

# 地震预研研究

——对此问题及将来工作方向的个人见解\*

F. D. Stacey

(澳大利亚昆士兰大学物理系)

## 摘要

本文是作者于1983年访华期间接受中国学术刊物的请求而撰写的。

文中指出,地震应力在数量上相当小,因此它的效应一定很微妙,需要有灵敏的仪器去觉察它们。文中对压磁效应、波速比、应变、地倾斜、大地测量、电阻率、水气和前震等各国常用的地震预报手段进行了评价,提出了建议。结论为,虽然注意到了 Brunel<sup>[1]</sup> (1979) 关于“在原理上地震可能是不可预报的”强有力的论证,但作者并不那样悲观。认为地壳可能十分不均匀,它的状态可能是多变的,这就要求我们拥有大量数据。所以必须同时使用几种方法和大量的仪器进行观测。更多的注意力应放在: (1)地震波传播的各向异性和衰减, (2)多色激光测距, (3)改善构造磁学中的信噪比, (4)在电导率测量中使用可交替极性的供电极和较大面积的测量极网和(5)对前震和余震序列的统计学分析进行重新仔细检验。

## 一、前言

地震波谱和大地测量所得到的地震位错模式清楚地表明,紧接地震发生前的时间内所释放的能量是逐渐地积累而储存在一局部的震源体积内的。人们提出的所有预报方法都是建立在这样假设的基础上,这储存的弹性能的存在,造成了这一区域在状态或物理性质上的异常。重要的是应该认识到,这储存的能量密度相当低。如借助于应力的释放来表示,则对一些地方性强震较可靠的估计是,最高的应力释放值为100巴的量级。因此,对于那些能承受更大应力的岩石,其破碎前的性质我们现在暂不考虑。也有人做了一些实验(例如在非地震区做的应力释放),但其结果并不能充分支持更大的应力,虽然所有这些测量都是在比地震应力的深度范围肯定要浅的条件下进行的。总的结论为,地震应力在数量上相当小,因此它们的效应一定很微妙。我们相信,需要有灵敏的仪器去觉察它们,并相信,从其它自然的变化中分辨出地震的效应是困难的。

由于地震的潮汐触发作用还缺乏明确的证据,还不能建立以应力线性积累到某一破裂点为基础的模式。在潮汐应力某有关分量减小的一瞬间,与增加的一瞬间同样容易触发一次地震。触发作用仍然不清楚,而且不象是由破裂应力那样简单的因素来控制的。这些观测支持了这样的观点:震前过程随时间变化是高度非线性的。有时假设,它们是

\* 1983年9月2日收到。此稿中文译稿由郝锦绮提供。

急剧灾变性地、并可能按特定的方式发展的，但这一点并没有得到确切的证明。确定震前效应的时间特征必须是地震预报研究的极基本的目标。如果出现了一种或几种可分辨的并相当简单的特征图象，就有可能做出预报。如果发现过多不同的和偶然的随时间变化，那么预报充其量也是不可靠的。

## 二、压磁实验

应力变化对于磁化岩石产生压磁效应，而引起磁异常随时间的变化，具有两个特有的优越性。(1)压磁效应测量的是作用在岩石上的应力，而不依赖于测量应变而推导应力，和(2)这一效应在直至居里等温面(一般假定它位于约20公里深)的各深度都存在。虽然地表异常图象更强地受到浅部磁化的影响，特别是对小范围的异常，但是通常磁化率随深度的增加可以在一定程度上对它有所补偿。压磁异常代表应力从地表至居里等温面的积分。

各国的地震预报计划和一些以大学为基础的地震预报工作都包括了磁观测，但迄今所得的资料还不能引出什么结论或者甚至是令人失望的。早年的期望过于乐观了。原因之一是在震磁效应的简化计算中，一些作者假设了不真实的应力集中，因此他们所估计的磁效应比实际应该预期的要强。最近一项计算避免了这一潜在的危险(Hao等<sup>[2]</sup>，1982)，并且表明，即便在最有利的情形下，在高磁纬并且断层走向为最有利时，压磁效应仍然只有很局限的区域范围和很低的强度(在极端情况下也仅有几伽马)。在不利的情况下，特别是在低磁纬地区，利用现有的技术可能观测不到磁效应。

