

孕震过程中重力和倾斜负荷潮的变化*

毛伟建

(中国科学院测量与地球物理研究所)

摘要

地震前孕震区弹性参数发生变化,从而导致地震波速变化。本文根据波速异常现象并利用负荷潮汐研究结果,估算了中国沿海某些地区在孕育一次七级地震时 M_s 负荷潮汐所引起的重力和倾斜的变化。发现重力变化甚微,倾斜变化可观。建议在确定地震重点区的沿海进行一些倾斜潮汐观测。

一、引言

地球除受太阳和月亮所施加的体力外,还受到表面变化着的负荷的作用(这种变化着的负荷主要指海潮),从而使地球产生负荷潮汐。负荷潮汐比太阳和月亮所引起的固体潮汐更能引起地球物理学界的注意。主要原因是固体潮汐对地球结构不敏感,对于不同的地球模型计算出来的勒夫数只有微小的差别^[1]。而负荷潮汐则不然,它对地球结构很敏感,特别对地壳和上地幔结构更是如此^[2]。因此,我们就可利用负荷潮汐的性质进行一些地球物理方面的研究。

目前,有相当多的地震学者认为,在地震发生前存在应力在未来震源区集中的过程,称做孕震过程。当这一过程发展到一定阶段时,孕震区内介质的弹性结构就会发生变化,从而导致波速发生一定的变化。根据 Scholz^[3] 等人的理论,在孕震区主要是纵波速度 V_p 变化,其变化最大幅度比正常值下降 15%,而横波速度 V_s 基本不变。本文主要根据这一理论,利用负荷潮汐研究结果,从理论上探讨在孕育一次大地震时,重力和倾斜是否在地面上有异常反映,反映的量级究竟有多大。

二、格林函数的变化

格林函数是地球对表面单位点质量负荷的响应。我们假定地球是球对称的,是遵从各向同性应力—应变胡克定律的弹性体。由弹性力学的平衡方程

$$\operatorname{div} \bar{\Sigma} + \rho \mathbf{F} = 0 \quad (1)$$

和泊松方程

* 1983年1月24日收到

$$\nabla^2 \psi = 4\pi G \left(\rho_0 \Delta + u \frac{d\rho_0}{dr} \right) \quad (2)$$

可得到六个一阶齐次线性方程组^[2]为

$$\frac{d}{dr} Y = \tilde{A} Y \quad (3)$$

式中 $Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)^T$, A 为一个六阶方阵.

假设一个单位点质量负荷作用在地面上,于是根据此边界条件和(3)式,采用某种地球模型就可求出一组负荷勒夫数 h'_n, k'_n, l'_n . 本文是采用目前较新的 G-D1066A 地球模型得到一组负荷勒夫数^[2],见表 1.

有了负荷勒夫数就可利用下式求出相应的重力和倾斜格林函数^[4].

$$\Delta g = \frac{g}{m} \sum_{n=0}^{\infty} [n + 2h'_n - (n+1)k'_n] P_n(\cos \theta) \quad (4)$$

$$t = -\frac{1}{m} \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n - h'_n) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n(\cos \theta) \quad (5)$$

(4)、(5)式括号中的第一项是直接引力的贡献,后面二项是由地球的弹性形变所产生的,记为 g^E, t^E . m 是地球的质量, θ 是负荷到测站的角距. 由(4)、(5)式引进一些勒让德求和式并利用负荷勒夫数的性质就可得到重力和倾斜格林函数^[9],见表 2. 有了格林函数只需沿海域对海潮积分就可得到重力和倾斜负荷潮汐值.

表 1 负荷勒夫数 (G-D1066A 模型)

