第 19 卷 第 6 期
1997 年 11 月 (566～573)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 19, No. 6
Nov., 1997

唐山地震发震断层运动学特征与大震重复周期*

刘 洁[1)] 宋惠珍[1)] 巫映祥[2)] 刘贵梅[2)]

1) 中国北京 100029 国家地震局地质研究所
2) 中国北京 100039 国家地震局地壳应力研究所

摘要 根据断层深部不均匀滑动反演方法，利用 6 期大地形变资料，反演计算了唐山地震断层在震前、震时、震后共 5 个不同时间段的运动状况. 其结果体现了地震断层由震前加速运动、震时突发错动到震后松弛、调整，趋于稳定的运动过程. 进而利用地震断层的滑动与应变能的关系，估算了唐山地震的复发周期.

主题词 唐山 地震断层 断层滑动 地震周期 反演

引言

唐山地震作为现代一个最著名的震例，研究它的论著非常多. 涉及地形变与断层位错的，有陈运泰等(1979)利用地形变测量资料反演唐山地震的断层模式；黄立人等(1988)在整理多期测量资料的基础上，分析了唐山地震前后的水平形变特征. 本文引用黄立人等整理的测量资料(宋惠珍，1990)，以 Harris 和 Segall(1987)的垂直走滑断层线性反演方法为基础，将该方法扩展到可以实现倾斜断层存在走滑、倾滑、拉张 3 个运动分量的反演(刘洁等，1995)，并计算了唐山地震断层在 1954～1964 年、1960～1971 年、1971～1976 年(震后)、1976～1977 年、1977～1985 年共 5 个时间段内的不均匀位错(包括走滑、倾滑两个运动分量). 5 个时间段代表了一个完整的地震周期过程，分析断层在不同时期的运动状态有助于更深刻地了解地面形变、断层深部运动与地震孕育、发生、发展的关系.

1 模型、方法与资料

本文采用与前文(刘洁等，1995)相同的反演模型和反演方法.

1.1 地震重复周期计算方法

地震重复周期的计算基于这样一个观点：对于稳定的震间断层滑动，应变能积累到上次地震释放量值所需的时间，正比于该地震之地震矩与震间矩缺失率(interseismic moment deficit)之比，即

$$\Delta t = \frac{<\tau_k>^c \iint_\Sigma d_k^c \mathrm{d}\Sigma}{<\tau_k>^i \iint_\Sigma [v^d - v_k(x)] \mathrm{d}\Sigma} \tag{1}$$

* 1996-04-19 收到初稿，1997-05-21 收到修改稿，1997-08-15 决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

式中，d_k^c 表示震时及震后瞬时断层的滑动量；$v_k(x)$表示震间断层面上任意一点 x 处滑动速率，而在某一深度 D 以下，断层以均匀稳定的速率 v^d 滑动；$<\tau_k>^c$ 和$<\tau_k>^i$ 分别表示震时整个断层面上的加权平均剪应力和震间断层年平均剪应力，当地震应力降相对其总的应力水平很小时，整个地震周期内断层平均剪应力变化不大，可以认为$<\tau_k>^c=<\tau_k>^i$，因而地震周期 Δt 可表示为

$$\Delta t=\frac{\iint_{\Sigma} d_k^c \mathrm{d}\Sigma}{\iint_{\Sigma}[v_d-v_k(x)]\mathrm{d}\Sigma} \tag{2}$$

变量 v^d，d_k^c，$v_k(x)$可以通过代表震时及震间的大地变形测量资料反演得到. 尽管我们不能保证地震将在预测的时间内发生，但能说明与前一次地震相当的事件潜在的可能(Segall，Harris，1987).

1.2　唐山地震断层模型

唐山地区受宁河—昌黎断裂、丰台—野鸡坨断裂、滦县—乐亭断裂和蓟运河断裂的切割，形成了一个北东东向的菱形块体，其内部北东方向对角线上发育了一条唐山断裂带. 唐山地震的发震构造，由不同资料获得的结果具有一定差异(陈运泰等，1979；国家地震局，1982；邱群，1976). 本文主要依据黄立人等(1988)和宋惠珍等(1990)的结果，取模型的断层走向(图 1 中 x 轴)为北东 30°，倾向南东，倾角 80°. 根据唐山 7.8 级地震的发震构造处于一个较完整的块体内，我们确定计算区域的长度即为菱形块体的对角线长度，约 65 km. 计算区域的深度取 0～－21 km. 网格单元划分为 10 段 7 层.