在新的更密或更大范围的磁力仪台网或者重复测量建立以前，应着重加强以下三个方面：

1. 改进仪器。看来有可能使质子磁力仪可靠地观测到0.1伽马或者更少(最小读数比它还要小得多)。如果普遍使用时，它们将取代目前用于震磁研究的陈旧的仪器。在不需要仪器轻便化的永久性台站上，质子磁力仪中使用大探头将会改善信噪比(但将要求更小心地避免磁场梯度)。必须在质子旋进的末尾计数周期，进行信噪比的常规检验，因为探头在被调谐到某个所期望的质子频率时会产生噪声而混淆信号。另一个值得重视的进展是使用(无氧)苯做探头物质，从而得到比用水较长的信号衰减时间。有人用煤油做探头物质来解决低温下冻结的问题，但煤油的质子弛豫时间很短，不能得到准确读数，因此应该避免使用。
2. 需要进行更复杂的数据处理的消除不同地点仪器的读数差中的噪声。数字(预测)滤波技术使用了向量场数据对总磁场记录进行校正，这看来是一种有希望的方法(Davis等<sup>[3]</sup>，1981)。在较有利的条件下，在相隔一定距离的台站上同步取得的读数之间或者时均值或24小时均值之间进行简单相减，可能是足够了。需要仔细研究磁场差的噪声水平随台站间隔距离的变化。从瓦努阿图地区(在澳大利亚以北)M. T. Gladwin所得的结果(将于1983年8月的IUGG汉堡会议上报告)表明，时均值差值的均方根误差随着台站间隔距离(远至500公里)的变化并不大，而从加利福尼亚所得结果(M. J. S. Johnston)表明，磁场差的噪声水平随台站间隔距离而大大增加(见图1)。要看中国的资料是加利

福尼亞类型还是瓦努阿图类型的,将会很有意思。

3. 具有很深起源的地磁场长期变化使局部磁异常产生了随时间的变化,这是通过对局部变化磁化率的作用而产生的,而正是这局部变化磁化率引起了局部异常。甚至于长期变化的梯度本身在一个分布宽广的台网内也造成可观测的磁场差,尽管此时它的图象很平滑。由于岩石磁化率引起的长期变化的影响,需要有向量磁场测量数据来进行改正,将构造磁效应记录“校正”到零长期变化的状态。在这三个问题全部得到令人满意的解决之后,震磁效应测量才有意义。

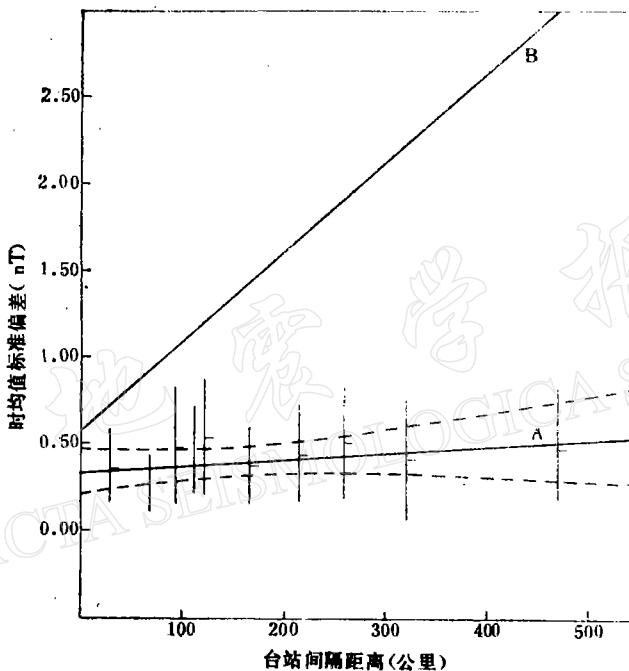


图 1 300 小时时间段内总磁场时均值差值的标准偏差和台站间隔距离的关系。

[进行比较的资料为: A 从瓦努阿图地区地磁仪台网 (M. T. Gladwin) 和 B 从加利福尼亞资料 (M. J. S. Johnston) 所得到的。]

### 三、波速异常

有人报道,在主震前,震中区域内产生的小震的 P 和 S 波视走时比在主震前显示出异常变化。这想法起源于苏联的 Nersesov 等<sup>[4]</sup>(1969),随后在美国引起了热烈的追索。通常的解释为,由于震前震源体积的膨胀,波速发生了异常,特别是  $V_p$  强烈降低。不论对这些资料如何评价,以上解释是如此似是而非,使得它让这整个设想失去了信誉。所报道的波速异常比可能出现的要大很多,但特别令人怀疑的是这一事实:不论所测的波是否完全地穿过早期的震源体积,  $V_p/V_s$  比值的减少总是趋于一个固定值。Lockner 和 Byerlee<sup>[5]</sup> (1978) 从地震波衰减的角度,提出了一种似乎可能的解释。他们指出,报道的这些

异常是由于观测者丢失初至而记录了第二个(在极端的情形是第三个)波峰而造成的。如果在膨胀体积中衰减增加的话,以上错误很自然会发生。我的观点是,波速异常的想法不应整个放弃,而应寻找肯定是很小的真正的波速异常,重点应是记录衰减的变化。这是不容易的。衰减的变化有可能表现为接收信号的波谱比的变化。为了考虑震源的变化,某些不受震源膨胀影响的控制性的观测也是必不可少的。

