

Reprint 1092

飛機偵測資料對南海熱帶氣旋分析與數值模式預報的影響

黃偉健

第 30 屆中國氣象學會年會

中國南京，2013 年 10 月 23-25 日

# 飞机侦测数据对南海热带气旋分析与 数值模式预报的影响

黄伟健

(香港天文台, 中国香港)

## 摘 要

香港天文台与政府飞行服务队自 2011 年起进行专门的探测飞行, 收集南中国海北部热带气旋的气象数据。政府飞行服务队的定翼机配备自动测量仪器, 于特定的飞行高度记录风向, 风速, 温度, 湿度和气压的资料。本文将介绍飞行任务所收集的气象数据分析, 包括 2012 年 7 月 22 日热带气旋韦森特 (1208) 的飞机观测资料。飞机侦测资料对分析风暴中心附近的风力分布, 风暴强度很有帮助, 与其他的观测如卫星的分析相当一致。同时, 本文讨论利用非流体静力模式 (NHM) 进行模式三维变分数据同化和预报实验, 发现飞机资料改进模式分析的风暴的环流与湿度分布, 提升热带气旋 36 至 60 小时的短期预报路径的表现和风暴附近风力的预测, 其中预报路径的误差平均减小了达百分之十五。

**关键词:** 飞机侦测数据, 热带气旋强度分析, 数值天气预报模式。

## 1 引言

每年大约有 12 个热带气旋影响中国南海北部和中部 (10-25 N, 105-120E), 它们带来强风, 暴雨及风暴潮, 影响人口稠密的沿海城市和地区。监测和预测热带气旋的发展和运动, 以及风暴结构和风力分布是非常重要的, 有助对热带气旋引起的潜在影响作出评估, 以便更有效实行准备和预防措施。要更详细监测海域的天气情况, 可以通过安装更多的气象站和观测网络, 和使用遥感观测平台, 如天气雷达和气象卫星资料。不过, 以上的观测系统还未能完全解决观测资料的不足, 譬如从沿岸海域的自动站气象资料只能获得近海面的气象情况, 而且空间覆盖较有限; 卫星资料, 例如微波散射仪 (ASCAT 和 OceanSAT-II 等) 的覆盖范围及时间比较有限, 可能未能配合资料同化的时间。对数值天气预报 (NWP) 模式, 数量有限的观测会影响模式的分析, 令预报包括热带气旋的移动与强度变化等出现偏差。

因应飞机数据能提供高空气象情况和拥有较高的空间分辨率, 为增加热带气旋的观测资料, 文献[1]讨论美国 NOAA 在大西洋和东太平洋使用飞机侦测仪器和下投式探空仪。在西北太平洋, 美国军方从 20 世纪 40 年代后期至 1987 年使用飞机进行热带气旋气象侦测。侦测资料有助分析热带气旋的位置和强度 (文献[2]), 以至短期的预测移动 (文献[3])。近年, 下投式探空仪器亦被使用监测影响台湾及附近海域的热带气旋 (文献[4])。

香港天文台自 2009 年年中以来, 与政府飞行服务队 (Government Flying Service - 下称 GFS) 合作, 在捷流 41 型 (Jetstream 41 - 简称 J-41) 定翼飞机上安装一套气象测量系统, 于香港国际机场 (HKIA) 附近定期收集气象数据。提供位于较低高度的风向风速, 温度和湿度的观测, 以帮助

研究香港国际机场附近发生的低空风切变及湍流过程, 有助验证基于地面气象系统所发出的风切变及湍流预警, 改进和帮助发展相关的自动演算与警报的法则。

政府飞行服务队亦协助香港海上救援协调中心(Maritime Rescue Coordination Centre), 负责覆盖南海的搜索和救援 (search and rescue - SAR) 工作。2009 年 7 月 18 日台风莫拉菲 (0906) 登陆广东东部沿岸前的搜救行动中, 定翼机的气象量度系统所收集的数据, 显示系统在台风附近较恶劣的环境下的观测资料仍具有一定的参考价值, 台风中心气压和风力与其他实际观测相当一致 (文献[5])。在 2011 年, 天文台和政府飞行服务队正式开展了热带气旋的数据侦测飞行, 支援监测南海北部的风暴实况, 以研究风暴的强度和预测风暴移动的能力。

下文第 2 节中, 会简要介绍 GFS J-41 安装的气象测量系统。第 3 节讨论部分观测个案, 比较飞机资料与其他观测平台。第 4 节介绍天文台业务中尺度非静力模式 (NHM) 的三维变分资料同化系统, 以 2012 年 7 月 22 日热带气旋韦森特 (1208) 的飞机数据为例, 讨论飞机资料对模式同化和预测的影响。本文的总结和日后发展将于在第 5 节中讨论。

## 2 飞机气象测量系统与数据采集

### 2.1 飞机气象测量系统 (AIMMS-20)

GFS J-41 安装的气象测量系统称为 AIMMS-20 (Aircraft Integrated Meteorological Measurement System), 系统的功能概要可参考文献[6]。基本上, AIMMS-20 提供 20 赫兹 (20 Hz) 的数据测量频率, 并包括以下部分: (一) 安装于 J-41 机翼下的数据探头量度风速, 气流角度, 温度和相对湿度; (二) 全球定位系统 (GPS) 模块以确定飞机的位置和飞行速度; (三) 测量飞机的旋转和加速度的仪器; 及 (四) 一个中央处理模组将收集的大气测量数据处理, 并储存到记录媒体。AIMMS-20 的输出数据规格见表 1。文献[7]详细讨论 AIMMS-20 应用在测量台风莫拉菲在 2009 年 7 月 18 日的气象情况。

表 1: AIMMS-20 气象数据测量系统的资料规格摘要。

气象要素	测量范围	精确度	分辨率
水平风分量 ( $u$ 和 $v$ )	0 - $\pm$ 90 米/秒	$\leq$ 1 米/秒	0.1 米/秒
气压	500 - 1040 百帕	1 百帕	0.1 百帕
温度	-20 - 50 摄氏度	0.3 摄氏度	0.1 摄氏度
相对湿度	0 - 100 %	3 %	1 %

### 2.2 飞行路线规划与数据收集

GFS J-41 定翼机一般的飞行时间约 4 小时。除了搜救飞行外, 热带气旋数据收集飞行路线会依据风暴的实况与预计的短期移动而确定, 通常飞行的水平距离约 200 公里, 覆盖香港飞行情报区 (Hong Kong Flight Information Region - HKFIR) 内 2 至 3 个飞行高度, 从海拔约 300-700 米,

1500 米, 3000 m 和 5500 米的飞行高度层选择进行测量。

AIMMS-20 系统的气象数据收集过程全自动化, 在不同的飞行阶段 – 即上升, 水平直线飞行和下降阶段均实时进行测量。据文献[5]研究香港国际机场的风切变和湍流个案, 飞机在上升和降落期时收集的风力数据与天文台激光雷达系统测量的资料相当一致。在下文第 4 节中, 飞机数据亦会通过额外的质量控制处理, 才会输入至 NHM 的 3DVAR 资料同化系统。

