

海浪破碎对北太平洋海表面温度模拟的影响

刘子龙, 史 剑, 蒋国荣

(解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 基于海浪模式 WAVEWATCH III 模拟北太平洋海浪要素, 结合 NDBC 浮标资料进行验证, 发现模拟出的有效波高与浮标测量值具有很好的一致性。基于改进型白冠覆盖率耗散模型, 利用海浪模式模拟出的有效波高、有效波周期和摩擦速度等海浪要素计算出单位面积水柱内因海浪破碎产生的湍动能通量。通过改变环流模式 sbPOM 湍动能方程的上边界条件, 引入海浪破碎产生的湍动能通量, 并探究海浪破碎对北太平洋海表面温度模拟的影响。研究表明, 由于海浪破碎的引入, 环流模式 sbPOM 对北太平洋海表面温度模拟的准确程度得到提升, 这为大气模式提供一个准确的北太平洋下边界条件具有重要意义。

关键词: 海浪破碎; 海表面温度; WAVEWATCH III; sbPOM

中图分类号: P732.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)03-0122-08

DOI: 10.11759/hyxx20160904001

近年来, 随着对上层海洋和低层大气物理过程耦合研究的不断深入, 对海浪运动的研究也得到了前所未有的关注, 所关注的焦点并非海浪现象本身, 而是海浪对其他海洋动力过程的影响^[1]。海浪运动导致海洋上层混合的机制主要有: 波致雷诺应力引发的湍流混合、波浪破碎诱导的湍流混合、Stokes 漂与风驱动的剪切流相互作用形成的 Langmuir 环流混合等^[2]。本文在前人研究的基础上, 仅从海浪破碎诱导的湍流混合对海洋表面温度模拟产生的影响方面展开研究。

海浪是存在于海-气界面上的一种重要的运动形式, 海浪破碎对海洋上混合层中的湍流生成及其混合有着直接的影响。大量实验观测结果表明^[3-5], 海浪破碎将促进海洋上混合层中湍流生成, 加强湍流垂向混合, 其影响深度与海浪成长状态有关。Toba 等^[6]根据观测指出海浪破碎的影响深度可达 5 倍有效波高。Thomson 等^[27]在数值模式中引入波浪破碎导致的湍动能通量, 发现波浪破碎的影响深度与垂直参考系相关。Alari 等^[20]基于耦合环流模式 NEMO 和海浪模式 WAM 引入海浪破碎作用, 发现海浪破碎对海表面温度、温度的垂直分布和上升流都产生较大影响。Breivik 等^[28]基于 NEMO 环流模式, 讨论了海表应力、波浪破碎导致的湍动能通量和 Stokes Coriolis 应力对混合层的影响, 发现 3 个物理过程对减小海表面温度偏差起到了巨大作用。管长龙等^[1]总结前人所得, 认为波浪破碎为海表附近的湍流生成源, 在混合层上部形成一个影响磁层, 该层中的湍

流耗散率分布不再遵从固壁定律所规定的结果, 波浪破碎的影响深度可达 5~10 倍有效波高。孙群等^[8-10]为了研究海浪破碎对混合层中湍能量收支的影响, 采用垂向一维湍封闭混合模型, 通过改变湍动能方程的上边界条件, 引入海浪破碎产生的湍动能通量, 发现海浪破碎在海表产生的湍动能通量影响了海洋上混合层中的各项湍能量收支间的局部平衡关系。Sun 等^[11]利用 M-Y 一维湍封闭模型, 通过将波浪破碎作为海表湍流源引入, 发现考虑波浪破碎效应后, 模式模拟的海表面温度比未考虑波浪破碎效应时降低, 同时, 混合层深度增加, 模拟效果更显著。

为了探究海浪破碎效应在较大范围内对海表面温度的影响, 本文在采用先进的并行版本 sbPOM 环流模式^[12]的基础上, 区别于孙群等^[8]利用海浪模式 WAM 计算海浪破碎导致能量耗散率的方式, 利用 Guan 等^[7]总结计算出的基于白冠破碎的能量耗散率表达式, 通过改变环流模式 sbPOM 湍动能方程的上边界条件, 引入海浪破碎产生的湍动能通量, 探究海浪破碎对北太平洋海域不同季节的海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 的影响。

收稿日期: 2016-09-04; 修回日期: 2017-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676014)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41676014]

作者简介: 刘子龙(1991-), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋动力学与数值模拟, 手机: 18761683583, E-mail: 941117242@qq.com; 史剑(1981-), 通信作者, 男, 江苏扬州人, 副教授, 研究方向: 海洋动力学与数值模拟, 手机: 13813388338

1 研究方法

1.1 WAVEWATCH III 海浪模式简介及设置

WAVEWATCH III 海浪模式(以下简称 WW3)是基于第三代海浪模式 WAM 发展起来的当前国际上最为成熟的几个海浪模式之一^[13],具有稳定性好、计算精度高等特点,目前已成为美国海洋环境预报中心的业务化海浪预报模式。大量海浪数值模拟研究表明^[14-16],WW3 能够模拟出精度较高的海浪要素。

