

基于多卫星融合资料的南海浪高时空分布特征研究

周水华, 俞胜宾, 冯伟忠, 梁昌霞

(国家海洋局 南海预报中心, 广东 广州 510310)

摘要: 为提高对南海波浪场的认识, 采用基于多卫星融合的 2009 年 9 月~2011 年 11 月的 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)有效浪高格点数据对南海浪高的月变化特征进行分析, 并结合南海的波浪特征和地形特点, 将南海划分为 6 个海区, 讨论南海浪高的空间分布规律。研究发现南海浪高具有以下 2 个特征: (1)南海浪高表现为由东向西、由北往南递减: 北部深水区>北部陆架区>南海中部~北部湾>南部陆架区>泰国湾。(2)浪高的月变化与季风的季节变化密不可分: 10 月~次年 3 月(冬季风影响期间)>4 月和 9 月(季风转换期)>5 月~8 月(夏季风影响期间), 1 月最大, 5 月最小。该研究成果对开展南海海浪的中长期预报、保障南海资源开发和军事安全等有一定的借鉴意义和参考价值。

关键词: 南海; 月平均波高; 月变化; 空间变化

中图分类号: P7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)10-0071-07

南海既是能源矿产等资源丰富的宝地, 也是重要的海上通道, 且具有极为重要的军事战略地位。随着海洋开发活动向深远海的推进, 海运的日益繁荣, 以及国际局势的风云变化, 作为影响航海、油气开发、军事活动等的重要环境要素之一, 南海的波浪特征迫切需要得到较为深入的研究。20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初, 齐义泉等^[1-5]先后利用 GEOSAT 卫星高度计资料、TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料分析了南海的风、浪场的季节特征, 并探讨了两者之间的关系, 发现南海全年月平均风速和波高分布特征为: 东北季风期较大, 冬季风向夏季风转换的时期较小, 12 月最大, 5 月最小, 且南海风、浪场之间具有很好的相关性, 但受资料的限制, 对南海浪高的空间分布阐述较为粗略。2003 年齐义泉等^[6]尝试采用数学模型的方法对南海的浪场进行后报, 以期望获得较高时空分辨率的浪场分布, 为进一步探讨南海的波浪特征提供基础数据源。他的研究发现以 NCEP 风场数据为强迫场, 利用 WaveWatch 海浪数值模型后报的南海的波浪场总体上存在偏小的趋势, 从模拟结果上看, 冬季好于夏季, 远海好于近海。此后国内又有葛黎丽等^[7-9]多位学者采用波浪数值模型, 以再分析风场或 WRF 中尺度气象模式模拟的风场为上边界驱动场, 后报了南海数 10 a 的波浪场, 分析风场和波浪场的季节变化, 探讨风浪的相关性, 并进行波候统计和重现期波高的推算, 发现南海的极值

波高的大值位于南海北部。不难发现, 遥感资料分析和数值模拟是南海波浪研究的主要手段。但是由于单个卫星获得的波浪资料数量有限, 且时间上无法同步, 难以满足较为细致的南海浪高的时空分布特征研究, 因此该资料主要用来进行数值模型的验证和风、浪的相关分析。基于波浪数值模型后报的浪场虽然可以用来进行南海波浪的时空变化研究和极值波高的推算, 但是由于受模型参数设置的合理性、强迫场精度、空间分辨率等多种因素的限制, 后报波浪场的精度有待进一步提高。本文利用多卫星融合的高度计有效浪高观测资料进行南海浪高的时空分布特征研究, 以弥补前人研究的不足。

1 资料来源

本文采用的多卫星融合资料是 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)的 NRT-MSWH 有效浪高(以下简称“AVISO 浪高”)资料, 该资料为准实时卫星测波资料, 是利用 Loess 滤波方法, 将最近两天可获得的 4 颗卫星(Cryosat-2, Jason-2, Jason-1 以及 Envisat)中的至少两颗卫星的 IGDR(Interim Geophysical Data Record)数

收稿日期: 2012-04-15; 修回日期: 2013-08-30

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201105002-13)

作者简介: 周水华(1979-), 女, 湖南耒阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋环境数值模拟研究, 电话: 020-89885064, E-mail: zsh@hyyb.gov.cn

据, 进行空间平滑和外插后得到。该数据覆盖全球, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 采用 netcdf 格式存储, 在 AVISO 的网站上可下载到 2009 年 9 月至今的每天一次的有效浪高数据(下载地址如下: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/mswhmwind/index.html>)。

