

文章编号: 0253-3782(2001)01-0054-07

地震前兆的象限性特征及其理论分析^{*}

宋治平 徐 平 张洪魁 樊智勇

(中国北京 100080 北京市地震局)

摘要 在总结华北北部地区唐山、大同地震前地电阻率和形变前兆的象限性特征的基础上, 分析并发现张北地震前的形变和地电阻率前兆也具有一定的象限性特征. 说明前兆象限性的存在并非偶然, 是与孕震体的存在有关. 通过岩石实验与理论分析认为, 在孕震过程中, 前兆异常确实存在象限性特征. 象限性的空间分布范围并不是固定不变, 而是具有“逐渐变大—最大—变小”的过程. 并且象限性的上升区与下降区(或压缩区与膨胀区)在近源区与远源区不同. 如果基于对前兆象限性的认识, 指导分析前兆异常不同形态异常的空间分布, 对地震的可能发震地区预测将具有参考意义.

关键词 地震前兆 象限性 包体流变模型

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

引言

在地震前兆的时空演变特征中, 地震前兆的迁移性与空间非均匀性是非常重要的方面. 梅世蓉等(1993)对前兆的时空转移性作了全面的论述, 并对其机理进行了分析. 而在近年的研究工作中, 取得了一些前兆空间象限性图象较为明显的震例, 并在机理解释方面有所发展. 因此, 本文在总结唐山地震前地电阻率异常和大同地震前形变异常的象限性特征基础上, 分析研究了张北地震前的地电阻率与形变异常的象限性异常, 并应用岩石实验与理论分析结果进行分析, 同时对如何应用前兆的象限性异常预测发震地点进行了讨论.

1 形变场的象限性特征

1.1 大同地震前形变异常的象限性分布

在地震前兆中, 存在形变异常的象限性特征(杨国华等, 1994). 图 1a 为华北北部地区 1983~1998 年地壳垂直运动速率异常图, 由图可见, 1989 年 10 月 19 日山西大同 6.1 级地震前, 在大同周围地区出现一个以大同为中心的明显的形变隆升的四象限分布, 即大同北部的集宁和南部的繁峙附近为两个高值区, 表明相对隆升区, 量级达 12 mm/a; 大同的东西两侧为两个相对低值区, 表示相对凹陷区, 其值为 1~2 mm/a. 总之, 在 1989 年大同 6.1 级地震前, 形变场异常表现出四象限的分布特征. 图 1b 给出了华北北部地区在 1991 年

^{*} 北京市自然科学基金(8992008)与地震科学联合基金(198085)联合资助项目.
2000-03-13 收到初稿, 2000-08-01 收到修改稿并决定采用.

大同 5.8 级地震前后(1988~1991 年)的地壳垂直运动速率异常分布. 可见, 大同周围地区形变异常的象限性分布依然存在, 只是形变异常量减小为负值, 高值区和低值区位置与 1989 年大同地震前完全相反. 如在大同北部的集宁和南部的繁峙附近为两个低值区, 量值减少为 -10 mm/a ; 大同的东西两侧为两个相对高值区, 量值为 $-4\sim-3\text{ mm/a}$ 左右.

