

寂静地震与地震预测的物理问题*

吴 忠 良^{1 2 †}

(1 中国科学院研究生院地球科学学院 北京 100039)

(2 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘 要 寂静地震是指发生了缓慢的位错、但几乎不辐射地震波的“地震”。在目前的地震预测的物理学研究中,通常是通过计算历史上曾经发生过的地震所引起的应力变化,或者通过研究地震活动的统计性质或“图像动力学”,来推测一个断层带上发生地震的危险性。寂静地震的信息的缺失,形成了地震预测的物理学研究中的一个很大的“盲区”,而在相当程度上,解决地震预测的物理问题的主要困难和可能的突破的希望,也许就在于此。寂静地震的研究目前还很不深入。关于寂静地震的性质,文章作者提出两个猜想(1)寂静地震的频度,满足类似于GR定律的幂律分布(2)最大的寂静地震的地震矩,与“可见”的最大地震的地震矩相当。

关键词 寂静地震 地震触发 地震预测

Silent earthquakes and the physics of earthquake prediction

WU Zhong-Liang^{1 2 †}

(1 College of Earth Science, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(2 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract A silent earthquake refers to a slow slipping event which does not radiate seismic waves. In current earthquake prediction, seismic hazard is generally estimated through the stress change caused by previous earthquakes and/or deformation, or through the statistics or pattern dynamics of seismic activity. Lack of information about silent earthquakes has left a missing piece in the physics of earthquakes, but it is this very piece that may lead to a breakthrough in earthquake prediction. We review the latest developments in this area, and propose two conjectures on the properties of silent earthquakes: (1) The frequency-magnitude relation of silent earthquakes satisfies Gutenberg-Richter's power law; and (2) The maximum silent earthquake has a seismic moment comparable to that of the maximum 'visible' earthquake.

Key words silent earthquake, stress triggering, earthquake prediction

1999年8月17日,土耳其伊兹米特发生强烈地震。地震发生的消息传到美国哥伦比亚大学拉蒙特-多赫蒂地球观象台(Lamont-Doherty Earth Observatory),在那里长期工作的资深地震学家Sykes L R教授马上在实验室召开会议。他拿出1998年出版的J. Geophys. Res.(《地球物理研究杂志》)专辑^[1],兴奋地告诉大家,伊兹米特地震“恰好”发生在地震学家“预测”^[1]的地震危险区内。成功的地震预测,迄今还非常少。1975年海城地震之后,就再没有在减灾实效方面可以与之相提并论的幸运的成功预报。因此,1999年的伊兹米特地震,在相当

程度上是给地震学家的一个很大的鼓舞。

* 国家重点基础研究发展计划“九七三”计划(资助项目 2004-02-05收到初稿 2004-06-13修回)

† E-mail: wuzhl@gscas.ac.cn

1) 这里所说的“地震预测”,用地震学的语言说,相当于“中期地震预测”(intermediate-term medium-range earthquake prediction),用工程地震学的语言说,则相当于“依赖于时间的地震危险性估计”(time-dependent seismic hazard estimation)。与短临地震预测不同,在中期地震预测领域,还是有一些既有物理内容、又有可操作性的方法的,“应力触发”就是其中的一个方法。20世纪90年代以来,Sykes一直在倡导“应力触发”方面的研究。那天他在实验室召集会议的时候,笔者也在场。

Sykes 所说的“预测”地震危险区的思路,在物理上是颇为简单的.人们很早就知道,地震是地球介质中强度较低的部分承受不了逐渐积累起来的构造应力而发生破坏的结果,漫长的地质历史使这些强度较低的部分形成了“断层带”.因此,一个比较切实可行的进行地震危险性估计的方法,就是计算一个断层带上,通过加载和以往的地震,究竟积累起了多少应力^[2].积累起来的应力可以对地震的发生起到“促进”的作用,地震学家称之为“应力触发”(stress triggering),也可以起到“抑制”的作用,地震学家称之为“应力影区”(stress shadow).目前,这在地震预测研究中几乎是惟一的一个既有明确的物理意义、同时又具有一定的可操作性的估计地震危险性的方法.所以不奇怪的是,伊兹米特地震后,“应力触发”和“应力影区”很快成为地震学方面的出版物中使用越来越频繁的两个关键词.

