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

李立 许金电 蔡榕硕

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005. E-mail: lili@xmu.edu.cn)

摘要 利用 7 年的 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计资料, 发现在 1993 年 1 月至 1999 年 12 月间南海海平面总体呈现上升趋势, 就整个海盆所估算的总体上升速率约 1 cm/a. 海平面的上升在空间上并不均匀, 在吕宋岛西侧的深水海盆处上升率高达 2.7 cm/a, 在浅水陆架区上升率则多较低(甚至为负值). 认为所观测到的海平面快速上升是一种地区性现象, 主要因南海上层变暖所致. 分析表明同期南海上层水温的上升速率为 0.15℃/a. 分析还表明, 所观测到的上升趋势主要是一种年代信号, 可能与太平洋暖池海域的年代尺度变化相联系.

关键词 海平面上升 年代趋势 高度计 南海

TOPEX/POSEIDON 高度计(以下简称 T/P)自从 1992 年 8 月发射升空后已在轨道上运行了近 10 年, 并被物理海洋学界广泛应用于海洋学研究. 测量结果表明, TOPEX 系统单轨(single-pass)海平面测量的均方根准确度已达到 4.7 cm^[1], 随后又提高到 4.3 cm^[2]. 但当分析中所含的观测次数增加时, 准确度随之提高. 就全球平均海平面而言, T/P 高度计 10 天一个周期(cycle)的观测精度已达到 4 mm, 但确定其准确度尚有一些困难^[3].

在应用网格化的 T/P 资料研究南海环流的平均周年变化的过程中, 我们注意到卫星高度计所给出的月平均海平面高度距平(sea surface anomalies, 简称 SSHA)时间序列有明显的上升趋势(图 1(a)), 表明在上一个年代南海的海平面持续上升. 本文纪录并讨论了该现象, 并认为上层海水年代尺度变暖是造成南海海平面上升的主要原因.

1 数据

为证实我们所发现的海平面上升趋势的正确性, 本工作采用了来源不同的两组 T/P 数据, 分别是: 由 NASA/GSFC 提供的 NASA 海洋高度计计划网格化数据集^[4]和由 NOAA/LSA 提供的沿轨海平面距平分析资料¹⁾. 两组数据的长度都是 1993 年 1 月到 1999 年 12 月, 原资料已经过各种标准的校正处理^[4~6]. 第 1 组数据提供相对于 1993 年平均参考面的 1° × 1°

网格化的逐月海平面高度变化的时间序列. 由于时空平滑消除了部分噪音, 网格化资料的噪音均方值估计减小到 1~2 cm^[4,5]. 第 1 组数据提供间距为 1 个纬度的各 T/P 周期的沿轨 SSHA 分析结果, 其参考面为同一点 1993 年 1 月至 1995 年 12 月的平均值. 相关研究表明, 对数百公里尺度的观测结果加以平均之后, 其高度计分析结果在热带太平洋一带的准确度大约为 2 cm^[6]. 平滑后的 SSHA 和南海沿岸潮位站月平均值的对比也表明, 南海局地的相对均方误差为 2~3 cm^[7].

本文还使用了夏威夷大学海平面中心提供的、经气压校正后的验潮站月平均水位资料和 Scripps 海洋研究所联合环境资料分析中心提供的全球上层海洋网格化逐月水温场资料来验证结果. 以上所有相关时序的趋势分析均采用常规的线性回归方法.

2 总体上升率

图 1 给出 1993 年 1 月到 1999 年底, 由上述两组 T/P 数据求得的南海平均海平面(105°~121° E, 0°~25° N 范围内所有有效测点的平均值)时间序列, 可以清楚地看到, 这一期间海平面呈上升趋势, 网格化数据集和沿轨分析资料给出的总体上升速率每年分别为 0.97 和 1.03 cm. 因此, 两项分析均证实了南海海平面的总体上升趋势.

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-1-59>

1) Cheney B, et al. TOPEX/POSEIDON altimeter along-track sea level deviation analysis. 2000

图 1 T/P 测量导出的南海海面高度(海区平均值)时间序列

(a) 网格化数据集结果并给出南海上层 400 m 热含量(平均水温)的逐月时序; (b) 沿轨分析结果, 所估算的总体上升速率约 1.0 cm/a

3 上升趋势的分布形态

分析还揭示了南海海平面上升在空间分布上的不均匀性。根据沿轨分析资料估算的海平面上升速率的空间分布(图 2)表明: 深水海盆处上升速率一般较高, 沿 16° N 有一条脊线发育, 以 16° N, 117.5° E 为中心有一峰值区, 其最高上升速率达 2.7 cm/a。在南海北部和 9° N 以南的陆架上, 上升速率大都在平均水平之下, 甚至为负值。自越南近岸到台湾海峡明显有一低槽, 覆盖了整个北部陆架。负值区还出现在加里曼丹沿岸。

图 2 中在南海之外还可识别出两个高上升速率区域: 一个中心位置在 23° N, 123° E, 上升速率大于 2.5 cm/a; 另一个在 16° N, 124° E, 上升速率约 2.2 cm/a。它们都是图 2 中引人注意的特征, 但位于西太平洋海域, 我们将留待以后讨论。

4 与验潮站的对比

在上述 T/P 观测的相同时段, 南海海盆中有两个海岛验潮站的月平均潮位资料可供比较, 它们是中国西沙(16° 50' N, 112° 20' E)和南沙(9° 32' N, 113° 53' E)。本文利用这些验潮站的观测资料来评价

图 2 南海海平面上升速率的等值线分布

上升速率根据 1992 年 10 月到 1999 年 12 月的 T/P 沿轨分析结果导出。等值线间隔为 0.2 cm/a

图 3 T/P 观测与海岛验潮站测量结果的对比
(a) 西沙; (b) 南沙; (c) Belau; (d) Yap

卫星高度计的分析结果(图 3(a), (b)), 为了与高度计数据一致, 比较时验潮站采用经气压校正后的测值. 由图 3 可见, 两个验潮站的月平均水位时序也都呈现出上升的趋势, 它们所反映出来的上升速率与高度计的估算结果量级也相当, 二者间的差值约 ± 0.4 cm/a.

图 3 中还给出赤道西太平洋 Belau($7^{\circ} 20' N$, $134^{\circ} 28' E$)和 Yap($9^{\circ} 31' N$, $138^{\circ} 08' E$)两个海岛验潮站与相近的高度计观测结果的对比(图 3(c), (d)), 二者均表明, 赤道西太平洋海区同期的海平面上升速率比南海还高, 两种不同手段的观测结果更为一致. 这进一步说明 T/P 高度计测量结果是可靠的, 同期在南海所观测到的高上升速率是可能的.

5 讨论

根据验潮站的观测, 全球平均海平面在上一世纪以 (1.8 ± 0.1) mm/a 的速率上升^[8]. 最近对 1993 年 1 月到 1998 年 12 月 T/P 高度计资料的分析表明全球平均海平

面上升速率为 (2.5 ± 0.5) mm/a^[3,9]. 最新的高度计分析给出 1993 年 1 月到 1999 年 12 月共 7 年间的估算值为 (1.81 ± 0.3) mm/a^[10], 该项研究并估算了赤道西太平洋区域(含南海)的局部上升速率, 其结果比全球平均上升速率大约 1 倍. 因此, 海平面上升在空间上并非均匀的, 在海洋中的一些地方上升速率可能要高得多.

近来, 有若干作者已注意到海平面上升的区域差别, 不过这些工作关注的主要是大型海盆. 根据 1992 年 4 月至 1995 年 3 月的 ERS-1 高度计数据, Anzenhofer 等人^[11]发现海平面上升趋势的空间变化强烈, 并报道了同期印度洋局部海域高达 10 cm/a 的海平面上升 (<http://www.gfz.potsdam-de>). Cabanes 等人^[10]用 T/P 卫星测高手段研究了各大洋区对全球平均海平面变化的贡献, 并发现南大洋在 1993~1999 年间可能是变暖了. 他们所报道的南太平洋、南印度洋以及南大西洋的总体海平面上升趋势分别为 4.1, 3.2 和 2.7 mm/a,

均高于他们所得出的全球上升趋势(1.81 ± 0.3) mm/a. 我们的结果则表明, 即使像南海这样的小型深水海盆, 海平面的上升趋势也有自己的分布格局. 由于某些地方海平面的变化更大、影响更明显, 我们应重视对局地海平面变化趋势和机理的研究.

由于本文所依据的 T/P 数据的长度只有 7 年, 所得出的南海海平面上升速率与全球平均上升速率之间的差别, 有可能只是某种时间尺度较短的变化所致, 不一定反映其长期变化. Merem 等人^[3] 表明在 1993~1998 年期间, 全球海平面和海面水温(SST)在 1998 年初出现一个相对的极大值. Levitus 等人^[12]审视了 1948~1998 年期间全球海洋 0~3000 m 水层热含量的年度间和年代变化, 发现上层海洋热含量的年代变化与其周年变化的幅度相差不是很大. 他们的研究结果清楚地显示, 自 20 世纪 80 年代以来太平洋上 300 m 层有年代尺度的变暖趋势, 其热含量在 1997 年达到最大值. 因此, 与长期的海平面变化相比较, 本文所报道的南海海平面上升现象可能和世界大洋的年代尺度变暖有较为密切的关联.

为寻找所观测到的南海海平面上升的可能机制, 我们还分析了同期南海海盆上 400 m 层平均水温的变化(图 1(a)). 这一分析所依据的是 Scripps 海洋研究所联合环境资料分析中心发布的全球网格化水温场资料. 该资料提供 0~400 m 间 11 个层次的逐月水温, 资料格点的间距为 5° (经度) $\times 2^{\circ}$ (纬度). 位于岸线, 2° N, 22° N, 110° E 和 120° E 间的所有格点参与平均, 平均过程中对 120° 边界上的数据做了加权处理.

由此得到的整个南海上 400 m 层月平均水温的时序所揭示的总体变暖趋势为 0.15°C/a (图 1(a)), 可导致比容高度以每年数厘米的速率上升. 图 1(a)还表明海平面与上层水温的变化呈正相关($R = 0.8$, 99% 置信水平为 0.33). 该结果说明, 就局部而言上层海洋年代尺度变暖是南海海平面上升的主要原因.

由于同一期间在赤道太平洋观测到更高的海平面上升速率, 我们很自然地猜测, 海平面上升不仅仅是南海的局部现象. 图 4 给出同期赤道沿线上层水温上升速率的分布, 图中最高速率近于 0.2°C/a , 出现在太平洋的西边界, 表明在南海所观测到的年代尺度变化趋势可能与太平洋暖池区的年代尺度变化有关.

图 4 赤道沿线上层水温上升速率的分布变化
1993-01~1999-12, 0~300 m 层

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目 (G1999040900, G1999043807) 的资助.

参 考 文 献

- 1 Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A Jr, et al. TOPEX/POSEIDON mission overview. *J Geophys Res*, 1994, 99(C12): 24369~24381
- 2 Tapley B D, Watkins M M, Ries J C, et al. The joint gravity model 3. *J Geophys Res*, 1996, 101: 28029~28049
- 3 Merem R S, Chamber D P, Leuliette E W, et al. Variations in global mean sea level associated with the 1997~1998 ENSO event: Implication for measuring long term sea level change. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3005~3008
- 4 Koblinsky C J, Ray R, Beckley B D, et al. NASA Ocean Altimeter Pathfinder Project Report 1: Data Processing Handbook, NASA/TM-1998-208605. Greenbelt: NASA/GSFC, 1999
- 5 Koblinsky C J, Ray R D, Beckley B D, et al. NASA Ocean Altimeter Project Report 2: Data Set Validation, NASA/TM-1999-209230. Greenbelt: NASA/GSFC, 1999
- 6 Cheney R, Miller L, Agreen R, et al. TOPEX/POSEIDON: The 2-cm solution. *J Geophys Res*, 1994, 99(C12): 24555~24563
- 7 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. *海洋学报*, 1999, 21(3): 7~14
- 8 Douglas B C. Global sea level rise: A redetermination. *Surveys in Geophysics*, 1997, 18: 278~292
- 9 Cazenave A, Diminh K, Soudarin L, et al. Sea level changes from Topex-Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 2077~2080
- 10 Cabanes C, Cazenave A, Le Provost C. Sea level changes from Topex-Poseidon altimetry for 1993~1999 and possible warming of the southern oceans. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 9~12
- 11 Anzenhofer M, Gruber T. Fully reprocessed ERS-1 altimeter data from 1992 to 1995: Feasibility of the detection of long term sea level change. *J Geophys Res*, 1998, 103(C4): 8089~8112
- 12 Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, et al. Warming of the world ocean. *Science*, 2000, 287: 2225~2229

(2001-09-13 收稿)