

华北地区地壳垂直形变场及 动态演化特征^{*}

王若柏¹⁾ 洪汉净²⁾ 许忠淮³⁾
耿世昌¹⁾ 孙东平¹⁾ 韩月萍¹⁾

1) 中国天津 300180 国家地震局第一地形变监测中心

2) 中国北京 100029 国家地震局地质研究所

3) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

摘 要

应用华北地区 30 余年的精密水准资料, 用统一的方法进行同网形、同起算点的平差计算, 得出了 1965—1975, 1975—1979, 1979—1983, 1983—1988 年度的垂直形变速率图; 从动态的观点研究了地壳垂直形变的演化特征。分析结果表明, 地壳垂直形变场有规律的变化与地震活动的周期有明确的对应关系, 并进一步推断, 这一现象可能与区域应力-应变场的微动态活动有关; 最后对垂直形变场与地震预报的有关问题作了讨论。

主题词 地壳形变; 动态响应; 水准测量

引 言

地壳形变研究主要涉及现代板块运动及其变形问题。在这一领域内, 近年来空间大地测量技术已取得了许多重要成果, 但是, 就垂向定位精度和资料的积累而言, 还不能代替常规的精密水准测量技术。因此, 在地震科学各领域内以精密水准测量为主要手段的地壳形变研究仍占有重要的地位。我国自 1966 年邢台地震之后, 在一些重要的地震活动区开展了大规模的精密水准测量和地壳垂直形变研究, 积累了可观的资料和一大批研究成果。

由地壳形变所揭示的现代构造运动谱应包含各种性质、量级和各种周期的变化, 它们在不同地质活动周期中的演化是极为复杂的。传统上使用一定时间间隔的水准复测资料(一般为两期), 作为查明地壳垂直运动的依据, 这就有着明显的局限性。因此, 本文使用多期精密水准成果, 在统一的起算基准上进行对比研究, 并使用地壳形变场这一概念描述地壳形变在各时空域内的变化。这样, 在大区域范围内研究不同时间段的地壳形变场及其时、空变化规律, 将是一项有意义的工作。

* 地震科学联合基金会资助项目。

1993 年 5 月 20 日收到初稿, 1994 年 4 月 19 日收到修改稿, 1994 年 7 月 16 日决定采用。

1 精密水准资料的准备

研究区包括大华北地区的绝大部分, 西起 $110^{\circ}00' E$, 东至 $118^{\circ}45' E$; 南起 $35^{\circ}10' N$, 北至 $40^{\circ}40' N$, 范围跨河北、山西、山东和京津地区。全部数据资料在分期计算时, 以唐山大震为界分成两大部分, 震前部分划分为两期, 震后分为3期。每期的时间间隔为3—5 a。原则上各期资料不重复使用, 以保证成果的真实性。各期数据采用同网形、同平差

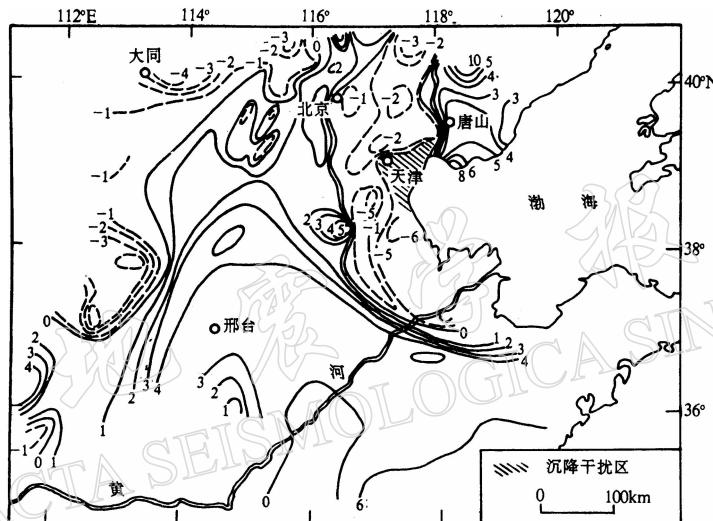


图1 华北地区地壳形变速率图(1965—1975)