由于卫星高度计观测的仅是星下点的数据, 因此面临着观测频率与空间覆盖密度的矛盾, 若要追求空间的高覆盖率, 则其更新频率必然受影响。如 Envisat 卫星两相邻轨道之间的最宽距离仅 80 km, 但其轨道的完全重合周期却需要 35 d, Jason-2, Jason-1 的完全重合周期是 10 d, 但两相邻轨道间的距离却高达 315 km, 该距离大于一般中尺度物理现象的空间跨度。多卫星融合数据在一定程度上缓解了观测频率与空间覆盖密度的矛盾, 因此, 多卫星融合数据能更精细地反映所关心物理现象的时间和空间变化。

2 与浮标资料的对比分析

为检验 AVISO 浪高的准确度, 将其与浮标资料进行对比分析。对比浮标位于南海北部陆架区 50~100 m 水深处(见图 1, 记为 A、B、C), 由国家海

洋局布放, 是我国海洋观测网的组成部分。对比分析的时间范围为 2009 年 9 月 1 日~2011 年 11 月 30 日。对比分析方法如下: 将 3 个浮标站的有效波高进行日平均后与 AVISO 浪高进行比较, 比较指标有: 平均偏差、均方根偏差、平均相对偏差以及相关分析。

$$\text{平均偏差: } MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i|$$

$$\text{均方根偏差: } RMS = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$$

$$\text{平均相对偏差: } MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{O_i} \times 100$$

$$\text{线性回归分析: } O_i = kS_i + a$$

$$\text{相关系数: } R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

O_i : 浮标站的第 i 日的日均有效波高, S_i : 第 i 日的 AVISO 浪高, \bar{O} : 浮标站有效波高平均值, \bar{S} : AVISO 浪高平均值, n : 统计样本数, 受观测资料的限制, 3 个站的样本数各不相同。

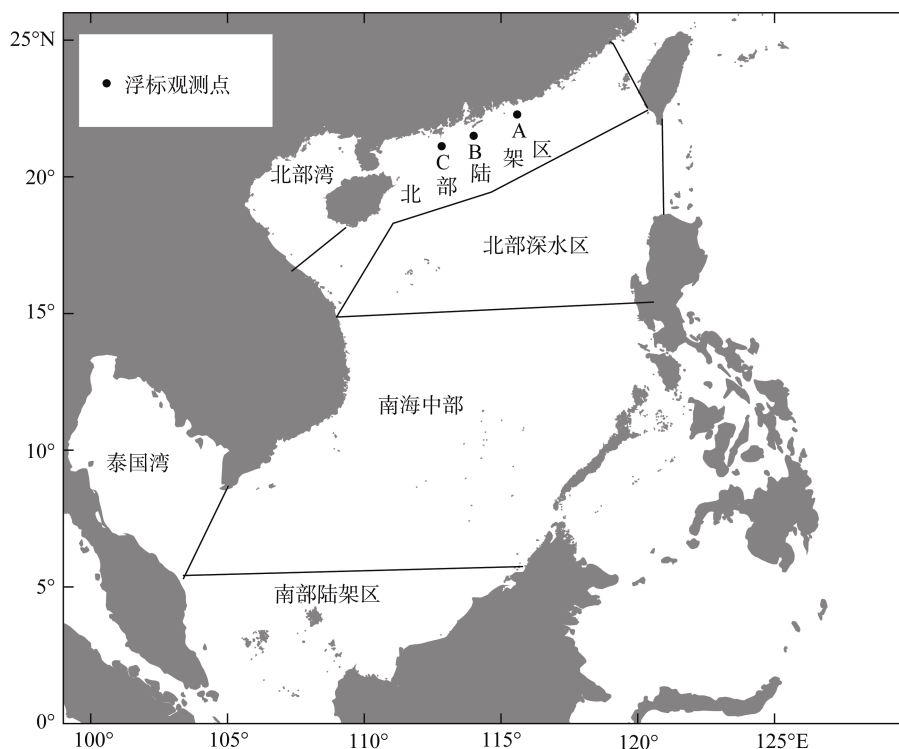


图 1 浮标位置与海区划分
Fig. 1 Positions of buoys and subdomain of the South China Sea

对比结果显示(见表 1 和图 2), AVISO 有效波高略大于浮标观测, 两者的均方根偏差在 0.5 m 以内, 且浮

标观测值与 AVISO 存在高度的线性相关。因此, 可以认为 AVISO 有效浪高资料的观测精度与浮标相当。

表 1 AVISO 与浮标的有效波高对比分析结果

Tab. 1 The comparison between the significant wave height derived from buoys and AVISO

