

乌什地震台倾斜固体潮观测与震兆异常^①

杨又陵¹, 唐九安²

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:选择新疆乌什台 1988—2003 年石英倾斜仪的记录为研究对象, 利用经典的潮汐分析方法求解乌什地区的倾斜潮潮汐参量。对结果的分析认为: 半主波潮汐参量的观测精度优于 0.001, 长期稳定性优于 2%; 在周围地区 6 级地震前可能记录到了 γ_{m2} 值的异常变化, 但异常量级小于理论量级; 水管倾斜仪的观测结果与石英倾斜仪的一致性很好, 精度和稳定性更优于石英倾斜仪。

关键词: 地倾斜观测; 潮汐参量; 前兆异常; 乌什地震台

中图分类号: P315.72⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0242-06

Observation of Tilt Earth Tide of Wushi Seismic Station and Earthquake Precursors

YANG You-ling¹, TANG Jiu-an²

(1. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China;

2. Earthquake Administration of Gansu, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The records of quartz tilter in Wushi station during 1998—2003 are processed with classical method of tidal analysis, and the tilt tidal parameters are calculated. The results indicate that the observational precision of semidiurnal tidal parameters is less than 0.001; the long-term stability is prior 2%. The abnormal varieties of γ_{m2} were recorded before $M_L \geq 6.0$ earthquakes in neighboring region, but the magnitude of abnormality is less than theoretic value. The observational records of water tilter are well consistent with that of quartz tilter, the conforming precision and stability of water tilter is higher than quartz tilter.

Key words: Observation of earth tilt; Tidal parameters; Earthquake precursor; Wushi seismic station

0 前言

地形变连续观测台网的任务是在监控范围内对形变速率、形变方向及岩石物性进行长期、连续、有效的监测; 根据台网所提供的地震平静期的大量观测资料, 建立正常运动模型; 在此基础上采取递推法预报后续的正常值, 以此来发现和识别异常, 并以前兆的阶段性特征为线索来判断进入短期阶段的标志^[1]。

在地倾斜观测的连续记录中包含了大量与局部地壳介质特性有关的信息, 如描述地壳岩石粘弹性的潮汐参量等。本文利用潮汐分析的方法计算了新

疆乌什地震台长序列(1988—2003 年)石英倾斜仪的观测资料, 研究了该区域倾斜潮汐因子 γ 值的时间分布特征, 试图从中探索与区域强地震活动有关的信息。

乌什地震台位于天山南麓、塔里木盆北缘、柯坪地块的西北缘, 在大地构造上跨及南天山地槽和塔里木盆地及其之间的过渡地带。1970 年代以来, 在 200 km 范围内发生多次 6 级地震, 是南天山地震带强地震的频发地区。台站的台基为石炭纪灰岩, 完整性较好, 观测山洞进深、旁侧覆盖大于 30 m。1987 年到 2004 年 4 月 SQ-70 石英倾斜仪在山洞内

^① 收稿日期: 2008-07-13

作者简介: 杨又陵(1951—), 女(汉族), 江西广丰人, 高级工程师, 主要从事地震前兆观测与研究。

连续观测 16 年以上,记录的潮汐日变形态清晰,且有明显的年变规律,在多次 6 级以上地震前日变和年变曲线上记录到明显的趋势和短临异常^[2-4]。

1 资料分析方法

1.1 资料预处理

为保证潮汐分析结果的信度,首先对资料进行预处理,剔除受干扰显著的资料。根据观测规范的约定,对间断 4 小时以内的数据利用内插公式补插;大于 4 小时以上则舍去 1 天数据;在潮汐分析时对间断时间较长的资料进行分段处理。

1.2 潮汐分析方法

采用经典的 Venedicv 调和分析方法^[5]对地倾斜观测整点值进行分析,提取主波的潮汐因子 γ 值和相位滞后 Φ 值。基本原理为:设每个观测值由不同成分的潮汐波叠加而成,即

$$y(t) = \sum H_n \cos[\omega_n t + \varphi_n(T)] + D(t)$$

其中: t 为自 T 时起算的以小时表示的时间; T 为 t

为 0 的时间; $y(t)$ 为 t 时刻的观测值; H_n 为第 n 个潮汐波的观测振幅; ω_n 为第 n 个潮汐波的角频率; $\Phi_n(T)$ 为第 n 个潮汐波的 T 时刻的初相位; $D(t)$ 为 t 时刻的仪器零漂。