### 3 飞机数据资料个案讨论

表 2 列出 GFS 飞机的热带气旋数据个案。当中在台风莫拉菲和强台风天秤, GFS 进行搜救行动同时收集气象数据。

表 2

热带气旋名称	日期
台风莫拉菲 (0906)	2009-07-18
热带风暴海马 (1104)	2011-06-20; 2011-06-22
台风纳沙 (1117)	2011-09-28
强烈热带风暴泰利 (1205)	2012-06-18; 2012-06-19
强台风韦森特 (1208)	2012-07-22
台风启德 (1213)	2012-08-16
强台风天秤 (1214)	2012-08-26
南海北部低压区	2013-06-14
热带风暴贝碧嘉 (1305)	2013-06-21; 2013-06-22
强烈热带风暴温比亚 (1306)	2013-07-01

以下会讨论其中两个飞行数据的个案。

#### (1) 热带风暴海马

数据收集飞行第一次在 2011 年 6 月 20 日 03-06 UTC 进行, 海马当时为一个热带低气压, 位于香港东南约 600 公里。从天文台的最佳路径数据的分析, 海马的附近最高持续风速(十分钟平均)约为 30 海里。飞机数据收集的路线在香港飞行情报区的东南方边缘, 离开海马中心约 200 公里以外。在约 1000 米和 3000 米的高度所收集的资料, 1 秒的平均风速最高达 15 米/秒。从 ASCAT 的资料(图略), 海马当时的气旋环流比较小, 半径只有大约 150 公里左右。故此飞机的风力资料只能显示海马与当时影响中国东南沿岸和台湾海峡的东北风产生的辐合带。

在 6 月 22 日上午, 海马增强为热带风暴, 图一显示 01:30 至 05:20 UTC 的飞机观测数据。在大约 03 - 04 UTC 时, 定翼机刚好穿越近海马的中心以北的位置, 离海平面约 300 米的高度, 录得最大 1 秒平均风速约 19 米/秒 (03:33 UTC)。基于 AIMMS 的 20Hz 的原始数据和文献[7]的计算方

案, 近海面的最高持续风速(十分钟平均)约为 16 米/秒左右。图二显示由 03:00 至 03:30 UTC 飞机数据所得的近海面风, 与 ASCAT 的 01:33-01:35 UTC 的海面风矢量比较, 两者基本上颇为吻合, 除了由于不同的观察时间而产生的风力和风向的差异。此外, GFS 的数据显示海马中心的旋转环流。由飞行测量数据计算近海平面的风速风向观测资料, 与其他沿岸海域的自动气象站观测(如石油钻井平台)比较, 两者所得的风速风向也颇为一致。

## (2) 强台风韦森特

2012 年 7 月 22 日韦森特仍处于热带风暴的强度, 并在南海北部缓慢移动。定翼机在 04-06 UTC 期间飞过风暴中心环流的东北部和西部, 于近风暴中心进行侦测飞行。图三所示飞行路线和两段分别离海面约 3000 米(从 A 到 B)和 750 米(从 B 到 A)的风力风向资料。当飞机在 3000 米高度从 A 点飞近风暴中心, 录得 40-50 海里的东风转偏北风, 而在较低的高度上, 位处韦森特以北约 50 公里, 飞机记录达 60 海里或以上的偏东风。

从飞行高度的资料计算的近海平面的气象要素, 发现飞行路线上最低的海平面气压为 985 百帕, 与当时(06UTC)的分析强度(986 hPa)相约; 近海面的最大风速约 23.3 米/秒, 与卫星的分析产品(文献[8])颇为接近(图四)。若比较韦森特的东北部强风与烈风半径, 飞机资料的强风和烈风半径分别 1.5 度和 0.7 度左右; 卫星分析的 20 海里风力与烈风半径为 1.4 度和 0.75 度(图四右所示的 R34 为 45 至 50 海里)。故此, 飞机观测数据对热带气旋分析的应用, 无论在定位和中心强度外, 也可以帮助评估大风区域的范围。

## 4 NHM 的资料同化和预报的作用

### 4.1 业务中尺度数值天气预报模式

2010 年 6 月香港天文台开始业务运行新一代中尺度数值天气预报模式[9], 称为 AIR (Atmospheric Integrated Rapid-cycle) 预报模式系统, 它是由从日本气象厅 (Japan Meteorological Agency - JMA) 引进的非流体静力学模式 (Non-Hydrostatic Model) (以下称为 NHM 或非静力模式) [10] 及其三维变分资料同化系统 (3DVAR) 所组成。AIR 预报模式系统包括两个单向套网格区域范围的 NHM(图五)。外范围(名为 Meso-NHM)的水平分辨率为 10 公里, 垂直有 50 层, 每 3 小时运行一次, 提供未来 72 小时预报。Meso-NHM 的边界场是基于 ECMWF 或 JMA 全球谱模式的预报数据, 海面温度场则分别来自 ECMWF 海温分析或美国国家环境预报中心 (NCEP) 高分辨率(约 10 公里)实时每日海温分析资料[11]。内范围(名为 RAPIDS-NHM)的水平分辨率为 2 公里, 垂直有 60 层, 利用 Meso-NHM 预报作为边界条件, 每小时运行一次, 提供未来 15 小时预报。

Meso-NHM 及 RAPIDS-NHM 均使用 3DVAR 的分析场为模式的初始条件。3DVAR 数据同化系统与预报模式具有相同水平分辨率和垂直层数, 以获得最优化的分析场, 使模式的初始条件能包含天气尺度以及中尺度系统的环流特征。Meso-NHM 3DVAR 能够同化的观测数据包括常规地面、海面、船舶和探空观测, 飞机气象数据下传 (AMDAR) 气象资料, 香港的自动气象站和风廓线仪, 广东省自动气象站, JMA MTSAT 地球同步卫星的云导风, NOAA-POES 和 EUMETSAT-Metop 极地轨道卫星的反演温度垂

直剖面(ATOVS retrieval profile), 以及从 SSM/I 及 AMSR-E 微波探测仪(microwave sounder)反演的垂直总可降水量(total precipitable water vapour)。除了以上观测资料, RAPIDS-NHM 亦同时同化雷达的多普勒径向风, 雷达三维风场反演资料和全球定位系统(GPS)反演的大气垂直总可降水量(PWV)的数据。

GFS 的飞行侦察数据输入 3DVAR 同化前, 先进行两个处理步骤。首先, AIMMS-20 的输出数据频率由原来的 20 Hz 经过仪器系统数据处理程序取平均至 1Hz, 以减少处理数据量。在 Meso-NHM 的 10 公里(x 和 y 方向)的网格内, 每个飞机测量的气象要素 - 水平风分量, 温度, 压力和相对湿度, 取所有可用的数据, 然后计算空间平均值, 形成一组的观测资料。在 3DVAR 处理 GFS 飞机数据的观测量误差值根据表 1 中的测量精度和仪器特点确定, 以计算 3DVAR 中观测误差协方差矩阵(error covariance matrix)。风分量(u 和 v)的方差取  $1.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 温度和相对湿度分别为  $0.52 \text{ K}^2$  和  $0.032$ 。用于不同的高度上飞机资料的观测值方差是相同的。然后, 飞机资料依照其他观测数据相同的程序, 进行质量控制。若果飞机观测要素(水平风分量, 温度, 相对湿度)与 3DVAR 的背景场的偏差达到观测误差值的 5 倍以上, 该观测资料要素会被去除, 以确保 3DVAR 同化过程中观测数据的质量。

