

数值预报/ 卫星反演/ 数据同化循环试验^{*}

王 超

(国家卫星气象中心, 北京, 100081)

万 丰

(国家气象中心, 北京, 100081)

张凤英 王宗皓

(国家卫星气象中心, 北京, 100081)

摘 要

文中介绍了数值预报/ 卫星反演/ 数据同化的循环试验。由于湿度反演方法的改进, 使得湿度反演产品的精度有所提高, 所以首先进行了湿度廓线参与同化过程的试验。结果表明, 反演的水汽产品对台风中心强度有正影响, 经过4次同化过程24h 预报模拟的台风加深与实况比较一致。48h 预报台风中心减弱趋势在低层显得不足, 但比业务预报有明显改进。24与48h 预报的总降水量和暴雨中心强度比未加入反演水汽产品的预报有明显增加, 且接近实况。

关键词: 卫星反演, 水汽产品, 数据同化, 台风, 暴雨, 预报。

1 引 言

王宗皓^[1]提出, Smith 从 ECMWF 的 Norris 数值预报时效延伸趋势图中看出1979年到1986年数值预报稳定的改进, 而其后几乎停顿。这是因为“观测和反演方法没有伴随模式的模拟和数据同化而发展, 使得卫星数据的信息内容相对于其它信息来源而言有减少的趋势。”王宗皓还提到, 科学家们忧虑1980年代以来卫星反演温度对北半球业务数值天气预报的负影响难以消除。于是1989年美国政府组织来自 NASA 和 NOAA 的反演专家和 NMC 的科学家们讨论决定由 NASA/ NESDIS/ NMC 联合建立卫星反演/ 数据同化/ 数值预报循环系统。在这个系统中首先以6h 或12h 数值预报为背景场反演温度和湿度廓线, 然后, 反演结果参与数据同化, 最后做出可作为新的反演背景的预报, 如此循环不已。当前全球数值预报的6h 预报的精度作为反演背景是有效的。如果由于有了数值预报做背景场, 反演的精度得以改善, 同化系统又能从卫星反演资料中受益而得到更精确的初始场, 那么下一轮的6h 预报也相应提高, 如此形成一个良性循环。在这个系统中, 数据同化

* 初稿时间: 1996年6月27日; 修改稿时间: 1997年5月2日。

资助课题: 国家《\五》课题85- 906- 03- 03。

与反演同时使用同一个数值预报场作为背景场。如果背景场是精确的, 反演不会对它进行较大的修改, 分析对背景的改变也将很小, 于是维持了模式的动力平衡态^[2]。根据这样的思路, 中国气象局国家卫星气象中心(NSMC)和中国气象局国家气象中心联合建立中国的卫星反演/ 数据同化/ 数值预报循环系统。作者建立的试验系统与上述的有一点差别, 就是其中的数值预报模式是有限区模式。在侧边界条件的限制下, 只好采用间断同化。在这种同化系统中, 初值的作用在时间积分过程中会很快减弱, 造成卫星资料影响的削弱。

最后, 在第4节中以一个台风个例说明试验系统对台风天气预报的作用。在王超和张凤英^[3]的文章中已经提到, 由于反演精度低于常规观测, 反演的大气参数只可能在缺少常规观测的区域会对天气预报有正影响。这种区域一般指沙漠、海洋或其它人烟稀少的地方。本例选的台风正处于这类地区。作者曾进行过计算, 在中国东南沿海, 数据同化使用的预备场的湿度场, 有明显的负偏差, 而本例的反演结果没有。从理论上讲, 在东南沿海使用反演水汽的同化, 会增加预报初始场的湿度, 而没有加入反演水汽初始场的湿度偏低。这样, 能清楚地看到与东南沿海的水汽源密切相关的台风活动, 会在反演提供的水汽条件下, 得以正确的模拟。众所周知, 台风是一个能够释放巨大能量的天气系统, 而这种能量主要是由水汽提供的, 可见提供正确的初始湿度场不但会给台风降水预报提供正确的依据, 同时会为正确模拟台风的发展和填塞提供有利条件。到目前为止, 作者只作过一个台风个例试验, 结果令人满意。要强调的是, 不是通过多个试验来证明作者的方法正确与否, 而是以一个例子说明作者理论的正确。当然, 有条件时, 应该进行多个试验, 检验其方法提高预报精度究竟有多少。