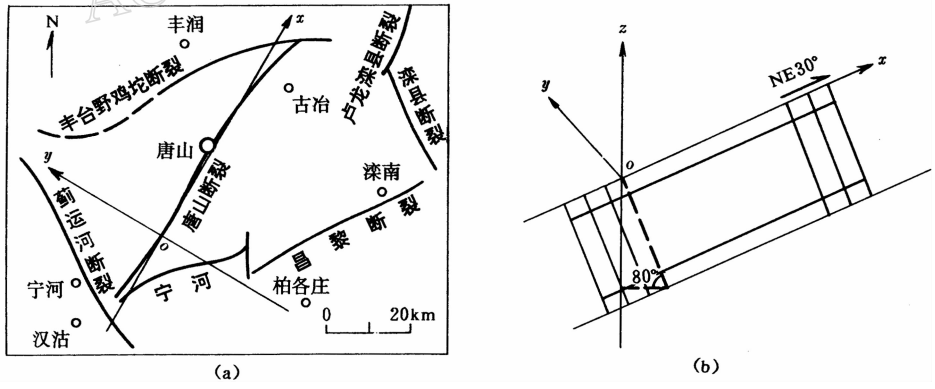

图 1　唐山地震断层构造特征(a)与反演模型(b)示意图

1.3　测量资料

反演计算用测量资料取自宋惠珍等(1990). 黄立人等根据Ⅰ等三角锁、Ⅱ，Ⅲ等三角网及微波测距测量结果，整理出 5 个不同阶段的形变演化；本文又将各测点的位移 dx，dy 转化为两测点之间线长的变化量(伸长为正，缩短为负).

反演计算所需的外部约束条件为跨断层短基线、短水准反映的断层浅部运动值. 唐山地区没有对应资料，但以下资料可作参考：①唐山地区震前的水准测量表明，较大范围内的垂直形变速率每年不超过几毫米，且升、降交替；②水平形变测量表明，1971 年以前断裂两侧没有明显活动(国家地震局，1982)；③北京地区跨断层短基线、短水准反映的断层

http://www.dizhenxb.org.cn

浅部运动速率为 0.1 到 5～7 mm/a. 鉴于此，本文计算时对震前两期约束值取值较小，震后断裂带已错开，浅部断层滑动约束值稍大，震时则以地表观测到的位移为约束.

2 地震过程断层深部滑动反演结果与分析

2.1 第 1 期资料(1954～1964 年)反演结果

第 1 期资料共有 16 条测线. 给出表层单元走滑速率－0.5 mm/a、倾滑速率－0.2 mm/a 的可能值作为约束(滑动方向约定走滑左旋为正、右旋为负，倾滑逆断为正、正断为负. 下同).

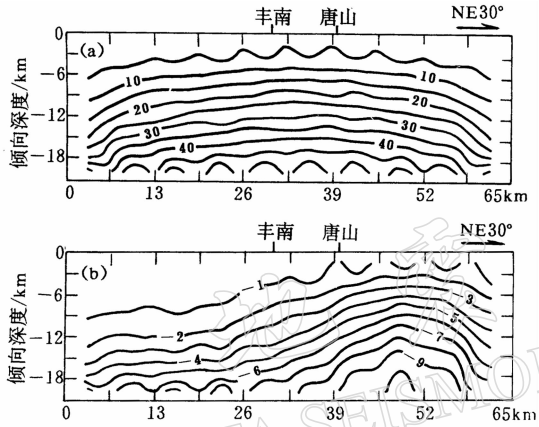

图 2 唐山地震断层 1954～1964 年深部滑动速率等值图(表层约束，$k=21$ 的解)

(a) 走滑速率；(b) 倾滑速率 (单位：mm/a)

计算结果(图 2)具有以下特征：① 走滑速率值为正、倾滑速率值为负，即断层表现为左旋正断型活动；② 走滑速率值大于倾滑速率值，即断层以走滑运动为主；③ 表层滑动速率小，往下速率增大；④ 断层两端的滑动速率较断层中部和底部小，但比表层单元约束值稍大，端部走滑速率小于 5.0 mm/a，倾滑速率小于 1.0 mm/a.

