



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140113

风场时空分辨率对海水温度场模拟的影响 ——以渤海和北黄海为例

徐霏霏, 丁磊

(天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 采用 FVCOM (finite-volume coastal ocean model) 模型对不同分辨率风场驱动下的渤海和北黄海区域海水温度进行数值模拟, 分析了风场时空分辨率的变化对于温度场的影响。这些敏感性实验的结果表明: 风场时间和空间分辨率的变化对海水温度的影响均呈现季节性变化特点, 温跃层出现后的温度变化值大于出现前的温度变化值; 随着风场分辨率的降低, 温度变化幅度增大, 而月均风场由于完全不能描述风速变化过程, 从而对温度的影响最显著。

关键词: FVCOM; 风场; 时空分辨率; 海水温度场

中图分类号: P76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2015)02-0043-08

Effects of Temporal-spatial Resolution of Wind Field on Sea Temperature Simulation ——A Case Study in Bohai Sea and the North Yellow Sea

XU Peipei, DING Lei

(College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Sea temperature variation of Bohai Sea and North Yellow Sea was simulated numerically with FVCOM (finite-volume coastal ocean model). The model was driven by wind with different resolution. Effects of temporal-spatial resolution of wind field on sea temperature simulation were analyzed. The results indicated that the effect of temporal-spatial resolution of wind field on sea temperature variation showed seasonal characteristics. The variation of temperature is bigger after thermocline appears. The variation of temperature increases as the resolution of wind field decreases. Effect of monthly-averaged wind on temperature variation is the most significant due to the poor description of the temporal variation of wind speed.

Key words: finite-volume coastal ocean model; wind field; temporal-spatial resolution; sea temperature

风场是海洋重要的驱动之一, 直接影响海气动量、热量等交换, 对于水团、环流以及海浪等水文要素有着重要影响。罗义勇等^[1]利用数值模式分析夏季风对于东海沿岸上升流的影响, 得出风对于中层的上升流贡献较大; 潘玉萍等^[2]也使用数值模式得出风和台湾暖流是影响上升流的重要因子; 经志友等^[3]得出上升流的季节变化机制与风场有着重要关系; 毛园等^[4]分析 POM (princeton ocean model) 模式结果, 得出海表风应力是影响跃层的动力因子, 对季节性温跃层的深度和强度有着重要影响; 郑鹏^[5]利用 FVCOM

模型研究了渤海冬夏季环流结构与风场变化的关系, 此外, 还有关于台风对海洋水温要素影响的研究^[6]。可见, 随着海洋科学的发展, 当海洋模型越来越多地应用于海洋水动力等物理环境状态以及海洋现象分析时, 风场强迫数据对于海洋模型的模拟精度有着重要影响。

不同来源风场的时间和空间分辨率各有差异, 因而反映大风过程和风场细结构的能力不同。对于不同风场数据的应用, Gao 等^[7]分析了月均风场和日均风场对南海流场和温度模拟的差异; Milliff 等^[8]从流

收稿日期: 2014-08-24; 修回日期: 2014-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973计划”资助项目(2011CB403606); 国家自然科学基金资助项目(41128006)

作者简介: 徐霏霏(1990—), 男, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 丁磊, 副研究员, leiding2012@tust.edu.cn.

场、净热通量、海表面温度方面分析两种风场对于 OGCM (ocean general circulation model) 模拟结果的影响。然而,前人对于风场分辨率变化影响水动力环境的研究主要基于两种不同来源或不同分辨率风场,没有能够系统地比较不同空间分辨率和时间分辨率的影响;同时,已有的研究成果也没有给出风场分辨率变化的影响效果是否存在季节上的差异。

本文针对渤海东海高分辨率海面风场,设计不同分辨率风场,并利用 FVCOM 模型对渤海和北黄海进行敏感性实验,分析风场时空分辨率对海水温度场模拟的影响。

1 模型配置与敏感性实验

1.1 模型配置

利用 FVCOM 模型对渤海及北黄海 1993 年的温度场进行模拟,计算区域为 37°07'N ~ 41°N 和 117°35'E ~ 125°10'E,水平方向采用三角形网格离散,开边界附近网格分辨率约为 0.1°,其余位置分辨率约为 0.05°。共有 7 307 个结点和 14 068 个单元;垂向采用 σ 坐标系,均匀分为 11 层,计算时间步长外模为 10 s,内外模时间步长比为 5 : 1。表面强迫采用 ERA-Interim (European centre for medium-range weather forecasts-reanalysis data archive-interim, http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim_full_daily/) 数据,包括长波辐射通量、短波辐射通量和降水量、表面气压、2 m 气温和 2 m 露点温度。风场数据为基于 WRF (weather research forecast) 模型的渤海东海高分辨率海面风场^[9],时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.1°。开边界采用 OTPS (OSU tidal prediction software, <http://volkov.oce.orst.edu/tides/YS.html>) 潮预报模式预报的实时水位进行驱动。开边界上的温度、盐度数据采用 NEMO2.3 (nucleus of European modeling of the ocean) 数据^[10]。温度和盐度初始条件采用 WOA09 (world ocean atlas 2009, <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/woa09data.html>) 数据。水位和流速的初始值均设置为 0。模型还考虑了流入渤海的 4 条主要河流的影响,分别为黄河、海河、滦河和辽河^[11]。

1.2 敏感性实验设计

敏感性实验分为 2 部分:分别为风场空间分辨率及时间分辨率的变化对海水温度场模拟的影响。表 1 给出了参考实验和敏感性实验使用风场的时间和空

间分辨率,其中 6 个敏感性实验风场的分辨率改变都是基于参考实验使用的原始风场,即在渤海东海高分辨率海面风场基础上进行的。实验 1—实验 3 的风场分别是在原始风场一定范围内进行风矢量平均,改变风场空间分辨率,而实验 4—实验 6 则是对原始风场每个格点在时间上进行单位风矢量平均^[12],生成对应时间分辨率的风场数据。

表 1 参考实验与敏感性实验风场分辨率

Tab. 1 Resolution of wind field in reference and sensitivity experiments

实验	空间分辨率/(°)	时间分辨率/h
参考实验	0.10 × 0.10	3
实验 1	0.25 × 0.25	3
实验 2	0.50 × 0.50	3
实验 3	1.00 × 1.00	3
实验 4	0.10 × 0.10	6
实验 5	0.10 × 0.10	24
实验 6	0.10 × 0.10	720

需要说明的是,本文在进行每个敏感性实验时,同时向 FVCOM 模型输入 2 种风场数据,使用与参考实验中相同的原始风场参与表面热通量的计算,而分辨率改变的风场仅参与模型水动力过程计算,考察风场改变的驱动力驱动效果,不考虑热力学通量的变化。

2 风场分辨率的变化对风场特征的影响

2.1 空间分辨率的变化对风场特征的影响

表 2 给出了实验 1—实验 3 和参考实验的 1993 年风场月均风速值。表 3 给出了表 2 中相应实验 1—实验 3 与参考实验风场数据比较的各月均方根误差。

表 2 实验 1—实验 3 和参考实验的 1993 年风场月均风速

Tab. 2 Monthly-averaged wind speed in experiments 1-3 and the reference experiment in 1993

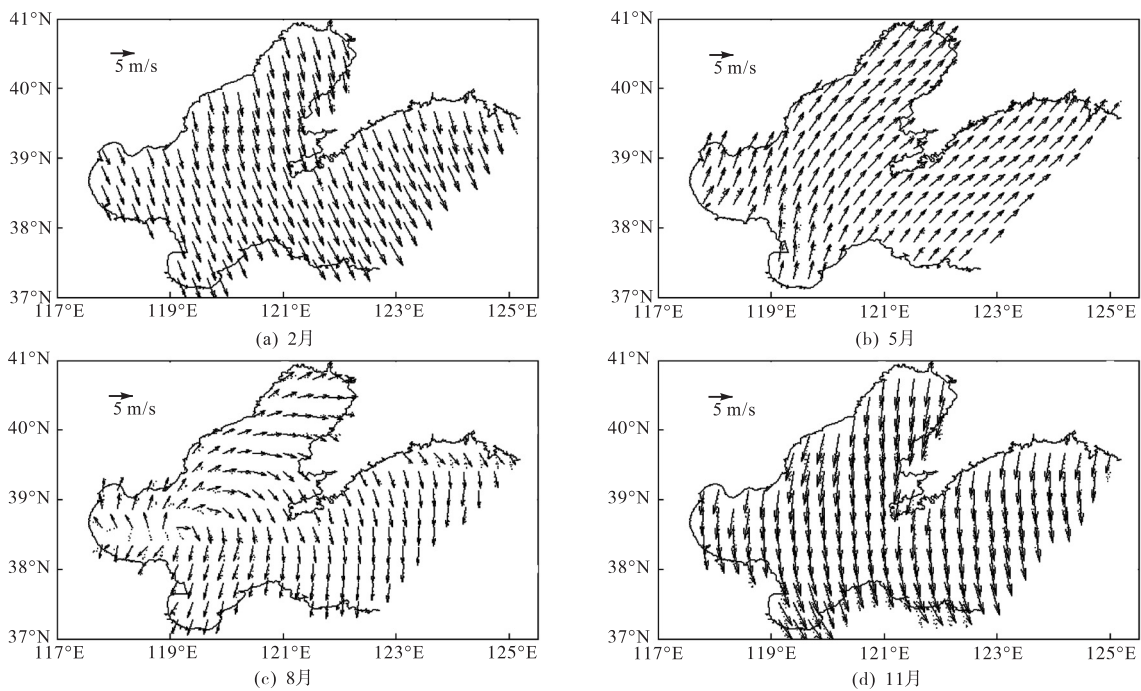
月份	风速/(m·s ⁻¹)			
	参考实验	实验 1	实验 2	实验 3
1 月	6.67	6.60	6.36	6.04
2 月	6.80	6.74	6.54	6.23
3 月	5.98	5.94	5.77	5.49
4 月	7.02	6.96	6.75	6.42
5 月	6.05	5.98	5.76	5.39
6 月	5.07	4.99	4.74	4.34
7 月	4.41	4.35	4.15	3.82
8 月	4.66	4.60	4.41	4.10
9 月	5.96	5.88	5.64	5.30
10 月	6.67	6.59	6.35	5.96
11 月	8.98	8.86	8.48	7.91
12 月	9.95	9.82	9.37	8.77

表3 实验1—实验3与参考实验风场比较的均方根误差
Tab.3 Root mean square error between experiments 1-3 and the reference experiment

月份	均方根误差/(m·s ⁻¹)		
	实验1	实验2	实验3
1月	0.27	0.61	1.10
2月	0.26	0.59	1.08
3月	0.21	0.52	1.01
4月	0.28	0.68	1.25
5月	0.26	0.67	1.28
6月	0.26	0.70	1.35
7月	0.21	0.54	1.07
8月	0.22	0.53	0.98
9月	0.28	0.65	1.18
10月	0.29	0.65	1.18
11月	0.39	0.94	1.70
12月	0.45	1.09	1.92

由表2和表3可知:实验1—实验3各月的平均风速变化趋势与参考实验风场变化趋势一致,而实验1—实验3风场与参考实验风场的均方根误差除11月12月外的其他月份间差别较小;随着风场空间分辨率的降低,各月的平均风速逐渐减小,且均方根误差逐渐增大;在各实验中,实验3风场变化最大。

图1给出了实验3和参考实验2月、5月、8月和11月4个代表月份的月均风场矢量图。从图1可以看出:2月,两者的风场差异较小;5月,黄河口附近和渤海湾两风场风向存在差异,但是基本属于偏南风;8月,渤海湾、渤海中部和北黄海北部沿岸区域的风向存在较大差异;11月,渤海中部、莱州湾、辽东湾以及北黄海南岸存在风向差异。



实线代表参考实验风场,虚线代表实验3风场

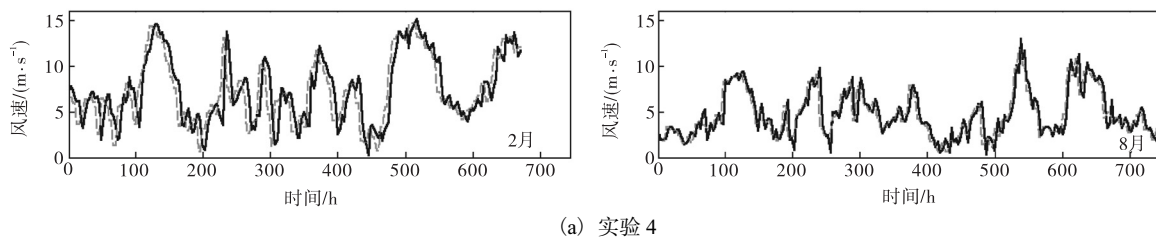
图1 实验3与参考实验月均风场矢量图

Fig.1 Monthly-averaged wind vector of experiment 3 and the reference experiment

2.2 时间分辨率的变化对风场特征的影响

任意选取了实验4—实验6与参考实验风场于121°E, 38.5°N处的2月和8月风速值序列进行比较,结果见图2。可以看出:实验4与参考实验的风速

波动基本一致,略超前参考实验风场的变化;实验5对风速的影响增大且极值风速要低于参考实验的极值风速;实验6对风速的影响更大,完全不能够描述风速变化过程,也不能描述极值风速。



(a) 实验4

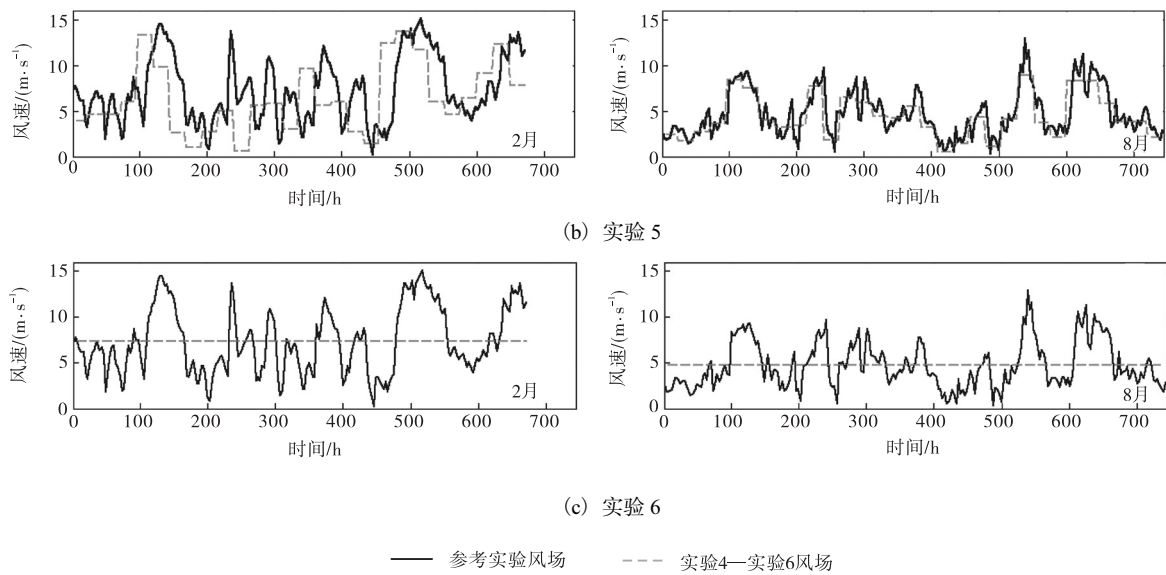


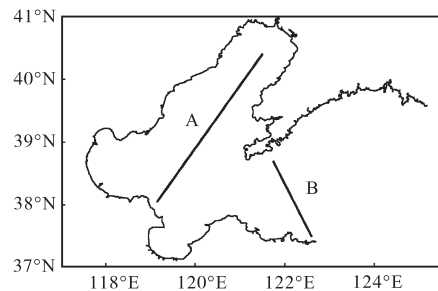
图 2 121°E, 38.5°N处实验 4—实验 6与参考实验在 2月和 8月的风速比较

Fig. 2 Comparison of wind speed in experiments 4-6 and the reference experiment in February and August at 121°E, 38.5°N
值较接近. 综上, 模型结果能够再现温度结构的季节变化特征, 例如层化等, 能够用于本文研究.