寻求真正波速变化的一种可能途径是从 S 波偏振的角度寻找各向异性的证据。Crampin 等<sup>[6,7]</sup> (1978, 1980) 强调了这种途径。有可能由于震源的复杂情况有效地使 S 波的一种偏振辐射滞后于另一种,需进行仔细的研究来检验,但是,比较 S 波的两种偏振的到时,从原理上看来是寻找波速变化的直接和灵敏的办法,它避免了可能由震源迁移所带来的困难,但存在的问题是,在离震源近处的 S 波起始可能被 P 波波列所模糊。为了选取特定的偏振,此时需要三分量多道磁带记录仪。

总之,我以谨慎甚至怀疑的态度看待  $V_p/V_s$  资料。我不能接受迄今人们所认为的真实波速变化的量级是合理的。如果地震记录中这种系统性的随时间变化是明显的,则它必须作为一种有希望的技术而加以验证,但在对它的机理搞清之前,用处似乎是不大的。

#### 四、应变、地倾斜和大地测量

短基线应变和近地表设置的倾斜仪,因干扰过强,用处不大。干扰并不是来自仪器而是来自大自然,降雨有着特别大的影响。在短基线测量仪器中,只有那些安放在深于地下水而又有排水的钻孔中的仪器才可能是有用的。唯一这种系统的研究是用 Sacks-Evertson 体积应变仪进行的 (Sacks 和 Evertson<sup>[8]</sup>, 1970)。为使小尺度地表应变测量避免漂移,使之有用,其中技术困难如此之大,以至于我相信目前没有必要再为这种仪器下功夫。注意力应放在置于深于地下水的钻孔仪器和基线大于 1 公里的长基线测量。

长基线应变观测 (10 公里量级) 明显提供了较好的成功的机会。这种情况下,最好的激光测距仪的真实精确度和稳定性看来是足够的,困难在于对大气折射进行校正。人们在十年前就认为三色激光光源或双色激光光源加一微波源的仪器即将问世,但至今还未出现。原则上讲它们可以对大气的变量如密度和含水量进行改正,但在目前阶段,到底还存在哪些实际困难不十分清楚。推进这项工作是会有技术上的困难的,但至今尚未实现,则一定是由于努力不够或兴趣不足。我找不到任何理由去怀疑这一发展的重要性,也不相信这些困难是不可克服的。

#### 五、电 阻 率

我没有地电阻率测量的切身经验,并且一直认为,靠近电极的地下水条件的变化给测量带来了如此大的干扰水平,使得测量失去意义。然而,当我最近访问在北京的国家地震局单位时,我所看到的资料却迫使我重新考虑这一态度。我认为还不清楚电阻率变化的形式而考虑进行测量的最好方式是可能的,因此,可以提出一些改进和发展的建议,它们看来可以给改善测量带来希望。考虑图 2 中电极的几何位置。在相距譬如说 1 公里的两

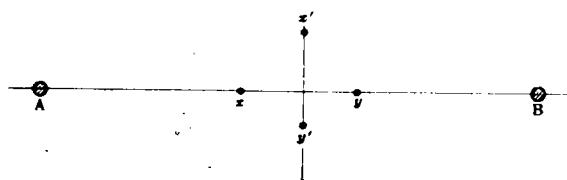


图 2 地电实验中的电极布设。

[A 和 B 为供电极, x 和 y 为按常规方法布设的测量 (电位) 极。  
x' 和 y' 为替代 x 和 y, 或者最好是补充 x 和 y 的电位极. 为了  
进行最有效的测量, 应该使用比之分布宽广得多的测量极网.]

个电极 A 和 B, 电流流入地下, 如按惯用的方法, 是测量由此引起的跨  $x, y$  (相距 300 米量级) 的电位差. 通常它只有 A, B 之上所加电压的千分之几. 要寻找的是  $x, y$  上电压随时间的很小的变化量. 但是, 这方法并没有充分利用地表上的电位变化量. 至少  $x', y'$  上的电位差是很令人感兴趣的, 因为在完全对称情况下它应为零. 事实上地质条件绝不会使它真正为零, 但是它应大大小于  $x, y$  上的电压. 由发展中的电导率异常 (z) 所引起的  $x', y'$  上小量电压变化, 比在  $x, y$  上的应该明显. 我们甚至可以考虑用尝试法来找出零电压的电极位置. 但是, 即使使用  $(x, y, x', y')$  四个电极也还没有充分利用可以得到的全部信息. 如果使用较大的测量电极网, 就有可能确定电极网的哪一侧电导率变化最剧烈.

我的理解是, A → B 间直流电以 5 分钟间隔供电和断电一次. 但我倾向于使电流反向而不是断路, 这样会使电极正反变号, 将减少 (但不是消除) 由感应极化效应所带来的怀疑或困难.