#### 4.2 侦察飞行观测数据对模式的分析与预报的影响

Meso-NHM 的数值模拟分为两组, 使用业务运行时的观测(控制实验)与加入飞机数据作比较。本节将以韦森特的数值实验结果, 讨论飞机数据的作用。图六比较控制试验(以 CNTL 标示)和飞机资料同化后(GFS)的分析, 在 CNTL 的分析(图六上方), 较高风速区域位于风暴东半部分, 沿 AB 的切面的风速为 20-30 海里。同化飞机观测资料后, 模式的分析风速于风暴的北面有所增加。飞机观测资料沿 AB 线上的两个飞行高度层中, 东风最高达 60 海里, 增强了模式分析中由海面至 850hPa 的风速, 加大了气旋环流的强度。GFS 实验中, 同化飞机资料后也增加风暴中心和以南区域低层的水汽量, 与卫星云图显示(图四)较深厚和活跃的对流云团集中在韦森特的南侧颇为一致。

图七显示 CNTL 与 GFS 实验的预报路径, 模式预报的初始时间为 22 日 06UTC。预测的风暴移动大致与实况相类似, 但在首 12-18 小时的预测就未能完全模拟当时风暴较慢的移动。整体上, 利用飞机资料减低模式首 48 小时的平均预报位置误差约 10%。对于中心强度, 因为 GFS 资料增加模式分析和初始条件的中心附近风速, 有利模式预报较高的风暴强度。模式预测的中心气压于 23 日 09-15 UTC 期间的最低气压为 965 hPa, 虽比 CNTL 的最低气压要低, 还是比实况高约 15 hPa(图八)。文献[12]比较 NHM 不同的模式物理过程对预报风暴中心强度的影响。当中, 海面与大气的能量交换控制方程的参数, 积云对流参数化与云物理过程都对模拟韦森特的急剧增强产生作用。

为进一步阐述飞机观测资料对预测风暴中心附近的风力影响, 图九比较 CNTL 及 GFS 实验中 Meso-NHM 的预测的海面/地面的疾风风速分布与风向, 预报时间为 23 日 15UTC, 韦森特增强至最大的强度, 并靠近珠江口以西的沿岸地区登陆, 香港西部和南部地方录得超过 70 海里的风力。经同化飞机资料后, 预报的暴风范围扩大, 不过与 CNTL 实验类似, 最大风的区域仍只覆盖香港正南面的海域。GFS 实验中, 飓风强度以上的区域亦有所扩大, 模式预报达 85 海里的大风区覆盖近香港以南约 50 公里的海域。

综合 2009 年台风莫拉菲, 2011 年及 2012 年的飞行个案, GFS 定翼机的气象数据对 Meso-NHM 预报的风暴位置误差如图十所显示, 平均的误差比控制实验降低约 15%。尤其在 36-48 小时的预报中, 误差的减幅较多。至于中心强度预测, 飞机数据的影响相对不太明显, GFS 与 CNTL 实验的强度误差的差别不大(图十一)。

## 5 总结与展望

本文讨论了香港天文台与政府飞行服务队近年进行的热带气旋侦测飞行, 利用定翼机上的 AIMMS-20 气象数据测量系统, 从不同的飞行高度, 以及较接近风暴中心位置收集气象资料。从高分辨率的数据计算近海面的实况风速风向, 增加了南海的气象数据, 有助分析热带气旋的中心和附近的风力分布。飞机所得的天气资料与其他观测平台相当一致。利用 NHM 的三维变分同化系统, 飞机观测资料能改善模式的分析, 譬如模式初值的风暴结构, 因而改进模式在未来 36-60 小时的预报路径误差。在模拟强台风韦森特的数值试验中, 飞机资料除了在路径预报的作用外, 对于风暴的大风区域的预报也有一定的改善。

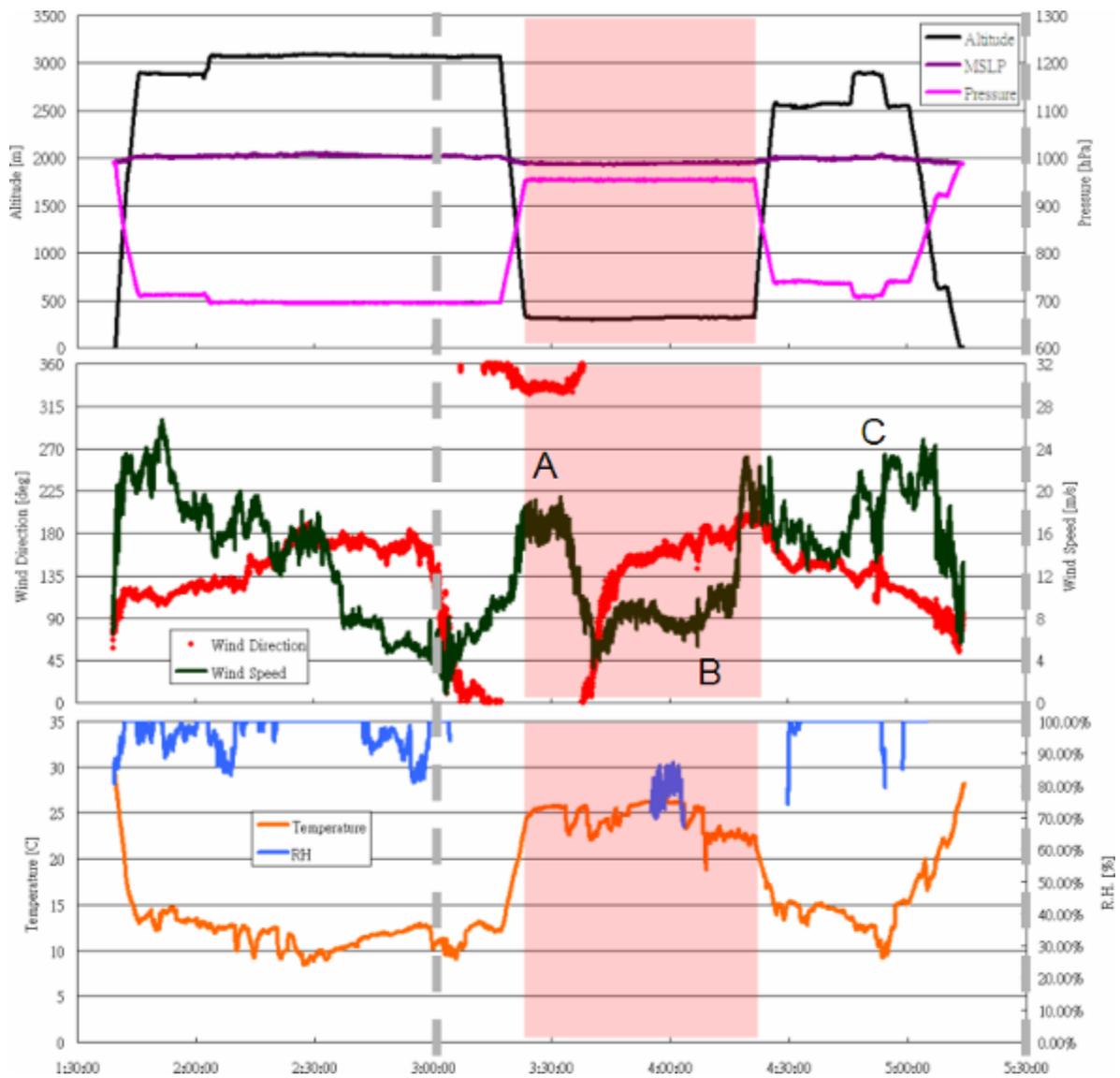
展望将来, 为进一步加强收集热带气旋的天气数据, 天文台与政府飞行服务队已计划在 2014 年在新更换的飞机上, 除了现时的气象探测仪器外, 还会安装一套发射器, 以投放下投式探空仪(dropsonde)。飞机可以从风暴的云顶以上的高度投下探空仪, 当探空仪下降时, 测量的天气数据会经由飞机直接传送至天文台, 实时提供热带气旋附近大气的气象资料垂直廓线, 以及近海面的风向风速数据以改进测定风暴强度。同时, 亦能避免碰上热带气旋相关的强烈对流, 令侦测飞行更有效和安全地进行。

## 参考文献

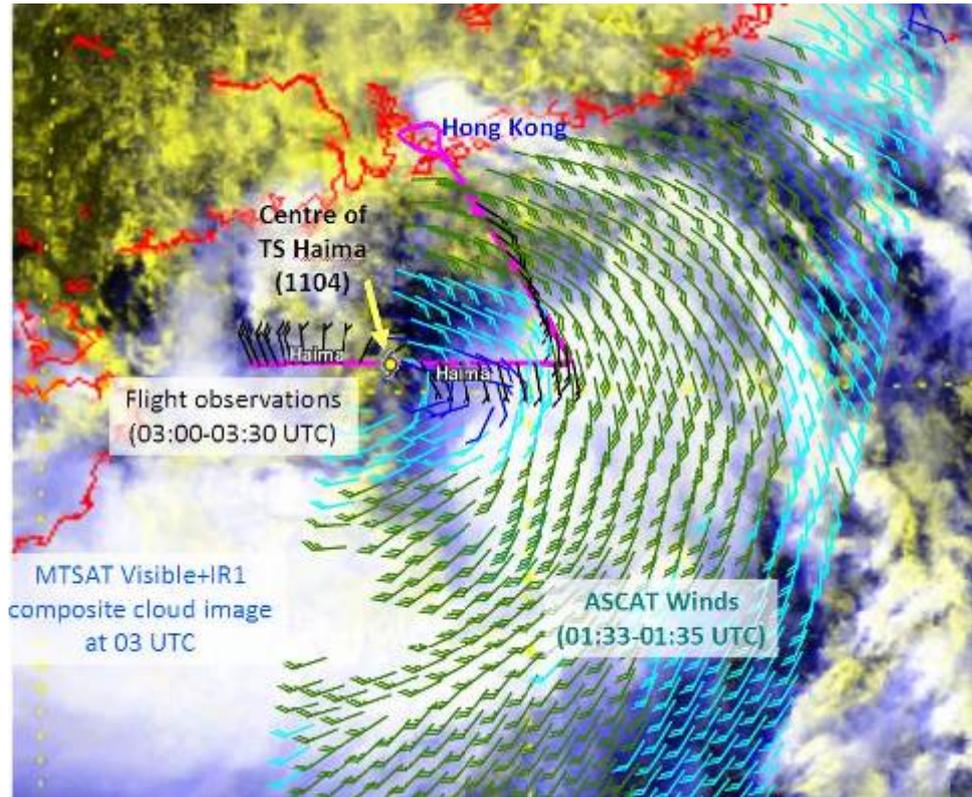
- 1 Ash, N., and J.J. Cione, 2010: NOAA's utilization of Coyote unmanned aircraft systems for tropical cyclone research. 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, 10-14 May 2010, Tucson, AZ, U.S.A.
- 2 Chan, J.C.L., and K.P. Wong, 1989: The impact of the termination of aircraft reconnaissance on tropical cyclone warnings and forecasts in western North Pacific. International Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate, 6-8 July 1989, Hong Kong. [Available online at <http://www.hko.gov.hk/publica/reprint/r205.pdf>]
- 3 Martin, J.D. and W.M. Gray, 1993: Tropical Cyclone Observation and Forecasting with and without Aircraft Reconnaissance. *Weather and Forecasting*, 8, 519-532.
- 4 Wu C.-C., K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Weather and Forecasting*, 22, 1157-1176.
- 5 Chan, P.W., C.M. Shun, and M.L. Kuo, 2010: Latest developments of windshear alerting services at the Hong Kong International Airport. 14th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, American Meteorological Society, 17-21 January 2010, Atlanta, GA, U.S.A.

中国气象学会 2013 年年会  
(分會場編號: S2)

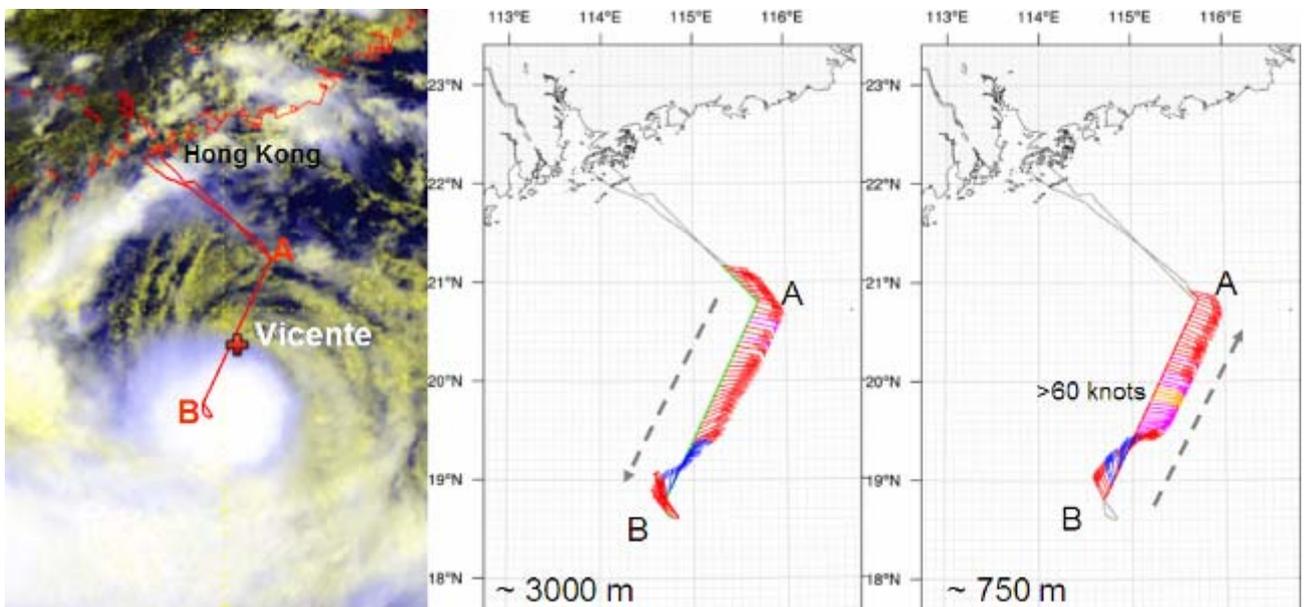
- 6 Beswick, K. M., M. W. Gallagher, A. R. Webb, E. G. Norton, and F. Perry, 2008: Application of the Aventech AIMMS20AQ airborne probe for turbulence measurements during the Convective Storm Initiation Project. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 5449 – 5463.
- 7 Chan, P. W.; K. K. Hon, K. K.; S. Foster, 2011: Wind data collected by a fixed-wing aircraft in the vicinity of a tropical cyclone over the south China coastal waters. *Meteorologische Zeitschrift*, 20, 313-321.
- 8 Knaff, J. A., and M. DeMaria, 2006: A multi-platform satellite tropical cyclone wind analysis system. 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, GA, U.S.A., 30 Jan. – 2 Feb. 2006.
- 9 Wong, W. K., 2011: Development of Operational Rapid Update Non-hydrostatic NWP and Data Assimilation Systems in the Hong Kong Observatory. Technical Reports of the Meteorological Research Institute No. 65, December 2011, 87-100.
- 10 Saito K., Fujita T., Yamada Y., Ishida J., Kumagai Y., Aranami K., Ohmori S., Nagasawa R., Kumagai S., Muroi C., Kato T., Eito H., and Yamazaki Y. 2006. The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Monthly Weather Review*, 134, 1266-1298.
- 11 Gemmill, William, Bert Katz and Xu Li, 2007: Daily Real-Time Global Sea Surface Temperature - High Resolution Analysis at NOAA/NCEP. NOAA/NWS/NCEP/ MMAB Office Note, 260, 39 pp.
- 12 韩启光、柯铭强、黄伟健, 2013: 强台风韦森特的数值模拟研究。第二十七届粤港澳气象科技研讨会, 广东韶关, 2013 年 1 月 9-10 日。