浮标	MAE(m)	RMS(m)	MRE(%)	k	a	R	样本数
A	0.34	0.50	25.9	0.762	0.195	0.87	716
B	0.31	0.48	23.1	0.815	0.176	0.87	707
C	0.28	0.43	27.4	0.817	0.164	0.86	638

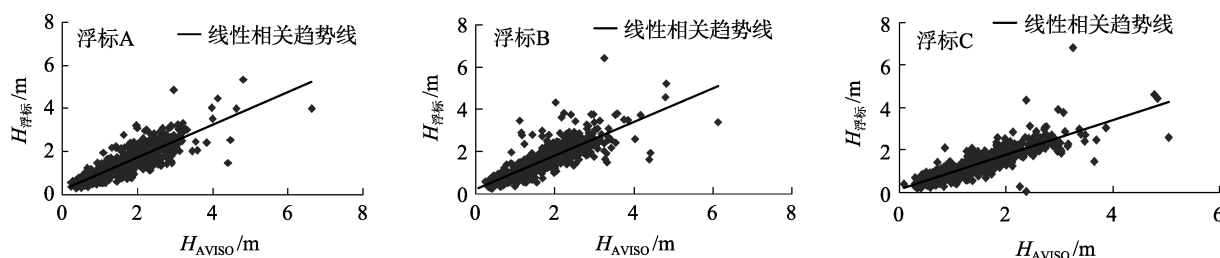


图 2 浮标与 AVISO 有效波高散点图

Fig. 2 Scatter diagrams of the significant wave height derived from buoys and AVISO

3 南海浪高的时空分布规律

分别统计各格点的月平均波高, 并绘制南海各月有效波高分布图(见图 3)。该组图显示南海波高 1 月最大, 5 月最小, 与齐义泉和施平^[4]的研究结论并不完全一致。这与南海风速的月变化有关, 齐义泉和施平^[4]的风场数据显示南海月平均风速 12 月最大, NCEP 再分析风场资料显示本文统计时段内南海风速 1 月大于 12 月(见图 4)。与齐义泉等^[3]的结果比较来看, 本文统计结果除 10 月和 11 月显著偏小之外, 其它各月与之接近。这与热带气旋的作用密切相关, 齐义泉等^[3]的研究结果表明 1988 年 10 月和 11 月分别有 3 个和 2 个热带气旋影响南海北部, 但本文统计时段内的 10 月和 11 月南海北部分别月均仅受到 1.5 个和 0.5 个热带气旋影响。南海各月平均波高的时空变化详述如下。

1 月, 除泰国湾外, 南海的月平均波高都大于 1.2 m; 5 月, 除巴士海峡外, 其它海域月平均波高均小于 1.0 m。南海浪高的季节变化与季风的变化密不可分, 受冬季风影响的 10 月~次年 3 月, 南海浪高较大; 受夏季风影响的 5~8 月, 南海浪高较小, 4 月和 9 月为季风转换期, 南海浪多小于受冬季风影响期间, 大于受夏季风影响期间。这主要是因为南海的海浪是由局地风浪和来自西北太平洋的涌浪叠加而成。冬季风期间, 海面风速较大, 风浪增大, 尤其是在广袤的东北风区作用下, 西北太平洋浪高显著增大。西北太平洋的大浪经巴士海峡向南海传播, 在传播的过程中能量不断分散, 浪高逐渐减小。巴士海峡、南

海北部受西北太平洋涌浪影响较大, 波高显著大于其他海域, 因此南海浪高的空间差异较大。夏季在偏南风的作用下, 南海北部风区大于中部和南部, 波高也略大于其它海域, 但是, 由于西北太平洋涌浪对南海的影响减小, 加之风速有限, 整个南海浪高的空间差异小于冬季风期间。

