

南极中山和长城站重力潮汐观测研究^{*}

徐建桥 郝兴华 孙和平 吕纯操

(中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学开放实验室)

摘要 利用 3 台 LaCoste-Romberg 型弹簧重力仪(G-589、ET-20 和 ET-21)在南极中山站和长城站的长期重力潮汐观测资料,在武汉国际重力潮汐基准上精密测定了中山站和长城站的重力潮汐参数,其中主波振幅因子的标准偏差优于 0.5%。各潮波的观测振幅在中山站比在长城站的小得多,两站周日潮(O_1)的观测振幅因子相差约 7%,而半日潮(M_2)的观测振幅因子相差超过 40%,气压和温度等气象因素的变化对观测结果的影响很明显。海潮负荷对两台站潮汐观测的影响非常显著,采用 Schwiderski 全球海潮模型对观测结果作海潮负荷重力改正。结果表明,经海潮改正后,各潮波的观测残差有较大幅度的减小,但是,由于采用的海潮模型没有顾及台站近区的海潮负荷效应,所以, O_1 波的振幅因子对相应理论潮汐模型值之间存在大约 4%(中山站)和 9%(长城站)的偏差。

关键词 南极 中山站和长城站 重力潮汐观测 国际重力潮汐基准 理论潮汐模型

中图分类号: P223.9 **文献标识码:** A

引言

地表重力固体潮的观测和研究是探讨整个地球在日月引潮力作用下,地表的形变和重力场潮汐变化的特征。地球的这些变化与地球的内部构造、形状和介质流变特征有关(Wahr, 1981; Dehant, 1987)。理论和实际观测研究表明,周日和半日潮波的振幅和潮汐参数随纬度不同存在较大的差异(Dehant, 1987; 方俊, 1984; 孙和平等, 1998)。图 1 直观地描述了 O_1 波和 M_2 波的理论振幅和理论振幅因子对纬度的依赖关系,各潮波的理论振幅在极点为 0(图 1a),振幅因子随纬度增加稍有减小(图 1b)。重力场的非潮汐时间变化主要与局部的环境变化有关。由于南极台站处于特殊的地理位置和自然环境,在该地区重力场的定点长期观测,对我们了解重力潮汐因子的纬度依赖关系,建立全球重力潮汐实测模型,探讨南极地区地壳的构造、南大洋的海平面变化以及南极地区的大气和海洋潮汐与重力场的耦合机制具有非常重要的意义。

我国在南极地区的重力固体潮观测和研究始于 1988 年。1988 年 2 月~1989 年 3 月,采用一台 LaCoste-Romberg(LCR) G 型重力仪(G-589),在位于西南极乔治王岛的长城站(62.22°S , 58.97°W)作连续定点重力观测;1991 年 3 月~1993 年 2 月,采用一台 LCR ET

^{*} 国家自然科学基金(49925411 和 49774223)和中国科学院(KZCX2-106 和 KZ951-A1-205-02)联合资助。
2000-07-11 收到初稿,2001-03-12 收到修改稿并决定采用。

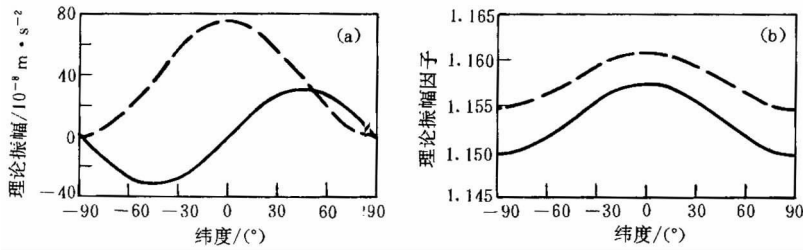


图 1 O_1 波(实线)和 M_2 波(虚线)的理论振幅(a)和理论振幅因子(b)
对纬度(北纬为正)的依赖关系

型重力仪(ET-20)在南极中山站(69.370 6°S, 76.364 5°E, 高程 21 m)作长期重力潮汐观测. 初步测定了两台站的重力潮汐参数(吕纯操等, 1991; 郝兴华等, 1995), 观测结果与理论潮汐模型相差较大(约 7%). 自 1994 年开始, 南极中山站的重力潮汐观测改用 LCR ET-21 重力仪. 所有这些仪器均在武汉国际重力潮汐基准站上作过格值标定和长期定点观测, 从而可以保证我们在南极的重力潮汐观测统一在国际标准上.