2.2 第 2 期资料(1960～1971 年)反演结果

唐山地区第 2 期资料共有 25 条测线(图 3). 表层单元约束为：走滑速率－1.0 mm/a，倾滑速率－0.2 mm/a.

解的特征(图 4)为：① 断层深部运

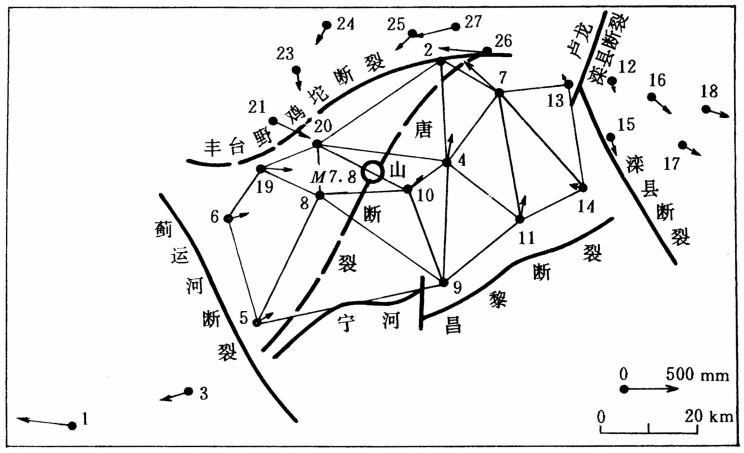

图 3 1960～1971 年测线分布与测点位移矢量图

动仍以走滑运动占优势，并表现为右旋逆断型. 从地表位移矢量图(图 3)上看，断层两盘之间似乎的确存在相向运动(下文将对此作进一步的讨论)；②滑动分布趋势仍为上小下

http://www.dizhenxb.org.cn

大；断层端部滑动速率较断层中部滑动速率小得多；③滑动速率值较第 1 期明显增大.

2.3　第 3 期资料(1971～1976 年震后)反演结果

第 3 期资料测于震前 1971 年和震后 1976 年 8～11 月间，其中测线的变化实际上包括了 1971～1976 年的震前形变、7.8 级主震的瞬时形变和震后形变 3 部分. 由于 1975～1976 年震前没有对唐山地区进行测量，只能将 1971 年至大震前的震前形变也归入震时形变，可能存在较大误差.

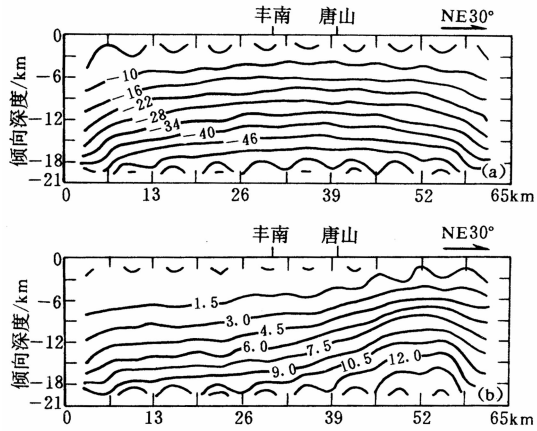

图 4　唐山地震断层 1960～1971 年滑动速率等值图(表层约束，$k=21$ 的解)

(a)走滑速率；(b)倾滑速率（单位：mm/a）

本期资料共有 24 条测线(图 5). 对这期资料作过 3 种边界条件的解. 其一是与震前两期资料一样，根据地表观测得到的震时形变值，仅给出表层单元约束值，其结果显示倾滑运动分布较好，但走滑运动底部边界外单元的滑动量大于震源处滑动量，对这一点作者认为不合乎震时震源处突发错动的特征. 因此作了第 2 种边界条件的反演，即除表层单元给予实测地表破裂约束外，底部边界外单元给予一个假设的约束值为右旋走滑量 2 000 mm、正断倾滑量 100 mm，左右边界外单元不给予约束.