对观测序列 $y(t)$ 进行数字滤波,从中分离出各主要潮汐波的观测振幅 H_n 和位相 Φ_n ,与相应的理论振幅之比是反映介质弹性参量的潮汐因子、与相应的理论相位之差为反映介质粘滞性的相位滞后。即

$$\gamma = \frac{\text{观测振幅 } H_n}{\text{理论振幅 } H_n}$$

$\Delta\varphi$ 为观测相位; φ_n 为理论相位。

2 潮汐分析结果及分析

2.1 长序列潮汐参量及其精度分析

表 1 列出了乌什台地倾斜两个分向长序列(1988—2003 年)观测数据的计算结果。根据经典的潮汐分波原则,周日波分为 11 个波群,半日波分为 6 个波群,1/3 日波分为 1 个波群。

表 1 乌什台地倾斜长序列潮汐分析结果(1988—2003 年)

EW 向(2674 组)VM ₁ =2.3							NS 向(2727 组)VM ₁ =2.1					
波名	潮汐 因子 r	误差	相位 滞后 φ	误差/ $^{\circ}$	振幅 /ms	误差 /ms	潮汐 因子 r	误差	相位 滞后 φ	误差/ $^{\circ}$	振幅 /ms	误差 /ms
Q ₁ -001-062,62	0.639 9	0.012 1	6.69	1.08	0.53	0.01	0.253 9	0.050 4	33.65	11.36	0.04	0
O ₁ -063-088,26	0.636 6	0.002 4	7.29	0.21	2.73	0.01	0.217 3	0.010 4	54.15	2.73	0.2	0
M ₁ -089-110,22	0.663 1	0.026 1	6.37	2.25	0.22	0.01	0.560 5	0.060 8	1.87	6.21	0.04	0
P ₁₁ -111-113, 3	1.285	0.083 7	50.95	3.73	0.15	0.01	4.536 1	0.367 4	73.73	4.64	0.11	0.04
P ₁₂ -114-120- 7	0.708 8	0.004 9	4.56	0.4	1.42	0.01	0.530 6	0.021 5	319.31	2.33	0.22	0
S ₁ -121-123,03	9.866 5	0.296 8	182.92	1.7	0.47	0.14	55.117 2	1.302 3	78.42	1.34	0.55	0.72
K ₁ -124-134,11	0.702 4	0.001 6	7.74	0.13	4.24	0.01	0.141 5	0.007 2	45.23	2.92	0.18	0
F ₁₀ -135-136- 2	1.326 1	0.205	282.62	8.86	0.06	0.01	4.605 2	0.899 9	6.14	11.19	0.05	0.04
F ₁₁ -137-143- 7	0.805 5	0.114	9.15	8.11	0.07	0.01	1.934 9	0.500 4	250.69	14.82	0.04	0.02
J ₁ -144-165,22	0.658 8	0.028 7	357.62	2.5	0.22	0.01	0.457 6	0.100 9	47.32	12.63	0.03	0
OO ₁ -166-197,32	0.761 4	0.046 8	2.16	3.52	0.14	0.01	0.247 9	0.206 8	310.51	47.81	0.01	0
EW 向(2674 组)VM ₂ =2.1							NS 向(2727 组)VM ₂ =1.7					
2N ₂ -198-236,39	0.619 4	0.019 7	0.14	1.82	0.23	0	0.714 4	0.024 7	4.39	1.98	0.17	0
N ₂ -237-260,24	0.631 8	0.004	1.86	0.36	1.44	0.01	0.746 5	0.005	4.27	0.38	1.12	0.01
M ₂ -261-286,26	0.645 1	0.000 8	2.06	0.07	7.67	0.01	0.754 9	0.000 9	4.2	0.07	5.89	0.01
L ₂ -287-300,14	0.623 7	0.025 2	0.44	2.31	0.21	0.01	0.724 2	0.032	5.46	2.53	0.16	0.01
S ₂ -301-309,09	0.714 9	0.001 6	2.57	0.13	3.96	0.01	0.766 4	0.002	15.53	0.15	2.78	0.01
K ₂ -310-347,38	0.666 3	0.006	0.52	0.52	1	0.01	0.7853	0.007 4	6.82	0.54	0.78	0.01
EW 向(2674 组)VM ₃ =0.8							NS 向(2727 组)VM ₃ =0.8					
M ₃ -348-363,16	0.732 1	0.02	4.22	1.56	0.13	0	0.728 3	0.031 5	357.43	2.48	0.08	0

