

# 海洋非潮汐变化对时变重力场的影响

朱耀仲<sup>1</sup> 闫昊明<sup>1</sup> 钟敏<sup>1</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路 174 号, 430077)

**摘要:** 基于全球海洋数值模式, 估计了海水质量非潮汐变化对低阶地球引力场季节性变化的贡献。激发模型预测的大气、地表水、海洋潮汐和非潮汐变化对引力场的组合影响被用来与卫星激光测距(SLR)的观测值进行比较。结果表明, 在季节性变化时间尺度上, 为克服海洋数值模式的体积守恒近似而采用的质量守恒改正对 $\Delta J_2$  具有较明显的影响, 对 $\Delta J_3$  的影响可以忽略, SLR 观测的 $\Delta J_2$  周年和半年振幅介于海洋、地表水、大气(IB)和(NIB)的组合结果之间。

**关键词:** 海洋数值模式; 质量变化; 重力场; 卫星激光测距  
中图法分类号: P229.2

利用大气、海洋和地表水的观测资料, 基于数值模式方法, 可从理论上模拟质量分布变化及其对地球引力场变化的贡献。随着观测精度、资料同化技术和数值模式理论的改善, 季节性质量分布变化的理论模拟精度正在不断提高。相对而言, 大气质量重新分布引起的地球引力场变化已从理论上给出较好的估计。地表水变化由于其复杂的特点, 观测资料和理论模型还有待进一步改进, 一些作者给出的模拟结果还存在明显差异。季节性海洋潮汐变化对地球引力场的影响可借助于平衡潮理论或卫星测高资料确定的海潮模型来计算。利用海平面变化资料, 并顾及温盐度引起的非质量变化效应, 可估计非潮汐引起的海洋质量重新分布产生的地球引力场变化。Cheng 等和周旭华等采用 T/P 测高资料确定的海平面变化和 WOA 模型的温盐度数据, 估计了海洋非潮汐变化对季节性低阶 $J_l$  的影响<sup>[1, 2]</sup>。Johnson 等采用并行海洋数值模式(POCM-4B), 计算了季节性海水非潮汐质量变化对低阶球谐系数的贡献<sup>[3]</sup>。近年来, 同化海洋数值模式结果的逐步完善, 使得海洋非潮汐效应的研究结果有望得到进一步的改进。

本文利用美国马里兰大学的 SODA 海洋同化资料<sup>[4]</sup> 和 Jet Propulsion Laboratory (JPL)、Massachusetts Institute of Technology (MIT) 和

Scripps Institute of Oceanography (SIO)最新联合研制的海洋数值模式(ECCO)的同化资料<sup>[5]</sup>, 估计了海洋非潮汐质量重新分布对地球低阶引力场系数季节性变化的贡献。此外, 笔者还采用日本水泽天文台的 NAO 海潮模型<sup>[6]</sup> 和美国 NECP 的全球表面气压资料, 分别计算了周年和半年潮汐引起的海水质量变化和大气质量重新分布对低阶引力场系数的影响。理论模拟的各种不同物体(或者是同一种物体的不同地球物理因素产生的)质量分布变化引起的引力场变化的组合被用来与 SLR 确定的总的质量影响进行比较。

## 1 模型资料和处理方法

地球外部引力位可展开为  $l$  阶和  $m$  级的球谐系数的求和形式。表面质量变化引起的归一化地球引力场球谐系数  $C_m$  和  $S_m$  变化的复数表达式为:

$$\Delta C_m(t) + i\Delta S_m(t) = \frac{(1+k_l')R^2}{(2l+1)M} \int_S \Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) P_{lm}(\sin\varphi) e^{im\lambda} \cos\varphi d\varphi d\lambda \quad (1)$$

式中,  $k_l'$  为  $l$  阶负荷 Love 数;  $R$  为地球平均半径;  $M$  为地球质量;  $\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)$  表示在  $t$  时刻、纬度为  $\varphi$ 、经度为  $\lambda$  处物体质量的面密度变化,  $P_{lm}$  为归一化缔合勒让德函数。习惯上用未归一化  $J_l$

表示地球引力位的带谐系数,且 $\Delta J_l = -\sqrt{2l+1} \Delta C_{l0}$ 。由式(1),得:

$$\Delta J_l(t) = -(1+kl') \frac{R^2}{M} \int_{\varphi} \Delta \sigma'(\varphi, t) \cdot P_l(\sin \varphi) \cos \varphi d\varphi \quad (2)$$

