DOI:10.14075/j.jgg.2025.01.016
文章编号:1671-5942(2025)12-1304-06

时变导纳值对固体潮分析的影响

龚立卓[1,2]　杨伟伟[1,2]　崔小明[1,2]　孙和平[1,2]

1　中国科学院精密测量科学与技术创新研究院精密大地测量与定位全国重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077
2　中国科学院大学,北京市玉泉路 19 号甲,100049

摘　要:利用 IGETS 网络中中国和欧洲的 5 台超导重力仪的长期观测数据,采用不同气压改正策略,分析导纳值时变性对潮汐参数确定的影响。结果表明,导纳值时变特性会显著影响潮汐参数,对地球自由核章动周期时变特征分析的影响可达 10 个恒星日。顾及导纳值时变特征及全球气压效应改正后的潮波振幅因子与理论值更为接近,这对区域潮汐模型构建及微弱动力学信号分析具有重要参考意义。

关键词:大气导纳值;超导重力仪;潮汐模型;固体潮;自由核章动
中图分类号:P312　　**文献标识码**:A

高精度时变重力测量已经成为研究地球内部物质迁移和变形过程的关键技术手段[1-2]。目前观测精度最高的相对重力仪——超导重力仪(superconductor gravimeter, SG)被广泛应用于研究各种地球物理现象,如固体潮、大气波动、地球自转及部分深部动力学现象等[3]。根据研究目标信号的不同,在处理观测数据时需要尽可能将影响较大的其他信号作为噪声进行剔除。对于 SG 观测资料,大气负荷效应改正一般通过气压传递函数,即导纳值来完成,通常取 $-3\ \mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot hPa^{-1}}$,或计算单一恒定导纳值。但气压变化在时间和空间尺度上非常复杂,因此导纳值会随时间、频率以及台站位置的变化而变化,选择合适的气压导纳值对精确剔除大气影响至关重要[4-5]。基于 SG 长期观测资料确定高精度固体潮汐参数是构建区域潮汐实验模型的基础,因此需要细致分析大气导纳值的时空差异对潮汐参数确定的影响。此外,潮汐参数变化是研究部分动力学过程的重要依据,如与自由核章动(free core nutation, FCN)共振效应相关的固体潮周日潮波潮汐参数的时变特性[6],大气导纳值的时变特性对潮汐参数变化的影响需要准确评估。为此,本文利用不同导纳值策略分析其对确定潮汐参数的影响。

1　数据与方法

1.1　观测数据及预处理

国际大地测量协会旗下的国际地球动力学与潮汐服务(international geodynamics and Earth tide service, IGETS)自 2015 年以来延续全球地球动力学项目(GGP)负责全球 SG 观测网络的数据服务。其中,武汉台站作为我国首个超导重力仪台站已积累了丰富的资料,建立了亚洲唯一的国际重力潮汐基准站,并于 2013 年更换新仪器 OSG-065;丽江台站 OSG-066 海拔高程 2 435 m,已采集超过 10 a 的连续观测资料。本文选择武汉和丽江台站检验导纳值选取对区域潮汐模型构建的影响,考虑到欧洲台站由于环境因素、地理位置等优势在液核共振效应研究中具有更高的精度水平[6],选取欧洲 Bad Homburg、Moxa 和 Strasbourg 等 3 个台站的长期观测资料分析大气导纳的时变对 FCN 周期确定的影响(表 1)。研究数据均采用 IGETS 数据中心提供的 SG 重力观测数据,以及同址同采样的气压观测数据。重力观测数据可以在 IGETS 网站下载,本文选择 Level2 产品中的 1 min 采样数据,降采样至 1 h 后对数据进行预处理。在数据预处理过程中,基于国际地潮中心推荐的 Tsoft 数据预处理软件,利用人机对话方式剔除混合在原始信号中的错误数据,如尖峰、突跳、掉格等;利用该软件计算理论潮,用于修补重力数据的间断;气压数据的间断通过其均值进行补齐。为分别分析全球气压和局部气压的影响,本文采用 EOST(School and Observatory of Earth Sciences)机构提供的全球气压数据,该产品根据气压模型 ERA5 和 MERRA-2 模拟计

收稿日期:2025-01-21
项目来源:国家自然科学基金(42394114, 42174108);湖北省“青年培养计划”项目。
第一作者简介:龚立卓,博士生,主要从事地球自由振荡研究,E-mail: 418029833@qq.com。

算局部、非局部以及全球气压数据(局部和非局部气压之和),采样率可选择 1 h、3 h、6 h,模拟的气压范围可选择台站周围 0.1°和 0.25°。海潮负荷改正采用 Free Ocean Tides Loading Provider 提供的基于海潮模型和褶积积分计算的不同台站重力海潮负荷数据。

