

2008 年汶川 8.0 级地震对地震预测研究的启示思考^{*}

邵志刚, 王 芑

(中国地震局地震预测研究所, 中国地震局地震预测重点实验室, 北京 100036)

摘要:2008 年汶川 8.0 级地震已经过去 10 年, 在此期间关于地震预测相关的基础研究和实践工作从未停止, 本文作者从地震预测业务人员角度, 分析了 2008 年汶川 8.0 级地震相关的地震地质、大地测量、地震学、前兆观测异常等方面的现象。针对不同研究方向, 从震情跟踪角度提出了预测意义的讨论、可能问题的分析、不成熟的一些建议, 并就综合预测给出了一些粗浅的思考和认识, 期望对地震预测预报工作起到抛砖引玉的作用。

关键词:汶川 8.0 级地震; 地震预报; 地震研究

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3274(2018)02-0001-10

引言

2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分, 四川汶川发生 8.0 级地震, 该地震是 1976 年唐山大地震后中国再次遭受如此严重的地震灾害。在此次地震后, 地学界开展了大量研究工作, 并进一步加强地震预报实践过程中长中短临多路探索的实际工作, 具体包括“中国大陆 7、8 级地震危险性中-长期预测研究”专项工作(简称 M7 专项)、中国大陆 2016—2025 年地震重点危险区判定工作、中国大陆长期地震重点危险区发震紧迫程度判定工作、年度地震重点危险区判定工作、7 级强震跟踪工作等。10 年来积累了可能用于地震预测的相关观测现象、技术方法和科学认识, 本文试图围绕地震预测实践过程所面临的诸多问题展开讨论, 希望能起到抛砖引玉的作用, 期望地学界越来越多的研究者能关注中国的地震预测预报事业。

1 地震地质

汶川 8.0 级地震发生在巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带中北段, 是典型大陆内部推覆型逆冲地震。龙门山断裂带是由平行的 3 条走向南西的断裂组成, 从西往东依次为汶川—茂县(后山)断裂、映秀—北川(中央)断裂、灌县—江油(前山)断裂^[1]。汶川地表同震

^{*} 收稿日期: 2018-02-01; 修改回日期: 2018-03-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500501)

作者简介: 邵志刚(1977-), 男, 山东临沂人, 研究员, 主要从事地球动力学与地震活动性等研究。

破裂考察结果表明,此次地震造成地表破裂长度可达 240 km,地表位错表现为逆冲兼右旋走滑,垂向逆冲位错 4~6 m,水平右旋位错 3~5 m,同震地表破裂主要发生在中央断裂,然后是前山断裂,特别值得注意的是连接中央断裂和前山断裂中间存在近东西向的小鱼洞同震位错^[2,3]。

记录到此次汶川 8.0 级地震的同震资料较多,包括 GPS 和 InSAR 记录到的同震地表位移、地震仪记录到的速度、强震仪记录到的地表加速度,以上述资料为约束得到同震位错或同震破裂过程的反演结果^[4~9]。同震位错或破裂过程结果表明,破裂过程持续时间约 110 s 左右,总体上显示出 3~4 次子事件,最大同震位错约 10 m 左右;破裂过程形成了两个最大位错集中区,分别与地表破坏最为严重的两个区域,即都江堰—映秀及北川—青川段相对应;同震位错显示出显著的分段特征,即以绵竹为界,西南段以逆冲错动为主,而北东段则显示出右旋走滑破裂特征。

龙门山断裂带是青藏高原与华南地块边界构造带,经历过复杂的地质演化历史^[10],晚第四纪以来龙门山断裂带是由 3 条具有强震发生能力的主干断裂组成^[11]。地震地质研究结果表明,万年时间尺度断层滑动速率不超过 3 mm/a,此次汶川 8.0 级地震前的历史记载和现代仪器仅记录到数次 6 级地震活动^[12,13]。而根据地震地质考察和此次汶川 8.0 级地震最大同震位移,在龙门山断裂带发生类似汶川 8.0 级地震的复发周期为 2000~6000 年^[11]。因此,从地震地质角度来讲,此次汶川 8.0 级地震孕育发生特征是累积速率低、复发周期长、释放能力强等^[11],在中国大陆内部具有一定的代表性。