式中,  $\Delta \sigma'(\varphi, t)$  为  $t$  时刻在  $\varphi$  纬度带上密度变化的和;  $P_l$  为未归一化勒让德函数。根据已有可采用的模型资料, 对于大气、地表水和海洋潮汐及非潮汐引起的质量分布变化,  $\Delta \sigma'$  有不同的表达式。

### 1.1 海水质量的非潮汐变化

对于非潮汐引起的海水质量变化,  $\Delta \sigma'$  为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta \sigma' = p_b/g = \rho_0(\zeta' + \zeta_{\rho} + \delta\zeta_{\rho}) \quad (3)$$

式中,  $g$  为地球重力加速度;  $\rho_0$  为海水平均密度;  $p_b$  是由于非潮汐引起的海水质量变化所施加在洋底地壳的压力;  $\zeta'$  为非潮汐引起的海平面高变化;  $\zeta_{\rho}$  为海水密度变化引起的海平面高变化;  $\delta\zeta_{\rho}$  为满足海水质量守恒条件的改正项。因为目前使用的海洋数值模式大部分都采用了体积守恒假设(全球  $\zeta'$  的平均为零)。为了比较不同海洋数值模式的结果, 计算中采用了 SODA 和 ECCO 两个海洋模式。SODA 模式资料包括 1980-01 ~ 2001-12 的海平面高变化、温度和盐度场资料, 网格经度从  $0 \sim 360^\circ$ , 纬度从  $62^\circ\text{S} \sim 62^\circ\text{N}$ , 经度分辨率为等间隔  $1^\circ$ , 纬度分辨率为不等间隔, 从低纬度的  $0.43^\circ$  到高纬度的  $1^\circ$ , 资料的采样间隔为一个月。采用的 ECCO 模式资料是 1993-01 ~ 2002-12 的洋底压力数值, 网格经度从  $0 \sim 360^\circ$ , 纬度从  $79.5^\circ\text{S} \sim 78.5^\circ\text{N}$ , 经度分辨率为等间隔  $1^\circ$ , 纬度分辨率从赤道区域的  $(1/3)^\circ$  到高纬度区域的  $1^\circ$ , 资料采样间隔为半天, 笔者采用平均方法得到一个半月一值。

### 1.2 海水质量的潮汐变化

对于潮汐引起的海水质量变化,  $\Delta \sigma'$  可写为:

$$\Delta \sigma' = \rho_0 H \quad (4)$$

式中,  $H$  为海潮引起的海平面高变化, 计算中选择了由 T/P 卫星测高和验潮站资料联合确定的 NAO.99b 海潮模型, 该模型给出的全球网格为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的周年 ( $S_a$ ) 和半年 ( $S_{sa}$ ) 潮波的振幅和位相。

### 1.3 大气质量变化

对于大气质量分布变化,  $\Delta \sigma'$  为:

$$\Delta \sigma' = p_a/g \quad (5)$$

式中,  $p_a$  为表面气压变化。海洋对气压变化的响应分别按反变气压计 (IB) 和非反变气压计 (NIB) 两种假设进行处理。本文采用美国环境预报中心 (NCEP) 的大气再分析资料给出的 1980-01 ~ 2001-12 全球网格为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的表面气压月均值。

## 1.4 地表水变化

对于地表水质量变化,  $\Delta \sigma'$  可写为:

$$\Delta \sigma' = \rho_w(P - E - R) \quad (6)$$

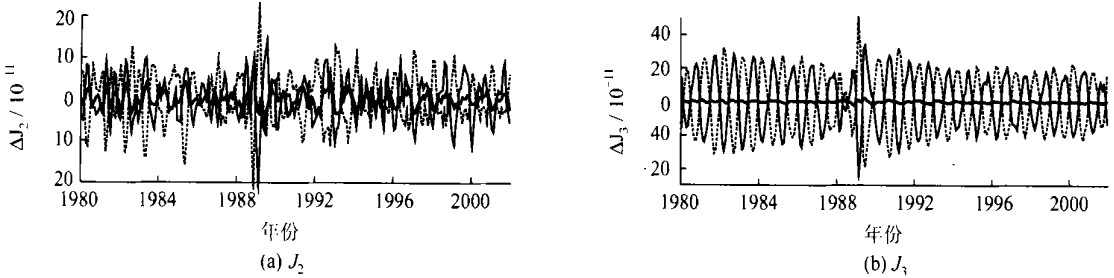
式中,  $\rho_w$  为纯水密度;  $P$ 、 $E$  和  $R$  分别为降水量、蒸发量和径流量。Cheng 等 (1999) 依据文献 [8] 的地表水变化的计算模式 (式 (6)), 估计了 1973 年 ~ 1996 年期间地表水质量重新分布引起的低阶地球引力场系数变化, 并给出每月一个值的时间序列<sup>[1]</sup>, 本文讨论中采用了这一结果。