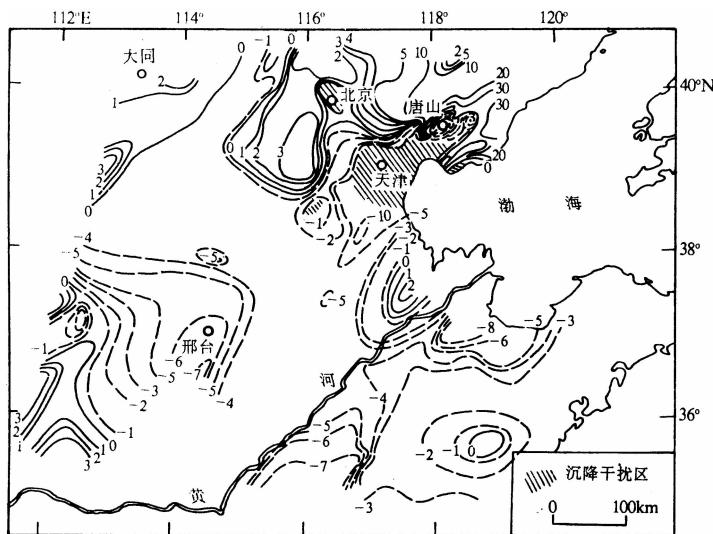


图2 华北地区地壳形变速率图(1975—1979)

方法(经典平差)和同起算点(北京原点)进行平差计算。平差计算时选取北京原点为不动

点, 令起算点形变恒为零. 计算程序将按每期内成果分布在时间上的权重自动给出中心年代 T_1 和 T_2 , 求得全部水准高程变化 ΔH 和形变速率 λ , 两者的关系为

$$\Delta H = \lambda(T_2 - T_1)$$

本文用 λ 值给出了该年代的形变速率图(图 1-4).

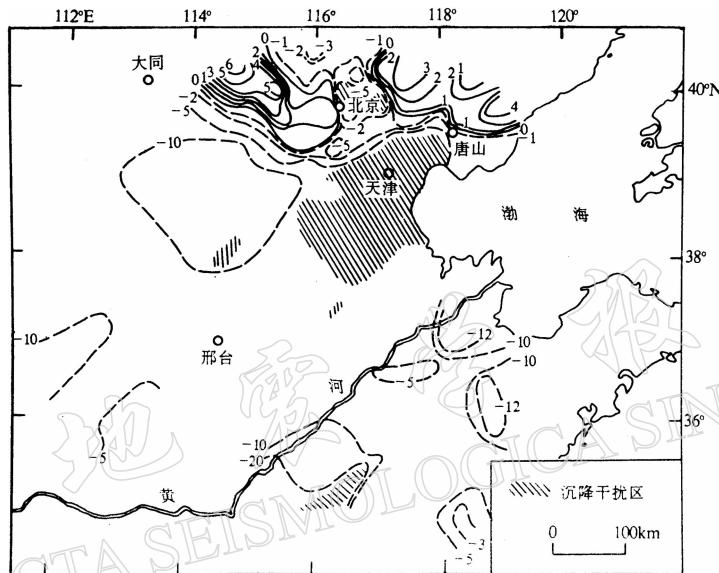


图 3 华北地区地壳形变速率图(1979—1983)

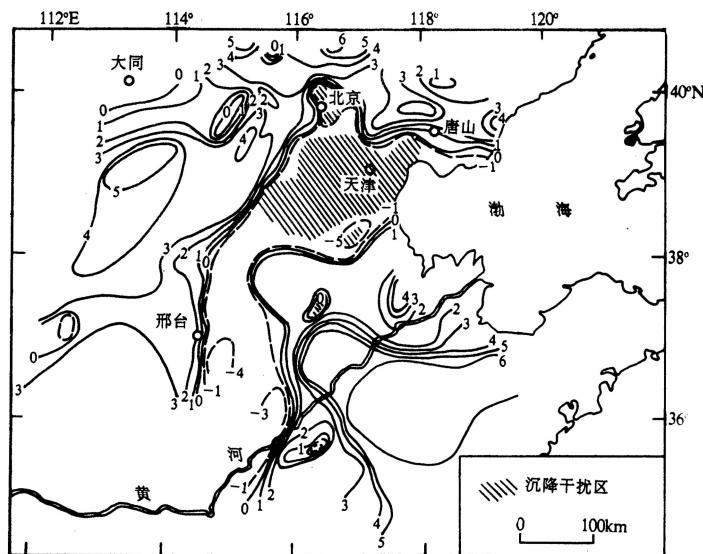


图 4 华北地区地壳形变速率图(1983—1988)