对于地震预测来讲,地震地质的研究结果是非常重要的基础研究资料,其原因主要是:① 地震地质相关研究可以为强震地点预测提供基本的构造背景,例如,对于中国大陆强震孕育环境最重要的研究进展是中国大陆地区 100% 的 8 级以上地震均发生在活动地块边界带上,80% 以上的 7 级地震也发生在活动地块边界带上^[14,15];② 地震地质可以为断层段发震能力分析提供最直接的研究依据,通过断层分段研究给出具体断层段的发震能力、凹凸体分布等;③ 地震地质相关研究是开展长期预测研究的最基础资料,对于长期地震预测来讲,基于强震复发周期、上次强震离逝时间、强震离逝率、强震孕育阶段等研究结果是长期地震预测非常重要的组成部分;④ 地震地质还是开展相关研究的重要基础研究资料,例如,地震地质研究给出的具体断层三维几何性质、最近地质年代平均断层速率、断层变形特征等研究结果,是利用反演、数值模拟等方法开展现今断层运动、断层应力、级联破裂等研究工作中断层模型构建的关键研究基础。客观来讲,汶川 8.0 级地震后中国大陆地区该方面工作取得众多研究积累,其重要性越来越得到重视,但从地震预测需求来讲,仍有很多值得改进或弥补的空间;例如,由于中国大陆强震与活动构造间关系的复杂性,以及对地震活动构造研究与认识的不足,导致近年来很多 6.5 级以上地震,甚至 7 级地震发生后,地震系统仍然难以找到并确定其发震断层。

对于震情预测与跟踪,我们需要构建中国大陆整体和主要构造区的统一结构模型和变形模型。建立与强震孕育发生相关的三维区域结构立体模型,具体包括广义速度模型、构造演化模型、地块模型、断层模型,为强震相关的数值模拟、反演、理论分析、综合预测、强地面运动等提供相应基础数据资料;构建中国大陆整体和主要构造区的统一变形模型,板块边界、活动地块、主要构造带和具体断层段的变形模式是分析中国大陆地壳变形和强震孕育发生的主要研究基础。主要包括:现今板块边界作用方式及其对地壳变形的影响、

现今壳幔深部动力作用方式及其对地壳变形影响、现今活动块体细化与变形特征、现今活动构造历史演化与现今变形特征。

2 地震活动

与汶川 8.0 级地震相关的地震活动包括如下几个方面：区域构造区/带的强震时序活动特征、龙门山断裂带强震历史破裂空段、区域中等地震活动空间特征、震前数年尺度 4 级地震围空、震前震源区地震活动参数异常等几个方面，下面分别介绍。