EW 向周日波的振幅在中纬度地区最大,理论振幅在 5 ms 左右。由表 1 看到:主波 K₁ 波振幅为 4.2 ms,O₁ 波振幅为 2.7 ms,与理论值接近。周日主波 O₁ 的潮汐因子 $\gamma_{O_1} = 0.636 6 \pm 0.002 4$;Q₁、O₁、M₁、J₁ 波群组的潮汐因子在 0.65 左右,与理论值接近;而 S₁ 波群组由于其角频率与大气潮主频一致,受大气潮影响非常大, γ 值高达 9.8;与其相邻的

K₁ 波的干扰明显减小, γ 值为 0.7,与理论值比较接近。中纬度地区 EW 向半日波的振幅较大,计算得到半日主波 M₂ 的振幅为 7.7 ms,S₂ 波群的振幅为 4.0 ms,与理论值接近。由 γ 值的结果看,除 S₂ 波群受大气潮影响外(远小于日波),其余 5 组 γ 值在 0.62~0.67 之间,中误差小于 0.025,最大的半日主波 M₂ 的 $\gamma_{M_2} = 0.645 1 \pm 0.000 8$,观测精度优于

1‰。

在中纬度地区, NS 向周日波的振幅非常小, 计算的振幅值均小于 0.5 ms, 在日变曲线上基本看不到周日波的形态, 因此 γ 值的结果凌乱, 没有实际意义。而半日波的振幅在该地区最大, 计算得到的主波 M_2 的振幅为 5.9 ms; 其 $\gamma_{M_2} = 0.7549 \pm 0.0009$; 其余 5 组半日波的 γ 值在 0.71~0.78 之间, 中误差小于 0.032, 观测精度与 EW 向的结果相当。

由表 1 还可以看到, EW、NS 两个方向观测的波群中误差 (VM_1 、 VM_2 、 VM_3) 均在 2 ms 左右, 表

明乌什台地倾斜的潮汐观测结果精度较高, 且与理论值接近。

2.2 潮汐参量的稳定性分析

表 2 列出了 EW 分向日波、半日波主波的年度潮汐分析的结果, 包括潮汐因子 γ 值及其误差、波群中误差以及相位滞后, 以及历年的平均值、平均值的标准偏差和以及长序列的计算结果。图 1 是 EW 分向 M_2 波、 O_1 波 γ 值月分析结果的变化曲线, 以及 NS 分向 M_2 波 γ 值分析结果的变化曲线。图中阴影部分是取 1 倍标准差控制的范围。

