

# 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验<sup>\*</sup>

张诚忠 万齐林 丁伟钰 陈子通 黄燕燕

ZHANG Chengzhong WAN Qilin DING Weiyu CHEN Zitong HUANG Yanyan

广州热带海洋气象研究所, 广州, 510080

*Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China*

2010-01-07 收稿, 2011-03-27 改回.

**Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Ding Weiyu, Chen Zitong, Huang Yanyan. 2012. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of Typhoon Morakot. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(1):30-38**

**Abstract** The experiment deploying dropsonde was, for the first time in mainland China, launched on 7 August 2009 over the South China Sea. Eleven dropsondes are released when the aircraft flew across the relatively thin cloud zone between Typhoon Morakot and the tropical depression Goni. Based on the dropsonde data taken from this experiment, the reliability of dropsonde data is tested, then a preliminary analysis is done on the characteristics of atmosphere such as the wind field and humidity field over the South China Sea. The feature of wind profile in the southwestern part of Morakot is revealed as a deep layer of southwestern airflow from low to middle level of the troposphere, whereas the feature of the humidity field exhibits both relatively low humidity at the lower and upper level of the troposphere, and relatively moist at the middle level. To investigate the impact of the dropsonde data upon the typhoon's track forecast, two experiments are designed. One experiment with the initial condition obtained with the assimilation of dropsonde data (the assimilation experiment) and the other without it (the control experiment), are run for 72 hours by using the GRAPES model, respectively. The results are shown as follows. (1) With the assimilation of dropsonde data, southwesterly weakens below 800 hPa, then strengthens from 800 hPa to 100 hPa, with the humidity weakening below 500 hPa at initial time. (2) The difference of wind field between with and without the assimilation of data at the initial time propagates to downstream regions with the increase of integration time, affecting the environment of typhoon and modifying the typhoon steering flow. The forecast track error of typhoon is reduced by 18% in 48 hours with the assimilation of dropsonde data. It is considered that the assimilation of dropsonde data released in the upstream regions of Typhoon Morakot improves the typhoon forecast track in this case.

**Key words** Dropsonde data, Assimilation experiment, Typhoon track forecast

**摘 要** 2009年8月7日中国大陆举行了首次利用机载下投式探空仪观测台风的试验, 飞机在台风莫拉克与天鹅之间的云带相对稀薄区释放11个下投式探空仪。基于下投探空观测资料、常规探空资料和 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的NCEP再分析资料, 分析下投探空资料的可用性, 并以下投探空资料初步分析了两台风间南海上空的风场、湿度场等大气特性; 分别进行了有无同化下投探空为初始场的GRAPES模式的模拟试验, 以了解下投探空资料对台风莫拉克预报的影响作用。初步结论表明, 台风天鹅与莫拉克之间的南海上空对流层中低层为深厚的西南气流, 对流层低层及高层湿度小, 中间层大; 同化下投探空资料后, 观测地区(下投探空点及其附近)800 hPa以下西南风减弱, 以上加强, 湿度中低层减小; 有无同化下投探空资料的初值场差异随模式积分向下游传播, 影响台风的环境场, 改变了台风的引导气流; 同化后500 hPa台风引导气流偏东、偏北分量加强, 使台风的路径更接近实况路径, 48 h台风路径预报误差比原来减少18%。

**关键词** 下投探空资料, 同化试验, 台风路径预报

**中图法分类号** P435.2

<sup>\*</sup> 资助课题: 公益性行业科研专项(GYHY200706014, GYHY291996016)、国家自然科学基金项目(41075040, 40775058, 41075083)。

作者简介: 张诚忠, 主要从事数值预报、资料同化与中小尺度研究。E-mail: cz\_zh@grmc.gov.cn

## 1 引言

数值模式台风路径预报的准确性,既依赖于模式的性能,例如对模式动力框架的设计、算法选择,以及对大气物理过程的真实描述程度等,又与模式初值场的质量有关。尤其对于中尺度对流系统的短时临近预报,模式初值尤为关键(Zhang, et al, 1986)。热带气旋(或台风)往往在观测稀疏或根本没有观测的海洋上活动,要准确地预报出台风路径和强度,必须加强对海洋地区的观测,充分有效同化融合这些资料,为模式提供高质量的初值场(Aber-son, 2003)。

20 世纪末,为了提高有重大影响天气短时预报的准确性,例如,对台风登陆点及其伴随对流系统的预报,Snyder(1996)提出在分析误差或预报误差较大地区的某一特定上游区域(关键区)增加额外观测,即所谓的目标或适应性观测,以此减少包括台风路径在内的预报误差。美国北太平洋计划(NOR-PEX)中为了提高对强厄尔尼诺事件的季节性预报和对风暴影响美国西海岸前 1—4 h 预报的准确性,在夏威夷和阿拉斯加地区之间进行了两周(1998 年 1 月 14 日—2 月 27 日)的下投探空资料收集工作。在同化这些资料后,美国西北部地区 2 h 内的平均预报误差减少了 10%,个别例子减少了 50%(Lang-land, et al, 1999)。Szunyogh 等(2000)利用 WSR00(2000 Winter Storm Reconnaissance)计划中的资料研究了下投探空资料对下游地区系统预报的影响,得出了影响信号以每天 30°的速度向东传播等有意义的结果。同样,为了改善登陆台湾岛的台风路径及强度预报,2002—2003 年台湾大学、美国飓风研究部门和 NCEP 科学家联合在台湾附近地区进行了多次的下投探空观测试验。Wu 等(2007)利用 5 个数值模式(4 个业务模式和 1 个研究模式)评估了下投探空资料对台风路径预报的影响,认为同化资料后对降低路径预报误差有一定的改进。