区域构造区/带强震活动时序上的成丛性是中国大陆地区强震时空活动特征的重要特征之一，并由此决定了在中国大陆强震趋势跟踪工作中强震期幕活动、主体活动区判定成为主要工作内容。例如，自 1996 年 11 月 19 日喀喇昆仑 7.1 级地震以来，中国大陆地区 7 级以上浅源地震均发生在巴颜喀拉块体边界带上，其中包括 1996 年 11 月 19 日喀喇昆仑 7.1 级、1997 年 11 月 8 日玛尼 7.6 级、2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级、2008 年 3 月 21 日于田 7.3 级、2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级、2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级、2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级、2014 年 2 月 12 日于田 7.3 级、2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震。因此，巴颜喀拉活动地块是过去 20 多年中国大陆 7 级地震主体活动区。而且，从更长时间尺度来看，受控于巴颜喀拉块体东向运动作用下的巴颜喀拉块体北边界和东边界强震活动均存在加速过程，且两者在时序上呈现关联性^[16]。对于区域强震活动时间上呈现成丛性的物理机制也是强震孕育发生理论的关键科学问题，但由于其难度，相关研究并不多。张国民等^[17]利用多组弹簧和滑块表示区域多条组合断层模型中应力应变的累积与释放过程，结果表明，区域强震成组活动前多条断层均呈现为应力持续积累并达到较高水平的动态过程，发生成组强震活动后，大多数断层的应力水平恢复到较低水平，较好地解释了区域强震时序成组的活动特征。对于该结果，有两点特别值得关注：① 成组强震活动前，区域内多数断层的应力状态处于较高水平，但在区域强震成组结束后，很多未发生强震的断层也往往出现应力恢复的现象；② 该模型较好地解释了区域强震成组活动的特征，但还仅是机理模型，尚未达到实体化和实用化程度。特别值得关注的是，美国南加州地震中心基于摩擦本构率和实际断层模型开展数值模拟工作，已向实体化迈出了一大步，但仍缺乏确定实际断层摩擦物理参数的有效方法。

历史和现今地震资料表明，2008 年汶川 8.0 级地震前的 1100—1700 年间，龙门山断裂带未发生 7 级以上地震，是典型的强震破裂空段^[18]。目前来看，断裂带的强震破裂空段确实是长期预测中有效的地点判定方法，在近年来世界上几次强震前破裂空段均对未来强震的地点有较好的预测效果，例如，2010 年智利 8.8 级、2014 年智利 8.1 级、2015 年尼泊尔 8.1 级地震，而且 2011 年日本 9.0 级地震表明俯冲带上的强震破裂立体空段对强震地点预测也有较好效果。由于历史强震资料记录不全面的原因，在相关研究缺失的情况下应避免将强震破裂空段当作没有发生强震能力的推断^[19]。

有台网记录以来，龙门山断裂带中小地震比较活跃，但从 2000 年开始，中小地震活动水平显著降低，自 2002 年开始逐渐出现 $M_L \geq 4.0$ 地震空区，该现象是典型强震前震源区中小地震围空现象（又称为第二类空区）^[20]。在该空区形成过程中，空区周边地震活动比较活跃，且自 2004 年开始呈中小地震活动增强特征，期间发生甘肃岷县 2003 年 11 月 13 日 5.2 级、2004 年 9 月 7 日 5.0 级和 2006 年 6 月 21 日甘肃文县 5.0 级地震。另外，四川马尔

康震群活动非常显著,2004年12月14日至2007年10月30日,共发生 $M_L \geq 2.0$ 地震309次;而在汶川8.0级地震前半年时间空区外围和马尔康震群活动均显著降低,与以往空区震例类似,即“大地震往往在空区外围大面积里,地震活动峰值之后减少段里发生”^[21]。而自2007年后该围空出现收缩现象,龙门山北段发生了2007年3月11日青川 $M_L 4.2$ 、9月16日 $M_L 4.1$ 地震和2007年4月27日松潘 $M_L 4.3$ 地震,龙门山断裂带南端与鲜水河断裂带的交会地区发生了2007年7月31日汉源 $M_L 4.3$ 、2008年2月16日康定 $M_L 4.4$ 和2008年2月27日康定 $M_L 4.6$ 地震。

在地震预测中,地震活动参数是比较常用的方法,基于资料类型可以分为两类,即基于目录的活动参数和基于波形资料的活动参数。基于目录的活动参数,最常用是 b 值,一般认为低 b 值表示高应力,高 b 值表示低应力。汶川8级地震前,龙门山断裂带中北段的绵竹—茂县与江油—平武段的 b 值显著低于区域平均值^[22, 23]。但 b 值异常区与强震同震破裂位错集中区空间上存在一定差异,与2011年日本9.0级地震和2014年智利8.1级地震前 b 值异常现象存在一定差异,后面两次强震前的低 b 值区与同震位错集中区空间上具有较好的一致性,且 b 值时间上震前逼近主震时异常现象逐渐增强;然而,汶川8.0级地震前的 b 值异常分布并不像日本9.0级和智利8.1级地震那么理想,从基于重新定位的地震目录给出 b 值随深度变化的结果来看,汶川8.0级地震的震中并不是震前应力较高的地方^[24]。

