

日本海西南海域现场观测和卫星高度计获取的海面高度距平的比较研究

葛磊^{1,2,3}, 徐永生^{1,3,4}, 尹宝树^{1,3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 压力传感逆式回声仪(pressure-sensor-equipped inverted echo sounders, PIES)可以用来测量海底压力和声波从海底到海面的传播时间。海底压力和声波传播时间分别被用来估计水体质量变化(正压)和比容变化(斜压)对海面高度距平的贡献。对由 PIES 在日本海西南海域现场观测数据得到的海面高度距平(PIES SLA)与卫星高度计海面高度距平(Sat SLA)进行了比较研究。利用相关分析法, 对 PIES SLA 和沿轨 T/P 卫星、沿轨 ERS-2 卫星测得的海面高度距平(TP SLA、ERS-2 SLA)进行了比较; 对 PIES SLA 和 AVISO 网格化海面高度距平进行了比较, 估计可能的误差来源, 并分析 PIES SLA 正压部分和斜压部分对 SLA 的贡献。比较发现, PIES SLA 和 Sat SLA 的相关系数较高, 且均方根误差较小, 并且对特定区域和特定站点产生误差可能的原因进行了进一步的探讨。通过研究, 有以下结论: (1)相对于湾流和黑潮地区, 这一区域正压部分对海面高度的贡献相对较大; (2)如果再考虑斜压变化对海面高度的贡献, PIES SLA 和 Sat SLA 相关系数会有所提升; (3)在高能区 PIES SLA 和 Sat SLA 相关系数较高, 符合得比较好。总的来说, 在日本海地区, PIES SLA 和 Sat SLA 相关系数较高, 具有较高的一致性, 能为我国海洋二号(HY-2)等卫星高度计的校验提供一种可靠的方式。该研究对于 PIES 的研发和设计以及对于 PIES 的布放位置的选择都有一定的借鉴意义。

关键词: 海面高度距平; 压力传感逆式回声仪(PIES); 卫星高度计; 声波传播时间; 海水底部压力

中图分类号: P733.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)02-0128-08

doi: 10.11759/hyqx20130328001

回声探测仪被广泛地用于测量海洋深度等海洋要素, 但是其容易受极端海况、恶劣天气、绳索倾斜等影响, 从而导致较大的测量误差。而逆式回声探测仪(inverted echo sounder, IES)与一般的声波探测仪正好相反, 它将声波发射器置于海底, 向上发射声波, 经海面反射后回到海底, 从而记录声波由海底到海面的往返传播时间 τ 。如果再加上一个压力传感器, 用来记录海洋底部压力 P_{bot} , 便构成了压力传感逆式回声仪(pressure-sensor-equipped inverted echo sounders, PIES)。由于具有观测周期长、安全性高、适合阵列式大范围观测的优点, PIES 已发展成为近代海洋观测的一个重要手段, 在全球海洋环境监测、海洋环流动力学研究以及军事海洋学等多个应用领域, 全世界大洋多个海区得到了成功应用。

自从 1969 年 Rossby^[1]发展逆式回声仪(inverted echo sounders, IES)以来, 人们一直在发展对声波 τ 的处

理技术, 以便从声波 τ 中获取更多的海洋信息, Meinen 和 Watts^[2]、Sun 和 Watts^[3]、Watts 等^[4]得到了重力经验模方法(gravest empirical mode, GEM), 能够利用声波 τ , 来获得海水温度和比容异常的剖面或者廓线。

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2013-04-04

基金项目: 中国科学院“百人计划”(Y32109101L); 国家自然科学基金项目(41376028); 中国科学院方向项目(KZCX2-EW-209); 国家海洋局(全球变化与海气相互作用)及中国科学院知识创新项目(Y22114101Q) [Foundation: 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, No.Y32109101L; National Natural Science Foundation of China, No.41376028; Key Topics in Innovation Engineering of the Chinese Academy of Sciences, No. KZCX2-EW-209; State Oceanic Administration, (Global change and the air sea interaction project), Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences, No.Y22114101Q]

作者简介: 葛磊(1987-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 电话: 15806599166, E-mail: gexinlei@126.com; 徐永生(1970-), 通信作者, 男, 山东青岛人, 博士, 研究员, 从事卫星海洋学, 海洋遥感, 海洋动力学等方面的研究工作, 电话: 86-13656488817, E-mail: yongsheng.xu@qdio.ac.cn; 尹宝树(1963-), 男, 山东青岛人, 博士, 研究员, 主要从事海洋动力过程及数值模拟和海洋灾害研究, 电话: 86-532-82898502, E-mail: bsyin@qdio.ac.cn

近年来, 卫星高度计发展成为海洋观测卫星的基本观测仪器之一, 其能够对全球海洋进行大面积、全天候持续观测, 对全球海洋进行精确的测量。随着卫星测高技术的发展, 卫星测量海面高度(SSH)得到了越来越广泛的应用, 在我们认识全球环流分布、中尺度涡、海面动力过程、海洋风浪的反演等研究中起着重要的作用。