本研究将综合 G-589、ET-20 和 ET-21 在南极长城站和中山站的长期观测资料, 利用最新的武汉国际重力潮汐基准值(许厚泽等, 2000), 精密确定南极中山和长城站的重力潮汐参数, 为该地区的大地测量和固体地球物理其它领域的研究, 特别是利用重力资料反演该地区地壳及上地幔构造方面的研究提供参考.

1 南极地区重力潮汐观测到武汉国际重力潮汐基准的归算

通过与比利时、英国和德国等国家广泛的国际合作以及国内多台仪器的对比观测和研究, 宋兴黎和毛慧琴(1991)利用多台高精度重力仪在武汉台长期、定点和对比观测结果, 初步确定了武汉重力潮汐基准值, 其中包括 4 个主要潮波 O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 的潮汐参数(包括重力振幅因子 δ 和相位差 $\Delta\varphi$). 许厚泽等(2000)利用超导重力仪长期观测资料, 对该基准进一部精化, 得到了更完善、更精确的武汉国际重力潮汐基准值. 该基准值与 Dehant 非弹性地球潮汐理论模型符合得相当好, 振幅因子的偏差小于 0.3%.

我们用于南极地区重力潮汐观测的 3 台仪器均在武汉基准站作过长期重力潮汐观测. 观测结果表明, 这些仪器都具有很好的稳定性. 表 1 给出了武汉基准站的重力潮汐基准值及这 3 台仪器在武汉基准站的观测结果(毛慧琴等, 1989; Hsu *et al.*, 1989).

表 1 武汉国际重力潮汐基准值及有关仪器在武汉基准台的观测结果

仪器	O_1 波		K_1 波		M_2 波		S_2 波	
	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
G-589	1.199 5	-3.30	1.177 5	-2.64	1.189 9	-2.97	1.189 2	-2.78
ET-20	1.191 5	-0.55	1.161 8	-0.69	1.179 4	-0.86	1.169 3	-0.63
ET-21	1.189 8	-0.48	1.167 4	-0.65	1.186 8	-0.66	1.187 4	-0.37
基准值	1.178 0	-0.31	1.152 2	-0.46	1.175 1	-0.28	1.171 0	-0.14

由于 O_1 波和 M_2 波的观测受其它因素的干扰较小, 在此, 我们将它们分别作为周日和

半日潮波观测的标准，通过武汉台基准值与观测结果的比较，得到各仪器观测结果归算到武汉国际重力潮汐基准的归算因子 F_d 和 F_{sd} (表 2)。

比较表 1 中各仪器观测的相位差和基准值，很容易发现 ET-20 和 ET-21 观测的各主要潮波相位差与相应的基准值相差不大，基本在观测的误差范围内；G-589 存在比较明显的响应滞后，因此，该仪器观测获得的长城站各潮波的相位差必须做响应时间滞后改正。

我们在南极中山和长城站的重力潮汐观测资料均利用长图记录仪作模拟记录，通过人工量图每小时读一个重力值，记录格值采用定期的测量螺杆位移标定方法得到。从格值标定实验结果看，仪器的工作状态相当稳定，标定因子互差一般在 1% 以内。各仪器的记录格值乘以表 2 给出的相应的归算因子，即可将南极地区的重力潮汐观测归算到武汉国际重力潮汐基准系统。

表 2 观测结果归算到武汉国际重力潮汐基准的归算因子

归算因子	G-589	ET-20	ET-21
F_d	0.982 076	0.988 670	0.990 082
F_{sd}	0.987 562	0.996 354	0.990 142

2 中山站的重力潮汐观测结果

1991 年 3 月~1998 年 2 月，分别利用 ET-20 和 ET-21 重力仪在南极中山站记录到 1 526 天的重力场时间变化观测资料，采用经典的 Venedikov 调和分析方法对重力潮汐观测资料作调和分析。前 28 个月为 ET-20 从 1991 年 3 月~1993 年 12 月的观测结果；后 24 个月为 ET-21 分别于 1995 年和 1997 年的观测结果。图 2 描述了采用每个月观测资料获得的 4 个主波(O_1 ， $P_1S_1K_1$ ， S_2K_2 和 M_2)的振幅因子。