n	$-h'_n$	$-k'_n$	l'_n	$-nk'_n$	nl'_n
0	0.1337	0	0	0	0
1	0.2900	0	0.1130	0	0.1130
2	1.1511	0.3364	0.0358	0.6728	0.0716
3	1.1259	0.2029	0.0798	0.6087	0.2394
4	1.0934	0.1351	0.0621	0.5404	0.2484
5	1.1111	0.1047	0.0461	0.5235	0.2305
6	1.1738	0.0902	0.0386	0.5412	0.2316
8	1.324	0.0762	0.0315	0.6096	0.2520
10	1.4747	0.0686	0.0284	0.6860	0.2840
18	1.9797	0.0531	0.0242	0.9558	0.4356
25	2.3073	0.0451	0.0228	1.1275	0.5700
32	2.5524	0.0388	0.0213	1.2416	0.6816
56	3.0564	0.0251	0.0162	1.4056	0.9072
100	3.5703	0.0143	0.0102	1.4300	1.0200
180	4.3439	8.07×10^{-3}	5.47×10^{-3}	1.4526	0.9846
325	5.7488	5.36×10^{-3}	2.91×10^{-3}	1.7420	0.9458
425	6.7022	4.86×10^{-3}	2.56×10^{-3}	2.0655	1.0880
550	7.8181	4.59×10^{-3}	2.60×10^{-3}	2.5245	1.4300
750	9.2928	4.27×10^{-3}	2.84×10^{-3}	3.2025	2.1300
1000	10.436	3.71×10^{-3}	2.80×10^{-3}	3.7100	2.8000
1800	11.346	2.15×10^{-3}	1.90×10^{-3}	3.8700	3.4200
3000	11.351	1.32×10^{-3}	1.14×10^{-3}	3.9600	3.4200
10000	11.369	4.00×10^{-4}	3.43×10^{-4}	4.0000	3.4300

表 2 格林函数 (G-D1066A 模型) 外加负荷 1 克

ϕ 度	$\times 10^{17}(a\phi)$ g^E	$\times 10^{11}(a\phi)^2$ t^E	ϕ 度	$\times 10^{17}(a\phi)$ g^E	$\times 10^{11}(a\phi)^2$ t^E
0.0001	-196.44	77.39	6.0	-10.20	6.81
0.001	-195.02	77.39	7.0	-9.315	5.74
0.01	-181.61	77.28	8.0	-8.704	4.97
0.02	-169.47	76.87	9.0	-8.245	4.54
0.03	-158.70	76.53	10.0	-7.858	4.32
0.04	-146.34	76.31	12.0	-7.215	3.93
0.06	-120.00	73.65	16.0	-6.336	3.62
0.08	-98.72	69.31	20.0	-5.586	3.71
0.10	-81.08	62.82	25.0	-4.694	3.81
0.12	-67.85	55.44	30.0	-3.755	3.83
0.16	-50.77	38.97	40.0	-1.790	3.94
0.20	-42.27	25.16	50.0	-0.022	3.11
0.25	-38.12	15.87	60.0	1.275	1.32
0.30	-36.73	14.18	70.0	1.940	-0.87
0.40	-35.42	14.30	80.0	1.935	-3.14
0.50	-34.71	16.02	90.0	1.338	-5.14
0.60	-33.42	18.10	100.0	0.343	-6.51
0.80	-30.96	17.27	110.0	-0.860	-7.17
1.00	-29.04	17.38	120.0	-2.164	-7.37
1.20	-27.15	17.13	130.0	-3.529	-7.30
1.60	-23.99	16.27	140.0	-4.932	-7.02
2.00	-21.35	15.20	150.0	-6.314	-6.44
2.50	-18.66	13.81	160.0	-7.576	-5.26
3.00	-16.53	12.44	170.0	-8.618	-3.15
4.00	-13.47	9.93	180.0	-9.399	0
5.00	-11.52	8.11			

C. G. S 单位制, a 为地球半径, ϕ 为离负荷角距。

由弹性理论知介质中纵横波的速度分别为

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

式中 λ, μ 为拉梅参数, ρ 为介质密度。

根据 Scholz 等人的理论,在波速异常区 V_p 下降最大幅度为原来的 15%, V_s 基本不变。因为在地震孕育期应力积累主要使得拉梅参数发生变化,介质密度变化很小,所以纵波速度 V_p 的变化可看成主要是由于 λ 变化而引起的。设变化后的 λ 为 λ_1 ,于是可由下式

$$1 - \frac{\sqrt{\lambda_1 + 2\mu}}{\sqrt{\lambda + 2\mu}} = 15\%$$

求出地壳中每一层的 λ_1 ,从而得到变化后的地壳介质。然后按上面所讲的方法对变化后的地球模型从新求解得到一组地壳变化后的负荷勒夫数和格林函数,分别见图 1 和图 2。