Ponte^[5]、Guinehut 等^[6]、Jayne 等^[7]认为海面高度变化由以下两个部分构成: 由于海水质量变化引起的正压部分(barotropic components)和由于海水温度、密度等变化引起的斜压部分(baroclinic components), 有些文献上也分别称为质量负载变化(mass-loading)和比容变化(steric)。Baker-Yeboah 等^[8]认为水柱中质量变化(正压部分)对 SSH 的贡献和纯粹由比容变化(斜压部分)对 SSH 的贡献均可以由 PIES 记录数据来得到。也就是说 PIES 能够通过同时测量声波 τ 和底部压力 P_{bot} , 来获得对应 SSH 的斜压部分和正压部分。卫星高度计测量的 SSH, 当然也由正压和斜压两部分组成。Fukumori 等^[9]认为跟密度变化相关的斜压部分被认为是主导 SSH 低频变化的主要因素, 而正压部分则对高频带部分贡献较大。

卫星观测和现场观测得到的 SSH 之间的定量比较少, 因为在开放的海洋中, 难以同时获得两种测量方式得到 SSH 的正压部分和斜压部分。较早的一些研究中, Gilson 等^[10]、McCarthy 等^[11]对 XBT 数据得到的 SSH 距平与沿着部分卫星测量的 SSH 距平进

行了比较, 以达到评估卫星测高的目的。

这次布放在日本海(Japan/East Sea, JES)西南部区域的持续观测达 2 a 之久 24 个 PIES, 为我们比较逆式回声仪测得的海面高度距平(以下简称为 PIES SLA)和卫星高度计海面高度距平(以下简称为 Sat SLA)提供了一个很好的机会。本文将利用相关分析法, 利用卫星高度数据产品包括 AVISO 的 T/P 沿轨(along-track)海面高度距平数据产品、ERS-2 沿轨(along-track)海面高度距平产品以及网格化的海面高度距平产品, 对 PIES SLA 和沿轨 T/P 卫星、沿轨 ERS-2 测得的海面高度距平(以下简称为 TP SLA、ERS-2 SLA)以及 AVISO 网格化海面高度距平进行比较, 估计 PIES SLA 和 Sat SLA 之间可能的误差来源, 并分析 PIES SLA 正压部分和斜压部分对比较结果的影响。研究发现在日本海地区, PIES SLA 和卫星高度计 SLA 相关系数较高, 具有较高的一致性, 为我国海洋二号(HY-2)等卫星高度计提供了一种比较可靠的校验方式。

1 数据和方法

在 1999 年 6 月到 2001 年 7 月期间, 在日本海西南海域的郁陵海盆布放了一个 24 个 PIES 的阵列, 布放的位置如图 1 所示。

对 PIES 测量的声波 τ 和 P_{bot} 进行处理, 获得时间分辨率为 1 h 的数据。 τ 的分辨率是 0.05 ms, PIES 的 Paroscientific 压力传感器测 P_{bot} 的精确度 $\pm 0.01\%$, 分辨率是 10 Pa, 大概是 0.1 cm。这些数据经过剔除

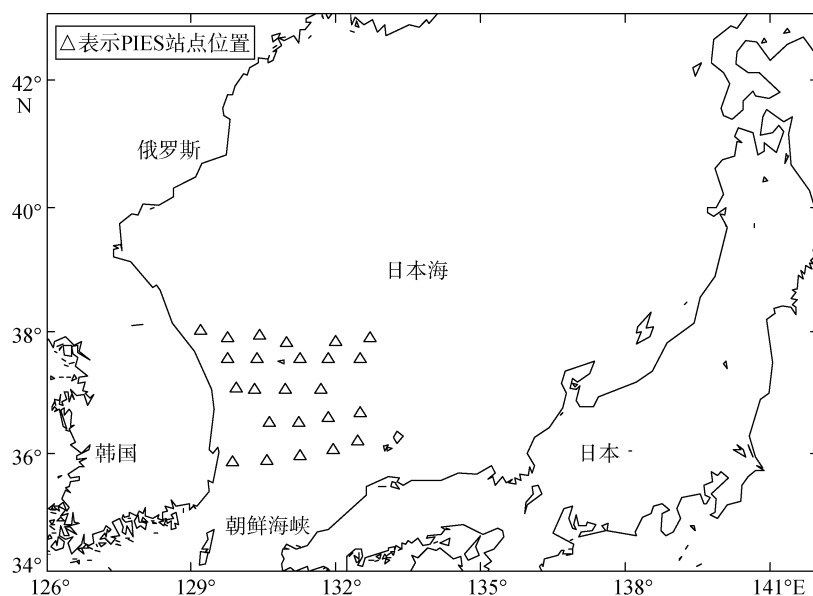


图 1 24 个 PIES 站点的位置示意图

Fig. 1 Positions of the 24 PIES stations

异常值、去除漂移(dedrift)、去除跳跃(dejump)、深度校正(leveling)等一系列的处理后^[12-14], 并且去除各种表面波的影响, 再进行 120 h (5 d) 的低通滤波处理得到新的时间分辨率为 1 h, 并在每天的 00 时和 12 时(UTM)重新二次采样。对 PIES 测得的 τ 和 P_{bot} 的数据处理的过程中, 之所以进行深度校正是为了方便以后的科学分析和研究, 深度校正一般都要选择一个参考深度, 这个参考深度根据观测区域的不同而不同, 比如在湾流区域和大西洋的某些区域, 这个深度能都达到 4 500 m 甚至 5 000 m, 而 Park 等^[15] 等在黑潮延伸体区域, 这个深度选择了 4 000 m。因为本次观测深度大都不是太深, 并且 500 m 以下的斜压部分就很弱了, 因此参考深度定为 500 m。也就是说 τ 和 P_{bot} 要通过一定的转换关系, 转换成为 τ_{500} 和 P_{500} 。