下投式探空仪对台风的观测试验在中国大陆始于 2009 年。2009 年 8 月 7 日和 9 日,由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室主持的国家重点基础研究发展计划 973 项目“我国南方致洪暴雨

监测与预测的理论和研究方法研究”和气象行业专项“热带西太平洋观测试验与我国高影响天气可预报性研究”项目,联合开展了中国大陆首次利用机载下投式探空仪对台风“天鹅”和“莫拉克”进行了两次大规模的观测试验。本文拟利用 8 月 7 日观测的 11 个下投探空,初步分析台风外围南海上空大气层结特性及该资料对台风莫拉克路径预报的影响,为以后的台风路径预报和研究积累经验。

## 2 资料来源及处理

### 2.1 资料简介

2009 年 8 月 7 日试验飞行路线设定在台风莫拉克(Morakot)与天鹅(Goni)之间的云带相对稀薄区,03 时 39 分—04 时 48 分(世界时,下同),由北往南及回折的航程中共投 11 个有效的下投式探空仪(图 1)。下投式探空仪在 8.5 km 的高度以约 11 m/s 的速度下降,探测风、湿度、气压等要素。

### 2.2 台风外围大气温、湿度特点

为了了解下投探空资料是否可用,选取香港(45004)和西沙站(59981)等常规的探空站与距其最近的下投探空资料进行对比。香港站常规探空(图 2a)与其最邻近的下投探空(图 2b)数据均显示 500—400 hPa 有明显的干层,而在 500 hPa 以下,温度-露点差均在 3—4℃以内,湿度很高。因香港站处于台风的西侧,风向以东北偏东风为主。下投探空点处于台风的西偏南地区,对流层中低层为深厚的西南气流控制,数据合理。西沙站分析结果类似,不再赘述。综上分析,下投探空资料是可用的。

飞行航线处于台风莫拉克的西偏南地区,从由北往南飞行过程中下投的 6 个探空仪资料组成的大气风场、相对湿度垂直剖面(图 3)可见,风场廓线上 500 hPa 以下从北到南为一致深厚的西南气流,风速为 12—20 m/s;相对湿度廓线呈南北两侧湿度高而中间低的分布,925—700 hPa 的对流层低层相对湿度比 700—500 hPa 的对流层中层低,450 hPa 以上大气为湿度低于 40%的干层。其中,在最靠近陆地的湿度从低层到高层大气湿度大,均大于 75%。从第 2 探空点(19.14°N)往南推进,850—925 hPa 的大气低层逐渐变干。到 17.88°N 处,小于 75%的相对湿度线范围已上升至 700 hPa。17.47°—

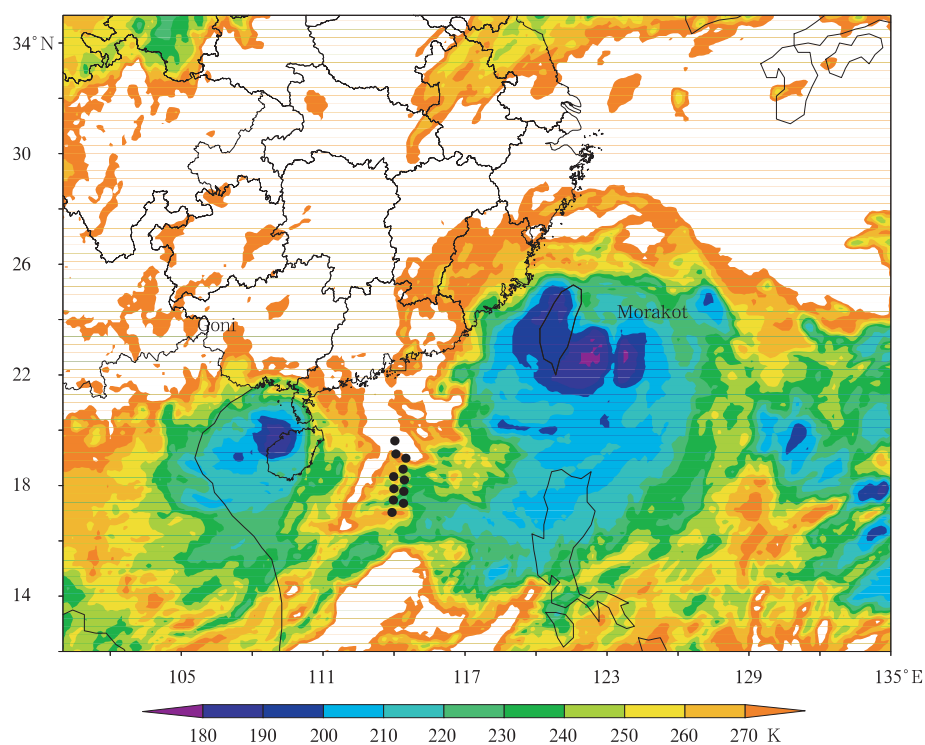


图1 2009年8月7日05时TBB

(黑圆点为下投探空位置)