在地壳形变研究中, 对提取构造活动信息影响最严重的是过量抽取地下水引起的地

面沉降, 其变化值较之构造活动超出 1—2 个量级。在本文发表的形变图中的京津及河北平原部分沿海地区(图中的阴影部分), 这种干扰完全淹没了构造活动的信息, 故不作构造活动的研究。

2 华北地区地壳形变场的演化特征

在深入研究了几张形变图后, 我们可以得出这样的一些认识:

第一, 图 1 与图 4 相似, 也就是说, 1965—1975 和 1983—1988 两个时间段内, 全区呈现出明显的上升状态, 形变等值线的分布规律性较好, 主要为北东和北西两个方向, 中部有一条大尺度的北西西向的形变梯度带, 将全区分为南北两个部分。相比较而言, 图 1 的规律性更好一些, 特别是研究区的北部, 从唐山一大同由东向西呈现隆凹相间分布的大型异常带相当醒目。南部则为宽缓的隆起区。图 4 的异常上升, 西部较东部更有规律一些。与之相反, 图 2 和图 3 相似, 除北部(少部分西部)上升之外, 绝大部分地区表现为异常的下降运动。同时, 形变的等值线分布的规律性不很明显, 尤其以图 3 更为典型。

第二, 从几张形变图中出现大量的局部异常来看, 我们注意到了, 在图 1 的东北部, 以唐山为中心大体为四象限分布的形变异常区, 南北侧相对上升, 东西侧相对下沉。而唐山附近北北东向的形变梯度带最为突出, 为全区之冠(不包括干扰区的边缘), 表现了强震前震中区应力-应变的相对集中。图 2 则完全不同, 震前的形态完全解体, 代之是震后的剩余形变。同时, 华北北部大型的异常带由东向西逐步解体。如果我们结合地质构造背景认真分析一下该区域的这一显著变化就不难看出, 震后(图 2)的地形变可能反映了地表盖层断块在应力场相对松弛条件下的重力滑脱运动, 而震前(图 1)的形变态势恰与震源位错的点源理论垂直形变场的前兆图象相当。这种震前震后形态上的显著差异所反映的地质构造含义完全不同。如果说震后是盖层活断裂的活动, 那么震前则可能是深部孕震层构造应力相对集中的图象。

第三, 从 4 张形变图在时间发展上的变化, 我们又可看出另一个明显的特征, 即地壳垂直形变的异常隆起—差异沉降—均匀沉降—异常隆起, 对应了华北地区这几十年间地震活动活跃—平静—活跃的变化, 我们推测这种活动可能反映了区域应力场的加强—松弛—加强的过程。深入分析这一变化有着重要的意义。例如图 1 反映了唐山大震前区域形变场的状态。而图 4 则反映了大同地震前的同一状态, 两者震级相差较大, 但大区域垂直形变场出现了同样的异常趋势, 两者之间可能有着内在的联系。

同样, 1975—1979 和 1979—1983 两张形变速率图表现了强震活动之后的一种松弛状态, 大范围的沉降活动由震后强烈的差异沉降发展为宽缓的大范围沉降与这一时间段地震活动平静的状态相对应, 可能是地震孕育—发生过程不同阶段的反映。

从前面总结的几个特征中, 我们可以得出一个重要的认识: 在地震的活跃期, 华北地区垂直形变场表现为异常的隆起状态, 形变等值线分布规律性好, 并且局部地区形成特征性异常, 而在地震活动的平静期则相反。为了进一步验证这一认识, 我们又选用了杨国华等(1994)的资料, 对华北北部地区 1983—1988—1992 年的地壳垂直形变场进行