汶川8.0级地震前出现的地震活动时空特征在中国大陆地区具有一定的普遍性,例如,强震某个时段的主体活动区时间上成丛性、强震破裂空段具备长期预测意义、中等地震围空具有中长期预测意义、地震活动参数具有一定的地点预测意义等。但汶川8.0级地震前地震活动参数异常的时空特征并不是特别典型,其形成原因及其物理机制解释尚待深入研究。另外,大范围中等地震围空周边连续发生多次强震、强震主体活动区时间上成丛性等问题的物理机制仍需进一步探索。

3 区域地壳变形

中国大陆地区针对强震的地壳变形观测包括水准、GPS观测等。关于汶川地震的震前资料分析主要包括区域地壳变形、断层变形两个方面,也可以概括为区域性变形场和震源区变形过程的相关研究。

青藏高原区域地壳变形观测资料表明,汶川8.0级地震前龙门山断裂带受到西侧巴颜喀拉地块大尺度、长时间、缓慢持续的推挤变形作用^[25],而GPS基线和跨断层形变观测均表明2001年昆仑山口西8.1级地震的发生导致巴颜喀拉地块对龙门山断裂带的挤压作用增强^[26]。

汶川地震发生后,综合不同观测资料给出的强震孕育发生动力学模型对于理解区域变形观测资料非常重要。张培震等^[1]给出了汶川推覆逆冲强震震源动力学模型,该模型将推覆型逆冲震源模型分为变形单元、支撑单元和闭锁单元(破裂单元)。基于该模型科学地解释了震前川西高原作为变形单元的GPS观测的地壳水平变形和水准观测的地壳垂直变形^[26, 27];而作为孕震单元的龙门山断裂带,由于震前发震断层表现为闭锁^[28],区域变形呈现为特别显著的弱变形带。结合历史强震资料,基于水准垂直变形速率水平梯度带给出了较准确的长期危险地点预测^[27];而基于GPS水平地壳变形速率震前并未给出类似预

测^[26]，其关键是缺乏有效区域强震孕育发生的动力学模型。

关于区域地壳变形资料在地震预测中的应用，非常关键的是构建合理的构造变形模型和强震动力学模型。类似的资料，基于不同的认识会得到完全相反的预测意见。汶川 8.0 级地震使得对断层变形与区域变形间关系有了进一步认识，尤其是现今地震预测相关研究和业务中特别重视断层运动闭锁的问题；但问题在于，断层闭锁对于地震预测的意义到底有多大仍存在较多的不确定性，例如，虽然有多种断层变形的理论模型，但对于强震动力学过程中断层活动的闭锁程度在不同孕震阶段的具体表现尚不清楚，所以导致基于断层运动强闭锁给出的未来地震震级或地点预测，其时间预测尺度是不确定的。

另一方面，在统一结构模型和变形模型研究过程中非常重要的约束是地球物理场的观测资料，根据观测目标可以分为地壳变形速度场、壳幔密度场、壳幔热力学场等方面的数据同化和针对地震预报的研究产出，具体需求是构建统一大地测量模型、统一壳幔密度模型、统一壳幔热力学模型。