表 1　超导重力台站观测资料信息

Tab.1　Data information of SG stations

序号	台站名(仪器型号)	观测周期	观测长度/d
1	武汉(OSG-065)	2013-03-28—2023-02-10	3 606
2	丽江(OSG-066)	2014-06-17—2023-12-10	3 463
3	Bad Homburg(GWR SG-044)	2007-02-13—2016-12-31	3 609
4	Moxa(CD-034)	2000-01-02—2019-12-18	7 290
5	Strasbourg(GWR C026, GWR iOSG23)	1997-02-27—2023-12-31	9 783

1.2　大气导纳和 FCN 参数估算方法

大气变化对重力场的影响来自 2 个方面:1)引力效应,即大气团质量的引力;2)负荷效应,即大气团质量导致地表变形,使得地表物质重新分布,引起重力场发生变化。从重力信号中扣除气压影响有 2 种方式:

1)通过同址同采样率的重力气压观测数据计算导纳值,进而改正气压效应,可采用回归分析计算,也可利用 ETERNA 软件进行计算[7]。该方法最方便、常用,具体见式(1)。值得注意的是,同址气压观测数据仅代表局部气压效应,但研究表明[8],90%以上的全球气压效应来自局部的影响,因此该方法能满足大部分的研究需求。

$$g_{\mathrm{res}} = g_{\mathrm{raw}} - \alpha \cdot p \tag{1}$$

式中,g_{raw} 和 p 分别为原始的重力和气压观测数据;α 为导纳值。

2)通过理论计算全球气压效应。Farrell[9] 提出一种基于大气压力负载潮汐理论的方法,使用全球气压数据、弹性地球模型和格林函数计算大气重力效应和大气负荷引起的重力变化。该方法更加完善,但计算高时间分辨率的大气效应时工作量很大且计算复杂。

通常根据研究需求选择不同的气压改正方式,潮汐参数确定可利用 ETERNA 等调和分析软件,因此主要采用导纳值方法,基于最小二乘原理同时拟合潮汐参数和气压导纳值。该方法无法考虑导纳值时变性的影响,且导纳值方法仅考虑局部大气。Ducarme[10] 采用混合全球气压的校正方法,将实测局域气压效应与通过理论计算的非局域气压效应相加得到合成的混合全球气压,并以欧洲台站为例印证了对于 S_2 潮波,选择全球气压效应更合适。Meurers[11] 认为随时间变化的 4-D 气压模型校正大气是最有效的,但在时间和空间分辨率上受限。

本文采用混合气压的方式,通过实测重力和气压数据计算导纳值,估计局部气压效应及其时变特征,在下载全球气压数据后,将实测局部气压效应加上理论非局部气压效应得到合成的混合全球气压效应。数据处理步骤如下:

1)时变的局部导纳值估计主要有 2 种方法,一是从重力观测数据中扣除理论潮汐,并去除长期趋势,通过小波分解和重构方法对数据进行带通滤波(0.75～12 cpd)。对已扣除理论潮汐的重力观测数据 g 和气压观测数据 p,以 3 个月无重叠的时间段为窗口选择数据,每个时间段都通过回归分析计算随时间变化的导纳值 α。二是通过 ETERNA 软件将原始重力观测数据 g_{raw} 和气压观测数据 p 以 3 个月无重叠的时间段分段计算时变导纳值 α_0(3-m)。

2)全球气压效应根据 EOST 提供的全球气压模型数据,将局部气压替换成实测气压 P_{local},合成全球气压效应数据 P_{global}。

3)根据 2 种局部导纳值估计方法和全球方式的大气重力效应预先改正重力观测序列 g_{raw} 后,再利用 ETERNA 软件单独对改正后的观测序列选择合适的时段作调和分析,获取潮汐参数。

FCN 共振参数(本征频率和共振强度)的确定基于周日潮波重力振幅因子共振公式[12],为减小台站观测资料的系统偏差和局部环境干扰对拟合参数的影响,共振公式中减去精度高且受 FCN 共振影响较小的 O_1 波潮汐信号:

$$\tilde{\delta}(\sigma) - \tilde{\delta}(\sigma_{O_1}) = \frac{\tilde{\alpha}}{\sigma - \tilde{\sigma}_{\mathrm{nd}}} - \frac{\tilde{\alpha}}{\sigma_{O_1} - \tilde{\sigma}_{\mathrm{nd}}} \tag{2}$$

式中,$\tilde{\alpha}$ 为依赖于地球形状和地幔介质流变特征的复共振强度;$\tilde{\sigma}_{\mathrm{nd}}$ 为复本征频率。FCN 参数的确定非常依赖于频率与其最为接近的 ψ_1 波,精确确定 ψ_1 波潮汐因子需要较长观测序列,本文选取经过时变气压导纳改正后的观测序列进行分段调和分析来确定周日潮波潮汐参数。经海潮负荷改正后,基于式(2),利用加权最小二乘法拟合 FCN 的共振强度和本征频率。