表 2 乌什台石英倾斜仪 EW 分向 1988—2003 年年度潮汐分析结果

年	O_1				M_2			
	潮汐因子 r	中误差	日波群误差	相位滞后 φ	潮汐因子 r	中误差	半日波群误差	相位滞后 φ
1988	0.641 4	0.012 4	3.67	4.449 9	0.648 7	0.003 5	2.33	0.4451
1989	0.654 4	0.012 6	3.6	7.132 3	0.644	0.003 4	2.24	2.694 5
1990	0.640 7	0.008 6	2.42	6.683 6	0.648 3	0.002 7	1.83	4.420 9
1991	0.638 7	0.008 5	2.28	6.557	0.652 2	0.002 4	1.61	2.155 8
1992	0.647 3	0.007 8	2.01	6.095 7	0.650 4	0.001 9	1.34	1.844 1
1993	0.648 1	0.007 1	1.71	7.023 1	0.652 6	0.001 6	1.13	1.554 2
1994	0.641 3	0.011 1	2.51	7.500 3	0.637 9	0.002 3	1.66	2.894 8
1995	0.620 1	0.008 7	1.86	7.298	0.641 3	0.002 5	1.76	3.241 1
1996	0.623 9	0.009 3	1.92	8.267 9	0.648 3	0.002 1	1.55	3.068 8
1997	0.629 4	0.009 7	1.96	6.500 5	0.650 5	0.001 9	1.34	3.679 6
1998	0.608 6	0.009 4	1.95	6.727 4	0.638 6	0.002 2	1.55	2.301 2
1999	0.627 8	0.008 5	1.88	7.387 3	0.643 2	0.002 3	1.64	2.584 8
2000	0.619 1	0.009 1	2.16	5.269 8	0.638 4	0.003 4	2.41	1.211 6
2001	0.642 8	0.010 3	2.59	6.611 3	0.643 7	0.002 9	2.01	2.166
2002	0.644	0.009	2.39	7.744 3	0.642 4	0.003 6	2.47	-0.492 3
2003	0.625 4	0.009 5	1.85	5.152 4	0.639 1	0.002 7	0.79	-2.12
均值	0.634 6	0.009 5	2.297 5	6.650 1	0.645 0	0.002 6	1.728 8	1.978 1
标准偏差	0.012 7	0.001 5	0.584 5	1.006 9	0.005 2	0.000 6	0.473 2	1.624 2
γ 值的离差	0.009 8				0.0045			
1988—2003 长序列结果								
	0.636 6	0.002 4	2.3	7.29	0.645 1	0.000 8	2.1	2.06

首先分析 γ 值的离差分布, 由表 2 可以看到, EW 分向半日主波 γ_{M_2} 值的离差值 0.004 5, 而相对离差为 0.7%, 即平均偏离在 0.7%, 取 2 倍的限差则 γ_{M_2} 值的波动范围小于 1.4%。周日主波 O_1 波 γ_{O_1} 值的离差值是 0.009 8, 相对离差为 1.54%, 取 2 倍的限差则 γ_{O_1} 值的波动范围小于 3.08%, 是 γ_{M_2} 值的一倍。与中长序列的计算结果相比, γ_{M_2} 值的平均值偏差 0.000 1, γ_{O_1} 值偏差 0.002, 结果极为接近。由图 1(a) 可以看到, 有 75% 以上的 γ 值月调和结果落在 1 倍标准差的范围内, 而落在 2 倍标准差的范围内的结果大于 96%, 表明 γ 值的时间分布非常稳定。

同样分析了 NS 向 γ_{M_2} 值的结果, 年度调和结果的结果与平均值的离差值是 0.008 8, 平均偏离在

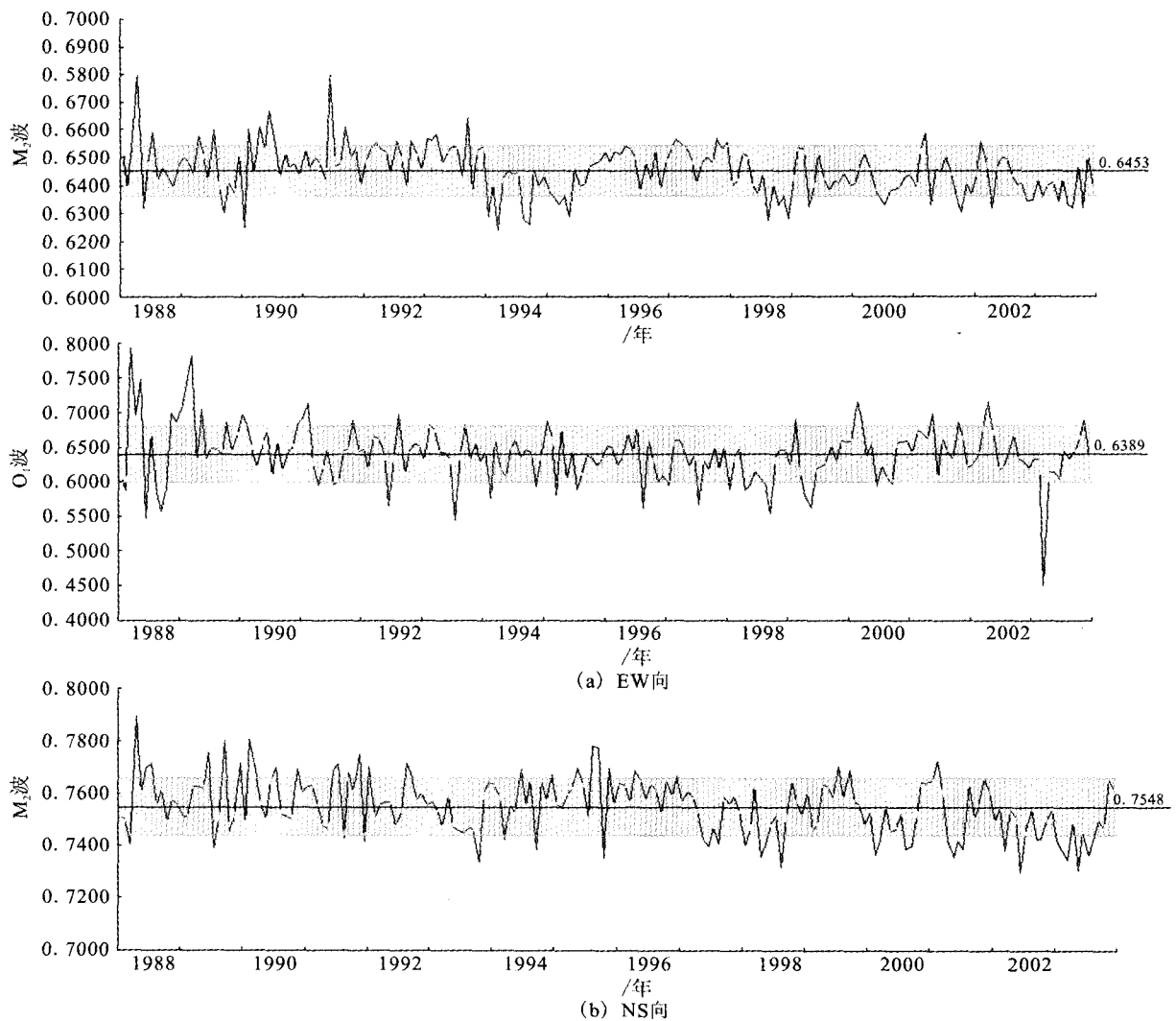
1.16%, γ_{M_2} 平均值与长序列的结果一致, 均为 0.754 9。由图 1(b) 可以看到, NS 向 γ_{M_2} 值的时间分布与 EW 分向相当, 非常稳定。

对相位滞后 φ 值的分析(表 2)认为, 历年的结果中相位滞后 φ 值的互差大, φ_{M_2} 值的最大互差约 5°, φ_{O_1} 值的最大互差约 4°。另外长序列资料的计算结果(表 1)相位滞后与理论值的偏差大, 这可能与石英倾斜仪整个观测系统的布设、时间服务系统的精度等有关。

以上分析表明, 乌什地震台地倾斜观测的潮汐参量稳定, γ_{M_2} 值的结果偏离小于 2%, 日波的结果偏离小于 3%; EW 向优于 NS 向, 但相位偏差较大。

2.3 水管倾斜仪的初步结果及对比分析

根据中国地震局“十五”数字化网络项目的总体

图1 1988—2003年石英倾斜仪月 γ 值曲线Fig.1 Curves monthly γ values of quartz tiltmeter from 1988 to 2003.

部署,2006年10月在乌什台的观测山洞内安装了两分向的DSQ水管倾斜仪,替代了原有的石英摆倾斜仪观测。仪器NS向方位角为 $N6^{\circ}E$,基线长19.04 m,EW向方位角为 $N88.5^{\circ}E$,基线长19.04 m。经过1年多的试运行,记录连续完整,潮汐日变清晰。表3是对2007年观测资料的分析结果,图2是EW向 M_2 波月调和分析结果曲线。

由表3可以看到,各个分波的 γ 因子值一致性比较好,与表1中长序列的结果非常接近,明显优于石英倾斜仪年度分析结果(表2);主波的波群中误差 ≤ 1 ms,小于长序列资料的观测结果;观测振幅稳定,与表1中长序列的结果基本一致;EW分向的 γ_{O_1} 值、NS分向的 γ_{M_2} 值与石英倾斜仪的计算结果偏差很小,但EW分向的 γ_{M_2} 值偏大了4%。由图2可以看到两个分向的 γ_{M_2} 值1—2月的值偏离均值较大,可能与初期的安装调试有关。3月以后稳定,

最大偏差是EW分向1.4%,NS分向3.8%。

以上分析表明,水管倾斜仪的观测精度和稳定性明显优于石英摆倾斜仪。

3 潮汐因子变化与强地震前兆信息的初步研究

根据扩容—扩散模型的理论:一、地震前岩石的应变不是线性的;二、与发震有关的震前波速异常的变化周期是地震震级的指数函数,波速的下降是震源体膨胀的结果。迄今为止的报告表明,震前P波和S波的速度有可能下降10%到20%。比蒙特和比格研究的结论是, V_P/V_S 变化15%,在最有利的地方,可以观测到固体潮倾斜和应变的振幅发生50%的异常变化。从这个角度看,实际上是把固体潮当作输入信号,通过连续采样来检验膨胀区内岩

石的弹性变化情况^[5]。

表 3 乌什台 DSQ 水管倾斜仪潮汐分析结果(2007 年)

EW 分向				
波名	潮汐因子,误差	相位滞后,误差	振幅,误差	波群中误差
Q ₁	0.638 7±0.018 2	359.084 5±1.635 5	0.524 8±0.009 6	VM ₁ =1.06
O ₁	0.643 1±0.003 7	357.687 5±0.325 8	2.759 8±0.010 1	
M ₁	0.623 8±0.038 4	357.652 7±3.530 4	0.210 5±0.008 1	
P ₁	0.672 0±0.009 1	359.290 6±0.777 6	1.342 2±0.012 2	
S ₁	8.179 2±0.568 6	168.049 0±3.931 6	0.387 4±0.220 2	
K ₁	0.705 4±0.002 7	359.848 0±0.219 2	4.257 1±0.011 5	
J ₁	0.688 0±0.044 1	352.036 0±3.671 6	0.232 2±0.010 2	
OO ₁	0.629 2±0.053 6	354.040 8±4.882 2	0.116 3±0.006 2	VM ₂ =0.78
2N ₂	0.683 7±0.028 3	351.841 2±2.363 7	0.248 5±0.007 0	
N ₂	0.667 7±0.005 9	353.801 9±0.504 4	1.520 0±0.008 9	
M ₂	0.670 4±0.001 2	353.380 3±0.100 2	7.971 1±0.009 4	
L ₂	0.755 1±0.055 2	355.544 3±4.195 0	0.253 8±0.014 0	
S ₂	0.684 5±0.002 4	354.267 4±0.201 6	3.786 8±0.008 9	
K ₂	0.660 8±0.006 6	354.172 8±0.575 7	0.994 6±0.006 6	
M ₃	0.722 3±0.030 5	358.083 9±2.415 8	0.127 0±0.003 9	VM ₃ =0.29
NS 分向				
波群	潮汐因子,误差	相位滞后,误差	振幅,误差	波群中误差
Q ₁	0.308 8±0.092 7	61.199 9±17.200 0	0.059 6±0.005 5	VM ₁ =1.52
O ₁	0.336 5±0.022 0	45.171 8±3.752 8	0.339 4±0.007 5	
M ₁	0.468 1±0.281 8	53.097 6±34.492 0	0.037 1±0.010 5	
P ₁	0.236 5±0.054 8	247.770 5±13.277 7	0.111 0±0.006 1	
S ₁	106.095 0±3.381 8	30.424 5±1.844 3	1.181 0±3.993 9	
K ₁	0.273 0±0.016 3	31.731 2±3.415 7	0.387 3±0.006 3	
J ₁	0.648 9±0.214 3	39.644 2±18.921 2	0.051 5±0.011 0	
OO ₁	0.361 7±0.350 9	66.443 1±55.584 8	0.015 7±0.005 5	VM ₂ =0.72
2N ₂	0.691 6±0.039 7	9.721 3±3.293 2	0.166 2±0.006 6	
N ₂	0.742 6±0.008 3	5.612 9±0.638 5	1.117 5±0.009 3	
M ₂	0.743 8±0.001 6	4.776 8±0.125 5	5.846 8±0.009 5	
L ₂	0.832 7±0.062 6	0.026 6±4.309 9	0.185 0±0.011 6	
S ₂	0.798 8±0.003 3	11.326 1±0.235 2	2.921 3±0.009 7	
K ₂	0.732 3±0.009 2	6.314 7±0.720 7	0.728 6±0.006 7	
M ₃	0.831 4±0.069 7	1.831 7±4.804 4	0.096 7±0.006 7	VM ₃ =0.45

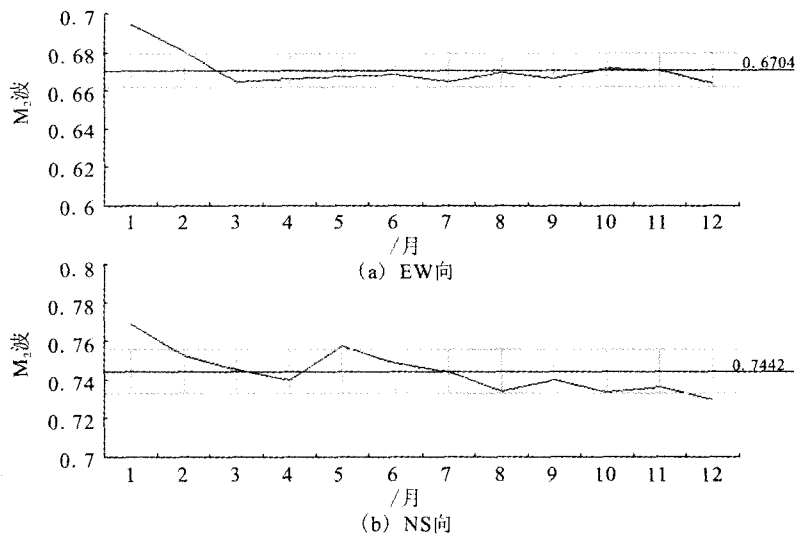


图 2 水管倾斜仪 γ_{M_2} 值月值曲线(2007 年)

Fig.2 Curves of monthly γ_{M_2} values of water tilter in 2007.

以上对资料分析表明,乌什台地倾斜观测的潮汐参数的稳定性较好,尤其是EW分向主波 M_2 的 γ_{M_2} 值,最大偏差小于2%,因此为强地震的前兆研究提供了相对平静的背景场。取EW向主波 M_2 的月潮汐分析结果为研究对象,对 γ_{M_2} 值取3点平滑处理后作图,与乌什周围地区的6级以上强震活动进行对比分析(图3)。

理论研究和震例分析表明,强地震前可能引起的 γ 因子异常可能为下降型的负异常。在图3中可以看到2次明显的变化过程:1989年4月到1990年1月, γ_{M_2} 值呈现了一次下降到回复的过程,持续

时间10个月,下降幅度2.3%,其中1989年9月—1990年2月连续6个月低于基值线,回复正常后12个月在100 km范围内发生了6.5级地震;1993年11月到1996年3月又出现同样的变化,持续了29个月,下降幅度3.0%,其中1994年1月—1995年6月持续18个月低于基值,回复后即开始了长达3年的伽师6级强震群活动;2002年5月到2003年7月,又出现持续15个月的下降变化,但最大幅度仅1.7%,在观测误差范围内,并且其后资料中断,尽管2005年2月在100 km内发生了一次6.3级地震,但作为异常判断比较牵强。

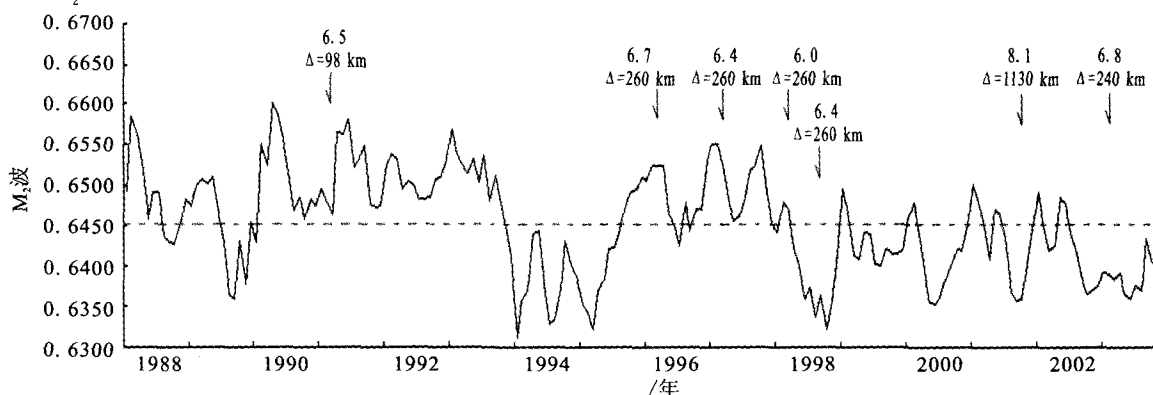


图3 石英倾斜仪EW分向 γ_{M_2} 值变化曲线(经过3点滑动处理)

Fig. 3 Curves of the γ_{M_2} values of quartz tiltmeter in EW direction.

由图3还可以看到,在1999年前后整个 γ_{M_2} 值序列的基值线有一个台阶变化,仅有13%的值在原来的基值以上,因此分两段计算了均值,在图中用浅色线标出。前后两段的均值相差1.3%,若分两段分析,则震前的异常显得更为突出,但1999年后的强震异常很不明显。

4 结论

(1) 乌什台地倾斜观测的潮汐参量精度高、稳定性好,尤其是半主波潮汐参量的观测精度优于0.001、长期稳定性优于2%,为周围地区的地球物理场研究、强地震的预测研究提供了平静的背景信息。

(2) 震例研究表明,周围地区的6级以上地震前,可能记录到了由局部的地壳形变异常而引起的潮汐参量异常变化,但量级比理论计算的要小。

(3) 水管倾斜仪与石英倾斜仪观测的潮汐参量有很好的 consistency,可连续使用;但水管倾斜仪的观测

精度和稳定性明显优于石英摆倾斜仪。

[参考文献]

- [1] 梅世蓉,冯德益.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993:96-127.
- [2] 赵建政,刘辉,张文来,等.1998年8月伽师6.0级、6.6级地震前阿合奇台、乌什台地倾斜异常[J].内陆地震,1999,13(4):357-361.
- [3] 潘振生,刘辉,李士柱,等.乌什、阿合奇台地倾斜在伽师地震前临震异常特征分析[J].内陆地震,2004,18(2):187-192.
- [4] 刘辉,赖爱京,王志宽,等.新疆乌什、阿合奇台地倾斜异常图像与中强地震[J].内陆地震,2005,19(3):136-141.
- [5] 李瑞浩.重力学引论[M].北京:地震出版社,1988:269-270.
- [6] 杨又陵,孙甲宁,高国英,等.新疆地倾地震短期异常特征研究[J].西北地震学报,2006,28(1):64-68.
- [7] 史丽艳,传庆,相书江,等.新疆乌什地震带断裂研究的综合地球物理方法[J].西北地震学报,2007,29(2):156-160.