## 2 计算结果和比较

根据式 (3) ~ 式 (5) 所采用的模型, 笔者计算了大气、潮汐和非潮汐引起的海水质量变化对  $J_2$  和  $J_3$  季节性变化的贡献。图 1(a) 和图 1(b) 分别显示了采用 SODA 数值海洋模式估计的由于海平面高变化、海水密度变化和质量守恒改正引起的  $J_2$  和  $J_3$  季节性变化的时间序列。这些时间序列已分别经 Vondark 带通滤波器滤波, 保留了周年和半年项变化的信息。由图 1 可见, 海平面高变化和海水密度变化对  $J_2$  和  $J_3$  季节性变化的贡献基本上表现为等值反向, 质量守恒改正引起的  $J_2$  季节性变化比较明显, 但对  $J_3$  变化的影响很小。图 2(a) 和图 2(b) 分别给出由 SODA 和 ECCO 海洋数值模式资料估计的海水质量变化产生的  $J_2$  和  $J_3$  季节性变化的时间序列, 它们也经过了带通滤波。采用 SODA 模式估计的  $\Delta J_2$  和  $\Delta J_3$  序列已考虑了质量守恒改正, 而采用 ECCO 模式估计的序列是依据体积守恒假设 (在式 (3) 中忽略  $\delta\zeta_{\rho}$  项)。SODA 和 ECCO 模式资料的重叠时间为 1993-01 ~ 2001-12。比较重叠时期两个模式预测的  $\Delta J_2$  和  $\Delta J_3$  序列可见, 在季节性变化的时间尺度上, ECCO 模式预测的振幅比 SODA 模式给出的结果大, 且两者位相也存在一定差异。ECCO 模式是近两年来研制出的一个受到广泛关注的海洋数值模式, 这个模式给出的资料 (纬度  $79.5^\circ\text{S} \sim 78.5^\circ\text{N}$ ) 比 SODA 模式的资料 (纬度  $62^\circ\text{S} \sim 62^\circ\text{N}$ ) 包含了更多的全球海洋质量变化信息, 因此该模式更具有合理性。表 1 给出了不同作者估计的海水质量非潮汐变化引起的  $J_2$  和  $J_3$  周年和半年变化的振幅和位相。振幅  $A$  和位相  $\Psi$  的表示形式为  $A \sin[\omega(t - t_0) + \Psi]$ , 其中,  $\omega$  为周年和半年项的频率,  $t_0$  为参考历元, 取 1980 年 1 月 1 日, 振幅单位为  $10^{-11}$ , 位相单位为 ( $^\circ$ )。比较表 1 的振幅可知, 除  $\Delta J_3$  半年项以外, 采用 T/P 测高资料, 并顾及 WOA 模型给出的温盐度引起的

非质量变化影响而得到的结果一般要大于采用海洋数值模式给出的结果(T/P+WOA94的 $\Delta J_2$ 周年振幅除外),依据 SODA 模式的估计值要小于其他结果。Johnson 等(2001)采用 POCM 模式,分别考虑质量和体积守恒两种情况,估计了海洋非潮汐变化引起的低阶引力场变化,结果也列入表 1。由表 1 可见,两者的 $\Delta J_2$ 周年项振幅相差