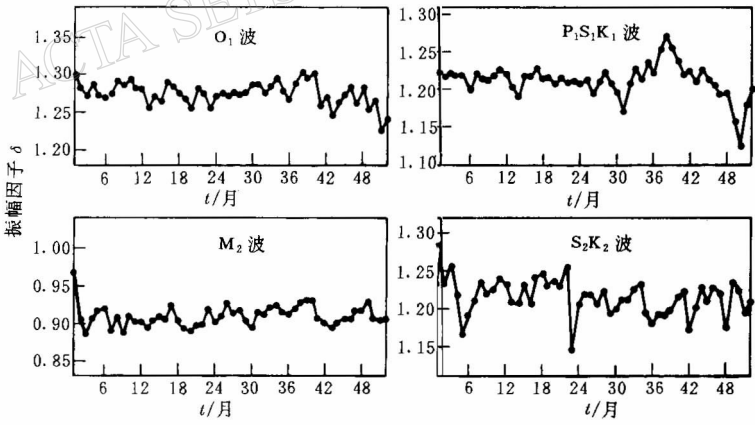


图 2 南极中山站 4 个主要潮波振幅因子的扰动

分析 4 个主波的逐月观测结果，我们发现 4 个主要潮波振幅因子随时间变化的相关性非常弱，没有明显的规律性。引起重力振幅因子变化的原因除地球内部的物理变化外，主要是由于局部环境因素的干扰所致：① 冰雪负荷变化的影响。中山站距南极大冰盖约 3 km，大冰盖的部分融化或加载对中山站的重力潮汐观测产生极大的影响；② 海洋的影响。中山站距海不足 10m，除海潮的负荷效应外，涨、落潮时，海水对海岸的冲击将产生海岸

附近的地脉动,从而导致台站重力记录的扰动.同时,台站沿岸附近(大约40 km以内)海水每年定期的凝固及海冰的定期融化,对台站近区的海洋潮汐存在一定的影响.这种影响必将耦合在重力固体潮的观测之中;③ 大风暴的影响.南极常年有6级以上的大风,有时出现10级以上的大暴风,这些对记录都有很大的影响;④ 大气和温度的影响. Kanao 和 Sato(1993)利用东南极 Syowa 站的重力潮汐观测与台站气压、温度变化的相关分析,得到大气和温度的重力导纳值分别为 $-0.291 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{hPa}$ 和 $0.575 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/^{\circ}\text{C}$,气压和温度变化具有明显的日周期和半日周期;而在南极地区气压和温度的变化幅度都很大,潮汐(特别是半日潮)信号的振幅却比较小.因此,气压和温度的影响将使得重力潮汐观测的信噪比大幅度降低,从而导致重力潮汐参数的观测不稳定,这就是 $P_1S_1K_1$ 和 S_2K_2 波比 O_1 和 M_2 波振幅因子扰动幅度大得多的主要原因.从图2看出,在整个观测期间,除极少数几个月外, O_1 和 M_2 波振幅因子均相当稳定,其扰动幅度不超过 $\pm 4\%$ 和 $\pm 2\%$.表明仪器工作的稳定性较强,观测结果具有极高的可靠性.

分别对 ET-20 和 ET-21 的所有观测资料作调和分析.以各潮波实际观测的振幅因子标准偏差的倒数作为权函数,对两台仪器观测的潮汐参数作加权平均,得到中山站的潮汐参数.表3列出了南极中山站各潮波的观测振幅、振幅因子 δ 和相位差 $\Delta\varphi$ 及其标准偏差.

采用多台观测仪器的长期重力潮汐观测资料,可以有效地减小各仪器系统偏差对观测结果的影响,但由于局部和全球的海洋和大气负荷及局部温度的影响和重力潮汐信号的所有或某些潮波的频率始终非常接近,因而不可避免地耦合在重力潮汐观测之中.观测结果表明,在南极中山站, O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 波的观测振幅分别为 24.9388×10^{-8} , 34.0948×10^{-8} , 8.6898×10^{-8} 和 $5.2625 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,比长城站相应潮波的观测振幅分别小41%、34%、