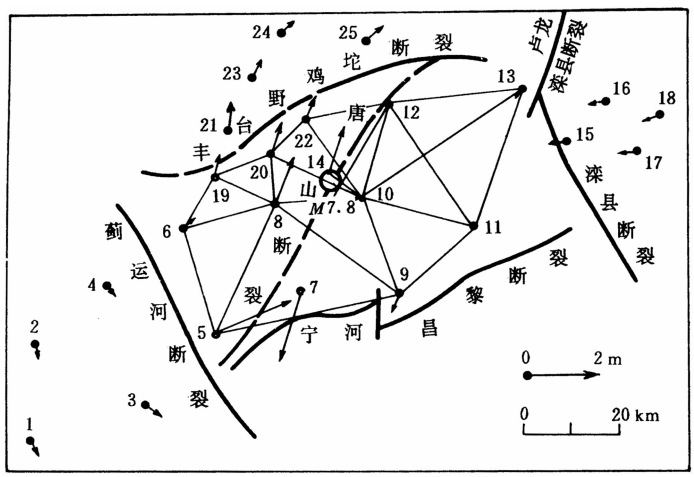

图 5　1971～1976 年(震后)测线分布与地表位移观测矢量图

计算结果仍以右旋走滑运动为主，震源区为正断倾滑运动(图 6). 图 6a 中显示断层震时走滑错动最大值位于震中区之下稍偏西南，联系计算区域西南端宁河附近发生的数个大于 5.5 级地震及地表 5 号、7 号测点的大位移，震源位置与反演最大错距点的偏差也就得到

http://www.dizhenxb.org.cn

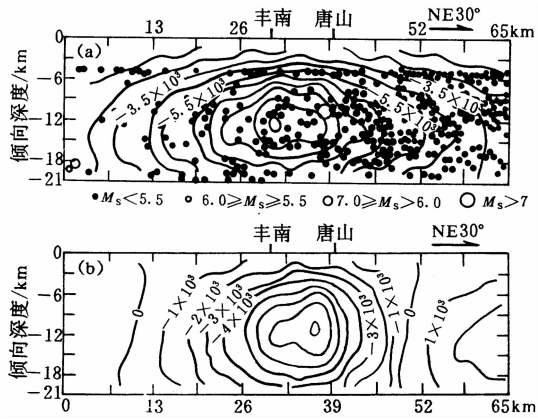

图 6 唐山地震断层震时错距等值图(表层及底部约束，$k=24$ 的解). (a) 走滑错动量叠加主震、余震震源分布(据国家地震局，1982，第 57 页)；(b) 倾滑错动量(单位：mm)

解释. 推测在测点更密、测线资料较好的情况下，可以反演得到更详细、准确的结果. 计算的断层平均错距为 487.4 cm，地震矩为 2.4×10^{20} N·m.

当表层给予同样的约束，底部走滑量假设为 −1 000 mm，左右边界外单元均固定为零时，总体特征与表层及底部给予约束的解类似. 平均错距为 418.7 cm， 地震矩为 2.1×10^{20} N·m.

必须说明，3 个边界外单元的约束都是没有实测值作依据的，给出的只是一种可能的假设值. 通过对比计算，对采用 1971～1976 年震后资料反演计算的唐山地震断层的震时错动有以下初步的认识：① 震时形变以右旋走滑为主，与震前蠕动方式一致，也与地表观测、应力场的作用效果相吻合；② 震时倾滑运动为正断型，对正断运动仅局限于震中 40～50 km 范围以内、断层两端呈小量逆断运动这一特点，依据 1960～1971 年的计算结果，推测很可能是由于震前形变量的影响.

2.4 第 4 期资料(1976～1977 年)反演结果

唐山地区第 4 期资料共有 12 条基线(图 7)，分布靠菱形块体的东北部. 表层单元约束为走滑速率 1.0～8.0 mm/a、倾滑速率 −0.2～−1.0 mm/a，震后断层滑动特征为(图 7)：① 断层以走滑运动占绝对优势；② 走滑速率值为正，即为左旋走滑，与震时运动方向相反，但倾滑运动仍为正断型；③ 平均滑动速率 17.3 mm/a，小于震前两期资料的反演结果.

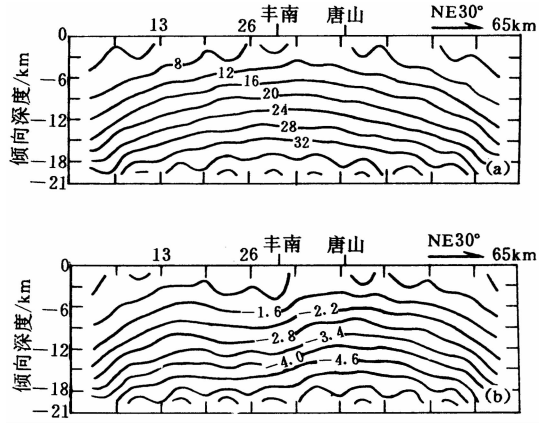

图 7 唐山地震断层 1976～1977 年滑动速率等值图(表层约束，$k=21$ 的解). (a) 走滑速率；(b) 倾滑速率(单位：mm/a)

2.5 第 5 期资料(1977～1985 年)反演结果

第 5 期资料共有测线 20 条，分布与前一期测线相似，偏向菱形块体东北. 当给予表层单元走滑速率 −1.0 mm/a、倾滑速率 −0.5 mm/a 的约束时，计算结果具有以下特征(图 8)：① 断层运动具右旋、正断性质，且走滑速率与倾滑速率值相近；② 滑动速率量值，小于震后 1976～1977 年的值，更小于震前 1954～1964 年和 1960～1971 年的滑动速率值.

http://www.dizhenxb.org.cn

2.6　唐山 7.8 级大震过程分析

纵观唐山地震前、后 5 期资料的反演结果(表 1)，可以得出唐山地震全过程断层运动规律如下：

(1) 从断层的运动方式来看，断层总是以走滑运动为主，仅第 5 期资料的结果倾滑速率稍占优势；从断层的运动方向上看，断层以右旋、正断型运动为主. 根据邓起东等(1979)的研究结果，华北断块区自新构造期以来受到大致北东-北东东向的太平洋和印度洋板块的水平挤压，断层运动以走滑为主，兼有正断性质，北东向断层为右旋、正断型. 本文的计算结果总体上与这一普遍接受的观点相吻合.

在走滑运动方向上，震后(1976～1977 年)出现的反向(左旋)运动，与地表水平形变资料推测的断层浅层运动相符；袁岩光(宋惠珍等，1990)用裂纹扩展模型计算所得的结果，也与此完全一致.

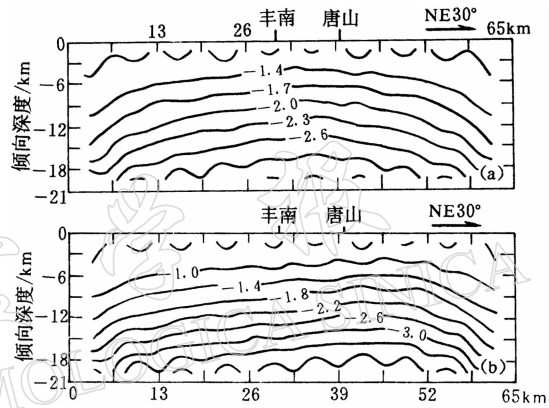

图 8　唐山地震断层 1977～1985 年滑动速率等值图(表层约束，$k=21$ 的解). (a)走滑速率；(b)倾滑速率 (单位：mm/a)

倾滑运动在 1960～1971 年间表现为逆断型运动，以往的资料未曾有过类似结论. 若从力学上作一简要分析，在应力场加强的过程中，与断层平行的应力分量造成的效果是走滑(右旋)速率的增大，这一点可以被前面第 1、2 期资料的反演结果证实；而与断层垂直的应力分量增强的效果是断层所受垂向压应力增强，有可能出现挤压逆断的运动性质. 曾融生等(1985)指出，在 1968～1969 年间，震中区的地面有 50 mm 的上升，上升的地带长度达 70～80 km，宽度达 50 km. 本文所采用的三角边(网)测量资料不曾捕捉到这一具体信息，但我们的计算结果与之并不相佐，即断层的逆断运动和地形的上升应是相互一致的.