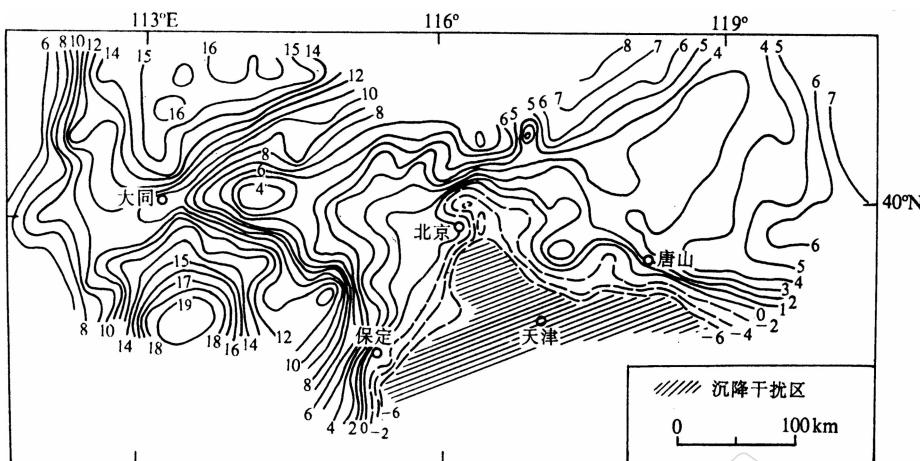


图 5 华北北部地区地壳垂直形变速率图(1983—1988)

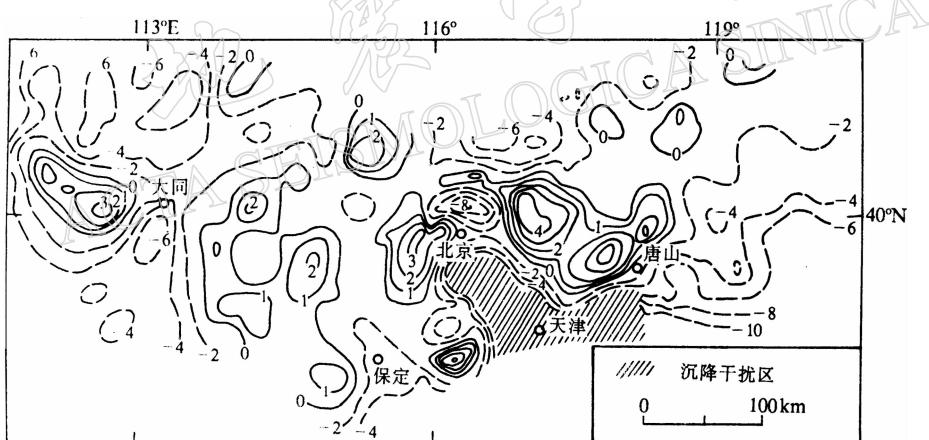


图 6 华北北部地区地壳垂直形变速率图(1988—1992)

了研究. 这几期资料对应整齐, 网形较好, 起算标准与前述一致, 时间分布上刚好跨大同地震, 因此, 能够较好地验证上述认识.

在 1983—1988 时段内, 华北北部形变等值线分布紧密、有序, 呈北东和北西两个方向, 上升十分明显. 而大同地震后的 1988—1992 时段内, 形变总貌大为改观, 形变等值线紊乱、隆凹相间分布, 呈现出无序状态. 西部以大同为中心的四象限分布的特征, 震前震后分布的相对隆凹完全相反, 较之唐山地震更为典型. 两张图对比后这些特征一目了然. 如果说唐山大震前华北地区形变异常范围很大不足为奇的话, 而只有 6.1 级的大同地震, 前兆形变场有如此大的变化是我们始料不及的. 因此我们认为, 区域形变场的异常反映了区域应力场的加强, 展示了板内大范围的形变场变化. 而大地震破裂则是在变化中的重要事件, 它的出现可能标志着这一次应力场加强的结束.

3 华北地区地壳垂直形变场的构造含义

我们引入地壳形变场的概念不仅仅用来研究现代构造活动的结果, 更重要的是用以研究现代构造活动的过程, 以获得现代地壳运动及其动力学信息.

3.1 地壳形变场揭示了深部孕震层的应变信息

地壳形变活动包含了大量的构造信息, 有位移场也有应变场的结果. 许多研究已经证明, 地壳垂直形变资料选取的时间跨度愈长, 其结果也就愈趋近于现代地形、地貌的轮廓. 因此可以推论, 长趋势形变主要反映的是永久形变(地壳均衡运动), 而短周期, 特别是那些分期以地震事件为界的形变图, 则可能揭示更多的弹性应变信息.