表3 南极中山站的重力潮汐参数

潮波	观测振幅 $/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	振幅因子 δ		相位差/ $^{\circ}$	
		结果	标准差	结果	标准差
σ_1	0.869 0	1.243 02	0.083 130	5.164	3.858
Q_1	4.890 9	1.305 21	0.016 69	2.429	0.736
O_1	24.938 8	1.275 88	0.003 18	1.619	0.143
M_1	2.249 5	1.246 20	0.035 05	1.248	1.606
π_1	0.710 1	1.252 45	0.107 15	-1.036	4.891
P_1	11.783 7	1.229 50	0.006 52	0.969	0.304
S_1	0.227 5	1.423 40	0.388 35	19.455	15.617
K_1	34.094 8	1.213 27	0.002 24	0.994	0.106
Ψ_1	0.339 6	1.481 32	0.268 07	4.328	10.785
Φ_1	0.465 7	1.129 43	0.145 76	-6.846	7.386
J_1	1.871 2	1.210 78	0.038 32	1.085	1.820
OO_1	1.054 8	1.227 51	0.084 82	2.533	4.067
$2N_2$	0.350 5	0.993 54	0.066 78	-23.222	3.879
N_2	1.701 8	0.910 24	0.013 50	-17.990	0.854
M_2	8.689 8	0.910 61	0.002 58	-4.732	0.163
L_2	0.281 9	0.907 48	0.086 70	2.494	5.888
S_2	5.262 5	1.215 12	0.005 59	13.485	0.263
K_2	1.256 1	1.193 30	0.023 22	13.801	1.118
M_3	0.074 8	1.081 23	0.220 45	85.758	11.735
周日频段标准偏差		半日频段标准偏差		1/3 日频段标准偏差	
$3.62 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$		$1.48 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$		$0.99 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$	

65%和55%,重力振幅因子分别小7%、6%、42%和20%.海洋潮汐负荷使周日波的振幅因子增大约14%,使半日波的振幅因子减小约14%.由于 S_2 波的振幅很小,气压和温度对它的影响非常显著,这也是 S_2 和 M_2 波的观测结果存在较大差异的主要原因之一.因为周日频段存在较大的环境干扰,尽管周日波的振幅比半日波的振幅大得多,但是主要周日

波和半日波潮汐参数的观测精度在同一量级。在长城站，海洋潮汐负荷分别使周日波和半日波的振幅因子增大约 20%和 30%(表 5)。

3 海潮负荷改正及残差矢量

3.1 残差矢量

1) 各潮波分量的观测残差矢量 **B**(其振幅和相位分别表示为 B 和 β)为该潮波的观测振幅矢量与相应理论模型值的矢量差,其主要贡献来自海洋潮汐的负荷效应。对于 Dehant (1987)非弹性地球潮汐模型,各潮波潮汐参数的虚部都很小,相对于我们在南极的潮汐观测精度可以忽略,在此取其实部作为潮汐参数的理论值。

2) 最终残差矢量 **X**(其振幅和相位分别表示为 X 和 χ)为各潮波分量的观测残差矢量 **B**与海潮负荷在观测点的相应的重力改正值矢量 **L**(其振幅和相位分别表示为 L 和 λ)的矢量差。它反映了观测结果与理论潮汐模型的不符合程度。孙和平等(1999)给出了观测残差矢量 **B**和最终残差矢量 **X**的具体计算公式。

3.2 海潮的负荷改正

由于海洋潮汐与重力潮汐的力源相同、频谱特征相似,因此,在资料的分析处理过程中,海潮的负荷效应与固体潮信号耦合在一起,只能根据负荷理论,采用适当的地球模型和海潮模型计算出海潮负荷的重力改正值矢量 **L**,然后利用矢量减法(各潮波的观测振幅矢量与 **L**的矢量差),获得经海潮改正后各潮波的振幅因子和相位差。

对于南极中山和长城站的重力潮汐观测结果,采用基于 Schwiderski 全球海潮模型得到的海潮负荷的重力改正值和 Dehant(1987)给出的非弹性地球的潮汐理论值,可以计算出 4 个主波的观测残差矢量和海潮改正以后的潮汐参数(表 4, 5)。

表 4 中山站和长城站的观测残差矢量

潮波	中 山 站				长 城 站			
	$B/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\beta/(^{\circ})$	$X/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\chi/(^{\circ})$	$B/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\beta/(^{\circ})$	$X/10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\chi/(^{\circ})$
O_1	2.504 5	16.339 9	0.949 1	8.383 6	6.790 2	10.182 4	3.340 2	10.205 5
K_1	2.377 1	14.407 4	0.992 3	6.731 4	6.567 7	-9.612 1	3.394 8	-3.707 7
M_2	2.473 4	196.837 5	0.942 2	216.799 8	6.922 3	25.401 2	1.747 7	-1.967 6
S_2	1.232 3	84.748 3	0.418 3	68.143 9	2.963 5	-17.769 1	1.506 3	-15.325 8