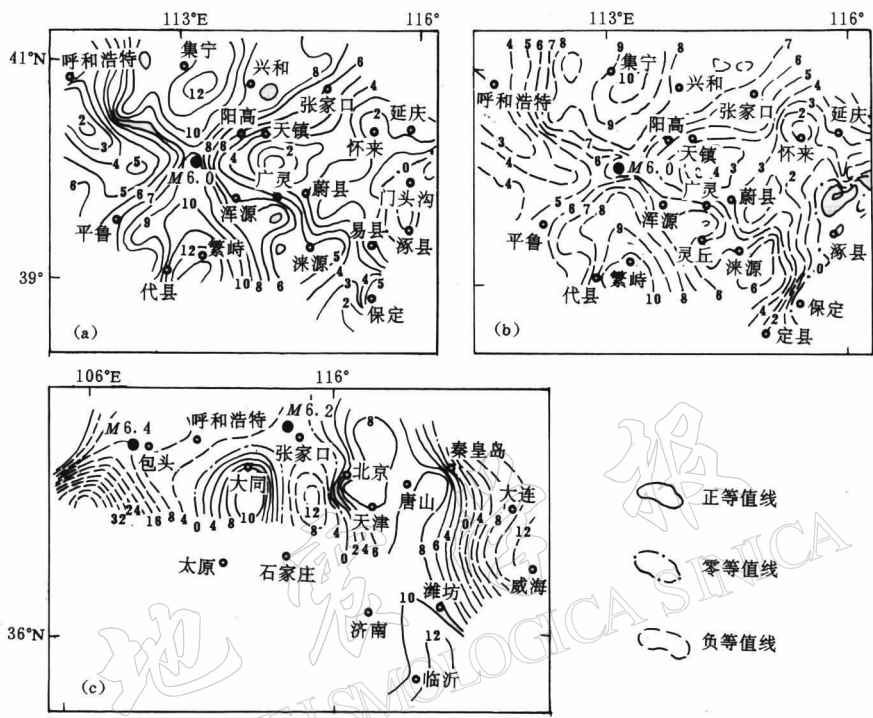


图 1 (a) 1989 年 10 月 19 日山西大同 6.1 级地震前的形变场;
(b) 1991 年 3 月 26 日山西大同 5.8 级地震前的形变场
(c) 包头地震与张北地震前的垂直形变场

1.2 张北地震前形变场异常

利用车兆宏等^①给出的 GPS 观测的华北地区 1992~1995 年地壳垂直形变资料(图 1c), 分析发现张北东部北京附近地区和西南大同附近地区存在两个高值区, 量值为 $8\sim10\text{ mm/a}$. 在张北东南存在一个低值区, 其量值达 -12 mm/a . 虽然张北西北部由于资料原因未画出低值区, 但其值也为 -4 mm/a 左右. 可见, 地震前在张北周围明显存在两个高值区和一个低值区, 形变异常也基本表现出象限性分布特征. 另外, 在 1996 年内蒙包头 6.4 级地震周围, 只在包头西南和东南分别存在一个高值区与低值区. 虽然包头西北和东北地区由于资料所限未画出异常区, 但有资料的地区已表现出两个高、低值异常区.

总之, 两次大同地震前垂直形变场的象限性特征比较明显, 而包头与张北地震前也表现出一定的象限性现象.

① 车兆宏, 谢觉民, 张晶. 1998. 张北-尚义地震地形变前兆及演化特征. 张北-尚义地震科学总结形变学科汇总报告.

2 地电阻率的象限性

2.1 唐山地震前的地电阻率异常的象限性

唐山地震前,地电阻率异常的象限性分布明显(孙其政等,1998).在唐山地震前,对地电阻率长趋势异常的上升台与下降台进行区分,作出其空间分布图(图 2).可见,唐山地震前地电阻率 ρ 的象限性十分明显,由地电阻率 ρ 的象限分布节线求得的震中与实际震中基本一致.而 ρ 异常变化的象限性与震源机制结果也基本一致.把地电阻率台用上半球投影法投影到乌尔夫网震源球网上时,表明所有 ρ 震兆下降的台均位于地震 P 波初动符号向下的象限内,而一个 ρ 上升台和两个变化不明显的台则位于节线附近.遗憾的是在 P 波初动“+”区的两个象限无地电阻率台(主要为海和山区).说明地电阻率异常的象限性分布与震源的孕震过程密切相关.

2.2 张北地震前的地电阻率异常的象限性

张北地震前,首都圈东部地区地电阻率趋势异常最早出现在 1993 年,且多为测线的东西向异常.由此可以推测,该地区应力状态的变化首先从东西向开始,继之于 1994 年出现了上述台站的南北向的变化.包头地震的发生改变了华北地区应力状态的分布,使得张北地震前东部电阻率变化的分布出现了规则的变化.图 3 给出了地电阻率上升异常与下降异常的台站分布,沿张家口—渤海地震带形成一条明显的分界线 AB.首都圈东部的地电阻率异常上升型台位于 AB 线的北部,下降型台位于 AB 线的南部.值得注意的是,首都圈西部的太卜寺旗和阳原台都属于下降型异常,可近似地画出节线 CD.张北地震位于两条节线交汇点附近.可见,首都圈地区张北地震前的电阻率趋势变化也具有一定的象限性分布现象.