## 六、水 氢

从一些文献报告中来看地下水中氢含量的常规测量似乎是有希望的, 尽管有可能选择发表的仅是一些有希望的记录. 如果要普遍使用这种方法, 必须考虑降雨、灌溉等所伴随的变化. 我不从事这一专业, 不能进一步评论.

## 七、前 震

小震活动性的增强和减弱以及二者前后相继交替出现已被用作为大震临近的证据. 在这方面不同的大地震可以表现得这样不同的事实不但使人对这方法本身, 而且对整个地震预报工作失望. 单一前震观测本身似乎永远不能成为地震预报方法的基础, 但它可能成为其它方法的有用补充. 云南省地震局刘正荣先生介绍给我一种数据分析方法, 看来表明了前震序列有着一种明显的震级分布图象. 确定他的方法的普遍适用性将是重要的.

## 八、结 论

比起 10 年或 15 年前, 可靠的地震预报距离我们似乎更远了。我注意到 Brune<sup>[1]</sup> (1979) 的强有力的论证: 在原理上地震可能是不可预报的, 但我不象他那样悲观。地壳可能十分不均匀, 它的状态可能是多变的, 但这仅要求我们拥有大量的数据。必须同时使用几种方法和大量的仪器和观测。我们不能先验地完全否定任何建议, 即令我不能假装懂得它们(动物反应属于此类)。无论如何, 我们有科学上的责任去决定, 哪些可能的方法值得我们做最大的努力。我个人的判断是, 更多的注意力应放在(1)地震波传播的各向异性和衰减,(2)多色激光测距,(3)改善构造磁学中的信噪比,(4)在电导率测量中使用可交替极性的供电极和较大面积的测量极网和(5)对前震和余震序列的统计学分析进行重新仔细检验。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. N. Brune, Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena. *J. Geophys. Res.*, 84, 2195—2198, 1979.
- [ 2 ] Jinqi Hao, L. M. Hastie and F. D. Stacey, Theory of the seismomagnetic effect: a reassessment, *Phys. Earth Planet. Int.*, 28, 129—140, 1982.
- [ 3 ] P. M. Davis, D. D. Jackson, C. A. Searle and R. L. MacPherson, Detection of tectonomagnetic events using multichannel predictive filtering, *J. Geophys. Res.*, 86, 1731—1737, 1981.
- [ 4 ] I. L. Nersesov, A. N. Semenov and I. G. Simbireva, Space-time distribution of travel times of transverse and longitudinal waves in the Garm region, In M. A. Sadovsky *Experimental Seismology*, Moscow. Science Publishing House, 334, 1969.
- [ 5 ] D. A. Lockner and J. D. Byerlee, Velocity anomalies: an alternative explanation based on laboratory experiments, *Pure and Appl. Geophys.*, 116, 765—772, 1978.
- [ 6 ] S. Crampin, Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 53, 467—496, 1978.
- [ 7 ] S. Crampin, R. Evans, B. Ucer, M. Doyle, J. P. Davis, G. V. Yegorkina and A. Miller, Observations of dilatancy-induced polarization anomalies and earthquake prediction, *Nature*, 286, 874—877, 1980.
- [ 8 ] I. S. Sacks and D. W. Evertson, A sensitive borehole strain-rate meter, Carnegie Institution Washington Year Book 68, 448—452, 1970.

# **EARTHQUAKE PREDICTION RESEARCH—A PERSONAL VIEW OF THE PROBLEMS AND THE DIRECTIONS WHICH FUTURE WORK SHOULD TAKE**

**F. D. Stacey**

*(Physics Department, University of Queensland)*

## **Abstract**

This paper is written as requested by the Chinese scientific journal during the author's visit to China in 1983.

The author believes that seismic stresses are quite small in magnitude and therefore, their effects must be subtle. Sensitive instruments will be required to detect them. For such disciplines used in many countries for earthquake prediction, as piezomagnetic effect, velocity ratio, strain, tilt, geodetic surveying, electrical resistivity, radon and foreshocks, their nature and prospectiveness are discussed and suggestions made. It is noted that although the argument of Brune<sup>[1]</sup>(1979) that earthquakes may be unpredictable in principle is forceful, the author is not so pessimistic. The earth's crust may be very inhomogeneous and its behaviour fickle, but that only demands that we have a massive redundancy of data. Several methods and numerous instruments and observations must be used simultaneously. More attention should be given to (1) seismic anisotropy and attenuation, (2) multicoloured laser-ranging, (3) improvements in the signal/noise ratio in tectonomagnetism, (4) use of alternative and more extensive arrays of detector electrodes in resistivity measurements and (5) a careful re-examination of the statistics of foreshock and aftershock sequences.