同化循环试验系统包括: 数值预报分析同化系统; 反演背景场的形成; 同步物理反演; 反演结果的检验和订正; 为数据同化提取反演数据。

2 有限区数值预报模式

文中有关符号说明如下:

u, v : 风的纬向和经向分量; $d\sigma/dt$: 大气垂直运动; T : 温度; q : 水汽混合比; RH : 相对湿度; Φ : 重力位势; λ : 地理经度; φ : 地理纬度; σ : 垂直坐标; p : 气压; p_s : 地面气压; $\Delta\lambda, \Delta\varphi$: 经向和纬向格距; Δt : 时间步长。

本文所用的数值预报模式和分析同化系统是一个以张玉玲等人^[4]的模式为动力框架、郭肖容等人^[5]开发的有限区分析预报系统。模式的动力方程组写成拟能形式。模式大气的垂直方向采用 σ 坐标, $\sigma = p/p_s$ 。水平方向采用经纬坐标 (λ, φ) 。预报变量为 u, v, p_s, T, q , 在水平方向被交错地写在 Arakawa C 网点上。在垂直方向上模式大气被分成 15 层, 考虑到行星边界层和对流层顶的复杂性, 模式的垂直分层在这一带增加分辨率。垂直运动 $d\sigma/dt$ 和重力位势 Φ 写在 σ 半层上, 其余变量写在其整层上。水平方向上按等间距划分经纬网格, 格距为 $\Delta\lambda = \Delta\varphi = 1.875^\circ$ 。预报范围为 $15.00^\circ - 63.75^\circ \text{N}$, $69.375^\circ - 144.375^\circ \text{E}$ 定义的矩形区。这是包括中国大陆在内的东亚地区, 内有 41×27 个格点。这个有限区模式嵌套在中国气象局国家气象中心的全球预报模式内, 全球预报模式单向地给有限区模式提供侧边界条件。为使两个模式协调, 在边界处进行 Davies 处理。时间积分采用显式经济格式, $\Delta t = 120\text{s}$ 。模式中使用真实地形。加入的物理过程有层结降水、积云对流参数化、浅对

流、蒸发过程、水平扩散和边界层湍流输送。

该系统的客观分析方案采用修改的美国国家气象中心多元最优插值方案,在12个等压面上分析风分量 u 和 v 、重力位势 Φ 和下层的6个等压面上的相对湿度 RH 。通过薛纪善等人的有限区非线性正规化初始化方案进行初始化^[6]。

3 卫星反演模式

卫星反演采用张风英等^[7]提供的改进的 Smith 同步物理反演法,其解如下,

$$Y = Y_g + \Phi(\Psi^T \Psi + \mathcal{Y})^{-1} \Psi^T (R_0 - R_g) \quad (1)$$

其中, Y 表示包括大气湿度廓线、温度廓线和地面温度的解向量, Y_g 表示与 Y 对应的背景向量, R_0 表示 TOVS 观测的光谱通道的辐射亮温向量, R_g 表示由背景向量通过辐射传输方程计算得到的 TOVS 光谱通道的辐射亮温向量。 Φ 是基底函数, Ψ 是协方差矩阵。上标 T 表示矩阵转置, -1 表示矩阵求逆, \mathcal{Y} 是拉格朗日乘子, I 是单位矩阵。

需指出,该模式不直接反演出水汽廓线,而是首先利用一组测温通道反演出湿空气的温度和一组测温通道反演出干空气的温度,然后再利用湿空气的温度和干空气的温度推导出水汽廓线。

反演大气参数时,必须考虑仪器观测视场内云的影响。如果辐射测值受到云污染,应利用 Menzel 等人^[8]的云参数计算方法由 HIRS/2 $15\mu\text{m}$ CO_2 光谱通道的辐射测值推导出云顶高度 P_c 、云顶温度 $T(P_c)$ 和云量 N 。利用这些参数便可算出云顶的水汽混合比 $W(P_c)$,如下:

$$W(P_c) = N W_{\text{sat}}(T(P_c)) + (1 - N) W_g(P_c) \quad (2)$$

其中, W_{sat} 是云顶的饱和水汽混合比, $W_g(P_c)$ 是云顶的背景水汽混合比。在云层以下,利用原地面水汽混合比插值求出新的背景水汽混合比廓线。

4 反演及其结果的处理

反演所需的大气背景温湿廓线是由中国气象局国家气象中心的有限区模式预报提供的。利用 σ 面上的格点预报资料,根据反演点的经纬度在水平方向上内插出反演点上的数值预报值。假设反演点 P 的经纬度为 (λ, φ) ,其临近的格点上的预报值分别为 $F_{11}, F_{12}, \dots, F_{44}$, P 到最近的西边网格的距离为 $\delta\lambda$,到最近的南边网格的距离为 $\delta\varphi$ (见图1),则点 P 处的预报值 F_P 由式(3)确定。

$$F_P = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{11} & F_{21} & F_{31} & F_{41} \\ F_{12} & F_{22} & F_{32} & F_{42} \\ F_{13} & F_{23} & F_{33} & F_{43} \\ F_{14} & F_{24} & F_{34} & F_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, A_i 和 B_i 的值由下面的 X_i 表示:当 $A_i = X_i$,则 $x = \delta\lambda \Delta\lambda$;当 $B_i = X_i$,则 $x = \delta\varphi \Delta\varphi$

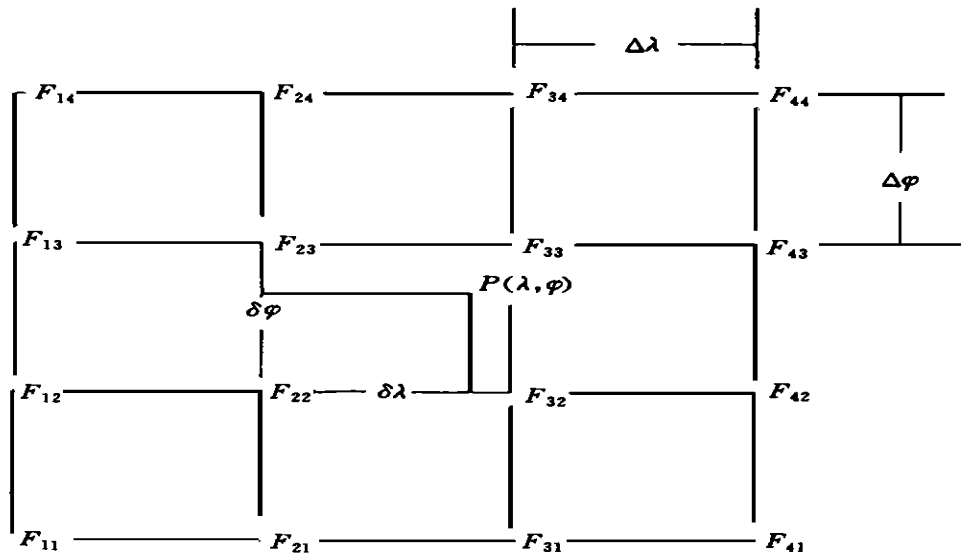


图1 模式格点示意图

$$X_1 = -\frac{1}{6}x(x-1)(x-2), X_2 = \frac{1}{2}(x+1)(x-1)(x-2), X_3 = -\frac{1}{2}(x+1)x(x-2), X_4 = \frac{1}{6}(x+1)x(x-1)。$$

在点 P 处算出所有 σ 面上的 F_P 值。检查了一个在 $0-60^\circ\text{N}$, $50-160^\circ\text{E}$ 的经纬矩形区域上有1.5个经向波和3.5个纬向波的简谐震动的插值误差。当经纬格距均为2.5时,在每个网格内取一距两个边均为1的点,在每个点上插值。结果,平均绝对误差为 2×10^{-4} ,最大绝对误差为 5×10^{-4} ,而RMS误差为 2.4×10^{-4} 。可见,对于大尺度天气系统来说,上述插值方法的精度是足够的。

再进行垂直方向反演模式层的插值。以地面气压 1000hPa 为例,可算出反演需要的 25hPa 以下的27个气压层上的预报值。由于预报模式大气在垂直方向上,尤其在行星边界层内,相对于大气标准层而言分辨率较高,对数气压坐标上的线性插值有较高的精度。

利用上述方法提供的背景场把NOAA-12卫星的探测资料反演出温湿廓线,并按照文献[3]的方法对其中的湿度廓线进行误差订正,形成称为NSMC水汽的反演产品提供给数值预报的同化系统进行客观分析。误差订正所用的订正值取自1992年8月下半月(即所选天气实例的前半月)资料的统计值。