2 结果与讨论

2.1 导纳值时变特征

气压在时空尺度上呈现复杂变化，受到温度、湿度及高度等多种因素的影响，大气导纳值会随时间、频率以及台站位置而变化。图 1 为采用不同方法计算的丽江和武汉台站的导纳值。利用 ETERNA 软件调和分析的同时计算导纳值，采用时间窗口分别为 3 个月、1 a 和整段数据，分别对应图中蓝色点线 α_0(3-m)、红色点线 α_0(1-y)和橙色线 α_0(all-time)。结果表明，2 个台站整个时段计算的恒定导纳值 α_0(all-time)分别为 $-3.413\ \mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot hPa^{-1}}$ 和 $-3.251\ \mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot hPa^{-1}}$，而通过 3 个月和 1 a 时间窗口分段计算的导纳值呈现明显的时变性，1 a 窗口获得的年际导纳值波动幅度为 0.5～1.0 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot hPa^{-1}}$，3 个月窗口获得的导纳值呈现更加剧烈的时变特征，变化幅度可达 1～3 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot hPa^{-1}}$。2 个台站的导纳值均存在显著的季节性变化，主要是由于季节性气候是影响大气温度和湿度的关键因素。根据滤波后重力残差和大气数据直接进行回归分析，以 3 个月时间窗口分段计算导纳值 α，结果如图中绿色点线所示，其与 ETERNA 获得的导纳值 α_0(3-m)相比并不完全一致，尤其是丽江台站差异尤为明显。2 种方法的差异主要来源于重力观测序列中固体潮潮波的处理方式，导纳值 α_0(3-m)由 ETERNA 处理所得，输入原始的重力和气压数据后，将气压导纳值、潮汐、长期趋势等作为参数，通过最小二乘法计算所有参数，因此在分析气压导纳时扣除的是调和分析得到的固体潮；而导纳值 α 则是通过 Tsoft 处理所得，计算合成潮汐后从原始重力数据中扣除理论潮汐得到重力残差数据，然后将气压和重力残差数据进行回归分析得到导纳值，扣除的是理论固体潮。由此可见，不同方式、不同时段的导纳值时变特征不可忽视，需要进一步分析导纳值时变性对潮汐参数确定的影响。

2.2 潮汐参数时变影响分析

重力潮汐变化通常可用潮汐参数描述，即无量纲的振幅因子 δ(参考点“真实”地球的重力潮汐变化量与“刚体”地球的重力潮汐变化量之比，为固体潮 Love 数 h 和 k 的线性组合)和相位差 $\Delta\varphi$[13]。为有效分析导纳值变化对潮汐参数的影响，首先利用 2 种方式获得的导纳值 α_0(3-m)和 α(local)对重力数据进行局部气压改正，然后利用 1 a 时间窗口对改正后的重力数据分段采用 ETERNA 进行调和分析。图 2 为丽江和武汉台站采用不同的气压改正

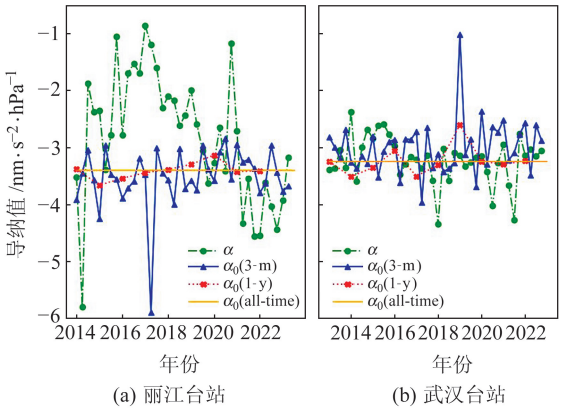


图 1 时变导纳值

Fig. 1 Time varying admittance

与采用单一恒定导纳值 α_0(all-time)改正气压后得到的潮汐参数，可以看出，时变导纳值对于潮汐参数影响显著，其中对于振幅较大的潮波如 O_1、K_1、N_2 和 M_2 等，影响量级约为 0.1‰～0.5‰，特别是部分潮波如 S_2 和 K_2，时变导纳值的影响超过 2‰～5‰；而对于振幅较小的潮波如 ψ_1 和 ϕ_1，时变导纳值的影响可以达到 2%～5%，甚至更高，这些小潮波对于 FCN 参数的拟合非常关键。2 种时变导纳值 α_0(3-m)和 α 对潮汐参数的影响在丽江台站非常显著，主要是由于二者的差异非常显著(图 1)，在武汉台站仅对部分潮波如 P_1 和 K_1 影响显著。在局部气压导纳值 α(local)的基础上，考虑全球气压改正，对重力观测数据进行全球大气效应改正 α(global)，结果如图 2 中红色点线所示。全球效应对潮汐参数的影响主要体现在半日潮波 S_2 处，其他潮波结果差别很小，这可能是因为 S_2 为行星尺度的波，采用局部气压改正会高估该频段上的导纳值(导纳值的绝对值被高估)，导致振幅因子过度改正。此外，图 2 中 α(local)和 α(global)不同时段结果对比显示，全球气压变化对潮汐参数时变性的影响微小。

