

文章编号: 0253-3782(2007)01-0048-11

远震前的地电场潮汐波异常^{*}

张学民¹⁾,^{*} 翟彦忠²⁾ 郭学增²⁾ 郭建芳²⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国石家庄 050021 河北省地震局

摘要 分析了5次远强震前河北省昌黎台、兴济台记录到的电场异常,发现该异常主要集中在震前2个月左右的时段内,具有很好的短临预报意义。震前电场呈现不同的异常特征,但与固体地球潮汐波变化关系密切,如半日、半月等潮汐波周期信号增强,引起电场变化幅度增大;或本该正常记录到的潮汐变化幅度突然减小或消失;以及高频信号增多并伴有跃变现象。分析异常产生机理认为,强震前的这种异常现象是震源区临震孕育过程中岩石弱化产生的电场异常,经自由空间或地壳传播到达地电台后,与台站记录的电场潮汐波相叠加产生潮汐波增强或减弱现象。高频异常可能与台站下方岩石孔隙度、渗透率等介质性质的改变有关,反映了强震的远场动态效应。

关键词 地电场 电场潮汐波 半日周期 应变波 短临预报

中图分类号: P319.1 **文献标识码:** A

引言

地电场是地球固有的地球物理场之一,它受到地球外部各种电流体系和地球内部的介质电性的影响,携带了丰富的地球内部信息。自1981年希腊“VAN”小组进行的震前多极距观测研究以来(Varotsos, Alexopoulos, 1984a, b),因其良好的映震效果受到世界各国的广泛注意和重视(阮爱国, 1998; Orihara *et al.*, 2002; Sharma, Baranwal, 2005)。孕震过程中的动电效应及谐振效应是地电场法能够预报地震的主要思路和出发点(赵玉林, 钱复业, 1981; Fitterman, 1979; Dobrovolsky *et al.*, 1989; 钱复业等, 1998; 陈有发等, 1999)。随着我国近年来ZD9A大地电场仪器的研制成功,电场观测的数据质量和采样密度都得到极大的提高,为进一步提取震前异常信号提供了可靠的保障。大量研究表明,固体地球潮汐对地壳运动、地震孕育和触发都有一定的调制作用(张国民等, 2001; 池顺良, 钟荣融, 1993)。地球潮汐现象是由于日、月的引力,使固体地球发生地形变具有日、半日、月、半月等周期的规律性变化。本文通过对几次强震前后地电场记录数据的变化分析发现,地震前出现的地电场异常与地球潮汐现象有一定关系,并对这类异常产生的机理进行了研究,认为地震孕育阶段出现的电场异常,传播到地电台站与正常电场潮汐波叠加,被电场观测仪记录下来,并具有比较复杂的变化特点。

* 国家科技攻关项目(2004BA601B010503)资助。

2006-04-14 收到初稿, 2006-10-13 决定采用修改稿。

† 通讯作者. e-mail: zhangxm96@126.com

1 台站基本情况

从 2001 年开始, 河北省地震局陆续布设了 4 个地电场观测站, 观测站都依托于原来的电磁台。地电观测场一般都布设在传统地电阻率观测区域内。地电阻率观测均使用对称四极的观测方式, 采用直流供电, 供电极距为 1 km 左右, 观测极距为 300 m 左右, 测量地下电阻率变化。而电场观测则采用多极距布极方式, 埋设 5 个电极, 分别得到 3 个测向的长短极距之间的观测结果, 即得到 WE、WE'、SN、SN'、NE(NW)、N'E'(N'W') 六个电场分量(图 1)。其中, 2 个正交测向的长极距距离为 300 m (WE、SN), 短极距为 150 m (EW'、SN')。电场观测采用 ZD9A 大地电场仪, 主要记录周期大于 10 s 的低频分量, 分辨率为 0.1 mV。电场研究表明(张学民等, 2006), 河北省几个台站都能够记录到与固体地球潮汐波动相关的半日、半月波等周期信息, 可以说对地下结构的应变响应是非常敏感的。本文主要使用了昌黎台和沧州兴济台的资料, 对几次远强震前记录到的电场异常现象进行总结分析。

2 震前地电场前兆信号特征

2.1 2001 年 11 月 14 日昆仑山口 8.1 级地震

河北省电场测量资料自 2001 年 9 月逐渐开始正常化和规范化。图 2 显示了昌黎台 EW、NS, 阳原 EW 和兴济台 NW 测向的资料, 可以看到阳原 EW 测向的资料最长, 而兴济台直到 11 月才有记录。图中显示的异常信息是比较突出的, 如昌黎台在 2001 年 10 月 19 日之后出现与以前形态差异很大的日、半日等周期变化(详见左上小图, 日期为 2001-10-15—2001-10-25), 信号出现近 1 个月后距昌黎台 2 490 km 的昆仑山口 8.1 级地震(90.54°E , 35.95°N)于 11 月 14 日发生, 震后仍有非常明显的准周期波形出现。兴济台明显的日周期变化开始于 11 月 5 日, 同样在震后持续保持, 并在 11 月 27 日—12 月 13 日出现 17 天的下降跃变。阳原台虽然记录时间最长, 但没有发现任何与地震有关的异常信息, 震后两天有大幅度的跃变现象。但这时仪器安装的时间都不是很长, 可能与观测系统不稳定有关。因此这类周期性电场波的出现是否与这次 8 级地震有关, 可能还需要其它资料的佐证。