3 模型验证

选择 1993 年 5 月和 11 月的航测数据对参考实验结果进行验证. 根据航测站点位置选取 2 个断面, 如图 3 所示.

两断面的 5 月和 11 月温度垂向分布见图 4 和图 5. 可以看出: 5 月, A 断面底层温度模拟值与实测数据存在较大偏差, 渤海北部洼地底层实测温度约为 8 °C, 而模拟值约为 12 °C; B 断面模拟结果与实测数据存在较一致的层化结构且温度分布相近. 11 月, A 断面和 B 断面均垂向混合均匀, 温度模拟值与实测



A 断面为渤海中部断面; B 断面为大连—成山头断面

图 3 断面位置图

Fig. 3 Locations of selected transects

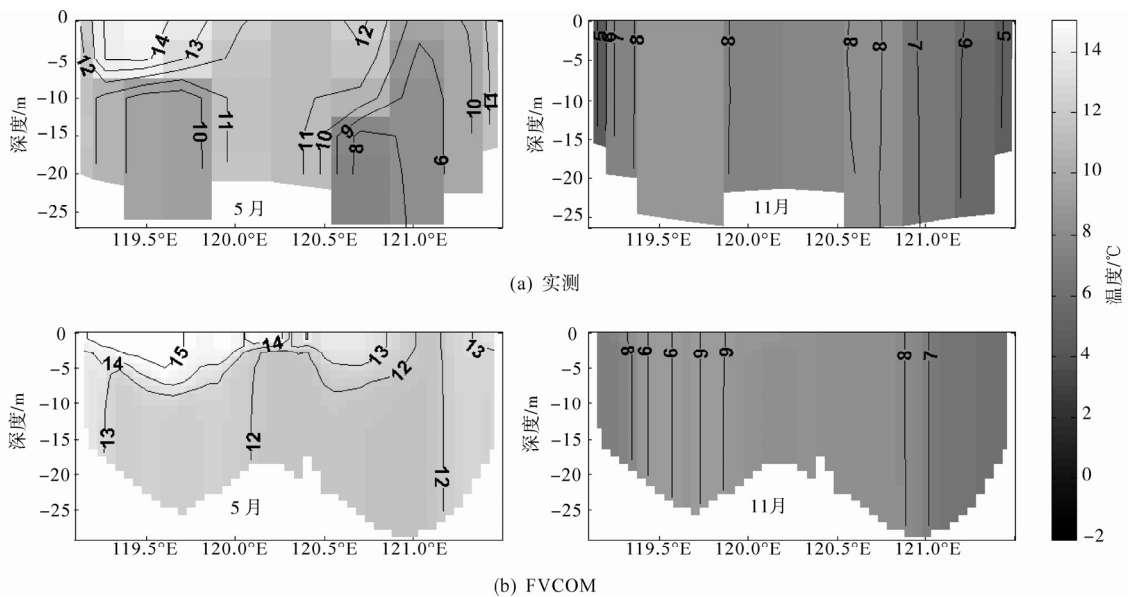


图 4 A 断面 5 月和 11 月温度的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of temperature at transect A in May and November

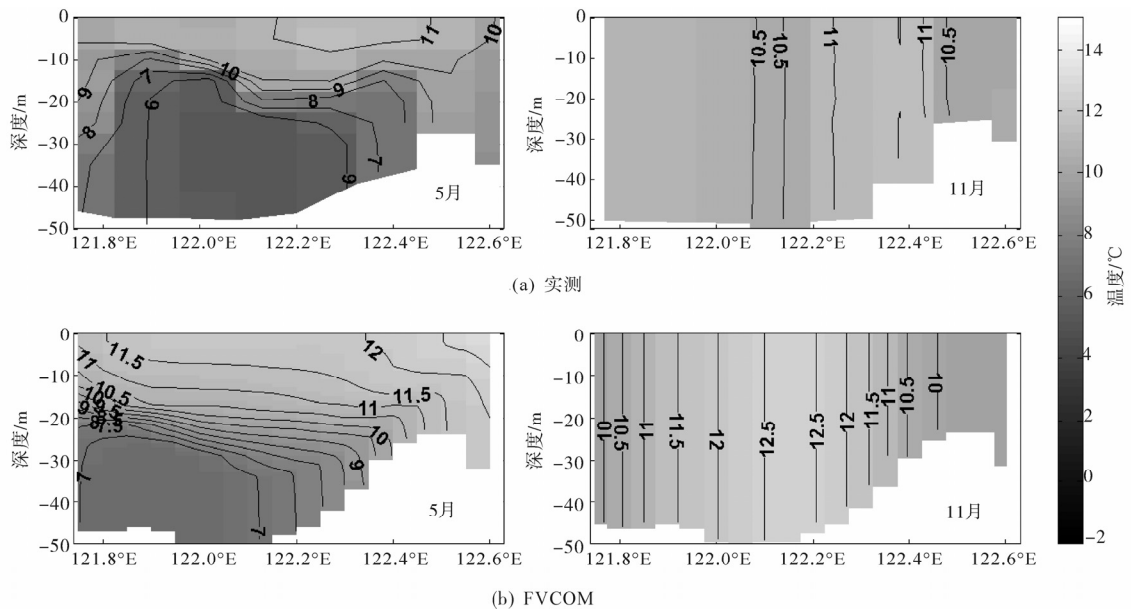


图5 B断面5月和11月温度的垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature at transect B in May and November