图 3 为丽江和武汉台站分段调和分析的潮波标准差，可以看出，时变导纳值对大部分潮波的影响量级与调和分析标准差相当，而对 S_2 和 K_2 两个半日潮波则显著大于潮波分析标准差，对于 ψ_1 波，其影响接近 2 倍标准差，这对于 FCN 时变性研究的影响不可忽视。通过不同气压改正方式获得的潮波标准差存在一定差异，特别是丽江台站 2017 年左右的潮波标准差明显偏大，并且采用局部导纳值 α(local)的标准差小于采用 α_0(3-m)的结果。由图 1 可知，导纳值 α_0(3-m)和 α 在 2017 年左右差异最大，这可能与丽江台站的区域环境有关，尤其是年降水因素的差异，导致大气重力效应的复杂变化。

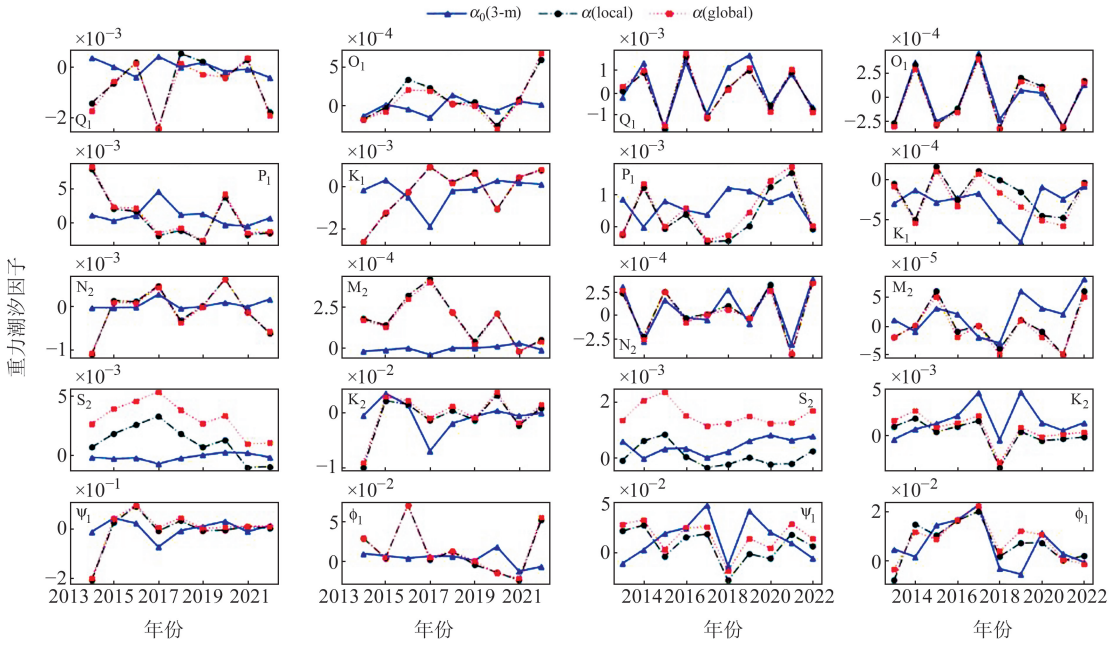


图 2　不同气压修正方法得到的潮汐参数与导纳值 α_0(all-time)气压修正结果对比

Fig. 2　Comparison of tidal parameters obtained by different pressure correction methods and based on admittance α_0(all-time)

