

遥感资料同化对海表温度预报的影响<sup>①</sup>

孙瑞立, 李 磊

(中国海洋大学 物理海洋实验室 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 本文将 AMSR-E 卫星微波遥感海表温资料运用到渤黄东海海表面温度短期数值预报模式当中。数值预报模式利用伴随方法实现了预报模式的初值场优化。微波遥感海表温资料与海表面温度短期数值预报模式有机结合后的试验结果表明: 将预报结果和船舶报资料进行比对时, 将遥感资料引入到数据同化的结果要明显优于仅同化船舶报资料的结果, 且均方差大部分都小于  $0.8^{\circ}\text{C}$ ; 将预报结果和旬平均场资料进行比对时, 将遥感资料引入到数据同化的结果和仅同化船舶报资料的结果在整体上一致, 个别月份优于仅同化船舶报资料的结果, 且均方差大部分都小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 最小的部分甚至可以达到  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。在本文研究中发现将 AMSR-E 卫星微波遥感资料引入到数据同化中, 在将预报结果和船舶报资料进行比对时, 可以提高海表面温度的预报精度。

**关键词:** 数据同化; 伴随方法; 遥感海表温资料; 海表面温度数值预报; 渤黄东海

中图分类号: P731.31

文献标识码: A

文章编号: 1003-6482(2011)04-0025-07

## 引言

船舶报资料覆盖率低, 实时性差, 且不易获取。遥感资料覆盖率很高, 有的可以覆盖全球, 且较易获得。遥感资料在不断丰富的同时, 其精度在不断提高, 特别是微波遥感资料, 由于微波可以穿透云层, 减少或避免了云层等天气因素的污染, 所以微波遥感和红外遥感等遥感资料相比, 覆盖率更高, 在大部分区域遥感精度更高。将微波遥感资料引入到渤黄东海海表面温度 (sea surface temperature, SST) 短期数值预报模式中, 对于提高海表面温度的预报精度具有重要的意义。

最初的 SST 数值预报模式仅限于大洋月距平预报模式<sup>[1,2]</sup>, 王赐震等试图研制中国近海及西北太平洋有限区域的 SST 短期 (3~5d) 预报模式, 通过数值试验结果表明此模式不仅有可信赖的热力学性能, 而且有能力描述漂流的发展和消衰, 但作为一项起始性研究, 尚有许多缺点<sup>[3,4]</sup>。王赐震等后从中

国近海海温的定义和形成机制出发, 在原有的海表面温度数值预报模式的基础上, 建立了一个以混合层的温、流、深度为变量的中国近海异常海温数值预报模式<sup>[5,6]</sup>。马继瑞等将变分伴随数据同化技术应用于海表面温度数值预报, 将船舶报海表面温度资料同化到中国近海海表面温度短期数值预报模式中, 对 SST 初始场进行优化, 结果表明变分伴随数据同化对改进 SST 数值预报的效果是比较明显的<sup>[7]</sup>。Chang et al. 采用神经网络预报模式预测 1996 年—2004 年的 SST, 除了少于 3 个月的短期预报外, 该模型预报海温结果良好, 尤其是 5 至 8 个月的预报结果<sup>[8]</sup>。为提高 SST 的预报精度, 还须在实时观测的质量及其客观分析的精度上有所提高, 张建华等以海洋原始方程组为基础, 用 SST 常规船舶资料形成初始场, 以气象预报产品提供海表面的强迫场, 建立了一个有限区域的 SST 短期 (3~5d) 动力数值二维预报模式。利用此模式进行预报, 预报效果良好, 实现了

① 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB411807); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金 (SOED0708); 国家科技支撑计划项目 (2007BAC03A0606) 资助