5 天气实例试验

5.1 天气过程

以1992年8月末到9月初的一次台风暴雨的天气过程^①为例,进行了数值预报/卫星反

① 马清云,朱宗申.我国北方一次台风暴雨数值试验.国家气象中心《科技年报》,1994,A册。

演/数据同化循环试验。这个台风(编号为9216)是8月27日在台湾以东洋面上生成的热带低气压。当时正值西太平洋副热带高压加强西伸,在其外围气流的引导下,台风向西偏北方向移动。路径稳定,强度不断加深,并于30日0600(UTC)在台湾花莲县登陆。8h后又在福建长乐县登陆,然后北上并减弱为低气压。9月1日0000(UTC)在安徽境内生成一个低压副中心,迅速转向东北进入黄海移出中国(见图2)。这个台风给沿途带来大范围暴雨。

5.2 同化试验方案

以1992年8月29日0000(UTC)为起始时刻进行如下两个试验:

(1) 控制试验 NSAT: 不加入作者提供的反演水汽(NSMC水汽),单纯重复业务预报系统的同化过程。

(2) 并行试验 SATW: 与试验(NSAT)的不同仅在于同化中在海上加入分析时刻前后3h以内的NSMC水汽(如图3所示)。

同化方案是这样设计的,在预报时刻 T (30日0000(UTC))前24h($T - 24h$)以中国气象局国家气象中心全球模式在 $T - 30h$ 做的6h预报为背景场,用有限区分析同化系统做一次有限区分析同化,为下一次在 $T - 18h$ 时刻的有限区分析同化提供背景场。依次进行 $T - 18h$, $T - 12h$ 和 $T - 06h$ 时刻的分析同化。

同化完成后得到 T 时刻的两个初始场,然后分别进行两种试验方案的 $T + 24h$ 和 $T + 48h$ 预报。

5.3 结果

5.3.1 台风强度的预报

图4为SATW和NSAT两方案进行的同化和预报试验中的台风中心强度变化与实况的对比。从图上看,台风在 T 时刻前24h内加深,其后的48h减弱。从29日0000(UTC)到30日0000(UTC)的24h同化过程中,SATW模拟的台风中心强度与实况接近。在其后的48h预报中在850和700hPa上,SATW预报台风减弱明显不足,但总的来说比NSAT的效果好。台风中心强度的预报与实况在表1中列出。SATW模拟的台风在850,700和

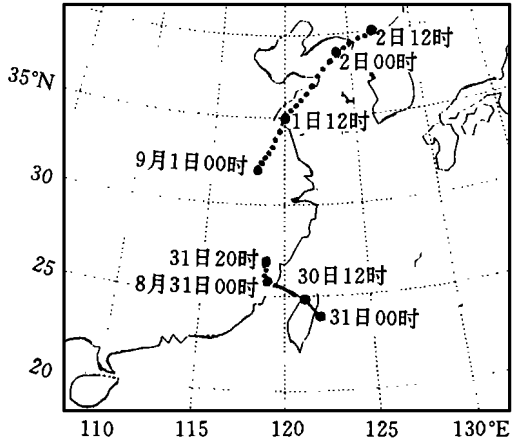


图2 9216号台风 Polly 路径

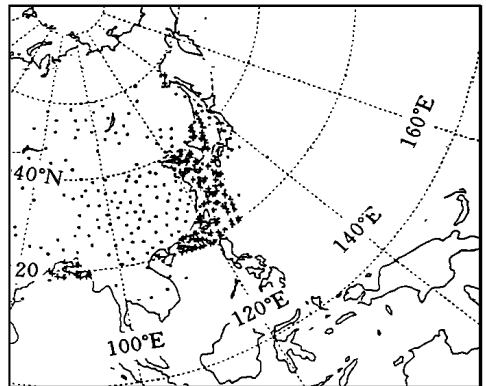


图3 1992年8月30日0000(UTC)客观分析使用的探空和NSMC水汽资料的地理分布
(探空, × NSMC水汽)

500hPa 分别加深5, 6和5dagpm, 实况加深了4, 5和4dagpm, 而 NSAT 模拟的台风加深3, 4和3dagpm。其后的48h 里, SATW 模拟的台风中心在上述三个等压面上分别上升7, 7和8dagpm。实况分别上升4, 13和7dagpm, 而 NSAT 模拟的只上升了2, 2和4dagpm。表1中经过同化过程的30日0000(UTC)的分析场中加入 NSMC 水汽的 SATW 比 NSAT 的台风中心强度要强, 而且更接近实况。可见经过1天4次同化过程后, 分析场已经受到了 NSMC 水汽的影响。其后的24h 和48h 的台风登陆后迅速填塞过程中, 虽然 SATW 预报的速度仍显不足, 但比 NSAT 的预报效果好。