然而,这一方法,连同其他的地震预测方法,所取得的成功仍十分有限.如所周知,现在,地震预测问题还是一个世界性的科学难题.这种情况有很多原因,比如,对地球介质的细节了解不够,就是一个重要的原因.而在诸多原因中,有一个非常重要的原因,近年来开始得到越来越多的重视,这就是,在地震的物理学研究的视野中,还存在着一个巨大的“盲区”,这个巨大的盲区就是寂静地震.在一定程度上,地震的物理学中的寂静地震,与宇宙物理学中的暗物质多少有些类似.

1 “静悄悄”的地震

“寂静地震”是指发生了缓慢的位错(即地震的断层运动不为零)却几乎没有地震波辐射(即地震波辐射能量几乎为零)的“地震”.寂静地震与蠕变相似,但就时间过程来说,寂静地震比地球介质的蠕变快得多;从空间尺度来说,寂静地震不同于分布在较大的空间范围内的蠕变,而更像是一次“地震”.

对寂静地震的认识是一个逐渐明确、逐渐深化的过程.历史上,一些地震学家曾经把寂静地震称为“慢地震”.本来这个称呼并没有什么问题,但由于另一些地震学家有时也把那些震源过程的持续时间较长、地震波的长周期成分较大、通常与海啸联系在一起的地震称为“慢地震”^[3],所以,区分慢地震(slow earthquake)和寂静地震(silent earthquake 或 quiet earthquake)这两个概念,就显得非常必要了.

按照一般的说法^[4],位错传播速度的数量级为

千米每秒的属于通常的地震,数量级为百米每秒的属于慢地震,数量级为十米每秒的属于寂静地震,而数量级低于一米每秒的则属于蠕变.

2 寂静地震的观测和震源性质

寂静地震没有地震波辐射,因此一般的地震仪记不到寂静地震的信号.要想观测寂静地震,就一定要在距离寂静地震的震源比较近的地方,观测甚长周期,或者说接近于“零频率”的地形变信号.显然,用连续形变测量方法,例如,用连续 GPS 观测,可以观测到在测点附近发生的寂静地震.而在地震观测中,要观测到寂静地震的信号,则必须使用甚宽带(VBB)地震仪.VBB 地震仪可以同时记录到周期很短的地震信号和周期很长的地形变,因此在低频端与大地测量中的连续形变测量之间已经没有明确的界限.

对地震学家来说,寂静地震或许是一个新的概念,但对大地测量学家来说,这种现象却并不新鲜.现代地震学中开始观测寂静地震,是 20 世纪 70 年代的事情^[5],当时所用的观测仪器,并不是地震仪,而是应变仪.其实,在地壳形变的观测研究中^[2],人们早就注意到一些被称为“断层运动短周期事件”的现象^[6,7].这里“短周期”的“短”,是相对于地壳形变的特征时间尺度(比如相对于固体地球的半月潮或半日潮)而言的,与地震的特征时间尺度(通常为若干秒)相比,这些“短”周期事件的特征时间尺度则显得很“长”.

耐人寻味的是,长期以来,在地震预测研究中,似乎并未深究寂静地震的物理意义,通常,人们仅仅是把观测到的这类“形变异常”作为一种可能的地震前兆.甚而在一些情况下,干脆把这些持续时间较“短”的信号作为一种来源不明的“干扰”,简单地从观测数据中“去掉”了.此外,要“看”清楚寂静地震的信号,还需要在连续形变资料中用滤波的方法扣除固体潮的影响和环境噪声的影响.数字化的、便于进行滤波处理的连续形变测量资料,在 20 世纪 80 年代以后才开始得到广泛应用.这一观测条件的限制也使得对寂静地震的研究很难广泛地开展起来.