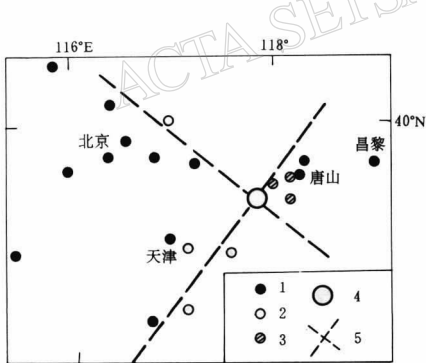


图 2 唐山地震前地电阻率 ρ 的象限性分布
1. ρ 下降异常台; 2. ρ 上升异常台;
3. 不同资料求得的 7.8 级实发震中;
4. ρ 求得的震中; 5. ρ 异常象限分布节线

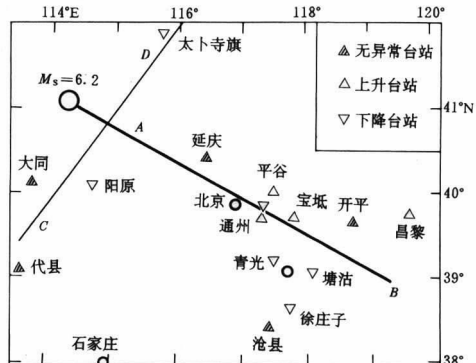


图 3 张北地震前地电阻率趋势异常的象限性分布

3 前兆象限性特征的理论分析

3.1 平板破裂实验

为了模拟地震前形变的近场与远场特征,应用有机玻璃板固定在剪切仪上,在两块有

机玻璃中用一个铅笔芯固定,设想铅笔芯处的闭锁部位就是即将发震的震源.在剪切作用下使有机玻璃板发生剪切错动.在铅笔芯断裂前,布设在玻璃板不同距离(2, 8, 15 cm)的观测点的形变曲线形态相似,并且都发生突变反向,然后发震.距离愈近反应愈强,距离愈远反应愈弱.破裂时产生震动,其纵波初动呈四象限分布(图 4).研究表明,地电阻率异常与震源机制间的关系是地电阻率下降的观测点均位于P波初动符号向下的象限(即压缩区)(梅世蓉等, 1993).

3.2 包体理论结果

宋治平(1996)将 Добровольский (1991) 的地震孕育的包体弹性模型发展为包体流变模型,并初步建立了相应的理论.通过计算体应变的时空场表明,硬、软包体的空间场均存在象限性特征.图 5 给出了半无限介质中存在硬、软包体和无包体时地表面的体应变变化的立体图及相应的等值线图 $\Delta\theta$. 为了便于分析,特定义球形包体(半径为 25 km)周围 2 半径尺度的区域为近源区,其外的区域为远源区.

硬、软包体皆能产生体应变高值区和低值区,在相同时刻,软包体产生的体应变极值低于硬包体(图 5a, c),无包体存在时(图 5b),不产生体应变的变化.硬、软包体产生的体应变的总体特征基本一致,只是硬包体产生高值区的象限恰为软包体的低值区,反之亦然.例如在第 1 象限远源区,硬包体为正,软包体为负(图 5d, e).由图 5d, e 表明,在包体半径 2 倍尺度的范围存在体应变变化的零值线.在远源区,硬包体在第 1, 3 象限为正,在第 2, 4 象限为负;软包体与硬包体刚好相反.

在近源区内体应变呈象限分布,硬包体在第 2, 4 象限为正,在 1, 3 象限为负,而软包体则刚好相反(图 5f, g).

另外,在相同时刻,硬包体产生的体应变值高于软包体.硬包体产生的体应变的空间范围比软包体的大(图 5d, e).

可见,硬、软包体体应变的空间场特征既有相似之处,也存在差异.相似之处在于两者都存在象限分布,2 倍震源尺度区内与其外的分布状态正相反;不同之处,硬包体产生的体应变增大区正好与软包体产生的减小区相对应.

