

HRT 波方法准确预测强震时空强的可行性及其汶川 8 级等强震的震例

赵玉林, 钱复业

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

[摘要] 潮汐力谐振共振波地震短临预测方法(简称 HRT 波法)是由震前所记 HRT 波根据 HRT 波预测模型,在震前同时测定给出地震三要素(地点、震级和时间)的一种新方法,把孕震过程与前兆产生机理视为“黑箱”,选已知大自然存在的潮汐力波作输入信号;使用专门研发的“PS-100”HRT 波接收网站记录 HRT 波(输出信号),辨识得到与震源区介质状态有关的关系式,建立了 HT 波与 RT 波短临预测模型(HRT 波预测模型)。

[关键词] “黑箱”与 HRT 波预测模型;“PS-100”HRT 波接收网站;波动前兆的发现及其规律性;HRT 波模型的实用性

[中图分类号] P315.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)06-0111-12

1 前言

我国是地震灾害很严重的国家。汶川大地震遇难总人数超过 8 万人,36 万余人受伤,举国震惊。地震有无前兆,强震能否预测、预报,再次成为地震学界乃至世界关注的争论焦点。

强震能否实现预测预报,主要取决于人们在地震前能否有仪器和技术观测到来自震源的、与地震孕育过程有因果关系的含有未来地震的发生地点、震级和时间信息的前兆,前兆的重现性、规律性是否已被人们所认识和掌握。震前记录的结果表明,各震例所记 HRT 波波动前兆具有一定的重现性;与 HRT 波预测模型基本吻合的规律性,初步验证了 HRT 波预测模型和预测方法的实用性。分析汶川地震前从中期预测,经建立红格(HG)等 4 个(抓短临前兆的)“PS-100”HRT 波网站,到汶川地震临震前发现 HG 台记录到 HRT 波临震前兆信息所经历的实际过程,笔者认为,强震是有前兆的,是能被预测预报的。只要选对观测方法技术及所用设备具有记录 HRT 波的高精度、远程监控、实时传输能力,并

布设适宜的台网,HRT 波方法一定能为我国率先实现地震预报特别是短临预报有所贡献。

2 潮汐力谐振共振波(简称 HRT 波)法预测地震的物理基础模型

地震预报是一项系统工程。岩石力学实验推论指出^[1],断层失稳(地震)时,震源区介质的本构关系曲线将处于极大值或过极大值阶段,即地震发生在源区介质刚度 $\lambda = \frac{dF}{du} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \leq 0$ 的阶段,式中 $F, \sigma, u, \varepsilon$ 分别为力、应力、位移和应变。目前人们还无法实地测量地球(源区)介质的本构关系曲线,但我们是否能找到一种方法,像人们常用的“工业探伤”、“医学透视”技术那样,找出表示 $\lambda \approx 0$ 阶段已经到来的物理标志,作为地震短临前兆。由于地震的孕育过程、地震前兆的产生机理,目前尚不清楚,为找到一种可操作的探索地震前兆的方法,赵璧如提议应用现代控制论中的系统辨识技术,把地震视为“黑箱”。根据唐山 7.8 级实测地震前兆的启示,使用过程辨识方法^[2],利用潮汐力波作“黑箱”的输入信号;使用专门研发的“PS-

[收稿日期] 2009-04-05

[作者简介] 赵玉林(1936-),男,河北承德市人,中国地震局地球物理研究所研究员,研究方向为地电学与地震预测;E-mail:zhaoyl522@yahoo.com.cn

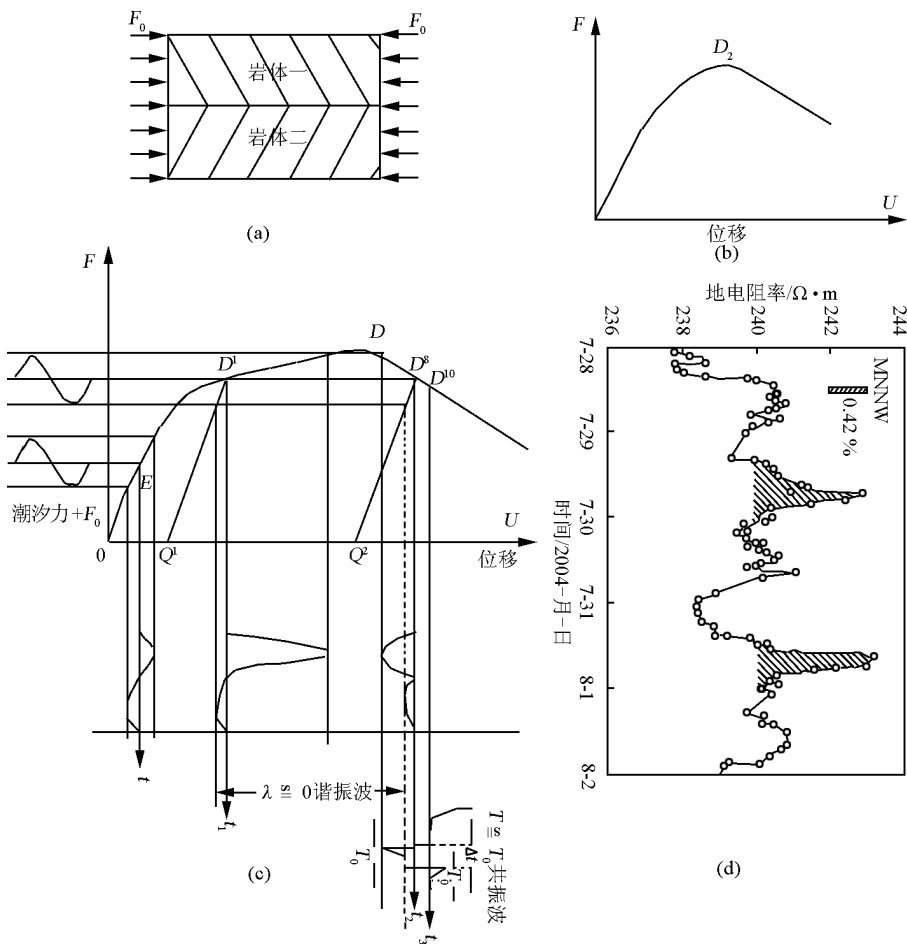
100”HRT波接收网站记录HRT波,作“黑箱”的输出信号(如同利用潮汐力波给地球做“探伤透视”),辨识得到与震源区介质状态有关的关系式,建立了HT波与RT波短临预测模型(HRT波预测模型)。1990年在分析 $\lambda \cong 0$ 阶段,输出信号的响应时,把外力看成两部分之和:主要部分(变化缓慢的构造力)是准静态(在不同时间段其值不同)的常量;另一部分虽然变化较快,但变化幅度却是很小的(如潮汐波动),辨识得到位移增量的表达式为^[3]: $\Delta u = (A/\lambda) \sin(2\pi/T)t$ 。即震源区介质在(分成两部分的)外力作用下的输出是简谐的应力—应变波,其周期 T 与潮汐波的相同,振幅则与源区介质刚度 λ 成反比。文献[3]中把外力分成两部分的分析方法,恰与理论声学^[4]中把各物理量每个都分成平衡值加上小的声扰动两部分的处理方法相同。

地震,特别是浅源地震周围的介质是多孔固体,其孔裂隙中通常含有流体^[1]。理论声学解波动方程的结果表明^[4],在多孔介质中存在两类可能的

波,速度快的波的能量大部分保持在固体骨架的运动中(在地壳中相当于地震波),而速度慢的波的大部分能量则保持在孔隙流体的运动中^[4]。观测到的波速比地震波波速慢得多的HRT波应属后者。

源区产生的应力应变波动主要沿介质孔隙流体传到观测台站,台站实测的地电阻率 ρ_s 遵从扩展的Archie经验定律^[5-7]: $\rho_s = \rho_o \Phi^{-(E+F\rho_o^{0.4})}$ 随孔隙应力—应变(ε)的波动而变化,式中 Φ 为孔隙度; ρ_o 为孔隙流体电阻率; E, F 为常数,即台站所测的地电参量能够灵敏地反映从震源传来的微小的应力—应变波动。这为台站检测从震源传来的HRT波,提供了理论与实验基础。

下面将通过潮汐力谐振共振波(HRT波)短临预测模式示意图(图1),来说明地震短临预测各阶段的物理标志。从放大的 $\lambda \cong 0$ 附近的本构关系图1(c)可见,在孕震早期(相当于预报的中期阶段),介质处于弹性阶段,震源区介质的 λ 为很大的、正的不



(a), (b), (c)为模型示意图, (d)为鲁甸地震前实测(与模型示意图可对比的)HT波震例

图1 潮汐力谐振共振短临前兆模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the model (mechanism) of HRT wave

变化的常数,所以电响应的振幅很小,基本不变化(在 0.05% ~ 0.1% 之间变化,其正弦波动几乎看不出来),不能被目前精度的仪器所检测(如图曲线 $E-t$ 所示);当 $\lambda \cong 0$ (相当于预测的短期阶段),源区介质的位移的变化规律和周期与潮汐力波的相同,其振幅却与 λ 成反比而异常增大(尽管 Δu 还与 A 成正比,但 A 的变化很小,所以响应的振幅主要取决于 λ 的变化)。所以出现能被记录到的,幅度异常增大的,其周期与起潮力一致的谐和振动波 (HT 波) 就成了孕震过程从中期转入短期的物理标志(如曲线 $D'-t_1$ 所示)。一般在 HT 波出现后数月 到数天就有强震跟随发生。当 λ 进一步减小(本构关系曲线进入 $\lambda < 0$ 的阶段),在输入信号周期 $T \cong T_0$ 阶段(相当于地震预报的临震阶段),当 T 从大于 T_0 (断层系统的固有周期)开始减少向 T_0 趋近,源区介质的速度与阻抗成反比,在 $T = T_0$ 时,阻抗的无功分量等于零,此时源区介质的运动主要受阻力(阻抗的有功分量)控制,力阻通常甚小,响应在 $T = T_0$ 时突然增大,源区介质的速度,即响应突然变化达到的极值^[4,8],产生共振振动(RT)波。文献[4]证明,黏滞性、可压缩流体的速度 u 总可以唯一地分成纵向与横向两部分,纵向部分同声压 p 有联系;横向部分则与压力波无关。所以源区同时产生一对 RT 波(一纵、一横),通常为一升一降(或相反),如曲线 $D''-t_3$ 所示^[9]。速度不同的纵、横两个 RT 波的到时差 (Δt) 与震中距成正比;在一个周期振动内,极值幅度阻尼衰减到原幅度 ($1/e$) 所花的时间,为断层系统的固有周期 T_0 , T_0 与断层长度(震级)有关。RT 波的出现就是孕震过程进入临震阶段的物理标志。通常在 RT 波出现后的数天到数小时内强震便跟随发生。

从潮汐力谐振共振短临前兆模式图看出,当发震断层失稳(地震)时,震源区介质(其孔裂中含流体)刚度 $\lambda \leq 0$,即本构关系曲线导数为 0 之后的阶段,断裂带中的多孔介质将随潮汐力而谐振、共振。从而产生微弱的能被“PS-100”HRT 波系统记录到的 HRT 波(HR 波的周期与潮汐力波的相同,RT 波的周期等于破裂断层系统的固有周期 T_0),从震中向外传播,被抗电(磁)干扰的“PS-100”HRT 波台站所接收。台站一旦记录到这种波动,则预示地震即将来临,判别分析这种波动的特性,便可预估得出未来地震时间、空间、强度的定量结果。

3 “PS-100”HRT 波接收网站及资料

3.1 “PS-100”IP 到端远程监控可控源大地电测仪

3.1.1 对记录 HRT 波仪器的要求与检验实验

邢台地震实验场 10 年来观测试验和唐山 7.8 级地震的实测结果表明,潮汐力谐振波(HT 波)的振幅是很微弱的(唐山 7.8 级地震震中区的波动振幅才只有约 1% ~ 2%)短临预报的 HRT 波来自震源,距离台站可能很远,收到的讯号更是微弱。震前测量电极极化不稳、天然电磁场变化与工农业杂散电流都对地电前兆的检测构成严重干扰,随社会现代化的发展,杂散电流的干扰,无论从幅度上还是从地域分布上,都愈来愈严重,致使检测地电的前兆方法难于生存,此外由于临震预报的紧迫性(震前几小时至数天),短临预报的观测系统不仅要连续,还必须满足分钟或小时观测值的准确可靠(即高精度),同时其测值需实时传输到预报人员那里,以备临震及实时分析判断,这就要求潮汐力谐振短临预报方法的观测系统必须具有极强的抗环境“电磁干扰”,“IP”到端、实时传输和远程监控的性能。

2003 年底在给中国地震局的两个内部报告指出,我国西部,南北地震带中段,2~3 年内有发生特大地震的危险^[10],为此 2004 年 3 月中国地震局特批“川滇地区强化地电观测”项目中,对所选用的我国自主研发的“PS-100”IP 到端远程监控主动源大地电测仪系统^[11]进行了观测实验测试与研究,结果表明:该仪器满足了上述要求^[12]。它不仅具有极强的抗电磁干扰能力和高的灵敏度与观测精度,而且可实时传输与远程监控。实地观测精度比国内外现有仪器高 1~2 个数量级,可达 0.05% ~ 0.1%。在 2004 年 12 月 26 日印尼 9.0 级海啸地震前,设在远离震中约 3 000 km 的川滇地区的“PS-100”台网,首次记录到来自震源的潮汐力谐振与共振波(HRT 波波动前兆)^[8,9],表明仪器能观测到微小的应力—应变波动,使潮汐力谐振短临地震预报方法(简称 HRT 波地震预测方法)的实用成为可能。

3.1.2 抗干扰高精度“PS-100”IP 到端远程监控可控源大地电测仪器系统—HRT 波接收网站

赵璧如等^[11]研制出的抗干扰的 PS100 高精度大地电测仪器系统,将通信领域中的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)技术首次应

用到地电测量仪器中,实现了在高电磁干扰噪声中辨识出不含电(磁)干扰的地电阻率值及其微小变化^[9]。中国计量科学研究院对“PS-100”系统的抗干扰能力进行了标定测试,在0.01%级标准电阻上加有从信号发生器(充当干扰源)获得的干扰电压的情况下,PS100系统对0.01%级的标准电阻的测定结果*表明,当信噪比在20~0 dB时,测值与真值之差及多次测量的均方偏差均优于0.1%,在0.01%(20 dB)到0.1%(0 dB)之间,新研制的“PS-100”HRT波远程监控遥测网站仪器系统,能在高电(磁)干扰环境下(信噪比为-60 dB)区分微弱信号,即在噪声比信号高1000倍的情况下可提取微弱的有用信号^[11],仪器具有提取HRT波信号的能力^[8,9]。

3.2 台站与资料

2004年在川滇地区设立了4个“PS-100”HRT波接收网站:冕宁(MN)台(28.532°N, 102.169°E)、红格(HG)台(26.544°N, 101.928°E)、元谋(YM)台(25.690°N, 101.861°E)、LJ台(26.837°N, 100.245°E)(其分布如图2所示),探索HRT波短临地震前兆^[12]。其中最北边的冕宁(MN)台距汶川8.0级地震震中288 km(图2),台站及汶川地震均位于中国大陆内部板块一级分界线—大体沿东经105°的南北地震带上。4个台PS100系统记录的地电阻率小时值的标准偏差,通常小于0.1%,对信噪比极低的个别点,实际观测精度仍优于0.17%,MN台“PS-100”系统4天内连续测量的5分钟值实测结果(图3a)表明,“PS-100”仪器能够记录微小的HRT波波动前兆^[8,9]。

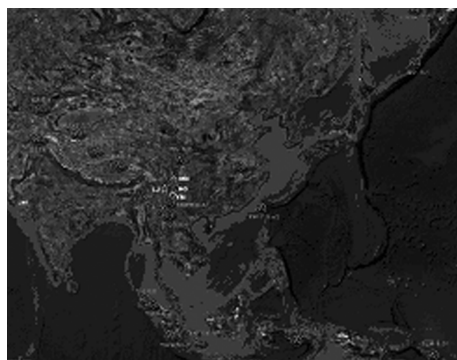


图2 “PS-100”HRT波接收网站位置和震前测到HRT波前兆的一些地震的分布

Fig. 2 PS-100 HRT station deployment and the distribution of epicenters of earthquakes

新建的4个台都做了电测深,以了解台址下探测

深度(体积)范围内地下水位变化等浅层干扰情况,研究表明一般电阻率的探测深度为200~300 m时,降雨和浅层地下水的年动态干扰可压低至1%~2%以下^[13,14]。用极化稳定的铅板作探测地电场的电极。仪器可两个方向供电,为节约场地少占农田面积,4个台均选用单方向供电,3个方向测量。MN和LJ台同一方向有长短两个测量对比道,共有两种物理量12个道的同步测量数据;YM台用ZD-8原电极系统在3个方向同步取得两种物理量数据。HG台EW道平行原线路新设电极系统在3个方向同步取得两种物理量数据。“PS-100”HRT波接收网站可

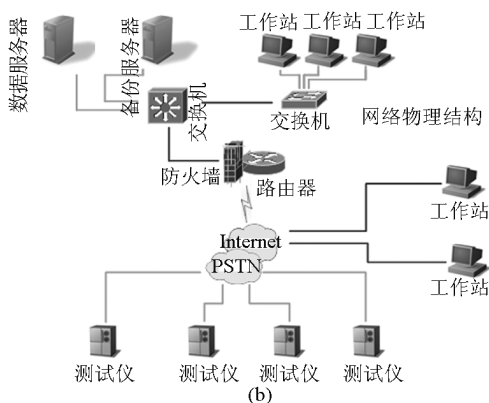
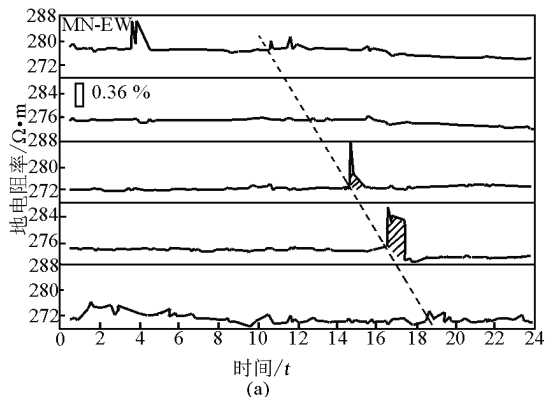


图3 (a)“PS-100”仪器高精度的实测结果(图中阴影为RT波);(b)HRT波系统的网络结构(PSTN:Public Switched Telephone Network 公共交换电话网)

Fig. 3 “PS-100” instrument precision recorded at MN station (a) and PS-100 network topology (b)

* 证书编号为DCcm2004-0012。此证书所列校准和测试结果系中国计量科学研究院直流及低频(1 MHz以下)电磁计量领域校准和测试能力(CMC)的一个项目,已列入互相承认协议附录C,可在BIPM网址: <http://kedb.bipm.fr/BIPM-KCDB/AppendixC/search.asp?MET=EM> 查询

(连续)定时、同步测量 12 个测道地电阻率(ρ_e)及地电场(ΔV)两种物理量^[9],所提供的对比记录可保证资料真实性、可靠性的检验与判断。12 个测道的 5 分钟值与小时观测值,及信噪比、小时值标准偏差、仪器温度、供电电流、供电电位差、天气等辅助信息,通过公用网实时(通常滞后 1 h)传至北京的远程监控中心,并储存于数据库。网内时间采用 NTP 时间同步协议,以保证各台之间的 HRT 波追踪及与地震发震时刻的对比。监控中心可监控、改变各台仪器的工作状态、操作程序等,经过整理的资料数据通过公用网服务用户(见图 3(b))。

4 HRT 波短临前兆震例

自 2004 年 5 月开始,4 个“PS-100”HRT 波接受网站所记录的国内外强震震例 20 余例,下面仅分

析几个重要震例。

4.1 HT 波短期前兆震例(见图 4)

从图 4(a)可见,2004 年 12 月 26 日苏门答腊 Mw9.0 级地震前 3 个月 MN 台开始出现周期为半月、波幅度逐渐增大的 HT 波,震后半月 HT 波立即消失,2005 年 1—5 月幅度基本无变化,从而表明震前 3 个月开始出现周期为半月、波幅度逐渐增大的 HT 波是 9.0 级地震的短期前兆;从图 4(b)和(c)可见,HG 台 NW 道在汶川 8.0 级地震前出现了 HT 的半月潮及连续出现 3 个周期约为 7 d 半(半月潮的一半)、幅度逐渐增大的 HT 波短期前兆;从图 4(d)可见,5 月 5 日前后连续出现两个相同方向(向下)的半日潮,表明源区介质的本构关系曲线处于 0 值附近,介质开始进入 $\lambda \leq 0$ 阶段,这是大震从短期转入临震的物理标志。

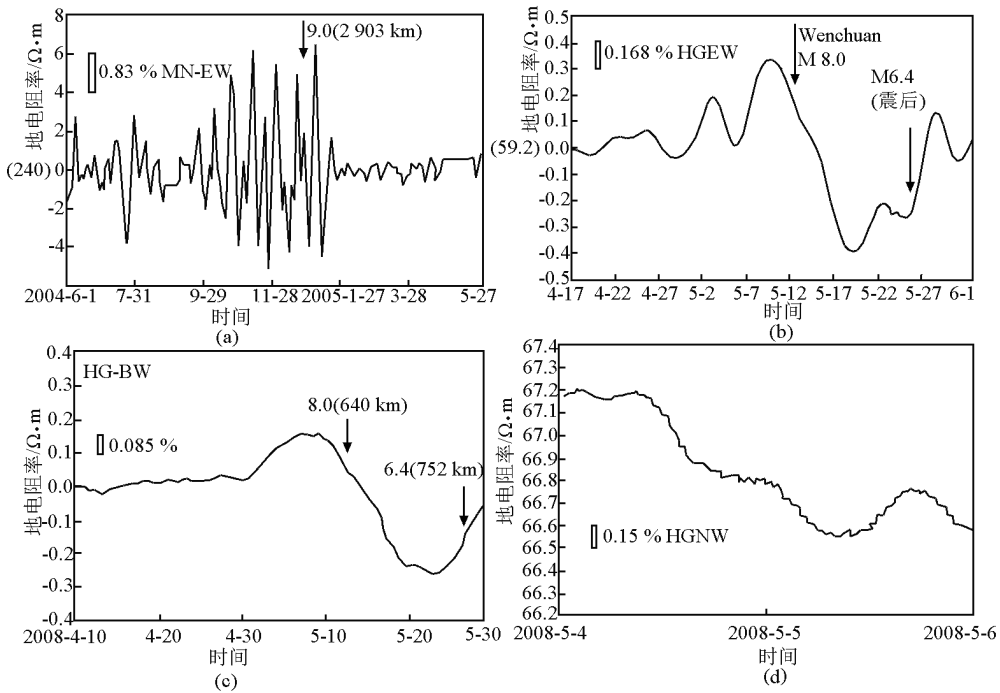


图 4 印尼 9 级和汶川 8 级地震 HT 波短期前兆震例

Fig. 4 The Sumatra Mw 9.0 earthquake and Wenchuan M_s 8.0 earthquake HT waves

(a) - 苏门答腊 9.0 级地震(北京时间 2004 年 12 月 26, 08-58-51.1, 3.15°N, 91.79°E)前后冕宁台 EW 道 HT 波记录图;(b) - 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震前 HG 台记录到周期为 7 天半的 HT 波;(c) - 汶川 8.0 级地震前 HG 台记录到周期为半月的 HT 波波动前兆;(d) - 5 月 4—6 日 HG 台 NW 道记录到显示震源体介质刚度 $\lambda = 0$ 的 HRT 波 5 分钟值图

4.2 RT 波临震前兆的震例及其所显示的 RT 波的传播特征(见图 5)

图 5(a)是 2004 年 12 月 24 日至 29 日小时值曲线,底部为 HG 台(距印尼地震的震中 $\Delta = 2686$ km;方位角 $Az = 13.5^\circ$)的地电阻率;中部为

MN 台($\Delta = 2903$ km; $Az = 12.8^\circ$)的地电流场;顶部为 MN 台地电阻率。对比两台极值出现的时刻,发现了极为有意义传播现象:HG 台的极值早于 MN 台的,从而求得 RT 波首波的相速度约为 85 m/s = 306 km/h。利用地震后 RT 波极值的到与 9.0 级

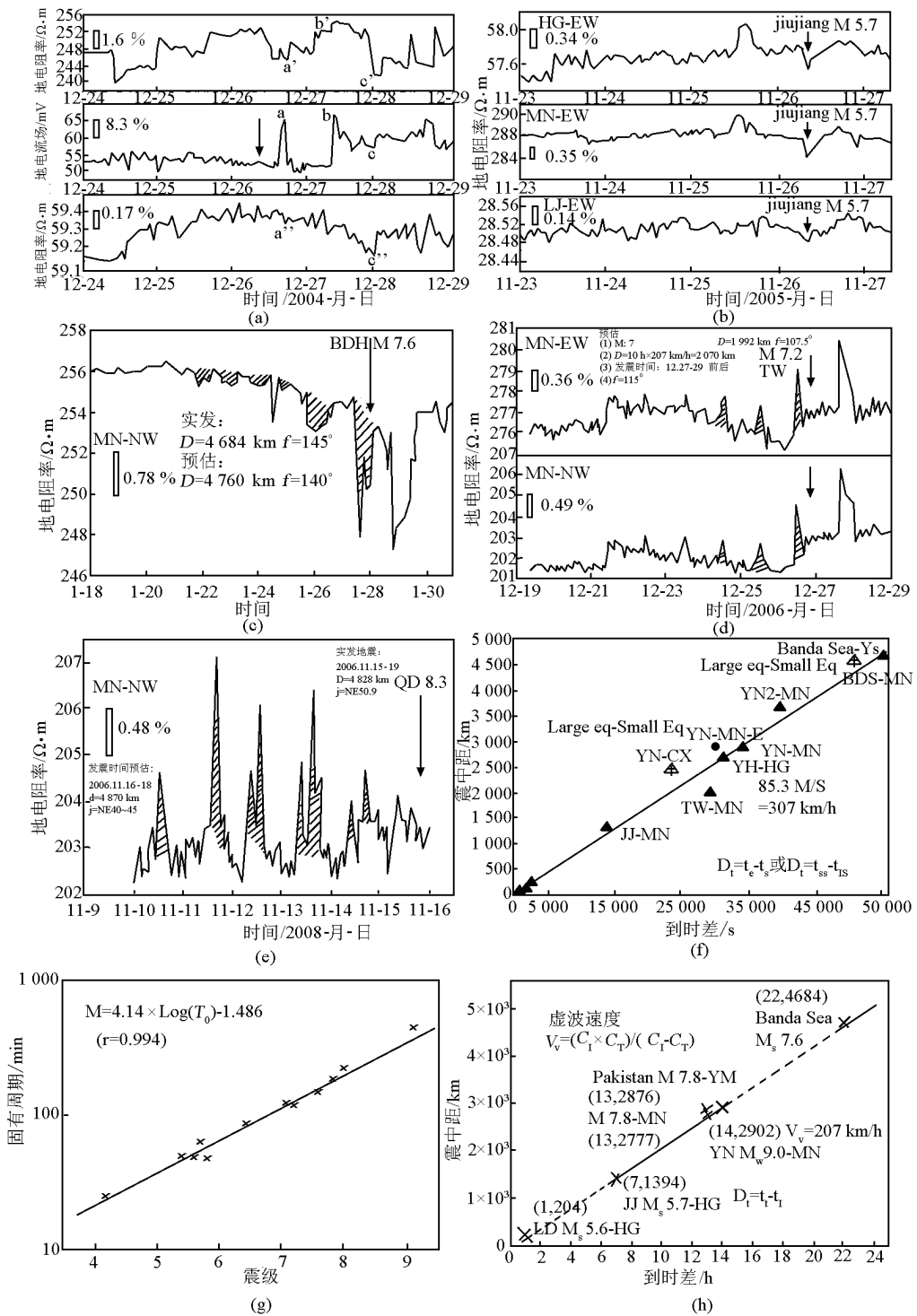


图5 RT波震例、传播特征与波速

Fig. 5 Examples of RT waves, propagation characteristic, wave velocity

(a) - 苏门答腊 $M_w 9.0$ 级地震时冕宁台地电阻率、地电场与红格台地电阻率对比,发现了2个RT波的震相,尤以冕宁地电场最为显著。得到RT波快波(纵波)速度;(b) - 九江地震前冕宁、红格、元谋3个台在震前记录到RT的波;(c) - 2006年1月28日班达海7.6级地震(北京时间,2006-01-28,00-58-50.5,54°S,128.1°E)临震前一周冕宁台NW道记录的HRT波震例;(d) - 2006年12月26日中国台湾两次7.0地震前记录的RT波震例;(e) - 2006年11月15日日本千岛8.1级地震前MN台记录的HRT波震例;(f) - RT波纵波速度曲线,求得 $V_{纵} = 307 \text{ km/h}$; (g) - 震级 M 与断层固有周期 T_0 关系;(h) - 虚波速度曲线

地震发震时刻的差和震中距,分别求得 RT 波的纵、横波波速,计算出的虚波速度与地震前求得的 RT 波的虚波速度一致。所求纵波波速与 RT 波首波的相速度吻合,用所得的虚波速度乘以地震后 RT 波极值的到时差,得到 RT 波波源对 HG 台的距离为 2 640 km;距 MN 台为 2 890 km,分别与两个台的实际震中距极为接近,证明 RT 波是从印尼 9 级地震震源发出的。只是因为 RT 波的传播速度甚慢,与 9.0 级地震同时发生的 RT 波的首波才在震后约 8 个小时出现(传至)在 HG 台、在震后约 9 h 出现(传至)在 MN 台。

把不同地震震后得到的(实际是与地震同时发生的)RT 波首波的到时同距离的坐标点展(绘)在图 5(f)上,发现印尼(YN)地震到 MN 台、印尼地震到 HG 台;2005 年 11 月 26 日江西省九江市 M5.7 级地震(JJ)到 MN 台等震例(如图 5 中 c, d)的诸点,几乎准确地落在一条速度等于 $85.4 \text{ m/s} = 307 \text{ km/h}$ 的直线上。不同震例求得 RT 波的首波速度如此稳定,成为 RT 波确实存在的有力证据。

根据浅源大震可引起显著的孔隙压力暂态变化和孔压的变化反过来又引发某些中小地震的见解^[15],将印尼(YN)9 级地震(2004-12-26, 08-58-51.1(北京时); $3.15^\circ\text{N}, 95.79^\circ\text{E}$)与楚雄(CX) M5.0 级地震(2004-12-26, 15-30-13.9; $24.76^\circ\text{N}, 101.75^\circ\text{E}$);以及班达海 M7.6 地震(2006-01-28, 00-58-50.5; $5.4^\circ\text{S}, 128.1^\circ\text{E}$)与永胜(YS) M4.8 地震(2006-01-28, 15-02-01.4; $26.3^\circ\text{N}, 100.8^\circ\text{E}$)的距离差与发震时刻差的坐标点也展在图 5(f)中(十字空三角),发现大、小地震的点也落在地电资料求得的速度等于 307 km/h 的直线附近。表明联系大小地震之间的孔隙压力变化(波动)的传播速度同用地电资料所求得的(RT 纵波)速度几乎是一致的,这证明 RT 波的存在是客观的。

川滇地区的 4 个台大体沿 NS 直线分布,九江 5.7 级地震大体在几个台的“正东”;巴基斯坦地震大体在几个台的“正西”,几个台大体位于这两个地震波动的同相波前峰面上,所以图 5(b)、图 6(e)给出这两个地震前的 RT 波前兆在 3 个台是可以对比的同步异常。

从图 5(c) 2006 年 1 月 28 日班达海 7.6 级地震($\Delta \approx 4 680 \text{ km}$)震例可见,班达海 7.6 级地震震前 10~8 d 曲线很平,无变化,震前 7 d MN 台记录到振幅逐日增加 HRT 波,临震前 1 d 急剧下降 1%

~2%,超出平时观测标准偏差 10 余倍,异常的显著性非常明显,先到的 RT 波与后到的上升的 RT 波之间的到时差为 23 h,求得震中距为 4 760 km,与台站的实际震中距(4 684 km)吻合。

从图 5(d) 2006 年 12 月 26 日中国台湾两次 7.0 级地震($\Delta \approx 2 013 \text{ km}$)震例可见,中国台湾地震震前 8~6 d 基本无变化,震前 5 d 起出现上升幅度逐渐增大、到时差为 10 h 的 RT 波,预测 MN 台的震中距 2 070 km,与实发震中距 2 013 km 一致;幅度从基本无变化增加到 1.5%,异常的显著性非常明显。

图 5(e)给出 2006 年 11 月 15 日日本千岛 8.1 级地震(北京时 2006-11-15 19:14:17; $46.616^\circ\text{N}, 153.224^\circ\text{E}$) MN 台($\Delta = 4 828 \text{ km}$)记录的 HRT 波震例。从图可见,约在震前一周每天出现幅度明显加大的 HRT 波,据 RT 波(图中阴影部分)预测发震时间为 11 月 16—18 日,震中距为 4 870 km;震级为 8.4 级,与实发地震吻合。

图 5(g)给出未来地震震级 M 与断层系统的固有周期 T_0 的关系: $M = 4.14 \times 10g(T_0) - 1.486$ 。分析 RT 波幅度的阻尼衰减情况,可得断层系统的固有周期 $T_0^{[9]}$,据此可预测震级。

从图 5(h)得 RT 波虚波速度 $V_v = (V_{\text{快}} \times V_{\text{慢}}) / (V_{\text{快}} - V_{\text{慢}})$, $V_v = 207 \text{ km/h}$,单台由震前 RT 波的到时差乘以虚波速度可得震中距,适宜台网中的多台则可用交绘法求得未来地震的震中,据此可预测震中。

4.3 本预测方法的实用性(见图 6 及表 1)

RT 波短临前兆震例及其所预测的震中距、震级与实发地震的要素吻合,表明预测方法有一定实用性。

图 6(a)是苏门答腊 9.0 级地震(2004 年 2 月 26 日)冕宁台 EW 道 HRT 波与 2005 年 3 月 29 日苏门答腊 M_s8.5 级地震的 HRT 波对比图;从图 6(a)可见,两个地震前出现半月周期的 HT 波形态相似,只是 M_s8.5 级地震的幅度较小。

图 6(b)上部是 MN 台地电阻率 5 分钟值。底部的是 HG 台地电场 5 分钟值。图中清楚地显示,二条曲线在苏门答腊 9 级地震前 2 d 及震后 1 d,即 2004 年 12 月 25、26 和 27 日出现可对比的箱状突然变化(主要由每天一次的突然上升构成),而且 MN 台的变化总比 HG 台的滞后 1~2 h,这显然是由于 MN 台的震中距($\Delta = 2 903 \text{ km}$)比 HG 台的($\Delta = 2 686 \text{ km}$)更远,RT 波从震中传到 MN 比传到 HG 台花的时间更长的缘故(据此求得 RT 慢波的相速度与从虚波速度公式算出的结果一致)。这个实测

记录表明苏门答腊地震前,距离震中近3 000 km的

两个台确实记录到具有传播特征的波动。

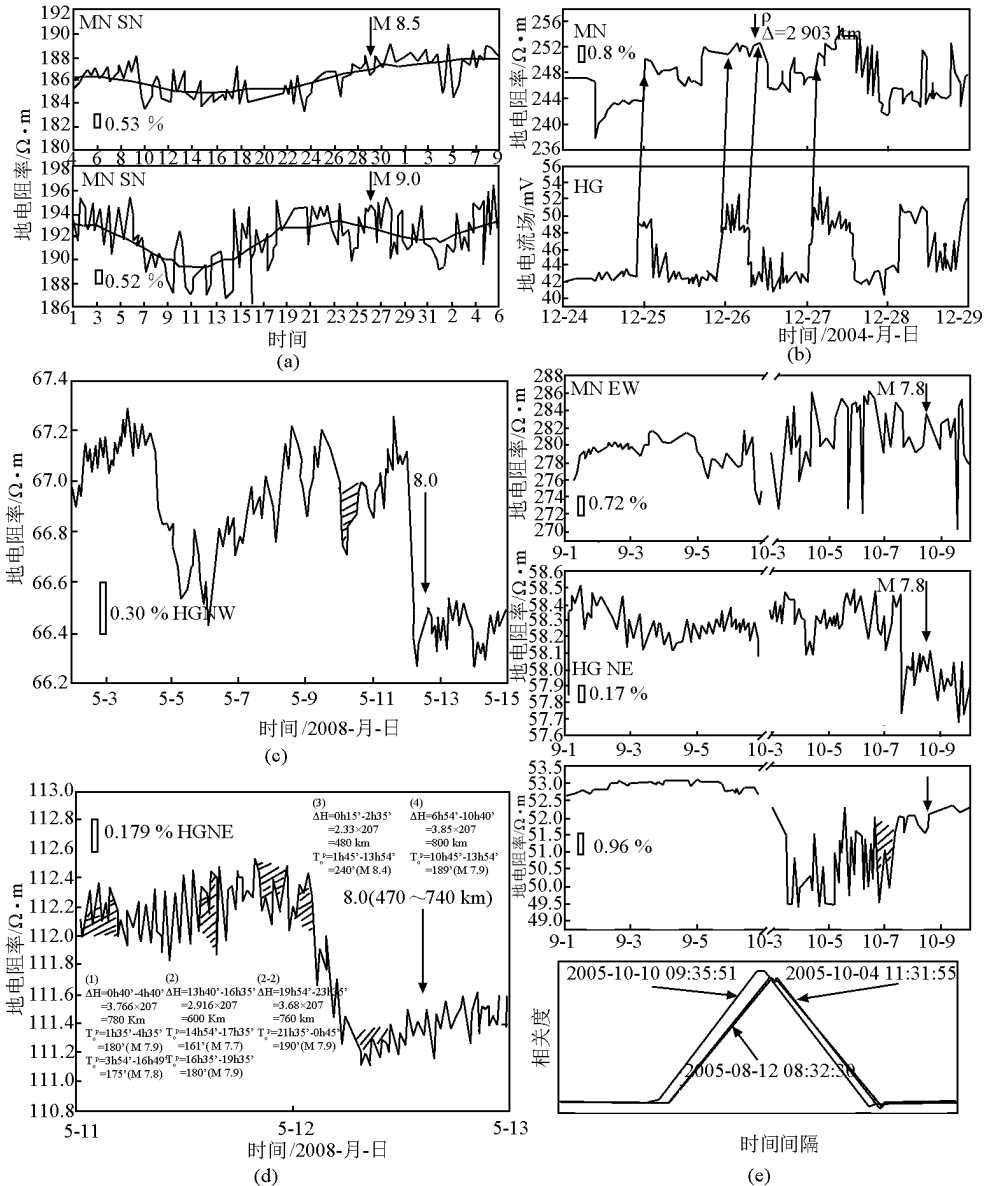


图6 波预测震中的震例及其规律性

Fig. 6 Examples of RT wave and regularity

(a) - 苏门答腊 9.0 级地震(2004 - 12 - 26, 08:58:51.1 (北京时间), 3.15°N, 91.79°N)前后冕宁台 EW 道 RT 波与 2005 年 3 月 29 日苏门答腊 $M_{8.5}$ 级地震的 HRT 波对比图;(b) - 苏门答腊地震红格、冕宁二个台记录的 RT 波的传播特性。图中顶部曲线是 MN 台地电阻率 5 分钟值,底部的是 HG 台电场 5 分钟值曲线;(c) - 汶川地震的 RT 波的震例;(d) - 汶川地震 5 分钟值的结果;(e) - 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 7.8 级地震前冕宁、红格、元谋 3 个台同时记录到可对比的 RT 波及对 MN 仪器远程标定的结果

图 6(b)中更引人注意的现象是:突然上升段的持续时间(箱状变化的宽度),逐日加长,如 25 日约 4.5 h;26 日为 9 h;震后 27 日约为 13.5 h,即图 6(b)中清楚地显示出多普勒效应。可以证明,固有周期 T_0 的逐日加长,是震前断层(或者毛细管模型的管中)流体先于地震出现流动,使断层的共振频率降低所致。

从图 6(c)中看出:汶川 8 级地震前 HG 台连续出现幅度超过观测标准偏差数倍的、半日潮 HRT 波,震前数日半日潮波幅逐日明显加大,其上叠加有 3~4 h 的短周期波动(RT 波),据此分析得到震中距、震级信息。震前 1 d,RT 波反向由平日的下降波转为上升的,表明源区介质再次经过刚度 $\lambda = 0$ 的状态,地震一触即发。震前 10 余个小时即 12 日凌晨,

地电阻率急剧下降达 1% 左右,其上叠加有 3 h 波动,反映断层滑动长度(震级)与震中距的信息(分析结果见表 1),可成为强震的预警信号。HG 台 NW 道出现幅度逐日增大的 RT 波(如 5 月 9 日,幅度为 0.3%;5 月 10 日,0.5%;5 月 12 日震前,1.0%)。

从图 6(d) 红格台 5 分钟测值图可见,NE 道临震前出现幅度逐日增大的 RT 波(图中阴影部分)图旁文字为根据 RT 波记录计算的震中距与震级结果参见表 1。

从图 6(e) 可见,2005 年 10 月 23 日巴基斯坦 7.8 级地震前冕宁、红格、元谋 3 个台大体位于 7.8 级地震的同一波锋面上,故 3 个台同时记录到可对比的 RT 波。底部曲线是对 MN 仪器远程标定的结果,震前、震时、震后 3 次标定曲线一致,表明仪器正常,记录结果可信。

表 1 汶川地震前红格台 EW 测道 RT 波分析得到的预测震级、震中距结果

Table 1 Earthquake prediction results from the RT wave in EW channel for epicenter distance and magnitude

日期	快波 到时	周期 / T_0	震级	慢波 到时	周期 / T_0	震级	震中 距/km
5 月 5—6 日	22:49			02:54	175	7.8	845
5 月 6 日	17:35	189	7.9	20:35	204	8.1	620
5 月 7 日	07:45			11:45	171	7.8	842
5 月 8 日	05:54			09:35	180	7.9	762
5 月 8 日	18:35			20:49	180	7.9	462
5 月 8 日	20:45			23:35	180	7.9	590
5 月 9 日	06:35	166	7.7	09:49			670
5 月 10 日(1)	03:45			06:45	180	7.9	620
5 月 10 日(2)	17:54			20:15	199	8.0	555
5 月 11 日(2)	01:54			05:35	190	7.9	760
5 月 11 日(3)	15:49	180	7.9	19:40			800
5 月 11~12 日(4)	23:54			02:25	240	8.4	555
5 月 12 日	06:40			10:35	190	7.9	810

注:括号中的数字分别对应于图 6(d) 中的标号

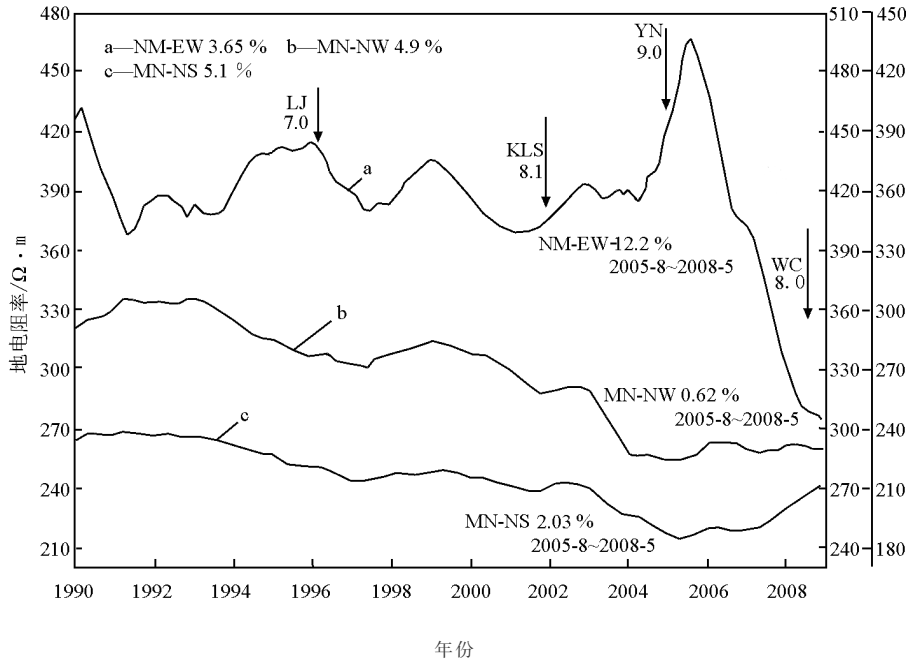
表 1 所得汶川地震三要素与实际发生地震吻合,由不同日期和时段求得的震中距在 500 ~ 800 km 范围内变化;由于“震中”均在红格台以北,表明震前波动的源可能存在沿断层南、北来回迁移的现象。5 月 12 日临震前两个 RT 波波源到红格台

的震中距为 555 km 和 810 km(由南向北迁移),如认为这是断层的“两端”,则可求得“断层的破裂长度”为 $(810 - 555 \text{ km}) = 255 \text{ km}$ 。按断层长度与震级的统计关系^[16]: $M = 3.3 + 2.1 \log L$, 求得震级为 8.5,这与 HRT 波求得的震级(表 1)吻合,与矩张量反演的结果^[17] ($M_w = 7.9 \sim 8.1$)一致,表明 RT 波的客观性。

汶川地震前所记录的 HRT 波同以前所记录的其他地震的 HRT 波的规律具有很好的一致性,且都与起潮力模式吻合。实际检验结果进一步说明与未来地震三要素紧密相关的 HRT 波波动前兆是客观存在的。

5 冕宁台地电阻率中长期异常变化与汶川地震有因果关系的分析

冕宁台位于 SN 向安宁河断裂带附近,从图 7 可见,自 1993 年至 2005 年初,该台手工操作 DDC-2 仪器记录到 NS 向与 NW 向地电阻率持续下降,而 EW 向值基本保持不变。根据岩土层加压现场实验的结果^[5-7] 得到,1993—2003 年底冕宁台一直受到主压应力 $N70^\circ E$ 方向区域应力的作用。期间虽然发生(1996 年)丽江 7.0 级、(2001 年)昆仑山口 8.1 级等地震,冕宁台地电阻率趋势并未发生明显改变。故 2003 年底提出:在 MN 台附近 200 ~ 300 km 范围内,2 ~ 3 年内有发生特大地震的危险^[10]。2004 年底苏门答腊 $M_w 9.0$ 级地震后,MN 地电阻率的 NS 向转上升,NW 向转平,EW 向则转下降。表明苏门答腊 $M_w 9.0$ 级地震后,冕宁台的主压应力方向转成 $N20^\circ W$ (MN 台距汶川仅 288 km),几乎与汶川地震的发震断层垂直,使断层被“锁住”,这与 1976 年唐山 7.8 级地震前最大主压应力方向使唐山地震发震断层“锁住”的情况^[18] 是一样的。因而从 2005 年中冕宁附近强震的孕育转入中期,这个变化趋势与该台“PS-100”仪器的记录一致,表明人工操作的仪器,可以消除大部电磁干扰,得到可用的地电阻率中期趋势。对此中期异常的持续时间 $T = 1\ 046 \text{ d}$,按统计公式^[19,20] $M = 0.54 + 2.48 \log T$ 得 $M = 8.0$ 级,5 月 12 日汶川地震的发生与 2003 年底两个内部报告^[10] 的预测意见基本一致,说明以前 40 年所积累预测经验^[21-34] 可用于汶川地震的预报。临震前发现 HG 台“PS-100”HRT 波系统于 5 月 12 日凌晨 1 h 至 5 h 记录到应力场急速转成 $N70^\circ E$,这是使汶川地震发震断层发生震前滑动的显著预警信号。



注:图中的3个纵坐标由左至右分别对应 NM-EW 3.65 %, MN-NS 5.1 %, MN-NW 4.9 %

图7 汶川 M_s8.0 级地震前 MN 台地电阻率异常

Fig. 7 Anomalies in: earth resistivity recorded at MN station before Wengchuang M_s 8.0 earthquake

6 结语

1966年邢台发生地震,敬爱的周总理以他那唯物主义的博大胸怀精辟地指出,地震是有前兆的,是可以预测预报的……。希望在你们这一代解决这个问题。外国人没有解决的问题,难道我们不可以提前解决吗?

作为年轻的地球物理工作者的笔者,当时正是在党中央的这一号召下,走进我们本该走进的邢台地震预报实验场,我们把物探电法,经变种引进地震战线。与新桥地震队七八十位战友一起,经过八个春夏秋冬的“摸爬滚打”,使预测地震的地电方法初露曙光,记录了20世纪70年代我国地震高潮期的震例,在唐山7.8级和松潘二次7.2级地震前,均有地电分析人员因觉察到异常而去到这两个地震震中及其附近的地电台,帮助加强工作。可惜的是唐山地震前因当时没有确切的短临预测方法,只是根据“小震闹大震到”的经验,地电人员手里拿着震前2~3年就已出现的反映大震的“长趋势”异常,在等大震前的小震闹。就在临震前3d(7月24日)当时的国家地震局分析预报室京津组的会商会上,大家

曾预报主震前的小地震(4.5级),殊不知就在所预报的时间、地区来的并不是主震前的“小前震”,竟是7.8级大地震本身。没有“小震闹”就“大震到了”。24万人的生命鞭答着我们在地震预测预报第一线又“战斗”了30年。

如果说唐山地震的“漏报”原因之一是当时没有确切的短临预测方法,而32年后汶川8级地震没能预报的原因之一却是:有了(不少)短临预报方法却没有实施条件的保证,8万人又失去了生命!从事一辈子地震预测探索研究的我们,又怎么能不悲痛万分,老泪横流。

经过唐山、汶川两次地震血的教训,我们清醒地认识到,中国人民迫切需要地震预报。我国的地震预报已积累了40多年经验和教训,只要我们认真总结,下定决心去搞地震预报,选对方法技术,使用能记录到前兆波的,具有高精度和远程监控、实时传输能力的设备,我们坚信在中国共产党的领导下,外国有的,我国也能有;外国没有的,只要是人民需要的,我们的国家也一定能有。我们期待着地震预报能列入国家地震科学技术发展规划之中,力争更准确的地震预测预报能早日到来。

参考文献

- [1] 耶格 J C, 库克 N G W, 中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-690
- [2] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 1-562
- [3] Qian Fuye, Zhao Yulin, Xu Tongchu, et al. A model of an impending - earthquake precursor of geoelectricity triggered by tidal forces[J]. *Phys Earth Planet Int*, 1990, 62: 284-297
- [4] Morse P M, Ingerd K U. *Theoretical Acoustics*[M]. New York: McGraw Hill, 1968: 1-927
- [5] 赵玉林, 钱复业. 原地电阻率变化的实验[J]. *地震学报*, 1983, 5(2): 217-284
- [6] 赵玉林, 钱复业, 许同春. 岩土层受力时电阻率变化与应变的关系[J]. *地震学报*, 1990, 12(1): 87
- [7] Zhao Yulin, Qian Fuye, Stopinski W. In situ experiments and relationship between the electrical resistivity changes and the strain[J]. *Acta Geophys Polon*, 1990, 38(3): 229-243
- [8] 赵玉林, 赵璧如, 钱卫, 等. 印尼 Mw9.0 级地震的短临地电波(声波: 潮汐力谐振共振波, HRT 波)波动前兆—HRT 波法进行短临地震预测可能性的探讨[J]. *国际地震动态*, 2006, (8): 6-21
- [9] 钱复业, 赵璧如, 钱卫, 等. 汶川 8.0 级地震 HRT 波地震短临波动前兆及 HRT 波地震短临预测方法[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 19(1): 11-23
- [10] 钱复业, 赵玉林. 关于“川滇地区 1~3 年可能发生特大地震的地电学方法监测应急措施方案”的建议(2003 年 12 月)[J]. *国际地震动态*, 2008, (8): 1-12
- [11] 赵璧如, 赵健, 张洪魁, 等. PS100 型 IP 到端可控源高精度大地电测仪 - CDMA 技术首次在地电阻率测量中的应用[J]. *地球物理进展*, 2006, 21(2): 675-682
- [12] Zhang Hongkui, Zhao Biru, Zhao Yulin, et al. PS100 anti - interference electrical observation system and its application to earthquake prediction study[J]. *Phys Chem Earth*, 2006, 31: 172-181
- [13] 钱复业, 赵玉林. 地电阻率季节干扰变化分析[J]. *地震学报*, 1987, 9(3): 289-302
- [14] Lu Jun, Qian Fuye, Zhao Yulin. Sensitivity analysis of the Schlumberger Monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China[J]. *Tectonophysics*, 1999, 238: 397-405
- [15] Nur A. The study of relations between deformation and forces in the Earth. *Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics* [R]. Theme 2: Tectonophysics. Denver, 1974: 243-317
- [16] 郭增建, 秦保燕, 徐文耀, 等. 震源孕育模式的初步探讨[J]. *地球物理学报*, 1973, (16): 43-48
- [17] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(10): 1186-1194
- [18] Qian Fuye, Zhao Yulin, Lu Jun. Georesistivity precursors to the Tangshan earthquake of 1976[J]. *Anneli di Geofisica*, 1997, XL(2): 251-260
- [19] 钱复业, 赵玉林, 于谋明, 等. 地震前地电阻率异常变化[J]. *中国科学 B 辑*, 1982, (9): 831-839
- [20] 钱复业, 卢振业, 丁鉴海, 等. 电磁学分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 1-227
- [21] 赵玉林, 钱复业. 唐山 7.8 级强震前震中周围形变电阻率的下降异常[J]. *地球物理学报*, 1978, 21(3): 181-190
- [22] Zhao Yulin, Qian Fuye. Geoelectric precursors to strong earthquakes in China[J]. *Tectonophysics*, 1994, 233: 99-113
- [23] 赵玉林, 钱复业, 卢军. 电测量在中国地震预报中的应用[J]. *地震地质*, 2001, 23(2): 277-284
- [24] Gu Gongxu. On the strategy of earthquake prediction. In: *Coulomb J, eds. Source Mechanism and Earthquake Prediction*, Paris, 1980: 99-107
- [25] 钱复业, 赵玉林, 黄燕妮. 地电阻率各向异常参量算法及地震前兆实例. *地震学报*, 1996, 18(4): 480-488
- [26] 赵玉林, 钱复业. 唐山地震前后形变电阻率的脉冲[J]. *地球物理学报*, 1979, 22(1): 25-31
- [27] Zhao Yulin, Li Zhengnan, Qian Fuye, et al. Synthetic criterion for judging the transition geoelectric precursors from medium - term stage to short to short - term/imminent stage[J]. *J Earthq Predict Res*, 1996, 5(4): 594-601
- [28] 赵玉林, 钱复业. 地电场短临预报方法研究[J]. *地震*, 2005, (2): 33-40
- [29] Zhao Yulin, Zhao Biru, Qian Fuye. Electrical Streaming Potential Precursors to catastrophic earthquakes in China[J]. *Anneli di Geofisica*, 1997, XL(2): 241-250
- [30] Qian Fuye, Zhao Yulin, Teisseyre R. Periodic anomalies of the telluric electric field before the Tangshan earthquake and a model of electrokinetic precursor triggered by tidal forces[J]. *Acta Geophys Polon*, 1990, 38(3): 245-256
- [31] 钱复业, 赵玉林, 刘捷, 等. 唐山 7.8 级地震地电阻率临震功率谱异常[J]. *地震*, 1990, (3): 33-38
- [32] 钱复业, 赵玉林. 地电短临前兆产生机理及一种新的短临预报方法(谐振预报法)[J]. *华北地震科学*, 1996, 14(3): 1-9
- [33] 张洪魁. 地电幕式变化及其与地震的关系[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(增刊): 90-95
- [34] 钱复业, 赵玉林, 陈英方, 等. 地震预测 - 地电方法论文集[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1985: 1-321

The feasibility of accurate earthquake prediction by HRT wave and examples of strong earthquakes including Wenchuan Earthquake (M = 8)

Zhao Yulin, Qian Fuye

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

[**Abstract**] The method of earthquake short-term and impending prediction by using tidal wave (abbr HRT wave method) is a new, quantitative technology of simultaneous determination of the location, magnitude and time of an earthquake. The earthquake preparation processes and precursor mechanism are considered as a “black box”. Using the modern control theory in system recognition, we can calibrate this “black box” mathematically with different input and output parameters. We regard the tidal force as our “input signal” while geoelectric response to the tidal forces is considered as an “output”.

[**Key words**] “black box” & HRT wave model; PS-400HRT instrument system; discovery of HRT wave precursor and its regularity; practicality of HRT wave model

(上接 110 页)

The scientific faith that earthquake is predictable should be insisted —the successful prediction of three strong aftershocks of Wenchuan Earthquake

Wang Chengmin

(*Chinese Earthquake Prediction Consultation Committee, Beijing 100029, China*)

[**Abstract**] Is earthquake predictable? This question has been discussed a lot by earthquake researchers and common people after the Wenchuan Earthquake. The specialists in Chinese Earthquake Prediction Consultation Committee started the aftershock prediction research after the earthquake to support emergency rescue and disaster relief with practical action. From May 15 to August 15, the committee formally reported prediction results for 3 times and the three strong aftershocks, i. e. M 6.0 earthquake on May 18 in Jiangyou, M 6.4 earthquake on May 25 in Qingchuan and M 6.1 earthquake on August 1 in Beichuan, have been correctly predicted. Through predicting aftershock isn't so difficult as predicting main shock, those people who think earthquake can be predicted after decades of generations and despise the academic viewpoint that earthquake is predictable should think over the fact that the prediction of all three aftershocks was correct without any miss report, and treat the academic viewpoint equally.

[**Key words**] Wenchuan Earthquake; aftershock of Wenchuan Earthquake; earthquake short-impending prediction