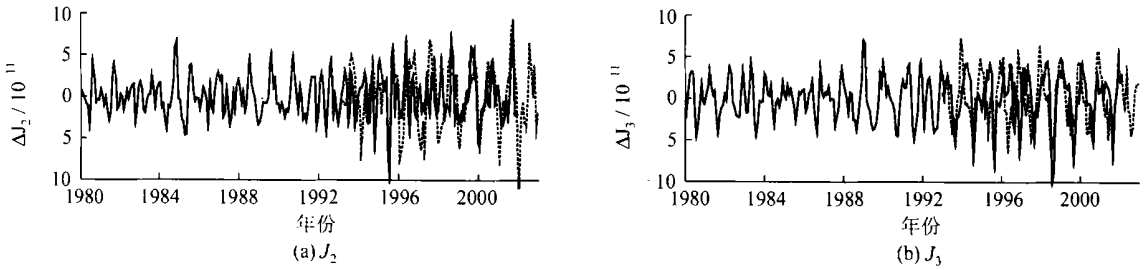
约 $0.6 \times 10^{-11}$ ,位相相同,半年项振幅和位相基本一致, $\Delta J_3$ 周年和半年项的振幅和位相几乎完全相同。在体积守恒的假设下,本文采用 ECCO 模式的估计结果与 POCM 模式预测值比较一致( $\Delta J_3$ 半年振幅还存在一些差异)。在质量守恒的情况下,本文采用 SODA 模式的估计结果要小于 POCM 模式的预测值。



细实线为海平面变化项,虚线为密度变化项,粗实线为质量守恒改正项

图 1 海平面高变化、密度变化和体积守恒改正引起的 $J_2$ 和 $J_3$ 的等效变化

Fig. 1 Equivalent Variations in  $J_2$  and  $J_3$  Due to Dynamic Sea Level Change, Density Change and Mass Conservation Correction



实线为 SODA 海洋模式,虚线为 ECCO 海洋模式

图 2 海洋非潮汐变化对 $J_2$ 和 $J_3$ 的影响

Fig. 2 Effects of Nontidal Variation in Ocean on  $J_2$  and  $J_3$

表 1 海洋非潮汐变化引起的 $J_2$ 和 $J_3$ 季节性变化

Tab. 1 Seasonal Variation in  $J_2$  and  $J_3$  Caused by Nontidal Variation in Ocean

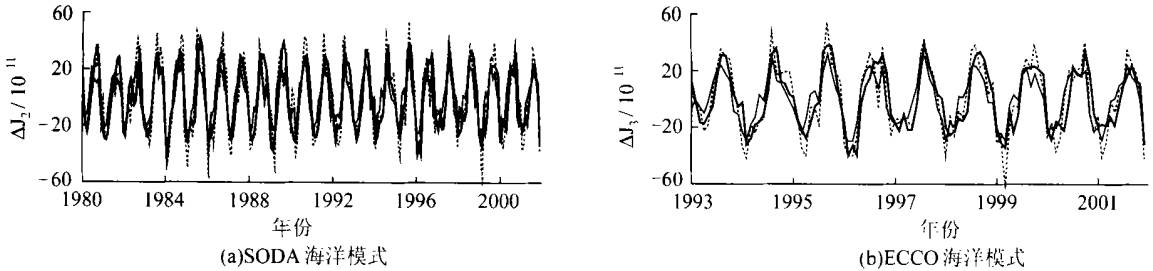
资料来源	资料长度	$J_2$				$J_3$			
		周年		半年		周年		半年	
		振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相
T/P+WOA94 <sup>[1]</sup>	1993-10~1996-12	3.13	237	2.24	1	7.41	74	1.06	153
T/P+WOA98 <sup>[2]</sup>	1993-01~1999-12	5.81	255	2.50	26	9.26	67	1.06	121
POCM(质量守恒) <sup>[3]</sup>	1987-01~1995-12	3.73	234	1.45	282	3.92	60	1.80	133
POCM(体积守恒) <sup>[3]</sup>	1987-01~1995-12	4.32	234	1.43	291	3.92	61	1.80	133
SODA(质量守恒)	1980-01~2001-12	1.04	212	0.97	7	2.54	37	1.47	180
ECCO(体积守恒)	1993-01~2002-12	4.53	219	1.35	290	3.83	98	1.26	154

图 3 显示了 Cox 等(2002)给出的 SLR 观测的 $\Delta J_2$ 序列<sup>[9]</sup>与大气、地表水和海洋非潮汐季节性变化组合序列的比较。这些时间序列同样进行了带通滤波。SLR 观测序列已经消除了季节性的海洋潮汐变化,大气和海洋非潮汐变化是本文的估计结果,地表水变化结果是根据 Cheng 等(1999)估计的周年和半年项振幅和位相而模