地壳形变研究理论告诉我们, 某些宽波长的形变带可能是深部构造活动的反映(Stein and Barrientos, 1985). 一个最为明显的事是, 大区域的地壳垂直形变图与用重力反演得到的地壳厚度图有明显的一致性(应绍奋等, 1988). 我们在研究中曾将华北地区趋势性形变结果与用地震活动资料分析得到的华北地区构造格架(马宗晋等, 1982)和重力反演得到的深部构造图(冯锐等, 1989)进行对比, 发现许多重要的形变特征在这些图中均有反映. 因此, 重要的是从大量的形变结果中识别那些代表深部活动的应变信息. 我们发现, 那些规模较大、跨地表构造并有明显规律性的形变单元, 可能反映了这一结果. 显然, 在这几张形变图中, 那些尺度远远大于易震层厚度的地表形变的时空变化是难以用某个局部偶然因素来说明的. 同时, 大量的震源机制解说明, 华北地区现今构造活动的水平分量大大超过了垂直分量. 因此, 比较适宜的解释是深部(可能为孕震层)的应变活动引起了地表垂直形变的巨大变化.

3.2 地壳形变场揭示了区域构造应力场的活动

虽然薄板理论告诉我们, 用垂向位移反演水平应力具有很大的不确定性, 但是, 垂直形变毕竟是地壳内部应力-应变的表现, 而且目前只有这种资料比较丰富. 所以, 从垂直形变与其它资料综合分析, 可以得出构造应力场变化的一些描述.

为研究垂直形变与构造应力场的关系, 我们搜集了1966—1989年中国及邻区尽可能多的震源机制解分期进行统计分析, 发现在地震活动的平静幕, 我国大陆西部与东部最大主应力轴的优势方向总有一定差异, 而在地震活动的活跃期, 两者的方向则比较接近.

地壳构造应力场主要源于板块运动. 由于板块运动方向的稳定性, 造成了新构造运动所塑造的地形地貌的尺度是以万年来计算的(Turcotte and Schubert, 1982), 这就决定了应力场方向的稳定性. 然而, 位于俯冲和碰撞板块发散边缘共同作用的我国大陆, 可以推测, 当印度板块和太平洋板块活动加强时, 使其夹持的亚欧板块的东南部出现了总体应力场的加强, 这就可能出现较为统一的应力图象, 当相反的情况出现时, 总体方向减弱, 则可能出现较为分散的应力图象. 因此, 垂直形变场与区域应力场加强和松弛可能有着一定的对应关系. 当应力场加强时, 华北地区由北东东向的挤压和北北东向的右旋剪切力控制块体的运动, 较强的挤压、剪切造成了与最大主应力垂直的隆起活动, 对应了地震活动的活跃期; 当总体应力场减弱或松弛时, 则出现较为分散的应力图象, 出现大范围的下降区. 同时, 地震活动处于平静期.

4 地壳垂直形变场与地震活动的研究

本文的几张地壳形变速率图的主要特点是, 对选取资料进行比较严格的筛选, 采用统一的平差方法和统一的起算基准。因此, 比较客观地反映了资料选取年代内地壳垂直形变的演化特征。从时间序列上看, 华北区形变场由1965—1988年出现了异常隆起为主的有序活动—异常沉降为主的无序活动—异常隆起为主的有序活动, 这样一起一伏的变化与地震活动的准周期规律一致。在地壳形变的隆-凹(有序-无序)活动中, 也代表了地震的活跃-平静的变化。中国大陆自80年代后半期进入新的地震活动的活跃幕(张国民等, 1990), 这一特征在地壳垂直形变场上也有反映。这种规律的内在联系可能与构造应力场的微动态变化有关。我们将形变场代表的年代与地震活动期进行对比(表1)。

表1 地形变分期与地震活动分期对比

形 变 图	地 形 变 分 期			地 震 活 动 分 期	
	年 代	中 心 年 代	活 动 情 况	年 代	活 动 情 况
图 1	1965—1975	1969.25	异常上升	1966—1976	活 动 期
图 2	1975—1979	1976.11	差异下降	1976—1985	平 静 期
图 3	1979—1983	1981.48	均匀下降	1976—1985	平 静 期
图 4	1983—1988	1984.14	异常上升	1985—	活 动 期

从表1和前述中不难看出以下两个特点:

(1)地壳形变演化的特征与地震活动期有明显的对应。虽然受资料的限制, 形变图所选用的年代与地震活动期并不完全重合, 但这一特征却体现得十分明显。

(2)地震活跃期。全区出现大面积隆起, 等值线分布呈现明显有序性, 并在未来的震中和邻区出现明显的特征异常, 反映了区域应力场的加强。而地震活动平静期恰好相反, 出现大面积甚至全区下沉活动, 异常呈现明显的无序特征, 反映了区域应力场的减弱。

上述研究中我们没有采用传统的“形变梯度带”等提法, 是因为在板内地区, 大震前数年内孕震区的反应是多点场效应, 垂直形变场研究主要是使用大面积精密水准资料, 是从各个采样点单一形变中提取的统计规律。反映的是构造活动群体涨落水平及其时、空变化, 即某些形变-应变的场信息。如果认为长趋势形变反映的是构造活动群体的稳定态的状况, 那么短期形变则可能反映孕震在自组织过程之中的偏离正常稳定的过程, 使得信息熵降低、有序度提高, 从而进入强震的中期危险状态。值得注意的是, 这次发表的几张形变图, 地震活动的平静期出现了一种大范围的沉降, 地形变有序度较之正常的稳定态(趋势性形变)降低的图象, 这种过程我们推测是与前述的危险期形成是相反的过程。在这一背景之下, 某些局部的点、线、区, 可能出现“异常”, 但是这种异常却是“安全”的异常。这一认识或许对我们使用形变手段预测地震经常发生“虚报”的问题有着一定的启示。

5 讨 论

华北地区地壳垂直形变场演化的研究, 使我们认识到, 在大区域范围内地壳形变与

地震活动的对应是复杂的, 特别是位于板内地震活动区的一个重要类型——裂陷盆地地区更是如此, 并非是某些地表活断层的研究就可以解决问题的(Hill, 1987). 实际上, 我们在仔细地研究了几张地壳形变速率图之后, 会觉得从中发现的问题比起所叙述的特征还要多. 例如, 我们仅仅用了地壳三维运动中的垂直运动分量, 信息量存在严重不足; 再者, 形变与破裂在机制上亦存在根本差异. 我们的形变资料在选取年代上与地震活动周期也有些不同步. 这些基础资料和理论上的不足影响了我们对形变-应变、形变与地震活动等问题的深入讨论. 我们对研究区地壳垂直运动与应力场的关系等也仅限于做了一些推测. 此外, 地壳的垂直形变应当与地质体的诸多内在因素, 如华北盆地新生代沉积物之下的基底岩性、厚度和结构有关. 某些与地热异常因素甚至地表的侵蚀、沉积和断裂引起地表荷载的再分布也可能与之有关(Brown, 1984). 这些问题将有待我们在以后的工作中进一步深入研究解决.

应用地壳形变图研究地震和地球物理场的变化, 已有多年的历程, 但是迄今为止很多观点和结论尚难统一. 我们认为, 关键在于地形变资料的选取和分期不当所致. 笔者对华北地区地壳垂直形变过程研究的特点之一, 是围绕大震事件来划分形变资料的阶段性, 具体计算时采取统一的方法, 以利于对比研究. 因此, 展示了地形变与地震活动之间大尺度的相关性.

工作中得到谢觉民、杨国华、赵承坤、胡惠民等大力协助, 平差计算使用了黄立人的大地形变数据计算软件包, 谨此致谢.

参 考 文 献

- 冯锐、黄桂芬、郑书真、严惠芬、张若水, 1989. 华北地区地壳构造与地震构造活动. 地质学报, **11**, 2, 111—123.
- 马宗晋、傅征祥、张郢珍、汪成民、张国民、刘德富, 1982. 1966—1979 中国九大地震, 216pp. 地震出版社, 北京.
- 杨国华、王若柏、万素繁, 1994. 华北北部(大首都圈)地区近十年来地壳垂直形变的演化. 地壳形变与地震, **14**, 2, 41—47.
- 应绍奋、张祖胜、耿世昌、陈德民、王泽文、何肇雄、夏淑辉、王纪尧, 1988. 中国大陆垂直向现代地壳运动基本特征. 中国地震, **14**, 1, 1—8.
- 张国民、姜秀娥、陈修启、夏歧珍, 1990. 中国地震大形势预测研究, 25—33. 地震出版社, 北京.
- Brown, L. D., 1984. Uplift across long valley caldera. *J. Geophys. Res.*, **89**, 11507—11516.
- Hill, D. P., 1987. Seismotectonic. *Rev. Geophys.*, **75**, 1139—1148.
- Stein, R. S. and Barrientos, S. E., 1985. Planar high-angle faulting in the basin and range: geodetic analysis of the 1983 Borah Peak, Idaho Earthquake. *J. Geophys. Res.*, **90**, B13, 11355—11366.
- Turcotte, D. L. and Schubert, G., 1982. *Geodynamics*, 450pp. John Wiley & Sons, New York.