近年来,观测技术的进步和对地震的交叉学科 2)有一次,笔者在中国地震局科技委的学术讨论会上介绍寂静地震,周硕愚研究员想了想,说:“明白了!你介绍的‘寂静地震’,不就是我观测到的‘短周期事件’吗?”

研究,使人们有条件对寂静地震开展具体的观测和研究^[8-10],这个研究方向显示出迷人的前景,其意义至今仍未被地震学家和物理学家所全面地认识。

对于寂静地震,可以独立地观测两个物理量。一个是地震矩 $M_0 = \mu DA$, 式中 μ 是震源区介质的剪切模量, D 是地震运动的位错量, A 是地震断层的面积。分别独立地观测这三个值是做不到的,但是对寂静地震,地震矩本身和地面位移成正比,并且反比于地震到观测点的距离的二次方。二次方反比的衰减规律也说明,只有在距离寂静地震很近的地方,才能观测到寂静地震。另一个物理量是寂静地震的上升时间 T ,粗略地说, T 相当于完成地震位错的过程所需要的时间。寂静地震具有与“可见”地震相似的静力学性质,因此,用来描述“可见”地震的大小的地震矩,也可以用来描述寂静地震的大小。但寂静地震又有不同于“可见”地震的动力学性质,这一点从 M_0 与 T 之间的标度关系可以看得很清楚^[8]:对“可见”地震,有 $M_0 \propto T^3$;但对寂静地震,则有 $M_0 \propto T^{1/2}$ 。

寂静地震的物理机制,在理论上研究得还很不够^[8],断层运动在什么情况下是以蠕变的方式实现的,在什么情况下是以寂静地震的方式实现的,在什么情况下可以发展成为一种位错速度很快的破裂,在地震的震源物理中还是一个研究之中的问题。而解决这个问题的关键,显然是用可靠的观测资料来约束理论模型。

3 寂静地震与地震预测

尽管对寂静地震本身目前研究得还很不深入,近年来越来越多的观测和研究结果表明,寂静地震作为地震“家族”的一员,在地震序列的动力学中具有不可忽视的作用。

3.1 通过寂静地震实现的应变释放?

1997年,在国际理论物理中心(ICTP)的“非线性动力学与地震预测”研讨会上,曾报道过一个有趣的例子。基于地震的非线性物理学,俄罗斯科学院国际地震预测理论与数学地球物理研究所发展起一种地震预测方法^[11],这一方法使用模式识别技术,通过地震活动性的“异常”来判断地震发生的“概率增加时段”(TIP)。这一方法在意大利北部进行了回溯性的检验^[12]。在所划定的 TIP 中,均有地震发生,但在1972年到1976年的一段 TIP 中,并没有发生地震。按照传统观点,这种情形应该属于“虚报”。然而,从1973年开始,在意大利北部底里雅斯特(Tri-

este)附近的倾斜仪上,记录到明显的寂静地震的信号,这表明这段时间的“异常”不是与地震而是与寂静地震联系在一起的。或者说,所观测到的地震活动的“异常”的确反映了震源区应力场的某种变化,但应变的释放不是通过“可见”的地震,而是通过寂静地震实现的。

3.2 考虑寂静地震的“地震空区”?

“地震空区”是地震预测研究中经常使用的一个概念,这个概念,形象地,但不是严格地说,就是那些周围都已发生了地震,但其本身却尚未发生地震的“顽固堡垒”,往往就是未来将要发生地震的危险地区。换句话说,地震的过程,有时可以用一种“农村包围城市、最后夺取城市”的过程来描述。把寂静地震的概念引入“地震空区”模型,相当于说“包围城市”的“农村”,并不一定都是以“战斗”的方式实现“占领”的,有些“农村”,也可以以“渗透”的方式“静悄悄”地“占领”。这种情况已经引起地震学家的重视。在日本海沟地震的研究中,地震学家同时考虑了“可见”的地震和寂静地震的作用,推广了“地震空区”的概念^[13]。

3.3 作为余震的寂静地震?