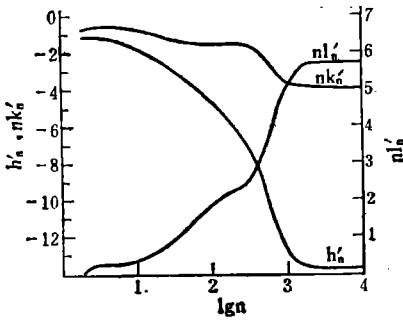


图 1 地壳变化后的负荷勒夫数

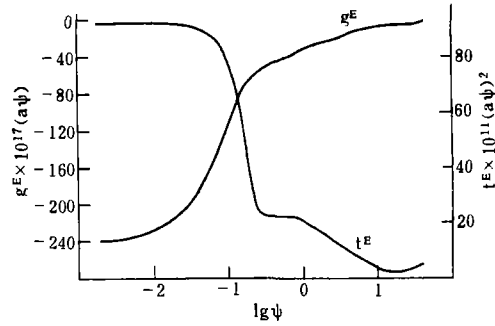


图 2 地壳变化后的格林函数

三、孕震前后重力和倾斜的变化

在图 2 中所给出的重力和倾斜格林函数是采用改变后的地壳模型,它只是对波速异常区内有效,在波速异常区以外,海潮对于震中那一点的影响在孕育地震前后是一样的,所以我们只需求出地壳变化前后波速异常区内海潮对震中的重力和倾斜的影响,然后相减就得到一次大地震孕育时重力和倾斜的变化。

由波速异常区半径与震级的经验公式^[6]

$$M = -0.4 + 3.4 \lg r \text{ (公里)} \pm 0.7$$

可求出相应不同震级的波速异常区域 s 。上式 M 为震级, r 为异常区最大半径。有了 s 然后利用公式^{[4][7]}

$$\Delta g = -\frac{G}{a^2} \int \frac{\sigma(\varphi', \lambda')}{4 \sin(\phi/2)} ds' + \int \sigma(\varphi', \lambda') g^E(\phi) ds' \quad (6)$$

$$\frac{\xi}{\eta} = \int \frac{\sigma(\varphi', \lambda') \cos(\phi/2)}{4m \sin^2(\phi/2)} \frac{\cos A}{\sin A} d\omega' + \int \sigma(\varphi', \lambda') t^E(\phi) \frac{\cos A}{\sin A} ds' \quad (7)$$

沿异常区域内的海潮作褶积积分。

式中 G 是引力常数, a 是地球半径, Δg , ξ 和 η 分别是由负荷产生的重力分量, 南北倾斜分量和东西倾斜分量, $\sigma(\varphi', \lambda')$ 是负荷面密度, A 是由震中起量到负荷 $\sigma(\varphi', \lambda')$ 处的方位角, ϕ 是震中到负荷的角距, g^E , t^E 由表 2 和图 2 给出。

$$\text{负荷面密度 } \sigma(\varphi', \lambda') = \rho H(\varphi', \lambda', t)$$

ρ 为海水密度, H 为潮高, 对 M_2 海潮

$$H_{M_2}(\varphi', \lambda', t) = H(\varphi', \lambda') \cos[\omega t + X(t_0) + \alpha(\varphi', \lambda')]$$

ω 为 M_2 波的角频率, $X(t_0)$ 为起算时刻 M_2 波的相位, α 为相位滞后。

将 $\sigma(\varphi', \lambda')$ 代入 (6) 和 (7), 根据海潮图并利用数值积分可得到震中处对异常区域内海潮的响应为

$$\Delta g = A_1 \cos[\omega t + X(t_0) + \delta_1]$$

A_1 为震中重力负荷潮汐振幅, δ_1 为相位滞后。对于倾斜也可得到类似的结果。

海潮图中给出了不同经纬度处的潮高和相位滞后。本文采用我国近海的 M_2 波海潮

图^[4]分别计算了我国沿海地区,如海城,唐山,青岛等地如果孕育一次七级地震时,重力和倾斜的变化,结果见表-3.