下面将讨论如何由 PIES 测量的 τ 和 P_{bot} 数据得到 SSH 距平。PIES 测量数据对 SSH 的贡献可以分为两个部分, 一部分是由于水体质量负载变化导致的正压变化, 这部分可以通过 P_{bot} 的变化得到, 一部分是由于密度变化导致的比容变化, 或者称为斜压部分, 这部分可以通过 τ 得到。

我们将 SSH 记为 η , SSH 的正压部分记为 η_{bt} , SSH 的斜压部分记为 η_{bc} , 而 η , η_{bt} , η_{bc} 三者的距平分别记为 η' , η'_{bt} , η'_{bc} , 底部压力记为 P_{bot} , 将声波传播时间记为 τ , Baker-Yeboah 等^[8] 给出,

$$\eta_{\text{bc}} = \frac{\Phi_{\bar{P}}}{g} = \frac{1}{g} \int_0^{\bar{P}} \delta dp \quad (1)$$

这里, g 代表重力加速度, δ 是海水温度(T)、盐度(S)和压强(p)的函数,

$$\delta = \delta(S, T, p) \quad (2)$$

η_{bc} 表示由于位势高度异常导致的海面变化, 是由比容或者是跟密度相关的变化(斜压)导致的海面变化。

对于 η_{bc} 来说, 去除时间平均值, 便有 η 斜压部分的距平

$$\eta'_{\text{bc}} = \frac{\Phi'_{\bar{P}}}{g} \quad (3)$$

和 η 正压部分的距平。

$$\eta'_{\text{bt}} = \frac{P'}{\rho_b g} \quad (4)$$

这里 \bar{P} 校正深度 500 m 深处的平均压力, $\rho_b = 1\ 036\ \text{kg/m}^3$, P' 代表压力距平, g 代表重力加速度。

而声波传播的时间是

$$\tau = 2 \int_0^{P_{\text{bot}}} \frac{1}{\rho_s g c} dp \quad (5)$$

这里, ρ_s 代表海表层海水的密度, g 代表重力加

速度, c 代表声波传播时间, c 是海水温度盐度和压强的函数,

$$c = c(S, T, p) \quad (6)$$

而又由于公式(1)的关系, 所以说要由 τ 确定位势高度变化, 就要使用 GEM 方法, 建立起 τ 和位势高度变化之间的联系。

前面提到, GEM 方法首先由 Meinen 和 Watts^[4] 为了研究北大西洋海流的垂直结构和输运发展而来, 并且成功地应用到副极地锋面(sub antarctic front)^[6], 南极绕极流和黑潮小弯曲的发展^[15]的研究当中。这些区域都有两个重要的特征, 一是在 $10^7\ \text{Pa}$ 处或者更深, 有强的斜压变化, 导致斜压信号比较强。二是不同的水文廓线能够对应产生不同的 τ 。而日本海西南部地区恰恰不具备这两点, 于是针对这一海域空间季节信号变化和浅温跃层的特点, Mitchell 等^[16] 在 GEM 的基础上, 提出了剩余 GEM(residual GEM)。把 GEM 捕捉温度 T 的变化和比容(斜压)的变化分别从 70% 和 64% 提升到了 89% 和 84%。

τ 经过深度校正后得到 τ_{500} 对 SSH 距平斜压部分 ΔH 的贡献见图 2。

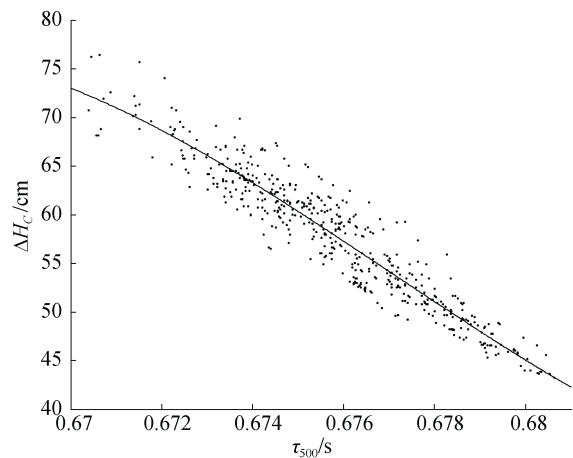


图 2 SSH 距平斜压部分 ΔH 与 τ_{500} 对应关系图

Fig. 2 Correspondence between ΔH (baroclinic components of the SSH) and τ_{500}

这次比较中用到了 3 种 AVISO 卫星高度计产品: 一个是 T/P 卫星迟时沿轨海面高度距平产品, 一个是 ERS-2 卫星迟时沿轨海面高度距平产品, 这两个产品都是由 AVISO 制作和分发的(AVISO DT CorSSH and DT SLA Product Handbook, 2012)。另一个是“参考”(reference)迟时的网格化产品(reference maps of sea level anomalies, Ref-MSLA), 空间分辨率是 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$, 时间分辨率是 7 d, 主要是融合了 T/P 和 ERS-2,