一些观测表明,在一些地震之后,作为“余震”的寂静地震几乎是一个普遍现象^[14,15]。这一点从地震的物理学来说并非不可理解,但是,注意到这一现象,我们就不得不重新考虑地震预测研究中常用的“余震爆发模型”,这一模型说,那些余震特别多的地方,往往就是未来的地震危险区。而在余震的统计中到底是否需要把“寂静余震”也包括在内,却是一个有待研究的问题。

3.4 作为前震的寂静地震?

目前的地震预测的成功率,无论是中短期预测还是年度预测,都普遍地低于30%。关于这一点,可以给出一个“魔鬼证明”。“魔鬼证明”的说法来自《魔鬼词典》,在那里,“大炮”一词的解释是“用来校正国界的仪器”,而“丈夫”一词的解释是“在家刷碗的人”。设想寂静地震或“可见”的地震作为“前震”总是存在的。实际上,在很多地震之前,的确发现存在作为“前震”的寂静地震,只是在不同的研究领域其名称不同。这样一来,我们有四种可能(A)先前震,后主震(B)先寂静前震,后主震(C)先前震,后寂静主震(D)先寂静前震,后寂静主震。其中我们只对(A)、(B)、(C)三种情况感兴趣。在传统的地震预测研究中,通常将情况(A)称为“成功预报”,将情况(B)称为“漏报”,将情况(C)称为“虚报”。由

于不知道(A)、(B)、(C)三种情况的相对权重,只好假定这三种情况出现的概率相等.这样,即使前震百分之百地存在,由前震信息所进行的地震预测,也最多只有1/3的“成功率”.由于迄今为止前震是最好的预测指标,所以所有的地震预测,其成功率最高不会超过30%.这一“魔鬼证明”显然不是严密的推理.但是,用一个流行的句式说,在地震预测的物理科学研究中,寂静地震不是万能的,但不考虑寂静地震却是万万不能的.

4 地震的“物理预测”方案和寂静地震的作用

下面我们具体介绍一下前面提到的“应力触发”或“应力影区”的计算方法.这类计算的主要目的,是把地震危险性的估计逐步纳入物理学的轨道.因为30多年来的地震预测研究和实践告诉我们,在地震预测研究中,仅靠经验和统计是不够的.近年来,随着高性能计算机和计算方法成为地震研究的“常规武器”,这方面的工作也开始引起越来越多的兴趣.

考虑一个简单的模型.如果在一个已知其弹性常数的弹性介质中发生了一次地震,那么这次地震就会引起介质中的应力场的变化.应力作为一个张量,可以投影到一个断层面上,这个断层面是有可能发生“下一次”地震的断层面.投影的时候,要同时考虑两个力:一个是投影到断层面的力;另一个是与断层面垂直的力,如果这个力是压力,就需要考虑它所产生的阻碍断层运动的静摩擦.在考虑静摩擦时,需要有一个“等效摩擦系数”,这个“等效”摩擦系数并不是真正的摩擦系数,因为还需要考虑断层附近的流体的作用.投影到断层上的力,再减去垂直于断层的力所产生的等效摩擦,称为库仑破裂应力(CFS).通过改变CFS,一次地震的发生可以对另一次地震的发生起到“促进”的作用(即“应力触发”)或者“抑制”的作用(即“应力影区”).是“促进”还是“抑制”,要看计算得到的CFS变化量,是不是与断层将来可能的运动方向一致:一致就是“促进”,相反就是“抑制”.而根据历史上曾经发生过的地震的“故事”,我们可以通过所有这些地震所引起的总的CFS变化量,来推测所要研究的“目标断层”上的地震危险性.考虑到地球介质的流变性质可以使断层逐渐“忘记”那些过于“久远”的地震的效应,所以

需要考虑的“历史”倒不见得十分长.