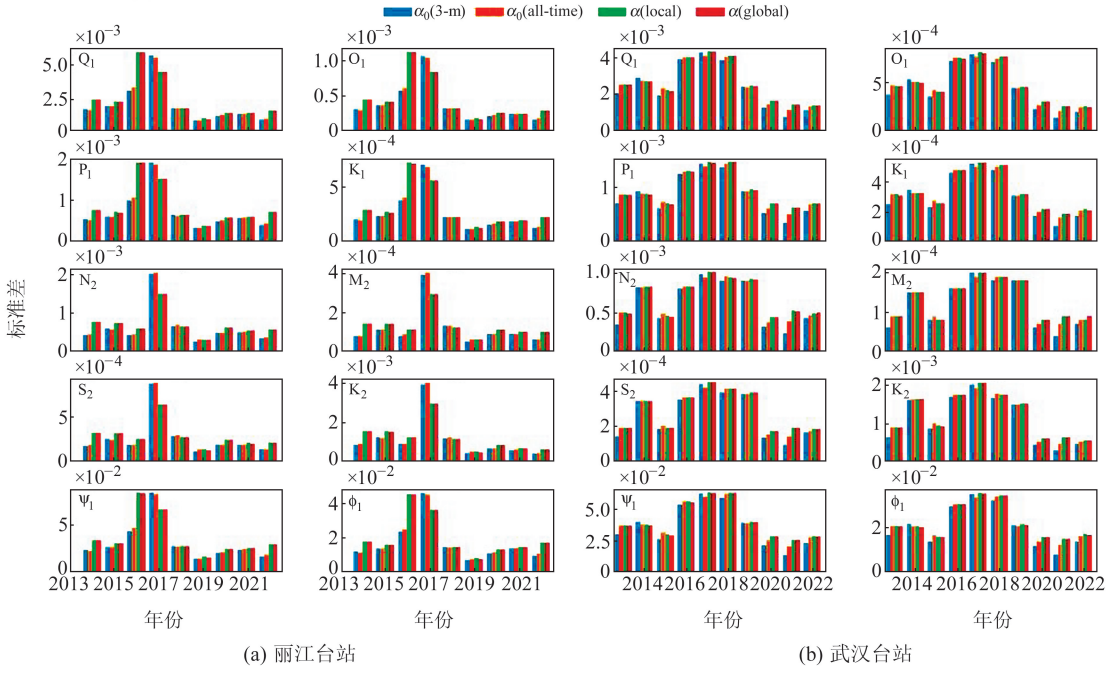


图 3　不同气压修正方法对不同潮汐参数的标准差

Fig. 3　Standard deviations of different tidal parameters using different pressure correction methods

2.3　区域潮汐模型影响分析

由于前文中 ETERNA 得到的潮汐参数耦合了固体潮汐和海洋潮汐,为获得精准的重力潮汐参数,有必要扣除海潮负荷的影响。在图 2 时变潮汐参数结果的基础上,采用经典负荷理论,即通过海潮潮高与负荷格林函数全球卷积积分获得各海潮潮波的负荷矢量(包括振幅和相位)。采用更契合亚洲地区的 NAO99 模型扣除海潮负荷效应[9],改正后的潮汐振幅因子与理论潮汐模型 DDW99 的差异见图 4。可以看出,在丽江和武汉台站,不同方式获得的潮汐参数与理论模型的偏差除 S_2 波外并无显著的规律。利用全球气压数据改正后获得的 S_2 波振幅因子更接近理论值,这进一步表明 S_2 波受全球气压变化的影响较大,因此亚洲区域台站 S_2 波潮汐因子需要采用全球气压进行改正,这与 Ducarme[10] 对欧洲台站的实验结果一致。

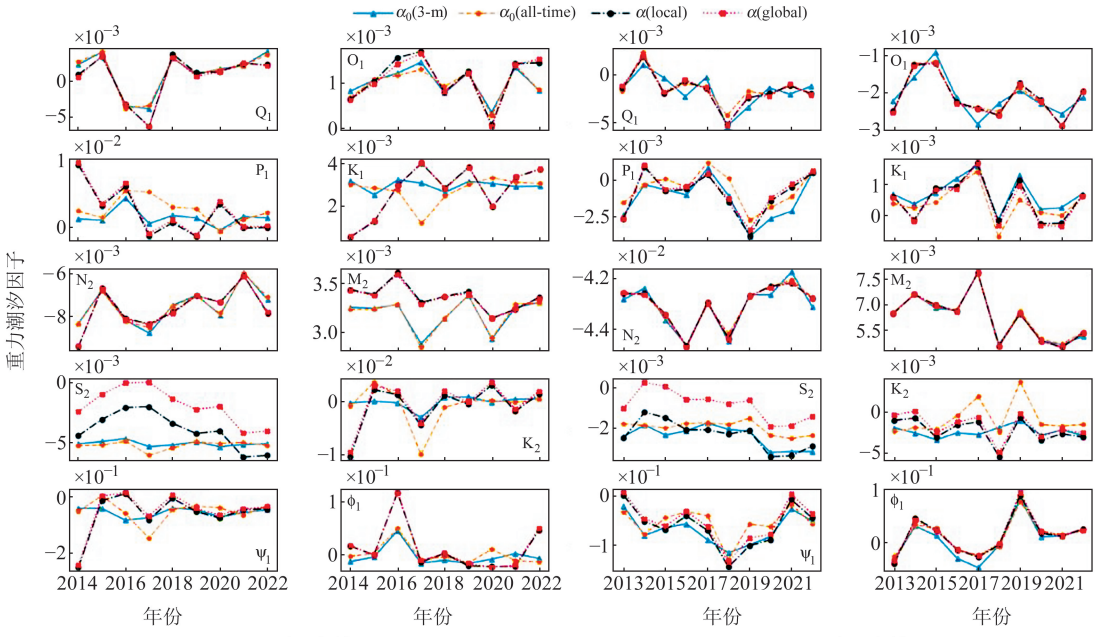


图 4 在考虑海潮的情况下不同气压修正方法得到潮汐参数与参考值 DDW99 的差异

Fig. 4 The difference between tidal parameters obtained by different pressure correction methods and the reference value DDW99 considering ocean tides