表 5 中山站和长城站重力潮汐实测模型与 Dehant(1987)理论潮汐模型比较

观测 台站	潮波	观测结果		海潮改正后		理论潮汐模型	
		δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	δ	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
中 山 站	O_1	1.275 88(±0.003 18)	1.619(±0.143)	1.200 5	0.34	1.152 4	-0.02
	K_1	1.213 23(±0.002 24)	0.994(±0.106)	1.166 2	0.20	1.131 2	-0.02
	M_2	0.910 61(±0.002 58)	-4.732(±0.163)	1.078 1	-3.14	1.155 6	-0.02
	S_2	1.215 12(±0.005 59)	13.485(±0.263)	1.194 9	4.30	1.155 6	-0.02
长 城 站	O_1	1.370 59(±0.005 99)	1.630(±0.250)	1.259 9	0.87	1.153 0	-0.02
	K_1	1.293 49(±0.004 42)	-1.210 ((0.190)	1.216 3	-0.26	1.131 9	-0.02
	M_2	1.561 63(±0.004 44)	6.880(±0.160)	1.266 5	-0.17	1.156 4	-0.02
	S_2	1.527 46(±0.005 83)	-4.410(±0.330)	1.346 1	-2.20	1.156 4	-0.02

重力潮汐观测结果与理论模型之间存在差异的主要原因来自全球和局部海洋潮汐的负荷效应. 结果表明, 海洋潮汐对长城站重力潮汐观测的影响比对中山站重力潮汐观测的影响大得多. S_2 波在两站的观测残差矢量 \mathbf{B} 的振幅比其它 3 个主要潮波的观测残差矢量的振幅小得多, 表明在南极地区, 大气的负荷效应在很大程度上抵消了海潮的负荷效应对南极地区 S_2 波观测的影响. 由于南极处于高纬度区域, 固体潮的信号相对较弱, 因此, 气压变化对观测结果(主要是 S_2 波的振幅因子)的影响非常显著. 经全球海潮改正(基于 Schwiderski 全球海潮图)以后, 各潮波最终残差矢量 \mathbf{X} 的振幅明显降低. 在中山站, O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 波最终残差矢量的振幅分别下降了 62%、58%、62% 和 66%; 在长城站, O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 波最终残差矢量的振幅分别下降了 51%、48%、75% 和 49%. 然而, 各潮波的最终残差矢量 \mathbf{X} 的振幅还相当大, 表明 Schwiderski 全球海潮模型对于南极地区还不够完善(由于没有顾及台站近区海域的负荷效应). 中山站各潮波的最终残差矢量的振幅比长城站相应潮波的最终残差矢量的振幅小得多. 其主要原因与两台站的位置有关, 位于南极大陆的中山站显然比位于海岛(乔治王岛)的长城站的重力潮汐观测受台站局部海潮负荷的影响要小.

海潮改正后, 在长城站测定的 O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 波振幅因子与理论潮汐模型值之间分别存在 9%、7%、10% 和 16% 的偏差; 而在中山站测定的 O_1 , K_1 , M_2 和 S_2 波振幅因子与理论潮汐模型值分别相差 4%、3%、7% 和 3%. 这些差异主要来自台站近海的海潮负荷效应. 同时, 局部的大气和温度变化等气象因素对不同的潮波也有不同程度的影响. 研究表明, 气象干扰对 O_1 和 M_2 波的影响很小. 由于南极地区的纬度较高, S_2 波的观测振幅较小, 气压和温度变化在 S_2 波频率上的信号很大, 因此, S_2 波受气象因素的影响非常显著. 这也是长城站测定的 S_2 波振幅因子与理论潮汐模型之间的偏差较大, 而中山站的相对较小的主要原因.