本文采用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)再分析风场数据驱动 WW3 海浪模式(该数据空间分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.9^{\circ}$,时间间隔为 6 h),模式地形数据由全球分辨率 $5' \times 5'$ 的 ETOPO5 地形插值得到。模拟了 2014 年全年的北太平洋海域海浪过程。设置 WW3 模式考虑风摄入波动、非线性的波波相互作用、白帽耗散和底摩擦等物理过程,相应的检验参数采用默认值。WW3 模拟的区域范围为: $10^{\circ}S \sim 66^{\circ}N$, $100^{\circ} \sim 280^{\circ}E$,空间分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。海浪谱频率分布范围为 0.041 8~0.41 Hz,共分 25 个频段,谱空间上离散为 24 个波向,方向角分辨率为 15° 。模式最大全局时间积分步长取为 2 400 s, x - y 方向和 k -theta 方向最大 CFL 时间积分步长设为 1 200 s,最小源函数项时间积分步长本文中设为 300 s。

1.2 sbPOM 环流模式简介及设置

sbPOM(stony brook parallel ocean model)模式^[12]是基于 POM(princeton ocean model)模式^[25]进行改进得到的一种可并行运算的环流模式,刘欣等^[17]曾采用区域海-气耦合模式 WRF-sbPOM,对理想热带气旋和海洋暖涡间的海气相互作用进行模拟,获得较好的模拟效果。刘子龙等^[26]曾在环流模式 sbPOM 中引入海浪搅拌混合作用,并探究其对北太平洋海表面温度模拟的影响,发现海浪搅拌混合作用的引入能够较大的改善原模式对北太平洋海表面温度的模拟。sbPOM 除将 POM 改为并行外,物理模型较原来无较大变化,垂向坐标仍然采用 σ 坐标。本文关注的湍动能方程,

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right] + 2P_s + 2P_b - 2\varepsilon \quad (1)$$

在海表($\sigma=0$)的边界条件如下:

$$q^2 = B_1^{2/3} u_*^2 \quad (2)$$

其中 K_q 为湍流垂向扩散系数; P_s 、 P_b 和 ε 分别表示湍动能的剪切生成项、浮力生成项和耗散率; q 为湍

流速度尺度; B_1 为常数; $u_* = \sqrt{\tau / \rho_w}$ 为海水中的摩擦速度。

在对北太平洋海表面温度进行模拟的过程中, sbPOM 模式空间分辨率与上文 WW3 模式设置保持一致,垂向采用 40 个 σ 层,在海洋上层采用较高的分辨率,而在中、深层分辨率较低。模式初始温、盐场取自 SODA 资料月平均温度和盐度,全场运动速度取零,地形同样由全球分辨率为 $5' \times 5'$ 的 ETOPO5 地形插值得到。风场和热通量取自空间分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料中心, sbPOM 模式外模时间步长为 20 s,内模时间步长 600 s,积分 2 a,取第二年积分结果进行分析。

1.3 海浪破碎的引入

海浪破碎能够在海表面产生湍动能通量,进而影响海洋上混合层湍能量收支的平衡关系。近年来,大量实验观测^[18-19]也都证明海浪破碎对上混合层中湍能量收支有着重要的影响。因此海洋混合层模式中需要考虑海浪破碎的影响。

根据文献[21-22],当考虑波浪破碎对海表面温度的影响时,将在海表形成一向下输入的湍动能通量,此时,可将(2)式给定的海表边界条件改为(3)式:

$$K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \bigg|_{z=0} = F_w \quad (3)$$

其中 F_w 假设为各种尺度的破碎波产生的湍动能通量。

结合 Guan 等^[7]提出的改进型白冠覆盖率耗散模型,

$$R_{dis} = 2.97 \gamma \rho_w g \beta_*^{-2} \omega_p E \quad (4)$$

其中, R_{dis} 表示单位面积水柱内由于海浪破碎导致的湍动能通量, β_*^{-2} 为波龄, ρ_w 为海水密度, γ 为单位白冠耗散的能量占总波能耗散的百分率,一般取为 0.1,谱密度 $E = \int F(k) dk = \frac{1}{16} H_{1/3}^2$, k 为波矢量, $F(k)$ 为波浪谱,频率 $\omega_p = 0.91 \times 2\pi / T_{1/3}$,波龄 $\beta_* = g / u_* \omega_p$, u_* 为摩擦速度, $H_{1/3}$ 为有效波高, $T_{1/3}$ 为有效波周期。

这样,可化简(4)式为 $F_w = 0.297 \rho_w u_*^2 \omega_p^3 E / g$,利用 WW3 海浪模式模拟得出的有效波高、有效波周期和摩擦速度等海浪要素,计算出波浪破碎导致的湍动能通量。通过改变环流模式 sbPOM 湍动能方程的上边界条件,引入海浪破碎导致的湍动能通量,