Fig. 1 TBB field at 05:00 UTC 07 Aug 2009 and locations of dropsonde  
(The black dot denotes the location of dropsonde, the color bar indicates the TBB)

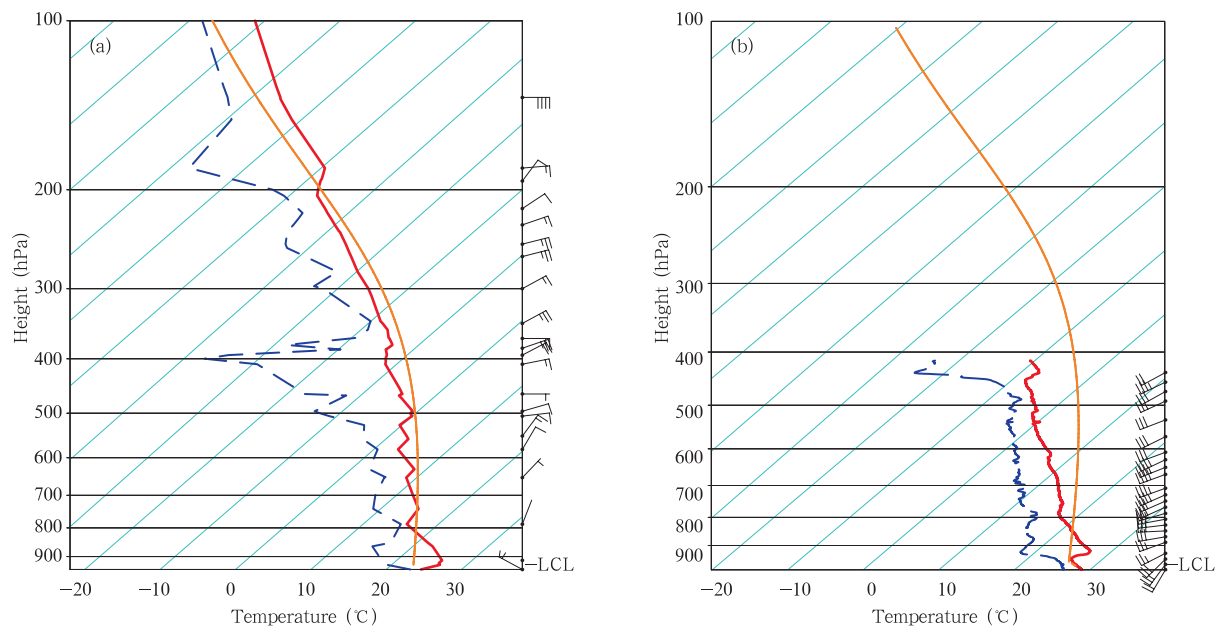


图2 (a)香港站(45004)常规探空(22.3°N, 114.2°E)与(b)距香港站最近的下投探空(19.6°N, 114.1°E)资料对比  
(蓝色为露点温度、红色为温度, 黄色为气块从抬升凝结高的上升轨迹)

Fig. 2 Skew  $T$ -log  $p$  plots based on the conventional sounding data at Hong Kong (a) and the dropsonde data near Hong Kong (b)

(Blue line denotes dewpoint, red one denotes temperature, and yellow one indicates the track of air parcel left from the LCL)

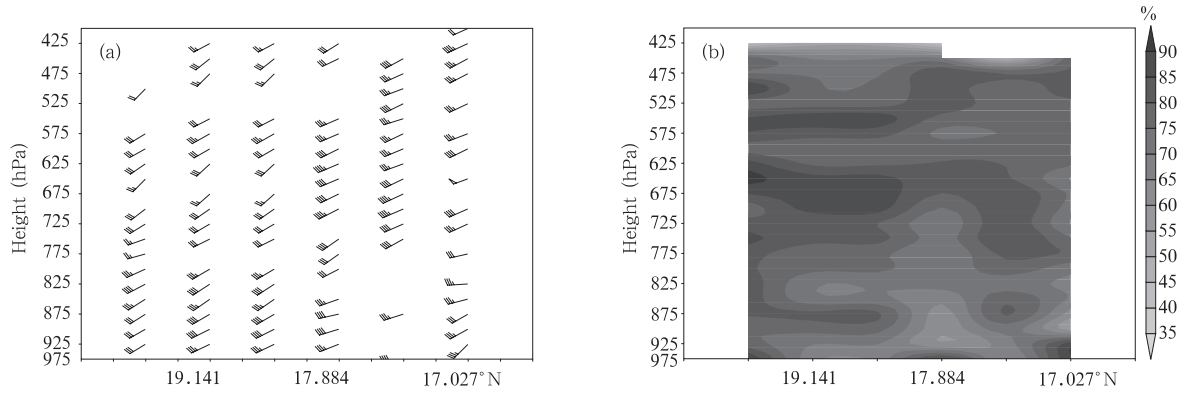


图3 经向大气剖面图(见图1中左排的下投探空点)

(a. 风场, b. 相对湿度)

Fig. 3 Height-longitudinal cross sections along the left column of dropsonde locations shown in Fig. 1