4 地震前兆

除了上述测震学异常外，关于汶川地震的震前异常主要包括地球物理场流动观测、定点前兆观测、卫星观测等，其时空演化特征的差异及机理有待进一步研究。

根据对中国大陆重力场流动观测资料的分析研究，中国地震局第二监测中心 2007 年度和 2008 年度地震趋势研究报告重力专题报告中，对四川地区尤其是汶川—马尔康地区作了明确强震预测^[29]。震中附近的一些场地和台站出现了疑似前兆异常，但均未被确认^[30~32]，这似乎与有些总结震例发现强震震中附近存在“异常空区”的现象类似^[33]。记录到的前兆异常大多为趋势性变化，如郫县观测台地电阻率在 NE 向测项下降幅度达到 7.2%，下降持续时间在 2 年左右，震前 5 个月异常转折^[34]，但电离层电子总含量 (Total Electron Content, TEC) 分析表明，地震前后一个星期，孕震区上空连续出现电离层异常扰动^[35]。

地震前兆一直是地震预测相关研究中争议最大的科学问题之一。在震源尺度 (汶川 8.0 级地震震源尺度约为 300 km) 数倍的范围内，测震、形变、电磁和流体等几个大学科都观测到一些前兆异常。对于这些异常的表现特征、时空演化，及其与汶川 8.0 级地震的内在联系和物理上的成因机制，已有许多学者进行了广泛和深入的研究^[33, 36~40]。由于篇幅所限，本文不再赘述。对于强震前兆，在异常分析跟踪过程中有几个问题特别值得关注：① 构造关联，即如果是观测异常与目标断层之间存在构造关联性，就算距离较远，也可能存在很强的预测意义，如果不存在构造关联性，就算距离很近，其预测意义也可能减弱；② 场兆和源兆，虽然场兆和源兆的基本概念是清楚的，但实际跟踪过程中如何有效区分场兆和源兆依然存在很多主观因素；③ 异常时间与预测时间，实际震情跟踪过程中，预测时间的长中短临有具体的时间尺度规定，但科学上来讲，异常时间可能与地震孕育时间有关，即一个特定的异常持续时间，对不同区域、不同震级的地震，所具有的长中短临的预测时间是不同的；④ 异常机理，当前实际震情跟踪中地震前兆多数基于震例来判断，其机理分析和研究远远不够。

而震源异常的确定和机理分析均离不开科学的震源物理模型，当前震源物理模型构建和应用最好的当属美国南加州地震中心的工作，围绕破裂预测 (rupture forecast)，从统一

结构模型、地壳变形模拟、震源物理、强地震动、地震预测、地震灾害分析等不同方向,开展了地震地质、大地测量、地震学、地球化学、地球动力学等学科的基础研究,最终应用于地震破裂预测。相对而言,中国大陆地区为典型的大陆型地震,需要有针对性地构建大陆逆冲、走滑、拉张断层的震源物理模型,并且应细化每类震源物理模型。例如,对于中国大陆逆冲地震,有俯冲型、推覆型、花状构造型等。对于中国大陆地区,震源物理模型至少包括断层运动、断层应力、发震能力、流变结构、热力学结构等方面。只有基于科学的震源物理模型,才能明确观测资料的物理内涵,反映的是地壳变形加速还是减速、区域应力增强还是减弱、断层运动的加强还是减弱、深部壳幔作用的增强还是减弱等;期望“场源结合,以场求源”中,“源”的目标进一步明确。

5 讨论与展望

在国际地震研究发展过程中,中国地震研究难能可贵的是:①对大陆型强震孕震机理开展持续研究;②在艰难的地震预测预报实践不间断地坚持50多年并将继续砥砺前行。在中国地震预测预报研究与实践探索过程中,逐渐形成了得到系统内外相对认可的整体研究思路主要包括:①长、中、短、临渐进式地震预报;②场源结合,以场求源。但不尽人意的是,汶川8.0级地震10年后,上述这两个主要震情跟踪思路在实际地震预测工作中尚未取得显著性进展,基于当前实际情况,需要正视地震预测实践过程中面临的具体基础科学问题。

