

文章编号: 1001-8166(2005)06-0643-06

利用 T/P 海面高度数据校验验潮站 地面升降的初步研究

崔树红, 谢志仁, 钟鹤翔, 信忠保
(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097)

摘要 利用 TOPEX/Poseidon 卫星 1993—2001 年的海面测高资料提取了上海和江苏临近海域这 9 年间的绝对海面变化信息, 并与该区域 6 个验潮站的时段潮位记录数据进行了对比分析。研究表明根据 T/P 海面高度数据提取的月均海面变化曲线与同海区验潮站测得的同期海面变化过程具有相当好的一致性和同步性, 但是根据潮位序列得出的 9 年平均海面上升速率值均大于根据卫星资料得出的上升速率值。由于卫星测高数据是严格建立在在地心坐标基础上的, 因此二者的差异在很大程度上应与验潮站所在地点的地面沉降有关。值得注意的是经过地面沉降校正的上海吴淞验潮站数据得出的 9 年平均海面上升速率值仅比卫星测高结果大 0.43 mm/a , 而江苏省射阳河口至三条巷之间 5 个未经地面沉降校正的验潮站得出海面上升速率与卫星测高结果之间的差值在 $0.95 \sim 3.01 \text{ cm/a}$ 之间, 并呈向北递增趋势。这一对比结果反映该岸段近期的地面沉降速率可能有自南向北增大的趋势, 其量值有可能达到厘米量级。

关键词 海面变化; 地面升降; 卫星测高; T/P 卫星; 验潮站

中图分类号: P228.715 文献标识码: A

0 引言

传统的海面变化研究方法^[1]的直接研究对象是建立在陆地坐标系之上的海面相对于陆地的升降变化, 即所谓相对海面变化。如何将这一海陆相对变化量中所蕴含的海面和地面相对于地心之间距离的变化量(所谓绝对变化量)分离、提取出来是海面变化研究者长期追寻却很难达到的一个终极目标^[23]。近 10 年来卫星测高技术的发展和实测数据的积累为实现这一意义重大却困难重重的目标提供了崭新的思路和方法^[4]。如 1992 年 8 月美国和法国联合发射的 TOPEX/Poseidon(T/P)^[5-8] 卫星已经积累了 10 多年与验潮站测量精度相接近的全球海面高度测量数据^[9]。卫星测高资料确定绝对海面

变化而验潮站资料确定相对海面变化, 通过这两种资料的对比显然有可能提取出验潮站所在陆地的地面绝对升降变化信息^[10-12]。本文通过江苏中部至长江口近岸海域 1993—2001 年期间时段同区段的 T/P 测高资料与验潮站资料的对比分析, 对该岸段的海面—地面变化速率以及根据卫星资料校验地面升降速率的方法进行探讨。

1 数据来源及处理方法

本文中使用的卫星测高数据是由美国德克萨斯大学空间研究中心(UTCRS)提供的 T/P 卫星海面高度距平(SSHA)网格化数据记录, 数据周期为 10 天, 数据长度是 1992 年 12 月 21 日至 2002 年 6 月 12 日(第 10 ~360 周期), 数据空间分布为 $65^{\circ} \text{N} \sim$

* 收稿日期: 2004-07-28 修回日期: 2004-10-21.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“长江三角洲地区海面—地面系统模型研究”(编号: 40171008)资助。

作者简介: 崔树红(1979-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统方面的研究. E-mail: sh_cui@163.com

通讯作者: 谢志仁(1945-), 男, 浙江上虞人, 教授, 博导, 主要从事海面变化及其趋势预测研究. E-mail: xzhiren@njnu.edu.cn

65°E, 180°E ~ 180°W 数据记录在每个 1° × 1° 的经纬度网格的中心点上。原资料已经过各种标准的校正处理, SSHA 网格化数据提供相对于 5 年 TOPEX 数据确定的平均海平面作为参考面的 1° × 1° 网格化的逐周期海面高度变化的时间序列, 网格化 SSHA 数据的评估精度为 3 ~ 4 cm。

