中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 3 期: 313 ~ 319
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究中国南海海平面变化

冯伟[①②*], 钟敏[①③], 许厚泽[①③]

① 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049;
③ 华中科技大学地球物理研究所, 武汉 430074
* E-mail: fengwei@asch.whigg.ac.cn

收稿日期: 2011-05-23; 接受日期: 2012-02-16
中国科学院方向性项目(编号: KZCX2-YW-143)、国家自然科学基金(批准号: 40974045, 41021003)和中国科学院动力大地测量学重点实验室开放基金(编号: L09-18)资助

摘要 利用卫星测高、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星重力和海洋实测与模式资料, 在季节和年际尺度上, 探讨了海水比容变化和海水质量变化对中国南海海平面变化的影响. 在季节尺度上, 利用测高和 ECCO(Estimation of the Circulation and Climate of the Ocean)模式得到的南海海水质量引起的海平面变化的周年振幅和 GRACE 卫星独立观测的结果在地理分布上有很好的一致性. GRACE 卫星观测到海水质量引起的南海平均海平面变化具有明显的季节性变化, 其周年振幅为(2.7±0.4) cm; 利用另一种独立的方法(测高减比容)得到的平均海平面周年振幅为(2.7±0.3) cm, 两者符合得很好. 在年际尺度上, 南海平均海平面变化表现出明显的年际变化特征, 且主要为比容海平面变化的贡献. 卫星测高结果表明, 1993~2009 年的南海平均海平面变化为(5.5±0.7) mm/a, 明显高于同期全球平均海平面变化趋势(3.3±0.4) mm/a. GRACE 卫星观测到的海水质量变化没有表现出明显的趋势信号, 这说明南海整体上与周边海域或陆地水的水循环是平衡的.

关键词
卫星测高
GRACE
ECCO
南海
海平面变化

海平面变化是全球气候变化的重要指标之一. 引起全球海平面变化的因素主要有两个方面: (1) 比容海平面变化, 这主要是由于海水温度和盐度变化引起海水体积变化导致的; (2) 质量项海平面变化, 这主要是由于海洋与大气、陆地之间进行各种质量交换(如冰川融化、降雨、径流和蒸发等)引起的. 过去一个世纪以来, 验潮站资料得到的全球平均海平面上升速率为 1~2 mm/a[1]. 随着卫星测高技术的发展, 特别是 TOPEX/Poseidon (T/P) 测高卫星的出现, 我们可以针对高时空分辨率的海平面信息开展研究工作[2]. 卫星测高可以观测包括比容和质量项的总海平面变化. 海平面变化中的比容海平面变化可以利用温盐数据计算得到[3~5]. 比容海平面变化只引起海水体积变化, 不引起海水质量变化. 质量项海平面变化伴随着海水质量变化信号, 这可以通过卫星重力测量手段获得. 美德联合研制的 GRACE(Gravity

英文引用格式: Feng W, Zhong M, Xu H Z. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data. Sci China Earth Sci, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4394-3

Recovery and Climate Experiment)重力卫星于 2002 年 3 月发射升空, 可以观测大尺度全球时变重力场变化信号[6,7]. 随着 GRACE 观测精度的提高和数据处理方法的改善, 目前已可用于研究全球海平面变化中的质量项部分[8~11]. 因此, 利用温盐资料、卫星重力和卫星测高三种独立观测手段得到比容海平面变化、质量项海平面变化和总的海平面变化, 可以进一步加深我们对海平面变化的理解.

很多学者对全球海平面变化进行了深入研究, 但对区域海平面变化的规律和物理机制的研究仍不足. IPCC 第四次报告指出, 海平面变化在地理分布上有很大的不一致性, 即有些地区(如 1993~2003 年的西太平洋暖池地区)海平面上升速率远大于全球平均海平面上升速率, 而有些区域(如 1993~2003 年的太平洋东部沿岸)海平面则呈下降趋势[1]. 因此, 区域海平面变化与全球海平面变化有很大的不同.