为进一步检验时变导纳值对构建区域潮汐模型的影响，对本文 4 种不同方法改正后的全时段重力观测序列使用 ETERNA 进行调和分析，采用 NAO99 模型扣除海潮负荷效应，得到丽江和武汉台站重力潮汐参数见表 2，表中列出图 2 中的 10 个周日和半日潮波的振幅因子和与 DDW99 理论值的相位差(DDW99 理论值只有振幅因子，其相位视为 0)。对于调和分析获得的 17 个振幅较大的主要周日和半日潮波(Q_1、O_1、P_1、K_1、PSI_1、PHI_1、J_1、OO_1、$2N_2$、μ_2、N_2、ν_2、M_2、L_2、T_2、S_2 和 K_2)，与 DDW99 理论值对比结果显示[14-15]，丽江台站除少部分潮波(P_1、ψ_1、ϕ_1、J_1、$2N_2$、L_2 和 T_2)外，采用时变导纳值改正方法的潮波振幅因子与理论值更为接近，武汉台站除少部分潮波(Q_1、P_1、M_2、L_2 和 K_2)外，采用时变导纳值改正方法的潮波振幅因子与理论值更为接近，

表 2 丽江和武汉台站潮汐参数

Tab. 2 Ocean tide parameters at Lijiang and Wuhan stations

潮波	DDW99(丽江台)	丽江台振幅因子/相位(°)				DDW99(武汉台)	武汉台振幅因子/相位(°)			
		α_0(3-m)	α_0(all-time)	α(local)	α(global)		α_0(3-m)	α_0(all-time)	α(local)	α(global)
Q_1	1.154 37	1.156 54/ −0.241 87	1.156 45/ −0.222 15	1.155 98/ −0.201 22	1.155 83/ −0.199 29	1.154 25	1.153 40/ −0.321 12	1.153 58/ −0.347 60	1.153 36 / −0.342 08	1.153 38/ −0.346 07
O_1	1.154 35	1.153 54/ −0.396 76	1.153 54/ −0.396 56	1.153 62/ −0.398 47	1.153 59/ −0.397 67	1.154 24	1.151 99/ −0.474 64	1.151 99/ −0.474 95	1.152 01/ −0.474 44	1.151 99/ −0.473 32
P_1	1.149 01	1.145 43/ −0.337 49	1.146 53/ −0.366 94	1.146 20/ −0.317 89	1.146 51/ −0.312 97	1.149 16	1.145 02/ −0.561 05	1.145 64/ −0.554 65	1.145 32/ −0.547 35	1.145 48/ −0.519 44
K_1	1.134 09	1.133 89/ −0.331 27	1.133 72/ −0.351 94	1.133 75/ −0.333 08	1.133 76/ −0.317 73	1.134 89	1.133 42/ −0.573 31	1.133 29/ −0.588 31	1.133 38/ −0.587 20	1.133 30/ −0.576 55
PSI_1	1.275 21	1.220 25/ −2.270 30	1.223 94/ −3.648 48	1.209 56/ −3.017 67	1.219 01/ −2.430 02	1.269 78	1.185 19/ −3.478 54	1.212 23/ −2.229 94	1.203 86/ −3.788 35	1.213 00/ −3.389 73
PHI_1	1.171 13	1.165 03/ 0.112 57	1.167 00/ 0.551 28	1.181 22/ 0.231 81	1.182 71/ 0.327 92	1.170 29	1.155 04/ −0.357 28	1.162 84/ −0.350 68	1.163 28/ −0.327 30	1.164 37/ −0.353 33
N_2	1.161 61	1.157 38/ −0.391 29	1.157 34/ −0.392 90	1.157 19/ −0.395 21	1.157 18/ −0.395 92	1.162 62	1.157 80/ −0.445 25	1.157 99/ −0.441 19	1.157 97/ −0.442 20	1.157 96/ −0.442 51
M_2	1.161 61	1.157 88/ −0.346 24	1.157 89/ −0.346 14	1.158 06/ −0.347 75	1.158 05/ −0.347 25	1.162 62	1.155 82/ −0.442 39	1.155 93/ −0.445 13	1.155 92/ −0.445 23	1.155 91/ −0.445 03
S_2	1.161 61	1.155 13/ −0.574 47	1.155 00/ −0.586 90	1.156 26/ −0.476 55	1.158 27/ −0.357 27	1.162 62	1.156 16/ −0.653 74	1.156 74/ −0.615 03	1.156 39/ −0.651 42	1.157 84/ −0.562 71
K_2	1.161 61	1.158 25/ −0.364 11	1.157 66/ −0.408 47	1.158 00/ −0.316 95	1.158 56/ −0.304 33	1.162 62	1.155 69/ −0.446 92	1.157 59/ −0.373 76	1.156 02/ −0.478 30	1.156 55/ −0.476 28