本文选取了 T/P 卫星 SSHA 网格化数据记录中的第 11 ~ 342 周期位于 120° ~ 122°E, 31° ~ 35°N 区间的数据。把 SSHA 数据中标为“999.0000”和“998.0000”的无效数据剔除后, 按月求算术平均得到 1993 年 1 月到 2001 年 12 月的月均海面高度距平数据序列。

本文所用的吴淞验潮站 1993—2001 年的月均潮位数据由上海海事局海测大队提供, 已经过地面沉降校正。江苏沿岸没有经过沉降校正的 1993—2000 年的 5 个验潮站月均高潮位数据由江苏省水文局提供。

本文选用的验潮站位置和卫星测高数据格网分布如图 1 所示。其中格网 1、2 分别与射阳河口站、斗龙港站对比, 格网 3 与小洋口站和遥望港站对比, 格网 4 与三条港站和吴淞站对比。

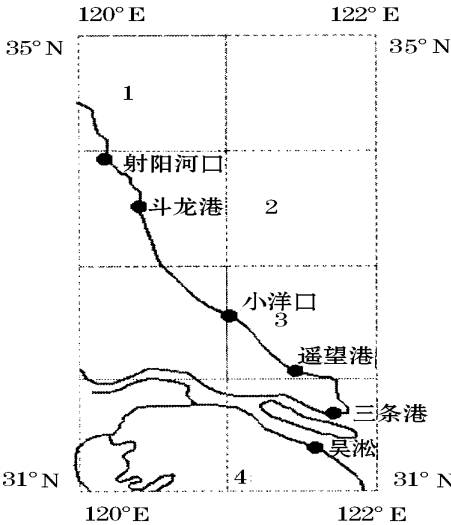


图 1 研究区位置

Fig.1 Position of research reaches

图中黑点表示验潮站所在位置, 数字表示所采用的卫星测高数据所在经纬格网

The dot point denotes tide gauge stations position, number denotes the grid of satellite altimetry

2 对上海吴淞验潮站的校验

2.1 相关性

取 1993 年 1 月至 2001 年 12 月图 1 中标“4”的网格的 T/P 卫星 SSHA 数据算得该海区的月均海面变化距平序列。将同期上海吴淞验潮站经过地面沉降校正的逐月平均潮位数据以该 9 年平均值为基准转换为距平序列。根据这两种不同来源的数据序列绘制的海面变化距平曲线见图 2。图中曲线以实线表示卫星海面变化过程, 以虚线表示吴淞站海面变化过程。可以看出, 二者除了距平绝对值不同以外, 在变化趋势和细节上是十分相似的。如二者呈现出近似相同的季节性变化, 年内低海面均出现在 2 ~ 4 月, 高海面均在 8 ~ 10 月, 研究时段内两者均呈现出相近的海面上升趋势。计算结果表明, 这两个序列之间的相关系数为 0.73 (通过 99% 信度水平的显著性检验) 表明二者之间具有显著的相关性。

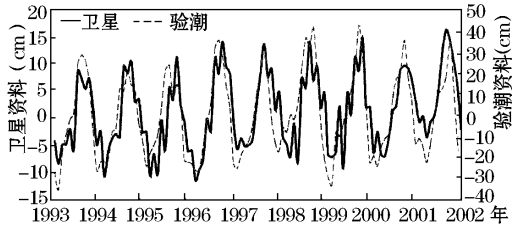


图 2 1993—2001 年卫星测高和吴淞验潮站海面变化距平曲线的对比

Fig.2 The contrast of sea surface change between satellite altimetry and tide gauge station from 1993 to 2001

2.2 周期成分

对这两个时间序列进行功率谱分析的结果如图 3 所示。吴淞站的月均海面距平序列主要显示出 3 个周期成分: 12 个月 (频率 0.0833)、6 个月 (频率 0.1667)、54 个月 (频率 0.0185)。12 个月的周期成分为周年波动, 6 个月的周期是半年振动与 K1 分潮混淆, 54 个月 (4.5 年) 周期为大气振动周期^[13, 14]。在 T/P 卫星的功率谱上, 12 个月周期有显著表现, 但其振幅明显较吴淞序列小, 4.5 年周期也有显示, 且其振幅与吴淞序列大致相当, 6 个月周期没有显示。功率谱分析的结果表明, T/P 卫星监测到的海面变化周期成分与吴淞验潮站记录的结果大体相