(a) wind field, (b) relatively humidity

17.02°N, 低层湿度重新逐渐变湿。温度廓线分布与湿度相反(图略), 随着向南推进, 500 hPa 以下温度逐渐升高, 500 hPa 以上温度少变。

以上分析反映在远离台风莫拉克的西南侧风场从对流层低层到中层为一致的深厚西南急流, 这为台风的维持发展提供动力和水汽输送条件。湿度廓线场反映了台风外围因气流下沉导致低层湿度低、温度高, 与已有研究结果一致(陈联寿等, 1979)。

### 3 模拟试验设计及结果分析

为了便于比较下投探空对台风路径及强度的影响, 设计了控制与同化两种试验。以  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料为初值场与边界条件, 应用中国气象局中国气象科学研究院研发的 GRAPES 模式(陈德辉等, 2008)从 00 时开始积分 24 h。将生成的 05 时的预报场分别为控制试验(Ctrl)提供初值场和同化试验(Assi)提供背景场。应用 GRAPES-3D-Var(张华等, 2004; 马旭林等, 2009)系统同化资料得到分析场后, 以基于 GRAPES 模式的广州区域气象中心台风模式积分 72 h。

#### 3.1 下投探空资料的同化

本文所用的三维变分同化系统为中国气象科学研究院开发的 GRAPES-3D-Var, 其目标函数及其梯度定义为

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}[(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_b)^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_b)] \quad (1)$$

$$\nabla J = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \mathbf{H}^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_b) \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为模式变量场;  $\mathbf{x}_b$  为背景场;  $\mathbf{B}$  为背景误差协方差矩阵;  $\mathbf{O}$  为观测误差协方差矩阵;  $\mathbf{y}_b$  为观测场;  $\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x})$  为观测算子;  $\mathbf{H}^T$  为观测算子的伴随算子。按上述方案将 11 个下投探空资料进行同化。

分析背景场与观测资料的偏差随高度分布(图4)可知, 观测风场与背景场的偏差为  $-5 \sim 5$  m/s, 低层至 450 hPa 偏差分布以 0 为轴对称, 大部分偏差值较小, 其中, 偏差为 0 的出现频率最大, 说明观测资料与背景场的偏差遵从高斯分布, 符合三维变分同化要求的前提条件。考虑到下投探空在中国第一次应用, 且观测量少, 文中的观测误差与 Langland 等(1999)设定的一致, 即 1000—700 hPa 的风场观测误差为 2.8 m/s, 500—400 hPa 观测误差设定为 3 m/s。观测湿度总体比背景场偏小, 因此, 同化后该地区的湿度比背景场要干。在同化中湿度的观测误差采用 GRAPES-3D-Var 的默认值。

从同化下投探空资料后的 850 hPa 分析场(图5)可知, 在衰减的热带低压天鹅南侧为明显的湿度低值区, 下投探空点的比湿值均小于 14 g/kg, 为相对的干区。热带低压天鹅与台风莫拉克环流过渡带风速不大。分析下投探空观测区最南端下投探空点(17°N, 113.9°E)的分析增量(图6)可知, 风场的  $u$  分量, 除了在 700 及 500 hPa 以外, 各层均为正值, 即整层西风分量加大; 而  $v$  分量在 800 hPa 以下为负值, 以上为正值, 反映了同化后低层南风减小, 高层南风增大。因此, 同化观测资料后, 在台风莫拉克

与天鹅间的区域大气, 800 hPa 以下西南气流比背景场偏弱, 以上西南气流加强, 风场增量平面图(图略)上也显示出同样的结果。而显示整层的湿度增量为负值(图 6c), 显然同化后观测区内的湿度变

小。湿度场增量平面图(图略)同样显示同化资料后, 在低压天鹅南部的湿度变得更低, 促使低压衰减。同时, 台风莫拉克的西部、南部的湿度增加。这些订正无疑为模拟台风莫拉克的维持发展创造有

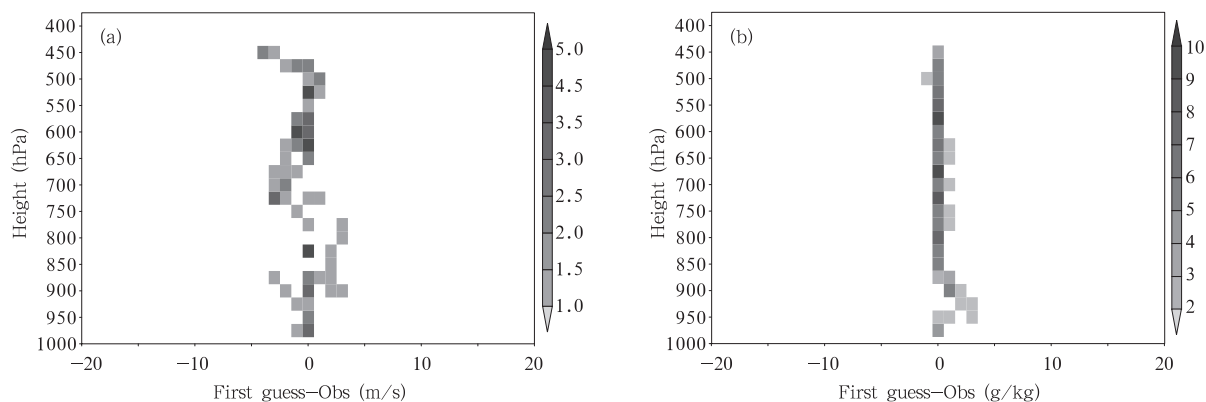


图 4 观测场与背景场的偏差随高度分布

(a. 风场, b. 比湿场; 灰阶代表偏差值出现的频数)