探究海浪破碎对北太平洋海表面温度模拟的影响。

2 结果分析

2.1 海浪模式数值试验结果分析

选取模式模拟有效波高作为探究 WW3 海浪数值试验模拟结果准确性的验证要素。基于美国国家浮标资料中心 NDBC(National Data Buoy Center), 选取如图 1 所示的 8 个浮标站数据进行验证, 验证的月份分别为 2014 年 2 月、5 月、8 月、11 月。

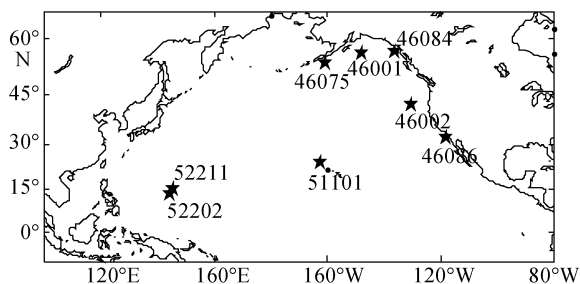


图 1 本研究所选取的 NDBC 浮标站点的位置

Fig.1 The position of the selected NDBC buoy

限于篇幅, 图 2 仅给出了 46075 号浮标站点的 4 个月份的有效波高模拟结果和浮标测量结果的对比如。从图中可以看出, WW3 海浪模式模拟有效波

高值和浮标测量值具有很好的一致性, 但是在一些风速较大、变化较剧烈的时间段, 模拟结果稍不理想, 如, 2 月 8 日到 2 月 15 日期间, 模式模拟结果和浮标测量结果存在一定偏差, 出现这种现象的原因可能是 NCEP 再分析风场资料时空分辨率不够高。

对图 1 所示 8 个浮标站点的模式模拟有效波高和浮标测量有效波高进行统计分析, 分别计算出均方根相对误差 E_{rms} 与相关系数 R_{of} , 其表达式分别如(6)、(7)所示。对于浮标因某些异常原因而未能进行测量或测量数据较少的月份, 在表 1 中用“NaN”表示。

$$E_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{fi})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{oi}} \times 100\% \quad (5)$$

$$R_{of} = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})(H_{fi} - \overline{H_f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{fi} - \overline{H_f})^2}} \quad (6)$$

式中, H_o 和 H_f 分别代表有效波高的浮标测量值和模式模拟值, N 为样本点的个数。

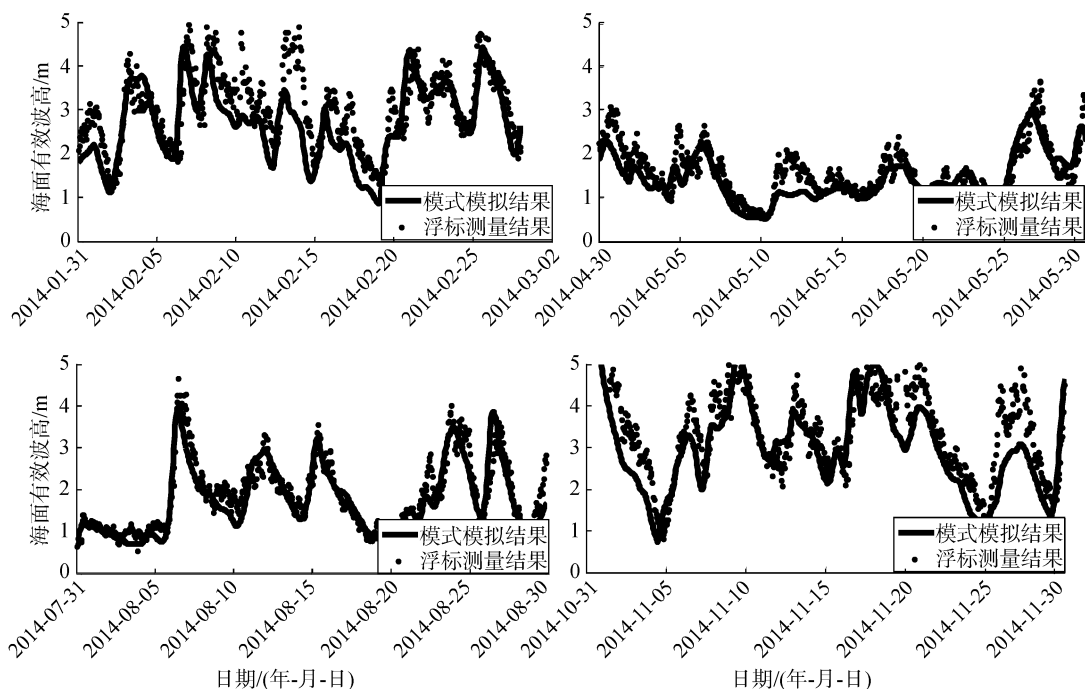


图 2 46075 号浮标处有效波高模拟与测量对比

Fig.2 Comparisons of the simulation significant wave heights with the results obtained from the 46075 buoy data

表 1 模拟有效波高值的误差分析

Tab.1 Error analysis of the simulation significant wave heights

浮标站号	均方根相对误差(%)				相关系数			
	2 月	5 月	8 月	11 月	2 月	5 月	8 月	11 月
46001	23	18	20	18	0.80	0.86	0.82	0.91
46002	22	24	22	16	0.82	0.85	0.85	0.89
46075	21	23	19	23	0.80	0.82	0.92	0.86
46084	20	NaN	23	21	0.83	NaN	0.76	0.80
46086	23	22	21	21	0.78	0.80	0.82	0.83
51101	21	19	NaN	20	0.88	0.87	NaN	0.82
52202	20	23	21	21	0.89	0.86	0.90	0.84
52211	23	20	22	NaN	0.83	0.83	0.85	NaN
<i>N</i>	672	744	744	720	672	744	744	720
平均	22	21	21	20	0.83	0.84	0.85	0.85

根据表 1 中 8 个浮标 4 个月份的模式模拟有效波高和浮标测量有效波高的均方根相对误差和相关系数的统计结果, 4 个月份的平均均方根相对误差和平均相关系数差别不大, 其中 2 月份平均均方根相对误差较其他月份稍大, 为 22%, 平均相关系数相对稍小, 为 0.83。整体上, 模式模拟有效波高和浮标测量有效波高的均方根相对误差基本控制在 20% 左右, 最小仅为 16%; 关系数基本控制在 0.80 以上, 最大相关系数为 0.92, 且相关系数在 0.80 以下的仅有两个。

基于对图 2 和表 1 的分析结果, 可以得出, NCEP 再分析风场资料可以作为 WW3 海浪模式的驱动风场, 其模拟出来的北太平洋有效波高等海浪要素准确度较高。

2.2 环流模式数值试验结果分析

图 3 分别给出了 4 个月份的未考虑海浪破碎模拟月平均 SST 和 ECMWF(european center for medium range weather forecasts)再分析月平均 SST 之差在北太平洋的空间分布图。从图中可以得出, 在未引入海浪破碎的情况下, 环流模式 sbPOM 已经能够较为准确的模拟出北太平洋的海表面温度。在空间尺度上, 环流模式 sbPOM 对北太平洋中心海区模拟效果较好, 误差范围基本控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右, 而对近大陆海区模拟效果较差, 误差范围在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 左右。赤道地区多呈现模拟 SST 较 ECMWF 再分析 SST 偏低的趋势。在时间尺度上, 2 月份和 11 月份北太平洋西部海区, 亚洲东岸邻近海区呈现模拟 SST 较 ECMWF 再分析 SST

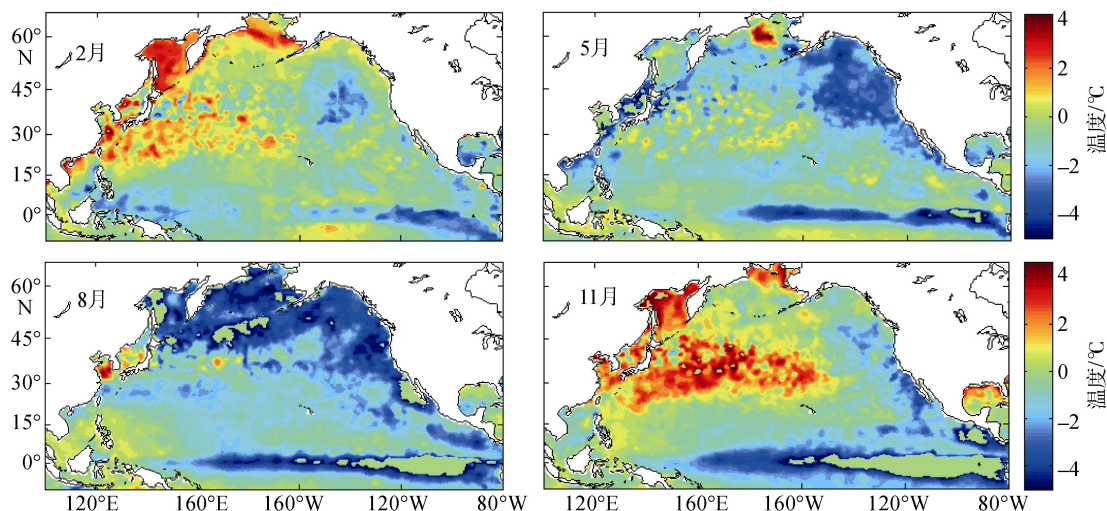


图 3 未考虑海浪破碎模拟月平均 SST 和 ECMWF 再分析资料月平均 SST 之差在北太平洋的空间分布

Fig.3 The spatial distributions of monthly mean SST deviations from simulation experiments without introducing wave breaking and ECMWF reanalysis data in the northern Pacific

偏高的趋势,5月份和8月份北太平洋东部海区,美洲西岸邻近海区呈现模拟 SST 较 ECMWF 再分析 SST 偏低趋势,且赤道地区西部海区常年呈现出模拟 SST 较 ECMWF 再分析 SST 偏高的趋势,赤道地区东部海区常年呈现出模拟 SST 较 ECMWF 再分析 SST 偏低的趋势。

为初步了解海浪破碎不同月份对北太平洋海表面的作用情况,图4给出了海浪破碎导致的湍动能通量在北太平洋不同月份的月平均空间分布图。从图中可以看出,在时间尺度上,2月份和11月份海浪破碎导致的湍动能通量较大,而5月份和8月份海浪破碎导致的湍动能通量较小;在空间尺度上,中高纬度地区海浪破碎导致的湍动能通量较大,而在低纬

度地区导致的湍动能通量较小。

选取美国全球海洋数据同化实验室(USA Global Ocean Data Assimilation Experiment, USGODAE)2014年2月27日如图5所示的9个浮标站点作为验证点,将Argo浮标资料测量SST、未考虑海浪破碎模拟SST与考虑海浪破碎模拟SST的对比结果进行统计分析,主要比较表中给出的绝对误差和相对误差,其定义分别为:

$$E_R = |H_o - H_f| \quad (7)$$

$$E_A = |H_o - H_f| / H_o \quad (8)$$

式中, E_R 代表绝对误差, E_A 代表相对误差, H_o 和 H_f 分别代表实测 SST 和模拟 SST。

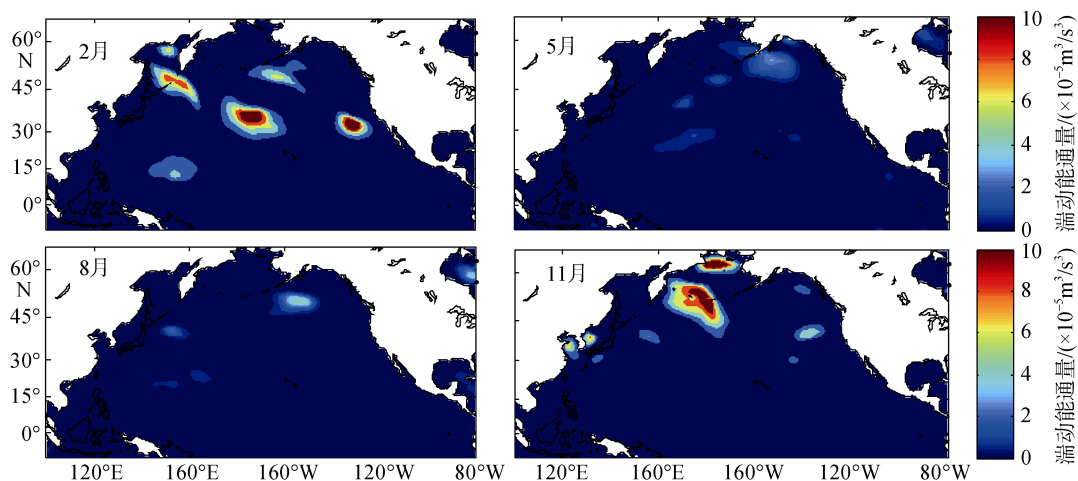


图4 海浪破碎导致的湍动能通量在北太平洋的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of the rate of dissipation due to wave breaking in the Northern Pacific

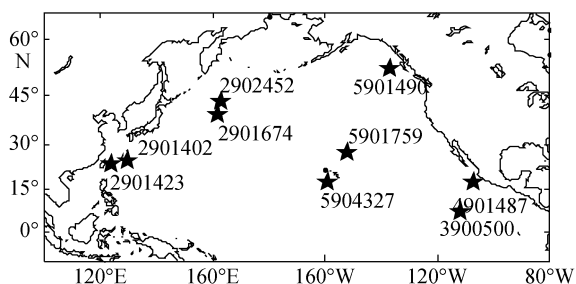


图5 Argo浮标北太平洋分布图

Fig.5 The position of selected Argo buoy in the northern Pacific

自沉浮式剖面探测浮标又称Argo浮标,因首先应用于国际Argo计划而被称为Argo浮标,专门应用于海洋次表层温、盐、深剖面测量。Argo浮标每7d或10d浮出一次海面,向卫星传输经度、纬度、深度、温度和盐度等资料,然后再次潜入预定深度,一般为2000m左右,其经度、纬度、盐度和温度资料的精确度都为0.001。本文浮标测量SST数据取为

Argo浮标测量首层海温数据,其测量首层水深基本在5m左右,具体数据见表2。

根据表2的统计结果,在sbPOM模式未引入海浪破碎时,模式本身能够较为准确的模拟出北太平洋SST,平均绝对误差仅为0.855。在模式引入海浪破碎后,其模拟SST的平均值相比未引入海浪破碎时得到一定提升,同时,平均绝对误差由原来的0.855降为0.753,平均相对误差由4.26%降到3.52%。综上所述,sbPOM模式在引入海浪破碎后,北太平洋海域模拟SST的准确性将进一步提升。

3 讨论

为了能从整体上更加直观地了解波浪破碎对北太平洋海域不同季节海表面温度模拟的影响,图6给出了4个月份北太平洋未考虑海浪破碎模拟SST和考虑海浪破碎后模拟SST之差分布图。

表 2 SST 北太平洋模拟与浮标实测的比较

Tab.2 Comparisons of the simulation SST with the results obtained from buoy data in the northern Pacific

浮标号	浮标首层水深(m)	实测温度(°C)	模拟海温(°C)		绝对误差(°C)		相对误差(%)	
			未考虑	考虑	未考虑	考虑	未考虑	考虑
3900500	4.7	27.477	27.847	27.891	0.370	0.414	1.35	1.51
2901402	5.4	21.332	23.540	23.247	2.208	1.915	10.35	8.98
2901423	4.8	22.820	24.290	23.996	1.470	1.176	6.44	5.15
4901487	4.4	28.893	27.740	27.630	1.153	1.263	3.99	4.36
5901759	5.5	22.712	21.740	21.471	0.972	1.241	4.28	5.46
5904327	5.4	25.108	26.010	25.698	0.902	0.590	3.59	2.35
5901490	4.7	6.553	6.604	6.542	0.051	0.011	0.78	0.17
2902452	4.7	5.875	6.173	6.063	0.298	0.188	5.07	3.20
2901674	5.1	10.441	10.708	10.491	0.267	0.050	2.56	0.48
平均值	5.0	19.023	19.406	19.353	0.855	0.753	4.26	3.52

注:“未考虑”表示未考虑海浪破碎;“考虑”表示考虑海浪破碎

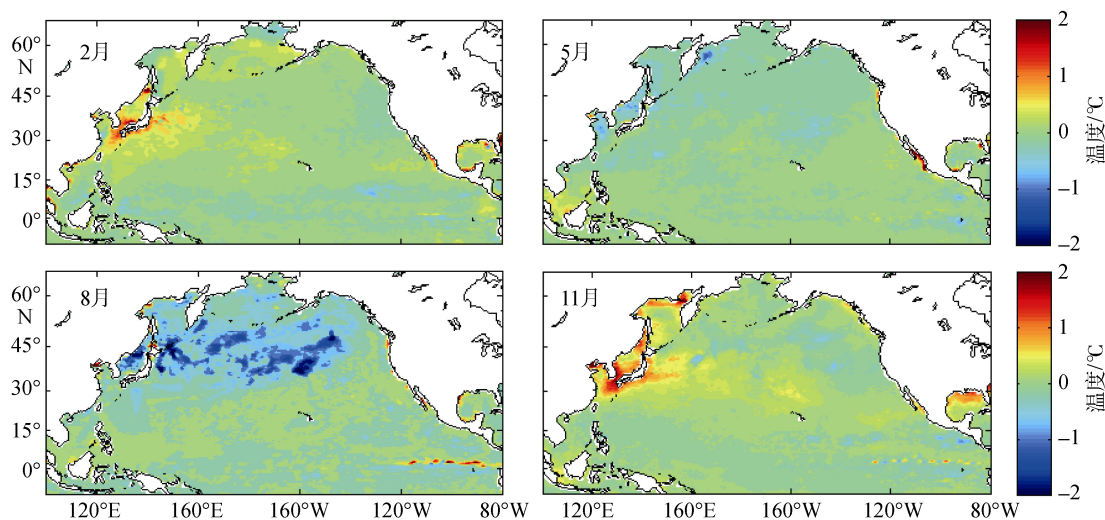


图 6 未考虑海浪破碎和考虑海浪破碎模拟月平均 SST 之差在北太平洋的空间分布

Fig.6 The spatial distributions of monthly mean SST deviations from simulation the experiment without introducing the wave breaking and introduced that in the northern Pacific

对图 6 进行分析可以得出,空间尺度上,海浪破碎的引入,对中高纬度 SST 模拟改善效果较为显著,对低纬度海区 SST 模拟改善效果不明显;对沿海地区改善效果比大洋内部及赤道地区效果明显。时间尺度上,2 月份和 11 月份海浪破碎的引入使得北太平洋大部分海区模拟 SST 比未引入波浪破碎时模拟 SST 减小,以北太平洋西北海域最为明显;而 5 月份和 8 月份北太平洋北部地区模拟 SST 主要呈现比未引入波浪破碎时模拟 SST 增大的趋势,这也正好与图 3 得出的结论相对应:未考虑海浪破碎时模拟 SST 比 ECMWF 再分析 SST 偏高地区,如 2 月和 11 月份亚洲东部海区,海浪破碎的引入,使得模拟 SST 比未考虑海浪破碎时降低;反之,未考虑海浪破碎时模拟 SST 比 ECMWF 再分析 SST 偏低地区,如 5 月

和 8 月份北太平洋北部海区,海浪破碎的引入,使得模拟 SST 比未考虑海浪破碎时升高。结合图 4 可以发现,海浪破碎导致的湍动能通量愈强的地区,海浪破碎对北太平洋 SST 模拟的改善效果愈明显,主要表现为使得海区模拟 SST 较未引入波浪破碎时减小,而对于某些模拟 SST 较未引入波浪破碎时增大的海区,如 5 月和 8 月份北太平洋北部海区,从图 4 可以看出其海浪破碎导致的湍动能通量并不强,其模拟 SST 的增大可能与海洋环流和海气热通量有关。一般情况下,海洋环流模式在考虑海浪破碎后,会增强海洋表层的混合,通常使得 SST 降低,但是海表面温度的升高或者降低同时还受到了海洋环流和海气热通量的影响^[23-24],这两个过程的作用都可能使得环流模式在加入海浪破碎后模拟的 SST 较原来偏

大。通过对比可以发现,在 sbPOM 模式对北太平洋 SST 进行模拟的过程中,海浪破碎的引入使得海洋表面混合更加均匀,模式模拟出来的 SST 更加准确。

4 结论

本文在 WW3-sbPOM 联合模型的基础上,利用 NCEP 再分析风场驱动 WW3 海浪模式模拟出的有效波高、有效波周期和摩擦速度等海浪要素,结合 Guan 等^[7]提出的改进型白冠覆盖率耗散模型,计算出海浪破碎导致湍动能通量。通过改变环流模式 sbPOM 湍动能方程的上边界条件,引入海浪破碎产生的湍动能通量,探究海浪破碎对北太平洋 SST 模拟的影响。研究表明:(1)在未考虑海浪破碎的情况下,sbPOM 模式已经能够较为准确的模拟出北太平洋 SST,且对大洋中部模拟效果较好,误差在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右,对沿岸地区以及赤道地区模拟效果较差,最大绝对误差可达 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 左右。(2)从空间尺度上来说,海浪破碎的引入,对中高纬度 SST 模拟效果改善较大,对低纬度 SST 模拟效果改善较小。从时间尺度上来说,海浪破碎的引入,使得 2 月份和 11 月份北太平洋大部分海区 SST 比未引入海浪破碎时模拟的 SST 减小,而 5 月份和 8 月份北太平洋北部地区主要呈现出比未引入海浪破碎时模拟 SST 升高的趋势。(3)sbPOM 环流模式中海浪破碎的引入,使得海表面混合更加均匀,对北太平洋 SST 的模拟相对于未引入海浪破碎之前有较大幅度提高,模拟效果更好。

参考文献:

- [1] 管长龙, 张文清, 朱冬琳, 等. 上层海洋中浪致混合研究评述——研究进展及存在问题[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(10): 20-24.
Guan Changlong, Zhang Wenqing, Zhu Donglin, et al. Review of research on surface wave induced mixing in upper ocean layer: progress and existing problems[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(10): 20-24.
- [2] 张书文, 曹瑞雪, 朱风芹. 波浪破碎湍流混合研究综述[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 786-791.
Zhang Shuwen, Cao Ruixue, Zhu Fengqin. A review of the turbulent mixing by wind wave breaking[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 786-791.
- [3] Kitaigorodskii S A, Lumley J L. Wave-turbulence interactions in the upper ocean. Part I: the energy balance of the interacting fields of surface wind waves and wind-induced three-dimensional turbulence[J]. Journal of Physical Oceanography, 1983, 13(11): 1977-1987.
- [4] Terray E A, Donelan M A, Agrawal Y C, et al. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 1996,

- 26(5): 792-807.
- [5] Agrawal Y C, Terray E A, Donelan M A, et al. Enhanced dissipation of kinetic energy beneath surface waves[J]. Nature, 1992, 359(6392): 219-220.
- [6] Toba Y, Kawamura H. Wind-wave coupled downward-bursting boundary layer (DBBL) beneath the sea surface[J]. Journal of Oceanography, 1996, 52(4): 409-419.
- [7] Guan Changlong, Hu Wei, Sun Jian, et al. The whitecap coverage model from breaking dissipation parametrizations of wind waves[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(112): 395-412.
- [8] 孙群. 海浪破碎对海洋上混合层影响的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
Sun Qun. Numerical investigation of the effect of wave breaking on ocean surface mixed layer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [9] 孙群, 管长龙, 宋金宝. 海浪破碎对海洋上混合层中湍能量收支的影响[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(1): 69-74.
Sun Qun, Guan Changlong, Song Jinbao. Effect of wave breaking on turbulent energy budgets in ocean surface mixed layer[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 37(1): 69-74.
- [10] Sun Qun, Guan Changlong, Song Jinbao. Wave breaking on turbulent energy budget in the ocean surface mixed layer[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(1): 9-13.
- [11] Sun Qun, Song Jinbao, Guan Changlong. Simulation of the ocean surface mixed layer under the wave breaking[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(3): 9-15.
- [12] Jordi A, Wang D P. sbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 38(6): 59-61.
- [13] Tolman H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(6): 782-797.
- [14] 张洪生, 辜俊波, 王海龙, 等. 利用 WAVEWATCH 和 SWAN 嵌套计算珠江口附近海域的风浪场[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(1): 8-17.
Zhang Hongsheng, Gu Junbo, Wang Hailong, et al. Simulating wind wave field near the Pearl River Estuary with SWAN nested in WAVEWATCH[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(1): 8-17.
- [15] Wang Jizhao, Zhang Jie, Yang Jungang. Numerical simulation and preliminary analysis on ocean waves during Typhoon Nesat in South China Sea and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2014, 32(3): 665-680.
- [16] Cui Hong, He Hailun, Liu Xiaohui, et al. Effect of oceanic current on typhoon-wave modeling in the East China Sea[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(10): 592-599.
- [17] 刘欣, 韦骏. 热带气旋与海洋暖涡间的海-气相互作用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 456-466.
Liu Xin, Wei Jun. Air-Sea interaction between Tropical

- Cyclone and Ocean Warm Core Ring[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 456-466.
- [18] Agrawal Y C, Terray E A, Donelan M A, et al. Enhanced dissipation of kinetic energy beneath surface waves[J]. *Nature*, 1992, 359(6392): 219-220.
- [19] Terray E A, Donelan M A, Agrawal Y C, et al. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26(5): 792-807.
- [20] Alari V, Staneva J, Øyvind Breivik, et al. Surface wave effects on water temperature in the Baltic Sea: simulations with the coupled NEMO-WAM model[J]. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(8): 917-930.
- [21] Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(7): 1791-1806.
- [22] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, 20(4): 851-875.
- [23] 宋振亚, 乔方利, 杨永增, 等. 波致混合对热带太平洋海气耦合模式中冷舌模拟的改进[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(9): 1138-1145.
Song Zhenya, Qiao Fangli, Yang Yongzeng, et al. The improvement of wave-induced mixing on the simulation of cold tongue in the tropical Pacific Ocean with sea-air coupled model[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(9): 1138-1145.
- [24] 宋振亚, 乔方利, 雷晓燕, 等. 大气-海浪-海洋环流耦合数值模式的建立及北太平洋 SST 模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2007, 22(5): 543-548.
Song Zhenya, Qiao Fangli, Lei Xiaoyan, et al. The establishment of an atmosphere-wave-ocean circulation coupled numerical model and its application in the North Pacific SST simulation[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(5): 543-548.
- [25] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model[C]// Heaps N S. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, vol 4. Washington DC: American Geophysical Union, 1987: 1-16.
- [26] 刘子龙, 史剑, 蒋国荣, 等. 海浪搅拌混合对北太平洋海表面温度模拟的影响[J]. *海洋科学*, 2016, 40(12): 131-137.
Liu Zilong, Shi Jian, Jiang Guorong, et al. Influence of wave-induced mixing on a sea surface temperature simulation of the North Pacific[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(12): 131-137.
- [27] Thomson J, Schwendeman M S, Zippel S F, et al. Wave breaking turbulence in the ocean surface layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(6): 1866-1882.
- [28] Breivik Ø, Mogensen K, Bidlot J, et al. Surface wave effects in the NEMO ocean model: Forced and coupled experiments[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(4): 135-143.

Effect of wave breaking on the sea surface temperature simulation in the North Pacific

LIU Zi-long, SHI Jian, JIANG Guo-rong

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Received: Sep.4, 2016

Key words: wave breaking; sea surface temperature; WAVEWATCH III; sbPOM

Abstract: In this paper, wave parameters in the North Pacific were simulated by the WAVEWATCH III and were combined with NDBC buoy data verification. We found that the simulated significant wave height is highly precise. Based on the modified model of whitecap coverage dissipation, turbulence kinetic energy (TKE) fluxes due to wave breaking were calculated using the simulated significant wave height, wave period, and friction velocity. The influence of surface wave breaking could be introduced into ocean model sbPOM by modifying the existing surface boundary condition of the TKE equation and specifying its input. The effects of wave breaking on the SST simulation in the North Pacific were also investigated. The results indicated that wave breaking can improve the accuracy of the ocean model sbPOM on the North Pacific sea surface temperature simulation and it plays an important role in providing accurate lower boundary conditions in atmospheric models.

(本文编辑: 刘珊珊)