南海各月的平均波高在空间上都表现为由东向西, 由北往南递减。北纬 10° 以北的海域, 11~1 月波高等值线近似为 NE~SW 走向, 其他各月近似为 N~S 走向; 北纬 10° 以南海域波高等值线全年为 E~W 走向; 泰国湾波高等值线全年基本为 NE~SW 走向。从海区比较来看, 各海区波高依次为: 北部深水区 > 北部陆架区 > 南海中部 > 北部湾 > 南部陆架区 > 泰国湾(海区的划分见图 1)。南海北部深水区由于受西北太平洋涌浪的直接影响, 波高显著大于其他海域, 全年各月平均波高多大于 1.0 m。10 月~次年 3 月(2 月除外)大部分海域平均波高大于 2.0 m(见表 2), 1 月波高最大, 整个北部深水区的月平均波高都大于 2.3 m; 5~8 月, 月平均波高 0.8~1.3 m; 4 月和 9 月, 月平均波高 1.1~1.8 m。北部陆架区同样受西北太平洋涌浪的直接影响, 但由于其水深有限, 波高略小于北部深水区, 西北太平洋涌浪在自东向西的传播过程中能量不断衰减, 北部陆架区浪高也随之由东向西逐渐递减, 东部和西部的月平均波高相差 0.2~0.7 m。10 月~次年 3 月(2 月除外), 该海域月平均浪高 1.5~2.5 m, 东西浪高之差多大于 0.5 m; 5~8 月, 该海域月平均浪高 0.8~1.3 m, 东西浪高之差小于 0.4 m; 4 月和 9 月, 月平均波高 1.0~1.6 m。南海中部受西北

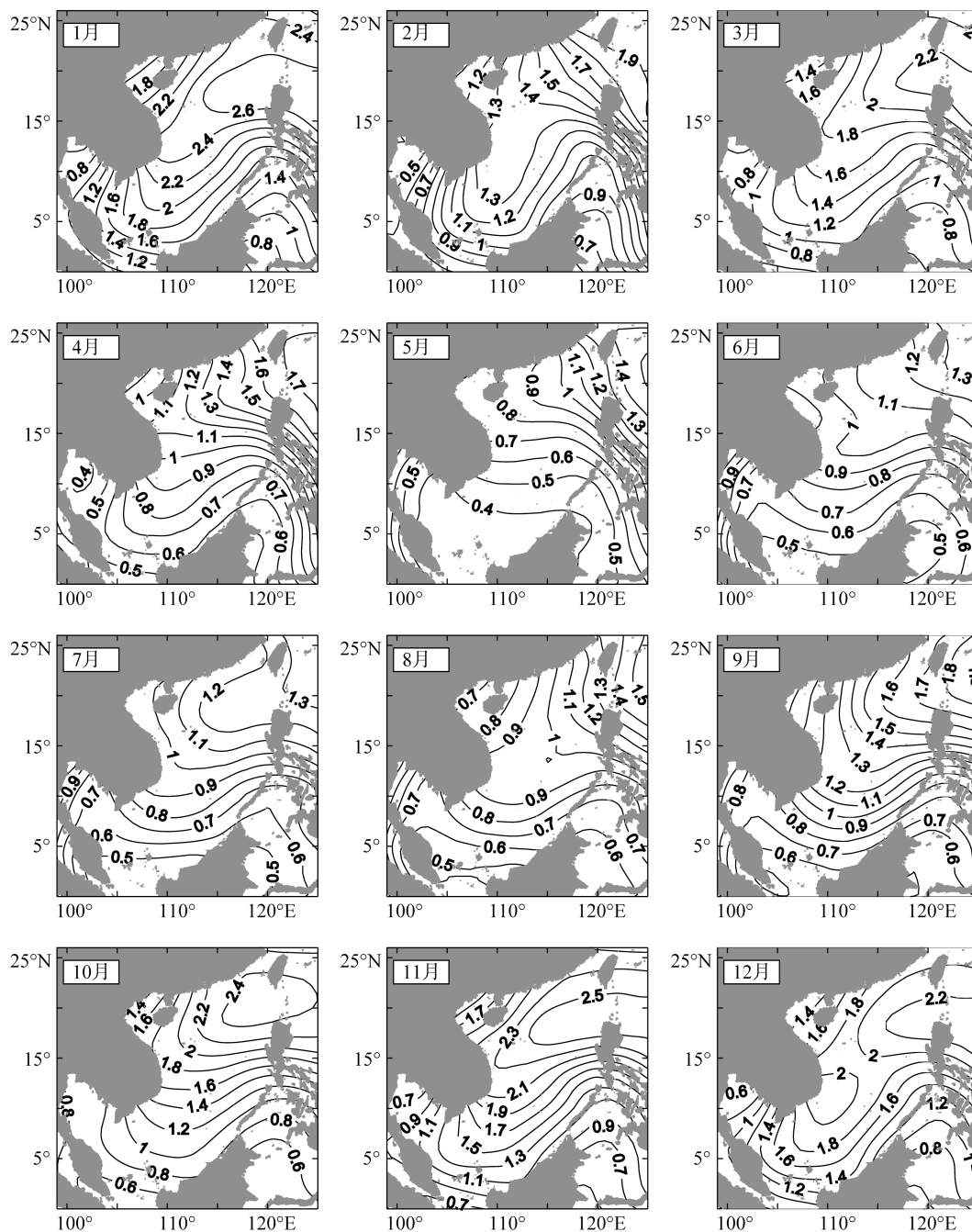


图3 南海各月浪高(m)分布图

Fig. 3 Distribution of the monthly mean significant wave height in the South China Sea during two years

太平洋涌浪的影响减小, 10月~次年3月(2月除外), 该海域月平均浪高 1.3~2.5 m; 5~8月, 该海域月平均浪高 0.4~1.1 m; 4月和9月, 月平均波高 0.7~1.4 m。北部湾为半封闭的浅水海湾, 南海北部的海浪经琼州海峡和北部湾口传至该海域, 浪高略有减小。10月~次年3月(2月除外), 该海域月平均浪高 1.3~2.0 m; 5~8月, 该海域月平均浪高 0.7~1.0 m; 4月和9月, 月平均波高 0.9~1.2 m。南部陆架区不但水浅, 且太平

洋的涌浪对该海域的影响有限, 受西南风影响时, 风区十分有限, 因此该海域全年浪高较小。10月~次年3月(2月除外), 该海域月平均浪高 0.7~1.8 m; 5~8月, 该海域月平均浪高 0.3~0.9 m; 4月和9月, 月平均波高 0.5~1.1 m。泰国湾为相对封闭的海湾, 不但湾内局地风区受限, 且西北太平洋的涌浪也难以影响到该区域, 是南海波高最小的海域, 除湾口外, 湾内全年各月平均浪高小于 1.0 m。10月~次年3月(2月