表 3 重 力 分 量

测 站	变 前		变 后		变 化	
	振 幅 (μgal)	相 位 (°)	振 幅 (μgal)	相 位 (°)	振 幅 (μgal)	相 位 (°)
海 城	0.77	292.0	0.87	290.7	0.10	-1.3
唐 山	0.19	131.6	0.21	129.5	0.02	-2.1
青 岛	2.84	-150.7	3.15	-150.8	0.31	-0.1
上 海	1.60	226.1	1.70	225.5	0.10	-0.6
泉 州	1.32	49.7	1.55	49.8	0.23	0.1
北 京	0.0108	92.0	0.0113	92.0	0.0005	0

南 北 倾 斜

	(ms)	°	ms	°	ms	°
海 城	10.93	277.7	14.08	277.2	3.15	-0.5
唐 山	2.50	94.3	2.98	93.9	0.48	-0.4
青 岛	20.42	-162.5	25.55	-161.5	5.13	1.0
上 海	5.71	3.2	6.26	3.5	0.55	0.3
泉 州	16.04	34.9	20.41	35.9	4.37	1.0
北 京	0.054	91.6	0.057	91.6	0.003	0

东 西 倾 斜

海 城	9.39	94.0	11.41	94.1	2.02	0.1
唐 山	1.69	336.9	1.90	335.0	0.21	-1.9
青 岛	27.20	35.0	33.68	34.3	6.48	-0.7
上 海	14.88	44.3	17.41	42.6	2.53	-1.7
泉 州	15.00	255.8	19.14	253.7	4.14	-2.1
北 京	0.066	272.0	0.069	272.0	0.003	0

四、结 果 分 析

1. 潮汐因子的变化

我们知道潮汐因子与地球内部介质有密切的关系,分析它们的变化,为研究地球的弹性性质,探索地震前兆提供了途径.

所谓潮汐因子就是潮汐观测振幅与固体潮理论振幅之比. 固体潮理论值就是刚体地球对日月引潮力的响应. 对 M_2 潮波有公式^[8]

$$\left. \begin{aligned} \Delta g &= C'K\cos^2\varphi\cos[\omega t + X_1(t_0)] \\ \xi &= \frac{1}{2}CK\sin 2\varphi\cos[\omega t + X_2(t_0)] \\ \eta &= CK\cos\varphi\cos[\omega t + X_3(t_0)] \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中 $C' = 82.26$ 微伽, $C = 0''0173172$

$K = 0.90812$

φ 为震中的地心纬度

$\omega = 28.9841042 \text{ 度/小时}$

由(8)可求出 M_2 潮汐的理论振幅 A_2 , 然后利用表 3 中由于孕育地震所引起的振幅变化, 两者之比就是潮汐因子的变化(见表 5)。

2. 振幅相对变化

我们可求出固体潮汐与负荷潮汐在地面一点处总的潮汐值。固体潮汐等于潮汐因子乘上潮汐理论值, 对 G-D1066A 模型, 重力潮汐因子 $\delta = 1.157$, 倾斜潮汐因子 $\gamma = 0.69$ 。负荷潮汐是在全球海潮作用下产生的, 由 (6), (7) 式对全球海潮作褶积积分得到。见表 4。

设总的潮汐值为 $A \cos(\omega t + X + \varphi)$, 因此由下式

$$A \cos(\omega t + X + \varphi) = A'_1 \cos(\omega t + X + \delta'_1) + A'_2 \cos(\omega t + X)$$

解出 $A = \sqrt{(A'_2 + A'_1 \cos \delta'_1)^2 + (A'_1 \sin \delta'_1)^2}$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{A'_1 \sin \delta'_1}{A'_2 + A'_1 \cos \delta'_1} \right)$$

表 4 负 荷 潮 汐

测 点	重 力 分 量		南 北 倾 斜		东 西 倾 斜	
	振 幅 (μgal)	相 位 ($^\circ$)	振 幅 (ms)	相 位 ($^\circ$)	振 幅 (ms)	相 位 ($^\circ$)
海 城	1.03	144.2	11.41	97.3	9.12	279.8
唐 山	0.42	195.3	2.30	282.8	1.72	174.8
青 岛	1.36	204.7	14.17	214.1	14.98	82.0
上 海	2.34	98.8	7.56	155.4	13.56	242.9
泉 州	2.60	71.56	19.83	14.4	28.43	222.0
北 京	0.42	196.4	0.23	323.5	0.28	157.4