拟出的时间序列。图 3 (a)和 3 (b)分别是采用 SODA 和 ECCO 模式的结果,大气压力变化的贡献按 (IB)和 (NIB)两种情况进行估计。比较图 3 中 SLR 观测和激发模型预测的时间序列可见, Cox 等给出的 SLR 观测的 $\Delta J_2$ 序列介于 (IB)和 (NIB)的组合序列之间,且更接近 (NIB)组合序列。为了定量比较周年和半年项

的观测和模型预测结果,表2列出了另一组SLR观测值<sup>[1]</sup>和大气、地表水、海洋潮汐及非潮汐变化引起的 $\Delta J_2$ 和 $\Delta J_3$ 振幅和位相及它们的线性组合。在表2中,振幅和位相的单位和表示形式与表1相同,SLR的结果包含了海洋潮汐的影响。由NAO海潮模型预测的周年和半年项的振幅和位相也列入表2,由NAO海潮模型估计的 $\Delta J_2$ 的振幅和位相值轻微偏离了平衡态<sup>[10]</sup>。本文采用NCEP估计的大气质量变化对 $J_2$ 振幅影响的结果(包括(IB)和(NIB))与其他作

者的估计值<sup>[1,2]</sup>比较相符。对于 $\Delta J_2$ 和 $\Delta J_3$ 周年变化以及 $\Delta J_3$ 半年变化,大气和地表水变化的贡献占主要地位,海洋潮汐和非潮汐变化的影响较小,对 $\Delta J_2$ 半年项的影响主要来自海洋潮汐变化,大气、地表水和海洋非潮汐变化的影响都很小。对于 $\Delta J_2$ ,SLR测定的周年和半年振幅介于(IB)和(NIB)的组合值之间。在这两个频率上,SLR测定的位相与组合位相也较接近。对于 $\Delta J_3$ ,SLR测定的周年和半年振幅明显大于组合值,且位相与组合结果相差较大。



粗实线为SLR,细实线为大气(IB)+水+海洋,虚线为大气(NIB)+水+海洋

图3  $\Delta J_2$ 观测和预测结果的比较

Fig. 3 Comparison Between Observed and Predicted  $\Delta J_2$

表2  $J_2$ 和 $J_3$ 季节性变化的比较

Tab. 2 Comparison of Seasonal Variations in  $J_2$  and  $J_3$

资料来源	资料长度	$J_2$				$J_3$			
		周年		半年		周年		半年	
		振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相
大气(NIB) <sup>[1]</sup>	1980-01~2001-12	18.92	205	2.14	346	31.97	88	13.7	116
大气(IB) <sup>[2]</sup>	1980-01~2001-12	9.36	180	1.51	302	21.30	101	6.18	125
地表水(文献[1]) <sup>[3]</sup>	1993-10~1996-12	11.85	234	2.91	144	11.85	206	2.24	108
海洋潮汐 <sup>[4]</sup>	1980-01~2001-12	1.95	90	12.71	295	0.05	113	0.46	315
海洋非潮汐(SODA) <sup>[5]</sup>	1980-01~2001-12	1.04	212	0.97	7	2.54	37	1.47	180
海洋非潮汐(ECCO) <sup>[6]</sup>	1993-01~2002-12	4.53	219	1.35	290	3.83	98	1.26	154
组合A(1+3+4+5)		29.78	213	11.87	301	29.31	105	16.15	119
组合B(2+3+4+5)		19.06	205	11.97	294	21.46	126	8.72	128
组合C(1+3+4+6)		33.25	214	12.86	296	32.21	108	16.48	117
组合D(2+3+4+6)		22.45	208	13.08	289	24.81	128	8.97	124
SLR <sup>[1]</sup>	1993-10~1996-12	27.95	230	12.52	308	48.30	71	21.24	12

### 3 结 语

大气和地表水变化是引起低阶地球引力场季节性变化的主要因素,相比之下,海洋非潮汐变化的影响较小。对于体积守恒假设的海洋数值模式,考虑质量守恒改正对估计海水质量非潮汐变化引起的 $J_3$ 季节性变化的影响很小,可以忽略,但对 $J_2$ 季节性变化的影响比较明显。用T/P卫星测高资料,并顾及温盐度引起的非质量变化的影响,估计的 $J_3$ 季节性变化的振幅与采用海洋数