以及它们对应后继的 Jason-1 和 Envisat 卫星数据。T/P 卫星轨道和 ERS-2 卫星轨道与 24 个 PIES 站点位置示意图如图 3 所示。迟时的网格化卫星数据的分辨率和 24 个 PIES 站点位置示意图如图 4 所示。

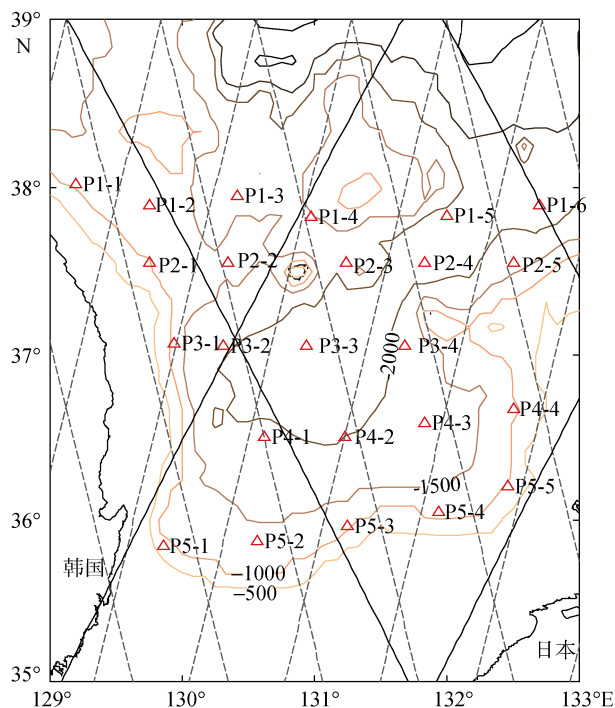


图 3 T/P 卫星轨道和 ERS-2 卫星轨道与 24 个 PIES 站点位置示意图

Fig. 3 Schematic of the T/P and ERS-2 orbits, and the positions of the 24 PIES stations

红色三角代表 PIES 站点; 橙色代表海底地形; 黑实线代表 T/P 卫星轨道; 黑虚线代表 ERS-2 卫星轨道

Red triangles represent the PIES stations, orange represents the seabed terrain, the solid black lines represent the T/P orbit, and the black dotted lines represent the ERS-2 orbit

2 海面高度的比较

2.1 PIES SLA 与 TP SLA 的比较

从图 3 中可以看出, P1-6 站点正好在 T/P 轨道扫过的区域内。T/P 卫星周期约为 10 d, 相邻资料的空间间隔(沿轨)是 5.8 km, 为了创建能够与 PIES SLA 可比的 T/P 卫星时间序列, T/P 卫星上轨道上距离 P1-6 站点最近的点将被确定为可比的数据点。P1-6 站点处总的 PIES SLA 和 TP SLA 的对比图见图 5, 从图 5 中可以看出总的 PIES SLA, 能够比较好地反映 TP SLA 的大致趋势, 吻合度比较高, 计算两者的相关性, 能够达到 0.914, 计算二者的均方根误差为 8.7 cm。仅仅考虑 PIES BT SLA 与 TP SLA 相比较, 从图 5 中看出二者吻合得也很好, 但是计算两者的相关性,

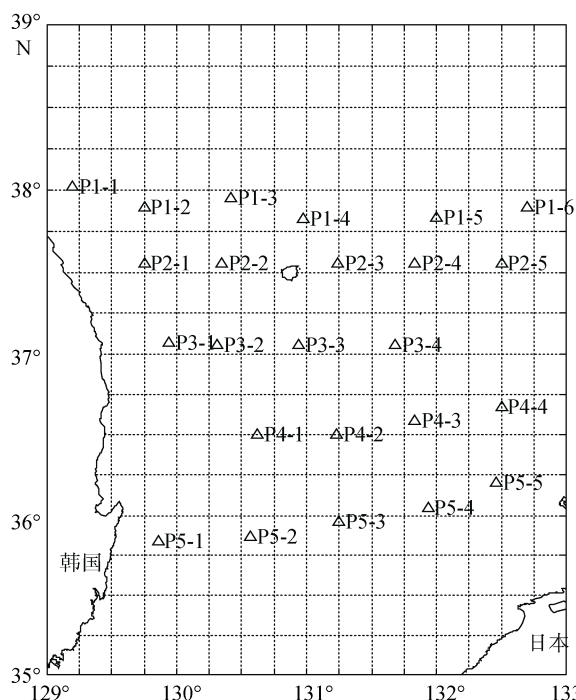


图 4 PIES 站点位置和网格化卫星数据空间分辨率的相对位置图

Fig. 4 Positions of the PIES stations and the grid of the satellite SSH data

三角代表 PIES 站点, 虚线的交点处代表此处有网格化的 SLA 数据

The triangles represent the PIES stations. There are gridded SSH data at the intersections of the dotted lines

稍微有点降低达到 0.887, 但是均方根误差为 7.0 cm。仅仅考虑斜压部分 PIES BC SLA 的与 TP SLA 的比较, 从图 5 中看出二者吻合的稍差, 计算两者的相关性, 降低到了 0.87, 均方根误差也稍微增大为 7.6 cm。

