

# TCFM 技术的卫星导风数据在台风模拟中的应用初探

王振会<sup>1,2</sup>, 杨艳蓉<sup>1,2,3</sup>, 肖稳安<sup>2</sup>, 河惠卿<sup>2</sup>, 李峰<sup>2</sup>

1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;

3. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037

**摘要:** 利用傅里叶相位分析方法与最大相关法结合的云导风技术 TCFM(Technique based on combination of Fourier phase analysis and maximum correlation), 对 2005-08-05 的强热带风暴“麦莎”天气过程中静止气象卫星得到的 30min 间隔云图时间序列进行导风计算, 并将导风结果应用于中尺度数值模式 ARPS(The Advanced Regional Prediction System), 结合其资料分析系统 ADAS(ARPS Data Analysis System), 对台风“麦莎”登陆前的过程进行模拟。尽管洋面上常规资料稀缺, 但卫星导风数据的同化使用结果表明, TCFM 技术得到的导风资料能够显著改善台风眼壁东部区域的垂直气流活动, 使台风螺旋雨带更加明显, 符合实际。

**关键词:** TCFM 导风技术, 云风矢量, 资料同化, 台风模拟

中图分类号: X43

文献标识码: A

## 1 引言

卫星遥感资料, 可以弥补海洋、沙漠地区的常规气象观测资料的缺乏。由卫星云图时间序列计算得出的云导风资料, 已被证明对天气分析和预报, 尤其是对探测资料稀少的海洋和沙漠地区的天气分析和预报有积极作用(Schmetz 等, 1993; Kidder & Vonder, 1995; Tomassini 等, 1997)。对于热带气旋的移动路径(张守峰&王诗文, 1999; 王栋梁等, 2005)、强度预报(Xiao 等, 2002; Velden 等, 1998)等也具有广阔应用前景。王云峰等(2003)的研究也表明, 云导风资料可以改善台风初始场质量, 提高台风路径预报。

一般来说, 云图时间间隔越短, 可用于导风计算的示踪云就越多(Shenk, 1991)。当用传统的相关法进行导风计算时, 目标云块的位移是以整数倍像素为单位的, 当云块的位移小于 1 个像素时, 会产生“亚像素尺度位移”问题(Purdom, 1996; Wang 等,

1997)。“亚像素尺度位移”问题因影响风速大小、风向及风矢密度, 而影响质量控制, 从而影响云高精度, 最终影响云导风质量。王振会等(2000)先后提出了解决“亚像素尺度问题”的傅里叶相位分析法和傅里叶相位分析方法与最大相关法结合的 TCFM 云导风技术(朱平等, 2007)。

TCFM 导风技术中, 相关法核心是计算相关系数, 完成多像素位移的粗匹配, 避免后续的计算傅里叶相位分析过程中的相位重叠现象; 傅里叶相位分析法核心是谐波相位计算, 旨在解决导风运算中的“亚像素尺度位移”问题。该技术通过模拟实验和实际资料分析(朱平等, 2007), 证明可用于 30, 20, 10 及 1min 间隔的云图资料导风运算。

利用 TCFM 导风技术对 2005-08-05 的强热带风暴“麦莎”天气过程进行 FY2-C 卫星资料导风计算, 通过相关法计算云图上云块的整数倍位移, 利用傅里叶相位分析法计算亚像素尺度位移分量, 得到最终的风场计算结果。结合中尺度数值模式 ARPS 及

收稿日期: 2008-05-05; 修订日期: 2008-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)(编号: 2009CB421500), 国家自然科学基金项目(编号: 40475018)和江苏省气象灾害重点实验室(南京信息工程大学)项目(编号: KLME05002)。