Fig. 4 Distribution of the difference with height between the observation and background

(The gray bar denotes appearance frequency of the magnitude of difference

(a. wind field, b. specific humidity))

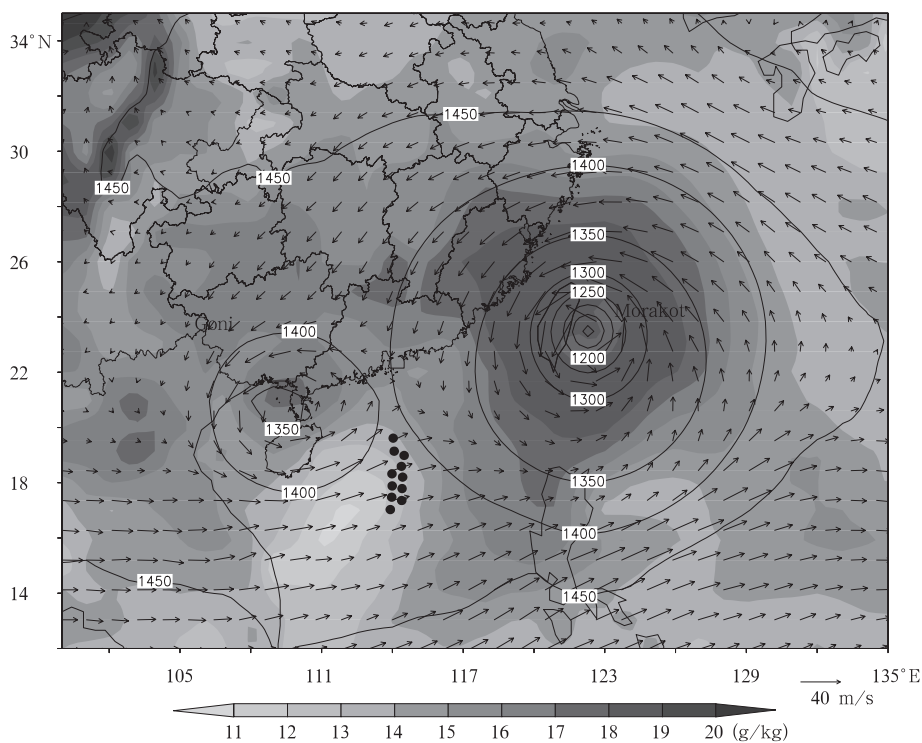


图 5 同化下投探空资料后的 850 hPa 分析场

(等值线为位势高度, 单位: gpm; 箭头线为风矢, 灰阶表示比湿, 黑原点为下投探空点)

Fig. 5 Analysis field at 850 hPa with the assimilation of dropsonde data

(contour denotes the geopotential height, arrow line indicates wind vector, grey bar denotes the specific humidity and the black dot denotes the location of dropsonde)

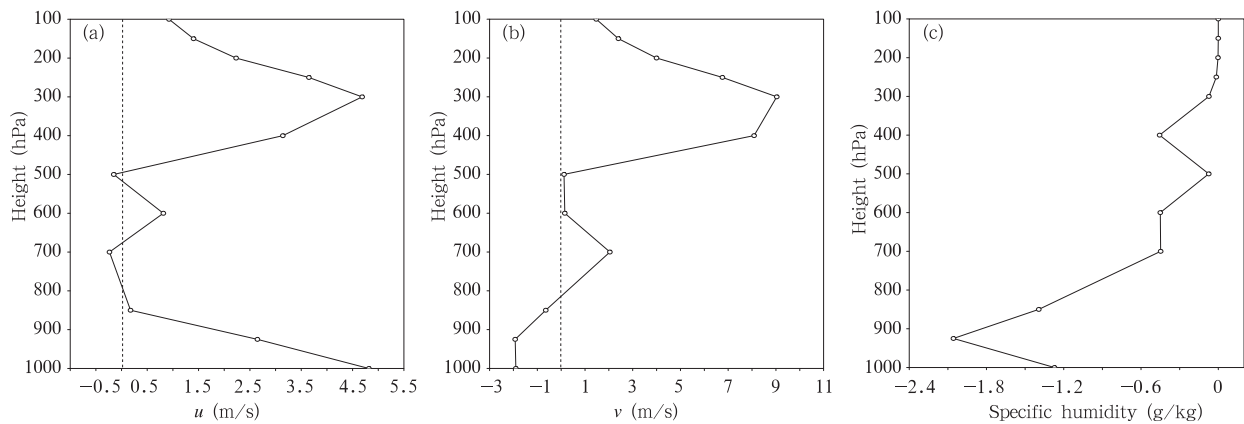


图 6 下投探空点(17°N,113.9°E)的分析增量(a.  $u$  分量, b.  $v$  分量, c. 比湿)  
Fig. 6 Analysis increment at the location (17°N, 113.9°E) of dropsonde  
(a.  $u$  component, b.  $v$  component, c. specific humidity)