2.2 2002 年 3 月 31 日台湾 7.4 级地震

2002 年 3 月 31 日台湾发生 7.4 级地震(122.18°E , 24.28°N), 震中距离河北省昌黎台 1 740 km。图 3a 显示了昌黎台 3 个长极距测向(EW、NE、NS)的观测曲线, 其变化特征非常相似。自 2002 年 3 月 10 日以后, 该台站记录到日变、半日变周期特征显著增强, 而且幅度明显比前几个月要大, 在 EW 测向还存在半月周期的迹象。理论计算的该区重力潮汐波表明, 3 月份是潮汐波动相对较弱的时段, 所以上述电场的潮汐增强变化不是地球潮汐引力变化引起的, 而是出现了电场异常。为突出这段时间的信息特征, 对昌黎台 NS 向数据进行了小波分析(陆远忠等, 2000)。其 3 阶小波变换结果显示(图 3b), 3 月 10 日以后绝大

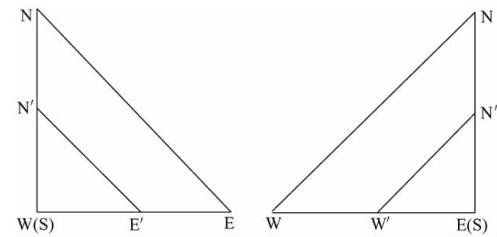
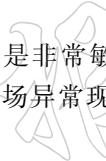


图 1 电场测量两种布极方式示意图



SINICA

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

www.sinica.ac.cn

中国科学院

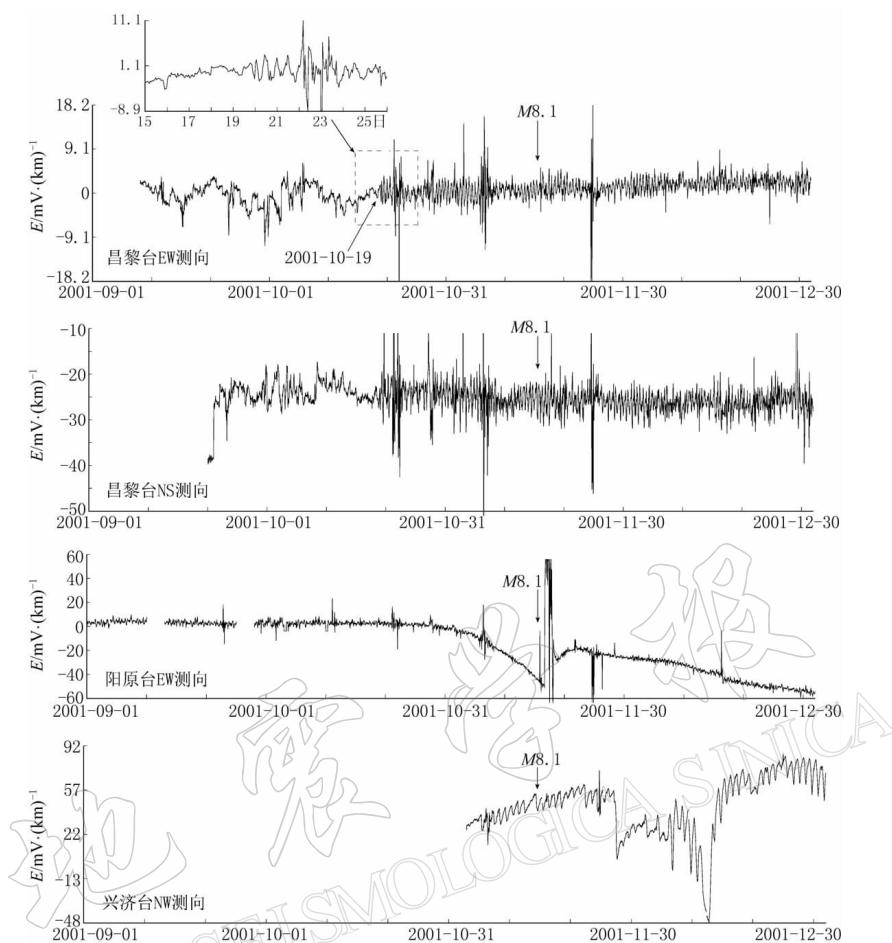


图 2 2001 年 11 月 14 日昆仑山口 8.1 级地震前的电场异常

多数的日变化幅度超过这个时段的 2 倍均方误差(图 3b 中的上下警戒线), 表明电场确有增强现象. 计算其日平均幅度, 2002 年 1 月份为 4 mV/km , 而 3 月份的中下旬增大到 6 mV/km .

2.3 2003 年 9 月 26 日日本 8.3 级地震

2003 年 9 月 26 日前后两个小时日本附近先后在同一地区发生 8.3 级(143.91°E , 41.81°N)和 7.4 级两次强震. 这两次地震位于昌黎台站的东北方向, 主震震中距离昌黎台和兴济台分别为 2 090 km 和 2 310 km. 图 4 给出了昌黎台 EW 测向长短极距和兴济台 EW 测向长极距的曲线, 发现这次异常特征与前面两次地震有较大差异. 地震前两个台站的日变化都很正常, 没有明显的增强信号. 8 月份最大地磁 K 指数大于 5 的有 6 日、8 日、18 日和 21 日; 9 月 16~17 日有一次磁暴, 昌黎台当日最大 K 指数分别达到 6 和 7, 18~20 日最大 K 指数为 5, 21~23 日 K 指数为 3, 24~25 日 K 指数为 5, 然后一直到月底都是磁场平静期. 可以看到两个台在 8 月和 9 月的几次大的波形变化, 尤其是 9 月 16~17 日持续时间比较长, 应该是受到磁暴干扰所致, 这在两个台站时间上是完全同步的. 17 日之后的几天磁暴干扰减弱, 电场也无明显的日变图象, 而以小幅度高频信号为主. 昌黎台在

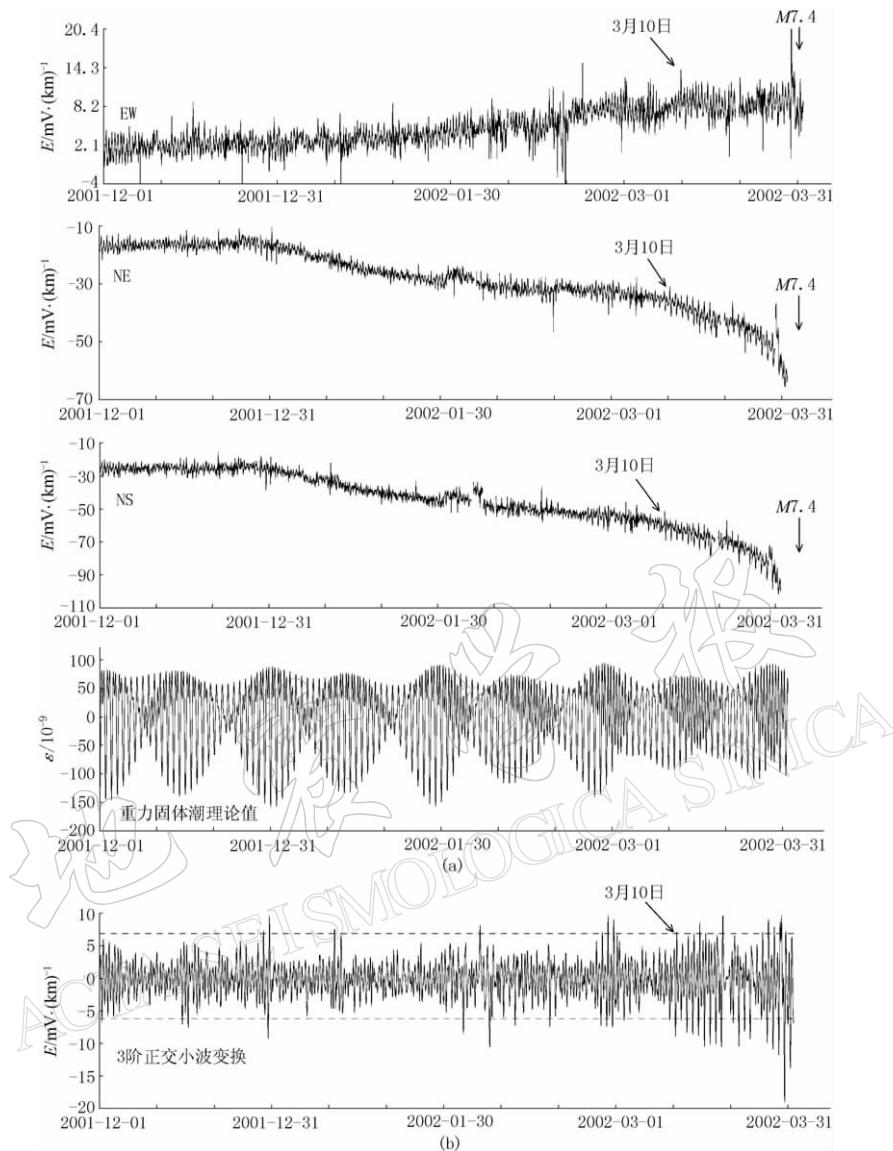


图 3 2002 年 3 月 31 日台湾 7.4 级地震前昌黎台电场异常

(a) 昌黎台各测向电场(E)原始数据曲线与理论固体潮汐波对比; (b) 昌黎台 SN 测向电场的小波变换处理曲线

9月22日数据出现大幅度跃变，而且在同测向长、短极距上电场相对变化幅度相当，说明不是哪个共用电极出现问题引起的干扰信号，可能是一组来自远场的信号。这组跃变一直持续到23日，以后恢复到原来的变化水平。但异常结束后，9月25日昌黎台日变信号突然增强，1天后地震发生，大幅度电场变化异常在震后1天左右恢复成原来的幅度后，异常结束。分析这次异常信号，与理论计算的固体潮汐波对比发现，潮汐波半月周期包络的波谷段是其幅度变化最弱的时段，因此日变幅减小的现象一般都出现在这段时间内。除了受磁暴干扰的几次突跳外，9月17—22日的幅度减小正好对应潮汐波最弱的时段，但相比其它类似时段幅度减弱特征仍很明显，可能存在一定的地震异常。之后先是9月22日的跃变，随后又出现日变增强现象。而兴济台一直到震前日变周期都没有完全恢复。各台站周

围环境无明显变化，也没有中小地震发生，推测这些异常信号应与这次强远震有关。

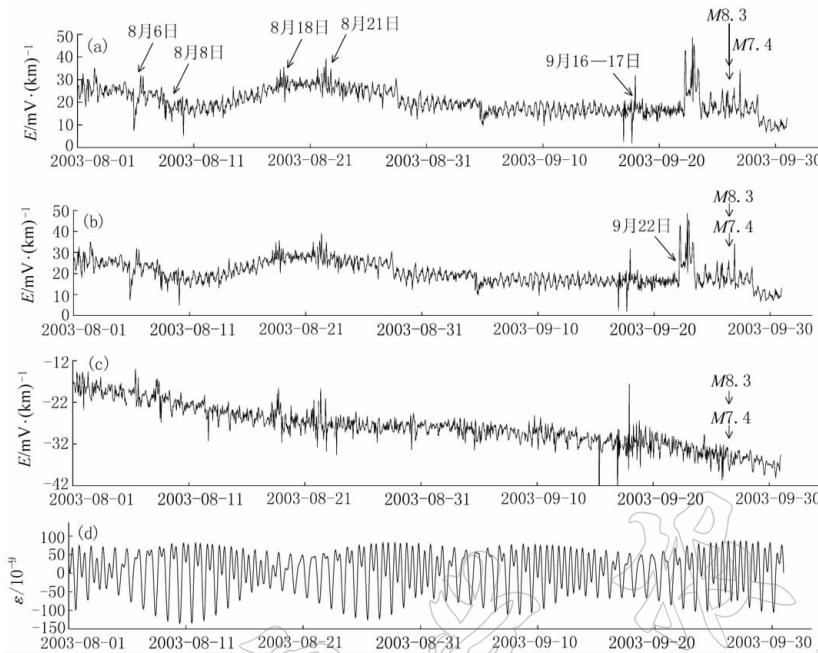


图 4 2003 年 9 月 26 日日本 8.3 级地震前电场异常与固体潮汐理论值对比

(a) 昌黎台 EW 向长极距; (b) 昌黎台 EW 向短极距; (c) 兴济台 EW 向长极距; (d) 重力固体潮理论值

2.4 2004 年 9 月 5 日日本 7.4 级地震

2004 年 9 月 5 日 18—22 时 4 个小时的时间内，日本相继发生两次 7 级以上强震。其中 7.4 级地震的震中位置为 137.07°E 、 33.18°N ，距离昌黎台 1 760 km，比 2003 年 9 月的地震近了 300 km 左右，震中位于台站的东南方向。图 5 是昌黎台 NS 和 EW 测向经过小波变换处理后的电场曲线(计算程序取自陆远忠等，2000)。其中得到的 1 阶小波主要突出了原始记录中的高频信息。结果显示 2004 年 8 月份高频信息明显增多，呈密集分布形态，而且幅度较大，多次超过该段数据的 2 倍均方误差线，尤其是 EW 测向异常更为显著。地震后大幅度高频信息明显减弱。3 阶小波变换结果反映了电场记录中的半日、日变化及更长的周期变化，曲线反映出自 2004 年 6 月底 EW 测向日变幅度开始增强。虽然 7 月下旬有缺数现象，但其前后数据变化形态没有受到影响。这种大幅度波动一直持续到地震发生，NS 测向 8 月份以后异常更为突出。另外两个测向在 8 月 5 日均出现下降跃变，这在 NE 测向上也同样观测到，因此不是共用电极造成的干扰。9 月 5 日 22 时即主震时，NS 测向以跃变上升结束了这次异常。NE 测向情况相同，但 EW 向一直在回升中，同步跃变幅度很小。

2.5 2004 年 12 月 26 日印尼 9.0 级地震

2004 年 12 月 26 日印尼发生 9.0 级地震(95.98°E , 3.3°N)，震后引发海啸，造成大量的人员伤亡。这次地震震中距离昌黎台 4 670 km，位于台站的西南方向。图 6 给出了昌黎台 EW 测向的原始曲线及其 1 阶和 3 阶小波变换结果。1 阶小波中主要突出记录的高频部分，图中显示 2004 年 10 月中旬尤其是下旬高频信息开始明显增多，并一直持续到 11 月中

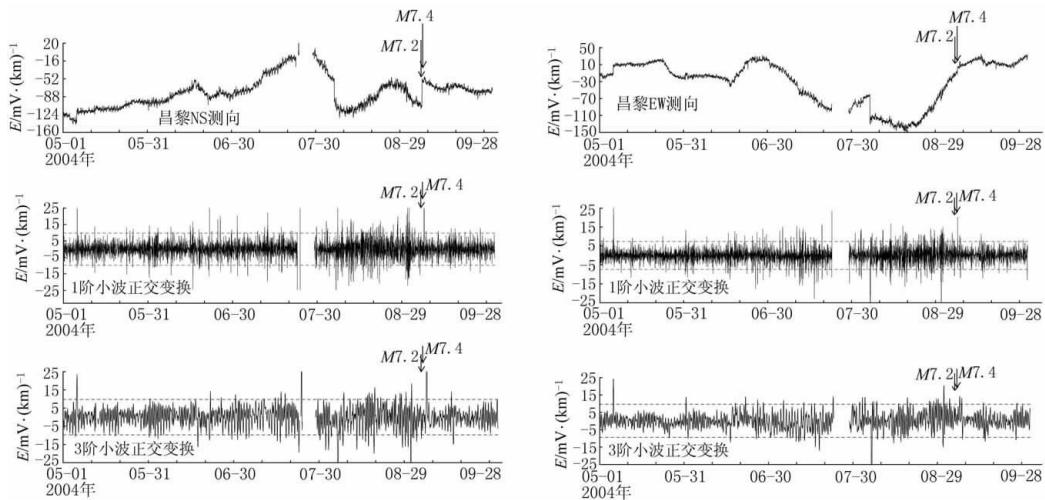


图 5 2004 年 9 月 5 日日本 7.4 级地震前后昌黎台电场异常

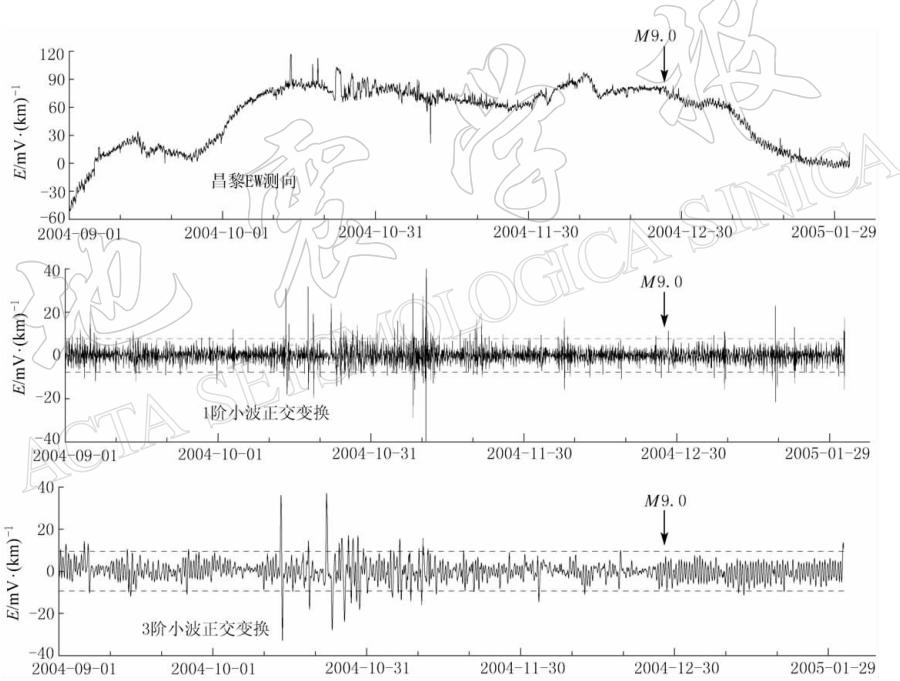


图 6 2004 年 12 月 26 日印尼地震前的电场异常

旬。3 阶小波变换显示 2004 年 9 月份台站电场有明显的潮汐波周期，图中清楚地显示了电场幅度的半月周期特征。但自 10 月下旬起，电场潮汐波的半月周期遭到破坏，已经难以分辨，代之以大幅度的起伏变化。11 月中旬后异常幅度减小，但常规的日变幅度、半月周期等一直没有出现，这种低幅度变化维持到地震发生。震后各种周期特征迅速恢复，幅度也恢复到震前水平。

2.6 异常特征总结

我们使用的观测资料是电场的小时观测值。为突出其中的周期信息，针对 2002 年 3 月

31 日台湾 7.4 级地震(详见 2.2 节)前 1、3 月的资料进行了功率谱分析(陆远忠等, 2000). 由于该异常时间短, 分别选取了两个月的 1~22 日的资料. 结果显示在正常的观测时段(图 7, 2002 年 1 月)就有潮汐波的周期, 其中以半日波和 1/3 日波比较突出. 进入异常时段(2002 年 3 月), 周期特性基本没有大的改变, 但半日和 1/3 日周期波功率谱大大增强, 是正常时段的 3 倍多, 日周期谱变化不大. 我们知道, 电场记录受到地磁场的影响有正常的日子变化, 而半日、1/3 日变却不是地磁场的固有周期, 而是固体地球潮汐波的周期, 因此在异常时段反映的是固体潮汐的信息. 由于时间段短, 对于半月、月周期等较长周期的异常在此无法正常反映.

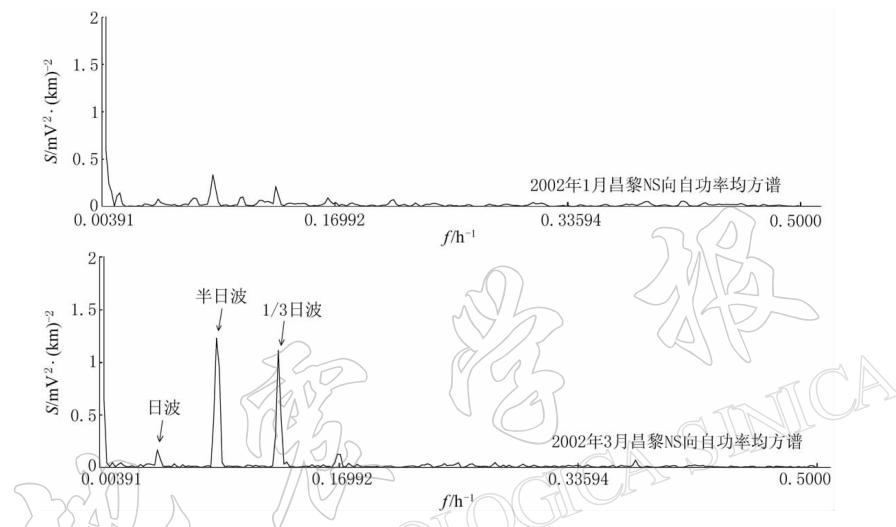


图 7 2002 年 3 月 31 日台湾 7.4 级地震前昌黎时测值功率谱异常

通过上面 5 个震例的分析, 可以发现电场异常一般出现在震前 2~3 个月或者更短的时间. 随着地震的发生, 异常都会快速恢复结束, 因此在时间上与地震有较好地吻合. 异常持续时间最长的为 2 个多月, 其短临特性比较显著. 远强震前后, 电场与潮汐波有关的异常主要有 3 种形态, 即幅度增强、潮汐周期接近消失以及高频信息增多, 或者是这几种形态的混合. 图 7 中展示的异常特性发现, 异常变化叠加在潮汐波上, 本身并没有产生新的周期. 可见这种异常波与潮汐力的调制作用有一定关系. 对于印尼地震前波形幅度变小的现象也许只是潮汐波与正常电磁波场的相位差异造成的.

3 异常机理分析

3.1 远场电场异常的信度

近场电场异常已经被多次记录到(赵玉林等, 2001; 马钦忠等, 2004), 但远场电场异常的研究非常少. 这是因为电磁波在地壳中衰减很快, 无法进行长距离传播. 本文主要是利用地电观测台记录到的电场潮汐波来反映远震异常信息. Saraev 等(2002)在低频电磁场观测中, 得到地电阻率与潮汐变化的相关度达到 0.95. 用电磁场探测引力波的实验在各国早已开展, 事实证明是可行的(石东平, 程正富, 2004). 本文选择的地震震级都比较大, 或者距离相对较近, 台站能够记录到这些地震前的异常是可以理解的.

前苏联学者在 1970—1980 年间在 Garm 进行的测试以及西方科学家的研究发现, 以

变形形式发生地壳变化, 地震波速的改变, 从地壳中辐射出的气体, 以及地壳电阻率变化等不仅在震源区可以观测到, 在更大范围的条带上也能记录到。基于这种特性发展了一种扩展理论, 即地壳的变形、破裂形成一个主要的错动区域称为地震孕育带(Scholz *et al*, 1973; Mjachkin *et al*, 1975)。Dobrovolsky 等(1979)对这个区域的尺度进行估算, 得到 $r = 10^{0.43M}$ 。其中, 地壳水平弹性变形采用 10^{-8} 量级, r 是地震孕育带的半径(km), M 是震级。图 8 是根据这个公式计算的孕震区范围。可以看到, 对于一次 7.4 级地震, 其孕震区半径可以达到 1 520 km; 8 级左右的范围是 2 754 km; 而 9 级左右的地震可以达到 7 413 km。

Scholz 等(1973)把氡作为一种地震前兆来建立地面地震预报的物理机制。我们知道氡也是地震电磁场异常产生的一种可能机制, 这意味着氡离子异常的区域应该与地震电场异常区域相当。Toutain 和 Baurbon (1998)列出了 150 位不同作者关于地震前兆地球化学测量清单, 并估算地球化学前兆异常条带与震级之间的函数关系, 他们的结论与 Dobrovolsky 等(1979)完全一致。因此可以证明, 震前异常电场的分布范围可通过上面的公式来估算。也就是说, 地震孕育引起的电场异常可以在一个很大的范围内被探测到。

本文分析的这几次地震以 2004 年印尼地震为最大, 与该震有关的地下水位、地热等同震异常已经在江苏及河北省多个台站记录到(郑江蓉等, 2005; 张素欣等, 2005)。其中, 一个可靠的地球化学前兆异常现象是, 江苏东海中国大陆科学钻探工程现场在震前 1 个半小时观测到的气体化学异常(曾令森等, 2005)。其具体表现为他们取得的流体样本中从不含 Ar、He、N₂ 跳跃到富含这 3 种气体, 测点距离震中达 4 170 km。同样, 2001 年昆仑山口 8.1 级地震前, 距离震中 1 030 km 的台站震前 2 天记录到水氡突变异常。因此我们可以说无论是震源区静态还是动态的异常变化, 在远场电测量中都能够记录到相关的信息, 而且我们提取的异常始末与地震在时间上有良好的对应性, 这些都说明这些地震异常是可信的。

3.2 异常产生的机理

大震在震前和震时都能够激发震中附近或远处的地震、地下水水位变化和地温场的变化。其主要通过两种机制: ① 地震孕育过程中导致静态应力变化即静态激发; ② 通过地震面波的传播, 导致到达地的岩石物理性质发生改变即动态激发。静态和动态激发都能引起所观测的地震震时或前兆异常现象。大量的研究表明, 地震引起的静态应力变化大小与离开震中的距离或距离的平方成反比, 在距离震中 3 倍于地震破裂以后的地方, 地震所产生的静态应力变化将衰减到和潮汐力相当的水平(Freed, 2005)。这对于对重力潮汐应变场非常敏感的电场观测来说可以有较好的反映效果, 这也是本文所分析的异常与地震孕育关系的物理机制所在, 即这些与潮汐波相关的电场信息的增强或减弱可能与震源区的静态应力激发有关。

那么异常信息为什么会与潮汐波周期一致呢? 大量的研究表明(张国民等, 2001; 池顺良, 钟荣融, 1993), 潮汐力对地球的加卸载作用与强震的触发, 岩浆活动, 以及介质定向

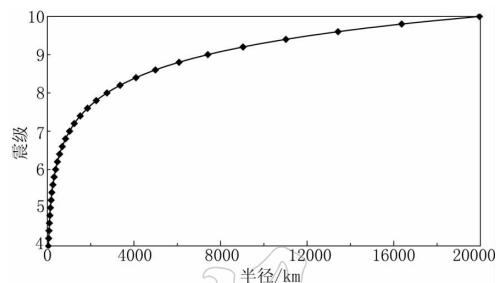


图 8 不同震级地震的孕震区范围

迁移等都能起到一定的作用,是地壳运动机制中不能忽视的因素。研究人员对于1976年唐山7.8级地震前昌黎电阻率及宝坻等台电场的研究发现(钱复业等,1990;赵玉林,钱复业,1981;Qian, Zhao, 1990),在震前2~3个月的时间内,各台电阻率、电场观测均显示了明显的半日周期和半月周期特性。这在其它时段是从未观测到的现象,其中昌黎台的电阻率半日周期异常幅度在临震前达到了7%左右。他们认为这是由于临震阶段,震源区地壳临近弱化,地下岩石的应力-应变本构关系的斜率趋于零,产生了与潮汐力一致或倍频的周期而形成的谐振效应。

潮汐力是一个长期存在的力源,假定震源区的静态应力是一个持续稳定的力,那么相对无震时段,应力的改变就是在潮汐力上又增加了一个近似常量的静态应力。地下电场的电动电位一般表示为 $\Delta U = 0.77 \rho_w \Delta p$ (陈有发等,1999)。其中, ρ_w 为液体的电阻率, Δp 是压力差, 其中包含了潮汐力及震源区静态应力。震源区的静态力与潮汐力叠加,产生一种类似潮汐波的应力应变异常信号,引起介质及其中的孔隙流体产生“海绵效应”(Saraev *et al*, 2002),同样可以激发出周期相似的电场异常信号。然后在自由空间或地壳中实现远距离的传播。当这个异常信号到达地电台站,又与台站的环境电磁场、正常电场潮汐波相互作用。当与正常记录相位一致时就导致电场潮汐波幅度增强,而与其相位差异较大时,就会导致电场变化幅度减小、产生畸变甚至消失。

至于震前电场记录的高频、跃变等信息应该与震源区的动态激发关系更为密切,即地震孕育区应力的加强作用以面波等形式传播至台站下方,导致台站下方岩石孔隙度、渗透率等物理参数即 ρ_w 改变,从而引发地下流体迁移,产生电动电位,以及激发台站附近电磁场信号等,这类特征也可以从强震在较远地区引起的小震密集活动,流体化学异常,以及GPS监测得到的地表位移变化等得到验证(王敏等,2006;曾令森等,2005)。

4 结论

本文总结了5次强震前的电场异常,发现正常电场潮汐波在震前产生不同形态的异常,该异常有时增强、有时减弱,还有高频信号及突跳跃变异常也明显增多。异常多开始于震前2~3个月,异常时间的长短可能与震中距离及震级大小有关,这为远强震的短临预报提供了新的思路和方法。另外,我们从多方面论证了电场记录远震异常信号的可能性及其物理机理,认为电场、地电阻率虽然不是应力-应变的直接测量手段,但其对微弱的应力-应变响应却有极好的敏感性(赵玉林等,1990; Saraev *et al*, 2002),应该可以记录到一定距离的强震孕育引起的电场异常。电场潮汐波在强震前呈现的异常特征主要是由于地震孕育过程中,孕震区应力-应变波本构关系被破坏,受潮汐力影响产生类潮汐波的电场谐振效应,并通过自由空间或地壳介质传播到比较远的台站处,与台站正常记录相叠加,从而观测到电场潮汐波的异常增强或减弱现象。而电场高频信息及跃变等异常应该与强震孕育的动态效应有关。

电场的潮汐波异常不仅在强震震源区可以记录到,在远场电场记录中也有反映,这为我们分析孕震机理及强震区电场信号的长距离传播提供了很好的研究平台。目前不足的是缺乏更密集的台站分布及高采样率的数据记录,如可以远距离传播的1 Hz至几 kHz的低频电场、电阻率数据采集等,因此无法对这类远场波的速度、传播特性进行更深入的分析。这需要在以后的观测中不断改善加强,才能为今后的地震短临预报,远场应变波叠加,以

及激发效应等深入研究提供更为有力的支持。

赵国泽研究员在论文审阅过程中提出了非常好的修改意见和建议，在此深表谢意。

参 考 文 献

- 陈有发, 马钦忠, 张杰, 等. 1999. 震前自然电场的前兆及其可能机理[J]. 华南地震, **19**(3): 26-34.
- 池顺良, 钟荣融. 1993. 潮汐在地壳运动中的作用[J]. 地震学报, **15**(4): 508-513.
- 陆远忠, 邓志辉, 李胜乐, 等. 2000. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社: 1-232.
- 马钦忠, 冯志生, 宋治平, 等. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析[J]. 地震学报, **26**(3): 304-312.
- 钱复业, 赵玉林, 刘捷, 等. 1990. 唐山 7.8 级地震地电阻率临震功率谱异常[J]. 地震, **12**(3): 34-39.
- 钱复业, 赵玉林, 卢军, 等. 1998. 孔压弱化失稳的系统辨识及大地电场前兆[G]//石特临主编. 地震地电学发展与展望. 兰州: 兰州大学出版社: 151-155.
- 阮爱国. 1998. 考察希腊地震预报 VAN 法的报告[G]//石特临主编. 地震地电学发展与展望. 兰州: 兰州大学出版社: 138-150.
- 石东平, 程正富. 2004. 用电磁方法探测引力波[J]. 现代物理知识, **16**(4): 25-27.
- 王敏, 张培震, 沈正康, 等. 2006. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门答腊地震的远场同震地表位移[J]. 科学通报, **51**(3): 365-368.
- 曾令森, 许志琴, 罗立强, 等. 2005. CCSD 在线流体监测捕获的气体地球化学异常与 2004 年 9.3 级苏门答腊地震可能的超远程关系[J]. 岩石学报, **21**(2): 521-524.
- 张国民, 李丽, 黎凯武, 等. 2001. 强震成组活动与潮汐力调制触发[J]. 中国地震, **17**(2): 110-120.
- 张素欣, 张子广, 张跃刚, 等. 2005. 2004 年 12 月 26 日印尼大地震河北省数字水位、地温记震能力分析[J]. 华北地震科学, **23**(3): 27-30.
- 张学民, 郭建芳, 郭学增. 2006. 河北省数字地电场数据分析[J]. 中国地震, **22**(1): 64-75.
- 赵玉林, 卢军, 张洪魁, 等. 2001. 电测量在中国地震预报中的应用[J]. 地震地质, **23**(2): 277-285.
- 赵玉林, 钱复业. 1981. 大地电场的临震周期[J]. 地震, **3**(2): 13-16.
- 赵玉林, 钱复业, 许同春. 1990. 受力条件下岩(土)层电阻率变化的放大系数及其与应变关系的研究[G]//国家地震局科技监测司主编. 地震预报方法实用化文集地磁地电专辑. 北京: 学术书刊出版社: 334-342.
- 郑江蓉, 徐桂明, 李鸿宇, 等. 2005. 2004 年 12 月 26 日印尼 8.7 级强震后江苏地区同震效应分析[J]. 防震减灾工程学报, **25**(1): 105-113.
- Dobrovolsky I R, Zubkov S I, Myachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. *Pure Appl Geophys*, **117**: 1 025-1 044.
- Dobrovolsky I R, Gershenson N I, Gokhberg M B. 1989. Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **57**: 144-156.
- Fitterman D V. 1979. Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half-space[J]. *J Geophys Res*, **83**: 6 031-6 040.
- Freed A M. 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **33**: 335-367.
- Mjachkin V M, Sobolev B G, Dietrich J. 1975. Two models of earthquake forerunners[J]. *Pure Appl Geophys*, **113**: 169-181.
- Orihara Y, Noda Y, Nagao T, et al. 2002. A possible case of SES selectivity at Kozu-shima Island, Japan[J]. *J Geodyn*, **33**: 425-432.
- Qian F Y, Zhao Y L. 1990. A model of an impending earthquake precursor of geoelectricity triggered by tidal forces[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **62**: 284-297.
- Saraev A K, Pertel M I, Malkin Z M. 2002. Correction of the electromagnetic monitoring data for tidal variations of apparent resistivity[J]. *J Applied Geophysics*, **49**: 91-100.

- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: A physical basis[J]. *Science*, **181**: 803-809.
- Sharma S P, Baranwal V C. 2005. Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, **57**: 155-166.
- Toutain J P, Baubron J C. 1998. Gas geochemistry and seismotectonics: A review[J]. *Tectonophysics*, **304**: 1-27.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984a. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes(I)[J]. *Tectonophysics*, **110**: 73-98.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984b. Physical properties of the electric field of the earth preceding earthquakes(II): Determination of epicenter and magnitude[J]. *Tectonophysics*, **110**: 99-125.

TIDAL WAVE ANOMALIES OF GEOELECTRICAL FIELD BEFORE REMOTE EARTHQUAKES

Zhang Xuemin¹⁾ Zhai Yanzhong²⁾ Guo Xuezeng²⁾ Guo Jianfang²⁾

1) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

Abstract: In this paper, geoelectrical field anomalies at Changli and Xingji station in Hebei Province were analyzed before five remote earthquakes. It was found that the anomalies mainly occurred two or three months before earthquakes, which is of importance to short-term and impendent earthquake prediction. There exhibited different characteristics in geoelectrical field anomalies, but they were closely related to tidal waves, for example, the increasing in amplitude at semidiurnal and semimonthly periods of tidal waves; the decreasing or disappearing in amplitude of tidal waves that should have been recorded normally at that time; while there accompanied incremental signals with high frequency, such as jump variations. It was thought that the formation mechanism of the geoelectrical anomalies before strong earthquakes resulted from stress-strain resonance effects when rock was weakened during the preparation process in seismic area, and then signals of electric field propagated to remote stations in free space or crust, and superposed on the geoelectric field tidal waves recorded at the stations, leading to increasing or decreasing in amplitude of geoelectrical tidal waves. The high frequency signals may be related to the variation of rock porosity, permeability and so on beneath the stations, as a result of the dynamic effects of remote earthquakes.

Key words: geoelectrical field; geoelectrical tidal waves; semidiurnal period; strain wave; short-term and imminent earthquake prediction