南中国海(以下简称南海)是赤道区域最大的边缘海, 通过台湾海峡、吕宋海峡和马六甲海峡连接了东海、太平洋和印度洋. 受卫星测高观测时间限制, 早期对南海海平面变化的研究主要在季节尺度上[12~15]. 随着卫星测高数据的积累, 部分学者研究了南海海平面变化的年际信号. 李立等[16]利用 T/P 资料得到 1993~1999 年南海平均海平面变化趋势为 10 mm/a, 其中吕宋海峡西部上升速率最大, 为 27 mm/a. Cheng 和 Qi[17]进一步分析了 1992 年 10 月到 2006 年 1 月的南海卫星测高数据, 发现 1993~2000 年南海平均海平面上升速率为 11.3 mm/a, 2001~2005 年下降速率为 11.8 mm/a. Fang 等[18]对南海卫星测高数据做经验正交函数(EOF)分析后, 也发现 1993~2001 年南海海平面上升明显, 2001~2003 年存在明显下降趋势. García 等[19]首次联合卫星测高、ECCO 海洋模式和 GRACE 资料, 研究了地中海地区的海平面周年变化. 其研究结果表明, 卫星测高减去比容海平面得到的海水质量周年变化与 GRACE 的结果在地中海地区有很好的一致性. Cheng 和 Qi[20]利用卫星测高、Ishii 海洋资料和 GRACE 资料, 研究了 2003~2006 年南海海平面周年变化. 其结果表明, 南海中部海平面变化主要为热容作用, 南海西部的海平面变化以海水质量变化为主. 本文联合了卫星测高、ECCO 海洋模式、Ishii 海洋资料、GRACE 卫星重力和验潮站资料, 分别在季节尺度(2003~2009 年)和年际尺度(1993~2009 年)探讨了中国南海海平面的变化规律.

1 数据与方法

本文采用的卫星测高数据为法国 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)提供的格网化数据(MSLA)[21]. 该数据融合了 T/P, Jason-1, ERS 和 ENVISAT 等多颗卫星的测高资料. 数据时间分辨率为 7 天, 空间分辨率为 1°×1°, 时间跨度为 1993 年 1 月至 2009 年 12 月. 数据经过了必要的标准改正, 如电离层延迟改正、对流层干湿分量改正、固体潮和海潮改正、海洋负荷潮汐改正、极潮改正、电磁偏差改正、仪器改正和反变气压计改正等[22]. 由于负荷效应, 海水质量的时变会导致海底地形的变化. 这部分影响在研究区域海平面变化时可能十分显著[23]. 本文利用 GRACE 得到的海水质量变化计算了该项负荷改正, 并从 MSLA 测高数据中进行扣除. 经计算, 该项负荷改正值在南海平均在 1.5 mm 以内.

西沙(16.83°N, 112.33°E)和南沙(9.53°N, 113.88°E)的验潮站数据由 PSMSL(Permanent Service for Mean Sea Level)提供[24]. 数据做了年平均处理, 南沙数据时间跨度 1998~2009 年, 其中 1999, 2002 和 2003 年数据缺失; 西沙数据时间跨度 1993~2009 年. 我们还采用了 2007 年公布的《中国海平面公报》中的南海海平面变化数据 (http://sdinfo.coi.gov.cn/hygb/hpm/2007/).

本文采用的海洋模式数据为 ECCO(Estimation of the Circulation and Climate of the Ocean)海洋模式提供的全球时变三维温盐场数据. 由于 ECCO 模式采用了 Boussinesq 近似, 使其体积守恒而非质量守恒, 我们对其进行了质量守恒改正[25,26]. 该项改正值的振幅约为 3 mm. ECCO 数据的时间分辨率为 10 天, 纬度方向分辨率从赤道区域的 0.3°到高纬度地区的 1°, 经度方向分辨率为 1°. 数据时间跨度为 1993 年 1 月至 2009 年 12 月.

海洋实测数据采用了 Ishii 等[5]提供的海洋温盐实测数据集, 数据时间分辨率为 1 个月, 空间分辨率为 1°×1°, 时间跨度为 1993 年 1 月至 2006 年 12 月. 根据海水温度、盐度变化与海水比容海平面变化之间的关系[5], 本文利用 ECCO 模式和 Ishii 实测数据计算得到南海比容海平面变化.