利条件,同时也加速天鹅的减弱。高度场的增量图(图略)也显示出同样的信号,不再一一列举。

### 3.2 模拟结果分析

从两次模拟试验和实况的台风路径(图 7)可以看出,在 48 h 内,同化试验的台风路径始终比控制试验的路径偏东,48—72 h 转向偏北、偏东,更接近实况的台风路径。从预报误差(图 8a)可知,控制试验 6—24 h 预报的最大误差为 91 km。试验的最大误差出现在 30 h 的预报中,为 137 km。同化试验除了在 66 h 预报误差比控制试验偏大超过 30 km 以外,其他时次的预报误差均比控制试验小。显然,同化下投探空资料后,对 72 h 内的台风路径预报有明显改进。其中,48 h 内台风路径预报误差比原来减少了 18%。

对台风强度预报(图 8b),两次试验在 54 h 以前

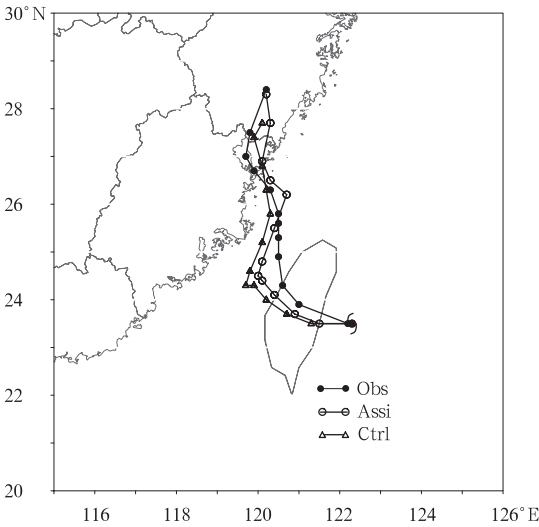


图 7 台风莫拉克路径  
Fig. 7 Track of Typhoon Morakot

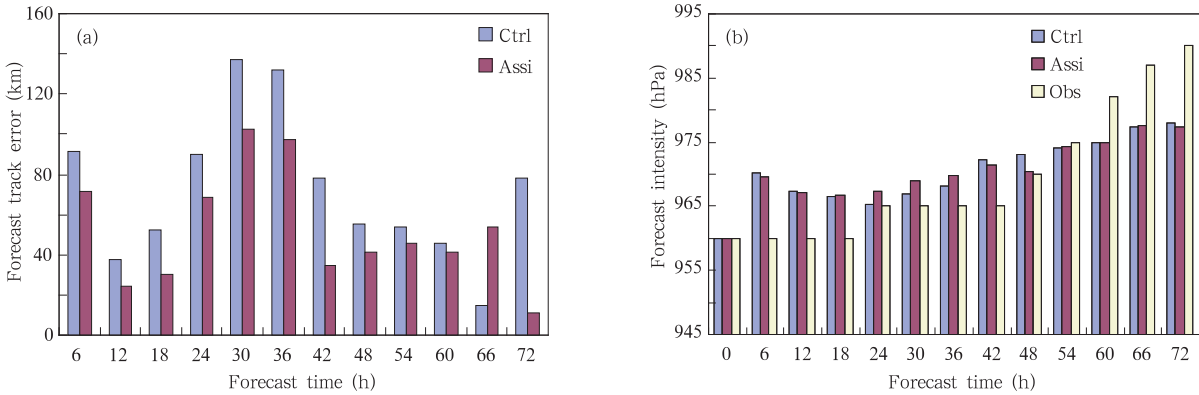


图 8 控制试验和同化试验路径预报误差(a)和强度预报对比(b)  
Fig. 8 Forecast track errors (a) and intensity (b) for the the control and assimilation experiments

预报强度比实况偏弱,之后则比实况偏强。在 72 h 内的预报中,除了在 24—36 h 同化试验比控制试验稍差,其他时间均比控制试验更接近实况(图 8b)。两种试验间的强度差异很小,预示同化探空资料有一定的作用,但效果不明显。

关于同化下投探空后对其附近及下游的预报影响,以前已总结出不少有意义的结论。如 Langland 等(1999)认为,模式初值场的差异将随着模式的积分而向一定的方向传播,从而影响下游的预报。Szunyogh 等(2002)明确提出了同化下投探空后,其影响信号以每天  $30^\circ$  的速度向下游传播,从而对下游的预报误差起到正面改进作用。为此,本文给出

两次试验 6、12、18、24 h 预报风场的偏差分布(图 9),以了解下投探空如何影响台风路径。

在初值时刻 850 hPa 风场偏差大值区出现在下投探空的位置(大于  $2\text{ m/s}$ )及其北侧(图略)。模式积分 6 h 后,风场偏差大于  $2\text{ m/s}$ (图中的阴影部分)迅速传播到南海的大部分地区及台湾海峡西侧(图 9a),12—24 h 预报的偏差已传播到台风范围附近(图 9b、c、d),在随后的 60 h,风偏差大值区仍出现在台湾及其东部地区(图略)。另外一个偏差大值中心出现在已减弱的热带低压天鹄附近。显然,下投探空似乎对有关对流活动地区的预报影响较为敏感。这一结论与 Szunyogh 等(2000)、Moteiki 等(2007)