5.1 长、中、短、临渐进式地震预报

按照中国颁布的地震预报管理条例,地震预报按照预测时间尺度分为长期(10年)、中期(1~2年)、短期(3个月)、临震(10天)。从多年的实践情况来看,各时间尺度地震预报的社会职责、主要产出、现今主要问题等均需要在实践与研究过程中进一步改进和完善。

长期预报的社会职责主要是为重点监视防御区确定和国家层面的综合防御提供依据,主要产出是10年尺度重点地震危险区。国际上,综合长期预测时间和社会影响问题,一般是30年左右的预测时间,例如,美国加州地区是未来30年6.7级以上地震发震概率预测结果,日本是未来35年7级以上强震发生概率。中国大陆2006—2020年重点地震危险区是现在仍在预测期内的预测结果,由同期强震活动来看,同期中国大陆70%以上的7级地震发生在危险区内,且其他7级地震也发生在危险区边缘。长期预报主要问题有:①危险区数量较多,其原因是时间上仅是孕震阶段的判定,时间跨度往往较大,所以数量较多;②面积较大,其原因是震源模型不够精细,往往1个危险区包括多个断层段或多个断裂带。需要依靠精细化的断层模型、介质模型、块体模型、变形模型、破裂模型等,以构建比较精细的震源物理模型,以此增强震级和地点判定的科学性。

中期预报的社会职责主要是为校舍加固等应急准备提供依据,主要产出是年度重点地震危险区。国际上有基于地震活动等开展中期地震预测,但很少按照年度为政府和社会提供该类预测。2010年以来,中国大陆年度地震重点危险区,在有监测能力地区发生的6级以上地震约有60%发生在年度危险区内(即9/15),但其中的7级地震并未发生在年度危险区内。中期预报主要问题有:①统计经验为主,基于实际震例给出效果较好的观测异常,往往6级左右地震的震例占多数,而7级地震相对来讲震例数量较少,可能是6级年度预测效果较好,而7级较差的原因;②对于长期危险区在年度震情跟踪过程中发挥的作

用不够，虽然已开始做长期危险区 7 级强震发震紧迫程度的判定工作，但很多长期危险区的研究基础仍不完备，其监测基础仍存在很多提升空间。需要强化与 7 级强震动态过程跟踪相关的异常判定、异常物理机制、异常与强震间关系的深入研究，需要进一步梳理有明确物理意义、预测效果较好的时间预测方法。

短临预测是有效减灾的重要手段，主要为政府发出一定程度的预报意见提供科学依据。国际上短临预报的具体形式存在较大差别，美国加州地区基于长期预测结果，利用地震活动做短临预测研究，曾经在网上更新短临预测结果；日本基于前兆异常启动短临应对机制，但从未正式启动。2010 年以来，中国大陆有监测能力地区虽然有 9 次 6 级地震发生在年度重点危险区内，但只有 2 次正式向政府书面报告（2014 年鲁甸 6.5 级地震和 2017 年精河 6.6 级地震）。短临预测的主要问题有：① 短临跟踪的时效性不够，实际可用跟踪资料种类越来越多，数字化资料积累越来越多，但观测现象的物理机制尚不完全明确、数据处理方法并未改善，异常确定过程仍然大量依赖人力；② 长期危险区和年度危险区在短临震情跟踪过程中发挥的作用不够，缺乏有效短临预测方法。需要利用好现有震例总结成果，基于精细震源物理模型分析短临异常物理机制。

5.2 场源结合，以场求源

中国大陆地处欧亚板块、印度板块、太平洋板块、菲律宾海板块相互作用区域，在漫长地质演化过程中形成典型大陆型孕震环境；中国老一辈地震学家有针对性地提出“场源结合，以场求源”地震预报的大陆动力学研究框架。该研究框架以大陆活动地块为基本理论基础，得到系统内外一定程度的认可。在日常预报实践过程中，其具体科学问题可以归结为“从板块到断层的动力加载过程（由动力源到震源）”，具体内容包括周边板块动力边界加载、主要地质块体运动调整、典型构造带变形机制、具体断裂带应力加载。

