

周 挚, 山秀明, 张 立等. 基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮的地震前兆信息. 地球物理学报, 2008, 51(3): 836~844
Zhou Z, Shan X M, Zhang L, et al. The gravity tide of Kunming & Xiaguan based on the HHT. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 836~844

基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮 的地震前兆信息

周 挚¹, 山秀明², 张 立^{3,1}, 傅容珊³, 梁 虹⁴, 全海燕⁵

1 云南省地震局, 昆明 650224

2 清华大学电子工程系, 北京 100084

3 中国科技大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

4 云南大学信息学院, 昆明 650091

5 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650051

摘 要 在重力固体潮地震前兆分析中引入 HHT 时频分析新方法, 结合 HHT 的优越性、固体潮的特点和地震的非平稳过程特性, 设计重力固体潮地震前兆分析的瞬时频率特征参数; 以相应理论计算值作为参照背景, 研究固体潮的震前变化特征. 昆明、下关的震例分析表明, 的确存在瞬时频率特征参数的震前变化, 且具短期、同步正异常特征; 瞬时频率特征参数具有明确的物理意义, 其震前变化反映了地震非平稳过程对理论重力固体潮的影响.

关键词 重力固体潮, HHT, 瞬时频率, 地震前兆

文章编号 0001-5733(2008)03-0836-09

中图分类号 P315

收稿日期 2007-04-29, 2008-02-21 收修定稿

The gravity tide of Kunming & Xiaguan based on the HHT

ZHOU Zhi¹, SHAN Xiu-Ming², ZHANG Li^{3,1}, FU Rong-Shan³, LIANG Hong⁴, QUAN Hai-Yan⁵

1 Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

2 Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

4 Information School, Yunnan University, Kunming 650091, China

5 Information Engineering and Automatism School, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China

Abstract HHT time-frequency method is introduced in new analysis of gravity tide. Based on superiority of HHT, the character of gravity tide and nonstationary processes of earthquake, we design characteristic parameters of instantaneous frequency of gravity tide. And we refer to corresponding theoretical values of gravity tide in the course of earthquakes analysis. The results of Kunming and Xiaguan show that there are some premonitory changes in the characteristic parameters of instantaneous frequency before earthquakes, which bear short-term and synchronization characters. The characteristic parameters of instantaneous frequency have clear physical significance. These premonitory changes express that the nonstationary processes of earthquake influenced the observation of stationary processes of gravity tide.

Keywords Gravity tide, HHT, Instantaneous frequency, Earthquake premonition

基金项目 国家自然科学基金项目(40774032)、“十五”国家科技攻关项目(2004BA601B01-01-04)、云南省自然科学基金项目(2003D0084M)资助.

作者简介 周 挚, 男, 1954 年生, 高级工程师, 主要从事数字信号处理与地球物理研究工作. E-mail: z-zhou@mails. tsinghua. edu. cn

1 引言

固体潮是唯一能够预先计算出的地球物理现象^[1]。一百多年来,由 Kelvin 引进的对比研究法则一直为国内外固体潮研究所遵循。这些潮汐分析通常是将所观测到的现象,与根据地球模型所计算出来的相应结果进行对比,求出仪器精度范围内所记录到的每个分波的振幅比和相位差,据此改进主要与地球液态地核有关的地球模型。目前趋向于根据观测事实和已经积累到的地球内部结构知识建立正常固体潮模型,用观测固体潮对比正常固体潮得出固体潮异常,进而研究固体潮异常的时空分布规律。国际上近年来在潮汐模拟理论研究方面处于领先地位的分别是以比利时皇家天文台的 V. Dehant 博士、德国科学研究中心的汪荣江博士、中国科学院测量与地球物理研究所的李国营博士所领导的三个研究小组^[2]。固体潮观测方面,中国地震局已在全国范围内建立了固体潮汐形变监测系统,共有 56 个台站、四类观测仪器(重力、地倾斜、体应变、钻孔应变)进行长期连续的观测,已积累大量的连续观测资料;中国科学院自 20 世纪 80 年代中期引进国际最先进的 TT70 型超导重力仪以来,已积累了 10 多年的高精度连续观测资料。目前国际地球潮汐中心推荐的标准潮汐分析方法有 Venedikov 调和分析方法和 ETERNA 调和分析方法。用不同的调和分析一般都能得出相当一致的结果^[3]。调和分析是一种基于 Fourier 变换、把观测数据序列分解成不同周期潮波分量的处理方法。而 Fourier 变换是用无穷区间的正弦波基函数所定义的一种整体变换,仅适用于分析频率不随时间变化的平稳信号、适用于对信号进行全局分析,不适用于分析频率随时间变化的非线性非平稳信号、不适用于对信号进行局部分析。

近年来发展起来的 Huang-Hilbert Transformation(HHT)是一种新的非线性非平稳信号处理方法^[4]。通过 HHT 对信号进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD),能有效地把各种频率成分以固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)形式从中分离出来。再对 IMF 序列进行 Hilbert 变换,可得到包含时间、频率、振幅的三维离散时频谱,它提供了非常清晰的局部细节性时频特征。HHT 方法具有较好的客观性与自适应性,适合于描述具有非线性非平稳变化特征的信号。在地球物理学领域已有初步应用^[5~7]。

本文在重力固体潮分析中引入 HHT 时频分析方法。结合 HHT 的优越性、固体潮的特点和地震的非平稳过程特性,设计提取地震前兆信息的特征参数;以相应的理论计算值作为对比背景,研究瞬时频率特征参数的震前变化特征,捕捉地震前兆信息。有关瞬时能量特征参数的震前变化研究另文讨论。

2 HHT 方法

HHT 由经验模态分解和 Hilbert 变换两部分组成:首先将原始信号分解成一组本征模态函数(IMF),然后对本征模态函数进行 Hilbert 变换。

2.1 经验模态分解

一般的实际信号常常是复杂信号,不一定满足 IMF 条件。故 Norden E. Huang 创造性地提出了一个假设:任何信号都是由一些不同的 IMF 组成;任何时候,一个复杂信号都可以包含多个 IMF 信号;如果模态之间相互重叠,便形成复合信号。在此基础上,Norden E. Huang 进一步指出,可以用 EMD 将 IMF 筛选出来^[4]。筛选的基本思想和步骤见文献[4,8]。筛选后,原始信号可由有限个 IMF 以及一个剩余分量(趋势项)之和表示。

由于每一个 IMF 代表一组特征尺度的信号,因此筛分过程在本质上是复杂信号分解为不同特征波动的叠加。

2.2 Hilbert 变换

Hilbert 变换是信号检测理论研究和通信工程应用中的一个重要工具。通过 Hilbert 变换,可以在不造成信息损失的前提下,将一个实信号构造成一个复信号(解析信号),使研究实信号的瞬时包络、瞬时相位和瞬时频率成为可能。

将 Hilbert 变换应用于 IMF,使之生成解析信号。然后计算出瞬时频率,进而求出 Hilbert 时频谱(亦称 Hilbert 幅值谱)和 Hilbert 边际谱^[4,8]。

3 频率分化现象的地震前兆分析思路

虽然 Hilbert 时频谱直观地显示了重力固体潮的幅度-频率随时间变化的情况,但从提取地震前兆信息的角度看,HHT 变换结果所展示的瞬时频率和瞬时幅值随时间变化的三维分布中,很难看出相关地震的直观异常表现^[8]。这说明简单地用瞬时频率和瞬时幅值作为分析地震前兆的特征参数难以达成目标。需要在一定的物理思想指导下,变通使用

HHT,探索适用的特征参数^[3].

机械结构出现损伤时的频率分化现象给我们以有益的启示.研究表明:正常振动信号的能量分布相

对集中,而故障振动信号的能量则向高频和低频两端扩散^[9~14].见图1.

浅源地震是地壳介质在应力作用下发生快速脆

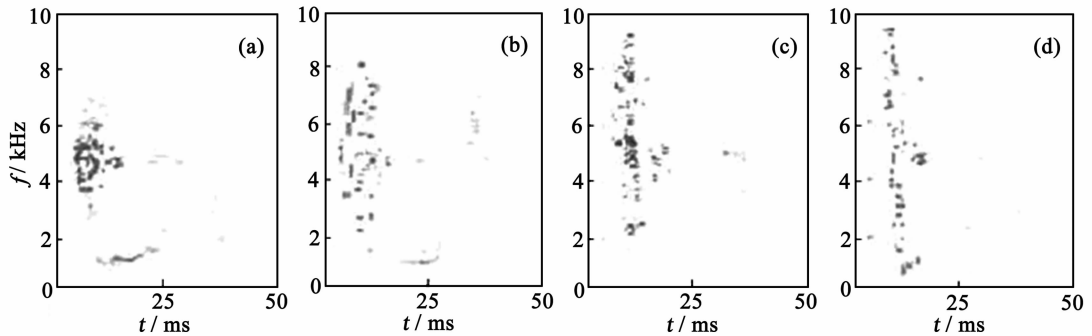


图1 柴油机缸盖振动信号的时频谱(正常态与故障态的对比)^[10]

Fig. 1 Time-frequency spectra of the vibration signals of a diesel engine cylinder head (the natural as compared with the broken-down)^[10]

性破裂的结果.岩石破裂实验和地震物理观测均表明,地震破裂过程也存在类似机械结构损伤的频率分化现象^[15~37].

Ohnaka等在岩石单轴压缩实验中发现岩石接近破坏时低通频段AER(声发射率)增长快于高通频段AER^[15].臧绍先等发现岩石破坏前,高频通道的AER增长快于低频通道的AER^[16].Xu等研究岩样破裂过程的多点应变变化,发现主破裂前的各点应变不仅具趋势性变化特征,而且同时出现突发扰动^[17].潘长良等研究了单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征^[18].结果表明:加载过程中,应力达到一定水平时,声发射数发生突跳;声发射频谱由低频向高频发展,到一定应力水平后基本保持稳定,而能量则由低频向高频集中.李世愚、唐林波等的声发射实验表明,随着微破裂的集结和裂纹的扩展,辐射波频谱向低频移动^[19~21].王赟赟等在岩石单轴压缩实验中发现大破裂来临之前的低频(长周期)事件与地震前驱波现象十分相符^[22].李正光等在岩石剪切破坏实验中,发现大破裂前也存在高频脉冲和低频波^[23].

李建国等研究了地声观测后认为,拾震器固有频率为1 Hz的微震仪所记录的地震仅仅是岩石破裂辐射的弹性波低频成分,地听器接收到的地声则是同一事件的弹性波高频成分^[24].陈德福等注意到西昌43-8测点短周期金属水平摆倾斜仪的震前高频异常:1976年11月7日盐源6.9级地震前57 h,连续记录出现曲线加粗的高频脉动现象^[25].谢觉民等注意到易县台伸缩仪的震前高频异常:大同阳高

6.1级地震前8 h,记录出现了前所未有的高频脉冲式扰动,持续约16 h^[26].王贤仁、许昭永等注意到大地震前地倾斜仪出现大量的高频扰动,震后扰动消失;无论是金属摆地倾斜仪、石英摆地倾斜仪,还是浮子水管地倾斜仪,都有这种影响;更换仪器后仍然存在高频扰动^[27~29].李瑞浩等在研究滇西试验场重力固体潮观测与地震的关系时,注意到下关台重力固体潮观测的震前高频异常:1988年11月6日澜沧耿马7.1级地震前8 h,未经滤波的记录曲线明显变粗,约10 mm,大约是正常记录的5倍之粗^[30].刘万琴等基于数字化地震记录分析了3次破坏性矿震的震源参数和断层面解,发现井下近场记录不仅有高频振动,而且有低频振动^[31].石耀霖注意到通海7.7级大地震的前一天,水准仪气泡漂来漂去,无法调平^[32].郝晓光等分析了在中国南极中山站重力仪记录到的高频扰动,脉动周期为3 min左右,持续53 h;前后共6次出现扰动现象,原因不明^[33].苏昉等观测到强地震前的次声波^[34].范桂英等注意到2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震前10天,水管倾斜仪记录有高频脉冲,高频脉冲表现出清晰的阶段性和规律性,震后消失^[35].姜朝松等记录到高频火山地震^[36].夏雅琴等观测到印尼大地震(2004年2月26日9.0级地震、2005年3月29日8.7级地震、2005年5月17日7.1级地震)的震前次声波^[37].

岩石破裂实验和地震物理观测均表明频率分化现象是一种客观存在.地震过程中频率特征点出现

随时间变化的频率分化现象,有希望携带有地震前兆信息.

4 固体潮瞬时频率特征参数的设计

归根结底,地震事件是发生在地质体中的力学过程.故重力固体潮不仅是地球物理观测的重要手段,而且是地震成因、地震前兆与地震预报研究的重要内容.引潮力周期性地长期作用于地球,地球的周期性受迫运动将产生巨大的潮汐应变能;而实际地球接近黏弹性体,引潮力所转化的应变能将有一部分在地幔和地壳中被消耗,或者在摩擦过程中转化成热能,或者在地幔介质的力学特征不连续处被转换成构造应变能^[38,39].因此地震孕育过程中的频率变化和能量变化备受关注.所以有必要从三维时频空间对地震影响重力固体潮的非线性非平稳过程加以分析.重力固体潮的观测对象是重力场的时间变化.可以依据地表任一点的固体潮理论值,对比分析相应的固体潮观测值;理论值提供了一个平稳过程的分析背景;地震孕育过程是一个非平稳过程,它叠加在平稳过程的背景上.这就是固体潮地震观测的物理本质所在.我们结合 Huang-Hilbert 变换的优越性、固体潮的特点和地震的非平稳过程特性,同时以相应的理论计算值作为对比背景,设计提取地震前兆信息的特征参数.

4.1 重力固体潮分析的特征参数

二维边际谱反映了考虑区间内重力固体潮的实际频率成分及其在该区间能量(振幅)的大小.为了达到短临地震预报的目标,这个区间应设计得尽可能小.考虑到重力固体潮分解后的主要成分是半日波和日波,且其中的日波可能会在 24 小时左右波动,故 48 小时肯定能包含至少一个完整的日波周期.所以这个区间以两天为宜.在两天区间的边际谱中,无论是日波或半日波,都可以确定其下截止频率和上截止频率,可称之为(日波或半日波的)低端频率和高端频率;由此可得到(日波或半日波的)带宽和中心频率.所以边际谱中与瞬时频率有关的分析参数是:半日波频段低端频率、半日波频段高端频率、半日波频段中心频率、半日波频段带宽、日波频段低端频率、日波频段高端频率、日波频段中心频率、日波频段带宽.

4.2 重力固体潮地震前兆分析的特征参数设计

基于瞬时频率的特征参数可用于描述重力固体潮,但直接用这些参数与地震作对应分析,则比较困

难.此时,重力固体潮的理论计算值可以为我们提供一个平稳过程的参考背景;取重力固体潮的理论值作为输入,用 HHT 计算出其相应特征参数.然后用观测值的 HHT 计算结果作为分子,用理论值的 HHT 计算结果作为分母,其比值随时间的变化就可以反映出地震(非平稳过程)对理论重力固体潮(平稳过程)的影响.

设计地震前兆分析的瞬时频率特征参数有两类波(半日波、日波)的 4 种比值:低端频率比、高端频率比、中心频率比、带宽比.这些特征参数并不都是线性独立的,但由于这一工作从未有人做过,所以我们选取这些参数进行尝试,希望从中找出对地震前兆敏感的特征参数.

5 震例分析

5.1 昆明重力固体潮的震例分析

选取昆明基准地震台重力固体潮观测资料,通过计算对瞬时频率特征参数加以分析.

1995 年 10 月 24 日武定 6.5 级地震:该地震距昆明台 87.26 km.震前两个月,日波低端频率比、半日波低端频率比、日波高端频率比、半日波高端频率比、日波中心频率比、半日波中心频率比均出现比值分别大于 2 倍、1.5 倍均方差正异常,幅度显著且同步.见图 2.

1997 年 10 月 23 日姚安 4.7 级地震:该地震距昆明台 150.52 km.震前 5 个月,日波低端频率比、日波高端频率比、日波中心频率比均出现比值大于 2 倍均方差正异常,幅度显著且同步.半日波低端频率比、半日波高端频率比、半日波中心频率比在震前 5 个月(即 1997 年 5 月至 7 月)呈明显的高值同步变化.见图 3.

2002 年 5 月 13 日嵩明 4.6 级地震:该地震距昆明台 30.53 km.震前 4 个月,日波低端频率比、半日波低端频率比、日波高端频率比、半日波高端频率比、日波中心频率比、半日波中心频率比均出现比值大于 2 倍均方差正异常,幅度显著且同步.见图 4.

5.2 下关重力固体潮的震例分析

选取下关地震台重力固体潮观测资料,通过计算对瞬时频率特征参数加以分析.

计算出下关重力固体潮的瞬时频率特征参数后,将每组地震中的最大一个地震标出.2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震:该地震距下关台 105.73 km.2003 年 10 月 16 日大姚 6.1 级地震:该地震距下关

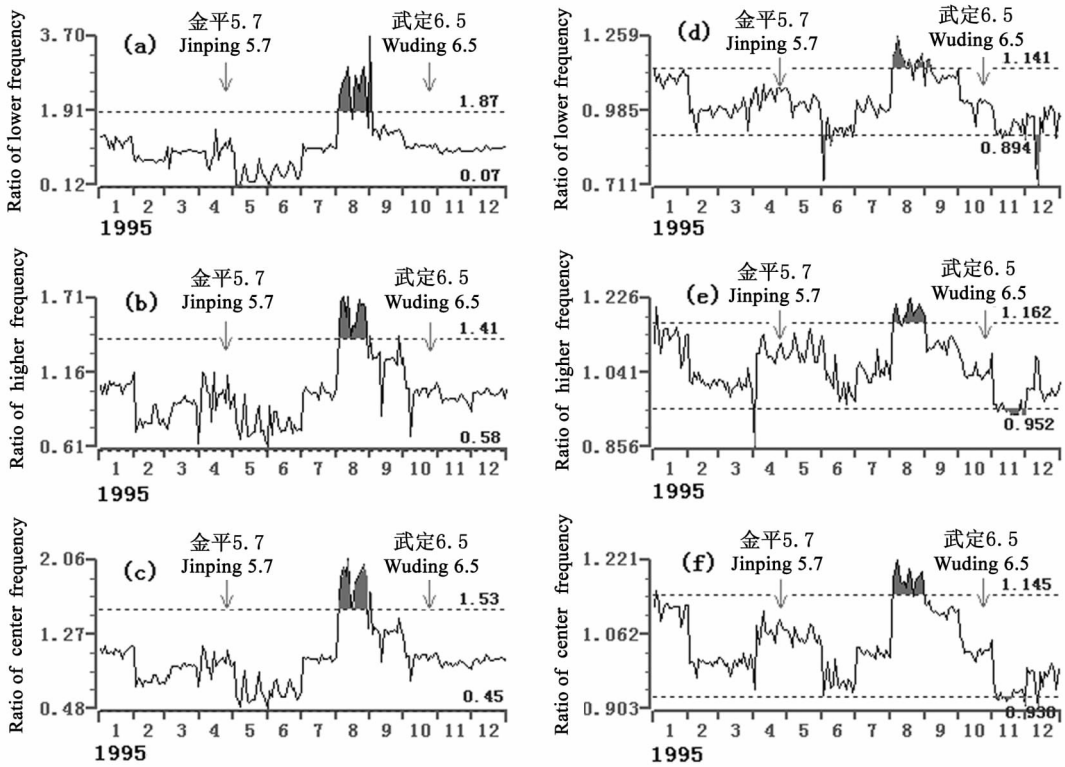


图 2 武定地震

(a, b, c) 日波; (d, e, f) 半日波.

Fig. 2 Wuding earthquake

(a, b, c) Daily wave; (d, e, f) Semidiurnal wave.

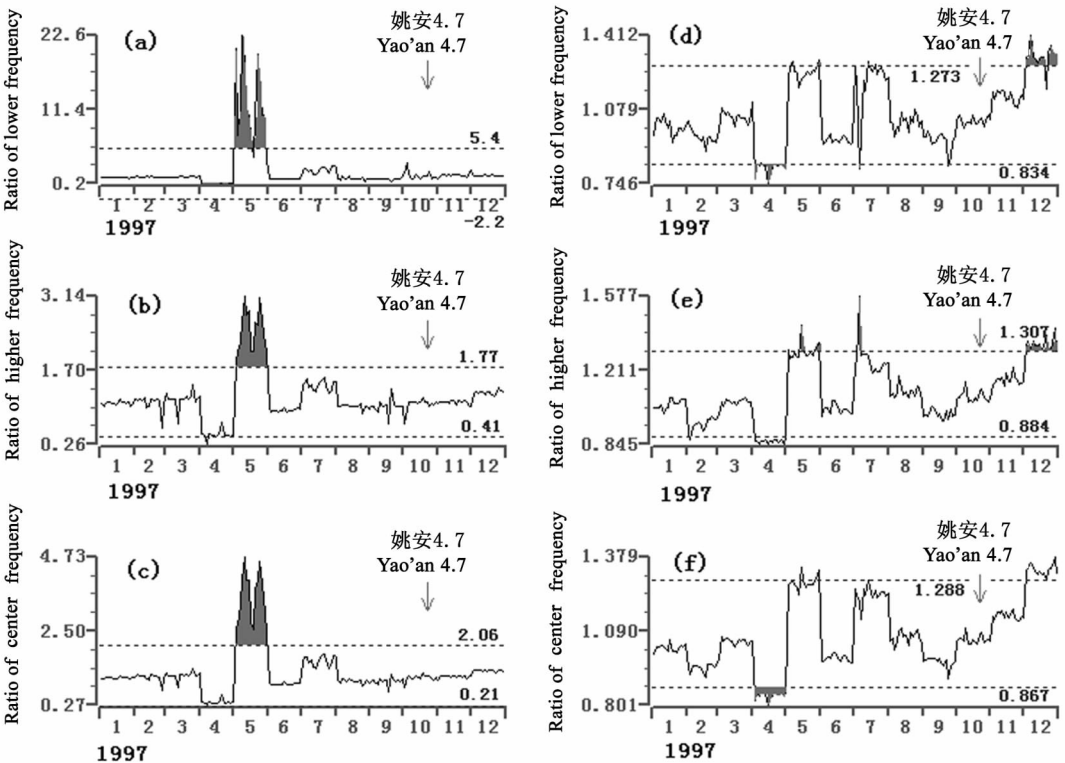


图 3 姚安地震

(a, b, c) 日波; (d, e, f) 半日波.

Fig. 3 Yao'an earthquake

(a, b, c) Daily wave; (d, e, f) Semidiurnal wave.

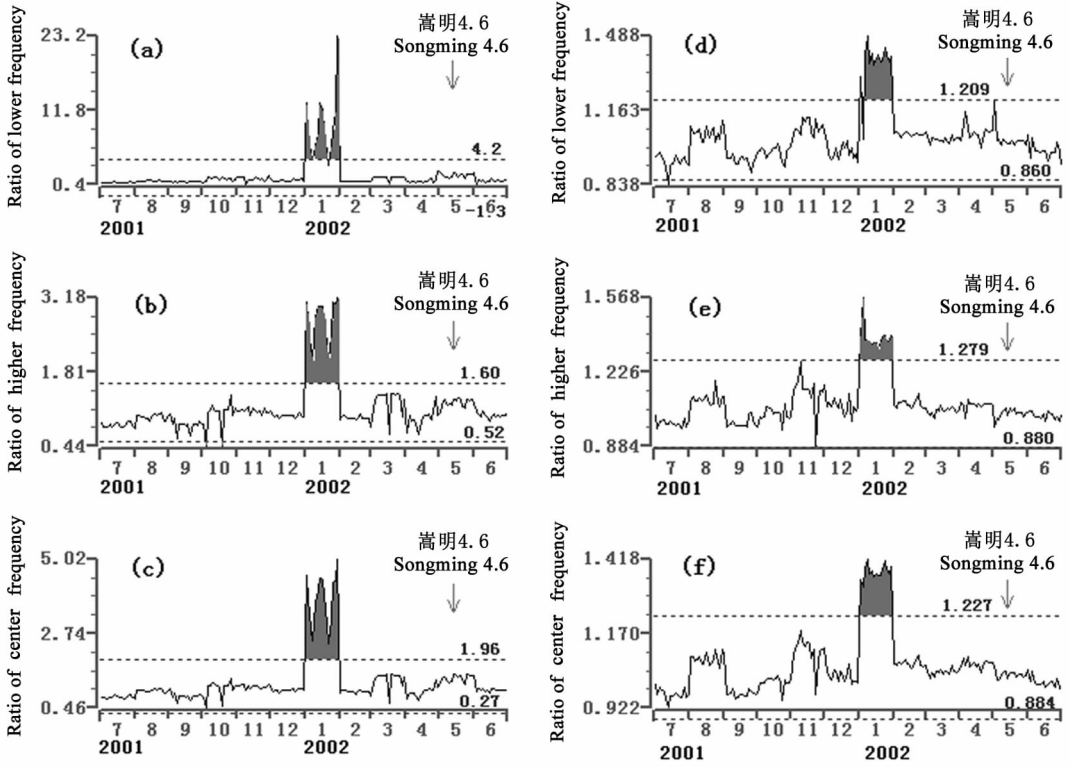


图 4 嵩明地震

(a, b, c) 日波; (d, e, f) 半日波.

Fig. 4 Songming earthquake

(a, b, c) Daily wave; (d, e, f) Semidiurnal wave.

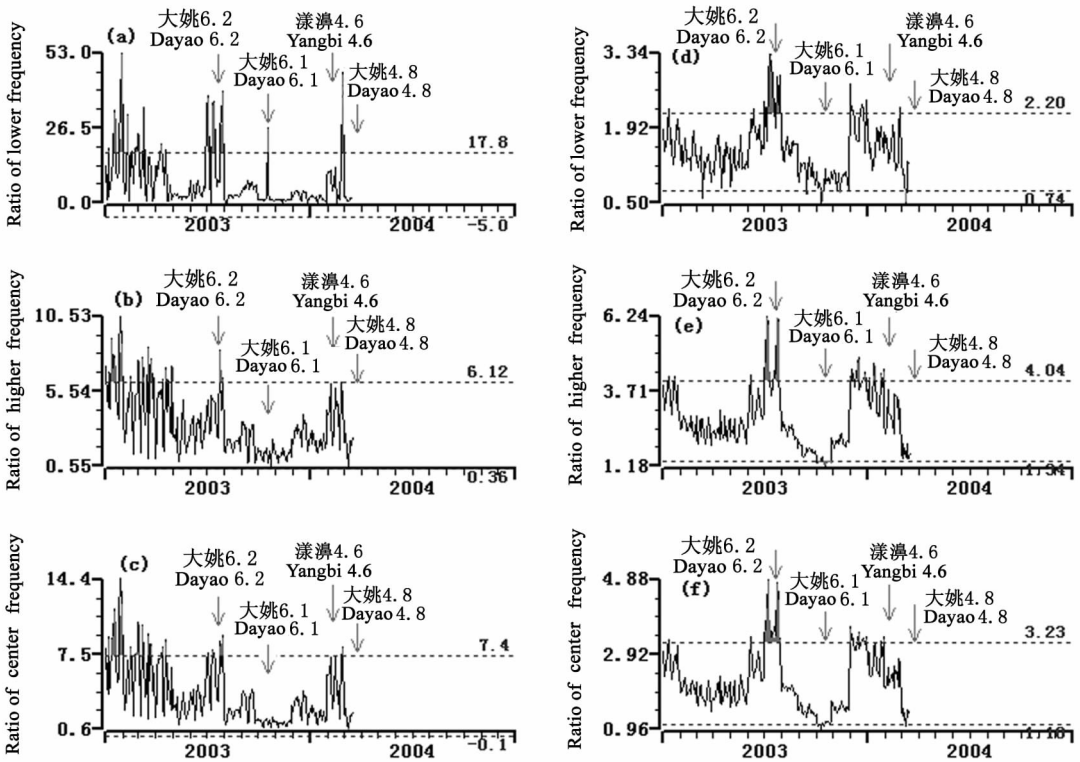


图 5 下关台

(a, b, c) 日波; (d, e, f) 半日波.

Fig. 5 Xiaguan Station

(a, b, c) Daily wave; (d, e, f) Semidiurnal wave.

台 110.73 km. 2004 年 2 月 9 日漾濞 4.6 级地震: 该地震距下关台 35.84 km. 2004 年 3 月 24 日大姚 4.8 级地震: 该地震距下关台 110.73 km. 计算结果见图 5. 由图 5 可见, 3 组大姚地震之前 1~3 个月, 日波低端频率比、半日波低端频率比、日波高端频率比、半日波高端频率比、日波中心频率比、半日波中心频率比, 均出现比值大于 1.5 倍均方差正异常, 异常同步出现且幅度显著. 3 组大姚地震为同一地区不同震级的地震, 震前均有异常出现, 即异常的重现性较好. 漾濞 4.6 级地震距下关台仅 35.84 km, 何以地震异常幅度不是很大, 有待深入分析.

5.3 小结

震例分析表明, 昆明、下关重力固体潮的瞬时频率特征参数(低端频率比、高端频率比、中心频率比)在震前确有前兆变化, 与地震对应较好. 说明重力固体潮观测中客观存在着频率分化现象. 对于同一地震, 日波、半日波的特征参量前兆变化特征均为同步正异常. 对于同一地区发生的不同震级的地震, 日波、半日波的特征参量前兆变化均出现在震前 3~5 个月内, 表明这些特征参数具有短期地震前兆意义. 大多数异常的持续期为 30 余天, 并且持续期的一致性较好. 因此可考虑将低端频率比、高端频率比、中心频率比作为短期地震前兆特征参量. 漾濞 4.6 级地震距下关台仅 35.84 km, 其地震异常幅度不是很大, 说明瞬时频率特征参数的地震前兆幅度和形态不仅与震中距、震级有关, 而且有可能与震源机制有关. 但这种推论有待进一步的研究验证.

6 结论

6.1 重力固体潮存在频率分化现象

计算结果表明, 瞬时频率特征参数在震前确有前兆变化, 与地震对应较好, 说明重力固体潮观测中客观存在着频率分化现象. 这种现象有可能与地震破裂过程中的物理变化有关. 该变化的物理机制有待于进一步的研究澄清.

6.2 瞬时频率特征参数可作为短期地震前兆特征参量

震例分析表明, 重力固体潮瞬时频率特征参数在震前确有前兆变化, 与地震对应较好. 对于同一地震, 特征参量的前兆变化特征均为同步正异常. 对于同一地区发生的不同震级的地震, 特征参量的前兆变化均出现在震前 3~5 个月内. 大多数异常的持续期为 30 余天, 并且持续期的一致性较好. 表明这

些特征参数具有短期地震前兆意义. 加上这些与瞬时频率相关的特征参数具有非常清楚的物理意义, 因此可以考虑将重力固体潮的低端频率比、高端频率比、中心频率比作为短期地震前兆特征参量.

6.3 HHT 有望成为地震科学研究的新技术支撑

虽然 HHT 仍有一些亟待深入研究的问题^[40], 但它可以帮助我们非线性非平稳分析的新思维去审视地震科学, 从地震动力学的角度去探索地震前兆. 故与此相关的多种观测手段都可应用 HHT 得到可预期的新结果、新认识. HHT 有望成为地震科学研究的新技术支撑.

参考文献(References)

- [1] Poul Melchior. 行星地球的固体潮. 杜品仁等译. 北京: 科学出版社, 1984. 1~5
Poul Melchior. The Tides of the Planet Earth (in Chinese). Du P R et al. Trans. Beijing: Science Press, 1984. 1~5
- [2] 王谦身. 重力学. 北京: 地震出版社, 2003. 382~388
Wang Q S. Gravimetry (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003. 382~388
- [3] 周 挚, 山秀明, 任 勇等. 固体潮的地震预测研究与地球动力学研究之分析比较. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 118~122
Zhou Z, Shan X M, Ren Y, et al. Comparing the earthquake forecast of the earth tide with the geodynamics of the earth tide. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, 20(1): 118~122
- [4] Norden E Huang, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Roy. Soc. London (Ser. A)*, 1998, 454: 903~995
- [5] 林振山, 汪曙光. 天文气候学 10 万年问题的研究. 地球物理学报, 2004, 47(6): 971~975
Lin Z S, Wang S G. A study on the problem of 100ka cycles of astroclimatology. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6): 971~975
- [6] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1585~1590
Yang P J, Yin X Y, Zhang G Z. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on HHT. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(5): 1585~1590
- [7] 刘喜武, 刘 洪, 李幼铭等. 局域波分解及其在地震信号时频分析中的应用. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 365~375
Liu X W, Liu H, Li Y M, et al. Local waves decomposition and its applications to seismic signal time-frequency analysis. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(2): 365~375
- [8] 周 挚, 山秀明, 梁 虹等. 固体潮时频分析新方法. 地震研究, 2005, 28(4): 334~339
Zhou Z, Shan X M, Liang H, et al. A new approach of earth

- tides time-frequency analysis. *Journal of Seismological Research (in Chinese)*, 2005, **28**(4): 334~339
- [9] 王 珍, 马孝江. 局域波边界谱在缸盖振动信号分析中应用研究. *内燃机工程*, 2002, **23**(3): 50~53
Wang Z, Ma X J. Application and research on vibration signal of diesel engine cylinder cover based on local wave boundary-spectrum. *Chinese Internal Combustion Engineering (in Chinese)*, 2002, **23**(3): 50~53
- [10] 王 珍, 马孝江. 局域波时频法在柴油机缸套活塞磨损诊断中的应用研究. *内燃机学报*, 2002, **20**(2): 157~160
Wang Z, Ma X J. Investigation on diagnosis of diesel engine piston-liner wear faults based on local wave time-frequency approach. *Transactions of Csice (in Chinese)*, 2002, **20**(2): 157~160
- [11] 李宏坤, 马孝江. 局域波法在船舶柴油机燃油系统故障诊断中应用. *大连理工大学学报*, 2003, **43**(2): 168~171
Li H K, Ma X J. Application of local wave method to fuel system fault diagnosis of marine diesel. *Journal of Dalian University of Technology (in Chinese)*, 2003, **43**(2): 168~171
- [12] 王奉涛, 马孝江, 邹岩昆等. 基于局域波法的时频局部能量特征提取方法. *中国机械工程*, 2003, **14**(23): 2012~2014, 2028
Wang F T, Ma X J, Zou Y K, et al. A method for feature extraction of local energy in time-frequency domain based on local wave approach. *China Mechanical Engineering (in Chinese)*, 2003, **14**(23): 2012~2014, 2028
- [13] 邹岩昆, 马孝江, 蔡 悦等. 基于局域波法的柴油机缸套活塞磨损故障诊断. *起重运输机械*, 2004, (2): 35~37
Zou Y K, Ma X J, Cai Y, et al. Diagnosis to diesel engine piston-liner wear with partial wave method. *Hoisting and Conveying Machinery (in Chinese)*, 2004, (2): 35~37
- [14] 程军圣, 于德介, 杨 宇. 基于 EMD 的能量算子解调方法及其在机械故障诊断中的应用. *机械工程学报*, 2004, **40**(8): 115~118
Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Energy operator demodulating approach based on EMD and its application in mechanical fault diagnosis. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (in Chinese)*, 2004, **40**(8): 115~118
- [15] Ohnaka M, Mogi K. Frequency characteristics and its relation to the fracturing process to failure. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(B5): 3873~3884
- [16] 臧绍先, 范建利. 不同单轴加压方式下岩石声发射的时间过程与频率特征. *地震学报*, 1987, **9**(1): 74~88
Zang S X, Fan J L. The acoustic emission and its frequency characteristics in rocks under different types of uniaxial compression. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 1987, **9**(1): 74~88
- [17] Xu Z Y, Yang R H, Wang B, et al. Burst strain disturbance: a new test study on fracture precursory. *Acta Seismologica Sinica*, 1998, **11**(6): 737~744
- [18] 潘长良, 祝方才, 曹 平等. 单轴压力下岩倾向岩石的声发射特征. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 2001, **32**(4): 336~338
Pan C L, Zhu F C, Cao P, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression. *Journal of Central South University of Technology (Natural Science) (in Chinese)*, 2001, **32**(4): 336~338
- [19] 李世愚, 刘建新, 和雪松等. 地震前低频事件的实验研究. *地震地磁观测与研究*, 2002, **23**(4): 1~7
Li S Y, Liu J X, He X S, et al. Experimental investigation of precursory low-frequency events before strong earthquakes. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research (in Chinese)*, 2002, **23**(4): 1~7
- [20] 唐林波, 李世愚, 苏 昉等. 强地震前兆低频波的实验研究. *中国地震*, 2003, **19**(1): 48~57
Tang L B, Li S Y, Su F, et al. Experimental study on precursory low-frequency waves of earthquakes. *Earthquake Research in China (in Chinese)*, 2003, **19**(1): 48~57
- [21] Li S Y, Tang L B, He X S, et al. Experimental research of the low frequency wave that radiated into the air before failure of rock. *Earthquake Research in China*, 2005, **19**(1): 86~96
- [22] 王赟赟, 杨润海, 赵晋明等. 前驱地震波的试验研究及波谱分析. *地震研究*, 2003, **26**(1): 50~56
Wang Y Y, Yang R H, Zhao J M, et al. Experimental study of premonitory seismic wave and spectrum analysis. *Journal of Seismological Research (in Chinese)*, 2003, **26**(1): 50~56
- [23] 李正光, 杨润海, 赵晋明等. 地震序列类型的岩石破裂实验研究. *地震研究*, 2005, **28**(4): 388~392
Li Z G, Yang R H, Zhao J M, et al. Rock-breaking test research on earthquake sequence type. *Journal of Seismological Research (in Chinese)*, 2005, **28**(4): 388~392
- [24] 李建国, 刘祖沅, 陈献程. 浙江湖南镇水库 1982 年 5 月 22 日 3.1 级地震序列的近场地声观测和初步研究. *地震学报*, 1985, **7**(3): 314~324
Li J G, Liu Z Y, Chen X C. Near-field observation and preliminary study on the geosound generated by the magnitude 3.1 earthquake series in Hunanzhen reservoir, Zhejiang, on May 22, 1982. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 1985, **7**(3): 314~324
- [25] 陈德福, 罗荣祥, 刘国培. 倾斜异常图像分类及其特征浅析. 见: 陈德福等主编. *地壳形变动力学观测与研究*. 北京: 海洋出版社, 1993. 174~187
Chen D F, Luo R X, Liu G P. Classification of anomalous map of ground tilt and the analysis of its characteristic. In: Chen D F, et al. *Geodynamic Observations and Its Studies Based on the Crustal Deformation (in Chinese)*. Beijing: Ocean Press, 1993. 174~187
- [26] 谢觉民. 大同-阳高地震的地壳形变前兆及其机理研究. 见: 国家地震局科技监测司编. *大同-阳高地震研究*. 北京: 地震出版社, 1993. 77~87
Xie J M. Precursors of crustal deformation associated with the earthquake occurred in the Datong-Yanggao and the

- research on its principle. In: Department of Scientific Programing and Earthquake Monitoring of the State Seismological Bureau. Seismological Research of the Datong-Yanggao earthquake (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 77~87
- [27] 王贤仁, 卢艳清. 澜沧-耿马地震前 FSQ 仪记录到的粘滑和慢地震及对短临预报探讨. 地震研究, 1994, **17**(2):157~162
Wang X R, Lu Y Q. Stick-slip and slow shocks recorded on FSQ tiltmeters before Lancang-Gengma earthquake and primary study on short-impending earthquake prediction. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1994, **17**(2):157~162
- [28] 许昭永, 王贤仁, 黄 雍等. 倾斜扰动——一种可能的有效地震前兆. 地震研究, 2001, **24**(2):131~135
Xu Z Y, Wang X R, Huang Y, et al. The shaking - graph of clinometer, a possible effective forewarning of earthquake. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2001, **24**(2):131~135
- [29] 王贤仁, 卢艳清. 倾斜扰动与短临地震预报. 地震研究, 2002, **25**(1):20~24
Wang X R, Lu Y Q. Tilt disturbance and short-impending earthquake prediction. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2002, **25**(1):20~24
- [30] 李瑞浩, 刘贵安, 陈冬生等. 滇西试验场重力潮汐观测及其地震响应特征的研究. 中国地震, 1995, **11**(2):161~167
Li R H, Liu G A, Chen D S, et al. Gravity tide observation and research of response characteristics to earthquakes in western area, Yunnan province. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1995, **11**(2):161~167
- [31] 刘万琴, 李世恩, 郑治真等. 破坏性矿震震前短临阶段震源过程研究. 地震学报, 1999, **21**(1):57~64
Liu W Q, Li S Y, Zheng Z Z, et al. A study on seismic source process in shortterm and imminent stage before destructive mining shock. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, **21**(1):57~64
- [32] 石耀霖. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考. 地震, 2001, **21**(3):1~6
Shi Y L. Stress triggers and stress shadows: How to apply these concepts to earthquake prediction. *Earthquake* (in Chinese), 2001, **21**(3):1~6
- [33] 郝晓光, 许厚泽, 郝兴华等. 重力高频扰动与地震. 地壳形变与地震, 2001, **21**(3):9~13
Hao X G, Xu H Z, Hao X H, et al. Gravity high frequency disturbance and occurrence of earthquake. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 2001, **21**(3):9~13
- [34] 苏 昉, 田 维. 2000 年 7~9 月强地震的前兆次声波测量研究. 地震研究, 2002, **25**(1):11~19
Su F, Tian W. Measurements and study of the precursory infrasonic waves of strong earthquakes from July to September, 2000. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2002, **25**(1):11~19
- [35] 范桂英, 拾礼勤, 李兰生. 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级大震前徐州台数字化形变观测仪器记录的异常. 地震学刊, 2002, **22**(2):7~11
Fan G Y, Shi L Q, Li L S. Anomalies recorded by the digital deformation observation instruments at the Xuzhou seismic station prior to the M8.1 earthquake of 14 Nov. 2001 to the west of the Kunlun mountains' pass. *Journal of Seismology* (in Chinese), 2002, **22**(2):7~11
- [36] 姜朝松, 叶建庆, 蔡绍平等. 腾冲火山区地震波形特征. 地震研究, 2005, **28**(4):349~352
Jiang C S, Ye J Q, Cai S P, et al. Waveform characteristics of earthquakes in Tengchong volcanic area. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2005, **28**(4):349~352
- [37] 夏雅琴, 魏树红, 陈维升等. 印尼大地震震前次声异常信号的分析. 国际地震动态, 2005, (12):31~36
Xia Y Q, Wei S H, Chen W S, et al. Analysis of abnormal signals of infrasound before the Sumatra strong earthquakes. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2005, (12):31~36
- [38] 马 瑾. 构造物理学概论. 北京:地震出版社, 1987. 280~358
Ma J. Outline of the Tectonophysics (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1987. 280~358
- [39] 李瑞浩. 重力学引论. 北京:地震出版社, 1988. 265~270
Li R H. Introduction to Gravitology (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988. 265~270
- [40] 周 攀, 山秀明, 梁 虹等. 地震领域的 HHT 研究进展. 地震研究, 2006, **29**(增刊):513~519
Zhou Z, Shan X M, Liang H, et al. Progress of application of HHT to earthquake research domain. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 2006, **29**(Suppl.):513~519

(本文编辑 何 燕)