表 5

测 点	潮汐理论振幅			潮汐因子变化			潮汐总振幅			潮汐相对变化		
	Δg (μgal)	ξ (ms)	η (ms)	$\Delta \delta$	$\Delta \gamma_\xi$	$\Delta \gamma_\eta$	Δg (μgal)	ξ (ms)	η (ms)	Δg 相	ξ 相	η 相
海 城	43.24	7.76	11.96	2.3×10^{-3}	0.406	0.169	49.20	12.00	13.32	1.9×10^{-3}	0.262	0.152
唐 山	44.84	7.70	12.18	4.4×10^{-4}	0.062	0.017	51.47	6.25	6.69	2.0×10^{-3}	0.077	0.031
青 岛	61.56	5.99	14.28	5.0×10^{-3}	0.856	0.453	69.99	10.99	19.04	4.4×10^{-3}	0.466	0.340
上 海	54.86	6.94	13.48	1.8×10^{-3}	0.079	0.187	63.16	3.80	12.48	1.6×10^{-3}	0.145	0.203
泉 州	48.90	7.48	12.72	4.7×10^{-3}	0.584	0.325	57.45	24.87	22.68	4.0×10^{-3}	0.176	0.182
北 京	43.95	7.74	12.06	1.1×10^{-3}	3.9×10^{-4}	2.5×10^{-4}	50.45	5.53	8.06	9.9×10^{-6}	5.4×10^{-4}	3.7×10^{-4}

式中 $A'_2 = A_2 \begin{pmatrix} \delta \\ \gamma \end{pmatrix}$, A'_1 和 δ'_1 是负荷潮汐的振幅和相位滞后, A 和 φ 是总潮汐的振幅和相位滞后。

如果用表 3 中孕震引起的振幅变化比 A 就得到地面上的相对变化, 见表 5。

五、结 论

根据上述的计算结果可得如下几点结论:

1. 由表 5 可看出, 在目前仪器精度的范围内, 重力可能很难反映出地震前兆, 而倾斜在沿海地区还是大有希望的, 它的变化将更能反映出整个孕震区介质弹性参数变化, 而不仅限于某些线段。

2. 各地倾斜潮汐变化与海潮图^[4]结构很有关系, 如在海城、青岛、上海、泉州, 由于海潮变化幅度大, 所以前兆反映也明显, 其它几处则反映较弱一些。

3. 在离海岸较远的地方(150 公里以外), 倾斜也难以反映出地震前兆, 这主要是因为倾斜随距离衰减很快的缘故。

4. 由表 3 可看出, 相位变化较小。

综上所述, 为了节省人力物力, 有的放矢, 合理布局地震预报手段, 我们认为: 在确定地震重点区的沿海地区进行一些倾斜潮汐观测可能是有用的。

本文是在某些假定下, 根据地球模型进行理论计算的, 难免有些计算结果与实际观测不一致, 这就需要通过实践来检验。

本文在写作过程中得到方俊先生和许厚泽先生的指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] P. Melchior, The tides of the planet earth, Pergamon Press, 1978.
- [2] 毛伟建, 负荷勒夫数的理论计算, 测量与地球物理集刊, 第 5 号, 1983.
- [3] C. H. Scholz, L. R. Sykes and Y. P. Aggarwal, Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, **181**, 4102, 803—809, 1973.
- [4] 许厚泽等, 海洋潮汐对重力和倾斜潮汐观测的影响, 中国科学院测量与地球物理研究所专刊, 第 4 号, 1981.
- [5] 毛伟建, 地球表面质量负荷的静态响应, 地球物理学报, **27**, 1, 74—83, 1984.
- [6] 冯德益, 地震波速异常, 地震出版社, 1981.
- [7] 许厚泽等, 海洋潮汐对重力潮汐观测的影响, 地球物理学报, **25**, 2, 120—129, 1982.
- [8] 冯锐, 地倾斜与地震, 地震出版社, 1978.

THE VARIATIONS OF THE GRAVITY AND TILT LOADING TIDE IN SEISMOGENIC PROCESS

MAO WEIJIAN

(Institute of Geodesy and Geophysics, Academia Sinica)

Abstract

The elastic parameter variations within seismic source region prior to an earthquake result in variations of the seismic wave velocity. In this paper, on the basis of the phenomenon of wave velocity anomaly, before an earthquake of $M = 7$, the distortion of the Earth's gravity and tilt by the M_2 loading tide at some places near the coastline of China have been estimated by means of the results of the loading tide studies. We showed that the distortion of the gravity is very little and that of the tilt is observable. It is suggested that tilt observations should be done in the seismic active areas adjacent to the sea.

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA