

海浪搅拌混合对北太平洋海表面温度模拟的影响

刘子龙, 史 剑, 蒋国荣, 陈奕德, 张成成

(解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 利用 NCEP 再分析风场驱动 WAVEWATCH III 海浪模式对北太平洋海域的海浪过程进行模拟, 利用浮标观测资料对模拟出的海浪要素有效波高进行验证, 发现他们之间具有很好的一致性。基于模式输出的有效波高等波浪要素, 利用特征波参数化理论, 在海洋环流模式中引入海浪搅拌混合作用, 分析其对北太平洋海表面温度模拟的影响, 初步数值模拟结果表明, sbPOM 模式在考虑海浪搅拌混合作用以后, 模拟精度进一步提升, 这对提供一个准确的大气模式下边界条件具有重要作用。

关键词: 搅拌混合; 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(2016)12-0131-07

doi: 10.11759/hyxx20160127001

21 世纪, 海浪研究得到了世界前所未有的关注, 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和作用^[1]。一般情况下, 海浪通过 4 种方式影响海流: (1)海浪破碎过程; (2)波浪的搅拌混合过程; (3)波致应力; (4)辐射应力和底部应力等。目前, 国内外已有大批学者从这四个方面展开了海浪对海洋混合层影响的研究。本文仅对海浪搅拌混合对海洋表层温度(sea surface temperature, SST)的影响进行分析和总结。

Yuan 等^[2]将海水的运动分解成平均运动和扰动运动, 并将扰动运动视为波生运动和湍流运动的叠加。他们借用混合长的概念将波生雷诺应力参数化, 得到波生运动导致的混合系数。Qiao 等^[3]将混合系数加入到一个全球环流模式中发现可以有效地改进对海洋混合层的模拟。夏长水^[4]将波致混合系数运用到 MASNUM 浪流耦合数值模式中对黄海的温度环境场进行了模拟, 也取得了较好的结果。Yang 等^[5]将搅拌混合系数引入环流模式中对黄海混合层进行模拟, 发现其在冬季作用最强, 且改变了环流模式模拟混合层深度偏浅的缺陷。宋振亚^[6]等将混合系数引入到基于 MASNUM 海浪模式建立的大气-海浪-海洋环流耦合数值模式中, 对近 50 a 的北太平洋海表温度进行模拟, 从模拟结果的平均 SST 来看, 发现比大气-洋流耦合模式模拟的北太平洋海表温更合理。

此外, 胡好国等^[7]提出利用特征波参数化理论, 将海浪引起的垂直涡动动量和热混合系数引入 POM 模式中, 对渤海、黄海、东海海洋上层进行数值模拟, 探究海浪的混合作用, 发现海浪的作用使得海洋上

层混合更加均匀。本文在使用环流模式异于前人, 采用先进的并行版 sbPOM 模式的基础上, 利用胡好国等^[7]通过特征波参数化理论计算所得的垂直涡动动量系数和热混合系数, 探究海浪的搅拌混合作用对北太平洋海域不同季节海表面温度模拟的影响。

1 研究方法

1.1 WAVEWATCH III 海浪模式简介及设置

WAVEWATCH III^[8-9]海浪模式简称 WW3, 基于 Tolman^[10]的第三代海浪模式 WAM 发展起来的, 是当前国际上最为成熟的几个海浪模式之一, 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。

由于海浪具有随机性, 可采用谱密度 F 来描述海面的不规则变化, 同时考虑时间和空间的变化, 谱密度函数 F 可以写成: $F = F(k, s, \omega; x, t)$, 其中 k 为波数矢量; σ 为固有频率, ω 为绝对频率; x, t 分别为空间矢量和时间。而海浪传播方程可表示为

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20131066); 基于多源资料的海洋三维流场估算技术研究(41306010)

[Foundation: Program of Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No.BK20131066); Estimation Technique of Ocean 3D Flow Field Based on Multi Source Data(No.41306010)]

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, 电话: 18761683583, E-mail: 941117242@qq.com; 史剑(1981-), 通信作者, 男, 江苏扬州人, 讲师, 研究方向: 海洋动力学与数值模拟, 电话: 13813388338

$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}$, 其中 S 为源函数, 代表海浪能量的源汇。

本文采用 NCEP 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。模拟的区域范围为: $10^\circ\text{S} \sim 66^\circ\text{N}$, $100^\circ \sim 280^\circ\text{E}$, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。海浪谱频率分布为 $0.0418 \sim 0.41 \text{ Hz}$, 共 25 个频段, 方向上离散为 24 个波向, 且方向角分辨率为 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 方向上的时间积分步长都取为 1 200 s, 源函数时间积分步长最小取为 15 s, 本文中取为 300 s。

1.2 sbPOM 模式简介及设置

sbPOM(Stony Brook Parallel Ocean Model)模式^[11]是 Antoni Jordi 基于 POM(Princeton Ocean Model)模式^[12]进行少量改变得到的, 除采用的是并行原理外, 其他原理基本保持一致, 其垂直湍流黏性系数 K_M 和湍流扩散系 K_H 的计算式为 $K_H = q\lambda S_H$, $K_M = q\lambda S_M$ 。刘欣^[13]等曾采用区域海-气耦合模式 WRF-sbPOM, 通过控制海洋暖涡(WCR)的有无以及暖涡和热带气旋的(TC)的相对位置, 对理想 TC 和 WCR 间的海气相互作用进行模拟研究, 取得了较好的效果。

本文在对北太平洋海温进行模拟的过程中, 环流模式空间分辨率以及计算的区域的设置和上文 WW3 模式设置保持一致, 同时, 模式垂向采用 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, 控制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 海浪搅拌混合作用的引入

基于胡好国提出的特征波参数化理论^[7], 引入波浪搅拌混合作用探究其对海表面温度场模拟的影响。为了区别, 把海浪引起的垂直涡动动量和热混合系数分别记为 K_{wm} 和 K_{wh} , 其表达式分别为:

$$K_{wm} = \frac{2ak^2\lambda}{\pi T} e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \quad (1)$$

$$K_{wh} = \frac{2Pk^2}{g} \delta \beta^3 W^3 e^{\frac{gz}{\beta^2 W^2}} \quad (2)$$

在海面处, 一般取 $k=0.4$, $\beta=1.0$, $P=0.1$, $\delta=0.1$, $\pi=3.14$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。波浪混合作用可以分为波浪运动混合作用和波浪破碎混合, 相比而言, 波浪运动混合作用比波浪破碎混合作用大得多, 其对海洋产生的影响从表层到底层是一个逐渐减小的过程^[14]。本文考虑把计算所得的垂直涡动动量系数和热混合系数直接加入到 sbPOM 模式中作为垂直涡扩散系数的一部分, $K'_h = K_h + K_{wh}$, $K'_m = K_m + K_{wm}$, 这样表层的波浪运动混合作用就得到了考虑。

为了初步探究波浪搅拌混合作用在不同月份于北太平洋的作用情况, 图 1 给出了海浪搅拌混合作用强度在北太平洋不同月份的月平均空间分布图, 主要以 2 月、5 月、8 月、11 月为例进行分析。从图 1 中可以看出, 海浪搅拌混合作用在中高纬度作用较明显, 在低纬度地区作用较弱; 从时间上来看, 2 月和 11 月份作用较强, 5 月和 8 月作用较弱。

2 结果及分析

2.1 海浪模式数值试验结果及分析

WW3 数值试验, 采用 NCEP 风场作为模式的输入场, 得到了计算时间范围内每个小时的波浪场要素, 选取有效波高作为检验模式模拟结果可靠性的要素。

本文在美国国家浮标资料中心(National Data Buoy Center, NDBC)选取了 6 个如图 2 所示的浮标站点作为验证点, 并以 2 月、5 月、8 月、11 月为代表月进行分析检验。限于篇幅, 图 3 仅分别给出了 46001, 46002, 51003, 51004 四个浮标 11 月份有效波高模拟值和浮标观测值的对比图。从图 3 中可以看出, 模式模拟结果较好地吻合了浮标观测有效波高的变化趋势, 即便是在有效波高极大极小值点, 其模拟效果令人也是较为满意的, 偶有出现极大值点模拟值偏低的情况, 如 51003 号浮标 11 月 17 日和 25 日出现的模拟值偏低情况。造成这种误差的主要原因在于 NCEP 风场的时空分辨率较低。

将 WW3 海浪模式模拟结果与 NDBC 浮标观测值进行比较, 并对结果进行统计分析, 对于浮标因为某些异常而未进行观测或观测数据较少的月份, 予以舍弃, 并于表 1 中以“NaN”表示(表中计算结果通过四舍五入方法精确到小数点后二位)。表中给出的均方根相对误差和相关系数^[8], 其定义分别为:

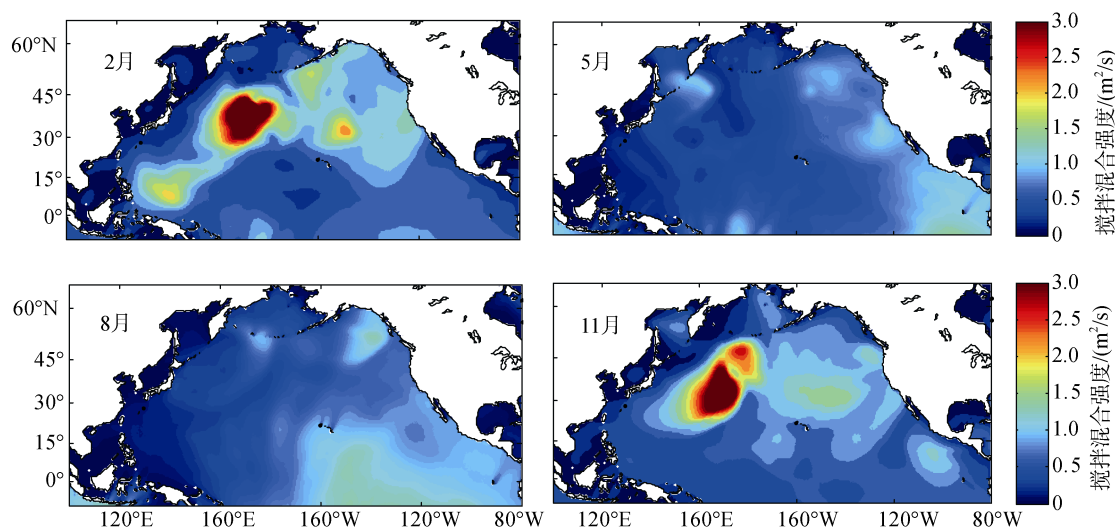


图 1 海浪搅拌混合作用强度在北太平洋的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of wave-induced mixing intensity in the northern Pacific

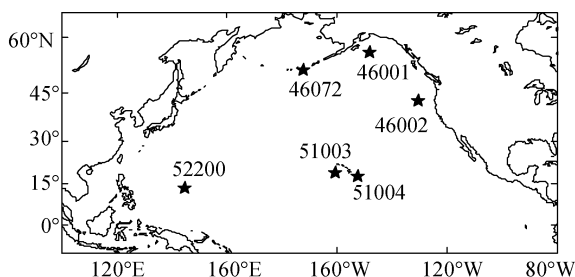


图 2 北太平洋所选 NDBC 浮标站点的位置

Fig. 2 Position of selected NDBC buoys in the northern Pacific

$$E_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{fi})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{oi}} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{of} = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})(H_{fi} - \overline{H_f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{fi} - \overline{H_f})^2}} \quad (4)$$

式中, E_{rms} 和 R_{of} 分别代表均方根相对误差和相关

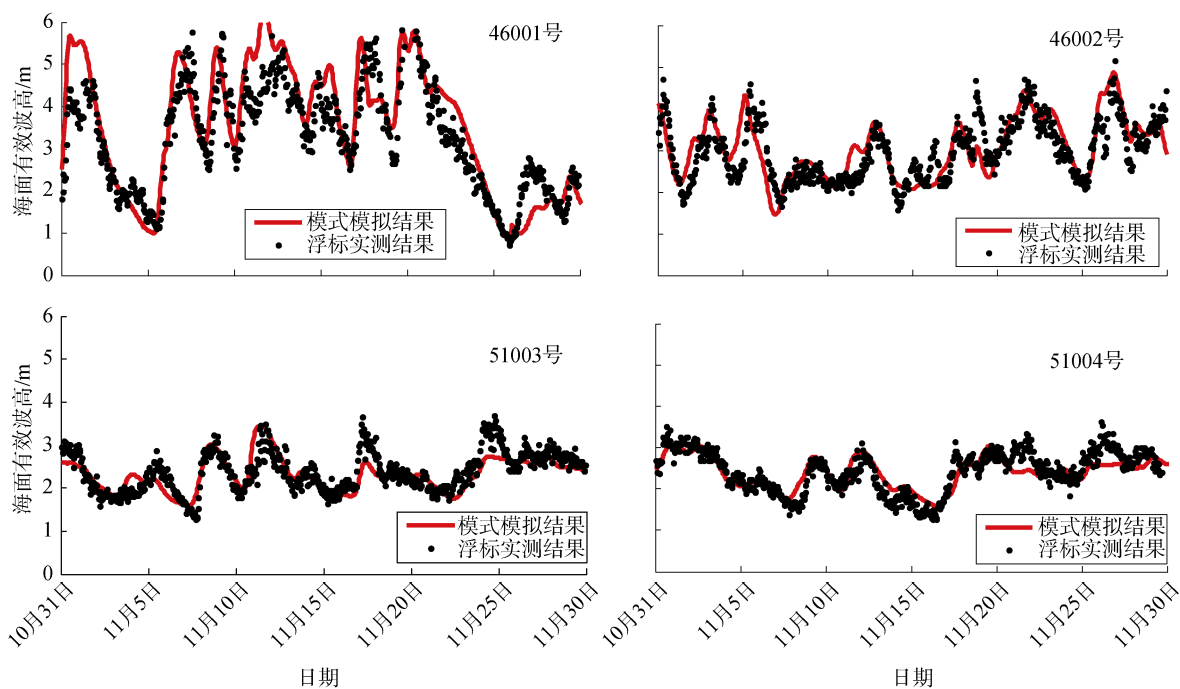


图 3 实验模拟有效波高和浮标实测有效波高的对比图

Fig. 3 Comparison of simulated significant wave heights with those from buoy data

表 1 实验模拟有效波高和浮标实测有效波高的对比

Tab. 1 Comparison of simulated significant wave heights with those from buoy data

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
52200	NaN	14	18	20	NaN	0.93	0.86	0.82
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
46072	NaN	NaN	17	19	NaN	NaN	0.78	0.81
51004	17	NaN	22	19	0.88	NaN	0.80	0.84
51003	24	23	18	20	0.66	0.78	0.81	0.80
平均	22	20	20	19	0.80	0.86	0.82	0.85

系数, H_o 和 H_f 分别代表波高的观测值和模拟值, N 为样本点的个数。

根据表 1 统计结果可以得出, 利用 NCEP 再分析风场驱动 WW3 海浪模式所得的模拟结果和实测资料结果全年均方根相对误差在 20% 左右, 相关系数在 0.83 左右, 且大多数位于 0.85 以上, 0.80 以下的仅有 3 个, 其最大相关系数可达 0.93, 最小也有 0.66, 总体来说, 基本属于强相关。从时间变化来看, 4 个月份均方根相对误差变化不大, 2 月较其他月份来说稍微偏大点, 为 22%, 其相关系数也为 4 个月份中最小的, 仅 0.80, 而 5 月相关系数达 0.86, 为 4 个月份中相关性最强。根据对图 3 和表 1 的分析, 可以得出, NCEP 再分析风场可以作为 WW3 海浪模式的驱动风场, 其模拟出的有效波高和浮标观测数据基本保持一致。

2.2 环流模式数值试验结果及分析

对于海流模式 sbPOM 模式的模拟结果, 同样以 2 月、5 月、8 月、11 月为例分析海浪搅拌混合作用对北太平洋海表温度模拟的影响。

图 4 分别给出了 4 个月份的未考虑海浪搅拌混合作用模拟 SST 和 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecasts)再分析资料 SST 之差在北太平洋的分布图, 可以从整体上把握 sbPOM 模式对北太平洋海温的模拟情况。由图 4 可以得出, 在未考虑海浪搅拌混合的情况下, sbPOM 模式已经能够较为正确的模拟出北太平洋海表层的温度。从全年来看, 其模拟的大部分地区, 尤其是北太平洋中部, 误差范围主要控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内; 局部地区, 如大洋沿岸和赤道地区, 模拟温度误差较大, 误差范

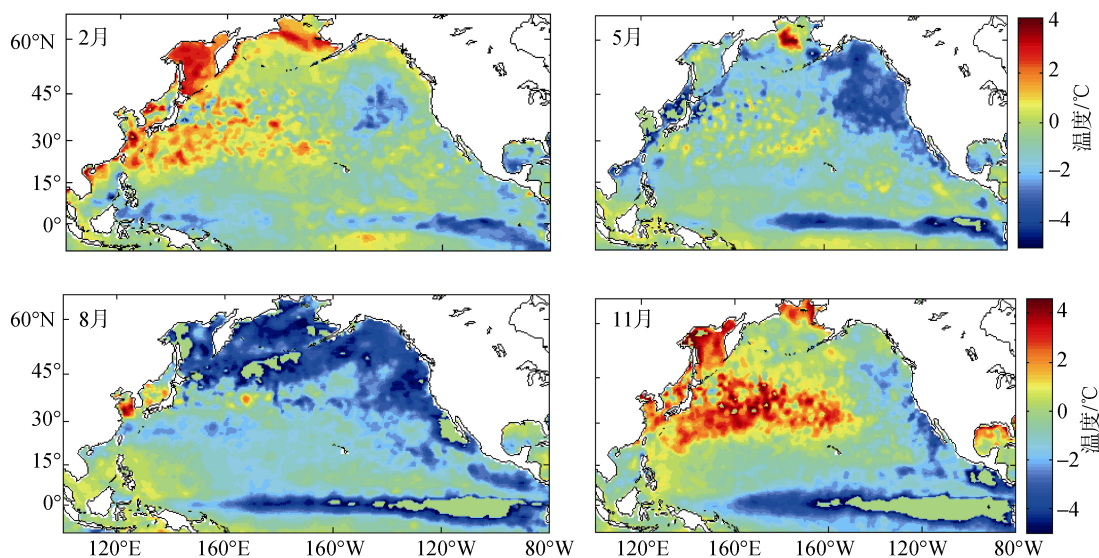


图 4 未考虑搅拌混合模拟月平均 SST 和再分析月平均 SST 资料之差在北太平洋的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of monthly mean SST deviations from simulation without wave-induced mixing and reanalysis data in the northern Pacific

围在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 左右,其中,北太平洋东北部和赤道地区年平均模拟温度较低,而亚洲东岸年平均模拟温度较高。从时间变化来看,5月和8月这两个月份主要呈现美洲西岸、北太平洋北部和赤道地区模拟温度较实际值低的趋势,仅有亚洲东岸小部分地区模拟温度较实际值高;而2月和11月却主要呈现出亚洲东岸模拟温度较实际值高的趋势,唯有美洲西岸小部分地区模拟温度较实际值低,其中赤道地区11月份仍主要表现为模拟温度较实际值低。

为了定性的分析海浪搅拌混合作用对北太平洋海表温度的影响情况,图5分别给出了4个月份未加入海浪搅拌混合作用项和加入海浪搅拌混合作用项后模拟北太平洋海表温度差分布图。从全年来看,波浪搅拌混合作用的引入,对中高纬度地区影响比较明显,而对低纬度地区影响较弱,这和夏长水^[4]等提出的 B_v 在中高纬度海区比 K_h 要大,在低纬度海区比 K_h 要小相对应,也正好迎合了由图1得到的结论。局部地区如对大

洋沿岸地区作用较为明显,而对北太平洋中部地区和赤道地区作用较弱。从时间变化上来看,5月和8月海浪搅拌混合作用的作用使得北太平洋北部地区模拟温度值变大,而2月和11月海浪搅拌混合作用使得亚洲东岸模拟值变小,这些现象的出现,正好与上文得出的模式模拟误差相对应:模拟温度较高地区,如亚洲东岸,搅拌混和的加入使得模拟温度降低;模拟温度较低的地区,如北太平洋北部,搅拌混合作用的引入使得模拟温度增大。一般情况下,海洋环流模式在考虑波致混合作用后,会增强海洋上层的混合,改变海洋中温度的垂直结构,通常会使得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^[6,15]。这两个过程都可能使得环流模式在加入搅拌混合项后模拟的温度较原来偏大。在sbPOM模式对北太平洋海表温度进行模拟的过程中,海浪搅拌混合作用的引入使得海表面混合更加均匀,模拟出来的海表温度更加准确。

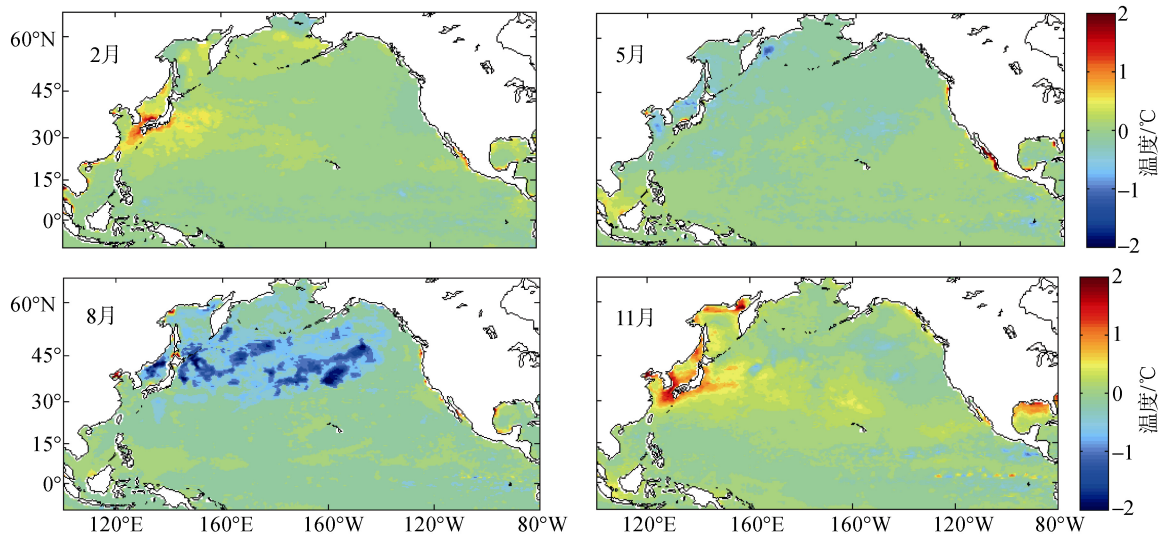


图5 未考虑搅拌混合和考虑搅拌混合模拟月平均SST之差在北太平洋的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of monthly mean SST deviations from simulation with and without wave-induced mixing in the northern Pacific

为了能够较为直观地看出搅拌混合作用对北太平洋表层温度的影响,在美国全球海洋数据同化实验室(USA Global Ocean Data Assimilation Experiment, USGODAE)选取2014年2月27日如图6所示9个浮标站点作为验证点,对Argo浮标资料探测海表温、未加海浪搅拌混合作用的模拟海表温与加入了搅拌混合作用的模拟海表温进行比较分析,主要比较表中给出的绝对误差和相对误差,其定义分别为:

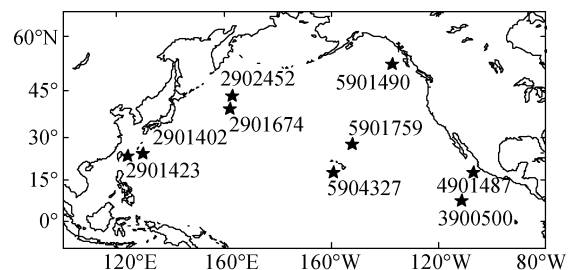


图6 Argo浮标北太平洋分布图

Fig. 6 Position of selected Argo buoys in the northern Pacific

$$E_R = |H_o - H_f| \quad (5)$$

$$E_A = |H_o - H_f| / H_o \quad (6)$$

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

通过对表 2 进行分析得出, 在未引进海浪搅拌混合作用项的情况下, sbPOM 模式可以较为精确的模拟出海表温差, 其温度偏差基本在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 左右, 最大温

度偏差也仅为 2.21°C , 平均绝对误差为 0.806°C 。在引入搅拌混合作用项以后, 模拟海温值和观测值偏差进一步缩小, 平均绝对误差达到 0.644°C , 平均绝对误差提高 20.1%。同时, 平均相对误差也由原来的 4.07% 提高到 3.03%。可以得出, sbPOM 模式能够较好的模拟北太平洋海表面的温度, 在考虑海浪搅拌混合作用项以后, 其模拟效果能够进一步提升。

表 2 北太平洋模拟 SST 和浮标实测 SST 的比较

Tab. 2 Comparison of simulated and buoy SST data from the northern Pacific

浮标号	实测温度 ($^\circ\text{C}$)	模拟海温($^\circ\text{C}$)		绝对误差($^\circ\text{C}$)		相对误差(%)	
		未考虑	考虑	未考虑	考虑	未考虑	考虑
3900500	27.477	27.847	27.817	0.370	0.340	1.35	1.24
2901402	21.332	23.540	23.260	2.208	1.928	10.35	9.04
2901423	22.820	24.290	24.040	1.470	1.220	6.44	5.35
4901487	28.893	27.740	27.960	1.153	0.933	3.99	3.23
5901759	22.712	21.740	21.940	0.972	0.772	4.28	3.40
5904327	25.108	25.570	25.500	0.462	0.392	1.84	1.56
5901490	6.553	6.604	6.538	0.051	0.015	0.78	0.23
2902452	5.875	6.173	6.049	0.298	0.174	5.07	2.96
2901674	10.441	10.708	10.466	0.267	0.025	2.56	0.24
平均值	19.023	19.357	19.286	0.806	0.644	4.07	3.03

注: 未考虑表示未考虑海浪搅拌混合作用; 考虑表示考虑海浪搅拌混合作用

3 结论

本文首先利用 NCEP 再分析风场驱动 WAVEWATCH III 海浪模式对北太平洋海域的海浪过程进行模拟, 接着针对模拟出的有效波高, 利用 NDBC 浮标资料对模拟结果进行验证。通过结合海浪模式模拟出的有效波高等海浪基本要素和胡好国提出的特征波参数化理论, 计算出海浪引起的垂直涡动动量系数 K_{wm} 和热混合系数 K_{wh} , 将海浪搅拌混合作用引入环流模式中, 探究其对北太平洋海表温度模拟的影响。结果表明: (1) 从全年时间变化的角度来看 sbPOM 模式的模拟结果, 主要表现为, 5 月和 8 月两个月份主要呈现出美洲西岸、北太平洋北部模拟温度较 ECMWF 海表温度值低的趋势; 而 2 月、11 月两个月份主要呈现出亚洲东岸模拟温度较 ECMWF 海表温度值高的趋势; (2) 从全年整体上来看, 波浪搅拌混合作用的引入, 对中高纬度地区影响比较明显, 而对低纬度地区影响较弱, 局部地区如大洋沿岸地区作用较为明显, 而对北太平洋中部地区和赤道地区作用较弱; (3) sbPOM 模式能够较好的模拟出北太平洋海表面的温度, 考虑海浪搅拌混合作用以后, 其模拟精度能够进一步提升, 海浪搅拌混合作用对北太

平洋海表面温度的模拟产生了不可忽略的影响。

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, 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] Yuan Yeli, Qiao Fangli, Hua Feng, et al. The development of a coastal circulation numerical model: Wave-induced mixing and wave-current interaction[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser A, 1999, 14: 1-8.
- [3] Qiao Fangli, Yuan Yeli, Yang Yongzeng, et al. Wave-induce mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model[J]. Geophysical Research Letters, VOL.31, L11303, doi: 10.1029/2004GL019824, 2004.
- [4] 夏长水. 基于 POM 的浪流耦合模式的建立及其在大洋和近海的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
Xia Changshui. The establishment of the wave-circulation coupled model based on POM and its applications in the global ocean and the coastal sea[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2005.

- [5] Yuan Yeli, Qiao Fangli, Xia Changshui, et al. Wave-induced mixing in the Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2004, 22(3): 322-326
- [6] 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.
- [7] 胡好国, 袁业立, 万振文, 等. 海浪混合参数化的渤海、黄海、东海水动力环境数值模拟[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 19-32.
Hu Haoguo, Yuan Yeli, Wan Zhenwen, et al. Study on hydrodynamic environment of the Bohai Sea, the Huanghai Sea and East China Sea with wave-current coupled numerical model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 19-32.
- [8] 邓波, 史剑, 蒋国荣, 等. 驱动大洋海浪模式的两种海绵风场对比分析研究[J]. 海洋预报, 2014, 31(3): 29-36.
Deng Bo, Shi Jian, Jiang Guorong, et al. Comparison between two kinds of sea surface wind field applied in ocean wave simulation[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(3): 29-36.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jordi A, Wang Dongpin. SbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model[J]. Environmental Modeling & Software, 2012, 38: 59-61.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 乔方利, 马建, 夏长水, 等. 波浪和潮流混合对黄海、东海夏季温度垂直结构的影响研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(12): 1434-1441.
Qiao Fangli, Ma Jian, Xia Changshui, et al. Study on the vertical structure of temperature in the summer with wave and tidal currents in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(12): 1434-1441.
- [15] 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.

Influence of wave-induced mixing on a sea surface temperature simulation of the North Pacific

LIU Zi-long, SHI Jian, JIANG Guo-rong, CHEN Yi-de, ZHANG Cheng-cheng

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

Received: Jan. 27, 2016

Key words: wave-induced mixing; sea surface temperature; WAVEWATCH III; sbPOM

Abstract: In this paper, the National Centers for Environmental Prediction reanalysis wind data was used to drive WAVEWATCH III (WW3) to simulate the process of ocean waves in the North Pacific. The simulation results, which were compared with buoy data, show that the significant wave heights from simulation and observation are remarkably consistent. Based on the simulated wave parameters, the significant wave height obtained using WW3, and the theory of the parameterization of feature waves, wave-induced mixing was introduced into the ocean circulation model and its influence on the sea surface temperature in the North Pacific was analyzed. The primary simulation results showed that by considering the wave-induced mixing in the sbPOM model, the accuracy of simulated sea surface temperature has been further improved. This plays an important role in providing accurate lower boundary conditions for atmospheric models.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)