthquake because of the large scale of the seismogenic zone; (2) the precursor observations on the existed earthquake cases are too short compared to the long recurrence time; (3) the seismogenic environment is complex and closely related to the dynamics and tectonic backgrounds, which caused the large differences of the precursory anomalies for each earthquake; (4) the precursory anomalies are observed on the surface of the earth. And they give only indirect reflection of the stress or strain changes in the deep area. The relationship between the observed anomalies and the precursors of earthquakes still needs be investigated in detail. Therefore, it is clear that the earthquake does not exactly follow the statistical behaviors summarized so far. We need direct measurements of underground stress/strain state for capturing earthquake precursors, instead of the measurements at individual sites. Earthquake prediction also need rely on physical models based on spatial-/temporal- dependent physical field, instead of empirical and statistical approaches.

earthquake precursor, selection and evaluation of precursors, statistical prediction, physical prediction

doi: 10.1360/N972015-01261

刘杰

1965 年 8 月出生，理学博士，中国地震台网中心研究员。长期从事地震预报工作，曾担任中国地震局全国地震形势和 7 级大震短临跟踪专家组组长，负责全国年度地震趋势判定、地震形势的短临跟踪、突发震情的快速判定和地震现场分析预报。参加过四川汶川 8 级地震、云南孟连和四川芦山 7 级地震以及多次 6 级地震的现场工作。研究领域包括地震预测、地震危险性评估、数字地震学、地震动力学模型等。