Teague 等^[17]将 PIES 数据得到的 SSH 距平与 T/P 高度计得到的海面距平做了比较, 结果显示两者符合的比较好, 但是均方根误差达到了 12 cm, 与他的结果相比, 无论是从相关性来说还是从均方根误差方面来讲, PIES SLA 与 T/P SLA 的比较结果都有显著的改进。从图 5 还可以看出, 相对于湾流和黑潮地区(Book^[18]), 在这一海域正压部分对海面高度的贡献相对较大, 如果再考虑斜压变化对海面高度的贡献, PIES SLA 和 TP SLA 相关系数将会进一步提升。

2.2 PIES SLA 与 ERS-2 SLA 的比较

从图 3 中可以看出, P1-4, P2-2, P2-5, P3-1, P4-1, P4-2 站点正好在 ERS-2 轨道扫过的区域内。ERS-2 周期大约为 35 d。为了创建能够与 PIES-SSH 可比的 ERS-2 卫星时间序列, ERS-2 卫星上轨道上距

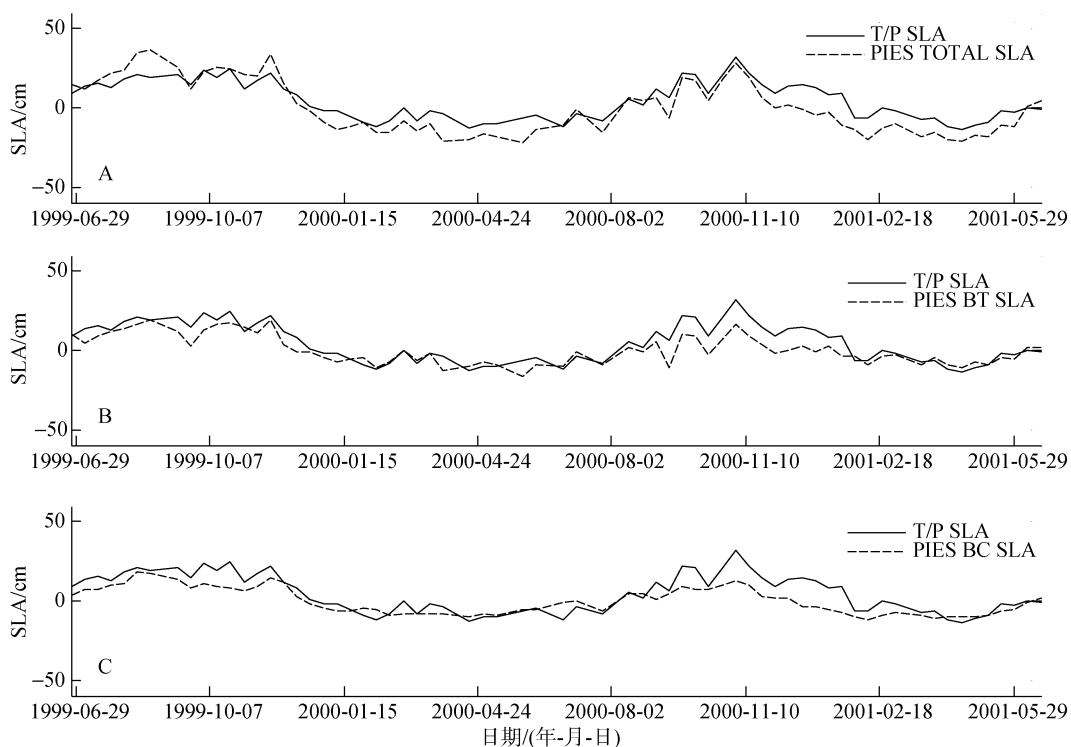


图 5 P1-6 站点处 T/P 卫星 SLA 和 PIES 得到的 SLA 地对比图

Fig. 5 Comparison of the TP SLA and PIES SLA at the P1-6 station

A. PIES TOTAL SLA 表示总的 PIES SLA; B. PIES BT SLA 表示 PIES SLA 的正压部分; C. PIES BC SLA 表示 PIES SLA 的斜压部分
 A. PIES TOTAL SLA represents the total PIES SLA; B. PIES BT SLA represents the barotropic components of the PIES SLA; C. PIES BC SLA represents the baroclinic components of the PIES SLA

离上述几个站点最近的点将被确定为可比的数据点。以 P2-5 站点为例分析, P2-5 站点处 ERS-2 卫星 SLA 和 PIES 得到的总的 SLA 地对比图见图 6, 从图 6 中可以看出总的 PIES TOTAL SLA 能够较好地反映 ERS-2 SLA 的大致趋势, 吻合度比较高, 计算两者的相关性, 能够达到 0.881, 计算二者的均方根误差为 7.62 cm。仅仅考虑 PIES BT SLA 与 ERS-2 SLA 的相比较, 从图上看二者吻合程度也很好, 但是计算两者的相关性, 稍微有点降低达到 0.851, 但是均方根误差较小为 6.8 cm。仅仅考虑 PIES BC SLA 与 ERS-2 SLA 的比较, 从图上看二者吻合的稍差, 计算两者的相关性, 降低到了 0.82, 均方根误差也稍微增大为 7.5 cm。从图 6 看出, 相对于湾流和黑潮地区(Book^[18]), 在这一海域正压部分对海面高度的贡献相对较大, 如果再考虑斜压变化对海面高度的贡献, PIES SLA 和 ERS-2 SLA 相关系数将会进一步提升。