4 风场分辨率的变化对温度场的影响

4.1 空间分辨率的变化对温度场的影响

图6显示了2月、5月、8月和11月实验1—实验3风场变化对A断面温度垂向结构的影响。

在同一敏感性实验条件下, 风场空间分辨率的改变对温度的影响呈现季节性变化特点: 2月和11月, 强垂向混合使得断面同一位置处由表层至底层的温度变化大体相同; 随着温跃层的出现, 5月, 表层至底层温度变化出现差异; 至8月这种差异更加明显. 同

时, 温跃层出现后的温度变化值要大于出现前的温度变化值, 特别是8月在4个代表月份中的温度变化幅度最大. 例如: 实验3中2月和11月的温度变化最大值分别约为0.6°C和0.4°C, 5月增大至约0.8°C, 8月更是达到了约2°C.

在同一代表月份, 从实验1到实验3, 随着空间分辨率的降低, 温度变化幅度逐渐增大. 同时, 温跃层出现后空间分辨率降低对温度的影响要高于出现前的影响. 例如, 2月实验1—实验3温度变化最大值分别约为0.1、0.4、0.6°C, 而8月相应数值则增大至约0.2、0.6、2°C.

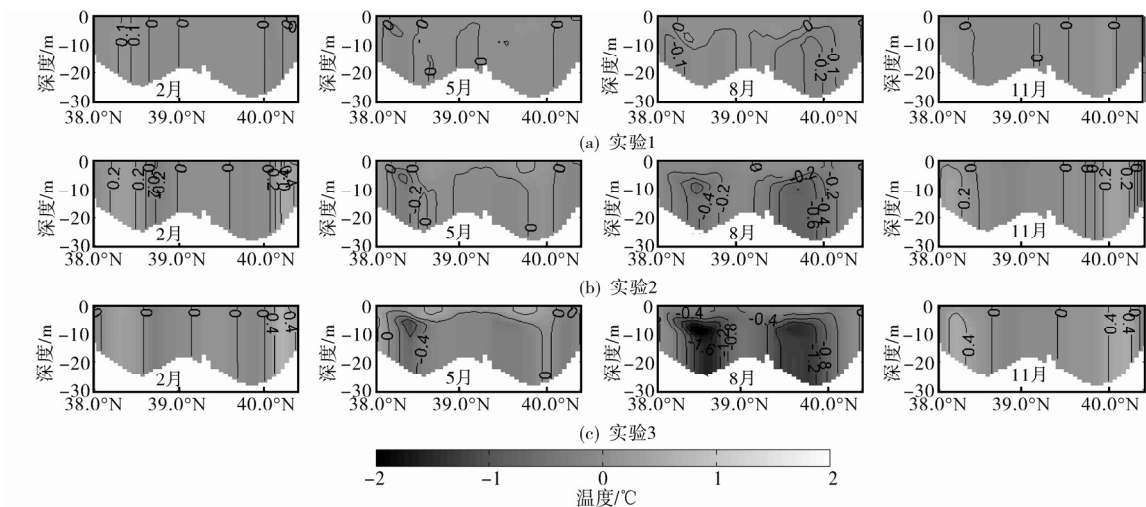


图6 A断面实验1—实验3与参考实验的温度差值

Fig. 6 Differences of sea temperature in experiments 1-3 and the reference experiment at transect A

图7显示了2月、5月、8月和11月实验1—实验3风场变化对B断面温度垂向结构的影响。

B断面在同一敏感性实验中温度的变化也呈现季节性变化特点,而温跃层出现后的温度变化值也大于出现前的温度变化值.此时,实验3中2月和11月的温度变化最大值分别约为1.2℃和0.6℃,5月

增大至约2℃,8月进一步增大至约2.8℃.

在同一代表月份,实验1—实验3的温度变化幅度以及温跃层出现前后空间分辨率降低对温度的影响与A断面也相似.例如,2月实验1—实验3温度变化最大值分别约为0.4、0.6、1.2℃,而8月相应数值则增大至约0.6、1.6、2.8℃.

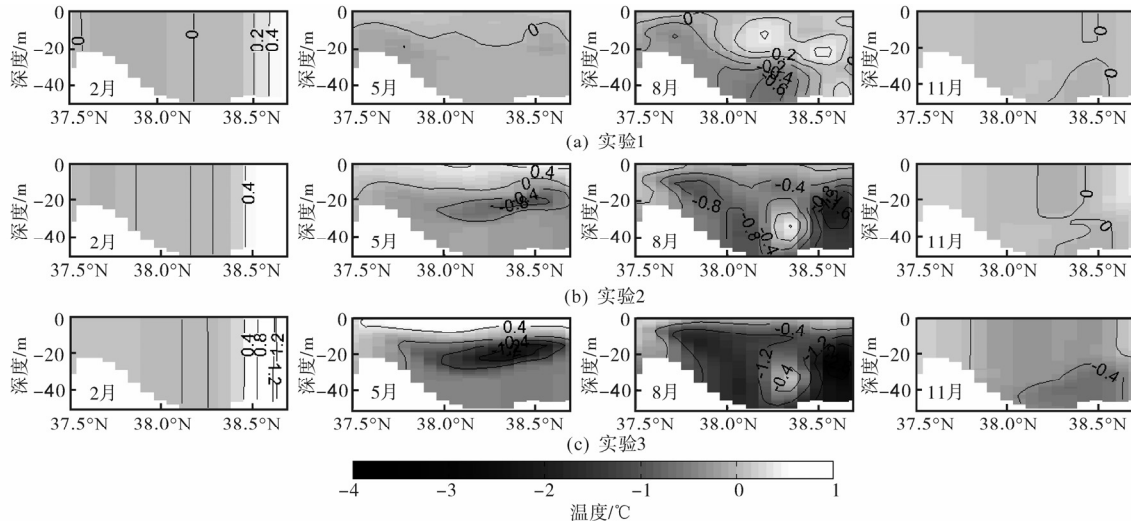


图7 B断面实验1—实验3与参考实验的温度差值

Fig. 7 Differences of sea temperature in experiments 1-3 and the reference experiment at transect B

4.2 时间分辨率的变化对温度场的影响

图8和图9分别显示了2月、5月、8月和11月实验4—实验6风场变化对A断面和B断面温度垂向结构的影响.可以看出:风场时间分辨率改变对温度的影响总体上与空间分辨率改变的影响一致,即在同一敏感性实验中温度的变化同样呈现季节性变化特点,温跃层出现后的温度变化值大于出现前的温度

变化值;在同一月份,时间分辨率的降低使得温度变化幅度增大并且温跃层出现后的影响要高于出现前的影响.需要指出的是,在实验6中,采用月均风场使得温度变化的最大值在8月达到4℃左右,而且在B断面上不同位置还出现与温度变化趋势截然相反的结果,北部主要表现为温度减小,最大值约为4℃,而南部主要表现为温度增大,最大值约为3℃.

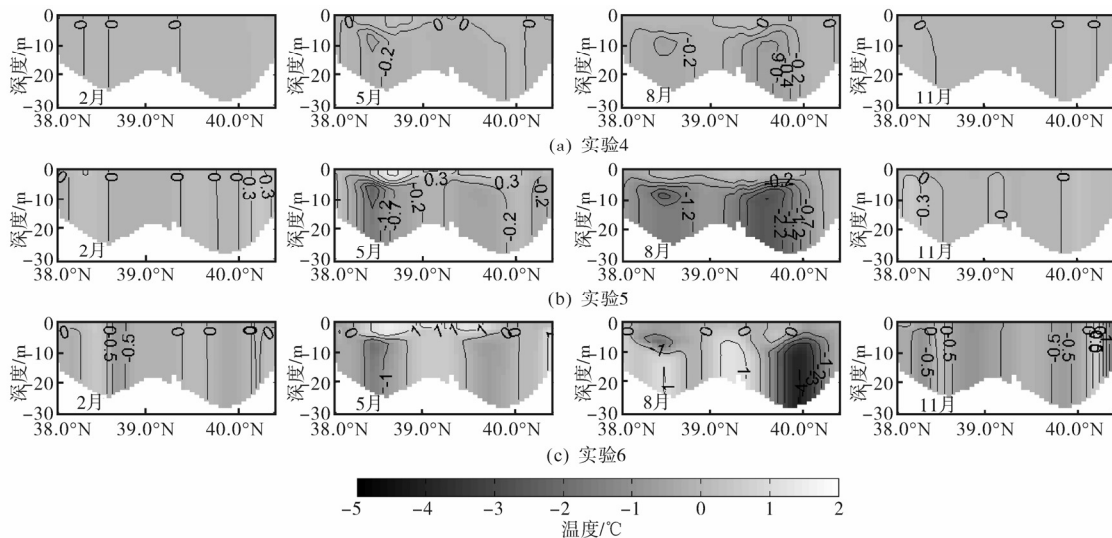


图8 A断面实验4—实验6与参考实验的温度差值

Fig. 8 Differences of sea temperature in experiments 4-6 and the reference experiment at transect A

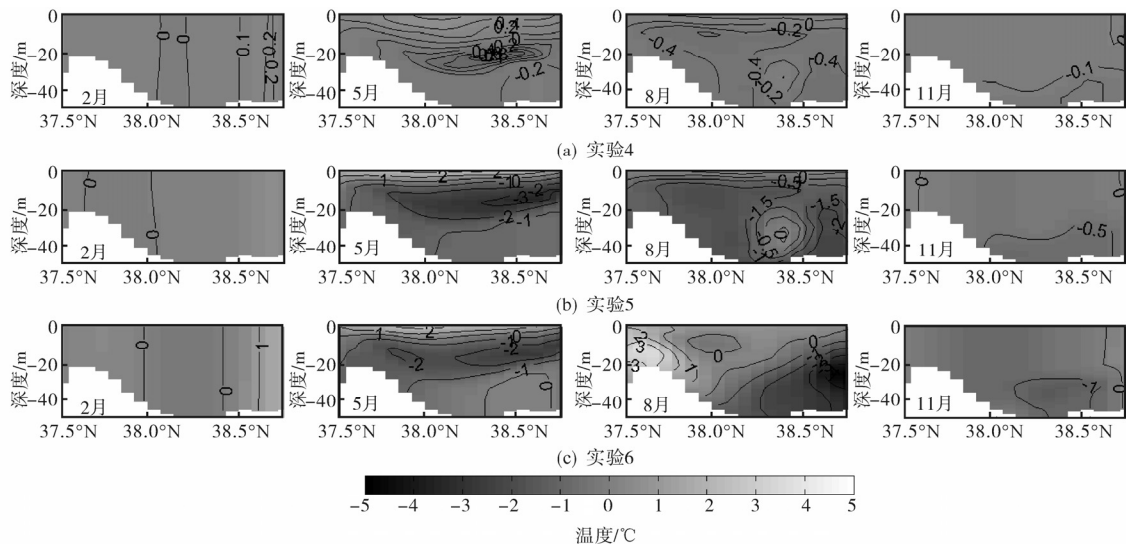


图9 B断面实验4—实验6与参考实验的温度差值

Fig. 9 Differences of sea temperature in experiments 4-6 and the reference experiment at transect B

如前文所述,月均风场相对于原始风场改变最大,已不能反映当月风速变化过程,从而对于温度场模拟的影响也最大,特别是温跃层存在的季节和区域.为了进一步反映月均风场对温度场模拟的影响,图10和图11分别给出了参考实验和实验6在5月和8月的表、底层温度水平分布比较.可以看出:5月实验6的表层温度在渤海中部升高约1°C,北黄海临近计算区域右下角开边界水域的温度升高约2°C,辽东半岛东南端近岸水域的温度降低约2°C;底层北

黄海冷水团6°C等温线范围增大,渤海中部最大降温约为2°C,且降温区域已延伸至渤海湾.8月,北黄海北部水域增温1°C左右,南部最大增温约为2°C,渤海中部温度变化不大,辽东湾顶温度增加1°C左右;底层北黄海冷水团8°C等温线范围扩大,并且在渤海北部洼地形成20°C相对低温中心.由以上结果可知,采用月均风场对温度的水平和垂向分布均会产生显著影响.

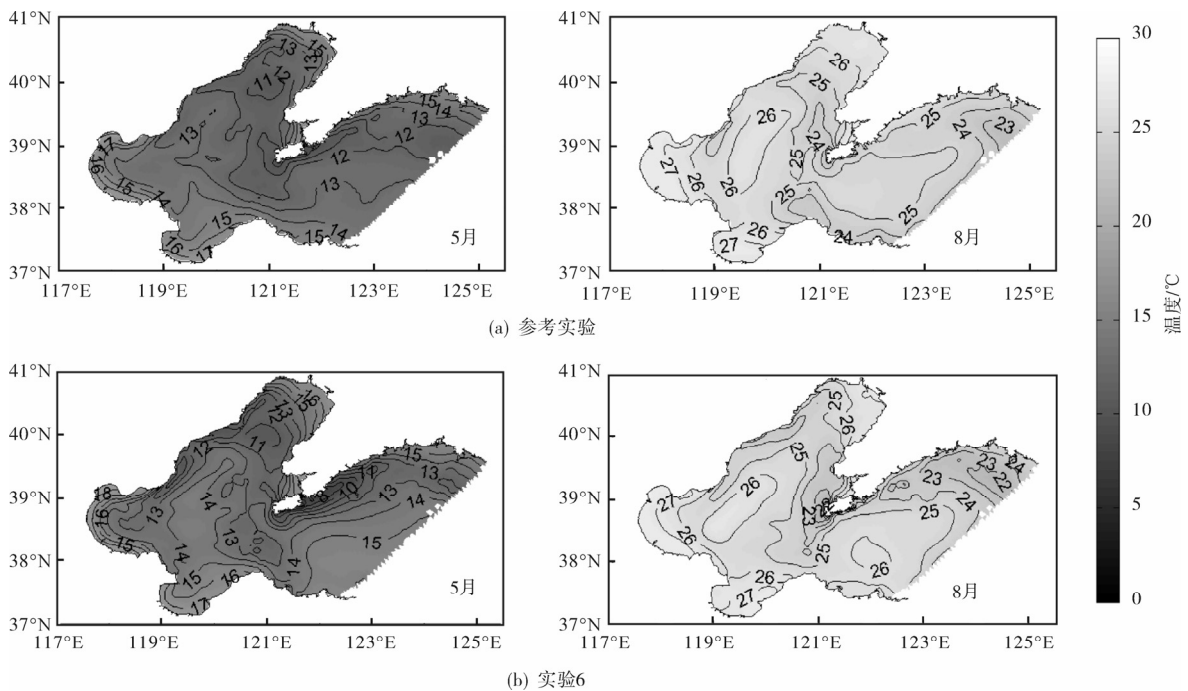


图10 参考实验和实验6的表层温度分布

Fig. 10 Sea surface temperature distribution of the reference experiment and experiment 6

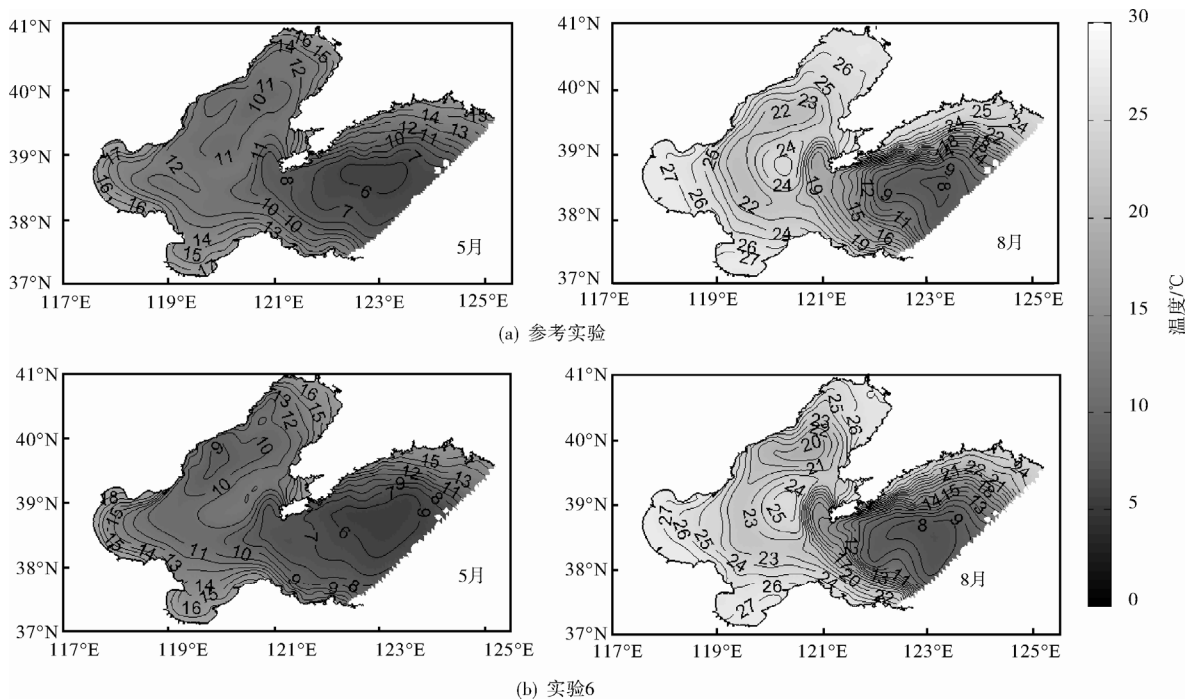


图 11 参考实验和实验 6 的底层温度分布

Fig. 11 Sea bottom temperature distribution of the reference experiment and experiment 6

5 结 语

本文通过改变参与动力过程计算的风场空间和时间分辨率,采用敏感性实验分析其对温度场模拟的影响.模拟结果表明:风场空间分辨率的降低会导致平均风速的降低和风向的改变,风场时间分辨率的改变体现在风速过程的变化,其中月均风场已完全不能描述风速变化过程,也不能描述极值风速;对于风场分辨率变化对温度的影响,在同一敏感性实验中温度变化呈现季节性变化特点,温跃层出现后的温度变化值大于出现前的温度变化值;在同一代表月份中,风场分辨率的降低使得温度变化幅度增大,温跃层出现后的影响要高于出现前的影响,而且变化范围主要位于温跃层以下.在采用数值模拟方法研究温度的具体变化过程时,应尽量采用高分辨率风场驱动海洋模型,避免使用月均风场数据.风场分辨率的变化对温度模拟产生影响的原因还有待研究.

参考文献:

[1] 罗义勇,俞光耀.风和台湾暖流引起东海沿岸上升流数值计算[J].青岛海洋大学学报:自然科学版,1998,28(4):536-542.
 [2] 潘玉萍,沙文钰.冬季闽浙沿岸上升流的数值研究[J].海洋与湖沼,2004,35(3):193-201.
 [3] 经志友,齐义泉,华祖林.闽浙沿岸上升流及其季节变

化的数值研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):464-470.
 [4] 毛园,沙文钰.海面风场对环台湾岛海域温跃层的影响[J].海洋预报,2002,19(3):33-43.
 [5] 郑鹏.渤海三维温盐流的数值模拟研究[D].青岛:中国海洋大学,2013.
 [6] 徐文玲.台风对海表温度的影响[D].青岛:中国海洋大学,2007.
 [7] Gao J S, Shi M C, Chen B, et al. Responses of the circulation and water mass in the Beibu Gulf to the seasonal forcing regimes[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(7):1-11.
 [8] Milliff R F, Large W G, Morzel J, et al. Ocean general circulation model sensitivity to forcing from scatterometer winds[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C5):11337-11358.
 [9] 吴德星,高山红,王永明,等.黄渤海月平均风和气温场图集(1960-2007)[M].青岛:中国海洋大学出版社,2011:150.
 [10] Wei H, Yuan C Y, Lu Y Y, et al. Forcing mechanisms of heat content variations in the Yellow Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(9):4504-4513.
 [11] 戴仕宝,杨世伦,郜昂,等.近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J].泥沙研究,2007(2):49-58.
 [12] 邱传涛,李丁华.平均风向的计算方法及其比较[J].高原气象,1997,16(1):94-98.

责任编辑:常涛