当然,体应变的空间场并非固定不变.由理论公式计算表明,把孕震体作为三维包体,无论包体是硬的还是软的,孕震体在地表产生的体应变的空间分布的共性特征都具有象限性.而两者间也存在差异.硬包体产生的体应变具有阶段性变化,即体应变的空间范围和强度随时间存在逐渐增强的过程,而在极值后,还存在一个缩小和变弱的过程.宋治平等(2000)论述了体应变等值线的空间范围也经历“逐渐变大—最大—变小”的过程.总之,硬包体产生的体应变,无论其值还是等值线的空间范围,都经历了三阶段过程.而软包体产生的体应变只具有趋势性变化(宋治平, 1996).

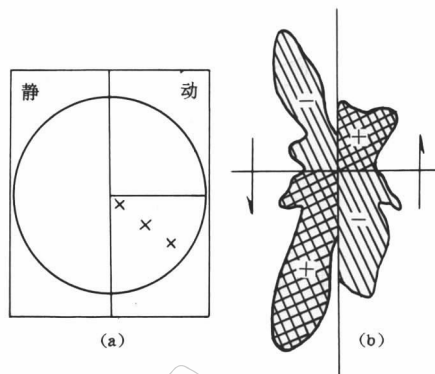


图 4 平板玻璃破裂实验

(a) 平板玻璃及应变观测点布置图;