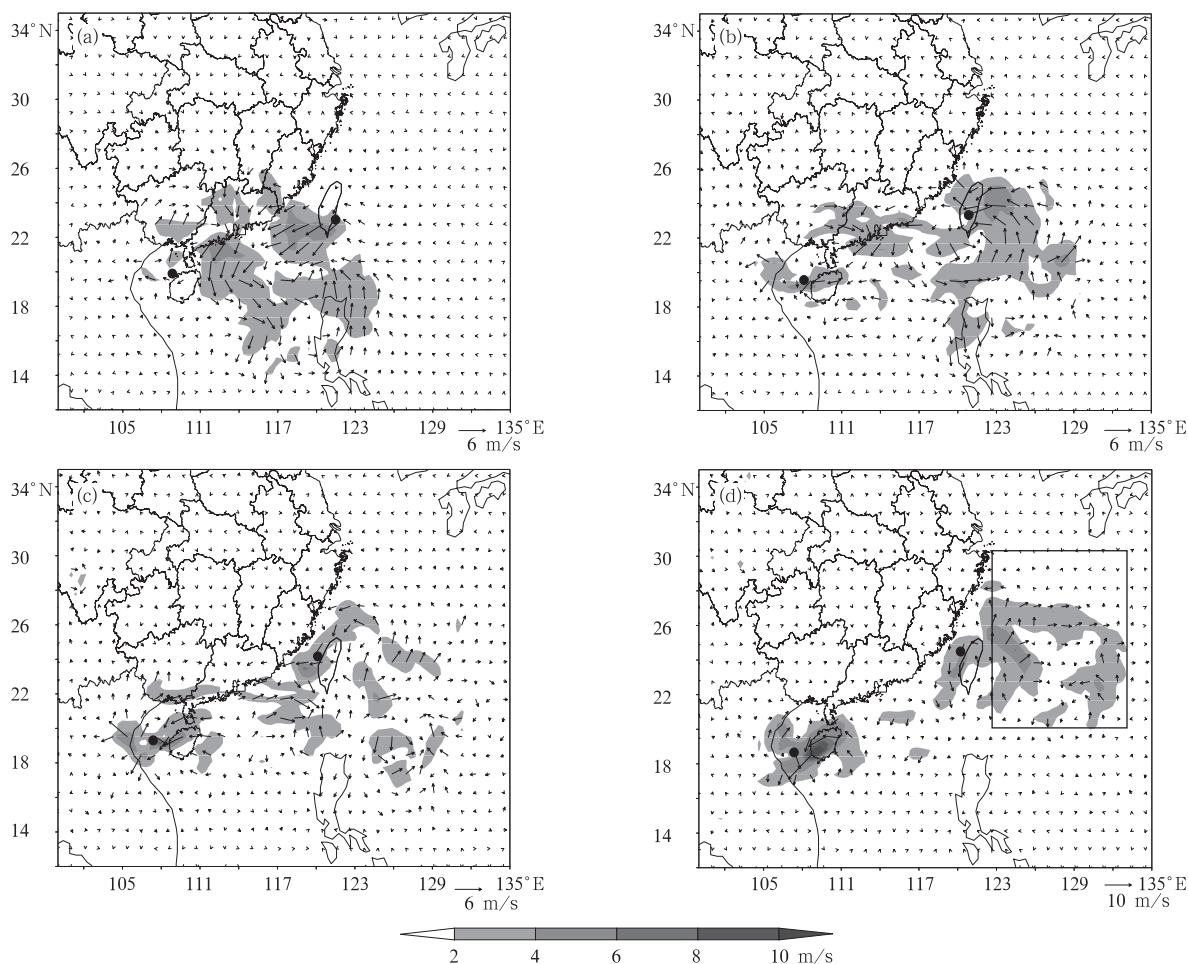


图 9 同化与不同化下投探空的 850 hPa 预报风场偏差

(a、b、c、d. 6、12、18、24 h 预报;黑圆点分别为台风天鹅、莫拉克的位置;

黑方格为计算 500 hPa 引导气流差值的范围(见图 10),图中阴影为风值偏差大于  $2\text{ m/s}$  范围)

Fig. 9 Difference of the wind filed between with and without the assimilation at 850 hPa

(a. 6 h forecast, b. 12 h forecast, c. 18 h frecast, d. 24 h forecast; the black dot denotes the position of Goni or Morakot. Black box in d is used for calculating the difference of the steer flow at 500 hPa as shown in Fig. 10.

The shade denotes the value of the difference greater than  $2\text{ m/s}$ , and color bar indicates the magnitude of the difference)

的研究结果一致。

为了进一步阐明同化下投探空后预报的台风路径为何更接近实况,分析了两次试验台风引导气流偏差(同化试验与控制试验的差值)随时间演变的情况。图 10a、b 分别代表 500 hPa 台风引导气流的东风、北风偏差时间序列。引导气流偏差的计算范围见图 9d 中的黑方框区。如图 10 所示,前 6 h 模式

初值场的偏差影响尚未传播到台风东侧,偏北、偏东风分量偏差小,两试验的路径预报几乎一致(图 7)。12—48 h,500 hPa 偏东、偏北分量中正偏差占主导;尤其在 36—48 h,偏东正偏差明显比偏北分量,此时预报的路径比控制试验的偏东。54 h 前后偏东偏北分量正偏差明显增大,相应的台风路径预报比控制试验的偏北偏东,更接近观测的台风移动路径。