说明考虑导纳值时变性有助于改善区域潮汐模型精度。此外,在 2 个台站的 S_2 潮波计算结果中,采用考虑全球效应的时变导纳值的计算结果最接近理论值,这与图 4 分段分析结果一致。

2.4　FCN 时变性确定影响分析

鉴于武汉和丽江台站观测资料采用较短时间分段调和分析时,ψ_1 和 ϕ_1 等小潮波拟合误差较大,导致拟合的 FCN 参数偏差过大,不利于准确评估气压改正的影响。根据以往研究,本文选择观测环境和背景噪音条件较好的 3 个欧洲台站资料,分析时变导纳值对 FCN 参数拟合的影响。选取表 1 中 Bad Homburg、Moxa 和 Strasbourg 三个台站长期观测资料,采用与武汉和丽江台站相同的处理方式,分别拟合其时变导纳值 α_0(3-m)、α(global)、α(local)与恒定导纳值 α_0(all-time),对利用不同方式改正的观测序列,以 1 a 滑动时间窗口、无重叠进行分段调和分析,估计潮汐参数。然后基于潮波 Q_1、O_1、P_1、K_1、ψ_1 和 ϕ_1 的振幅因子和相位差,利用式(2)和加权最小二乘方法计算 FCN 本征参数(包括周期和品质因子)。图 5 为 3 个台站利用时变与恒定导纳值气压修正方法计算的 FCN 周期,其中蓝色、绿色和橙色色柱分别代表时变导纳值 α_0(3-m)、α(global)和 α(local)与恒定导纳值 α_0(all-time)改正结果之差。结果显示,导纳值对 FCN 周期参数时变特征的拟合具有显著影响,导纳值时间变化引起的 FCN 周期拟合差异在观测精度较高的 Bad Homburg、Moxa 和 Strasbourg 台站均可达到几个甚至十几个恒星日量级,这对于研究核幔耦合与 FCN 关联产生的周期时变特征是不可忽视的因素。

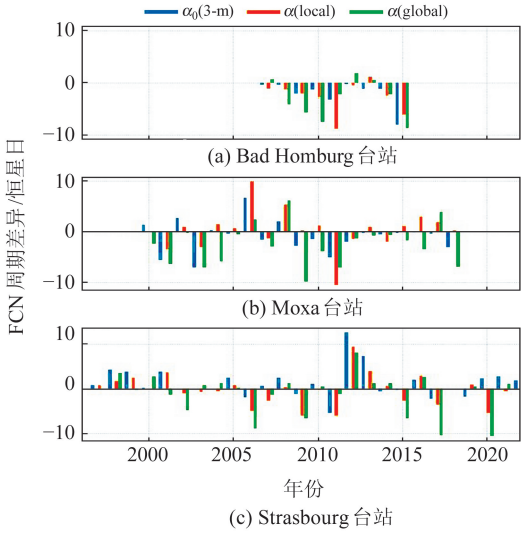


图 5　不同气压修正方法计算的 FCN 周期差异

Fig. 5　FCN period differences using different pressure correction methods

3　结　语

本文通过 IGETS 网络中中国和欧洲超导重力仪观测数据,采用不同方式估算随时间变化的导纳值,并且考虑全球气压效应,分析时变导纳值对潮汐分析及 FCN 时变性研究的影响。结果显示,时变导纳值对于潮汐参数的分析具有显著影响,采用时变导纳值改正的多数潮波振幅因子与理论值更为接近,考虑全球气压效应可以显著改善 S_2 潮波潮汐参数拟合,这对于区域潮汐模型构建具有重要参考意义;导纳值时间变化引起的 FCN 周期拟合差异非常显著,对于研究 FCN 周期时变性的影响不可忽视。

参考文献

[1] Crossley D, Hinderer J, Boy J P. Time Variation of the European Gravity Field from Superconducting Gravimeters[J]. Geophysical Journal International, 2005, 161(2): 257-264

[2] Hinderer J, Crossley D. Scientific Achievements from the First Phase(1997-2003) of the Global Geodynamics Project Using a Worldwide Network of Superconducting Gravimeters[J]. Journal of Geodynamics, 2004, 38(3-5): 237-262

[3] Zürn W, Widmer R. On Noise Reduction in Vertical Seismic Records below 2 mHz Using Local Barometric Pressure[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(24): 3537-3540

[4] Crossley D J, Jensen O G, Hinderer J. Effective Barometric Admittance and Gravity Residuals[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1995, 90(3-4): 221-241

[5] Hinderer J, Hector B, Boy J P, et al. A Search for Atmospheric Effects on Gravity at Different Time and Space Scales [J]. Journal of Geodynamics, 2014, 80: 50-57

[6] Cui X M, Sun H P, Xu J Q, et al. Detection of Free Core Nutation Resonance Variation in Earth Tide from Global Superconducting Gravimeter Observations [J]. Earth, Planets and Space, 2018, 70(1)