似,二者之间在年内短周期成分上的差异性可能与本文所取得的卫星测高资料已经过潮汐模型改正有关。

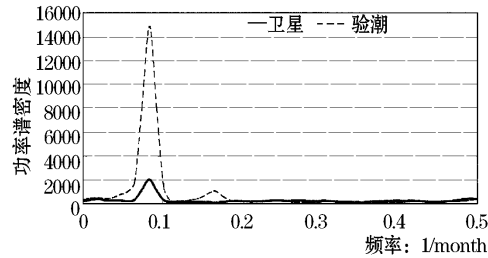


图3 卫星测高和吴淞验潮站海面变化功率谱特征对比

Fig.3 The contrast of sea surface change Fourier's character between satellite and tide gauge station

2.3 上升趋势

从图4已经可以看出²种监测手段确定的海面变化在研究时段内均呈上升趋势,进一步对卫星和潮位的年均序列进行线性回归求得1993—2001年9年平均海面上升速率分别是0.521 cm/a和0.564 cm/a,后者比前者大0.43 mm/a。对此结果可以有2种推论:这一微小差值表明经地面沉降校正后的吴淞潮位记录的海面变化速率已接近海面绝对变化速率,二者之间差值可视为由各种随机因素所造成的“噪声”;这一微小差值表明吴淞站地面沉降校正所依据的基准点(佘山基准点)可能存在轻微沉降趋势。陈西庆^[5]认为上海地区沉积基底最大绝对沉降速率为0.19 mm/a。据上海市地质处资料,上海等水准测量结果显示佘山与查山1962—1976年的高差变化为5.35 mm,这表明佘山基准点所在的基岩山体的差异沉降速率为0.35 mm/a。又据上海天文台甚长基线干涉测量(VLBI)研究的结果^[16],佘山地区基岩的现代沉降速率至多为1 mm/a。由此看来,上述2个推论中,推论二是能够成立的。这也从一定程度上证明了利用卫星海面测高资料与验潮站资料的对比进而对地面绝对升降速率进行校验的可行性。

3 对江苏沿海验潮站的校验

3.1 相关性

江苏沿海平原是典型的地面沉降区。本文选取从射阳河口到长江口北侧三条港之间的5个验潮站,对这些验潮站1993年1月至2000年12月的月均高潮位数据进行了分析。当然,这些潮位数据均

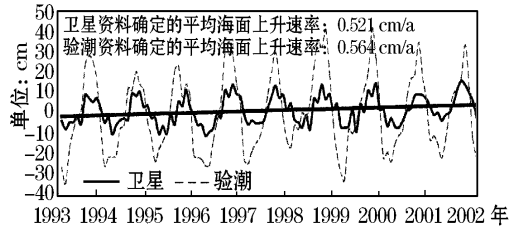


图4 卫星测高和吴淞验潮站海面上升趋势对比

Fig.4 The contrast of sea surface rising trend between satellite altimetry and tide gauge station

系未经地面沉降校正的相对变化值。考虑到这些地处淤泥质滩海岸的河口验潮站的低潮位数据普遍质量低下但高潮位数据可靠^[17],各站均采用平均高潮位数据来分析海面变化过程。同时选取这些验潮站临近海区4个经纬格网的T/P卫星海面测高数据进行同期绝对海面变化的分析。5个验潮站所显示的相对海面变化过程如图5所示,卫星监测的同期绝对海面变化过程如图6所示。可以看出,5个验潮站之间和4个格网之间的变化趋势和细节的吻合度很高,可以证明潮位数据和卫星数据的可比性。

对每个验潮站的月均高潮位序列与其相邻海区卫星测高海面序列的相关性进行了分析,其相关系数在0.728~0.763之间(表1)均通过了99%信度水平的显著性检验。这一结果进一步表明了这两类数据序列之间的可比性。

3.2 上升趋势

5个潮位年均序列及其相邻的卫星海面年均序列进行一元线性回归分析显示了这8年期间的上升趋势值(表1)。表1中“验潮资料得出的海面上升速率”、“卫星资料得出的海面上升速率”两列分别采用验潮与卫星两种序列的年均值做一元线性回归计算得到的,“二者之间的相关系数”是验潮与卫星月均序列的相关系数,“二者差值”是“验潮资料得出的海面上升速率”与“卫星资料得出的海面上升速率”两列的差值。如表1所示,根据潮位序列获得的相对海面上升速率值在1.327~3.378 cm/a之间,呈向北递增趋势,极差为2.051 cm/a。根据卫星海面序列得出的绝对海面上升速率值在0.339~0.380 cm/a之间,呈现两头高中间低的格局,极差

上海市地质处·上海市地面沉降勘察研究报告(1962—1976)·1976。

上海天文台·上海邻近海域海平面变化的规律及预测研究·1995。

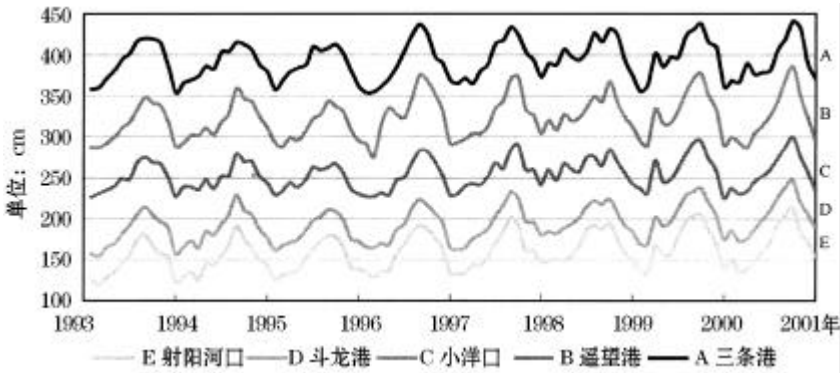


图5 1993—2000年江苏沿海5个验潮站的海面相对变化曲线

Fig.5 The relative sea surface change's curve of five-coast tide gauge tide in Jiangsu province from 1993 to 2000

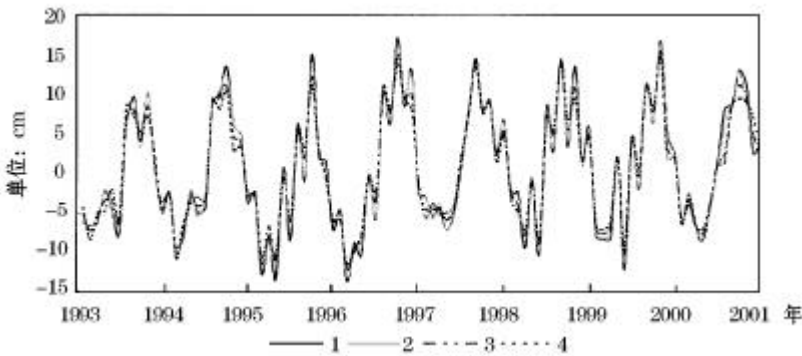


图6 验潮站附近卫星监测的4个经纬格网的海面变化距平曲线

Fig.6 The sea surface change's curve of four grid's satellite altimeter at nearby tide gauge station

数字代表 T/P 海面测高数据的经纬格网, 参见图1

Number denotes the grid of T/P altimeter data, see also Fig.1

表1 江苏沿海验潮资料与卫星资料的计算结果

Table 1 The computer's result between tide gauge station and satellite altimeter in Jiangsu coast

验潮站名	验潮资料得出的 海面上升速率 (cm/a)	卫星资料采用的 经纬格网	卫星资料得出 的海面上升率 (cm/a)	二者之间的 相关系数	二者差值 (cm/a)
射阳河口	3.378	35 N 120 E	0.380	0.731	3.013
斗龙港	3.283	34 N 121 E	0.365	0.731	2.918
小洋口	2.091	33 N 121 E	0.339	0.763	1.752
遥望港	1.839	33 N 121 E	0.339	0.728	1.500
三条港	1.327	32 N 121 E	0.375	0.733	0.952

仅为 0.041 cm/a 。潮位监测结果与其相邻海区卫星监测结果两两相减所得的差值在 $0.95 \sim 3.01 \text{ cm/a}$ 之间, 呈向北递增趋势, 平均差值为 2.027 cm/a 。

由海面—地面系统基本方程可知, 理论上某地点的相对海面变化速率是海面绝对变化速率与该地

点地面绝对变化速率的代数和^[3]。但是实际上根据卫星测高序列和验潮序列得出的海面变化趋势值各自都会受到一些不同的误差因素的影响。如卫星测高资料的各种校正模型在不同地区精度并不一致, 如潮汐校正模型在近岸区精度低下。又如验潮

序列是对单点潮位变动的记录,而卫星序列是对一个区域海面变化平均状况的记录等。因此,不能将二者的趋势差值直接看作是地面升降速率值。根据我们的研究,尽管可以以平均高潮位的变化来近似反映平均海面变化,但在本研究区已有数据表明近几十年来,平均高潮位的上升速率可能要比平均潮位的上升速率大 10%~30%^[17]。因此,根据江苏沿海验潮资料与卫星资料对比得出的初步推论应该是,射阳河口至三条巷之间近期的地面沉降速率有可能达到年厘米量级,并且呈现向北增大的趋势。

4 讨论和结论

(1) 本文研究区不同经纬格网卫星测高序列所描绘的 9 年海面变化过程彼此之间的高度一致性以及卫星记录与沿岸验潮站潮位记录之间的显著相关性和可比性表明:经过校正的 T/P 海面高度距平(SSHA)数据即使在研究区内的近岸海区仍具有很高的精度。据此获得的月均海面变化序列可以满足对 1993 年以来近海区域绝对海面变化趋势乃至变化细节研究的要求,可以用来对沿岸验潮站所在地点的地面升降运动进行校验和估算。

(2) 本文通过经地面沉降校正的上海吴淞验潮站记录的验证,对江苏沿海 5 个验潮站所在岸段近期地面沉降速率做出的推论认为,该岸段的地面沉降速率值可能会达到年厘米的数量级,并且有从苏北南部向中部增大的趋势。这一情况表明,以往根据地质资料和重复水准测量资料分析得出的苏北沿海地面沉降速率最大在 5.2 mm/a 以下^[18]的认识可能需要修正。同时本文得出的数据可能意味着某些局地性的、甚至是人为性的因素有可能对 20 世纪 90 年代以来该岸段的相对海面—地面系统变化造成了显著影响。

致谢:感谢美国德克萨斯大学空间研究中心提供宝贵的 T/P 资料。感谢厦门大学海洋与环境学院李炎教授对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References):

[1] Zhong Guang. The reason and result of sea-level change [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(5): 706-712. [钟广法. 海平面变化的原因及结果[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(5): 706-712.]

[2] Baker T F. Absolute sea level measurements, climate change and vertical crustal movements [J]. *Global and Planetary Change*, 1993, 8: 145-149.

[3] Xie Zhiren. Sea Surface Change and Environment Variance: The Base Search of Sea Surface-land System and Sea-Gas-Ice System [M]. Guiyang: Guizhou Science & Technology Publishing House, 1992. [谢志仁. 海面变化与环境变迁 海面—地面系统与海—气—冰系统初探[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1992.]

[4] Chen Junyong. Satellite geodesy and geosciences in the new millennium [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(2): 175-177. [陈俊勇. 新世纪的卫星大地测量学和地球科学[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 175-177.]

[5] Fu L L, Christensen E J, Yarone C A Jr, et al. TOPEX / POSEIDON mission overview [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12): 24 369-24 381.

[6] Koblinsky C J, Ray R, Beckley B D, et al. NASA Ocean Altimeter Pathfinder Project Report 1: Data Processing Handbook, NASA/TM-1998-208605 [R]. Greenbelt: NASA/GSFC, 1999.

[7] Koblinsky C J, Ray R D, Beckley B D, et al. NASA Ocean Altimeter Project Report 2: Data Set Validation, NASA/TM-1999-209230 [R]. Greenbelt: NASA/GSFC, 1999.

[8] Cheney R, Miller L, Agreen R, et al. TOPEX / POSEIDON: The 2-cm solution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12): 24 555-24 563.

[9] Nerem S S, Haines B J, Hendricks J, et al. Improved determination of global mean sea level variations using TOPEX / POSEIDON altimeter data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(11): 1 331-1 334.

[10] Kuo C Y, Shum C K, Braun A, et al. Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: art. no. 401608.

[11] Cazenave A, Diminh K, Soudarin L, et al. Sea level change from Topex-Poseidon altimetry and tide gauges and vertical crustal motions from DORIS [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 2 077-2 080.

[12] Mitchum G T. Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea levels [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12): 24 541-24 554.

[13] Li Li, Wu Risheng, Li Yanchu, et al. A preliminary analysis of shallow water tidal aliasing in TOPEX / POSEIDON altimetric data [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(3): 7-14. [李立, 吴日升, 李燕初, 等. TOPEX / POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析[J]. *海洋学报*, 1999, 21(3): 7-14.]

[14] Tian Suzhen, Ma Jirui, Zheng Wenzhen, et al. A periods elements of monthly average tide change in the Pacific Ocean [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(4): 11-18. [田素珍, 马继瑞, 郑文振, 等. 太平洋月平均水位变化中的周期成分[J]. *海洋学报*, 1996, 18(4): 11-18.]

[15] Chen Xiqing. The search and meaning of sea surface change nearby Changjiang in recently 70 years [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 45(4): 387-398. [陈西庆. 近 70 年长江口海面变化研究及其意义[J]. *地理学报*, 1990, 45(4): 387-398.]

[16] Qian Zhihan. Determination of the crustal vertical motion at Shes-

- han area, shanghai by VLBI[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1996, 17: 52-56. [钱志瀚·甚长基线干涉测量仪测量佘山地区的地壳垂直运动[J].中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17: 52-56.]
- [17] Wang Yanhong, Zhang Renshun, Xie Zhiren. Analysis of relative sea-level change on muddy coast by tidal gauge records—For example muddy coast in Jiangsu province[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(5): 59-64. [王艳红, 张忍顺, 谢志仁·平均高潮位记录分析淤泥质海岸的相对海面变化——以江苏淤泥质海岸为例[J].海洋通报, 2004, 23(3): 59-64.]
- [18] Xie Zhiren. The future trend of sea-level change[A]. In: Zhao Xitao ed. Climate and Sea-level Change, Trend and Infection in China: Sea-level Change in China[C]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1996. 312-358. [谢志仁·海面变化的未来趋势[A].见:赵希涛主编·中国气候与海面变化及其趋势和影响:中国海面变化[C].济南:山东科学技术出版社, 1996. 312-358.]

THE PRIMARY RESEARCHES THAT T/P SEA HEIGHT DATA IS USED FOR REVISED GROUND RISE OR FALL AT THE TIDE GAUGE STATION

CUI Shu-hong, XIE Zhi-ren, ZHONG He-xiang, XIN Zhong-bao
(College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: The T/P satellite data-sea surface height anomaly from 1993 to 2001 is used for the analysis of the information of absolute sea-level change on the coast of Shanghai city and Jiangsu province. The information of absolute sea-level change is contrasted with six tide gauge data at the same time and region. The results indicate that the two-month average sea surface change charts were almost equal and isochroous, and the value of rise speed computed of tide gauge was bigger than that computed from satellite data. The coordinate center of satellite altimetry data was the center of Earth so that the difference between value speed of satellite and the value speed of tide gauge station was correlative with the ground fall at tide gauge. It is noteworthy that the sea surface average rise speed value computed of Wusong tide gauge station in Shanghai city corrected by the round fall was 0.43mm/a above that computed from satellite data. The difference of rising speed was 0.95 ~ 3.01cm/a between calculation by the five tide gauges stations from Sheyang station to Santiaogang station in Jiangsu province not corrected by the round fall and computed by the satellite data, and the value of rising speed slowly from south to north. The contrast results indicated that the trend of speed of round fall on coast from Sheyang and Santiaogang increased slowly from south to north, the change value probably reached to one centimeter per year.

Key words: Sea-level change; Ground rise or fall; Satellite altimeter; T/P satellite; Tide gauge station.