“应力触发”和“应力影区”问题,与寂静地震有密切的关系.由于应力场的变化是由位错产生的,因此“可见”的地震和寂静地震都可以产生等效的CFS的变化.而在寂静地震的分布和性质未知的情况下,仅用“可见”地震的分布和震源机制计算得到的CFS的变化图像,肯定是不符合实际的.原则上讲,由此而带来的结果的偏差,远大于由地壳结构和震源过程的细节所带来的偏差.

在地震的“应力触发”研究中,现在有两派观点还在争论.一派认为,地震所产生的最终位错,或者说地震的“结果”,是主要的“触发”因素;另一派则认为,地震发生时所辐射出的应力波,或者说地震的“过程”,是主要的“触发”因素.显然,在搞清楚寂静地震的具体情况之前,这两个观点之间的争论,很难得到真正的解决.

5 “寂静地震目录”与地震预测

通过地震活动性来判断未来地震的趋势,是地震预测研究中的一个重要的方法.地震目录分析是地震预测中的一个“常规武器”.

地震目录也是地震学家和物理学家进行沟通的一个重要的“接口”,实际上,很多物理学家关于地震预测的工作,都是从地震目录的统计性质,或者地震活动的“图像动力学”入手的^[16].

从地震目录入手做工作,是一个好的思路.但问题是,现在我们手中的,仅仅是一个“残缺不全的”地震目录.因此,不管我们的分析方法多么巧妙,在输入的信息不够的情况下,我们的分析也难免是“巧妇难为无米之炊”的.

如同在宇宙学中用电磁相互作用“看”不到暗物质,在地震学中用传统的地震观测,也“看”不到寂静地震.提出暗物质的问题,是因为把星系中所有已知的天体都加在一起,也不足以解释它的引力.地震研究中有类似的情况.从构造运动的角度说,地震也是地壳变形的一种方式.通过地震实现的变形和大地测量实际测出的变形,可以进行相互比较.一个有趣的结果是,在大地测量所能探测到的地壳变形中,通过地震所实现的变形仅是其中的一部分^[17,18].那么,地震之外的变形究竟是通过什么方式实现的,有多大比例是寂静地震,有多大比例是蠕变,现在还不清楚.更进一步说,世界上到底有多少寂静地震,寂静地震是怎样分布的(比如,有没有寂

静地震的“地震带”?)这也是一个不清楚的问题。

寂静地震究竟满足什么样的震级-频度分布,最大的寂静地震可能有多大,这两个问题的答案目前也是不知道的。不过,从“可见”地震的震级-频度分布(Gutenberg-Richter定律)³⁾的物理意义^[19]来考虑,在此可以提出两个猜想(1)寂静地震的频度满足类似于Gutenberg-Richter定律的幂律分布,同时在大地震的一端可能偏离幂律,从而成为一种变形的伽玛分布(2)最大的寂静地震的地震矩与最大的“可见”地震的地震矩的数量级相当。未来的学者可以用寂静地震目录证实或者否定这两个猜想。

正如在宇宙物理学中暗物质对于决定宇宙的性质具有关键性的意义,在地震的物理学中,寂静地震也在相当程度上决定了地震序列的性质。目前,通过形变观测,在局部地区,已经可以记录到比较完整的静地震序列^[8,20]。而用甚宽带地震记录来探测寂静地震,理论上是可行的,实际上还没有人尝试过。把“可见”的和寂静的这两个“地震序列”结合起来进行研究,肯定会得到有趣的结果。这是地震预测研究中一块尚未开垦的处女地。

6 讨论和结论

我们讨论了寂静地震的性质及其对于地震预测的物理学的意义。也许不能说有了寂静地震的信息就一定可以解决地震预测的物理问题。但问题在于,寂静地震迄今还没有真正进入地震预测的物理学研究的视野,毕竟是一个值得注意的局限。而特别值得指出的是,正如天文观测的发展使暗物质的研究逐步成为可能一样,现代地震观测技术和地形变观测技术的进步,也逐步使寂静地震的研究成为地震预测研究一个重要的发展方向,这个发展方向无论如何是地震预测的物理学研究所不应忽略的。