值模式资料的估计结果还存在明显差异。大气、地表水和海洋质量变化的组合已能较好地解释SLR观测的 $J_2$ 周年和半年变化。 $\Delta J_2$ 周年和半年项的SLR观测振幅介于(IB)和(NIB)的组合值之间,但对于 $\Delta J_3$ ,SLR观测的周年和半年结果明显偏离激发模型预测值的组合。

低阶地球引力场季节性变化的SLR观测值与模型预测值之间存在差异的主要原因来自于:  
① SLR观测结果的误差,目前SLR测定 $\Delta J_2$ 周年振幅的标准误差约为 $2 \times 10^{-11}$ ,采用不同卫星和不同时期资料给出的SLR测定值还存在明显

差异, 最大约为  $(3 \sim 4) \times 10^{-11}$ ; ② 激发模型的不准确, 尤其是地表水变化模型; ③ 尚未考虑的激发源, 如冰雪消融等因素的影响。目前正在执行的卫星重力计划(如 GRACE 卫星)将大大地有助于提高时变重力场确定的精度和分辨率。由于观测到的重力场变化是总的质量影响, 因此, 改进各种激发模型依然是亟待解决的课题。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng M K, Tapley B D. Seasonal Variations in Low Degree Zonal Harmonics of the Earth's Gravity Field from Satellite Laser Ranging Observations. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(B2): 2 667~2 681
- 2 周旭华, 吴 斌. 大气、陆地水储量和海水质量变化与地球低阶引力场球谐系数的关系. *天文学报*, 2002, 43 (3): 327~322
- 3 Johnson T J, Wilson C R, Chao B F. Nontidal Oceanic Contributions to Gravitational Field Changes: Predictions of the Parallel Ocean Climate Model. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B6): 11 315~11 334
- 4 Carton J A, Chepurin G, Cao X H, et al. A Simple Ocean Data Assimilation Analysis of the Global Upper Ocean 1950~1995 (Part I): Methodology. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30: 294~309

- 5 Gross R S. Atmospheric and Oceanic Excitation of the Earth's Wobbles During 1980~2000. *J. Geophys. Res.*, 2003
- 6 Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/Poseidon Altimeter Data Into Hydrodynamical Model: a Global Model and a Regional Model Around Japan. *J. Oceanography*, 2000, 56: 567~581
- 7 Ponte R M. A Preliminary Model Study of the Large-Scale Seasonal Cycle in the Bottom Pressure Over the Global Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104 (C1): 1289~1300
- 8 雷小平, 高布锡. 水分布激发与周年极移. *天文学报*, 1992, 33(1): 61~66
- 9 Cox C M, Chao B F. Detection of a Large-Scale Mass Redistribution in the Terrestrial System Since 1988. *Science*, 2002, 297: 831~833
- 10 Zhu Y Z, Shum C K, Cheng M K, et al. Long-Period Variations in Gravity Field Caused by Mantle Anelasticity. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (B5): 11 243~11 248

第一作者简介: 朱耀仲, 研究员。现主要从事动力大地测量研究。  
E-mail: zyz@asch.whigg.ac.cn

## Nontidal Oceanic Effects on Temporal Variations in the Earth's Gravitational Field

ZHU Yaozhong<sup>1</sup> YAN Haoming<sup>1</sup> ZHONG Min<sup>1</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China, 430077)

**Abstract:** Based on the global numerical ocean models, the contributions of nontidal oceanic mass change to the seasonal variations in the low-degree Earth's gravitational field are estimated. The combined effects of the atmosphere, surface water and ocean on the gravitational field predicted by the models are used to compare the values determined by satellite laser ranging (SLR) observations. The results show that the effect of mass conservation correction due to volume conservation approximation used in the numerical ocean models on  $\Delta J_2$  is obvious on the seasonal timescales, but negligible for  $\Delta J_3$ . The annual and semiannual amplitudes of the SLR-determined  $\Delta J_2$  are in between the combined values of ocean, surface water and atmosphere with (IB) and (NIB).

**Key words:** numerical ocean model; mass change; gravitational field; satellite laser ranging

**About the first author:** ZHU Yaozhong, researcher. His research orientation is dynamical geodesy.

E-mail: zyz@asch.whigg.ac.cn

(责任编辑: 光远)