表 1　唐山地震断层震前、震后运动特征对比表

时间段	走滑方向	倾滑方向	滑动优势	平均值	最大值
震前(1954～1964 年)	左旋	正断	走滑	20.8 mm/a	55.4 mm/a
震前(1960～1971 年)	右旋	逆断	走滑	32.5 mm/a	67.4 mm/a
震时(1971～1976 年)	右旋	正断	走滑	480 mm	11 000 mm
震后(1976～1977 年)	左旋	正断	走滑	17.3 mm/a	41.9 mm/a
震后(1977～1985 年)	右旋	正断	走滑＋倾滑	2.82 mm/a	5.38 mm/a

对于 1954～1964 年间的左旋走滑运动，仅就本文的计算结果无法断言当时断层的真实运动情况. 因早期资料测点少、精度差、没有更早的资料可以作序列对比，也没有相关报道进行横向对比，在此不作论证.

(2) 从断层运动速率的大小变化趋势来看，1954～1964 年间的运动速率小于 1960～1971 年间的运动速率，显示了震前应力场的加强；1971 年以后至震前的活动性限于资料

无法得知，但据黄立人等(1988)的推断，至少这段时间内断层没有停止运动；震时断层两盘猛烈错动，平均错距大于 400 cm，计算结果表明右旋走滑错动量大；震后 1976～1977 年滑动速率已较震前小；而 1977～1985 年间滑动速率又比 1976～1977 年的更小，表明震后应力场松弛并逐渐调整，进入下一个地震周期的能量缓慢积累过程.

总之，华北平原北部地区主要受北东东向区域应力场作用(局部可能受垂直作用力的影响)，北东向断层呈右旋走滑正断运动，但在局部震源应力场加强或松弛情况下，在地震断层上出现了反向运动；而在整个地震过程中，应力场的震前加强—震时释放—震后松弛过程，都通过地表形变测量资料反演出的断层深部运动得到反映.

3 大震重复周期的探讨

根据前面理论分析，地震周期可以由震间矩缺失率和震时地震矩的比值获得. 利用 1971～1976 年(震后)资料计算的唐山地震的地震矩为 2.1×10^{20}～2.4×10^{20} N·m 之间. 陈运泰等(1979)运用 1960～1976 年(震后)资料反演求解的地震矩为 4.3×10^{20} N·m. 本文引用的资料排除了 1960～1971 年间的震前形变量，因而计算的地震矩也较陈运泰等人的结果要小. 这一结果完全可以接受，而且，据此也可以说明 1971 年至震前断层还存在蠕动.

震间矩缺失率严格说来应指两次大震之间，在稳定的区域场作用之下，断层长期稳定运动所造成的矩缺失率，遗憾的是唐山地区 1985 年以后没有再进行三角复测. 地震发生于 1976 年，1977 年以前明显表现为应力调整阶段(左旋运动)，随后(1977～1985 年)断层运动特征已恢复为与区域应力场吻合，说明断层应力场已逐渐趋于稳定. 根据现有条件，可以假定 1977～1985 年间断层的运动速率近似于长期运动值. 在附加表层单元滑动约束、3 个边界外单元自由的边界条件下，其时断层滑动的平均速率为 2.82 mm/a；远场速率，即底部边界外单元的运动速率为 5.94 mm/a，由此计算出的“震间”矩缺失率为 1.45×10^{17} N·m. 由震时和震后形变资料反演得到的地震矩和矩缺失率，二者的比值为 1 450 a 至 1 660 a，即唐山地震的重复周期——该断层再次发生 7～8 级地震的可能时间间隔约 1 550 ±100 a. 这其中包括了两个较大的误差因素：一是地震矩由于使用的计算资料包括震前形变，值偏大；二是用震后不久的资料当作震间资料计算震间矩缺失率，也可能存在较大误差. 根据现有资料还无法作出地震重复周期计算值及其误差的准确评价，但 7 级以上大地震的重复周期在一千年至数千年，这一结果是可以接受的.