第一作者简介: 孙瑞立 (1984-), 现为中国海洋大学海洋环境学院硕士研究生, email: sunrui2007@126.com

收稿日期: 2010-11-04

表层海水温度数值预报业务化运行,实效为3d的预报精度均方误差达到 $1.0^{\circ}\text{C}$ 左右<sup>[9]</sup>。

海表温预报经过从“七五”攻关开始的努力,至“十五”期间达到了业务化预报的水平。海表温度业务化预报中,一个好的初始场是十分重要的。“十五”的海表温预报已经引入了数据同化技术构建预报的初始场,但用于同化的数据仅限于船舶报的实测海表温度。有良好实时性而且数据量丰富的卫星遥感 SST 资料,应该是可用于业务化预报模式的数据同化中的。本文将2002年下半年的 AMSR-E 卫星微波遥感 SST 资料应用于海表温度业务化预报模式中,试验了遥感 SST 资料的引入对海表温度预报的精度影响。

## 1 模式预报方程组

本文所采用的 SST 数值模型基于“十五”国家科技攻关项目“中国近海海表面温度短期预报模式”。式中,下标  $d$  对应于漂流的各种量(变量),以便与下标  $c$  对应的余流诸量(模式常量)相区别。 $\zeta$  代表水位; $\vec{V}$  代表流速( $u, v$  分别是  $x$  和  $y$  方向的分量); $f$  是科氏参量; $h$  是混合层深度; $g$  是重力加速度常量; $\rho_0$  是海水密度; $A_M$  是水平动量扩散系数; $\tau_x$  和  $\tau_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向的分量; $c_b$  是混合层底摩擦系数; $T$  是海表温度; $S$  是盐度; $c$  是海水比热。

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta_d}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V}_d h) \quad (1)$$

动力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_d}{\partial t} = & -g \left( \frac{\partial \zeta_d}{\partial x} + \frac{h}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_d}{\partial x} \right) \\ & - (\vec{V}_c \cdot \nabla u_d + \vec{V}_d \cdot \nabla u_c) \\ & + f v_d + A_M \nabla^2 u_d + \frac{1}{\rho_0 h} \\ & (\tau_x - c_b |\vec{V}_d| u_d) \end{aligned} \quad (2)$$

状态方程:

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} = -g \left( \frac{\partial \zeta_d}{\partial y} + \frac{h}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_d}{\partial y} \right)$$

$$\begin{aligned} & - (\vec{V}_c \cdot \nabla v_d + \vec{V}_d \cdot \nabla v_c) \\ & + f u_d + A_M \nabla^2 v_d + \frac{1}{\rho_0 h} \\ & (\tau_y - c_b |\vec{V}_d| v_d) \end{aligned} \quad (3)$$

热力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\vec{V}_d + \vec{V}_c) \cdot \nabla T + A_M \nabla^2 T \\ & + \frac{1}{c\rho h} \sum_{m=1}^4 Q_m - (\widetilde{W}_{e1} + W_{e2} + \widetilde{W}_p) \\ & \frac{\nabla T}{h} \end{aligned} \quad (5)$$

海表面加热项:

$$\sum_{m=1}^4 Q_m = Q_I - Q_B - Q_H - Q_S \quad (6)$$

短波辐射:

$$\begin{aligned} Q_I = & Q_{I,0} (1 - 0.61Y) (1 - r) \\ & (1 - \beta_1 e^{-\gamma h}) \end{aligned} \quad (7)$$

海面有效回辐射:

$$\begin{aligned} Q_B = & \epsilon \sigma T_A^3 [T_A (0.39 - 0.05 \sqrt{e_a}) \\ & (1 - kY^2) + 4(T - T_a)] \end{aligned} \quad (8)$$