4 结语

通过对中山和长城站的重力潮汐观测资料的分析和对结果的讨论, 我们在武汉国际重力潮汐基准上精密确定了南极地区的重力潮汐参数. 分析表明, 海洋潮汐负荷对南极地区重力潮汐观测的影响很大, 海潮改正的效果非常显著. 由于没有顾及台站近海海潮的负荷效应, 我们得到的重力潮汐参数与理论模型值之间还存在较大的差异. 要更精确地确定中山站和长城站的重力潮汐参数, 还必须消除气压和温度变化对观测的影响, 以及采用更为合理的海潮(包括台站近海)模型.

在南极重力固体潮的观测过程中, 国家海洋局极地考察办公室的领导和工作人员给予了极大的支持和关心; 中国科学院测量与地球物理研究所的刘成恕、郝晓光和刘明等同志为取得观测资料付出了艰辛的劳动; 历次南极考察队的全体同仁提供了许多帮助. 在此一并深表谢意!

参 考 文 献

- 方俊. 1984. 固体潮[M]. 北京: 科学出版社, 53~179
郝兴华, 许厚泽, 吕纯操. 1995. 南极中山站固体潮观测分析[J]. 南极研究, 7(3): 109~112

- 吕纯操, 许厚泽, 郝兴华, 等. 1991. 南极乔治王岛重力潮汐研究[J]. 中国科学, B 辑, (12): 1 319~1 324
- 毛慧琴, 许厚泽, 宋兴黎, 等. 1989. 中国东西重力潮汐剖面[J]. 地球物理学报, **32**(1): 62~69
- 宋兴黎, 毛慧琴. 1991. 武昌重力潮汐基准研究[J]. 地球物理学报, **34**(3): 381~384
- 孙和平, 许厚泽, 罗少聪, 等. 1999. 用超导重力仪的潮汐观测资料研究海潮模型[J]. 测绘学报, **28**(2): 115~120
- 孙和平, 许厚泽, Ducarme B, 等. 1998. 中、比、法三国超导重力仪潮汐观测资料综合对比分析与研究[J]. 科学通报, **43**(13): 1 433~1 438
- 许厚泽, 孙和平, 徐建桥, 等. 2000. 武汉国际重力潮汐基准研究[J]. 中国科学, D 辑, **30**(5): 549~553
- Dehant V. 1987. Tidal parameters for an inelastic earth[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **49**: 97~116
- Hsu H T, Becker M, Groten E, *et al.* 1989. Comparison of gravity tide observations by ET16 and ET21 at Wuchang station of China[J]. *Bull Inf Marees Terrestres*, **104**: 7 379~7 394
- Kanao M, Sato T. 1993. Observations of tidal gravity and free oscillation of the earth with a LaCoste & Romberg gravity meter at Syowa station, east Antarctica[A]. In: Hsu H T ed. *Proc 12th Int Sympos on Earth Tides, Beijing* [C]. Beijing: Science Press, 571~580
- Wahr J M. 1981. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth[J]. *Geophys J R astr Soc*, **64**: 677~703

STUDY OF TIDAL GRAVITY OBSERVATIONS OBTAINED AT STATIONS ZHONGSHAN AND CHANGCHENG, ANTARCTIC

Xu Jianqiao Hao Xinghua Sun Heping Lü Chuncao

(Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy
of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: Based on the international tidal gravity reference values at Wuhan station, the tidal gravity parameters, including the amplitude factors and phase differences are determined accurately by using the observations with three LaCoste Romberg (LCR) gravimeters (G-589, ET-20 and ET-21) at stations Zhongshan and Changcheng in the Antarctic, respectively. The standard deviations of the determined amplitude factors of the main tidal waves are better than 0.5%. The amplitude of each tidal wave observed at zhongshan station is much less than one of the same wave at Changcheng. The differences of amplitude factors in the diurnal band (O_1) at these two stations are less than 7% while those in the semi-diurnal band (M_2) are larger than 40%. The influences of meteorology factors, such as atmospheric pressure and temperature, on the tidal gravity observations are very obvious. The oceanic loading effects on the tidal gravity are also very prominent. It is found that the amplitude of the final residual vector of every tidal wave reduces significantly after oceanic correction based on the Swiderski's global co-tides. However, because the local oceanic loading is not taken into account, the discrepancies of amplitude factors of wave O_1 observed at Zhongshan from the corresponding values of theoretical tidal model are about 4%, and 9% at Changcheng.

Key words: Antarctic; stations Zhongshan and Changcheng; tidal gravity observations; international tidal gravity reference values; theoretical tidal model