

# 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

## ——关于实现强震短临预测可能性的讨论

钱复业<sup>①\*</sup>, 赵璧如<sup>②</sup>, 钱卫<sup>③</sup>, 赵健<sup>④</sup>, 何世根<sup>⑤</sup>, 张洪魁<sup>⑥</sup>, 李世愚<sup>⑦</sup>, 李绍坤<sup>⑧</sup>, 严谷良<sup>⑨</sup>, 汪成民<sup>⑩</sup>, 孙振凯<sup>⑪</sup>, 张东宁<sup>⑫</sup>, 卢军<sup>⑬</sup>, 张平<sup>⑭</sup>, 杨国军<sup>⑮</sup>, 孙加林<sup>⑯</sup>, 郭纯生<sup>⑰</sup>, 唐宇雄<sup>⑱</sup>, 徐建明<sup>⑲</sup>, 夏坤涛<sup>⑳</sup>, 鞠航<sup>㉑</sup>, 殷邦红<sup>㉒</sup>, 黎明<sup>㉓</sup>, 杨东生<sup>㉔</sup>, 起卫罗<sup>㉕</sup>, 和泰名<sup>㉖</sup>, 关华平<sup>㉗</sup>, 赵玉林<sup>㉘</sup>

① 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

② 天津海泰光电科技有限公司, 天津 300201;

③ Department of Physics, University of Toronto, L6C, 1V9, Canada;

④ 防灾科学技术学院, 三河 065201;

⑤ 北京市地震局, 北京 100080;

⑥ 四川省地震局, 成都 610041;

⑦ 国家发展和改革委员会, 北京 100824;

⑧ 中国地震局预测研究所, 北京 100036;

⑨ 中国地震台网中心, 北京 100036;

⑩ 云南省地震局, 昆明 650041;

⑪ 天津市地震局, 天津 300201;

⑫ 内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010;

⑬ 丽江市古城区地震局, 丽江 674100

\* E-mail: [zhaoyl522@yahoo.com.cn](mailto:zhaoyl522@yahoo.com.cn)

收稿日期: 2008-08-14; 接受日期: 2008-10-23

**摘要** 2004 年初开始在川滇地区布设的 4 个地电台, 使用所研制的抗干扰性能极强的 PS-100 地电测量系统和技术, 捕捉地震短临前兆. 至 2008 汶川 8.0 级地震前, 唯一仍在工作的红格台记录到了汶川地震的 HRT 波短临前兆. 根据潮汐力谐振共振波(简称为 HRT 波)短临地震预测模型, 在汶川 8.0 级地震前 5 月 11 日夜至 12 日凌晨 5 时分析得到了大震即将来临的结果. 所记前兆同以前各台对其他强震所记的 HRT 波震例的规律有很强的一致性. 所测物理量(地电阻率与地电流)仅在强震前才出现潮汐力的周期, 而其振幅在震前数月甚至几天明显增大. 通过研究所记的实例表明, 它们通常与几天后所发生的地震有因果关系, 这种波的到时与台站的震中距成正比; 由这种波动所测的断层固有周期  $T_0$  与断层长度(震级)有关, 对 6~9 级地震,  $T_0$  的范围为 1~6 h. 有证据表明, 它们是来自即将发生地震的震源区. 这种波动周期较长, 在地壳中, 可传播数百乃至数千公里. 对发生在地壳中的浅源大震, 地壳固体在其孔、裂隙中通常含有易于流动的(导电的)流体(溶液), 这种流体在地震孕育过程中因受力(孔隙压力)先于断层位移(地震)产生的(微小)扰动(波动), 对所观测的 HRT 波提供了一种可能的解释. 从 2004 年在川滇地区增设 4 个 PS-100HRT 波台站, 试图捕捉强震短临前兆, 到 2008 年发生汶川 8.0 级地震(距离新增的 MN 台  $\Delta=288$  km; 距离记录到 HRT 波短临异常的 HG 台  $\Delta=465$  km; 距离青川 640 km)前, HG 台捕捉到汶川 8.0 级地震的 HRT 短临前兆的全过程, 表明地震是有前兆的, 地震是可以预测、预报的, 在可预见的将来实现地震的短临预报是可行的.

### 关键词

汶川 8.0 级地震

HRT 波短临预测模型

PS-100 远程监控大地电测仪

HRT 波波动前兆

强震震例的重现性与规律的一致性

地震短临预测的可行性

由于观测机会有限, 其影响因素又无法控制等原因, 一个地震的地电前兆是很难证实的. 孕震区的地球介质(特别是浅源地震的介质)是多孔固体, 而其孔、裂隙间常含有流体, 地震的孕育不仅与岩石基质固体骨架的变化有关, 而且也与其间的孔隙流体的运动(扰动)有关, 孔隙流体的易流动性显著地影响着地球材料的力学性质. 叠加在孔隙压力平衡值之上的微小扰动(声)压力, 对地震的孕育及前兆的形成有着重要的意义<sup>[1-4]</sup>. 另一方面岩石的电性主要受孔裂隙流体控制, 在岩石的诸物理性质中, 电性与其孔裂隙流体(溶液)的关系最为密切, 所以地震电学前兆的探索研究一直为各国科学家所重视, 日本、俄罗斯、美国、希腊等国科学家, 对地电阻率曾进行了许多研究; 近年他们主要集中探索研究地电流前兆<sup>[5-14]</sup>. 日本新岛地电台, 在 2000 年夏季一次最大震级为 6.3 级的震群前, 靠近震中的测线记录到地电场潮汐响应加强的现象<sup>[13]</sup>. 自 1966 年在邢台地震实验场开始探索地电前兆以来, 中国在其主要地震带上建立了地电阻率观测台网, 在连续定时采集地电阻率观测数据的同时, 也采集地电流的资料. 这种台站在中国曾达到 120 余个, 由于投入巨大, 在检测仪器设计、观测方法技术、台址选择、强震地电前兆现象、规律和机理等诸方面, 都发展积累了许多经验和资料.

## 1 潮汐力谐振、共振(HRT 波)短临地震预测模型

为探索前兆预测地震, 建立贴切的地震预测或地震前兆的数学模型是首要的. 地震预报之所以成为当今世界一大科技难题, 主要原因是由于地震的孕育过程、产生前兆的机理等, 至今尚不为人们所了解. 更由于在地震的孕育过程中, 各种“参量”必然是随时间而变化的, 需要随时了解其动态特性. 从现代控制论的观点出发, 在探索解决地震预测这一实际问题时, 赵璧如根据过程辨识<sup>[16]</sup>原理提议把孕育过程, 产生前兆的机理视为“黑箱”. 仿照工业生产中通常使用的“探伤”方法, 通过随时实地测取震源介质在某种扰动输入作用下的输出响应, 从实测资料建立与“黑箱”特性等价的(定量的)数学模型, 以便更好地分析孕育过程的机理、预报、理解过程的性能.

在解决地震预测这一实际问题时, 正确地选取

输入信号及测量输出响应的方法, 就成了控制论能否成功地应用于地震预测这一实际问题的关键. 根据 1976 年唐山地震实际记录的启示, 考虑到潮汐力具有运动规律已为人们所掌握, 其周期可远大于强震断层的固有周期  $T_0$  数小时, 可随时对地球各处的震源加载输入信号等特点, 我们选潮汐力作输入信号; 选主要受孔裂隙流体控制与孔裂隙流体(溶液)关系最密切的地电参量(地电阻率和地电流场)的测量方法, 作为实地测量“黑箱”输出响应的方法, 以随时定量地估计出对象的数学模型及其参量的动态变化.

1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震前半月, 震中区的昌黎台( $\Delta=70$  km)人工操作仪器记录到地电阻率对  $M_2$  波的异常响应, 其他时段则无异常出现. 据此于 1990 年提出潮汐力谐振模型<sup>[17]</sup>. 结合 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_w 9.0$  级地震的地电记录, 进一步总结出“潮汐力谐振共振波(我们简称为 HRT 波)短临预测地震方法”<sup>[17,18]</sup>(参见图 1). 据岩石力学实验<sup>[19]</sup>推论指出, 发震断层失稳(即地震)时, 其震源区介质的本构关系曲线将处于极大值或过极值段, 即地震将在源区介质刚度  $\lambda=dF/du = d\sigma/d\varepsilon \leq 0$  的阶段发生(式中  $F$ ,  $\sigma$  为力或应力,  $u$ ,  $\varepsilon$  为位移或应变). 目前人们无法实地测量地球介质本构关系全过程曲线, 我们可以利用过程辨识原理, 辨识源区介质  $\lambda \leq 0$  的阶段. 在分析  $\lambda=0$  时输出信号对潮汐力的响应特性时, 得到潮汐力输入地质系统时, 其位移增量的表达式为  $\Delta u = (A/\lambda)\sin(2\pi/T)t$ , 即源区介质(对潮汐力)响应为一应力-应变波, 其振幅与输入信号振幅  $A$  成正比, 与源区介质刚度  $\lambda$  成反比<sup>[17]</sup>. 源区产生的应力-应变波传到台站, 实测地电阻率  $\rho_x$  随孔隙应力-应变  $\varepsilon$  灵敏变化<sup>[20,21]</sup>, 按扩展的 Archie 经验定律  $\rho_x = \rho_0 \Phi^{-(E+F\varepsilon^{0.4})}$ , 反映源区传来的应力应变波.

从放大的  $\lambda \approx 0$  附近的本构关系图 1(c) 可见, 在孕震早期, 介质处于弹性阶段, 震源区介质的  $\lambda$  为很大的、正的、不变化的常数, 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), 如图曲线  $E-t$  所示; 当  $\lambda \rightarrow 0$  时, 源区介质的位移的变化规律和周期与潮汐输入信号的相同, 其振幅却与  $\lambda$  成反比而异常增大(尽管  $\Delta u$  还与  $A$  成正比, 但通常  $A$  的变化很小, 所以响应的振幅主要与  $\lambda$  成反比而变化), 震前数月或数天出现幅度异常增大,

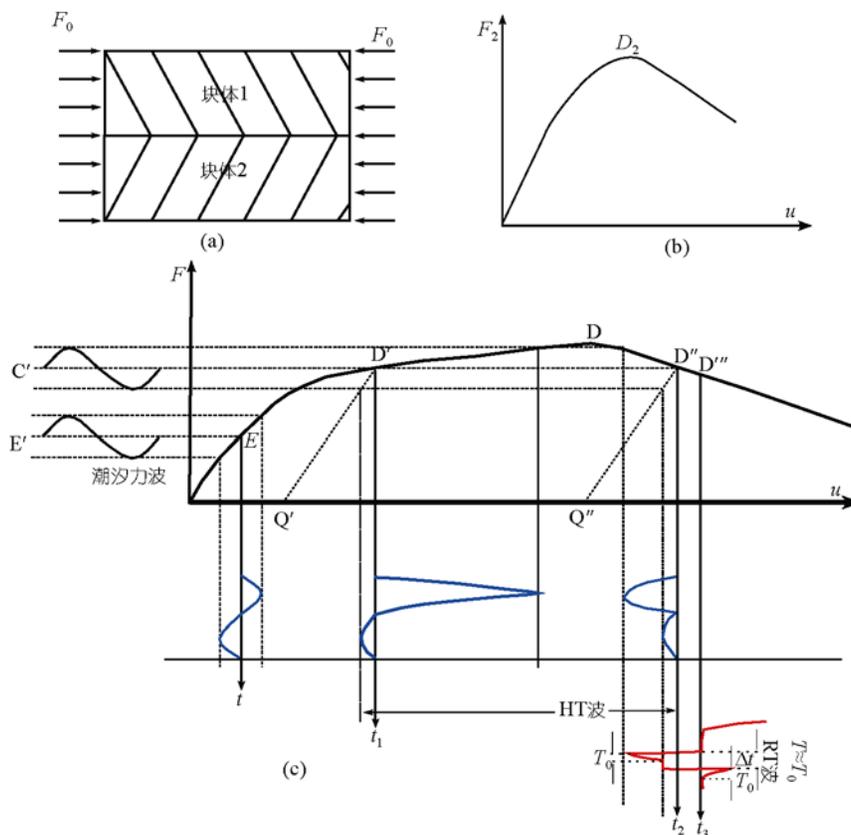


图 1 潮汐力谐振共振短临前兆模式示意图

其周期与潮汐力一致的谐和振动波(HT波), 多呈振幅逐日增大的单向波<sup>[17]</sup>, 如曲线 $D'-t_1$ 所示; 当 $\lambda$ 进一步减小(本构关系曲线进入 $\lambda < 0$ 的阶段), 输入信号周期 $T \approx T_0$ , 并从大于 $T_0$ 开始减少向 $T_0$ 趋近, 响应突然增大. 源区介质的速度与阻抗成反比, 在 $T=T_0$ (断层系统的固有周期)时, 阻抗的无功分量等于零, 此时源区介质的运动主要受力阻(阻抗的有功分量)控制, 孔隙流体的力阻通常甚小, 响应突然变化达到的极值<sup>[18,22]</sup>, 通常在临震前几天到几小时, 源区同时产生一对共振(RT)波: 通常为一升、一降(或相反); 一快、一慢的 2 个 RT 波, 其到时差( $\Delta t$ )与震中距成正比; 极值阻尼振荡对数衰减到原幅度(1/e)所花的时间, 为断层系统的固有周期 $T_0$ , 与断层长度(震级)有关. 如以 $D''-t_3$ 为时间轴的红色曲线所示.

从潮汐力谐振共振短临前兆模式图看出, 当发震断层失稳时(地震), 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”之后断层发生失稳, 在此阶段断裂带中的介质将随潮汐力而谐振

至共振. 从而产生微弱而清晰的与潮汐力有关的各种周期的 HRT 波(共振周期将等于系统——破裂断层的固有周期)从震中向外传播, 被抗电(磁)干扰的、主要反映孔隙中流体(溶液)运动(以 HRT 波波动形式)的 PS-100HRT 波台网所接收(参见图 3). 台网记录到这种波动时, 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的时、空、强的定量结果.

## 2 PS-100HRT 波接收网站及资料

(1) 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. 探索地电前兆, 在技术上遇到的主要困难是如何从强噪声中提取(地震)弱信号, 对地电阻率测量, 首先就是要在有各种电(磁)干扰的环境中准确地测定不含干扰的地电阻率(真)值, 然后才能探索地震前兆. 为克服电极极化不稳定、天然电磁场噪声的干扰, 特别是为克服随着社会的发展而日益严重的杂散电流的干扰,

赵璧如等<sup>[23]</sup>研制出抗干扰的PS-100 高精度大地电测仪器系统. 该系统将通讯中的码分多址(Code Division Multiple Access, 简称为CDMA)技术首次应用到地电测量仪器中, 借助“黑箱”概念, 对(伪随机)编码输入的时间序列及所测的输出时间序列进行卷积与反卷积运算, 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<sup>[23]</sup>. 中国计量科学研究院<sup>1)</sup>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, PS-100 系统对 0.01%级的标准电阻的测定结果<sup>2)</sup>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, 实现了高电(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有用信号<sup>[23]</sup>, 仪器具有提取HRT波信号的能力<sup>[18]</sup>.

(2) 台站与资料. 2004 年在川滇地区设立了 4 个 PS-100HRT 波接收网站: MN 台(28.532°N, 102.169°E)、HG 台(26.544°N, 101.928°E)、YM 台(25.690°N, 101.861°E)、LJ 台(26.837°N, 100.245°E), 探索HRT波短临地震前兆<sup>[24]</sup>. 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°的地震带上. 4 个台PS-100 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<0 的个别点, 实际观测精度仍优于 0.17%, 表明台站可以记录微小的HRT波波动前兆<sup>[18,24]</sup>.

每个台都做了电测深, 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, 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. 用极化稳定的铅板做探测地电场的电极. 仪器有供电转换

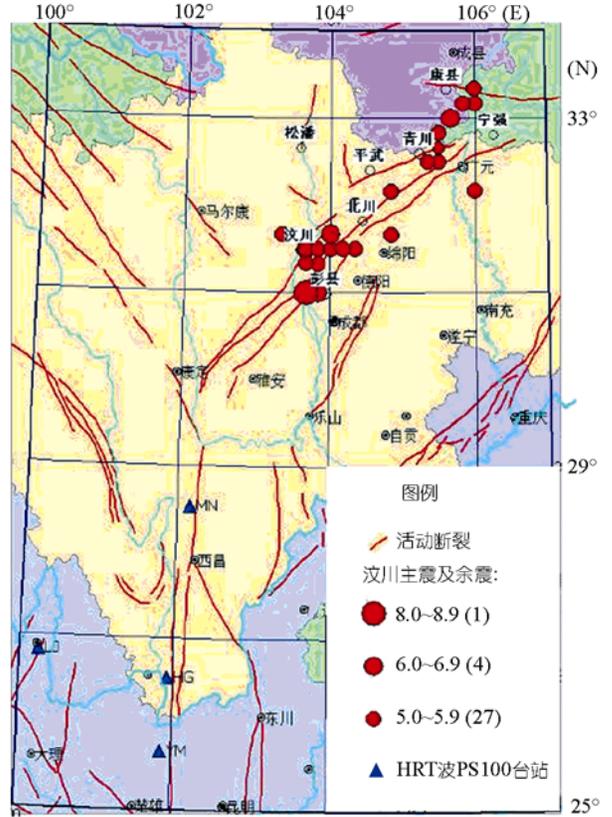


图 2 “PS-100HRT 波”接收网站位置和汶川 8.0 级地震及 5 级以上余震分布  
止于 2008 年 6 月 11 日

开关, 可在二个供电方向间切换, 台站为节约场地占用农田面积, 可以选用单方向供电, 而设 3 个测量方向, 有的台同一方向尚有长、短二个测量对比道, PS-100HRT 波接收网站可(连续)定时、同步测量地电阻率( $\rho_x$ )及地电场( $\Delta V$ )二种物理量(图 3(a)) 12 个测道的 5 min 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, 并贮存于数据库. 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

1) 中国计量科学研究院具有法定计量检定机构计量授权证书: (国)法计(2002)01001 号及中国实验室国家认可委员会(CNAL)认可证书: N0.L0502. 1999 年中国计量科学研究院代表中国在国际计量局(BIPM)签署了“国家测量标准及国家计量科学研究院出具的校准和测量证书互相承认协议”

2) 证书编号: DCcm2004-0012. 此证书所列校准和测试结果系中国计量科学研究院(NIM)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://kcdb.bipm.fr/BIPM-KCDB/AppendixC/search.asp?MET=EM> 查询

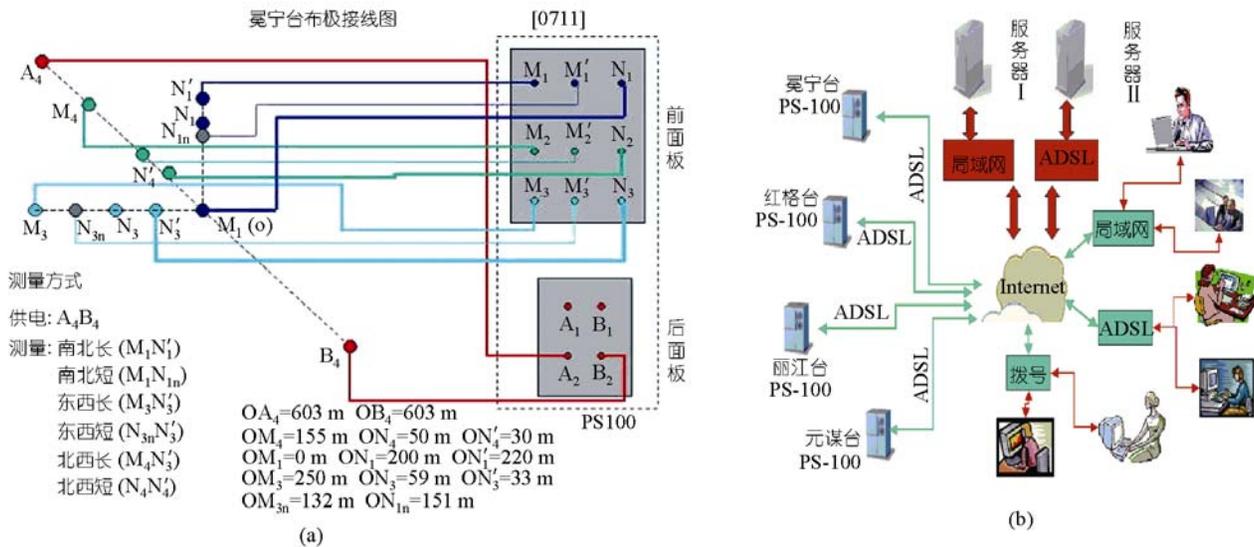


图 3

昊宁台 3 个方向各 6 个测道地电阻率、地电场电极布置图; PS-100 仪器 3 个完全独立的电位差数采单元, 和一个电流数采单元同步记录 3 个方向 6 个测道的地电阻率和地电场, 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. (b) PS-100“HRT”波接收站网络结构示意图; 网内时间采用 NTP 时间同步协议, 保证了多台 HRT 波的及时追踪对比; 服务器 I: 设在北京市地震局; 服务器 II: 设在中国地震局地球物理研究所

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(图 3(b)).

### 3 汶川 8.0 级地震的 HRT 波前兆及震前预测分析实况

图 2 给出 2004 年所建立的 4 个“PS-100HRT 波”接收网站, 其中 3 个台由于雷击仪器损坏、导线被偷、台站无维护经费等原因, 于 2007 年底以前先后停用, 在汶川地震前只有红格一个台仍在工作. 红格(HG)台距汶川 8.0 级地震(北京时间 2008 年 5 月 12 日 14 时)的宏观震中之一的北川县 640 km, 距其另一宏观震中附近的微观震中 465 km.

HG 台于震前半月至临震前(2008 年 4 月 30 日~5 月 12 日 5 时)记录到了汶川地震的 HRT 波短临前兆, 作者于临震前据 HRT 波及其短临预测模型求得的未来地震的时、空、强与汶川实发 8.0 级地震三要素一致, 其规律同以前其他强震震例相同; 与短临前兆模型吻合. 在临震前的 5 月 12 日 2 时至 6 时, 红格台更出现了幅度达 1%(超过平时观测标准偏差 10 倍)的特大地震即将发生的临震“预警”讯号.

据红格台 PS-100 仪器 5 月 6 日至 12 日凌晨 2~6 时 HRT 波的分析计算结果, 在震前十几小时已经得出: 5 月 12~13 日在以红格台为中心的 600~800 km 环带范围内将要发生 7.9~8.4 级地震的结果. 实际上, 5 月 12 日 14 时发生的汶川 8.0 级地震, 其中一个极震区(北川县)距红格台 640 km. 据此认为 HRT 波震兆是客观存在的. 我们非常痛心的是震前只有一个台在观测, 无法给出具体震中位置, 没能向职能部门报告. 图 4 和 5, 分别给出 8.0 级地震前半月、7 天和半日潮谱短期异常 HT 波图、临震时段的 RT 波图及对未来强震的震中距、震级, 及发震时间的分析计算结果(参见表 1).

从图 4(a)和(b)可见, HG 台 EW 道 8.0 级地震前出现了 HRT 的半月潮及连续出现 2 个周期约为 7 d(半月潮的一半)、幅度逐渐增大的波动. 震前十余小时, 5 月 12 日凌晨地电阻率持续下降约 1.0%, 超过平时观测标准偏差十余倍, 异常极为显著清晰. 从图 4(c)可见, 5 月 5 日前、后连续出现 2 个相同方向(向下)的半日潮, 根据图 1 中的曲线  $D''-t_2$ , 表明源区介质的本构关系开始进入  $\lambda \leq 0$  阶段.

从图 5(a)和(b)中看出: 8 级地震前 HG 台连续出

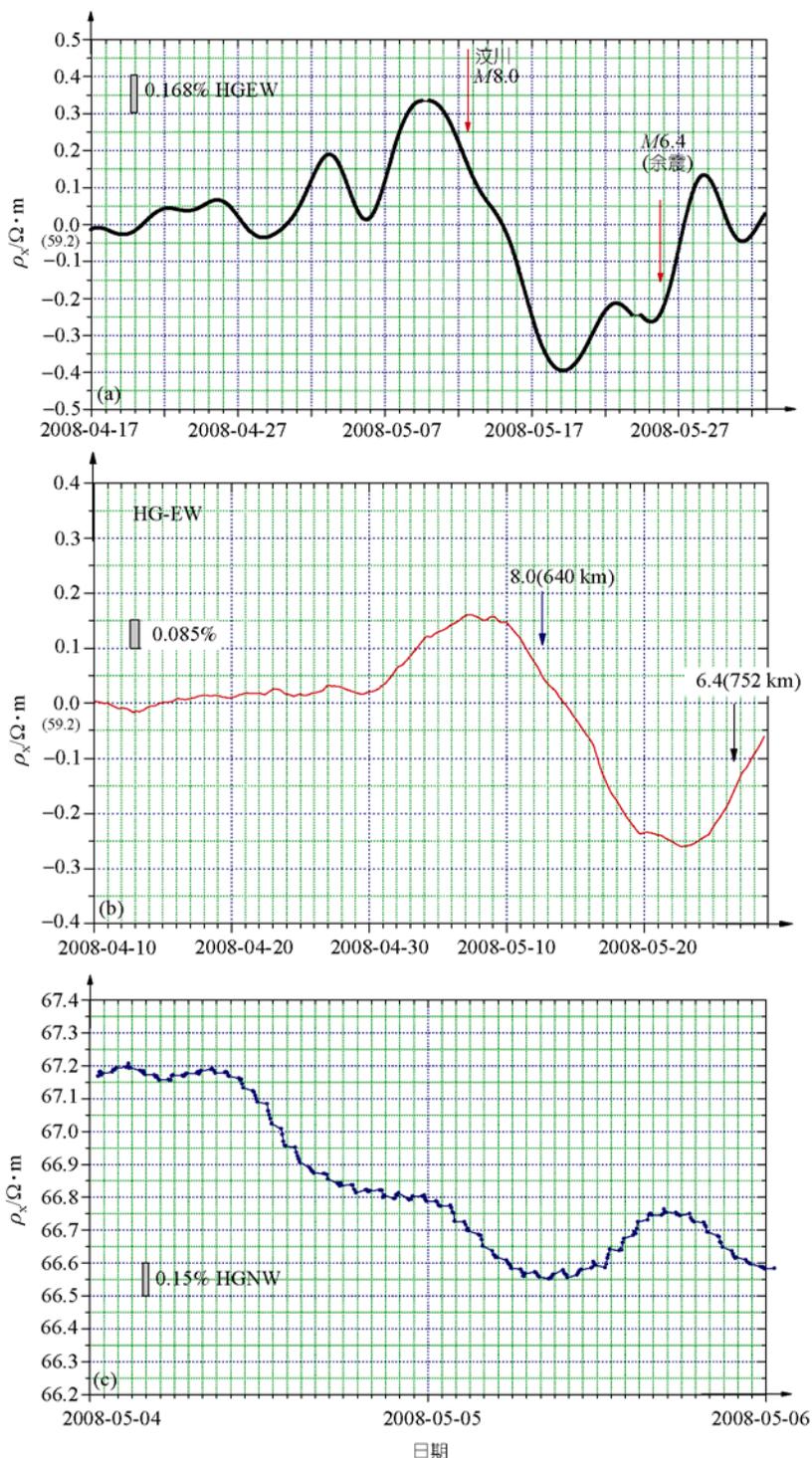


图 4 汶川 8.0 级地震的 HRT 波分析图

(a) 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震前 HT 波出现 7 天及半月潮谱; (b) 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震前 HRT 波半月潮波动前兆; (c) HG 台 NW 道 5 分钟值记录到显示震源体介质刚度进入  $\lambda \leq 0$  阶段(参见图 1 以  $D''-t_2$  为时间轴的曲线)的 HT 波图(二个连续向下的半日潮)

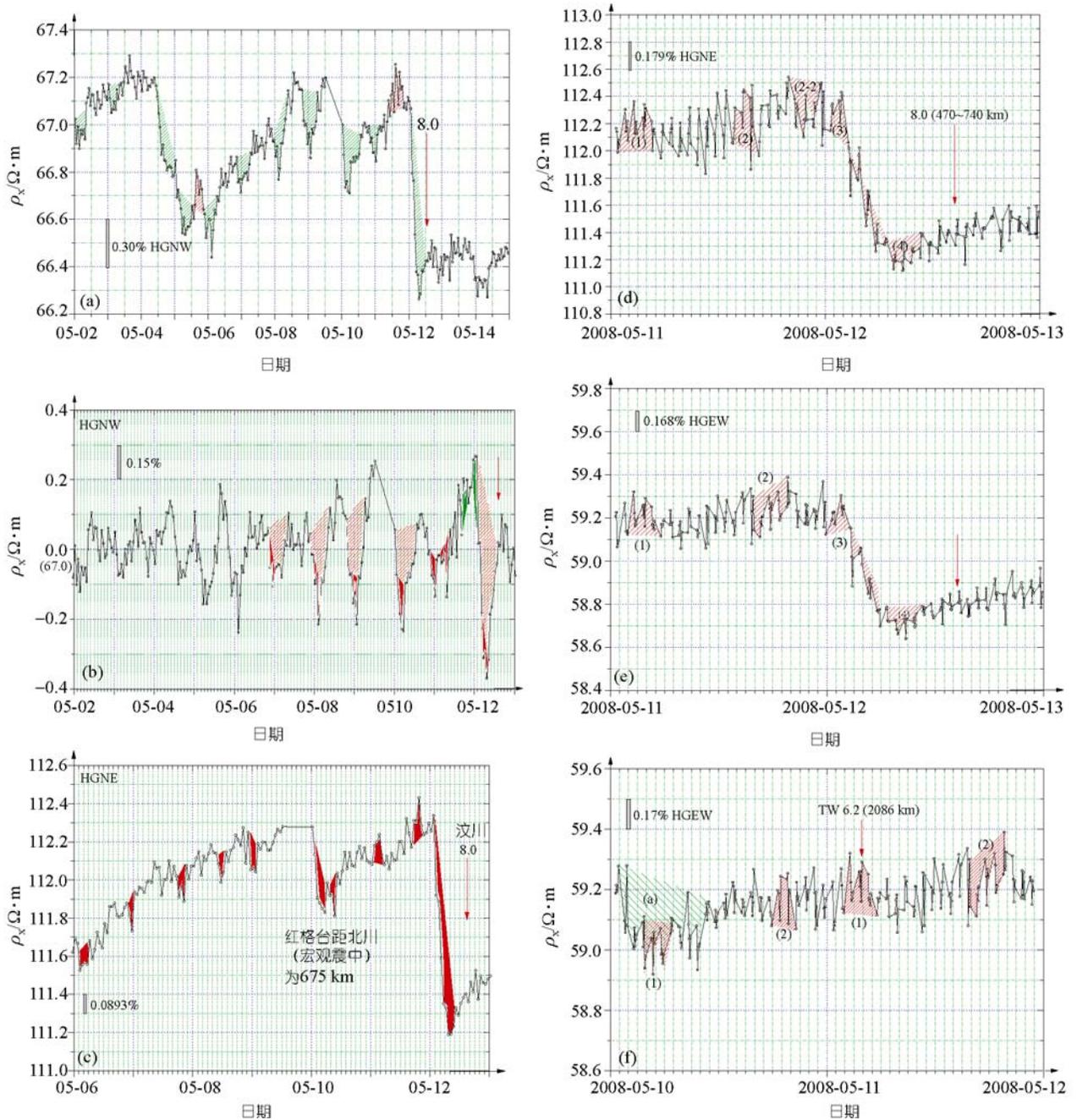


图 5 2008 年汶川 8.0 级地震红格台实测 HRT 波记录图

(a) 震前红格(HG)台北西(NW)道 HRT 波记录图; (b) 震前 HG 台 NW 道去长趋势 HRT 波记录图; (c) 震前红格(HG)台北东道(NE)HRT 波记录图; (d) 震前 HG 台 NE 向 HRT 波 5 分钟测值图(红色阴影部分为 8.0 级地震 RT 波), 利用共震波计算得到的未来地震的震中距和震级参见表 1; (e) HG 台 EW 道 HRT 波 5 分钟测值, 图中阴影为 RT 波(临震讯号), 利用 RT 波计算的未来地震的震中距和震级列于表 1; (f) 汶川 8 级地震前红格台 EW 道 RT 波记录图及震前对震级和震中距计算结果(参见表 1)的复制件; 该图记录只到 2008 年 5 月 11 日 22 时, 在大震前 5 月 11 日夜至 12 日凌晨 5 时得出(当时写在原图上)如下的分析意见: 2008 年 5 月 12~13 日前后, 下列地段将发生地震: (1)  $\Delta H = (2000 \pm 200)$  km,  $M = 7$ (5 月 11 日中国台湾发生 6.6 级地震); (2)  $\Delta H = 600 \sim 800$  km,  $M = 7 \sim 8$ , 5 月 12 日 14 时汶川发生 8.0 级地震, 距宏观震中之一的北川  $\Delta = 640$  km

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

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

a) 括号中的数字分别对应于图 5(d)~(f)中的标号

现幅度超过观测标准偏差数倍的、半日潮 HT 波, 震前数日半日潮波幅逐日明显加大, 其上叠加着 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 天, RT 波反向由平日的下降波转为上升的, 表明源区介质已处于刚度  $\lambda \leq 0$  的临震阶段. 震前十余小时, 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(分析结果参见表 1), 可成为强震的预警信号. 对比图 5(a)和(c)可见, HG 台 NE 道与 NW 道一致, 出现幅度逐日增大的 HT 波(如 5 月 9 日 NW 道幅度为 0.3%; 5 月 10 日, 0.5%; 5 月 12 日震前, 1.0%).

从图 5(d)和(e)5 分钟测值图可见, NE 与 EW 道临震前出现可对比的 RT 波(图中红色阴影部分), 根据 RT 波记录计算的震中距与震级结果参见表 1.

图 5(f)是震前 HG 台 EW 道 5 分钟值 RT 波(图中红色阴影部分)记录, 据此图于震前 5 月 11 日夜至 12 日晨 5 时得到了大震即将来临的结果(分析结果及分析意见, 当时标注在记录图上), 参见图 5(f)图题及表 1.

表 1 中所得地震三要素与实际发生地震吻合. 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 日临震前二个 RT 波波源到红格台的震中距为 555 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 255 km(810-555=255 km). 按断层长度与震级的统计关系<sup>[25]</sup>:  $M=3.3+2.1\log L$ , 求得震级为 8.4. 这与 HRT 波求得的震级(表 1)吻合,

与矩张量反演的结果<sup>[26]</sup>( $M_w=7.9\sim 8.1$ )一致, 表明 RT 波的客观性.

汶川地震前所记的 HRT 波同以前所记的其他震例(参见本文第 4 节)的 HRT 波的规律具有很好的一致性; 且都与潮汐力模式<sup>[17,18]</sup>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.

#### 4 四个 PS-100HRT 波接收网站记录的强震 HRT 波波动前兆震例

自 2004 年 5 月开始, 4 个 PS-100HRT 波接受网站所记录的国内外强震震例 20 余例, 下面仅分析几个典型震例.

(1) 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 9.0 级地震 HRT 波震例.

从图 6(a)可见, 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_w 9.0$  级地震前三个月 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, 从而表明震前三个月开始出现周期为半月、波幅度逐渐增大的 HT 波与 9.0 级地震的发生显著相关.

从图 6(b)可见, 12 月 24 日 0 时值反常处于低值, 不回返, 再次突然下降, 构成临震异常. 震前 4 天(22 日)开始出现明显 RT 波波动前兆. 震前 2 天(24 日)MN 台所记的 RT 共振波最为典型. 地电阻率急剧(尖锐)下降 2.9%, 经 14 h 突然上升, 变化幅度比测量标准偏差大 17 倍, 异常显著; 由到时差得震中距

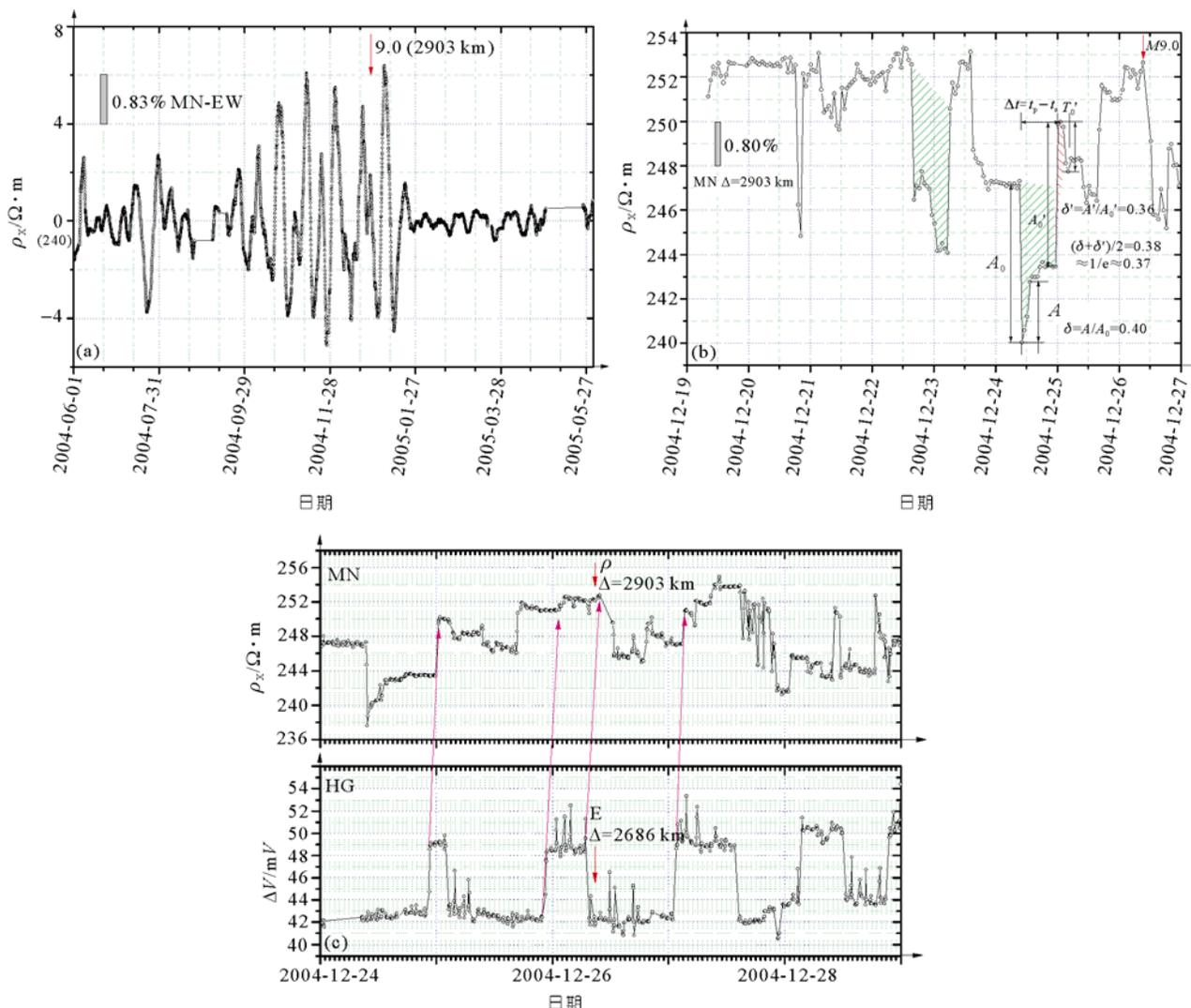


图 6 2004 年 12 月 26 日印尼苏门达腊 9.0 级地震 HRT 波震例

(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°E)前后冕宁台 EW 道 HRT 波记录图; (b) 2004 年 12 月 26 日印尼 9.0 级地震临震前冕宁台北西道 RT 波; (c) 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 min 值, 底部的是 HG 台地电场 5 min 值曲线

2898 km, 与实际震中距 2903 km 一致, 表明共振波来自 9 级地震的震源. 快波与慢波的初至幅度( $A_0$  和  $A_0'$ ) 衰减到  $(1/e)$  的时间段为固有周期  $T_0$ , 从图 6(b)求得  $T_0=6$  h, 据此可确定未来地震的震级为 9.1 级; 与实发地震参数一致. RT 波的快波使 MN 台处在即将发生地震的压缩区, 所以地震时地震 P 波初动为“+”号.

图 6(c)上部是 MN 台地电阻率 5 min 值, 底部的是 HG 台地电场 5 min 值. 图 6(c)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( $\Delta=2903$  km)比 HG 台的( $\Delta=2686$  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 3000 km 的二个台确实记录到具有传播特征的波动.

图 6(c)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(c)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(25, 26 日)断层或者(毛细管模型的)管中流体先于地震出现流动, 使管子的共振频率降低所致<sup>[22]</sup>.

(2) 2006 年 1 月 28 日班达海 7.6 级地震( $\Delta \approx 4680$  km)

从图 7(a)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 天急剧下降 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 4760 km. 与台站的实际震中距(4684 km)吻合.

(3) 2006 年 12 月 26 日中国台湾 7.2 级地震( $\Delta \approx 2013$  km)

从图 7(b)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 2070 km, 与实发震中距 2013 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.

(4) 2007 年 3 月 25 日日本 6.9 级地震( $\Delta=3358$

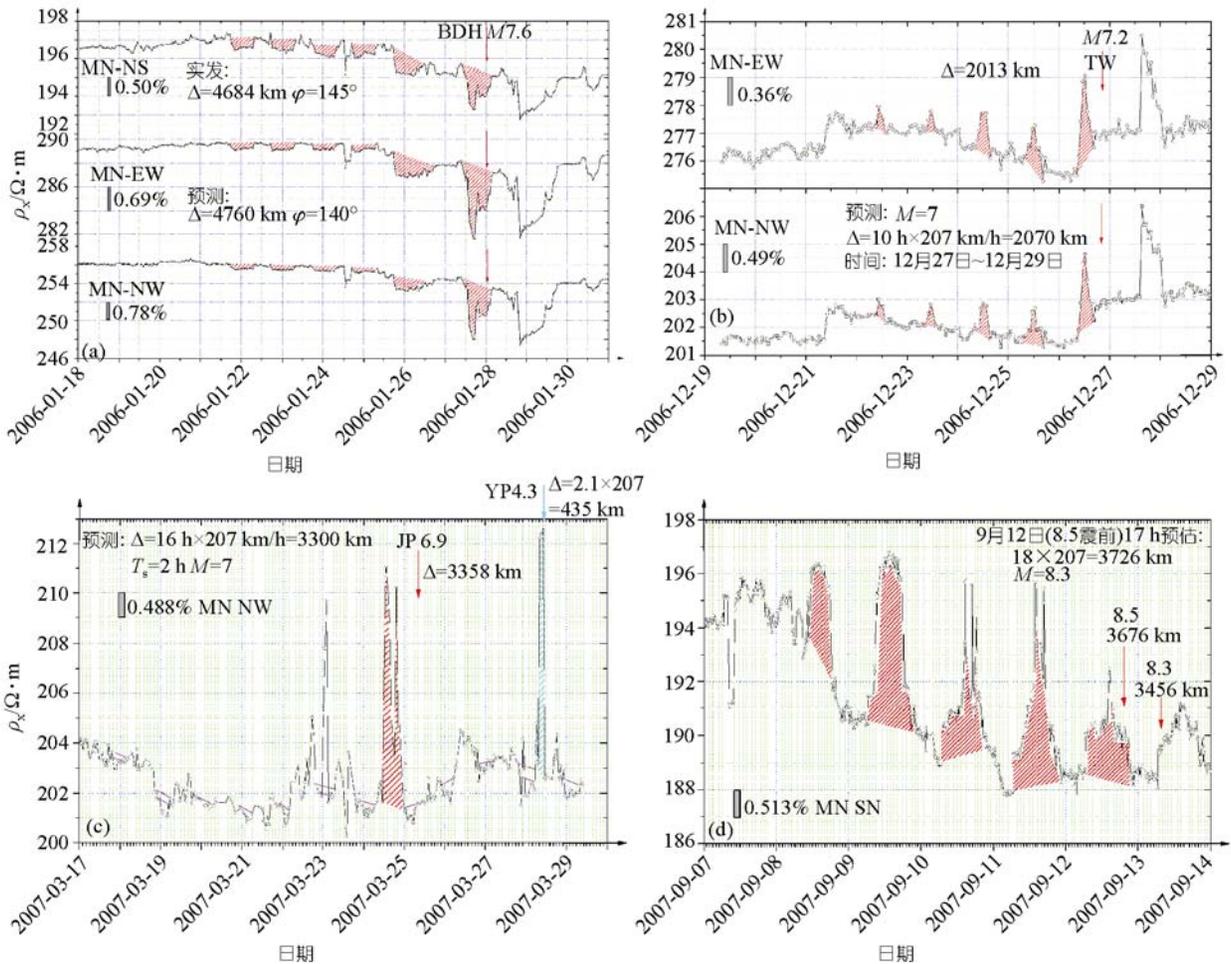


图 7

(a) 2006 年 1 月 28 日班达海 7.6 级地震(北京时, 2006-01-28, 00: 58: 50.5; 54°S, 128.1°E)临震前一周冕宁台三个道 HRT 波(阴影部分)幅度逐日增加; (b) 2006 年 12 月 26 日中国台湾 7.2 级地震(北京时 2006-12-26, 20:26:21; 21.826°N,120.538°E)前 HRT 波记录; (c) 2007 年 3 月 25 日日本 6.9 级地震(北京时 2007-03-25, 08:41:57; 37.275°N 136.603°E)前 MN 台( $\Delta=3358$  km)的 HRT 波记录; (d) 2007 年 9 月 12 日印尼 8.5 级地震(北京时 2007-09-12, 19:10:26; 4.520°S 101.374°E)前 MN 台( $\Delta=3676$  km)记录的 HRT 波震例

km) HRT 波震例

从图 7(c)可见, 日本 6.9 级地震前 MN 台记录到到时差为 16 h,  $T_0=120$  min 的 RT 波(图中阴影部分), 据此求得的震中距和震级与实发的地震参数十分接近.

(5) 2007 年 9 月 12 日印尼 8.5 级地震( $\Delta=3677$  km) HRT 波的震例

从图 7(d)可见, 印尼 8.5 级地震前 5 天 MN 台记录到幅度逐日增大的 HRT 波. RT 波的到时差为 18 h,  $T_0$  为 227 min(图中阴影部分), 据此求得的震中距和震级与实发的地震参数吻合.

5 HRT 波波动前兆与未来地震震中距及震级的关系

(1) 震中的预测分析. 从图 8(a)得 RT 波虚波速度  $V_v=(V_{快} \times V_{慢}) / (V_{快} - V_{慢})$ ,  $V_v=207$  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.

(2) 震级的预测. 分析 RT 波幅度的阻尼衰减情况, 可得断层系统的固有周期  $T_0$ (参见图 6(b)). 统计得到其衰减时间段( $T_0$ )与未来地震震级成对数相关:  $M=4.14 \times \log(T_0) - 1.486$  (图 8(b)).

6 结论与实现准确短临地震预报可能性的讨论

设在中国南北地震带上的 4 个 PS-100 台站, 在几次强震(包括 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震及 2004 年 12 月 26 日印尼  $M_w$ 9.0 级地震)前, 已记录到

HRT 波(地电阻率与地电场)波动前兆, 它们之间有很好的 consistency, 与起潮力谐振共振波模式吻合. 发现震前 HRT 波长周期分量( $T_0=1\sim 6$  h), 在地壳中传播很远(可达数百乃至数千公里). 震前记录的 RT 波的到时与震中距成正比, 分析所记 RT 波得到的断层固有周期与即将发生地震的震级有关. 有证据表明, HRT 波是从震源区辐射的. 当源区介质在刚度  $\lambda \leq 0$  阶段, 特别是输入信号周期  $T \rightarrow T_0(T=T_0)$  时, 孔隙流体先于断层破裂的运动(小的扰动)所致.

自 1966 年在邢台实验场把物探电阻率法经变种引进地震预测探索研究以来, 总结出一套实用的观测技术, 形成了有别于前苏联、美国、日本的地电阻率法 [27-29], 经推广中国地电台最多时曾发展到 120 多个, 成为中国几种主要前兆手段之一. 记录发现了世界上第一个强震震例——唐山 7.8 级地震的地电阻率前兆规律 [30-32]. 对其干扰因素从成因上进行了分类, 分别找出排除或压低干扰的方法 [33,34]. 开展了现场实验, 把岩石电阻率与孔隙度关系的 Archie 经验定律扩展到受力情况, 得出了受力时电阻率变化与岩石孔隙(流体)结构指数有关的前兆机制, 从理论上给出了受力条件下, 岩石孔隙(流体)结构指数  $n$  不再是常数, 而是应力-应变  $\epsilon$  的幂指数函数, 所以所测地电阻率  $\rho_x$  极灵敏地随孕震过程中微小的应力-应变的变化而变化 [20,21,35]. 探讨了地电阻率各向异性的计算方法 [36]. 特别是发现了与起潮力有关的地电阻率、韵律及快急始慢衰减的特殊图形等短临前兆 [37-45]. Qian 等 [17] 根据赵璧如提议把孕震过程、产生前兆的机理视

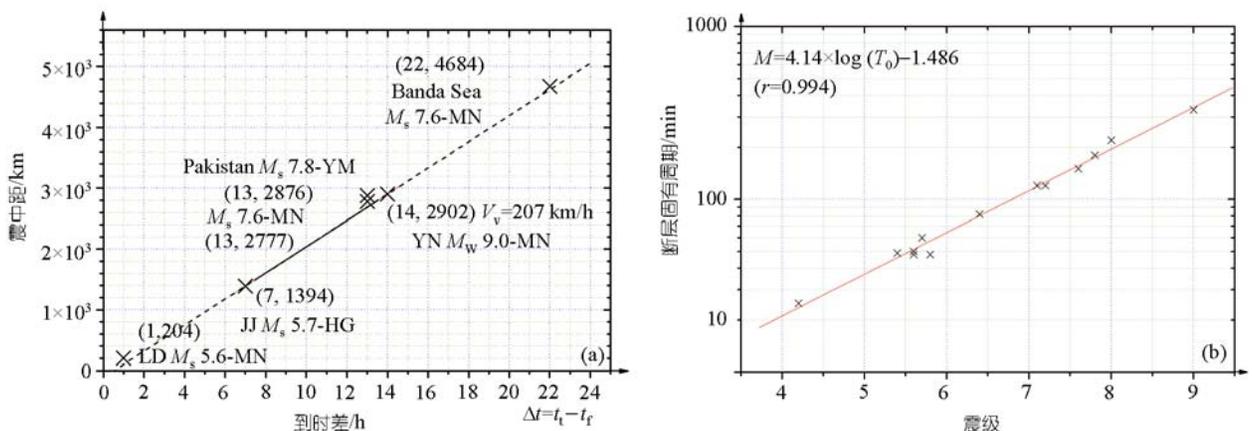


图 8

(a) 震前 RT 波虚波速度(台站震中距与到时差的关系)曲线; (b) HRT 波法发震断层固有振动周期  $T_0$  与震级  $M$  的关系曲线,  $T_0$  单位: min

为“黑箱”, 于 1990 年提出了地震潮汐力谐振短临预测法. 本世纪初赵璧如等<sup>[23]</sup>研发了抗电磁干扰的地电阻率观测技术, 使仪器具有了记录 HRT 的能力. 2003 年底在给中国地震局的 2 个内部报告指出, 南北地震带中、南段 2~3 a 内有发生特大地震的可能<sup>[46]</sup>, 为此中国地震局特批在川滇地区布设 4 个 PS-100HRT 波记录站, 进行短临预报跟踪及探索 HRT 波短临预测法的研究<sup>[24]</sup>. 所布设的 4 个记录站(最大 $\Delta = 2900$  km)于 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 $M_w 9.0$ 级海啸地震前记录到从震源区传来的 HRT 波<sup>[18]</sup>, 并在其后的近 20 次强震前, 记录到 HRT 波. 现象的重现, 表现出的规律有很强的一致性. 在 2008 年汶川 8.0 级地震前, 4 个 PS100HRT 波记录站中唯一仍在工作的 HG 台( $\Delta = 465$  km), 震前记录并发现了汶川地震的 HRT 波短临前兆, 所记现象与规律与 HRT 波模型及以前所记的 HRT 波震例具有相同的规

律性. 通过中国 40 年的地震预测预报探索研究<sup>[47,48]</sup>, 尤其是中国地震局特批川滇短临预测项目的实施, 及近年 HRT 波的实际记录, 有力地表明地震特别是强震, 是有前兆的, 是可以预测、预报的. 在可预见的将来, 实现短临地震预报是可行的.

对于我们所研究的 HRT 波地震短临预测新方法, 5 年来已记录到显著震例近 20 例, 其中包括汶川 8.0 级地震、2004 印尼苏门答腊  $M_w 9.0$  级(海啸)大地震. 根据震前短临前兆分析(预测)地震三要素的结果与实发地震的参数基本一致. 我们认为如果能进一步增设“PS-100 HRT 波”接收台网, 不断进行探索研究, 进一步证明模型的正确性并解决不同地震 HRT 波相互叠加等问题, 可以在地震 1~2 月到数小时前向国家决策部门提供具有实用价值的信息, 为中国首先突破和解决地震短临预报这一世界难题贡献力量.

**致谢** 观测资料取自中国地震局 PS-100HRT 波网站, 陈运泰院士、许绍燮院士、马瑾院士、梅世蓉教授、郭增建教授一直关怀和热情指导本项研究; 两位审稿专家的审稿意见对提高文章质量有很大帮助, 在此一并致谢.

## 参考文献

- 1 Sibson R H. Condition for fault-valve behavior. In: Knipe R J, Rutter E H, eds. *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. London: Geological Society, 1990. 15—28
- 2 Park S K, Johnston T R, Morgan F D, et al. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms. *Rev Geophys*, 1993, 31(2): 117—132<sup>[DOI]</sup>
- 3 Byerlee J. Model for episodic of high-pressure water in fault zones before earthquakes. *Geology*, 1993, 21: 303—306<sup>[DOI]</sup>
- 4 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, Theme 2: Tectonophysics*. Denver, 1974. 243—317
- 5 Madden T R. Electrical measurement as stress-strain monitors. *Proceedings of Conference VII, Stress and Strain Measurements Related to Earthquake Prediction*. USGS Open File Rep, 1978. 301—374
- 6 Brace W F, Walsh J B, Frangos W F. Permeability of granite under high pressure. *J Geophys Res*, 1968, 73(6): 2225—2236<sup>[DOI]</sup>
- 7 Morrow C, Brace W F. Electrical resistivity changes in tuffs due to stress. *J Geophys Res*, 1981, 86: 2929—2934<sup>[DOI]</sup>
- 8 Wang C Y. Electrical resistivity changes in during frictional sliding and fracture. *Pure Appl Geophys*, 1978, 116(4-5): 717—731<sup>[DOI]</sup>
- 9 Fitterman D V. Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half space. *J Geophys Res*, 1979, 84: 6031—6040<sup>[DOI]</sup>
- 10 Fenoglio M A, Johnston M J S, Byerlee J D. Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault sources: application to the Lama Prieta ULF emissions. *J Geophys Res*, 1995, 100(B7): 12951—12958<sup>[DOI]</sup>
- 11 Corwin R F, Morrison H F. Self-potential variations preceding earthquakes in Central California. *Geophys Res Lett*, 1977, 4: 171—174<sup>[DOI]</sup>
- 12 Mizutani H. Electrokinetic phenomena associated with earthquakes. *Geophys Res Lett*, 1976, 3(7): 365—368<sup>[DOI]</sup>
- 13 Sobolev G A. Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquake. *Pure Appl Geophys*, 1975, 113: 229—235<sup>[DOI]</sup>
- 14 Varotsos P, Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquakes. *Tectonophys-*

- ics, 1984, 110: 73—98[DOI]
- 15 黄清华, 刘涛. 新岛台地电场的潮汐响应与地震. 地球物理学报, 2006, 46(6): 1745—1754
- 16 方崇智, 萧德云. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1998. 1—562
- 17 Qian F Y, Zhao Y L, Xu T C, et al. A model of an impending-earthquake precursor of geoelectricity triggered by tidal forces. Phys Earth Planet Int, 1990, 62: 284—297[DOI]
- 18 赵玉林, 赵壁如, 钱卫, 等. 印尼  $M_w 9.0$  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 波法进行短临地震准确预测可能性的探讨. 国际地震动态, 2006, (8): 6—21
- 19 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础. 中国科学院工程力学研究所, 译. 北京: 科学出版社, 1979. 1—690
- 20 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. 地震学报, 1990, 12(1): 87—93
- 21 Zhao Y L, Qian F Y, Stopinski W. *In situ* experiments and relationship between the electrical resistivity changes and the strain. Acta Geophys Polon, 1990, 38(3): 229—243
- 22 Morse P M, Ingard K U. Theoretical Acoustics. New York: McGraw Hill, 1968
- 23 赵壁如, 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. 地球物理进展, 2006, 21(2): 675—682
- 24 Zhang H K, Zhao B R, Zhao Y L, et al. PS100 anti-interference electrical observation system and its application to earthquake prediction study. Phys Chem Earth, 2006, 31: 172—181
- 25 郭增建, 秦保燕, 徐文耀, 等. 震源孕育模式的初步探讨. 地球物理学报, 1973, 16: 43—48
- 26 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(10): 1186—1194
- 27 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. 地球物理学报, 1978, 21(3): 181—190
- 28 Zhao Y L, Qian F Y. Geoelectric precursors to strong earthquakes in China. Tectonophysics, 1994, 233: 99—113[DOI]
- 29 赵玉林, 钱复业, 卢军. 电测量在中国地震预报中的应用. 地震地质, 2001, 23(2): 277—284
- 30 钱复业, 赵玉林, 于谋明, 等. 地震前地电阻率异常变化. 中国科学 B 辑, 1982, (9): 831—839
- 31 Gu G X. On the strategy of earthquake prediction. In: Claude J A, Coulomb J, eds. Source Mechanism and Earthquake Prediction: National Center for Scientific Research, Paris, 1980. 99—107
- 32 Qian F Y, Zhao Y L, Lu J. Georesistivity precursors to the Tangshan earthquake of 1976. Anelli di Geofisica, 1997, XL(2): 251—260
- 33 钱复业, 赵玉林. 地电阻率季节干扰变化分析. 地震学报, 1987, 9(3): 289—302
- 34 Lu J, Qian F Y, Zhao Y L. Sensitivity analysis of the Schlumberger Monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China. Tectonophysics, 1999, 238: 397—405[DOI]
- 35 赵玉林, 钱复业. 原地电阻率变化的实验. 地震学报, 1983, 5(2): 217—284
- 36 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
- 37 赵玉林, 钱复业. 唐山地震前后形变电阻率的脉冲. 地球物理学报, 1979, 22(1): 25—31
- 38 赵玉林, 钱复业. 唐山地震前后自然电场的周期变化. 地震学报, 1982, 4(3): 264—272
- 39 Zhao Y L, Li Z N, Qian F Y, et al. Synthetic criterion for judging the transition geoelectric precursors from medium-term stage to short-term/imminent stage. J Earthq Predict Res, 1996, 5(4): 594—601
- 40 赵玉林, 钱复业. 地电场短临预报方法研究. 地震, 2005, (2): 33—40
- 41 Zhao Y L, Zhao B R, Qian F Y. Electrical Streaming Potential Precursors to catastrophic earthquakes in China. Anelli di Geofisica, 1997, XL(2): 241—250
- 42 Qian F Y, Zhao Y L, Teisseyre R. Periodic anomalies of the telluric electric field before the Tangshan earthquake and a model of electrokinetic precursor triggered by tidal forces. Acta Geophys Polon, 1990, 38(3): 245—256
- 43 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. 地震, 1990, (3): 33—38
- 44 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). 华北地震科学, 1996, 14(3): 1—9
- 45 张洪魁. 地电幕式变化及其与地震的关系. 石油地球物理勘探, 2004, 39(增刊): 90—95
- 46 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). 国际地震动态, 2008, 8: 1—12
- 47 钱复业, 赵玉林, 陈英方, 主编. 地震预测——地电方法论文集. 福州: 福建科学技术出版社, 1985. 1—321
- 48 钱复业, 卢振业, 丁鉴海, 等. 电磁学分析预报方法. 北京: 地震出版社, 1998. 1—227