蒸发潜热:

$$Q_H = \rho_a C_H L V_a (q_w - q_a) \quad (9)$$

显热交换:

$$Q_S = \rho_a C_H C_p V_a (T - T_a) \quad (10)$$

其中, $Q_{I,0}$ 为晴空入射辐射; $Y$ 为总云量(数值为0-1); $r$ 为海面反照率(与风速分段线性关系,取值范围0.07~0.4); $\beta_1$ 为短波辐射自海面向深层的透射量与入射量之比,显然 $(1 - \beta_1 e^{-\gamma h})$ 则为表层对短波辐射的吸收率; $\gamma$ 为海水对透射短波辐射的衰减率(和水深有关,经验取值0.0004~0.003); $\epsilon$ 为海面灰度; $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $C_p$ 为空气的定压比热(常数); $L$ 为潜热(597.3-0.57T); $C_H$ 为海气间热量及水汽的块体交换系数(与气温和风速有关,取值一般在 $1 \times 10^{-3}$ - $2 \times 10^{-3}$ 之间); $k$ 为云的阻拦系数[ $k=0.59+0.005(\Phi-20)$ , $\Phi$ 是纬度]; $V_a, T_a, e_a, q_a$ 分别为海面以上10m高度处的风速、气温、水汽压和比湿; $T_A = T_a + 273.15$ 为气温绝

对温度;  $q_w$  为海面的饱和比湿, 它仅是海表温度  $T$  的函数。  $q_w = 0.622e_w / (p_a - 0.378e_w)$ ;  $e_w = e_a / r_h$ ; 水汽压  $e_a = 6.1078 r_h e^{17.13T/235+T}$ ,  $r_h$  为相对湿度(取值范围为 0.2 - 1)。

上混合层的夹卷速度

$$\tilde{W}_{e1} = \begin{cases} 0 & W_{e1} \leq 0 \\ W_{e1} = \frac{1}{h\Delta b} \{2m_1^3 + \frac{h}{2} [(1+n)B_0 - (1-n) | B_0 |] + J_0(h - \frac{2}{r})\} & W_{e1} \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_0}}$  是海面风的摩擦速度,  $B_0$  为表面浮力通量,  $J_0$  是透射辐射的浮力通量,  $\Delta b$  是跨越上混合层底面(作不连续面处理)的浮力之差,  $m$  和  $n$  为 2 个与耗散有关的实验参数。

潮夹卷  $W_{e2}$  如下计算。式中  $D$  是水深,  $u_b$  是潮流的最大流速,  $m_b$  为与之相对应的参数<sup>[5,6]</sup>

$$W_{e2}(\eta) = \begin{cases} 0, & \eta \geq b \\ \omega_c \frac{b-\eta}{b-a}, & b \geq \eta \geq a \\ \omega_c, & \eta < a \end{cases} \quad (12)$$

$$\omega_c = \frac{2}{\eta\Delta b} m_b u_b^3, \quad \eta = D - h$$

Ekman 抽吸速度

$$\tilde{W}_p = \begin{cases} W_p = \frac{1}{\rho_0} \text{curl}(\frac{\tau}{f}) & \text{curl}(\frac{\tau}{f}) > 0 \\ W_{anti} = \frac{A}{\rho} \text{curl}(\frac{\tau}{f}) & \text{curl}(\frac{\tau}{f}) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

需要指出的是: 在(1)~(4)式中,  $h$  不随时间变化, 而在(5)式中,  $h$  是随时间变化的,

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \tilde{W}_{e1} - W_{e2} \quad (14)$$

以上(1)~(14), 加之初始条件和边界条件, 即构成近海异常海温数值预报模式闭合方程

组。

2 伴随方程及其推导

只对海温  $T$  作伴随。令

$$L = \int \lambda (\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - A_H \nabla^2 T) dt + \int \frac{\Theta}{2} (T - \hat{T})^2 dt \quad (15)$$

式中,  $u, v$  分别是  $\vec{V}_c + \vec{V}_d$  在  $x, y$  方向的分量,  $\hat{T}$  是实测值,  $\Theta$  是一个系数,  $\lambda$  是拉格朗日乘子。

由  $\frac{\partial L}{\partial T} = 0$  可得,

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial(u\lambda)}{\partial x} + \frac{\partial(v\lambda)}{\partial y} + A_H \nabla^2 \lambda + \Theta(T - \hat{T}) = 0 \quad (16)$$

上式是对方程推导得到的伴随方程。

此外, 根据离散化的热力学方程,

$$\frac{T^{n+1} - T^{n-1}}{2\Delta t} = \{-\nabla \cdot [(\vec{V}_c + \vec{V}_d)T] + T\nabla \cdot [(\vec{V}_c + \vec{V}_d)]\}^n + (A_H \nabla^2 T)^{n-1}$$

可以推导出模式的伴随方程。令

$$L = \sum_{n=1}^N \lambda^n \{ \frac{T^{n+1} - T^{n-1}}{2\Delta t} - \dots \} + \frac{\Theta}{2} (T - \hat{T})^2 \quad (17)$$

则根据  $\frac{\partial L}{\partial T^n} = 0$  可得到温度的伴随方程:

$$\frac{\lambda^{n-1} - \lambda^{n+1}}{2\Delta t} - (A_H \nabla^2 \lambda)^{n+1} - \lambda^n (\nabla \cdot \vec{V})^n - u \frac{\partial \lambda^n}{\partial x} - v \frac{\partial \lambda^n}{\partial y} + \Theta(T - \hat{T}) = 0 \quad (18)$$

我们可得到关于控制量的梯度表达式:

$$\frac{\partial L}{\partial T^0} = -\frac{\lambda^1}{2\Delta t} - (A_H \nabla^2 \lambda)^1 \quad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial A_H} = -\int \lambda^n (\nabla^2 T)^{n-1} dt \quad (20)$$

控制量的调整通过以下公式实现:

$$T^0 = T^0 + \beta \frac{\partial L}{\partial T^0} \quad (21)$$

$$A_H = A_H + \theta \frac{\partial L}{\partial A_H} \quad (22)$$

式中  $\beta$  和  $\theta$  分别是调整量参数。

### 3 伴随的实现

目前的伴随通常都采用模式的伴随,所以,根据方程(17)~(22)实现伴随,具体步骤为

(1)赋初值  $T^0$ 、 $A_H$

(2)主程序计算  $T^1 > T^{1441}$  (时间步长是 180 秒,72h 是 1440 步)。

(3)判断  $\sum \frac{1}{2} (T - \hat{T})^2$  是否满足要求精度,如果满足精度,进入步骤(9);如果不满足要求的精度,进入步骤(4)。

(4)伴随程序计算  $\lambda^{1441} \rightarrow \lambda^1$ , 根据(18)式计算。

(5)根据公式(19)、(20)分别计算  $\frac{\partial L}{\partial T_0}$  和  $\frac{\partial L}{\partial A_H}$ 。

(6)根据公式(21)计算  $T^0 = T^0 + \beta \frac{\partial L}{\partial T_0}$ 。

(7)根据公式(22)计算  $A_H = A_H + \theta \frac{\partial L}{\partial A_H}$ 。

(8)返回步骤(1)。循环。

(9)结束程序。

当以上系数的合适的值得到后,伴随同化就可以应用于海温预报了。

### 4 遥感 SST 资料的引入对 SST 预报的影响研究

本文所用的微波遥感 SST 是由 Remote Sensing Systems ([http://www.remss.com/sst/microwave\\_qi\\_sst\\_browse.html](http://www.remss.com/sst/microwave_qi_sst_browse.html))提供的 AMSR-E 卫星全球插值的遥感数据,其起始时间是 2002 年 6 月 1 日,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。因为受近岸或雨天等因素的影响,AMSR-E 卫星微波遥感 SST 资料

常有不合理区域。本项工作只采用了与旬平均 SST 场差值在  $1^\circ\text{C}$  之内的数据。

将微波遥感 SST 资料应用于海表温度业务化预报中,对效果进行检验。

试验一设计如下:

(1)用 2002 年 6 月至 12 月的旬平均 SST 场插值到每一天,作为同化程序的初始场。

(2)同化前 3d 的船舶报资料,将同化程序的结果作为预报程序的初始场。用预报程序所得的预报结果与后 3d 的船舶报资料比对,计算出均方差。

(3)同化前 3d 的船舶报资料和微波遥感 SST 资料,将同化程序的结果作为预报程序的初始场。用预报程序所得的预报结果与后 3d 的船舶报资料比对,计算出均方差。

试验一结果如图 1 所示,将遥感资料引入到数据同化的结果明显好于仅同化船舶报 SST 资料的结果,只有极少数几天将遥感资料引入到数据同化的结果略差。

因为船舶报 SST 资料在渤海黄海区很少,试验一的结果可能对于渤海东海全海区 SST 预报的代表性并不高。因此,试验二设计如下:

(1)用 2002 年 6 月至 12 月的旬平均 SST 场插值到每一天,作为同化程序的初始场。

(2)同化前 3d 的船舶报资料,将同化程序的结果作为预报程序的初始场。用预报程序所得的预报的第三天的 SST 场结果与旬平均 SST 场插值得到的同一时间的 SST 场比对,计算出均方差。

(3)同化前 3d 的船舶报资料和微波遥感 SST 资料,将同化程序的结果作为预报程序的初始场。用预报程序所得的预报的第三天的 SST 场结果与旬平均 SST 场插值得到的同一时间的 SST 场比对,计算出均方差。

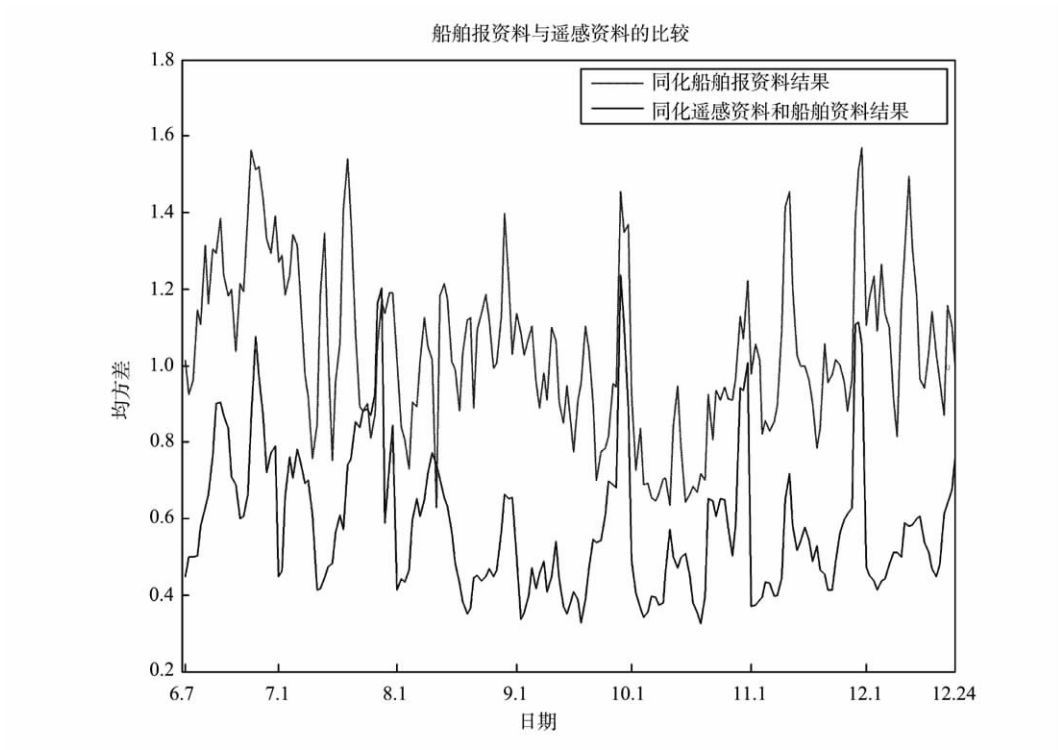


图 1 引入遥感资料和仅同化船舶报资料的预报结果的比较

(点线是仅同化船舶报资料的预报结果,实线是同化船舶报资料和遥感资料的预报结果)

Fig.1 Comparison of the forecast result of the introducing remote sensing data with the result of only assimilating the ships newspaper data

(the dashed line indicates the forecast result of only assimilating the ships newspaper data; the solid line indicates the forecast result of assimilating the ships newspaper data and the remote sensing data )

试验二结果如图 2 所示,将遥感 SST 资料引入到数据同化的结果与仅同化船舶报 SST 资料的结果大体一致。在 7 月中下旬到 8 月上旬,和 10 月中下旬到 11 月上中旬,将遥感资料引入到数据同化的结果明显好于仅同化船舶报 SST 资料的结果。在 7 月初,8 月 20 日左右,10 月 5 日左右,将遥感 SST 资

料引入到数据同化中的结果与仅同化船舶报 SST 资料的结果基本一致。6 月 14 日左右,9 月 25 日左右,11 月 15 日左右,将遥感资料引入到数据同化的结果要差于仅同化船舶报 SST 资料的结果。经统计得出:引入遥感资料的预报结果优于仅同化船舶报资料的预报结果的天数占总天数的 49.5%。

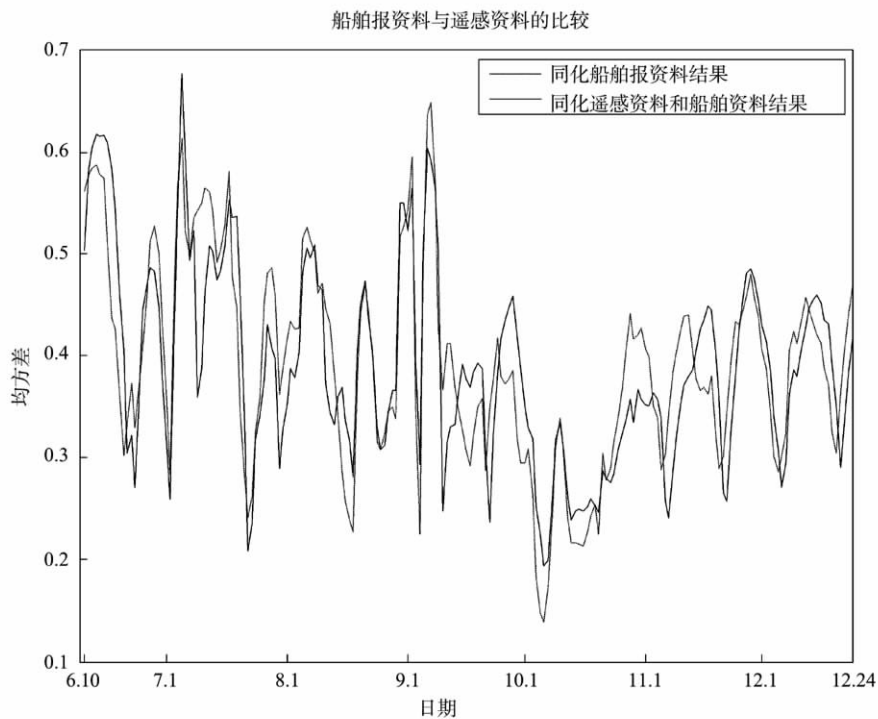


图 2 引入遥感资料和仅同化船舶报资料的预报结果的比较

(点线是仅同化船舶报资料的预报结果,实线是同化船舶报资料和遥感资料的预报结果)

Fig. 2 Comparison of the forecast result of the introducing remote sensing data with the result of only assimilating the ships newspaper data

(the dashed line indicates the forecast result of only assimilating the ships newspaper data; the solid line indicates the forecast result of assimilating the ships newspaper data and the remote sensing data)

## 5 结论与讨论

本文研究发现将 AMSR-E 卫星微波遥感 SST 资料引入到数据同化中,在将预报结果和船舶报资料进行比对时,可以明显提高海表温度的预报精度。

1)将预报结果和船舶报资料进行比对时,将遥感资料引入到数据同化的结果要明显优于仅同化船舶报资料的结果,且均方差大部分都小于  $0.8^{\circ}\text{C}$ ;

2)将预报结果和旬平均场资料进行比对时,将遥感资料引入到数据同化的结果比仅同化船舶报资料的结果基本一致。均方差大

部分都小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,最小的部分甚至可以达到  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。

将遥感 SST 资料引入到数据同化中,用于海表温业务化预报,究竟能否提高预报的效果,还需要在收集更多资料的情况下,做进一步的研究。将红外遥感 SST 资料和微波遥感 SST 资料同时进行同化,用于海表温度的预报将是下一步的工作。

## 参考文献

- [1] 长期数值天气预报研究小组. 一种长期天气数值预报方法的物理基础[J]. 中国科学, 1977, 2:162-172.

- [2] Adern, J. , Numerical\_thermodynamic prediction of mean monthly ocean temperature [J]. *Tellus*, 1975, 27: 541-551.
- [3] 王赐震, 苏育蒿. 一种有限区域海表面温度预报模式, I. 动力学部分[J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21(5): 418-424 .
- [4] 王赐震, 苏育蒿. 一种有限区域海表面温度预报模式, II. 物理学部分[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(1): 69-77.
- [5] 王赐震, 李许花, 戚建华, 等. 中国近海异常海温数值预报模式研究, I. 模式的建立[J]. *海洋学报*, 1998a , 20(2): 27-34.
- [6] 王赐震, 李许花, 戚建华, 等. 中国近海异常海温数值预报模式研究, II. 因子分析和试预报[J]. *海洋学报*, 1998b , 20(3): 19-26.
- [7] 马继瑞, 韩桂军, 李冬. 变分伴随数据同化在海表面温度预报中的应用[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 1-7.
- [8] Chang, Y. , D. Lee, and Y. Youn, Improving SST prediction in the tropical Pacific using subsurface oceanic data in the neural network model[J]. *American Geophysical Union*, 2006, 87(36): suppl.
- [9] 张建华, 苏洁, 李磊, 等. SST 短期数值预报[J]. *海洋预报*. 2005, 22(1): 1-8.

## INFLUENCE OF ASSIMILATING REMOTE SENSING DATA ON THE PREDICTING PRECISION OF SEA SURFACE TEMPERATURE

SUN Ruili, and LI Lei

(Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The AMSR-E satellite microwave remote sensing data are used to the sea surface temperature (SST) numerical prediction model in the Bohai sea, the Yellow sea, and the East China Sea. The model is used for the optimization of initial condition with the adjoint method of assimilation. The experiment of assimilating microwave remote sensing SST data shows the following results. When comparing the predicting results with the hourly ships-report data, the predicting results of assimilating both the remote sensing SST data and the hourly ships-report data are better than those of only assimilating the hourly ships-report data in general. And most of the mean square errors are smaller than  $0.8^{\circ}\text{C}$  with assimilating two kinds of data. However, when comparing the predicting results with the ten-days averaged SST field, the predicting results of assimilating both the remote sensing SST data and the hourly ships-report data are consistent with those of only assimilating the hourly ships-report data, and are better in few months. And the most of the mean square errors are smaller than  $0.5^{\circ}\text{C}$  and the minimum value even can reach  $0.2^{\circ}\text{C}$ . So the assimilation of remote sensing SST data can improve the predicting precision of SST.

**Key words:** data assimilation; adjoint method; remote sensing SST data; SST Numerical forecast model; Bohai sea, Yellow sea and East China Sea