[7] Camp M, Vauterin P. Tsoft: Graphical and Interactive Software for the Analysis of Time Series and Earth Tides [J]. Computers and Geosciences, 2005, 31(5): 631-640

[8] 孙和平, 罗少聪. 大气重力信号的理论计算及其检测[J]. 地球物理学报, 1998, 51(5):634-641(Sun Heping, Luo Shaocong. Theoretical Computation and Detection of the Atmospheric Gravity Signals[J]. Acta Geophysica Sinica, 1998, 51(5):634-641)

[9] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1972, 10

[10] Ducarme B. The Influence of Pressure Waves in Tidal Gravity Records[J]. Geodesy and Geodynamics, 2023, 14(1): 15-25

[11] Meurers B. Correction of High-Frequency(>0.3 mHz) Air Pressure Effects in Gravity Time-Series[J]. Geophysical Journal International, 2024, 237(1): 14-30

[12] Yang W W, Cui X M, Xu J Q, et al. Estimation of Free Core Nutation Parameters and Availability of Computing Options[J]. Geodesy and Geodynamics, 2024, 15(1): 61-74

(下转第 1316 页)

Strain Field in Xuzhou and Gaochun Areas and Seismic Response Characteristics of Tidal Factors of Gaochun Station

HAO Ran[1] *YANG Chi*[2] *HE Bin*[2] *ZHANG Dong*[2]
ZHANG Peng[1] *GAO Mingzhi*[1] *ZHANG Cen*[2]

1 Suqian Earthquake Monitoring Center Station, 72-2 South-Taishan Road, Xuzhou 221008, China
2 Jiangsu Earthquake Agency, 3 Weigang, Nanjing 210014, China

Abstract: We quantitatively analyzed the crustal strain changes in Xuzhou and Gaochun areas of Jiangsu province from 2019 to 2023 using four-component borehole strainmeters, and explored the characteristics of regional strain field and its relationship with seismic activity. According to the strain parameter results, both Xuzhou and Gaochun areas were in a stable state during the study period. The response values of tidal factors at Gaochun seismic station exhibited an abnormal change of first dispersion, then stabilization before and after the *M*5.0 earthquake in Dafeng sea area of Yancheng, Jiangsu province. Through the analysis of its variation characteristics, the relationship with the strike of faults and the focal mechanism solution of earthquakes, it can be inferred that in the process of earthquake preparation, the stress and strain in this area experienced a process from accumulation to release, and the tidal factors can reflect this change to a certain extent.

Key words: stress-strain characteristics; Venidikov harmonic analysis; component borehole strainmeter; strain field; tidal factors

Foundation support: Scientific Foundation of Jiangsu Earthquake Agency, No. 23407; Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA, No. SJH-202502004.

About the first author: HAO Ran, engineer, majors in geophysics, E-mail: haoran910106@163.com.

(上接第 1309 页)

[13] Wahr J M. Body Tides on an Elliptical, Rotating, Elastic and Oceanless Earth[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, 64(3): 677-703

[14] 徐建桥, 周江存, 陈晓东, 等. 武汉台重力潮汐长期观测结果[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3091-3102(Xu Jianqiao, Zhou Jiangcun, Chen Xiaodong, et al. Long-Term Observations of Gravity Tides from a Superconducting Gravimeter at Wuhan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3091-3102)

[15] 梁莹, 陈晓东, 孙和平, 等. 云南丽江台 OSG-066 重力潮汐观测结果及应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(7): 713-719(Liang Ying, Chen Xiaodong, Sun Heping, et al. Gravity Tide Observation with OSG-066 and Their Applications at Lijiang Station, Yunnan Province, China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(7): 713-719)

Influence of Time-Varying Atmospheric Admittance on Earth Tide

GONG Lizhuo[1,2] *YANG Weiwei*[1,2] *CUI Xiaoming*[1,2] *SUN Heping*[1,2]

1 State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CEA, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China
2 University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China

Abstract: We utilize long-term observation data from five superconductor gravimeters in China and Europe within the IGETS network, and apply various atmospheric pressure correction strategies to analyze the impact of time-varying admittance on the determination of Earth tide parameters. The results show that the temporal variability of admittance significantly influences Earth tide parameters, with effects on time-varying characteristics of the Earth's free core nutation period reaching up to 10 sidereal days. Taking into account the time-varying characteristics of admittance and global atmospheric pressure effects correction, the tidal wave amplitude factor is found to be closer to theoretical values. This has important implications for the construction of regional tidal models and subtle dynamic signals analysis.

Key words: atmospheric admittance; superconductor gravimeter; tidal model; solid tide; free core nutation

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 42394114, 42174108; the Young Top-Notch Talent Cultivation Program of Hubei Province.

About the first author: GONG Lizhuo, PhD candidate, majors in Earth's free oscillations, E-mail: 418029833@qq.com.