第一作者简介: 王振会(1955—), 男, 教授, 博士生导师。毕业于南京气象学院, 目前主要从事大气遥感及应用研究, 已发表论文 60 余篇。

通讯作者: 杨艳蓉, E-mail: yanggion@163.com。

其 ADAS, 对上述计算结果进行同化, 模拟台风“麦莎”登陆前的过程。

## 2 TCFM 云导风技术

### 2.1 选择示踪云

选择示踪云时要考虑云与空间分辨率和时间分辨率的关系(陈渭民, 2003)。由于静止卫星云图的星下点空间分辨率为 4—5km 左右, 离开星下点的斜向观测还会使空间分辨率降低。并且云的识别不是以个别像素、而是以几个像素进行, 所以卫星云图上的示踪云不是地面观测中看到的云, 是几十到几百公里的云区。选择的示踪云寿命必须大于时序图的时间间隔, 否则无法追踪云的移动。因此云迹风与常规地面测风是不同的: 它表示在一定时间内大范围运动的风, 不反映影响常规测值的小尺度运动。

一般情况下, 纹理清楚且变化缓慢的大块云系适用于跟踪, 因此选择与天气尺度云系有关的云作为示踪云。在估计低空风时, 挑选有积云、浓积云的积云群作为示踪云; 在估计高空风时, 常选用变化缓慢的卷云作为示踪云。

### 2.2 示踪云高度

示踪云按高度分为 3 类, 每块示踪云的具体高度赋值按照红外云图上云的色调差异估计。首先根据标准大气温度廓线和低云亮温度估计低云的高度; 然后根据红外云图上中云的色调差异识别中云的相对高度, 定出中云对应的色调范围, 同时参考低云高度, 估计中云高度范围; 最后根据低云和中云高度, 以及高云色调比中云浅的原则, 估计高云的高度范围。

陆地、植被、海洋、河流等视为地物, 需要与低云分离开。将气压高度 > 950hPa 的物象及移速很小(本文取小于 4m/s)的像元认为是地物。

### 2.3 追踪算法

TCFM 导风采用“盲搜索法”(Wang 等, 1997)。是采用“盲人摸路”的方式在一幅图上指定的搜索范围内寻找另一幅图上给定的示踪云模块(“模块”指云图上“示踪云”区的一个方框区, 而非整个示踪云本身。为节约计算时间, 取较小的搜索范围, 由搜索半径  $r$  表示(实际上  $r$  是正方形搜索区的半边长), 当因  $r$  较小而构成的匹配面的峰值位于搜索区边沿

上时, 搜索区中心向匹配面峰值方向移动, 直到匹配面峰值不再处在搜索区边沿为止。

对于示踪云上模块的整数像素位移速度计算, TCFM 方法使用中心矩相关系数  $CC$  和原点矩相关系数  $OC$  进行目标示踪云上的模块匹配。其表达式为:

$$CC(K, L, M, N) = \frac{\sum \sum [S_0(i, j) - \bar{S}_0][S_1(i, j) - \bar{S}_1]}{\sqrt{\sum \sum [S_0(i, j) - \bar{S}_0]^2 \sum \sum [S_1(i, j) - \bar{S}_1]^2}}$$

$$OC(K, L, M, N) = \frac{\sum \sum S_0(i, j)S_1(i, j)}{\sqrt{\sum \sum [S_0(i, j)]^2 \sum \sum [S_1(i, j)]^2}}$$

式中,  $S_0, S_1$  分别表示不同时刻获得的云图上相互比较的 2 个模块内的像素强度矩阵, 两模块在云图上的参考位置分别在  $(K, L)$  和  $(M, N)$ ,  $(i, j)$  表示在模块内的像素序号,  $\bar{S}_0, \bar{S}_1$  分别为两模块内像素平均强度。 $CC(K, L, M, N)$  和  $OC(K, L, M, N)$  分别表示参考位置在  $(K, L)$  处的模块  $S_0$  与在  $(M, N)$  处的模块  $S_1$  之间的中心矩相关系数和原点矩相关系数。

在风矢产生过程中, 单独使用  $OC$  或  $CC$  作为识别因子, 同时对产生的云迹风场进行多因子风矢综合编辑时, 再一次的采用它作为风矢质量控制的一个参控条件, 使得风矢在连续性和唯一性上有较高的可信度。

用相关法得到示踪云上模块的单位像素位移, 根据云图时间间隔, 得到该模块的单位像素位移速度。

对于示踪云上模块的亚像素位移速度, TCFM 使用傅里叶变换。在匹配位置模块处, 将目标模块和匹配模块进行快速傅里叶变换, 得到目标模块的亚像素位移速度。考虑到实际云图的像素分布中通常含有随即噪声, 为减小其影响, 可以计算以各次谐波振幅的整数倍次幂为权重的平均速度, 作为模块的移动速度, 其表达式为:

$$u = \frac{\sum_{\mu=1}^{N-1} \sum_{\nu=1}^{N-1} |F_{\mu,\nu}|^\rho \times u_{\mu,\nu}}{\sum_{\mu=1}^{N-1} \sum_{\nu=1}^{N-1} |F_{\mu,\nu}|^\rho}, \quad v = \frac{\sum_{\mu=1}^{N-1} \sum_{\nu=1}^{N-1} |F_{\mu,\nu}|^\rho \times v_{\mu,\nu}}{\sum_{\mu=1}^{N-1} \sum_{\nu=1}^{N-1} |F_{\mu,\nu}|^\rho}$$

式中,  $|F_{\mu,\nu}|$  表示第  $(\mu, \nu)$  次谐波的振幅,  $u_{\mu,\nu}$  和  $v_{\mu,\nu}$  表示第  $(\mu, \nu)$  次谐波的速度。快速傅里叶变换振幅的权重取为  $\rho = 2$  (孙林等, 2004)。

TCFM 方法采用相关法和快速傅里叶变换相结合的方法, 最终的速度为单位像素位移速度和亚像

素位移速度之和, 示踪云云上的模块大小为  $16 \times 16$  像素, 计算云图大小为  $512 \times 512$  像素。

## 2.4 风矢质量控制原则

根据连续两幅云图相同点上的风矢速度大小和方向在短时间(约 30min)内变化不会特别大的原则, 进行质量控制(Wang 等, 1997)。设连续 2 个风矢间的方向差为  $\theta$ , 风速相对差为  $V'$ , 有,

$$V' = \left| \frac{2(V_2 - V_1)}{V_2 + V_1} \right|$$

则设定阈值  $\theta_s = 40^\circ$ ,  $V'_s = 1\text{m/s}$ 。当  $\theta > \theta_s$  或  $V > V'_s$  时, 认为风矢错误。

同时, 把定错高度的风矢进行调整, 得到合理的高度。云迹风被定义到不同高度上必然会和该高度层上的邻近风场产生不连续, 因此, 对于点  $i$  处的云迹风矢量  $V_i$ , 需计算以  $i$  为中心, 影响半径为  $R$  的距离内(有  $n$  个风矢)所有的风矢与点  $i$  处云迹风矢的平均一致性系数  $\bar{\rho}_i$ 。有,

$$\bar{\rho}_i = \frac{\sum \rho_{im} \times G_{im}}{G_{im}}$$

式中,  $\rho_{im}$  为  $i$  点和  $m$  点的一致性系数,  $G_{im}$  为 2 点间的权重函数, 和 2 点间的距离有关。

根据影响半径  $R$  内和  $i$  点相邻的风矢数目  $n$ , 设置一个一致性系数阈值  $\rho_s$ , 当  $\bar{\rho}_i > \rho_s$ , 则云迹风矢高度合理, 认为该风矢处于该层; 反之, 则不合理, 需要将其高度调整到另外 2 层。根据示踪云上的模块大小为  $16 \times 16$  像素, 设定  $n$  取 4,  $\rho_s = 0.6$ 。

## 3 TCFM 导风资料的同化

### 3.1 ARPS 数据同化/分析系统

ARPS 的 ADAS(ARPS Data Assimilation System) 数据同化/分析系统, 作用是把观测变量插值到模式格点上, 将观测信息与背景信息联合。ARPS 使用 Bratseth(1986)的迭代方案, 迭代方案比较省时, 不需要进行大矩阵计算, 在每一步迭代结束时, 做平衡调整以控制计算稳定性。迭代可产生与模式同步的动力初始化过程, 由 Bretseth 方案计算背景场与观测之间的差异, 根据数据密集程度调整计算。

5 个变量直接在  $\sigma_z$  坐标中进行计算:  $u$ 、 $v$ 、气压、潜热、比湿, 其他变量在前向积分中加入。垂直速度  $w$  由水平风和连续方程预报诊断, 还有一个约束条件, 即风速法向在模式顶、底边界或瑞利散

射层底部设为 0, 其中任何不连续因素作为水平辐散随高度的误差处理, 当这些误差计算后, 再对  $w$  进行调整。

Bratseth 迭代方案需要估计观测误差, 这些误差分析放在 Adas/Data 中供计算调用。上层大气观测误差视为高度的函数。

ADAS 可对地面、高空、无线电探空仪、风廓线、WSR-88D 雷达资料、GOES 卫星和船舶等各类可利用的中尺度气象数据进行客观分析并插值到 ARPS 模式, 同时保持和模式的协调。它在垂直坐标方向是完全弹性的, 可处理单层或多层数据, 含有质量控制: 格点背景场插值到站点后与站点观测之间对比, 考虑到不可避免的数据代表性误差和仪器误差, 二者差值的阈值取的略高。

### 3.2 云分析

云分析过程是 ADAS 包含的一个复杂的模块, 它使用观测的云高、云量、雷达、卫星资料等对云内微物理过程进行分析, 可以在一模块中设定阈值, 控制影响最终输出的变量类型和数量。云分析可以判断层云、层积云和积云类型, 估计云内垂直速度。

### 3.3 试验个例选择

试验个例选择 2005 年 8 月热带风暴台风“麦莎”天气过程, 以未登陆时的洋面降水研究为主。

2005-08-05 14:00, 第 9 号台风“麦莎”的中心位于(123.2°E, 26.6°N)。台风的外围云系已经影响到中国台湾、浙江、福建等地, 台风环流结构清晰, 眼区能够识别。台风中心附近最大风速在 40m/s, 参照其他微波图像分析, 台风降雨云系不对称, 较强降雨发生在眼区以东。

据 TOM 新闻网介绍(2005), 受“麦莎”影响, 2008-08-05 晚浙江省台州市玉环县(121.3°E, 28.3°N)境内风雨交加, 20:00 “麦莎”中心位置已达到上海偏南 430km 的海面, 以 17km/h 速度向西北方向移动。其移动路径如图 1。

### 3.4 TCFM 云导风资料

使用 FY2-C 卫星资料, 通过 TCFM 导风技术得到 2005-08-05 1400UTC、2000UTC 的水汽和红外云图导风资料。资料内容包含风矢的风速、风向、所在的经纬度、气压值。范围是(90°E, 140.8°E)、(0.4°N, 51.2°N)。

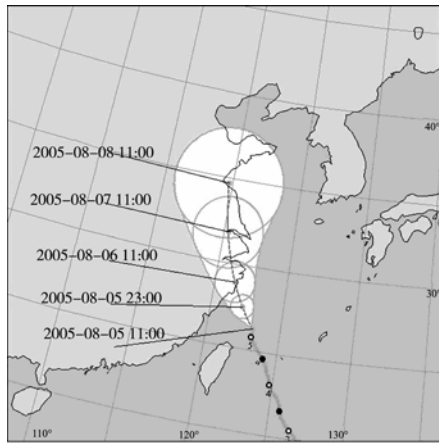


图 1 麦莎移动路径(北京时间)

### 3.5 试验方案

考虑到个例的实际情况和资料状况, 试验时段选为 2005-08-05 1200UTC—1800UTC, 共 6h。在 14:00 UTC 加入云导风资料。背景场资料为同时间的 NCEP1°×1°再分析资料。

模式取 2 重嵌套, 中心位置在 (122.152°E, 31.041°N), 外层格距 36km, 内层 12km, 水平格点数均为 121×121, 内、外层垂直均为 35 层, 格距分别是 400m 和 500m。内外层取暖雨微物理方案, 使用 Kain-Fritsch 积云对流参数化。以粗网格每 1h 的输出结果为内层的侧边界。

云导风资料作为探空资料在细网格加入。根据每个点的云顶气压值, 由表 1 得到大致的高度值, 把温度和湿度露点差设为缺测。由此, 细网格内新增探空站位置分布如图 2。