2.3 PIES SLA 与 Ref-MSLA 的比较

从图 4 可以看出, 大部分 PIES 站点都不在 Ref-MSLA 网格上面, 这就需要把 Ref-MSLA 网格数据插值到 PIES 站点上面去。因为 Ref-MSLA 时间分辨率是

7 d, 为了得到能够比较的时间序列, 需要对 PIES 得到的 SLA 数据进行再采样。对于所有的 24 个站点计算相关性(因 P3-2 处的可比性不强, 故未列出), 整体的相关系数从 0.75 到 0.94, 其中相关系数低于 0.8 只有近岸几个站点, 说明大部分站点 PIES-SLA 和 Ref-MSLA 吻合的还是很好的。全部站点的相关系数见图 7。

从图 7 中可以看出, PIES-SLA 和 Ref-MSLA 相关系数低于 0.8 的站点只有 P1-1, P2-2, P3-1 和 P3-3, 并且这 4 个站点大都处于近岸地区。相反, 越是处于深海地区的其他站点, PIES-SLA 和 Ref-MSLA 的相关系数反而比较高。在近岸地区, PIES-SLA 和 Ref-MSLA 相关系数相对较低, 究其原因可能有两个: 一个是日本海的边缘海特征, 导致近岸地区相关海洋活动如浪、流等较为剧烈, 影响了卫星高度计的精确度; 二是我们发现有些近岸地区站点 P3-1 正好位于陆架坡折处, 而陆架坡折处(shelf break)的大地水准面(geoid)比较陡峭, 卫星的横向不确定性导致卫星测量 SLA 误差较大。并且对于同一个站点 P1-6, 就相关系数而言, 同单个 T/P 卫星相比, Ref-MSLA 的精确度确实有所提升。

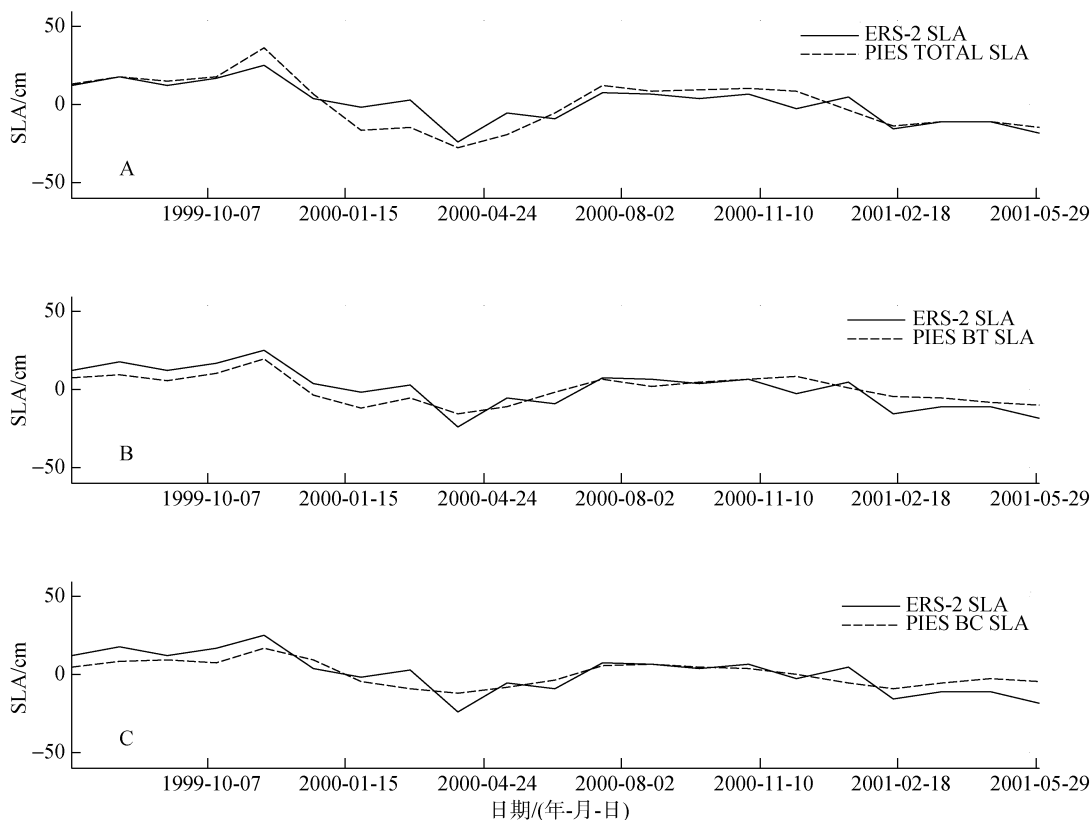


图 6 P2-5 站点处 ERS-2 卫星 SLA 和 PIES 得到的 SLA 地对比图

Fig. 6 Comparison of the ERS-2 SLA and PIES SLA at the P2-5 station

A. PIES TOTAL SLA 表示总的 PIES SLA; B. PIES BT SLA 表示 PIES SLA 的正压部分; C. PIES BC SLA 表示 PIES SLA 的斜压部分
 A. PIES TOTAL SLA represents the total PIES SLA; B. PIES BT SLA represents the barotropic components of the PIES SLA; C. PIES BC SLA represents the baroclinic components of the PIES SLA