致谢 感谢《物理》编辑部特约作者撰写这方面的评述。编辑在本文修改过程中给予诸多技术帮助,陈运泰院士改正了原稿中的几个容易引起概念上的混淆的说法,从而使本文的表述更为清晰,作者表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Harris R A. J. Geophys. Res. ,1998 ,103 :24347
 [2] Stein R S. Nature ,1999 ,402 :605
 [3] Kanamori H ,Kikuchi M. Nature ,1993 ,361 :714

- [4] Beroza G C ,Jordan T H. J. Geophys. Res. ,1990 ,95 :2485
 [5] Sacks I S ,Suyehiro S ,Linde A T *et al.* Nature ,1978 ,275 :599
 [6] Gladwin M T ,Gwyther R L ,Hart R H. G. J. Geophys. Res. ,1994 ,99 :4559
 [7] 周硕愚、施顺英、宋永厚等. 地壳形变与地震,1996,16(4): [Zhou S Y ,Shi S Y ,Song Y H *et al.* Crustal Deformation and Earthquake ,1996 ,16(4) : (in Chinese)]
 [8] Crescentini L ,Amoruso A ,Scarpa R. Science ,1999 ,286 :212
 [9] Ozawa S ,Miyazaki S ,Hatanaka Y *et al.* Geophys. Res. Lett. ,2003 ,30(6) :1283 ,doi :10. 1029/2002GL016665 [这是美国地球物理学联合会(AGU)最近开始采用的一种新的引文方案,对电子检索很方便]
 [10] Kostoglodov V ,Singh S K ,Santiago J A *et al.* Geophys. Res. Lett. ,2003 ,30(15) :1807 ,doi :10. 1029/2003GL017219
 [11] 关于TIP方法的理论基础的介绍,参阅:吴忠良,陈运泰. 物理,2002,31:365 [Wu Z L. Chen Y T. Wul(Physics) ,2002 ,31 365(in Chinese)]
 [12] Peresan A ,Costa G ,Panza G F. PAGEOPH ,1999 ,154 :281
 [13] Kawasaki I ,Asai Y ,Tamura Y. Tectonophysics ,2001 ,330 :267
 [14] Takai K ,Kumagai H ,Fujii N. Geophys. Res. Lett. ,1999 ,26 :2113
 [15] Reilinger R E ,Ergintav S ,Buergermann R *et al.* Science ,2000 ,289 :1519
 [16] Rundle J B ,Klein W ,Tiampo K *et al.* Phys. Rev. ,2000 ,E61 :2418
 [17] Ward S N. Geophys. J. Int. ,1998 ,134 :172
 [18] Ward S N. Geophys. J. Int. ,1998 ,135 :1011
 [19] Aki K. In :Simpson D W ,Richards P G (eds.) ,Earthquake Prediction :an International Review. 1981 ,Washington ,D. C. :AGU ,566
 [20] Linde A T ,Gladwin M T ,Johnston M J S *et al.* Nature ,1996 ,383 :65

作者简介 吴忠良,中国科学院研究生院地球科学学院教授,中国地震局地球物理研究所所长,国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)第一副主席,中国地震学会副理事长。主要从事地震和地震预测的物理学研究。

3) Gutenberg-Richter(GR)定律是,震级为 M 的地震的频度 N ,与震级呈 $\log N = a - bM$ 的关系,其中 a 和 b 是常数。由于 M 与 $\log M_0$ 成正比,所以GR定律相当于说,频度 N 与地震矩 M_0 之间呈幂律关系。Aki(安芸敬一)的这篇文章指出,这种幂律关系是由地震断层的几何形态和地震矩与地震断层参数之间的标度关系所决定的。