(b) 纵波初动符号分布

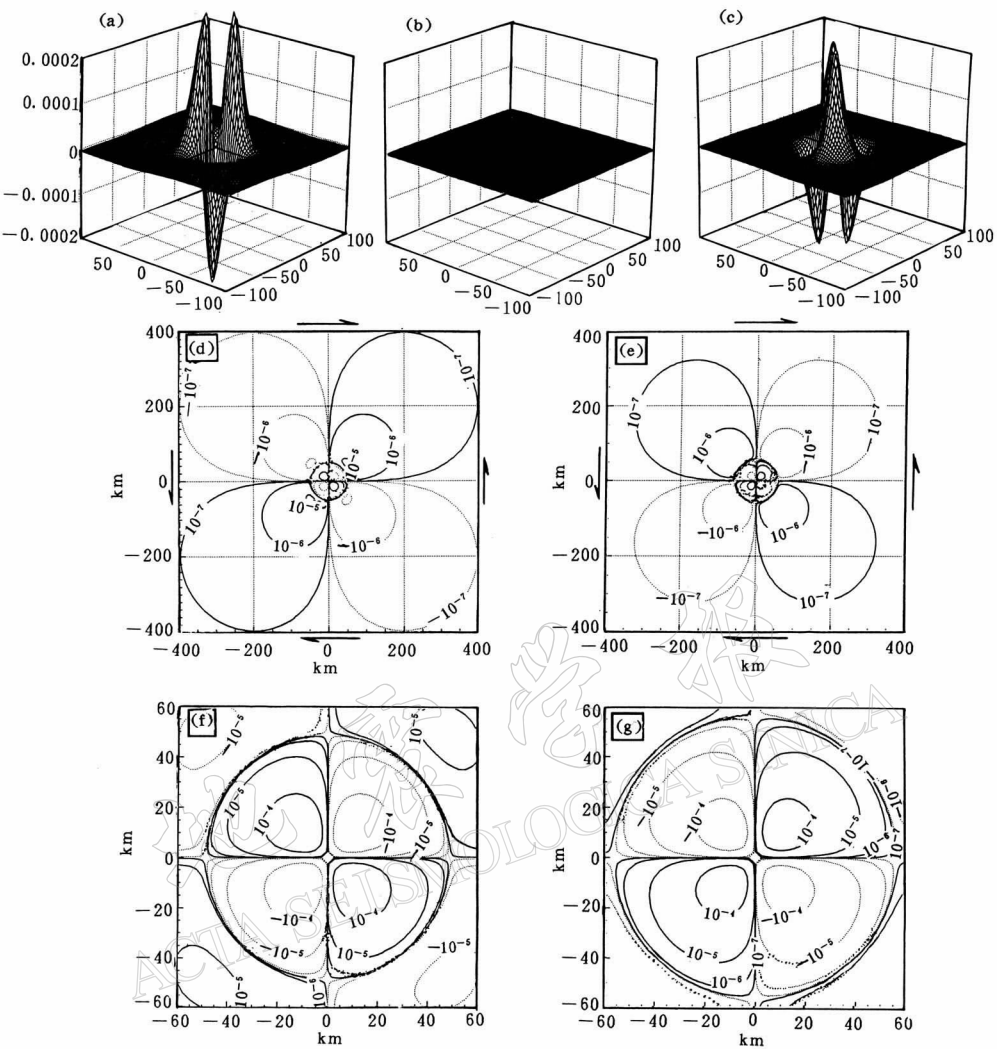


图 5 硬、软包体在地表产生的体应变(宋治平, 1996)

(a)、(b)、(c) 分别为硬包体、无包体和软包体产生的体应变立体图；(d)、(e) 分别为硬、软包体
远场体应变等值线图；(f)、(g) 分别为硬、软包体近场体应变等值线图；平面等值线图
中，实线表示体应变膨胀，其值为正；虚线表示体应变压缩，其值为负

3.3 岩石实验结果

需要强调的是，宋治平(1996)依据的是粘弹性介质的本构关系，反映孕震过程中的一些特征，但并未涉及破裂问题。而许昭永等(1997)给出了在常应力加载的情况下，三维介质中嵌入硬包体的岩石破裂实验的应变场的演变过程(图 6)。由图可见，在低应力时期，应变场不明显(图 6a, b)，当边界应力逐渐增加，应变场则逐渐增强，其象限分布更明显，其值也逐渐变大(图 6c, d, e)。但值得注意的是，在破裂前的 0.3 s 和 0.1 s 两张图，破裂前 0.3 s 的应变值增加到最大，其范围也达到最大；而在破裂前 0.1 s 的应变值略有变小，四象限分布区也略有变小。图 6a~d 相当于 α 阶段，图 6d, e 相当于 β 阶段，而图 6f 则相当于 γ 阶段。虽然实验结果与理论结果的条件并不完全相同，但两者确实存在一定的相似性。

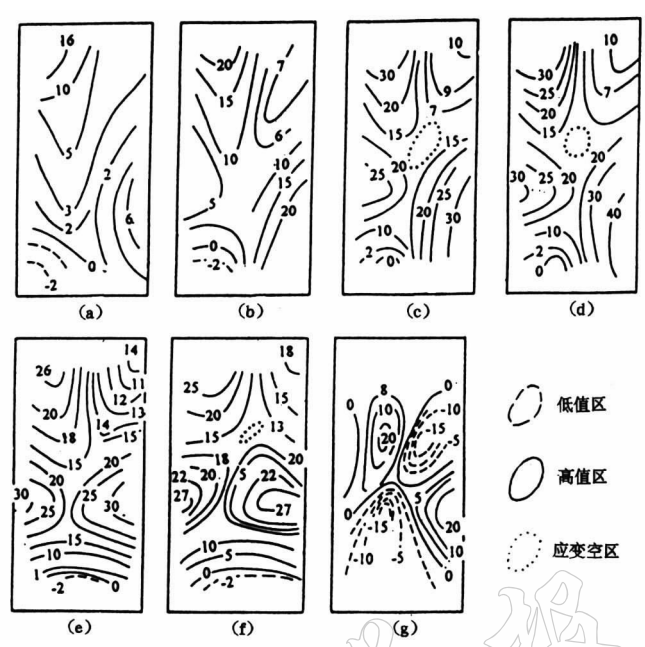


图 6 孕震过程中应变场时空演化的实验研究

(a) 31% 破裂应力；(b) 62% 破裂应力；(c) 93% 破裂应力；(d) 99% 破裂应力；
(e) 破裂前 0.3 s；(f) 破裂前 0.1 s；(g) 破裂后 0.2 s