3 结论与展望

本文利用相关分析法,对 PIES SLA 和沿轨 T/P 卫星、沿轨 ERS-2 测得的海面高度距平以及 AVISO 网格化海面高度距平进行了比较,估计可能的误差来源,并分析了 PIES SLA 正压部分和斜压部分对比较结果的影响。比较发现,PIES SLA 和 T/P SLA 和的相关系数高达 0.914,均方根误差(Root Mean Squared, RMS)为 8.7 cm。PIES SLA 和 ERS-2 SLA 的相关系数在 0.75~0.90 之间,均方根误差为 7.6~10.7 cm。PIES SLA 和 AVISO 网格化海面高度距平的相关系数在 0.75 到 0.94 之间。这些结果表明:(1)与湾流和黑潮地区斜压部分对海面高度的贡献相对较大不同,这一区域正压部分对海面高度的贡献相对较大;(2)如果再考虑斜压变化对海面高度的贡献,PIES SLA 和卫星高度计 SLA 相关系数会有所提升。(3)PIES SLA 和卫星高度计 SLA 的相关性跟海面变化信号的强弱有关系,一般在高能区,或者主流区,

SLA 和卫星高度计 SLA 相关系数相对较高,相关性较强。(4)在近岸地区,由于陆架坡折处大地水准面(geoid)比较陡峭,卫星的横向不确定性导致的测量误差,使得 PIES SLA 和 Sat SLA 相关系数相对较低。总的来说,在日本海地区,PIES SLA 和 Sat SLA 相关系数较高,具有较高的一致性,能为海洋二号卫星(HY-2)高度计的校验提供一种可靠的方式。

以往大都用验潮站、海上石油平台和 GPS 浮标来校验卫星高度计数据,而验潮站数据大都处于近岸,因而校验的效果相对较差,海上石油平台需要高额的运行维护费用,且存在诸多试验限制,操作要求高,GPS 浮标容易受到海浪、风的影响,因此具有观测周期长、安全性高、适合阵列式大范围观测的优点的 PIES 正好为我们提供了一个较好的校验机会。在 高能区和主流区,SLA 和卫星高度计 SLA 相关系数相对较高,相关性较强,这就提醒我们,在我们使用 PIES 校验海洋二号(HY-2)卫星数据时,可以选择 PIES 布放在高能区和斜压部分对海面贡献较大的区域来校验。

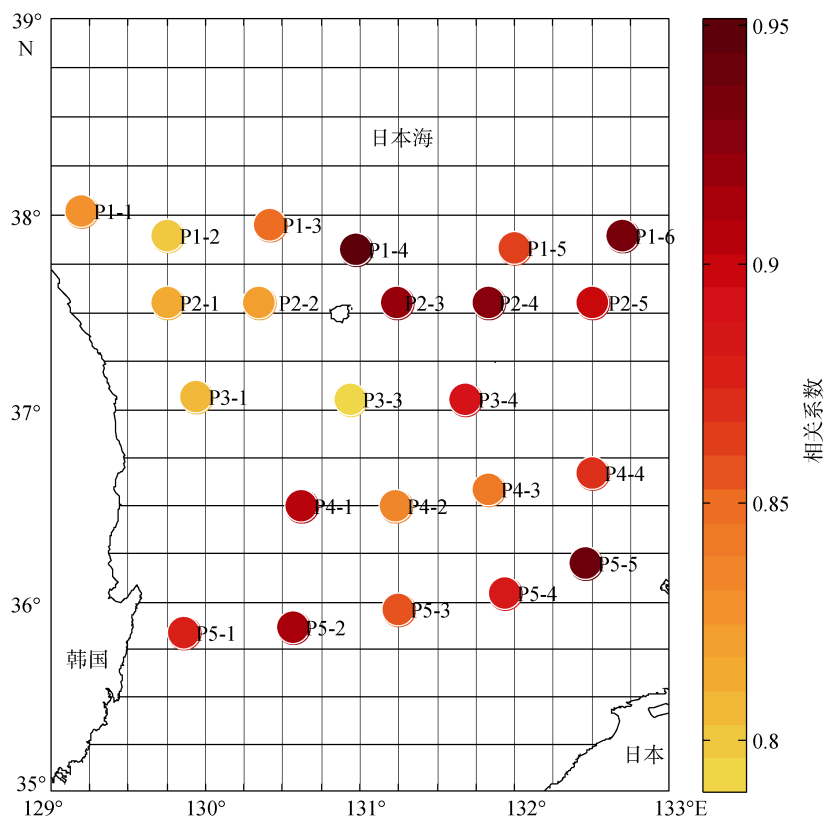


图 7 全部 PIES 站点 PIES-SLA 和 Ref-MSLA 的相关系数示意图

Fig. 7 Correlation coefficient of the gridded Ref-MSLA and the PIES-SLA

深红色的站点的相关系数最高，黄色的站点的相关系数最低，从黄色到深红色，相关系数逐渐增大；虚线的交点处代表此处有网格化的 SLA 数据

The correlation coefficient of the deep red station is the maximum, the correlation coefficient of the yellow station is the minimum, and the correlation coefficient increases gradually from the yellow station to the deep red station. There are gridded SSH data at the intersections of the dotted lines

下一步工作可以考虑在日本海区域利用 PIES 数据来进行时间和空间相关性尺度的分析(temporal and spatial correlation scale).

参考文献:

- [1] Rossby T. On monitoring depth variations of the main thermocline acoustically[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1969, 74(23): 5542-5546.
- [2] Meinen C S, Watts D R. Vertical structure and transport on a transect across the North Atlantic Current near 42°N: Time series and mean[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C9): 21869-21891.
- [3] Sun Che, and Watts D R. Acircumpolar gravest empirical mode for the Southern Ocean hydrography[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C2): 2833- 2855.
- [4] Watts D R, Qian Xiaoshu, Tracey K L. Mapping abyssal current and pressure fields under the meandering Gulf Stream[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(6): 1052-1067.
- [5] Ponte R M. A preliminary model study of the large-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C1): 1289-1300.
- [6] Guinehut S, Traon P-YL, Larnicol G. What can we learn from global altimetry/hydrography comparisons?[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(10): 229-237.
- [7] Jayne S R, Wahr J M, Bryan F O. Observing ocean heat content using satellite gravity and altimetry[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(C2): 295-314.
- [8] Baker-Yeboah S, Watts D R, Byrne D A, et al. Measurements of sea surface height variability in the Eastern South Atlantu from pressure sensor-equipped inverted echo sounders: baroclinic and barotropù[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(12): 2593.
- [9] Fukumori I, Raghunath R, Fu L-L. The nature of global largescale sea-level variability in relation to atmospheric forcing: a modeling study[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 5493-5512.
- [10] Gilson J, Roemmich D, Cornuelle B. Relationship of TOPEX/Poseidon altimetric height to steric height and circulation in theNorth Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C12): 27947-27965.
- [11] McCarthy M C, Talley L D, Roemmich D. Seasonal to interannual variability from expendable bathythermograph

- and TOPEX/Poseidon altimeter data in the South Pacific subtropicalgyre[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C8): 19535-19550
- [12] Xu Yongsheng, Watts D R, Wimbush M. Coupled patterns between fields of dynamic height and bottom pressure in the Japan/East Sea[J]. *Ocean Science Journal*, 2009, 44(1): 35-42.
- [13] Xu Yongsheng, Watts D R, Wimbush M, et al. Fundamental-mode basin oscillations in the Japan/East Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(4): 545-559.
- [14] Xu Yongsheng, Watts D R, Park J H. De-aliasing of large-scale high-frequency barotropic signals from satellite altimetry in the Japan/East Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(9): 1703-1709.
- [15] Park J H, Watts D R, Donohue K A, et al. Comparisons of sea surface height variability observed by pressure-recording inverted echo sounders and satellite altimetry in the Kuroshio Extension[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68(3): 401-416.
- [16] Mitchell D A, Wimbush M, Watts D R, et al. The residual GEM technique and its application to the southwestern Japan/East sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(12): 1895-1909.
- [17] Teague W J, Hallock Z R, Jacobs G A, et al. Kuroshio sea surface height fluctuations observed simultaneously with inverted echo sounders and TOPEX/Poseidon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C12): 24987-24994.
- [18] Book J W, Wimbush M, Imawaki S, et al. Kuroshio temporal and spatial variations south of Japan determined from inverted echo sounder measurements[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2002, 107(C9): 4-1-4-12.

Comparison of sea surface height anomalies derived by pressure-sensor-equipped inverted echo sounders and satellite altimetry in the Southwest Japan/East Sea

GE Lei^{1, 2, 3}, XU Yong-sheng^{1, 3, 4}, YIN Bao-shu^{1, 3, 4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory of Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Received: Mar., 28, 2013

Key words: sea surface height; pressure-sensor-equipped inverted echo sounder (PIES); satellite altimetry; acoustic echo time; ocean bottom pressure

Abstract: Pressure-sensor-equipped inverted echo sounders (PIES) can be used to measure sea bottom pressure and the acoustic-wave propagation time from the seabed to the surface. Bottom pressure and the acoustic propagation time are used to estimate the contribution of the sea surface height anomaly (SLA) to water quality changes (positive pressure) and hematocrit changes (baroclinic), respectively. In this paper, we compare SLAs derived by PIES with SLAs derived from satellite altimetry data in the Southwest Japan/East Sea. Using correlation analysis, we compared the PIES SLAs with SLAs measured by the along-track T/P satellite (TP SLA) and the ERS-2 satellite (ERS-2 SLA). We then compared the PIES SLA and AVISO gridded SLAs to estimate possible sources of error. We also analyzed the contributions of the PIES SLA positive pressure and baroclinic aspects of the SLA. The comparison results show that the correlation coefficient of the PIES SLA and Sat SLA is relatively high, and the root mean square error is relatively small. Further, we studied data from specific regions to identify possible causes of site-specific errors. Based on our results, we draw the following conclusions: (1) with respect to the Gulf Stream and the Kuroshio region, the contribution of positive sea surface height is relatively large; (2) if we consider the contribution of baroclinic changes in sea surface height, the PIES SLA and Sat SLA correlation coefficient will improve; (3) in the high-energy zone, the PIES SLA and Sat SLA correlation coefficient is relatively high and relatively better. Overall, in the Japan/East Sea, the PIES SLA and satellite altimeter SLA correlation coefficient is relatively high with a high level of consistency, providing a reliable way for checking the operation of Ocean II satellite (HY-2) altimeters. The research results have significance for the development and design of PIES, and for the selection of the placement of PIES.

(本文编辑: 刘珊珊)