但在日常预报意见产出过程中对该科学思路体现明显不够。究其原因，一方面是该科学思路本身的科学内涵和现有基础尚待研究完善，实现该科学思路的技术路线尚待逐步完整确立；另一方面，在目前的分析预报工作中，分析过程仍然以统计为主，缺乏物理方法；类比现象为主，缺乏动力学过程分析；震例为主，缺乏物理机制分析。综合判定结果仍然表述为可能性大小，缺定量概率表述；且对不同学科权重，缺定量综合过程。

5.3 地震前兆研究应注重机理和实践

地震预测的核心问题之一为“是否存在有助于预报的地震前兆”，该问题被《科学》列为最具挑战性的 125 个科学问题之一。从有地震预报研究以来，对于地震前兆就存在不同的定义和理解^[41, 42]，国际地震学和地球内部物理学联合会 (IASPEI) 遴选出的优秀地震异常也不可能与强震一一对应；因此，不能放弃相关地震前兆观测。例如，2011 年日本地震前虽然基于大地测量和地震学观测资料给出了可能的中长期地点和震级判定，但由于缺少相关观测，临震前无法判定是否具有明确的前兆异常^[43]。

但对于中国大陆已有震例来讲，前兆研究存在的主要问题是：① 由于中国大陆地区强震孕育周期较长，日常严格用时间来界定短临时间尺度有失科学性，对于不同地区不同震级的长中短临时间可能会存在差异；② 前兆异常震前时空演化特征亟需进一步加强研究；③ 对于地震前兆，监测、预报、科研结合不够，亟需综合分析前兆观测资料的可靠性、有效性；④ 有明确物理意义的观测资料在跟踪中依然重现象、轻机理。

本文是作者对汶川 8.0 级地震及其后 10 年地震预测预报工作实践中遇到的问题

考。其中尽管有一些启示,但更多的是留下众多的困惑,这些困惑来自于汶川 8.0 级地震的观测现象、大陆型强震特有的现象、众多方法实际应用并不理想的问题、科学思路与实际工作之间的差距等,期望对地震预测预报工作起到抛砖引玉的作用,哪怕是有争议的一些话题。

本文写作过程中与张国民、江在森、宋胜合多次交流与讨论,在此过程中作者获益良多,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 张培震、闻学泽、徐锡伟,等. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 2009, 54(7): 944-953.
- [2] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 5·12 汶川地震地表破裂基本参数的再论证及其构造内涵分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2321-2336.
- [3] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629.
- [4] 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 汶川特大地震震源特性分析报告, 汶川大地震工程震害调查分析与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [5] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(10): 1186-1194.
- [6] 赵翠萍, 陈章立, 周连庆, 等. 汶川 M_w 8.0 级地震震源破裂过程研究: 分段特征[J]. 科学通报, 2009, 54(22): 3475-3482.
- [7] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410.
- [8] Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Nature Geosci., 2009, 2(10): 718-724.
- [9] Xu C J, Liu Y, Wang Y M, et al. Coseismic slip distribution of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2010, 100(5B): 2736-2749.
- [10] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学 D 辑, 2013, 43(10): 1553-1582.
- [11] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [12] 唐荣昌, 韩渭滨. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [13] 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [14] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 12-20.
- [15] 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 138-146.
- [16] 闻学泽, 杜方, 张培震, 等. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震[J]. 地球物理学报, 2011, 54(3): 706-716.
- [17] 张国民, 耿鲁明, 石耀霖. 中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究[J]. 中国地震, 1993, 9(1): 20-32.