本文采用了 CSR(Center for Space Research, University of Texas at Austin)提供的 GRACE level-2

(Release-4)数据求解质量项海平面变化. 该数据为 60 阶正则化球谐系数, 时间跨度为 2003 年 1 月至 2009 年 12 月. 我们加回了卫星激光测距(SLR)观测的 C_{20} 项[27]和 Swenson 等[28]计算的地心改正; 采用了 Duan 等[29]提出的改进滑动窗口方法去除同一次的奇数阶和偶数阶球谐系数的相关性, 减少“条带”误差的影响; 使用 Guo 等[30]的方法去除了海陆边界泄漏误差的影响, 并使用了 300 km 高斯平滑来降低高阶噪声的影响; 球谐系数最终转化为 1°×1°的全球分布的等效水柱高变化. 为了与经过反变气压计改正的卫星测高数据匹配, 我们加回了 GAD 海洋大气模型, 并扣除了大气质量在海洋上月平均值的时变部分[8,19]. 为了与 GRACE 的时空分辨率匹配, 我们对测高数据和海洋数据做了必要的月平均和 300 km 高斯平滑.

受地壳均衡调整(GIA)的影响, 海底地形和大地水准面存在长期变化趋势. 这部分影响应该从卫星测高和卫星重力数据中扣除. 本文采用了汪汉胜等[31]提出的基于 RF3L20(β=0.4) 地幔粘滞度模型和 ICE4G 冰期模型的 GIA 模型. 由于 AVISO 提供的卫星测高结果没有进行 GIA 改正, 我们基于汪汉胜等的 GIA 模型, 计算得到南海地区的 GIA 对卫星测高的改正为−0.3 mm/a. 这与 GIA 对卫星测高数据在全球海洋的平均改正值一致. GIA 对 GRACE 结果的改正在南海为−0.7 mm/a. 我们利用国际上常用的 Paulson 等[32]提供的模型计算得到 GIA 对 GRACE 结果的改正在南海为−0.8 mm/a. 这与汪汉胜等[31]的结果是一致的.

2 结果和讨论

2.1 南海海平面季节性变化

图 1(a)~(d)分别表示卫星测高、ECCO 模式(比容)、“测高-ECCO”(质量项)和 GRACE(质量项)得到的 2003~2009 年南海海平面变化的周年振幅和相位的地理分布. 如图 1(a)所示, 卫星测高得到总的海平面变化的周年振幅在南海中部区域相对较小, 在吕宋海峡西部、华南沿海区域和越南沿海振幅相对较大, 最大分别达到 7, 9 和 12 cm 左右; 南海周年海平面变化的相位在 220°~340°之间. 与卫星测高结果不同, 图 1(b)中 ECCO 模式得到的比容海平面变化的周年振幅在南海西部相对较小, 在吕宋岛西部和南海南部存在两个周年振幅较大的区域, 最大分别达到 6 和 4 cm 左右; 比容海平面的周年相位则比测高结果提前一至两个月, 这主要是受海水质量变化的调制导致的. 如图 1(c)所示, “测高-ECCO”得到的质量项海平面变化, 在南海北部和越南南部海域周年振幅较大, 在南海中部和吕宋岛周边海域的周年振幅较小. 这说明在南海浅海地区的海平面变化主要为质量项海平面变化, 而南海中部和吕宋岛周边海域的海平面变化主要为比容海平面变化. “测高-ECCO”得到的质量项海平面变化的周年相位大约在 260°~340°之间. 图 1(d)表示利用 GRACE 数据得到的质量项海平面变化的周年振幅和相位. 如图 1(d)所示, GRACE 结果在吕宋岛周边海域的周年振幅也较小, 在南海浅海区域振幅则较大, 这与“测高-ECCO”的结果在地理分布上具有很好的一致性. GRACE 结果的周年相位在 310°~320°之间, 较“测高-ECCO”的结果提前一个月左右.

为了避免浅海对卫星测高和 ECCO 模式的影响, 我们选择了深度大于 200 m 的南海区域计算了平均海平面变化的时间序列. 为了去除高频的影响, 我们对数据做了三个月滑动平均, 结果如图 2 所示. 时间序列的周年振幅和相位如表 1 所示. 如图 2 和表 1 所示, 我们可以发现: (1) 卫星测高和比容海平面的结果较为一致, 两个时间序列的相关性为 0.84; 而卫星测高与 GRACE 结果的相关性只有 0.46. 海水膨胀导致的比容海平面最大值出现在 8 月, 测高得到的总的海平面变化最大值出现在 9 月, 两者存在 1 个多月的相位差. 这主要是因为海水质量的调制作用, GRACE 得到的海水质量变化的最大值出现在 11 月; (2) GRACE 和“测高-ECCO”估计的南海质量项海平面变化的周年振幅分别为(2.7±0.4)和(2.7±0.3) cm, 两者符合得较好, 两个时间序列的相关性为 0.8; 两者的周年相位也符合得很好. 通过这两种独立的观测手段相互验证, 我们有效地分离出了南海质量项海平面变化的周年变化信号.

表 1 2003~2009 年南海平均海平面变化的周年振幅和相位

	周年振幅(cm)	周年相位(°)
测高	3.3±0.6	266±10
ECCO	3.3±0.5	219±7
测高-ECCO	2.7±0.3	332±7
GRACE	2.7±0.4	312±12

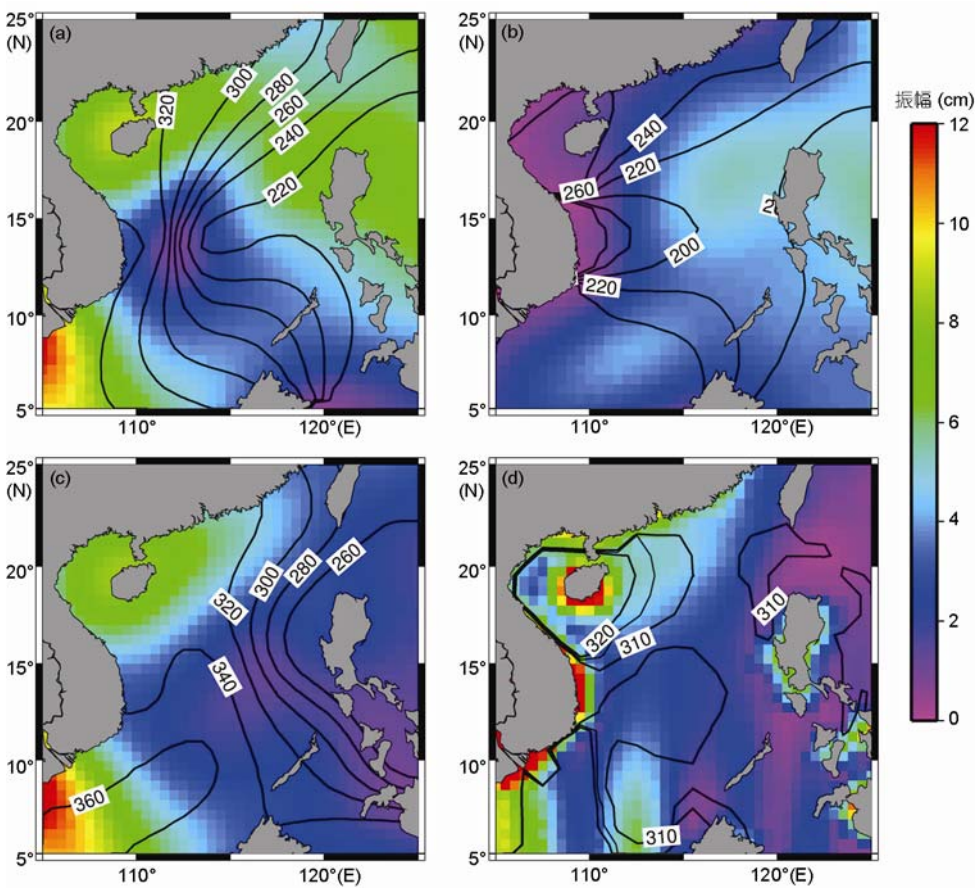

图 1　卫星测高(a)、ECCO 海洋模式(b)、测高-ECCO(c)和 GRACE(d)分别得到的 2003~2009 年南海海平面变化的周年振幅和相位

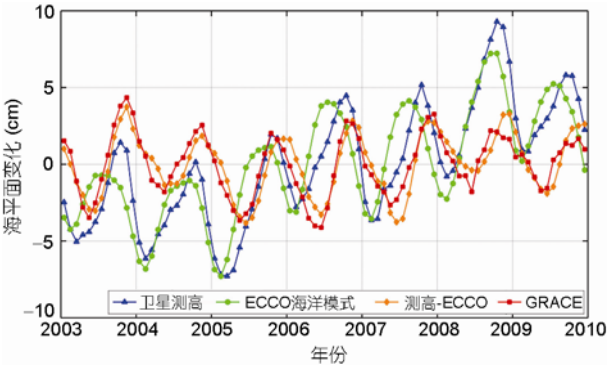

图 2　卫星测高、ECCO 海洋模式、测高-ECCO 和 GRACE 得到的南海平均海平面变化时间序列

2.2　南海平均海平面年际变化

我们选择了深度大于 200 m 的南海区域, 在扣除了海平面变化的季节信号后, 计算了南海平均海平面的年际变化结果. 卫星测高结果表明, 南海平均海平面变化存在十分明显的年际变化特征. 1993~2000 年的速率为(10.5±1.5) mm/a, 2001~2004 年的速率为(−15.3±2.6) mm/a, 2001~2005 年的速率为(−10.7±2.4) mm/a. 这与李立等[16]与 Cheng 和 Qi[17]的结果是一致的. 如图 3 所示, 南方涛动指数 (SOI) 与测高得到的海平面均表现出较为一致的年际变化特征. 1997~1998 年的海平面呈现出明显的先下降后上升的变化, 这种变化与 El Niño 现象相关[33~36]. 2005~2009 年南海平均海平面上升明显, 卫星测高的结果为(17.9±3.1) mm/a. 1993~2009 年测高得到的南海平均海平面变化为(5.5±0.7) mm/a. ECCO 海洋模式的结果虽然在季节尺度上与测高、GRACE 的结果符合得较好, 但是无法呈现长期趋势信号; 而根据 Ishii 海洋数据得到的南海比容海平面变化和测高的结果符合得非常好. 这说明在年际尺度上, 比容海平面变化仍是南海海平面变化的主要部分. GRACE 卫星观

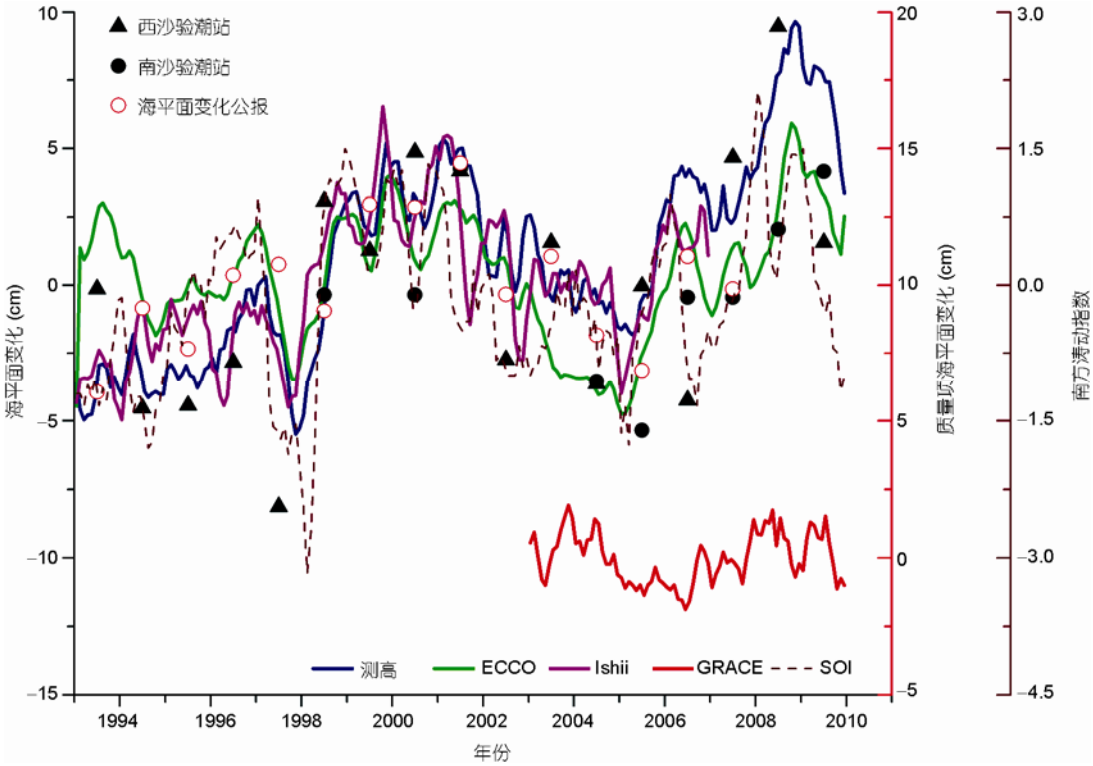

图 3　测高、Ishii, ECCO, GRACE 和验潮站资料得到的南海平均海平面年际变化和南方涛动指数

测得到的质量项海平面变化在扣除季节信号之后, 不存在明显的长期趋势信号. 这也说明了, 南海海水质量变化的长期趋势信号较小, 比容海平面变化是南海平均海平面变化的主要因素. 如图 3 所示, 虽然验潮站观测包含地壳垂直形变等其他信息, 但利用西沙和南沙两个验潮站观测得到的海平面变化和整个南海的平均海平面变化仍符合得很好, 均表现出 1993~2000 年、2005~2009 年海平面上升, 2001~2005 年海平面下降的年际变化. 这说明两个验潮站的观测能够很好地反映南海平均海平面变化的年际信息. 另外, 2007 年的中国海平面公报提供的南海海平面变化数据与卫星测高的结果也符合得很好, 表现出一致的年际变化特征.

3　结论

本文利用卫星测高数据、GRACE 卫星重力数据和海洋实测与模式资料, 分析了南海海平面变化特征. 在季节尺度和年际尺度上, 探讨了海水比容变化和海水质量变化对中国南海海平面变化的影响. 在季节尺度上, 质量项海平面变化是南海浅海区域海平面变化的主要因素. 在深度大于 200 m 的南海区域, GRACE 观测到明显的季节性质量项海平面变化, 这与测高减去比容海平面的结果符合得很好. 在年际尺度上, 南海平均海平面变化表现出明显的年际变化特征, 且主要为比容海平面变化的贡献. 在选择的深度大于 200 m 的南海区域, 卫星测高结果表明, 1993~2000 年南海平均海平面上升速率为(10.5±1.5) mm/a, 2001~2004 年下降速率为(−15.3±2.6) mm/a, 2005~2009 年又有明显上升趋势, 速率为(17.9±3.1) mm/a. 1993~2009 年测高得到的平均海平面变化为(5.5±0.7) mm/a, 明显高于全球同期平均海平面变化趋势(3.3±0.4) mm/a[37]. 2003~2009 年, GRACE 没有观测到明显的趋势信号. 这说明南海整体上与周边海域或陆地水的水循环是平衡的.

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见; 感谢中国科学院中法联合博士培养项目对本文第一作者的资助; 同时感谢中国科学院测量与地球物理研究所的闫昊明研究员和法国 GRGS 的 J.-M. Lemoine 博士提供的帮助.