表1 1992年8月30日0000(UTC)的分析及24h 和48h 预报的台风强度(dagpm)

气压 (hPa)	$T - 24$		$T + 0$			$T + 24$			$T + 48$		
	分析	实况	分析	实况	实况	预报	实况	预报	实况	预报	实况
	NSAT		SATW	NSAT		SATW	NSAT	SATW	NSAT	SATW	NSAT
500	572	568	567	569	564	569	570	567	575	573	571
700	297	293	291	293	288	292	293	292	298	295	301
850	130	125	125	127	121	128	127	123	132	129	135

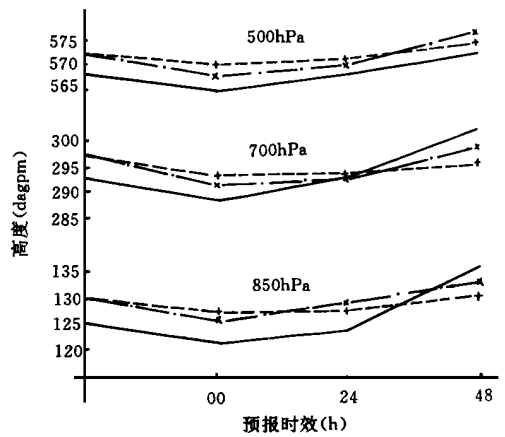
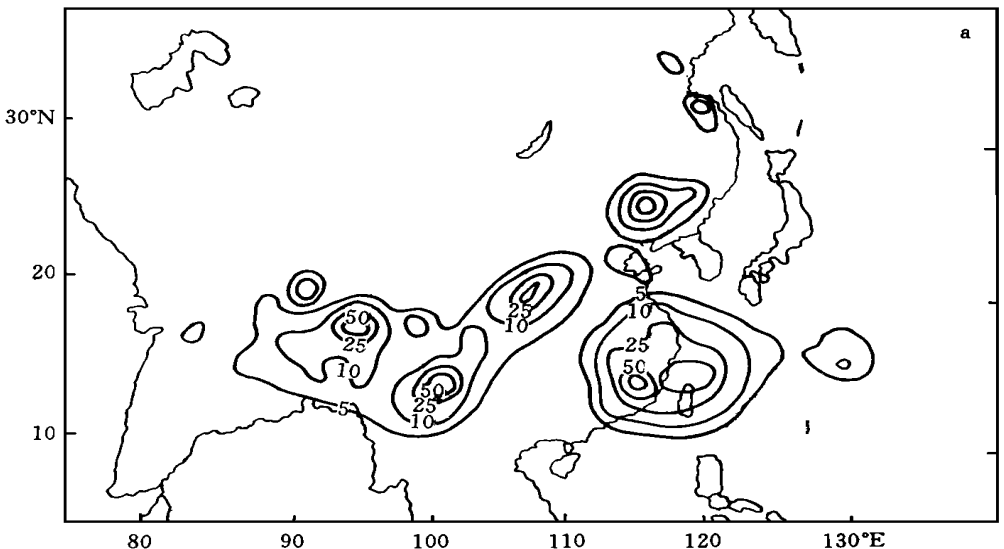


图4 台风9216中心强度变化示意图
(点划线为 SATW, 虚线为 NSAT, 实线为实况)

5.3.2 降水预报



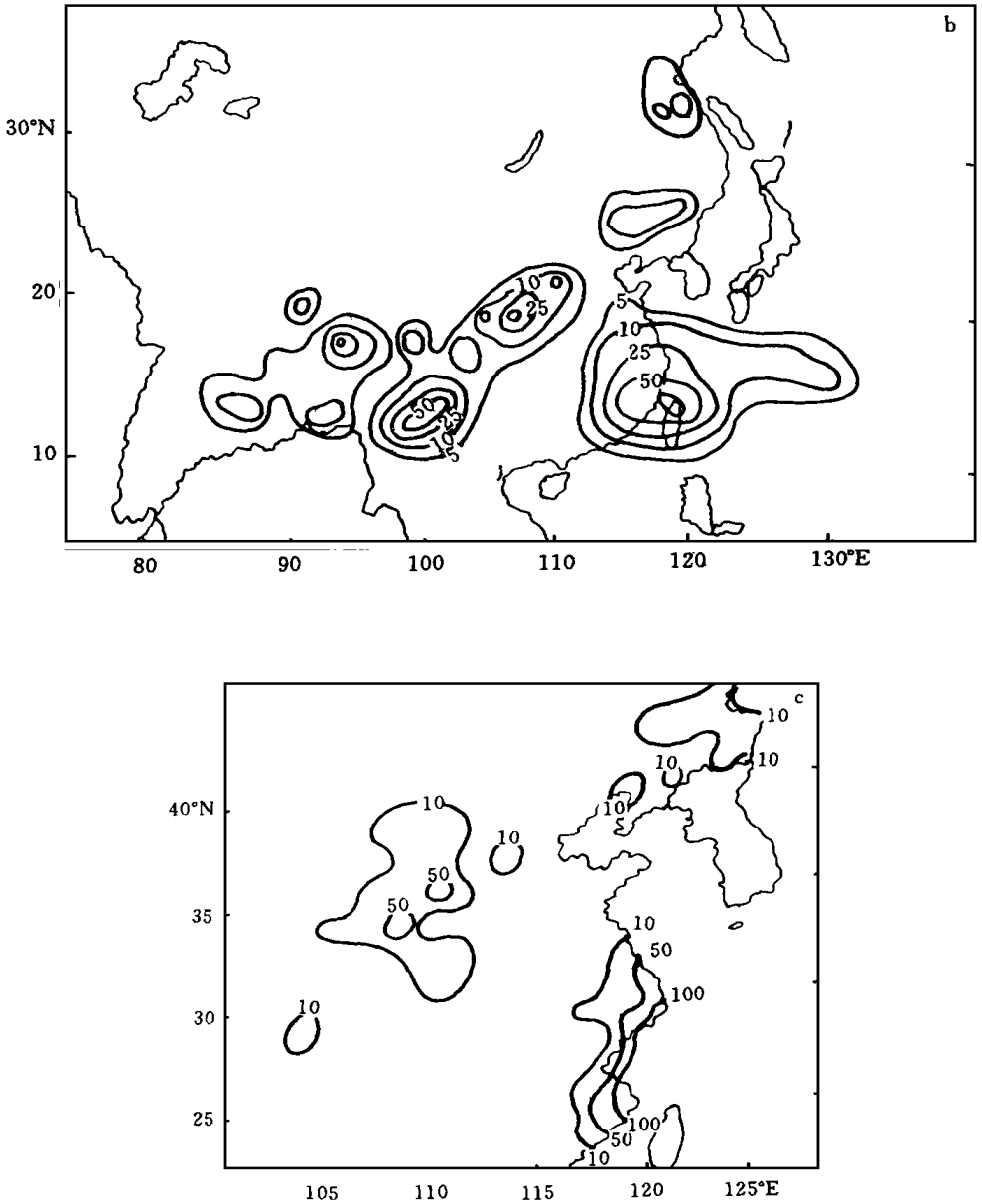


图5 24h 总降水量的24h 预报和实况

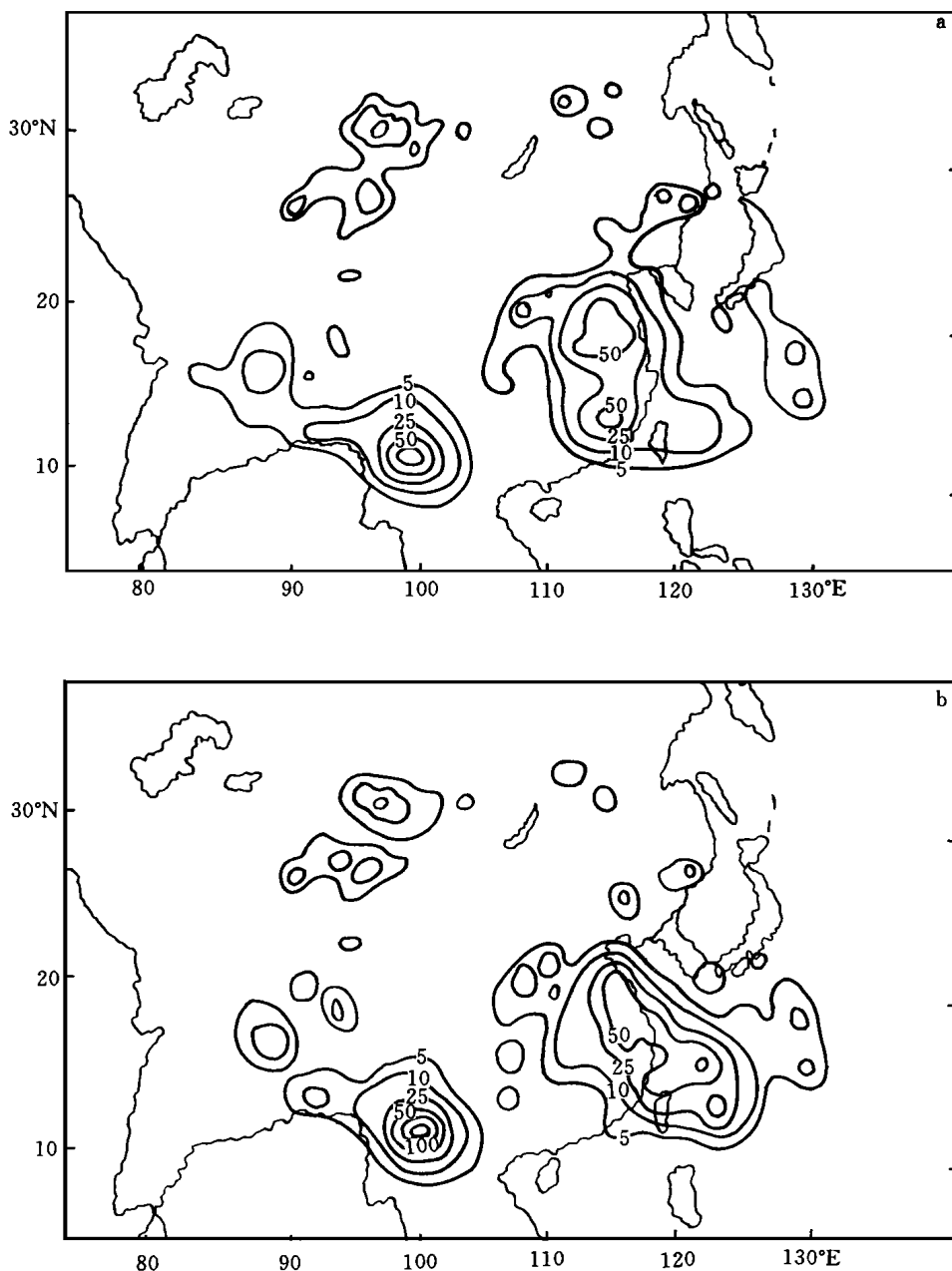
(a. SATW; b. NSAT; c. 实况)

5.3.2.1 24小时预报的检验

图5为 SATW 和 NSAT 的24h 降水量预报图。SATW, NSAT 预报及实况的最大雨量中心值分别为161mm, 128mm, 245mm, 可见SATW 的预报效果比NSAT 的要好。在落区上前者也比后者好些, 上述雨量中心前者报在福建沿海, 而后者却报在台湾北部。

5.3.2.2 48小时预报的检验

图6为 SATW 和 NSAT 的48h 降水量预报图。SATW 预报的降水中心不论在南方还是北方都与实况接近。在南方预报了75mm 的暴雨中心, 而 NSAT 只报了50mm, 其实是103mm。在北方两者的表现差不多, 且都接近实况105mm。如果检验25mm 以上的降水区域, 则 NSAT 显得不如 SATW 报得充分。尤其在北方, 前者只在115 E 以东预报了25mm 降水区。实况是在110 E 和120 E 之间有大片25mm 以上的降水, 甚至在115 E 以西



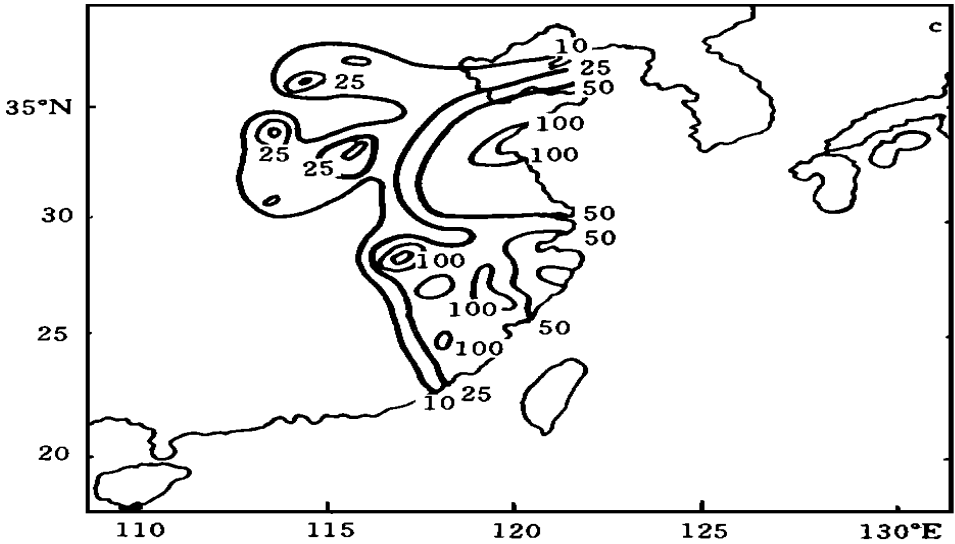


图6 24h 总降水量的48h 预报和实况

(a. SATW; b. NSAT; c. 实况)

有多处50mm 以上的中心。从图上看, 在这个例子上, SATW 的预报是很接近实况的。可见SATW 有较强的预报暴雨的能力。

5 结 论

通过上述试验, 对国家卫星气象中心的水汽反演产品在数值预报中的应用, 有如下的认识:

- (1) 经过系统误差订正的反演水汽产品在数值预报的数据同化试验中有正影响。
- (2) 试验所做的24h 和48h 台风强度预报比未加入反演水汽产品的预报更接近实况。
- (3) 加入反演水汽产品后, 预报的暴雨中心强度明显增加, 大雨和暴雨区增大。可见, 对模拟台风造成的暴雨, 反演水汽产品有一定的贡献。
- (4) 目前, 试验中反演产品的使用仅限于海上。在陆上由于下垫面和行星边界层的复杂性, 反演产品的精度相对较低, 对预报的影响不会好于海上。

参考文献

- [1] 王宗皓. 气象卫星探测对数值预报的影响评价. 计算物理学报, 1992, 9(4): 28—37.
- [2] Susskind J and Pfaendner J. Impact of interactive physical retrievals on NWP. ECMWF/EUMETSAT Proceedings of workshop— The use of satellite in operational numerical weather prediction, 1989. 245—270.
- [3] 王超, 张凤英. TOVS 水汽反演的误差分析及其订正. 应用气象学报, 1996, 7(3): 285—293.
- [4] 张玉玲等. 十层有限区细网格模式的试验研究. 中期数值天气预报研究成果汇编(一). 北京: 气象出版社, 1990. 152—168.
- [5] 郭肖容等. 一个有限区分析预报系统. 中期数值天气预报研究成果汇编(三). 北京: 气象出版社, 1991. 88—95.
- [6] 薛纪善等. 非线性正规模初值化在有限区模式的实现. 中期数值天气预报研究成果汇编(一). 北京: 气象出版

社, 1990. 58—69.

- [7] 张凤英, 王超, 冉茂农. 以 NWP 6小时预报场为背景场的 TOVS 大气湿度反演. 台风、暴雨灾害性天气探测、数据采集技术的研究(85- 906- 01). 北京: 气象出版社, 1996. 58—64.
- [8] Menzel W P, Wylie D P and Strabala K I. Characteristics of global cloud cover derived from multispectral HIRS observations. Technical proceeding of the 5th International TOVS Study Conference, Toulouse, France, 24- 28 July 1989. 276- 290.

AN EXPERIMENT ON NWP/SATELLITE RETRIEVAL/ DATA ASSIMILATION

Wang Chao

(*National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing, 100081*)

Wan Feng

(*National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing, 100081*)

Zhang Fengying Wang Zonghao

(*National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing, 100081*)

Abstract

An experiment on NWP/Satellite retrieval/Data assimilation was described in the paper. Since the method of water vapor retrieval was improved and the accuracy of retrieval relative humidity (RH) has been increased, the retrieval RH was only used in assimilation. The result shows after 4-step 6 h assimilation the typhoon intensity modelled was more consistent with that of the real one than without retrieval RH. Although the trend of decreasing of the typhoon intensity forecasted for 48 h ahead is weaker on the low levels, it is better than the modelling without retrieval RH. It is evident that the retrieval RH had positive impact on the analysis and forecast of typhoon intensity. The forecast both 24 and 48 h ahead of total precipitation and the rainstorm intensity in the centre of rain areas were increasing and close to the real ones when the retrieval RH was used.

Key words: Satellite retrieval, Water vapour product, Data assimilation, Typhoon, Rainstorm, Forecast.