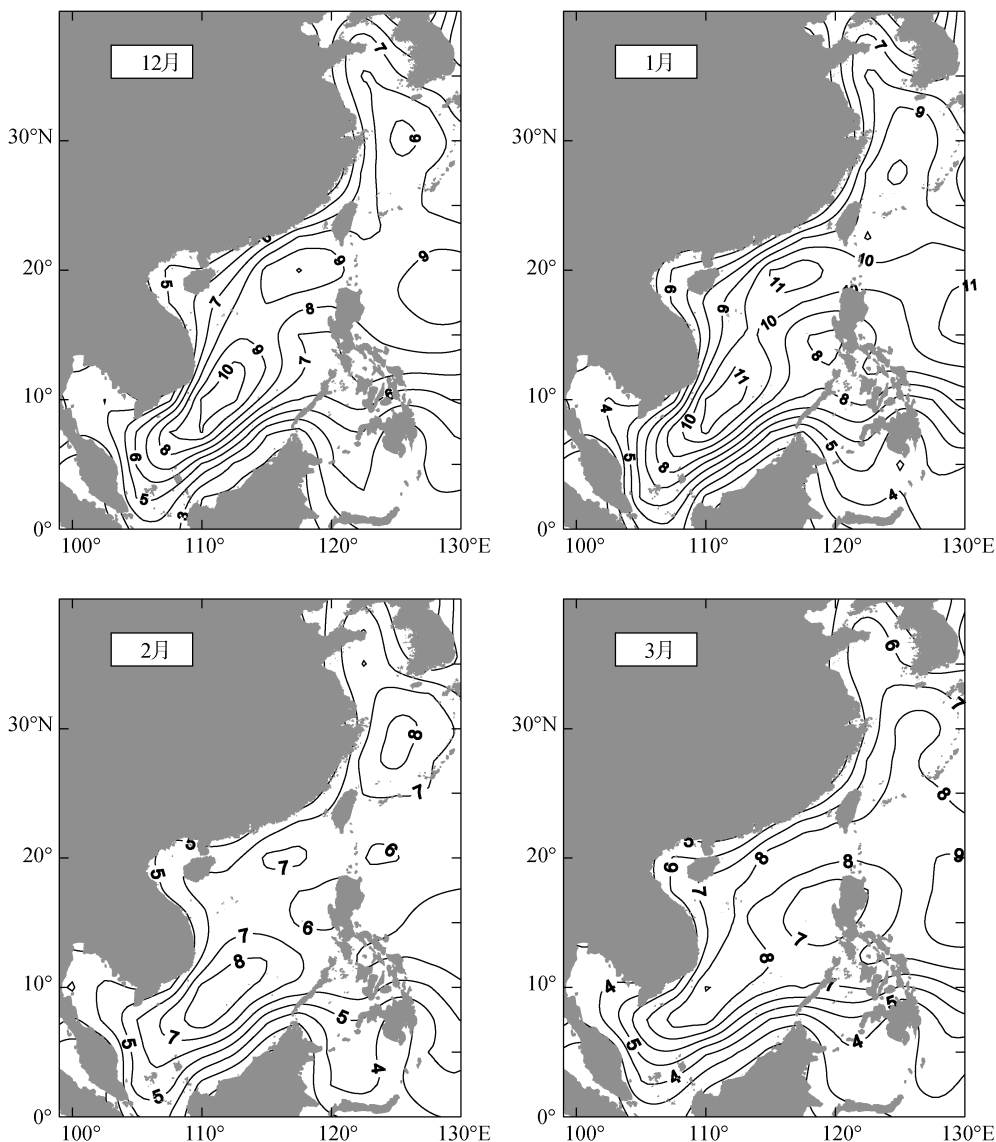


图4 南海月平均风速(m/s)分布图

Fig. 4 Distribution of mean wind speed in the South China Sea in December, January, February and March during two years

表2 南海各区月平均波高

Tab. 2 The monthly mean significant wave height of each subdomain in the South China Sea during two years

月份	波高(m)					
	北部深水区	北部陆架区	北部湾	南海中部	南部陆架区	泰国湾
1	2.3~2.8	1.8~2.5	1.5~2.0	1.8~2.5	1.2~1.8	0.5~1.6
2	1.3~1.9	1.3~1.9	1.1~1.3	1.1~1.3	0.8~1.2	0.4~1.0
3	2.3~2.8	1.5~2.2	1.3~1.6	1.3~1.9	0.7~1.3	0.6~1.2
4	1.1~1.6	1.0~1.6	0.9~1.1	0.7~1.1	0.5~0.7	0.4~0.6
5	0.8~1.3	0.8~1.3	0.7~0.8	0.4~0.7	0.3~0.4	0.4~0.6
6	1.0~1.3	1.0~1.3	0.9~1.0	0.6~1.1	0.4~0.6	0.2~0.6
7	1.0~1.3	1.0~1.2	0.9~1.0	0.6~1.1	0.5~0.9	0.7~1.0
8	0.8~1.3	0.8~1.2	0.7~0.8	0.6~1.0	0.5~0.9	0.7~1.0
9	1.2~1.8	1.2~1.7	1.0~1.2	0.7~1.4	0.5~1.1	0.7~0.9
10	1.9~2.5	1.8~2.4	1.4~1.8	0.9~1.9	0.6~0.9	0.6~0.9
11	2.2~2.7	1.8~2.5	1.5~2.0	1.4~2.3	0.8~1.4	0.6~1.3
12	1.8~2.3	1.6~2.1	1.3~1.6	1.6~2.1	1.0~1.6	0.5~1.5
年平均	0.8~2.8	0.8~2.5	0.7~2.0	0.4~2.5	0.3~1.8	0.2~1.6

除外), 该海域月平均浪高 0.5~1.6 m; 5~8 月, 该海域月平均浪高 0.2~1.0 m; 4 月和 9 月, 月平均波高 0.4~0.9 m。

本文的研究结果显示南海 2 月的浪高显著小于 1 月和 3 月, 文中用于对比分析的 3 个浮标的月平均风速和月平均浪高也都是 2 月小于 3 月。1~3 月南海没有受到热带气旋的影响, 月平均波高的变化与热带气旋作用无关, 可能是冬季风的强弱变化引起。图 4 中 NCEP 再分析资料显示 2009 年 9 月~2011 年 11 月期间南海和西北太平洋月平均风速 1 月>3 月>2 月, 由此可见南海的浪高不仅与南海的局地风速呈现正相关, 同时对西北太平洋的风速也十分敏感。但前人的研究也认为南海的浪高与风速呈良好的线性正相关^[2-5, 8-10], 且多年的统计资料显示南海和西北太平洋风速 1 月>2 月>3 月^[11-12]。因此, 可能受资料历时的限制, 本文分析得出的南海浪高的月变化具有一定时期的特殊性。随着 AVISO 遥感资料序列的增长, 以及未来更多的卫星源数据的加入, 基于该资料分析的南海浪高的时空变化特点将更接近实际情况, 尤其是南海浪高的月变化规律将更加清晰。