表 1 各标准等压面高度范围

气压层/hPa	高度范围/m
1000	-650—650
850	500—1800
700	2150—3450
500	4700—6000
400	6100—7700
300	8000—9900
250	9150—11350
200	10550—13050
150	12150—14950
100	13950—17050

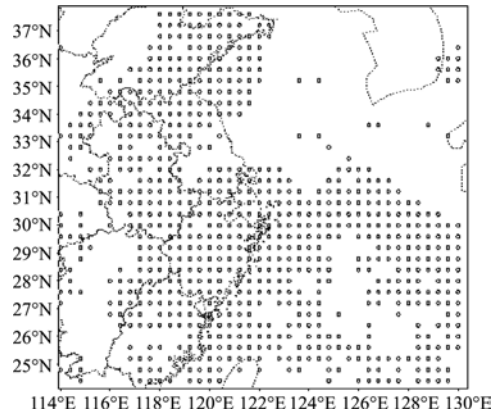


图 2 由云导风资料确定的细网格探空位置

## 4 试验结果分析

### 4.1 云水和垂直速度

1400UTC 云导风资料同化对模式的水汽场没有影响, 同化和非同化试验得到的云水含量基本相同。但是对于垂直速度场, 同化和非同化试验结果有明显差异。如图 3。

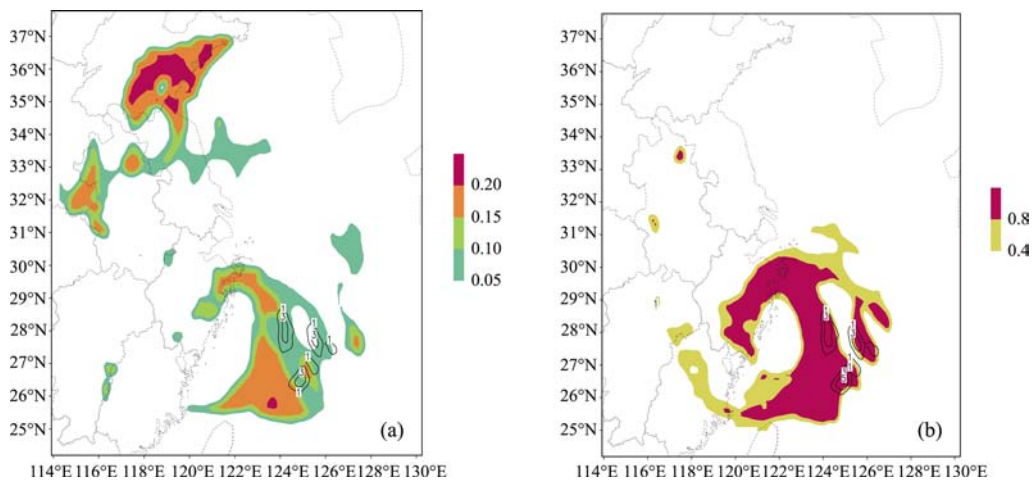


图 3 同化和非同化试验的垂直速度差值(等值线, 单位: m/s)和云水含量(阴影区, 单位:  $10^{-3}$ g/kg)  
(a) 2km 高度; (b) 6km 高度

由图 3 可见, 由于在 1400UTC 加入了云导风资料, 导致模式模拟在 2km, 6km 处的台风眼壁区东部出现强上升运动(非同化试验的对应位置没有速度上升运动), 速度达到 3m/s 左右; 且不论同化、非同化试验对应该位置有云水混合比的大值区, 呈反时针方向旋转, 根据 3.3 的台风“麦莎”介绍和图 1, 该区域基本是台风轮廓分布。

进一步分析表明, 1400UTC 加入云导风资料后, 在台风眼壁区东部的垂直速度强上升气流一直维持至模拟结束的 1800UTC, 表明了台风眼壁区域的强烈中尺度活动。图 4 给出了 1800UTC 时的同化与非同化试验的垂直速度差值, 该  $w$  差值在积分进行了 4h 之后仍然保持在 3m/s 左右, 且位置不变。

对于台风, 在台风眼壁区域, 空气具有非常强烈的上升运动, 是风雨最强烈的地区。热带气旋的最大降水和破坏性的风力常常发生在这里。而本研究同化试验正好说明了这一结论。

图 5 给出了 1200UTC—1800UTC 时的同化试验降水分布, 由图可见降水分布不对称, 主要降水区域位于台风眼壁区的东部。6h 内对浙江省玉环县产生降水超过 25mm。

#### 4.2 降水和水平风场

就逐时输出的同化和非同化试验的降水差值来看, 一些结果是有意义的。如图 6, 14:00 开始的同化与非同化试验模拟的逐时降水差值和对应

的 2km 处水平风场。图 6 中的水平风场均由同化试验得到。

由图 6 可见, 台风眼位置与图 1 一致。在台风眼壁区的风速达到 30m/s 以上, 4h 之内台风明显向西移动, 约有  $0.8^\circ$ , 向北移动不显著。可以粗略估计台风移速为 20km/h。这与本文第 3.3 节对台风的描述相符。同化试验加入云导风后逐时降水与非同化试验差值的分布位于台风眼壁内(图中阴影部分), 达到 10mm 左右, 呈螺旋状分布, 且主要位于眼壁区的东部。

## 5 结 论

本次 TCFM 技术云导风资料的同化试验, 对卫星遥感资料同化应用进行了有效尝试。主要结论如下:

(1) 云导风同化试验可以有效调整初始同化时刻的垂直风场, 使在台风眼壁区域出现强烈的上升运动, 且这种特征一直持续 4h, 至模拟结束。配合此处模式模拟得到的水汽中心, 为台风眼壁区的强风暴、降雨创造了条件。

(2) 从同化和非同化试验模拟的逐时降水差值分布来看, 同化试验对于台风眼壁区的螺旋雨带贡献显著, 特别是眼壁区东部。说明同化试验不仅有效调整了模式的垂直速度场, 还对降水模拟有了明显改善。

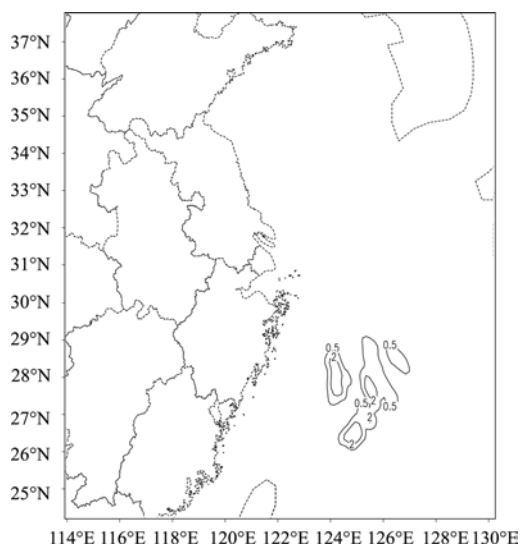


图 4 1800UTC 同化与非同化试验的  $w$  差值 (2km 处, 单位: m/s)

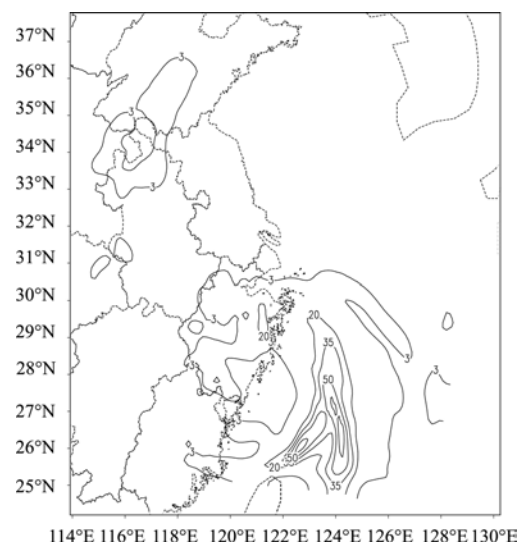


图 5 1200UTC-1800UTC 同化试验的 6h 降水分布 (单位: mm)

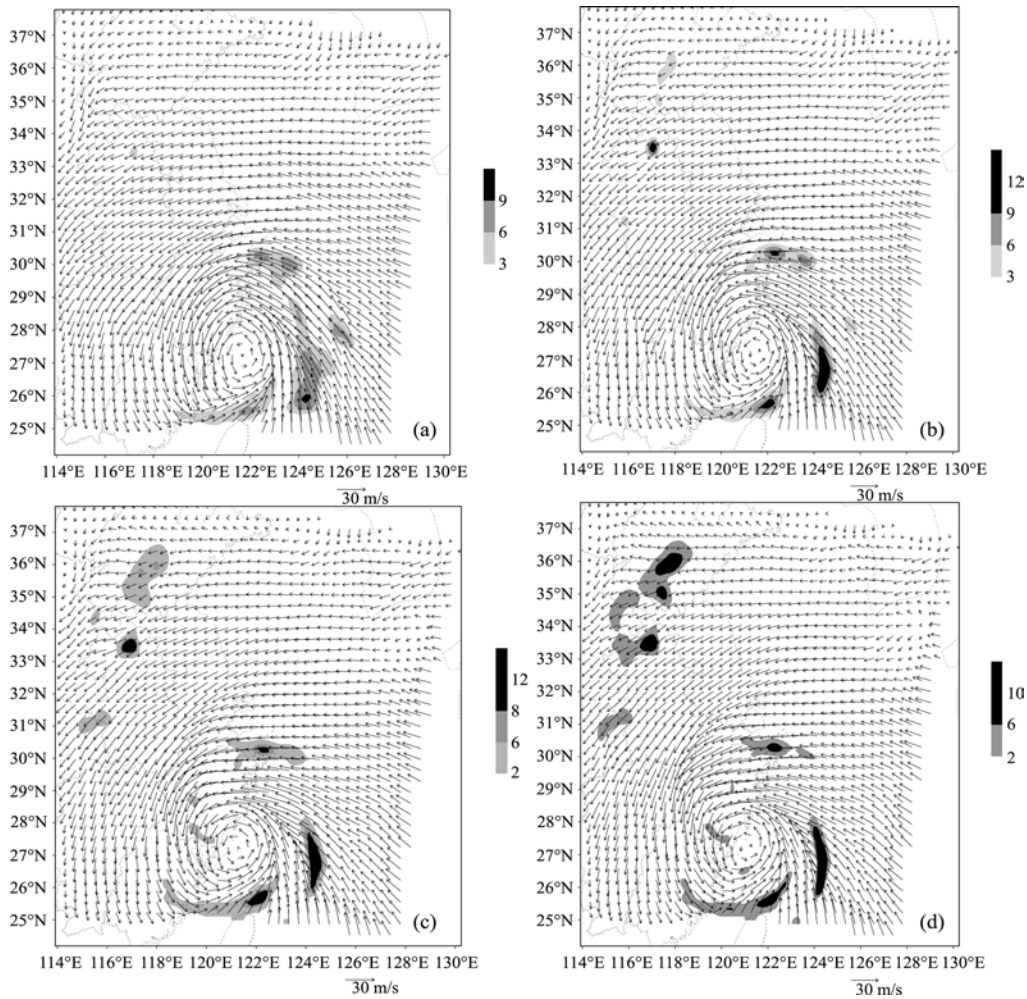


图 6 同化与非同化试验逐时降水差(阴影区, 单位: mm)和 2km 高度处的水平风场  
(a)1500UTC; (b)1600UTC; (c)1700UTC; (d)1800UTC

(3) 同化试验对于水平风场和水汽场的改进效果不大。模拟试验本身对于台风位置、移速、移向的模拟已经可以显现“麦莎”台风的特征。

本试验资料较少, 但对卫星资料风场计算技术、同化研究试验和可行性分析, 是一次很好的尝试。

## REFERENCES

- Bratseth A M. 1986. Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus*, **38A**: 439—447
- Chen W M. 2003. *Satellite Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press
- Kidder S Q and Vonder Haar T H. 1995. *Satellite Meteorology: An Introduction*. New York: Academic Press
- Li R. 2005. The typhoon Masta landed onto ground. [http://news.tom.com/hot/maisha/\(3 Jan, 2008\)](http://news.tom.com/hot/maisha/(3 Jan, 2008))
- Purdum J F W. 1996. Detailed cloud motions from satellite imagery taken at thirty second, one and three minute intervals. Proc. to the 3<sup>rd</sup> International Wind Workshop. Ascona, Switzerland, 10—12 June, EUM P-1: 137—145
- Schmetz J, Holmlund K, Hoffman J, Strauss B, Mamon B, Gaertner V, Koch A and Van De B L. 1993. Operational cloud-motion winds from Meteosat infrared images. *Journal of Applied Meteorology*, **32(7)**: 1206—1225
- Shenk W E. 1991. Suggestion for improving the derivation of winds from geosynchronous satellites. *Global and Planetary Change*, **4(1)**: 165—171
- Sun L, Wang Z H and Xu J M. 2004. A numerical simulation study on the 2D Fourier phase analysis technique for cloud motion winds. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, **27(2)**: 211—216
- Tomassini M, Kelly G and Saunders R. 1997. Use and Impact of Satellite Atmospheric Motion Winds on ECMWF Analyses and Forecasts. Eumetsat/Ecmwf research report No. 6
- Velden C S, Olander T L and Wazong S. 1998. The impact of multispectral GOES-8 wind information on atlantic tropical cyclone forecasts in 1995. Part I: dataset methodology, descrip-

- tion, case analysis. *Monthly Weather Review*, **126**(5): 1202—1218
- Wang Y F, Wang B, Ma G and Wang Y S. 2003. The influence of four dimensional assimilation with multi-observations on typhoon forecast. *Chinese Science Bulletin*, **48**(2): 82—86
- Wang Z H, Browning K A and Kelly G A. 1997. Verification of the Tracking Technique Used in an Experimental Cloud Motion Wind Inferring System. JCOMM Report. University of Reading
- Wang Z H and Zhou J. 2000. A preliminary study of fourier series analysis for cloud tracking with GOES high temporal resolution images. *Acta Meteorologica Sinica*, **14**(1): 82—94
- Wnag D L, Liang X D and Duan Y H. 2005. Impact of four-dimensional variational data assimilation of the cloud drift wind data on tropical cyclone track numerical forecast. *ACTA Meteorologica Sinica*, **63**(3): 351—358
- Xiao Q N, Zou X, Pondecia M, Shapiro M A and Velden C. 2002. Impact of GMS-5 and GOES-9 satellite-derived winds on the prediction of a NORPEX extratropical cyclone. *Monthly Weather Review*, **130**(3): 507—528
- Zhang S F and Wang S W. 1999. Experiments using satellite cloud motion wind on typhoon forecast. *Journal of Tropical Meteorology*, **15**(4): 347—355
- Zhu P, Wang Z H and Xu J M. 2007. Introduction to TCFM technique for tracking cloud and a preliminary experiment. *Journal of Remote Sensing*, **11**(4): 538—544

#### 附中文参考文献

- 陈渭民. 2003. 卫星气象学. 北京: 气象出版社
- 李荣. 2005. 台风麦莎在沿海登陆. <http://news.tom.com/hot/maisha/> (2008-01-03)
- 孙林, 王振会, 许建明. 2004. 卫星导风的二维傅里叶相位分析技术初步研究. *南京气象学院报*, **27** (2): 211—216
- 王栋梁, 梁旭东, 端义宏. 2005. 云迹风在热带气旋路径数值预报中的应用研究. *气象学报*, **63**(3): 351—358
- 王云峰, 王斌, 马刚, 王雨顺. 2003. 多种观测资料的四维变分同化对台风路径预报的影响. *科学通报*, **48**(增 2): 82—86
- 张守峰, 王诗文. 1999. 应用卫星云导风对于台风路径预报试验. *热带气象学报*, **15**(4): 347—355
- 朱平, 王振会, 许建明. 2007. TCFM 导风技术介绍及其初步试验研究. *遥感学报*, **11**(4): 538—544