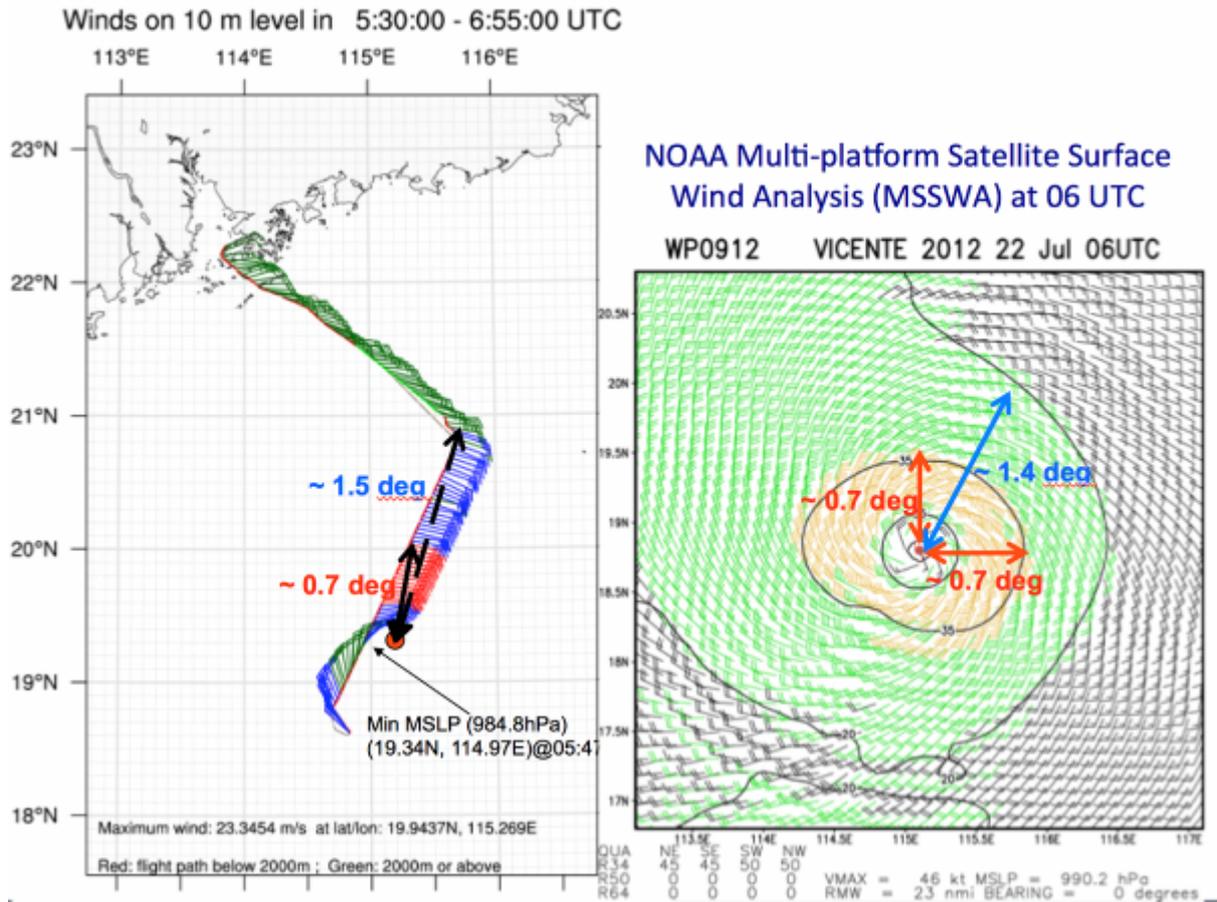
图一：2011年6月22日01:30 - 05:30 UTC GFS 定翼机收集的气象数据。上图：飞行高度（黑线），气压（紫）和海平面气压（啡）；中图：风速（黑）和风向（红）；下图：温度（橙）和相对湿度（蓝）。



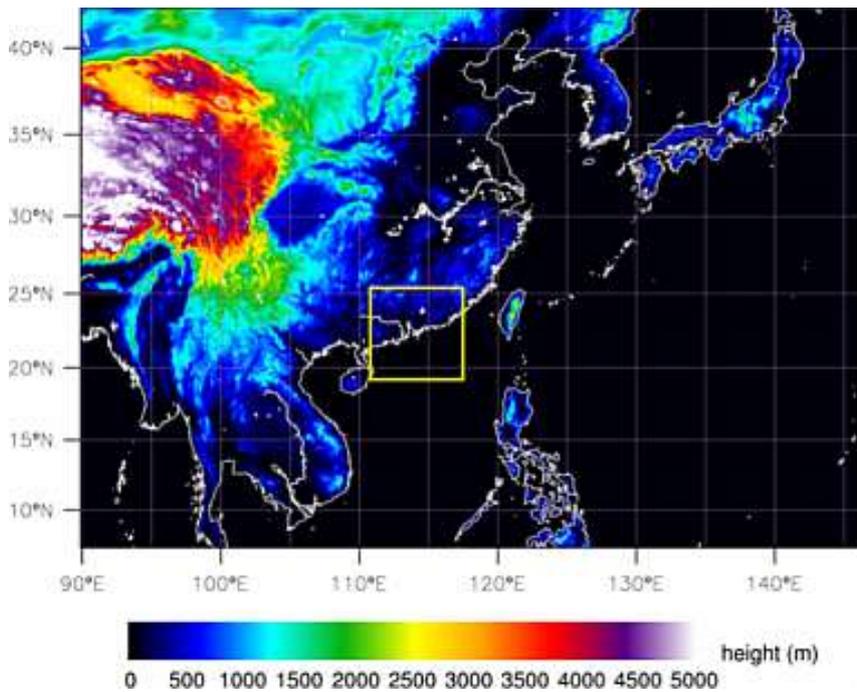
图二: 于 03: 00 - 03: 30 UTC 的飞机风向和风力观测数据, 与 ASCAT 风场 (01: 33-01: 35UTC) 和 MTSAT 03 UTC 的卫星云图。



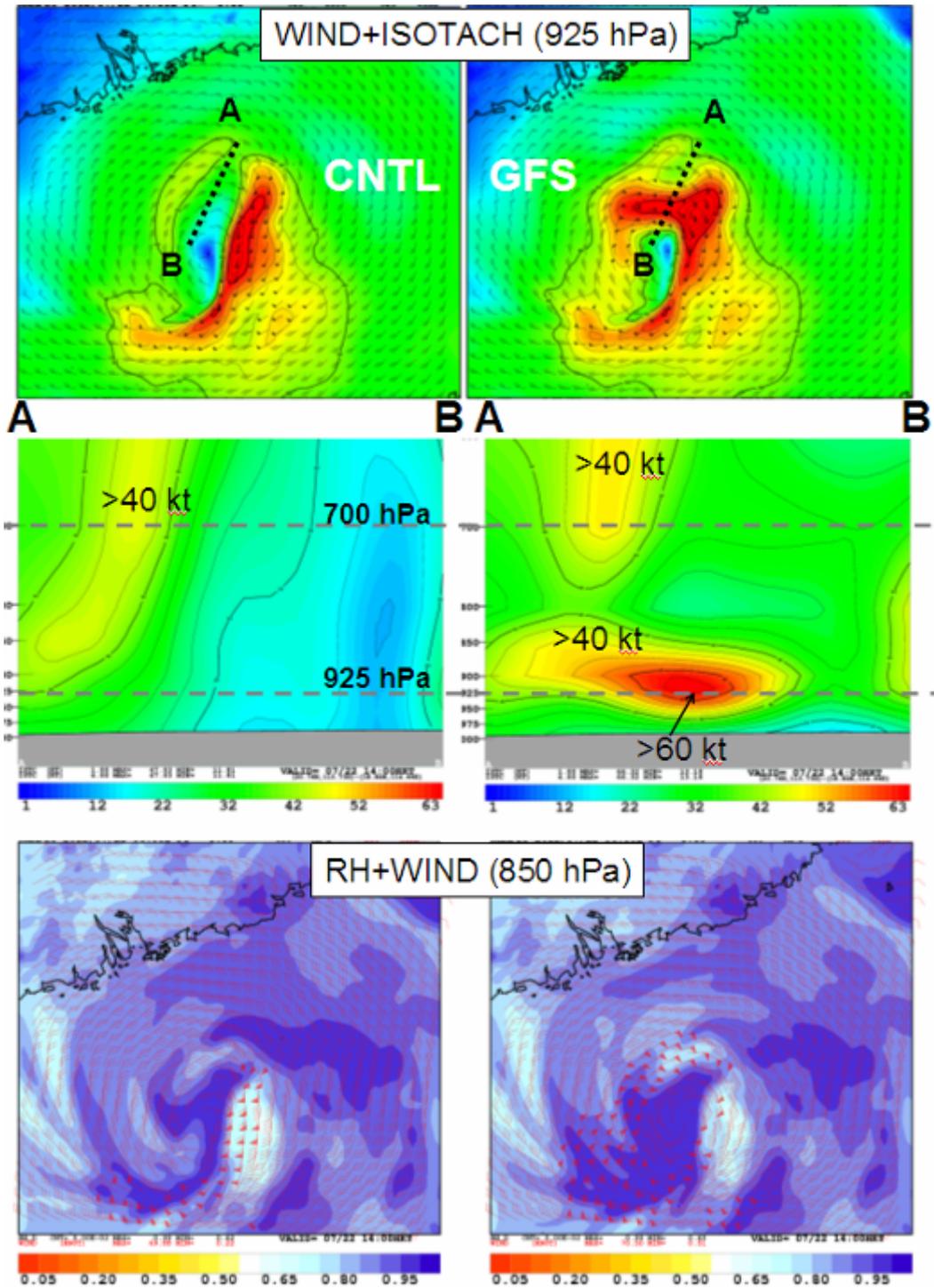
图三: GFS 于韦森特的飞行探测路线 (2012 年 7 月 22 日), 以及在 750 米和 3000 米的高度测量的风速与风向。



图四：(左) 由 GFS 数据计算近海面的风速和风向；(右) NOAA 卫星的风场分析。

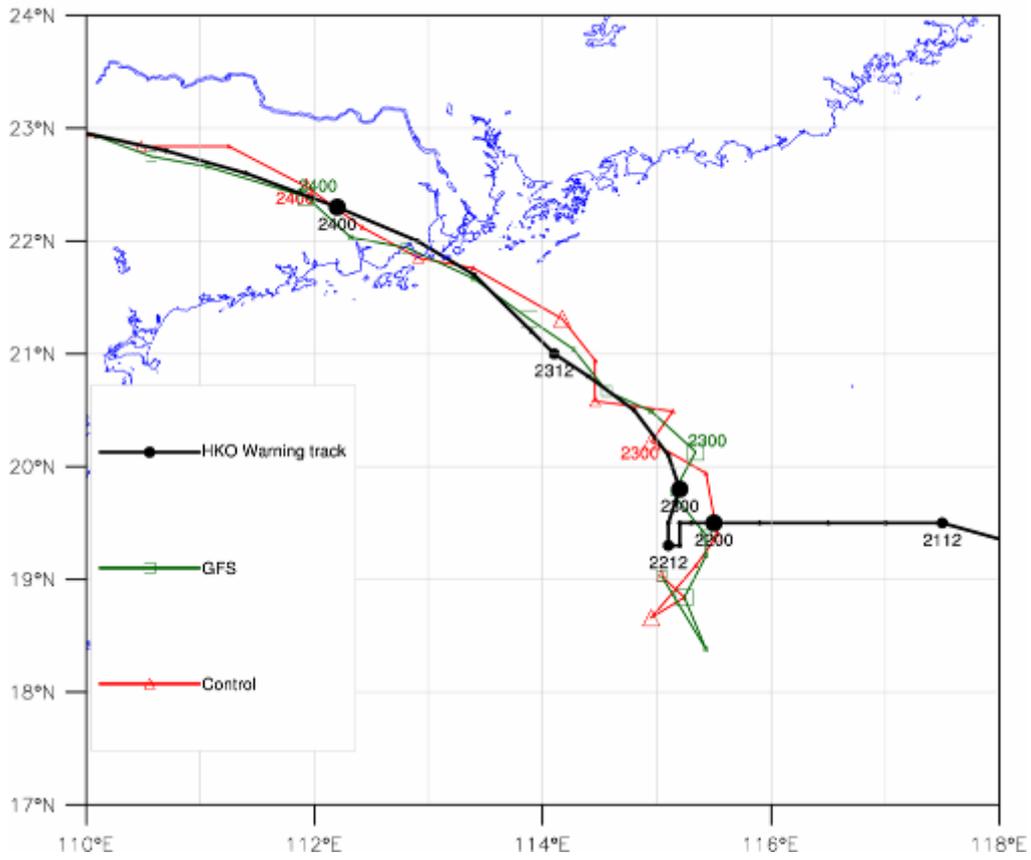


图五：香港天文台的 AIR 预报模式系统中 Meso-NH 和 RAPIDS-NH (黄线方框) 的计算范围。

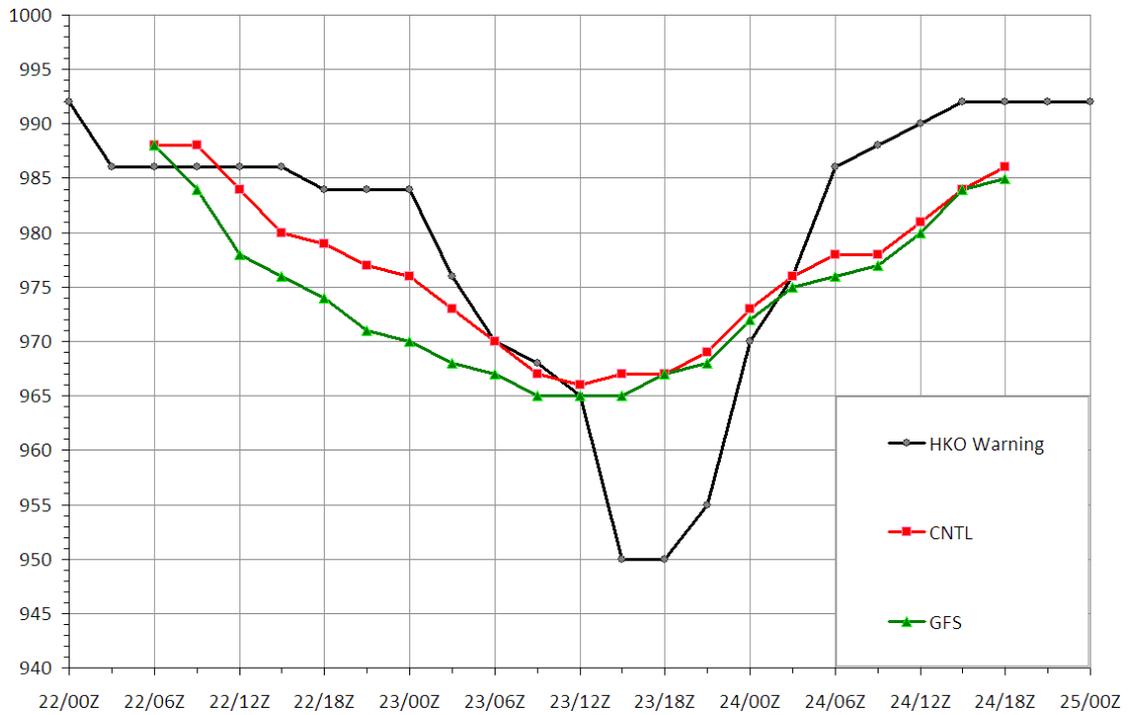


图六：（上图）CNTL 与 GFS 实验的 925 hPa 风场分析，颜色代表不同风速；（中图）沿 AB 的切面，显示从海面到 600hPa 左右的风速分布；（下图）850 hPa 的分析风场和相对湿度。

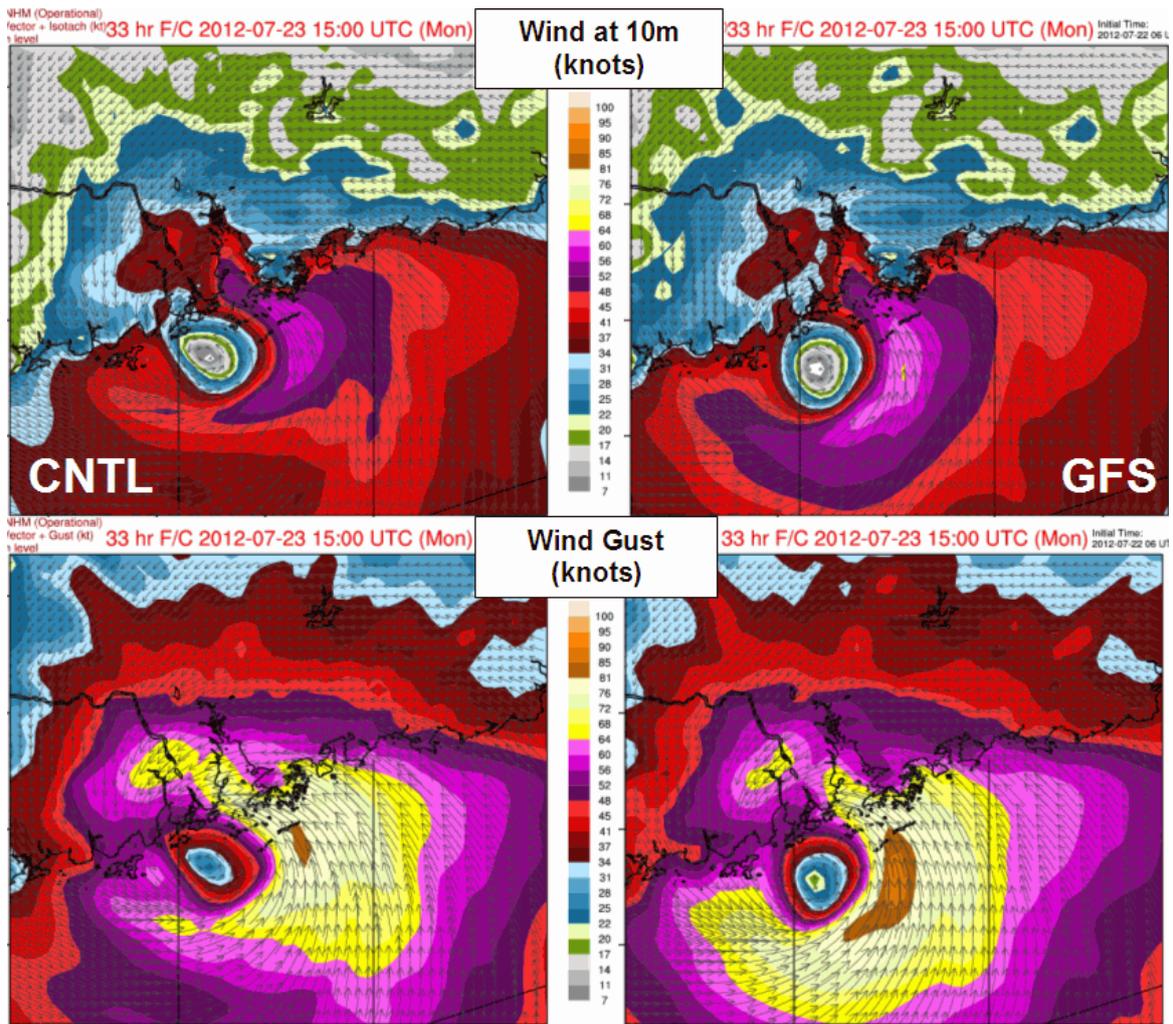
VICENTE (22-07-2012 06 UTC)



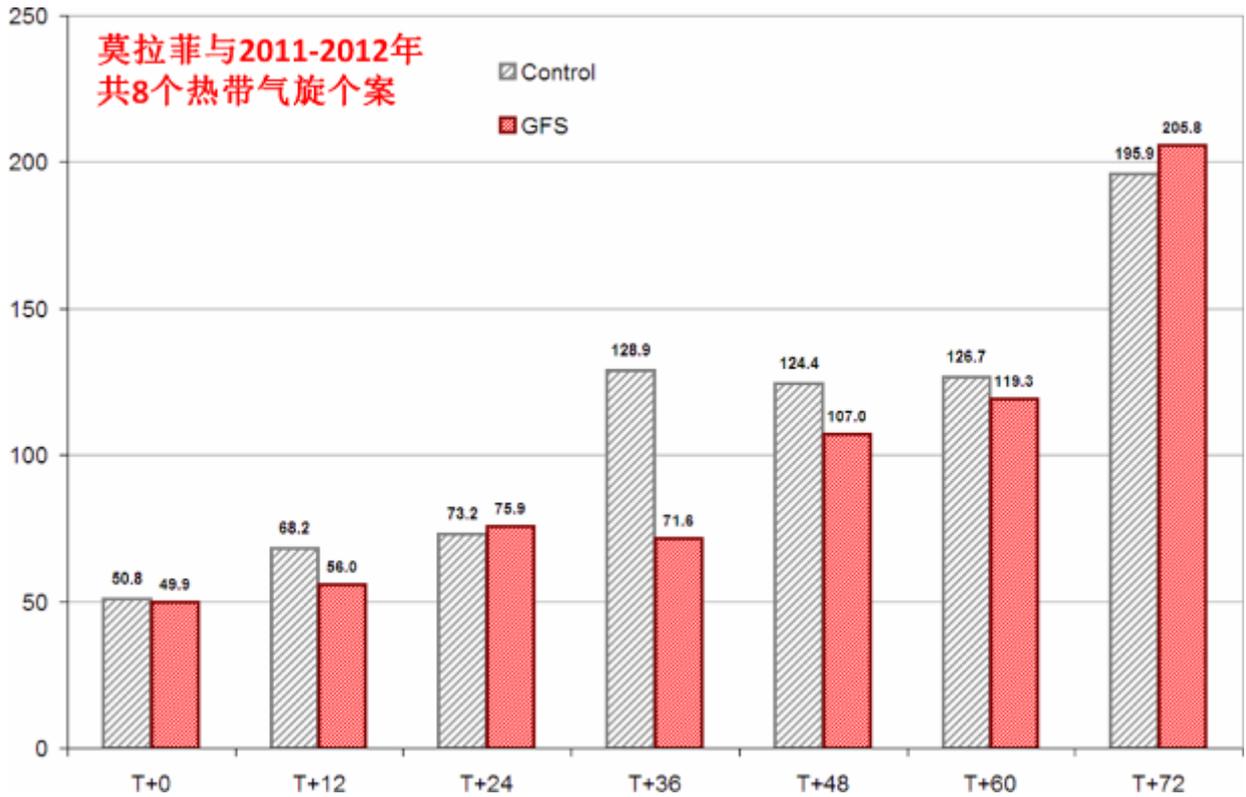
图七: CNTL (红线) 与 GFS (绿线) 实验的预测路径。



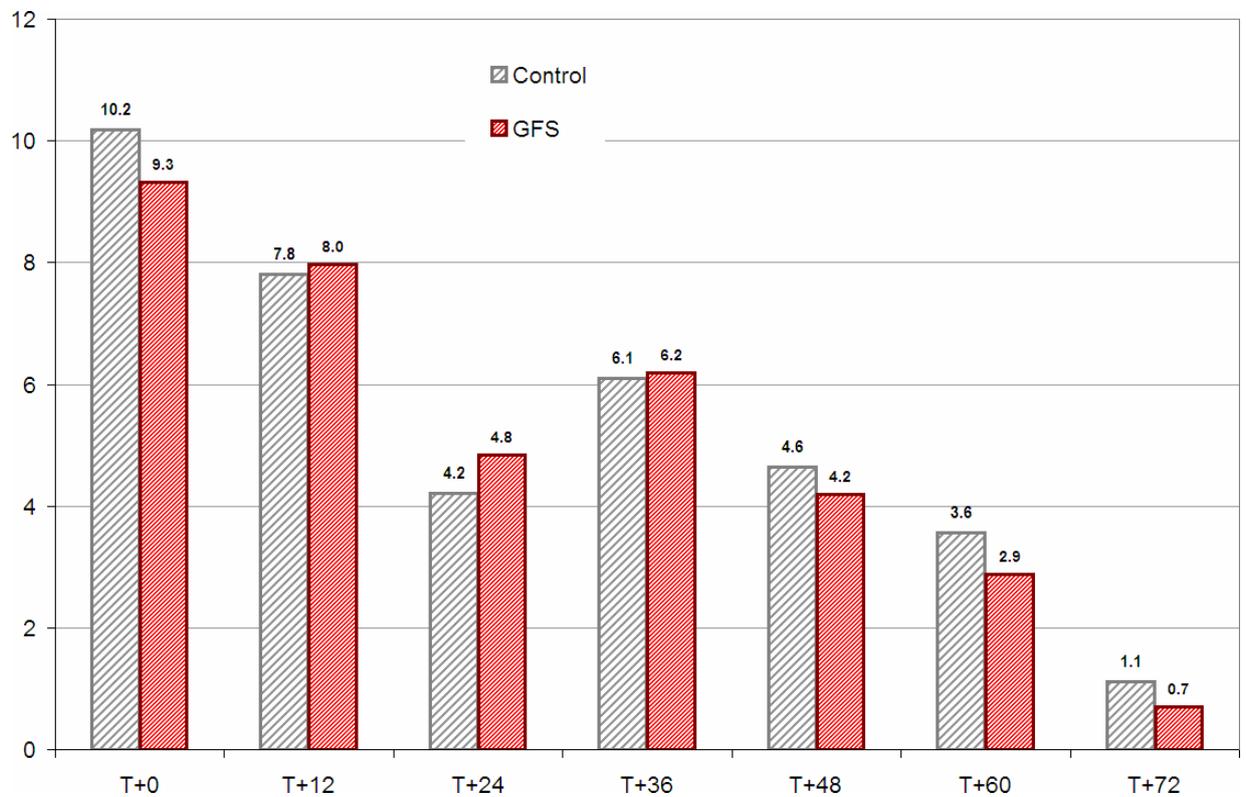
图八: 预测中心气压的时间序列。



图九: Meso-NHM 海面/地面的 33 小时风场预报, 颜色代表不同的风速 (上图) 和疾风分布 (下图)。



图十: CNTL (灰色) 与 GFS (红色) 预报路径的均方根误差 (单位: km)



图十一: 模式预报的中心气压的均方根误差 (单位: hPa)