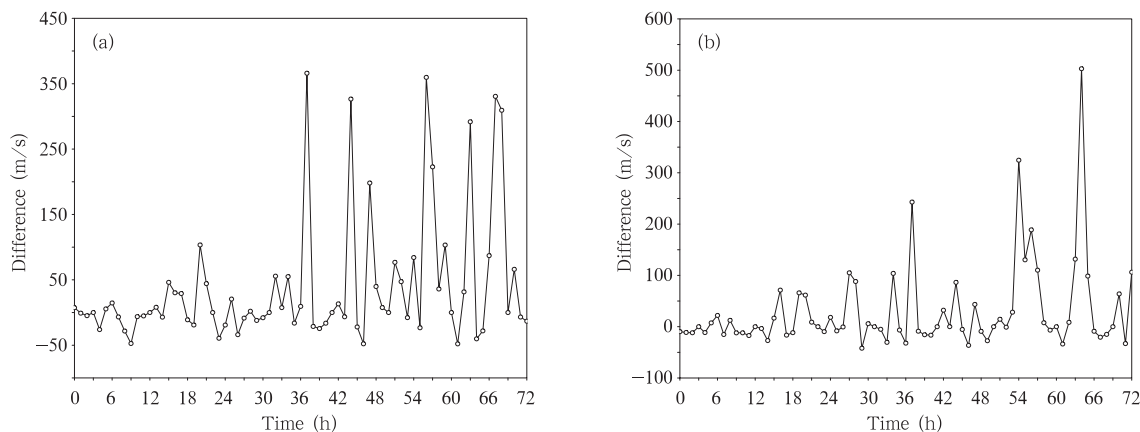


图 10 图 9d 方框内同化与不同化下投探空 500 hPa 预报的引导气流偏差

(a.  $u$  分量偏差, b.  $v$  分量偏差;分量偏差值为图 9d 方框内所有格点偏差的总和)

Fig. 10 Difference of the steer flow between with and without the assimilation at 500 hPa inside the box shown in Fig. 9

(a. difference of  $u$  component, b. difference of  $v$  component; the values for the difference of  $u$ ,  $v$  component are obtained by summing up all of the differences within the black box shown in Fig. 9)

综合以上分析,同化下投探空对这次台风路径的预报有明显改进作用,但对强度的预报作用不大。由于本试验仅限于下投探空资料的应用,要进一步做好台风强度预报,尚需考虑其他遥感资料的综合应用。

#### 4 结 论

2009 年 8 月 7 日 02—05 时,通过在台风莫拉克与天鹅云系空档间释放 11 个下投式探空仪对该地区进行大气垂直廓线的观测。利用该观测资料及常规探空资料分析了下投探空资料的可用性和南海上空台风外围的大气特征,并对下投探空资料对台风路径预报的影响进行初步分析,结论如下:

(1) 沿飞行航线风场为深厚的西南气流,北南两端湿度高、中间低。垂直方向低层(925—700 hPa)湿度介于 60%—70%,中层(700—500 hPa)湿度大于 75%,450 hPa 以上大气湿度小于 40%。这

可能与飞行航线相对台风所处的位置及台风外围下沉气流有关。

(2) 同化下投探空资料后,观测地区(下投探空点及其附近) 800 hPa 以下西南风分量减弱,以上加强。对流层中低层湿度减小。有无同化资料初值场间的偏差随模式积分向下游传播,改变台风周围的引导气流,影响台风路径:同化后 500 hPa 台风引导气流偏东、偏北分量加强,使台风的路径更接近实况路径,0—48 h 台风路径预报误差比原来减少 18%。下投式探空对改善台风强度预报的作用似乎不明显。

**致 谢:**对参加执行机载下投探空任务的所有观测人员、机组人员付出的辛勤劳动和提供的珍贵观测资料表示敬佩和谢意。同时也对张艳霞提供的 TBB 数据及其处理表示感谢!

#### 参考文献

陈德辉,薛纪善,杨学胜等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度

- 统一数值预报模式总体设计研究. 科学通报, 54(20): 2396-2407
- 马旭林, 庄照荣, 薛纪善等. 2009. GRAPPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展. 气象学报, 67(1): 50-60
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 263pp
- 张华, 薛纪善, 庄世宇等. 2004. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. 气象学报, 62(1): 31-41
- Aberson D. 2003. Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. Mon Wea Rev, 133: 1613-1628
- Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. 1999. The North Pacific experiment(NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. Bull Amer Meteor Soc, 80(7): 1363-1384
- Moteki Q K, Shirooka R C, Yoneyama K, et al. 2007. The impact of the assimilation of dropsonde observations during PA-LAU2005 in ALERA. SOLA, 3: 97-100
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. Bull Amer Meteor Soc, 77: 953-964
- Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 inter storm reconnaissance program. Mon Wea Rev, 128: 3520-3537
- Szunyogh I, Toth Z, Zimin A V, et al. 2002. Propagation of the effect of targeted observations: The 2000 winter storm reconnaissance program. Mon Wea Rev, 130: 1144-1165
- Wu C C, Chou K H, Lin P H, et al. 2007. The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. Wea Forecasting, 22: 1157-1176
- Zhang D L, Fritsch J M. 1986. Case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective systems to varying initial conditions. Mon Wea Rev, 114(12): 2418-2431