总之，地震形变与地电阻率前兆的象限性特征的存在具有一定的理论基础，因此，将前兆的象限性特征应用于地震预测无疑是有意义的。

4 前兆的象限性异常对地点预测的意义

在大同、张北地震前，形变异常均出现不同尺度的象限性；而在唐山、张北地震前，地电阻率异常也出现一定象限性异常。说明前兆象限性的存在并非偶然，是与孕震体的存在有关。通过岩石实验与理论分析认为，在孕震过程中，前兆异常确实存在象限性特征，象限性的空间分布范围并不是固定不变，而是具有“逐渐变大—最大—变小”的过程，并且象限性的上升区与下降区(或压缩区与膨胀区)在近源区与远源区亦不同。如果基于对前兆象限性的认识，指导分析前兆异常不同形态异常的空间分布，将对地震的可能发震地区预测具有重要参考意义。

具体思路如下：通过对前兆异常的上升与下降(或压缩区与膨胀区)台站分布进行分析，作出不同区的分界线，在理想模型的理论指导下确定未来可能发震的地区。另外，象限性的空间分布范围的阶段性变化特征还有助于判断该前兆属于长期、中期或短期异常。

5 结语

通过对唐山、大同以及张北地震前形变和地电阻率前兆的象限性特征的分析，表明前兆的象限性确实存在，是与孕震体的存在有关。通过岩石实验与理论分析认为，在孕震过程中，前兆异常存在象限性特征，象限性的上升区和下降区在近源区和远源区不同。象限

性的空间分布范围并不是固定不变的,而是具有“逐渐变大—最大—变小”的过程.这些特征对地震发震地点的预测具有指导意义.当然,前兆象限性的震例研究与预测应用都有待进一步完善和检验.对于同一强震前,形变、地电阻率异常的象限性特征是否同时存在?流体异常是否也存在一定象限性?本研究注意到张北地震前形变与地电阻率异常同时存在一定象限性;唐山地震前地电阻率异常存在明显象限性,形变资料在震前缺乏,只表现出地震前后形变场的象限性分布;而大同地震前形变异常出现明显象限性,但地电阻率异常如何呢?此外其它前兆(如水位)是否也存在象限性异常?等等,这一系列问题都有待进一步深入研究.

参 考 文 献

- 梅世蓉,冯德益,张国民,等.1993.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,270~271
- 孙其政,张国民,李宣璐,等.1998.电磁学分析预报方法[M].北京:地震出版社,190~191
- 宋治平.1996.加卸载响应比与其它地震前兆时空演化研究及其应用[D].[学位论文]:国家地震局地球物理研究所,15~110
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉.2000.包体流变模型的体应变场时空演变的理论分析[J].地震学报,22(5):491~500
- 杨国华,巩曰沐,杨春花.1994.大同地震与华北北部地壳异态垂直运动[J].中国地震,10(1):13~18
- 许昭永,王彬,赵晋明,等.1997.含硬包体试样破裂特征的实验研究[J].地震学报,19(1):79~85
- Добровольский И. П. 1991. Теория Подготовки Тектонического Землетрясения [М]. Москва: ИФЗ АН СССР, 1~218

QUADRANT CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE PRECURSORS AND ITS THEORETICAL ANALYSIS

Song Zhiping Xu Ping Zhang Hongkui Fan Zhiyong

(Beijing Seismological Bureau, Beijing 100080, China)

Abstract: On the basis of quadrant features of the precursors in geo-electricity and deformation in the case of Tangshan earthquake and Datong earthquake in North China, the same feature of geo-electricity and deformation precursors before Zhangbei earthquake has also been found. It seems that the existence of the quadrant behavior is not accidental, which might be related to existence of the earthquake generations. It is known in terms of rock experiment and theoretical analysis that there exists actually quadrant feature in earthquake-generating process with the range of quadrant spatial distribution unfixed, showing features of "gradual increasing \rightarrow maximum \rightarrow lessening slightly", and showing that the increasing zone and the decreasing one (or compressing zone and expanding one) of the quadrant in the near-source region could be different from that in the region for from the source. Based on the knowledge of quadrant characteristics of earthquake precursors and analyzing the spatial distribution of different precursory anomaly types, which may be possess some reference meaning to the earthquake occurring region.

Key words: quadrant; precursors; rheologic inclusion theory