4 结论与讨论

通过本文的分析, 可以得到如下结论:

1) 通过与浮标资料的比较分析发现, AVISO 浪高资料基本可以达到浮标观测精度。

2) 南海各月平均波高均表现为由东向西, 由北往南递减, 各海区波高依次为: 北部深水区>北部陆架区>南海中部 北部湾>南部陆架区>泰国湾。

3) 南海浪高的月变化与季风的变化密不可分, 10 月~次年 3 月(冬季风影响期间)>4 月和 9 月(季风转换期)>5~8 月(夏季风影响期间), 1 月最大, 5 月最小。

受资料历时的限制, 本文分析得出的结果可能具有一定时期的特殊性, 随着 AVISO 浪高资料序列的增长, 该资料将更清楚的揭示出南海浪高的时间

和空间变化特点。

参考文献:

- [1] 齐义泉, 施平, 毛庆文. 南海海面风速季平均特征的卫星遥感分析[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 68-73 .
- [2] 齐义泉, 施平, 毛庆文. 南海海面风场和浪场季平均特征的卫星遥感分析[J]. 中国海洋平台, 1997, 12(3): 118-122.
- [3] 齐义泉, 施平, 毛庆文. GEOSAT 高度计分析南海北部海域的海浪特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 20-26.
- [4] 齐义泉, 施平. 采用卫星高度计资料分析南海风、浪的月平均特征[J]. 热带海洋, 1999, 18(2): 90-96.
- [5] 齐义泉, 施平, 毛庆文, 等. 基于 T/P 资料分析南海海面风、浪场特征及其关系[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(5): 619-624.
- [6] 齐义泉, 朱伯承, 施平, 等. WWATCH 模式模拟南海海浪场的结果分析[J]. 海洋学报, 2003, 125(4): 1-9.
- [7] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用 WAVEWATCH III 模式对南海的波浪场进行计算、统计分析和研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 1-8.
- [8] 葛黎丽, 屈衍, 张志旭, 等. 南海深水区风、浪、流多年一遇重现期极值的计算[J]. 中国海上油气, 2009, 21(3): 207-210.
- [9] 郑崇伟, 张霞. 基于 WAVEWATCHIII 模式的近十年南海波候统计分析[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(1): 47-55.
- [10] 王静, 齐义泉, 施平. 南海海面风、浪场的 EOF 分析[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 136-140.
- [11] 杨亮. 基于遥感数据的西北太平洋海面风场时空特征分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
- [12] 赵喜喜, 侯一筠, 齐鹏. 中国海海面风场时空变化特征分析[J]. 高技术通讯, 2007, 17(5): 523-528.

Temporal and spatial distribution characteristics of wave height in the South China Sea based on multi-satellite merged data

ZHOU Shui-hua, YU Sheng-bin, FENG Wei-zhong, LIANG Chang-xia

(The South China Sea Marine Forecast Center of State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China)

Received: Apr., 15, 2012

Key words: the South China Sea; monthly mean significant wave height; monthly variation; spatial distribution

Abstract: The monthly variation of significant wave height in the South China Sea was analyzed based on the multi-satellite merged data of AVISO from November 2009 to November 2011. The South China Sea was divided into six subdomains based on the wave characteristics and topography. The spatial distribution of the wave height was analyzed and we found that firstly, the wave height (H) decreased from east to west, and from north to south, and the descending order of the wave height in different subdomains was H (the northern deepwater area) $>$ H (the northern continental shelf) $>$ H (the central South China Sea) \approx H (Beibu Gulf) $>$ H (southern continental shelf $>$ H (the Gulf of Thailand); secondly, the monthly variation of **WAVE HEIGHT** was highly associated with the monsoon, with the biggest one occurred in January and the smallest one occurred in May. The descending order of the **WAVE** in different periods of the monsoon was H (winter monsoon) $>$ H (summer monsoon) $>$ H (the monsoon transition period).

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)