参考文献

1 Bindoff N L, Willebrand J, Artale V, et al. Observations: Oceanic climate change and sea level. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 385–432
2 Fu L L, Cazanave A. Satellite Altimetry and Earth Sciences. California: Academic Press, 2001
3 Fukumori I. A partitioned Kalman filter and smoother. Mon Weather Rev, 2002, 130: 1370–1383
4 Levitus S, Antonov J, Boyer T. Warming of the world ocean, 1955–2003. Geophys Res Lett, 2005, 32: L02604, doi: 10.1029/2004GL021592
5 Ishii M, Kimoto M, Sakamoto K, et al. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. J Oceanogr, 2006, 62: 155–170
6 Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. J Geophys Res, 1998, 103(B12): 30205–30229
7 Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. Geophys Res Lett, 2004, 31: L09607, doi: 10.1029/2004GL019920
8 Willis J K, Chambers D P, Nerem R S. Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales. J Geophys Res, 2008, 113: C06015, doi: 10.1029/2007JC004517
9 Lombard A, Garcia D, Ramillien G, et al. Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. Earth Planet Sci Lett, 2007, 254: 194–202
10 Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. Global Planet Change, 2009, 65: 83–88
11 常金龙, 钟敏, 段建宾, 等. 联合卫星重力和卫星测高资料研究热容海平面季节性变化. 大地测量与地球动力学, 2007, 27: 44–48
12 Shaw P, Chao S, Fu L. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry. Oceanol Acta, 1999, 22: 1–17
13 Ho C R, Zheng Q N, Soong Y S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data. J Geophys Res, 2000, 105(C6): 13981–13990
14 李立, 许金电, 靖春生, 等. 南海海面高度、动力地形和环流的周年变化——TOPEX/Poseidon 卫星测高应用研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 978–986
15 Liu Q Y, Jia Y L, Wang X H, et al. On the annual cycle characteristics of the sea surface height in South China Sea. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 613–622
16 李立, 许金电, 蔡榕硕. 20 世纪 90 年代南海海平面的上升趋势: 卫星高度计观测结果. 科学通报, 2002, 47: 59–62
17 Cheng X H, Qi Y Q. Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data. Global Planet Change, 2007, 57: 371–382
18 Fang W D, Guo J J, Shi P, et al. Low frequency variability of South China Sea surface circulation from 11 years of satellite altimeter data. Geophys Res Lett, 2006, 33: L22612, doi: 10.1029/2006GL027431
19 García D, Chao B F, Del Río J, et al. On the steric and mass-induced contributions to the annual sea level variations in the Mediterranean Sea. J Geophys Res, 2006, 111: C09030, doi: 10.1029/2005JC002956
20 Cheng X, Qi Y. On steric and mass-induced contributions to the annual sea-level variations in the South China Sea. Global Planet Change, 2010, 72: 227–233
21 Ducet N, Le Traon P, Reverdin G. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. J Geophys Res, 2000, 105(C8): 19477–19498
22 Minster J F, Cazenave A, Serafini Y V, et al. Annual cycle in mean sea level from Topex-Poseidon and ERS-1: Inference on the global hydrological cycle. Global Planet Change, 1999, 20: 57–66
23 Kuo C Y, Shum C K, Guo J Y, et al. Southern Ocean mass variation studies using GRACE and satellite altimetry. Earth Planets Space, 2008, 60: 477–485
24 Woodworth P, Player R. The permanent service for mean sea level: An update to the 21st century. J Coastal Res, 2003, 19: 287–295

25 Greatbatch R J. A note on the representation of steric sea level in models that conserve volume rather than mass. J Geophys Res, 1994, 99(C6): 12767–12771
26 Ponte R M. A preliminary model study of the large-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean. J Geophys Res, 1999, 104(C1): 1289–1300
27 Cheng M K, Tapley B D. Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years. J Geophys Res, 2004, 109: B09402, doi: 10.1029/2004JB003028
28 Swenson S, Chambers D, Wahr J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. J Geophys Res, 2008, 113: B08410, doi: 10.1029/2007JB005338
29 Duan X J, Guo J Y, Shum C K, et al. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions. J Geodesy, 2009, 83: 1095–1106
30 Guo J Y, Duan X J, Shum C K. Non-isotropic Gaussian smoothing and leakage reduction for determining mass changes over land and ocean using GRACE data. Geophys J Int, 2010, 181: 290–302
31 汪汉胜, Wu P, van der Wal W, 等. 大地测量观测和相对海平面联合约束的冰川均衡调整模型. 地球物理学报, 2009, 52: 2450–2460
32 Paulson A, Zhong S J, Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. Geophys J Int, 2007, 171: 497–508
33 Rong Z R, Liu Y G, Zong H B, et al. Interannual sea level variability in the South China Sea and its response to ENSO. Global Planet Change, 2007, 55: 257–272
34 Chang C W J, Hsu H H, Wu C R, et al. Interannual mode of sea level in the South China Sea and the roles of El Niño and El Niño Modoki. Geophys Res Lett, 2008, 35: L03601, doi: 10.1029/2007GL032562
35 袁林旺, 俞肇元, 谢志仁, 等. 1965~2005 年西北太平洋边缘海区海面变化记录的 ENSO 信号及其时空分异特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 664–676
36 王东晓, 谢强, 杜岩, 等. 1997~1998 年南海暖事件. 科学通报, 2002, 47: 711–716
37 Nicholls R, Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. Science, 2010, 328: 1517–1520