4 结论

唐山地区震前、震后丰富的大地形变测量资料，使得一个完整大地震过程中断层运动特征的研究得以完成. 北东向断层在北东东向区域应力场的使用下，以右旋正断运动为主，而断层深部不均匀滑动的分布及随时间的变化，又充分反映了地震过程中，应力场由震前积累加强、震时突发释放到震后调整松弛过程，这一连续变化的反演结果是对以往有关唐山地震研究的补充. 虽然 1600 年左右的 7～8 级地震重复周期的预测不具太大实际意义，但该结果是地震时间预报从定性到初步定量化的进步，不失为一种有益的尝试.

http://www.dizhenxb.org.cn

参 考 文 献

陈运泰，黄立人，林邦慧，等. 1979. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式. 地球物理学报，**22**(3)：201～211

邓起东，张裕明，许桂林，等，1979. 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系. 地震地质，**1**(1)：11～22

国家地震局，1982. 1976 年唐山地震. 北京：地震出版社. 459

黄立人，王学中，刘天奎，1988. 唐山地震前后的水平形变. 地震学报，**10**(4)：375～384

刘洁，宋惠珍，巫映祥，等，1995. 倾斜断层深部不均匀滑动的反演计算. 地震地质，**17**(1)：25～31

邱群. 1976. 1976 年 7 月 28 日河北省唐山 7.8 级地震的发震背景及其活动性. 地球物理学报，**19**(4)：259～269

宋惠珍，黄立人，华祥文，1990. 地应力场综合分析. 北京：石油工业出版社. 207～220，415～425

曾融生，张少泉，周海南，等，1985. 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**(2)：125～142

Harris R A, Segall P, 1987. Detection of a locked zone at depth on the Parkfield, California, segment of the San Andreas fault. *J Geophys Res*, **92**: 7 945～7 962

Segall P, Harris R A, 1987. Earthquake deformation cycle on the San Andreas fault near Parkfield, California. *J Geophys Res*, **92**: 10 511～10 525

学会活动

中国地震学会地震流体专业委员会第二次学术讨论会在井冈山召开

中国地震学会地震流体专业委员会第二次学术讨论会于 1997 年 10 月 8 日～10 日在革命圣地井冈山市召开. 会议有本专业委员会委员、特邀委员及有关专家和学者共 50 多人出席，学会秘书长孙其政及副秘书长郝记川亲临会场，另有三位电磁学科的专家也到会参加了讨论与交流.

本次会议的主题有两个：一是地震波体研究的新领域，主要涉及地壳流体及其在孕震过程中的作用、地下流体对远大地震的前兆响应；二是地震流体监测与预报. 会议按议题分两组进行了交流与讨论.

地下流体学科近二年开辟了深部热流体研究、火山流体研究、远场与超远场效应研究、水库诱发地震监测与研究等新的领域. 本次会议深部热流体研究方面的讨论与交流最为引人注目，专家们认为地壳中流体存在的普遍性及地壳中流体作用的重要性的认识与探索是 20 世纪地球科学的重大进展之一，并以上地壳热流体、中下地壳超临界流体及其与强震活动的关系为主要问题展开了热烈的讨论. 会议交流了地壳放气、放热与地震活动关系研究方面取得的新进展，并肯定了超远距离强震前的地下流体动态异常的存在，同时认为这类现象出现的地球动力条件、物理本质、反映机理等目前尚不清楚，有待于进一步的观测与研究.

地下流体在地震前兆监测与预报方面，尤其在短临预报方面具有明显优势. 本次会议提交有关震例研究方面的论文 7 篇、预报新方法研究 10 篇、观测技术与其它方面的论文 5 篇. 会议代表对 1997 年 1 月 30 日云南省景洪 5.3 级地震中期、中短期与短临阶段跟踪预报成功的经验表现出特别的关注与兴趣，并普遍认为，地下流体不仅具有短临阶段方面的优势，而且在中期与中短期预报中也可发挥重要的作用. 会议还对“地震预报”的含义、能否预报以及预报的难点等问题展开了深入的讨论，再次明确了地震预报在社会需求方面的紧迫性和科学探索上的艰难性，认为社会需求就是我们的责任，不管前途多么艰难，还应坚定不移地推进地震预报的科学探索，力争在震前作出有一定意义的预报，为地震减灾事业作出贡献. 会议还对“九五”台站技术改造中存在的问题进行了交流与讨论.

在会议闭幕式上，中国地震学会秘书长、国家地震局预测预防司司长孙其政以普通会员的身份作了发言，在充分肯定地下流体学科在地震监测预报中作用的同时，诚恳地提出了今后应须关注的学术、技术与工作方面的 4 个问题，使与会代表们受到了深刻的启示.

（刘五洲　车用太）

http://www.dizhenxb.org.cn