- [18] 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 444-454.
- [19] Headquarters for earthquake research promotion. National seismic hazard for Japan[M]. 2005.
- [20] 陈章立, 赵翠萍, 王勤彩, 等. 汶川 M_s 8.0 级地震发生背景与过程的研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 455-463.
- [21] 梅世蓉. 从华北地震活动的规则性地震危险区划分的一个途径[A]. 学术讨论专集[C]. 地震战线, 1970, 1-11.
- [22] 易桂喜, 闻学泽, 王思维, 等. 由地震活动参数分析龙门山—岷山断裂的现今活动习性与地震危险性[J]. 中国地震, 2006, 22(2): 117-125.
- [23] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1490-1500.
- [24] 刘雁冰, 裴顺平. 汶川地震前后 b 值的时空变化及构造意义[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2104-2112.
- [25] 杜方, 闻学泽, 张培震, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2729-2738.
- [26] 江在森, 方颖, 武艳强, 等. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 505-518.
- [27] 张郢珍, 张立人, 粟生平, 等. 中国大陆垂直形变速率梯度与强震危险区[J]. 地震地质, 1992, 14(3): 237-244.
- [28] 赵静, 江在森, 武艳强, 等. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2963-2972.
- [29] 祝意青, 梁伟峰, 徐云马. 重力资料对 2008 年汶川 M_s 8.0 地震的中期预测[J]. 国际地震动态, 2008, (7): 36-39.
- [30] 傅容珊, 万柯松, 崇加军, 等. 地震前兆还是其他因素?——与“汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探”作者商榷[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 584-589.
- [31] 朱航, 邓建平, 阳光. 关于汶川 8.0 级地震前两项异常真伪的探讨[J]. 四川地震, 2010a, (1): 13-17.
- [32] 朱航, 苏琴, 杨涛, 等. 耿达短水准观测资料在汶川 M_s 8.0 地震前后异常的辨别[J]. 地震学报, 2010b, 32(6): 649-658.
- [33] 刘琦, 闫伟, 李智蓉, 等. 南北地震带定点形变前兆异常指标初建[J]. 地震, 2016, 36(4): 76-88.
- [34] 张学民, 李美, 关华平. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J]. 地震, 2009, 29(1): 108-115.
- [35] 林剑, 吴云, 祝芙蓉, 等. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1), 297-300.
- [36] 陈长云, 郑智江, 李腊月, 等. 南北地震带中南段典型强震震前跨断层形变特征分析[J]. 地震, 2016, 36(4): 47-60.
- [37] 何康, 郑海刚, 李军辉, 等. 基于震例的地震电磁异常特征研究[J]. 地震, 2016, 36(4): 144-152.
- [38] 吕坚, 宋美琴, 周龙泉, 等. 基于《中国震例》的地震空区和地震条带统计特征[J]. 地震, 2016, 36(4): 22-34.
- [39] 孙小龙, 王广才, 晏锐. 利用概率密度分布提取流体观测资料中的高频异常信息——以 2008 年汶川 8.0 级地震为例[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1673-1684.
- [40] 王俊, 邵志刚, 孙小龙, 等. 川滇地区强震前流体异常特征与预测指标体系初探[J]. 地震, 2016, 36(4): 109-119.
- [41] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(12): 1633-1658.

- [42] 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, 498.
- [43] Uyeda S. Current affairs in earthquake prediction in Japan[J]. Journal of Asian earth sciences, 2015, 114: 431-434.

Reflections on Earthquake Prediction Research Ten Years after the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake

SHAO Zhi-gang, WANG Peng

(Institute of Earthquake Science, Key Laboratory of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: A decade has passed since the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, research and practice about earthquake forecasting have never stopped. As professionals in earthquake forecasting, we analyzed phenomena of varied aspects about the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, including earthquake geology, geodesy, seismology and precursory anomalies. For tracing earthquakes, the authors discussed the predictive significance, analyzed possible problems and proposed suggestions for different research, and presented some thoughts and understandings about comprehensive forecasting, in the hope of providing some inspirations in earthquake forecasting and prediction.

Key words: Earthquake Prediction; Earthquake Forecast; The 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake