

Reprint 1357

利用大帽山天氣雷達快速掃瞄資料
進行對流尺度循環集合同化

韓啟光、江偉

第 33 屆粵港澳氣象科技研討會

暨

第 24 屆氣象業務合作會議

(香港 2019 年 3 月 6 日-8 日)

利用大帽山天气雷达快速扫描数据 进行对流尺度循环集合同化

韩启光 江伟

香港天文台

摘要

华南沿岸地理及气候条件复杂，中小尺度对流系统生消变化多端。要有效掌握强对流天气过程的时空特征，有赖崭新遥感观测技术和先进数据同化手段的紧密结合。自 2017 年起，天文台开始利用大帽山天气雷达作低仰角快速扫描试验，观测结果对雷暴尺度临近预报和台风强度分析起正面作用；同时，亦初步实现华南地区大范围雷达反射率拼图的中尺度集合同化。

本文利用一套 2 公里分辨率的区域集合预报系统，配以集合卡尔曼滤波算法，对大帽山天气雷达快速扫描观测的 1 分钟原始数据进行循环同化试验。初步结果显示，对流尺度集合预报对降雨过程在本港境内的地区性分布有一定预示作用，而雷达反射率数据的应用以逐分钟循环同化，较每五分钟或十分钟有效。

Convective-scale Cycling Ensemble Data Assimilation using Rapid Scan Observations from the Tai Mo Shan Weather Radar

HON Kai-kwong KONG Wai

Hong Kong Observatory

Complex geographical and climatological conditions over the South China coast introduce considerable variability in the development and dissipation of mesoscale and microscale convective systems. To effectively capture the spatio-temporal evolution of severe convective weather, it requires a combination of novel remote-sensing techniques and advanced data assimilation methods. Since 2017, the Observatory began performing rapid scan experiments at a low elevation angle using the Tai Mo Shan Weather Radar (TMSWR), results of which were found to bring positive impact on storm-scale nowcasting and tropical cyclone intensity analysis. Concurrently, the feasibility of mesoscale ensemble assimilation of large-area radar reflectivity mosaic over southern China was also established.

This paper studies the cycling assimilation of TMSWR 1-minute rapid scan raw data using a 2-km resolution regional ensemble prediction system and ensemble Kalman filter algorithm. Preliminary results indicated that the convective-scale ensemble forecasts were able to represent geographical differences within Hong Kong during the rain event. Moreover, radar reflectivity data was more effectively utilised by cycling assimilation at 1-minute intervals than every 5 or 10 minutes.

1. 背景

华南沿岸地理及气候条件复杂[1]，中小尺度对流系统生消变化多端[2]。要有效掌握强对流天气过程的时空特征[3]，有赖崭新遥感观测技术和先进数据同化手段的紧密结合[4]。自 2017 年起，天文台开始利用大帽山天气雷达作低仰角快速扫描试验[5]，观测结果对雷暴尺度临近预报和台风强度分析起正面作用[6]；同时，亦初步实现华南地区大范围雷达反射率拼图的中尺度集合同化[7]。

本文利用一套 2 公里分辨率的区域集合预报系统，配以集合卡尔曼滤波算法，对大帽山天气雷达快速扫描观测的 1 分钟原始数据进行循环同化试验，初步检视该系统的预报能力。文中亦讨论对流尺度集合预报的一些发展方向。

2. 集合同化试验方法

天文台早于 2012 年开始进行区域集合预报的可行性研究[8]，并自 2013 年底起以准实时形式测试一套基于动力降尺度方法的中尺度集合预报系统[9]，支持台风和暴雨等重要天气的影响评估[10]，至 2016 年初开展了对流尺度集合预报的初步试验[11]，并于 2017 年首次实现华南地区大范围雷达反射率拼图的中尺度集合同化[7]，为是次对流尺度集合同化试验提供基础。

2.1 模式配置

模式采用 Weather Research and Forecast (WRF) Model[12]，版本为 3.7.1，集合成员数为 20，采取双向嵌套(图一)，10 公里分辨率外范围覆盖 8° N 至 30° N， 100° E 至 128° E，2 公里分辨率内范围覆盖 21° N 至 25° N， 112° E 至 116° E。内外预报范围详细配置分别参考文献[11]和[9]。

2.2 集合卡尔曼滤波算法简介

本文使用的集合卡尔曼滤波算法与文献[7]相同。该算法基于文献[13]，以集合预报协方差作为背景误差协方差的近似，从而在同化过程中引入流依赖特性。其卡尔曼增益 (Kalman Gain) 的表达式为 $K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1}$ ，矩阵 P^f 、 H 、 R 分别代表背景误差协方差、观测算子和观测误差协方差。观测算子 H 采用非线性单偏振雷达反射率算子[14]，其中只考虑预报水凝物混合比的子项。

2.3 循环集合同化流程简介

循环集合同化流程详见图二，其主要步骤包括：

- (一) 于单一时次利用集合卡尔曼滤波算法同化大帽山天气雷达快速扫描反射率观测；
- (二) 根据观测数据时间密度（即最高 1 分钟），把整个集合传播至下一同化时次；
- (三) 重复步骤（一）和（二）至同化时间窗口的结尾；
- (四) 作出最后的短期集合预报。

同化过程中，雷达反射率观测数据根据内外预报范围水平分辨率作出适度稀疏及配对。下文亦比较不同观测时间密度对预报表现的影响。

3. 天气个案概述

2018 年 6 月 8 日，受热带风暴艾云尼的环流及外围雨带影响（图三），广东沿岸时有大雨。天文台于当日早上 6 时 50 分发出黄色暴雨警告信号，至 11 时 30 分改发红色暴雨警告。随着相关雨带移离本港，天文台于 12 时 30 分改发黄色暴雨警告，并于下午 2 时 15 分取消所有暴雨警告信号。期间本港普遍地区录得超过 50 毫米雨量，而港岛东部及新界东部更录得超过 100 毫米。

4. 集合同化试验结果

图四为 2018 年 6 月 8 日上午 8 时（即 00 UTC）至 11 时（即 03 UTC）

共 3 小时之间，同化试验的雨量子报与本港各区实际雨量分布的比。图中左栏为经循环同化后 2 公里内范围的集合平均 1 小时雨量子报，起报时间为 00 UTC，同化时间窗口由 7 日 23:50 UTC 至 8 日 00:00 UTC 共 10 分钟，观测时间密度为 1 分钟。请留意左右两栏分别采用稍有不同的雨量值间距，例如每小时 40 毫米的降雨在右栏以黄色表示，但在左栏则以红色表示。

从图四可以看见，同化试验的雨量子报能较有效反映该南北走向雨带的强度、形态，及其缓慢地自西向东横过本港的动作路径。虽然模式预测对 00 UTC 至 01 UTC 之间的雨量分布稍为偏东（图四上列），但对随后 01 UTC 至 02 UTC 之间位于大帽山和港岛的大雨区（图四中列），以及 02 UTC 至 03 UTC 之间雨带东移所引起的雨量梯度均与实况吻合。

图五和图六为同样使用 10 分钟同化时间窗口，但观测数据时间密度下调至分别每 5 和 10 分钟一次的对照试验子报结果（只显示外范围的子报，内范围所子报之雨带形势相若）。从图五和图六可见，对于是次有一定时空变化特征的降雨过程，降低观测数据时间密度（即同样使用 10 分钟同化时间窗口，但循环同化次数由 11 次降低至 3 次或 2 次）的试验均不能正确掌握雨带的形态或走势。这显示 1 分钟密度的天气雷达快速扫描观测，在一些恶劣天气情况下，对数值天气子报亦有其独特价值。

另外，主要全球模式，包括 ECMWF、NCEP、UKMO 和 JMA，均未能有效反映是次暴雨中本港的地区性雨量分布。

5. 讨论及展望

本文利用一套 2 公里分辨率的区域集合子报系统，配以集合卡尔曼滤波算法，对大帽山天气雷达快速扫描观测的 1 分钟原始数据进行循环同化试验。初步结果显示，对流尺度集合子报对降雨过程在本港境内的地区性分布有一定预示作用。在使用同样的同化时间窗口下，雷达反射率数据的应用以逐分钟循环同化，较每五分钟或十分钟有效。

可靠及适时的概率评估，是以天气影响为焦点的天气预报（Impact-based weather forecast）的重要一环。华南沿岸地区地理复杂，暴雨多变，不论对数值模式的确定性预报或集合预报均构成挑战[15]。参考海外经验，以对流尺度集合进行快速循环的遥感数据同化和短期概率预报，似乎是气象界应对高影响天气事件，包括北美地区的超级单体雷暴等强对流系统的一个可行方向[16]。

高分辨率集合预报的基础理论和应用技术日新月异，是近十多年来急速发展的重要研究课题[17]，全球主要数值预报中心均视之为策略性目标[18、19]。可以预期，势将全球化的对流尺度集合预报，会为各中、小型区域性气象中心的服务及运作模式带来一定改变。

6. 参考文献

- [1] 王荫桐等, 1984: 广东前汛期暴雨。科学普及出版社广东分社。153 页。
- [2] Li, P.W. and E.S.T. Lai, 2005: Typical Characteristics of Heavy Rain over the Coastal Areas of South China – A Radar Perspective. Workshop on Meteorology and Climate over South China, Hong Kong, 5–7 December 2005.
- [3] 韩启光、唐宇辉, 2011: 与台风灿都相关的一道强降雨带的中尺度分析。第二十五届粤港澳气象科技研讨会, 香港, 2011 年 1 月 26–28 日。
- [4] Miyoshi, T., M. Kunii, J. Ruiz, G. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Seko, H. Tomita, and Y. Ishikawa, 2016: “Big Data Assimilation” Revolutionizing Severe Weather Prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 1347–1354.
- [5] Kong, W., 2018: Rapid Scan Experiment of Doppler Weather Radar for Monitoring Rainstorms and Tropical Cyclones in Hong Kong. 10th European Conference on Radar in Meteorology & Hydrology, Ede-Wageningen, The Netherlands, 1–6 July 2018.
- [6] 江伟, 2018: 利用 S 波段远程天气雷达作快速扫描监测暴雨及热带气旋发展之初探。第 32 届粤港澳气象科技研讨会暨第 23 届气象业务合作会议, 澳门, 2018 年 1 月 8 日–10 日。
- [7] 赵汝扬、韩启光, 2018: 华南沿岸中尺度集合同化初探。第 32 届粤港澳气象科技研讨会暨第 23 届气象业务合作会议, 澳门, 2018 年 1 月 8 日–10 日。
- [8] 柯铭强、韩启光、黄伟健, 2013: Numerical Studies on Severe

Typhoon Vicente。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。

[9] 韩启光，2015：华南沿岸中尺度集合预报初探。第二十九届粤港澳气象科技研讨会，澳门，2015 年 1 月 20-22 日。

[10] 韩颖璐、韩启光，2016：华南沿岸中尺度热带气旋概率预报初探。第三十届粤港澳气象科技研讨会，广州，2016 年 4 月 20-22 日。

[11] 蔡子淳，韩启光，2016：云分辨尺度集合预报于广东沿岸强对流个案的试验。第三十届粤港澳气象科技研讨会，广州，2016 年 4 月 20-22 日。

[12] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

[13] Snyder, C. and F. Zhang, 2003: Assimilation of Simulated Doppler Radar Observations with an Ensemble Kalman Filter. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1663-1677.

[14] Tong, M. and M. Xue, 2005: Ensemble Kalman Filter Assimilation of Doppler Radar Data with a Compressible Nonhydrostatic Model: OSS Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1789 - 1807.

[15] 韩启光，2016：2015 年 5 月华南持续暴雨的高分辨率数值模拟。第 30 届粤港澳气象科技研讨会，广东省广州市，2016 年 4 月 20-22 日。

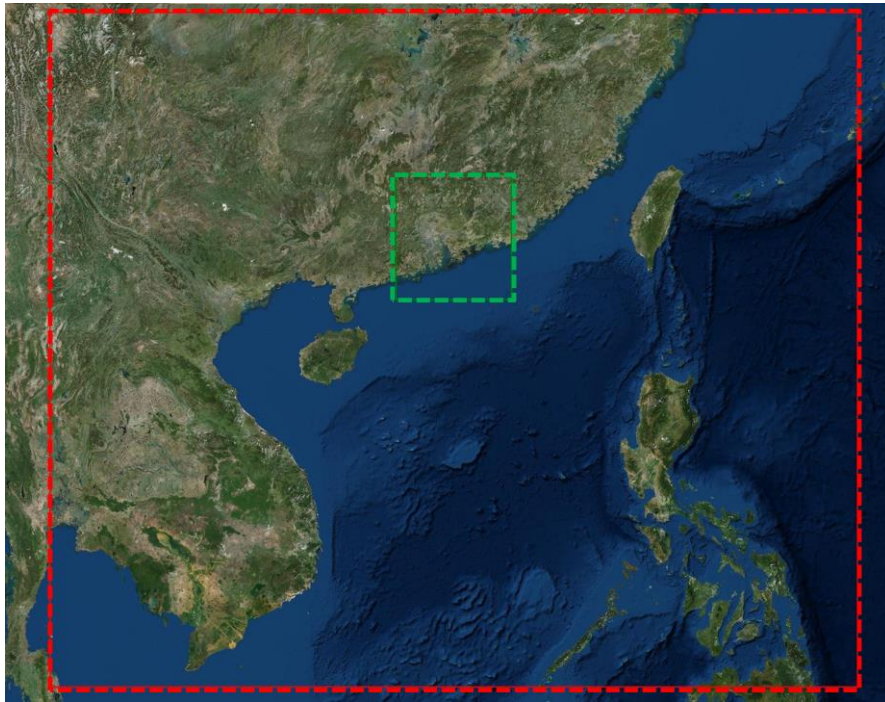
[16] Stensrud, D. J., M. Xue, L. J. Wicker, K. E. Kelleher, M. P.

Foster, J.T. Schaefer, R.S. Schneider, S.G. Benjamin, S.S. Weygandt, J.T. Ferree, and J.P. Tuell, 2009: Convective-Scale Warn-on-Forecast System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1487 – 1500.

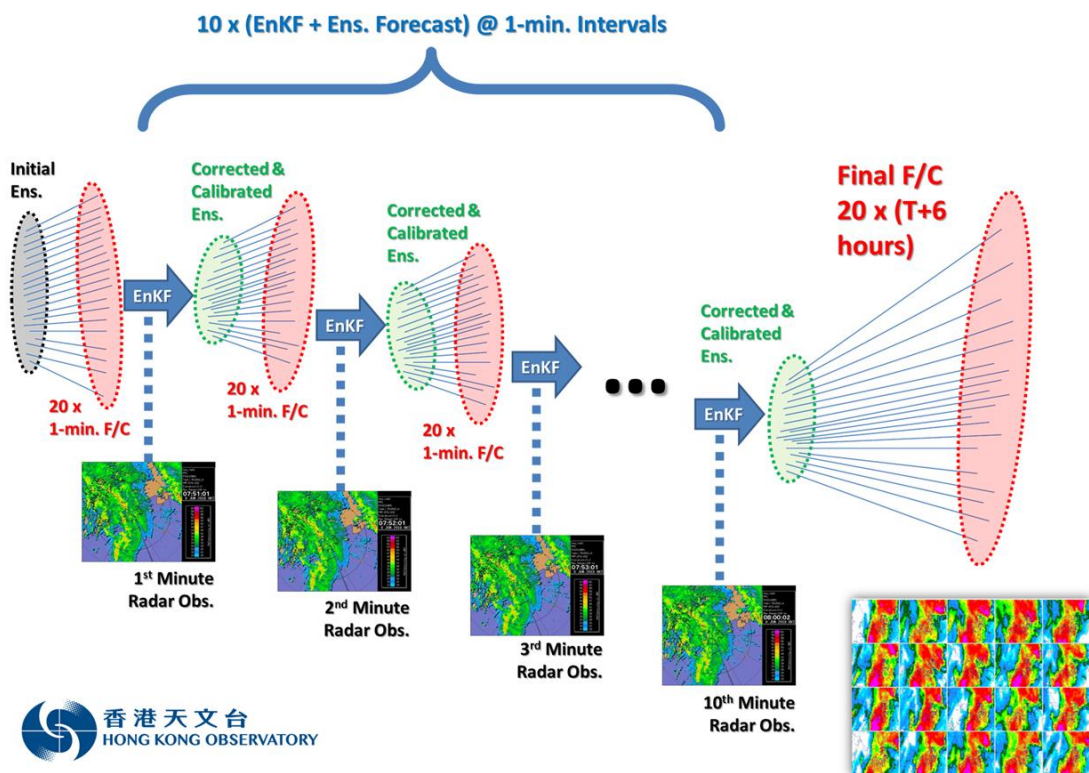
[17] Houtekamer, P.L. and F. Zhang, 2016: Review of the Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 4489 – 4532.

[18] ECMWF Strategy 2016–2025.

[19] NOAA ESRL Strategic Plan FY2016–2025.

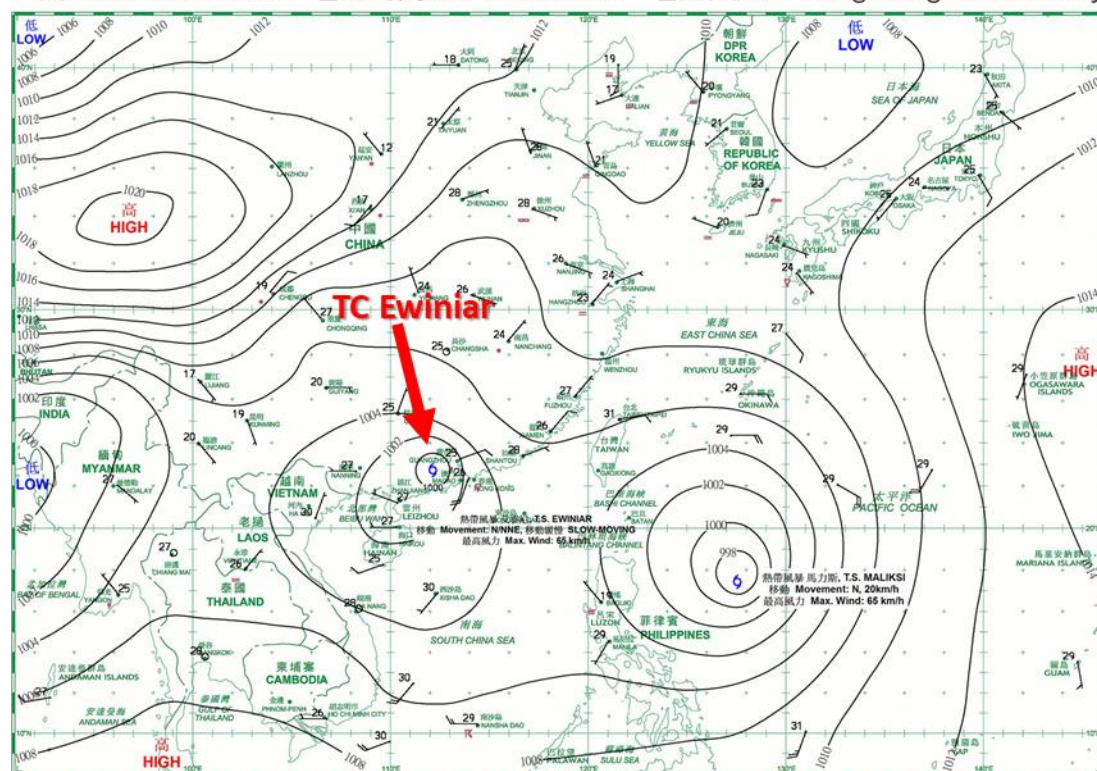


图一 试验性对流尺度集合预报系统预报范围示意图。红色虚线表示 10 公里分辨率的外范围，绿色虚线表示 2 公里分辨率的内范围。

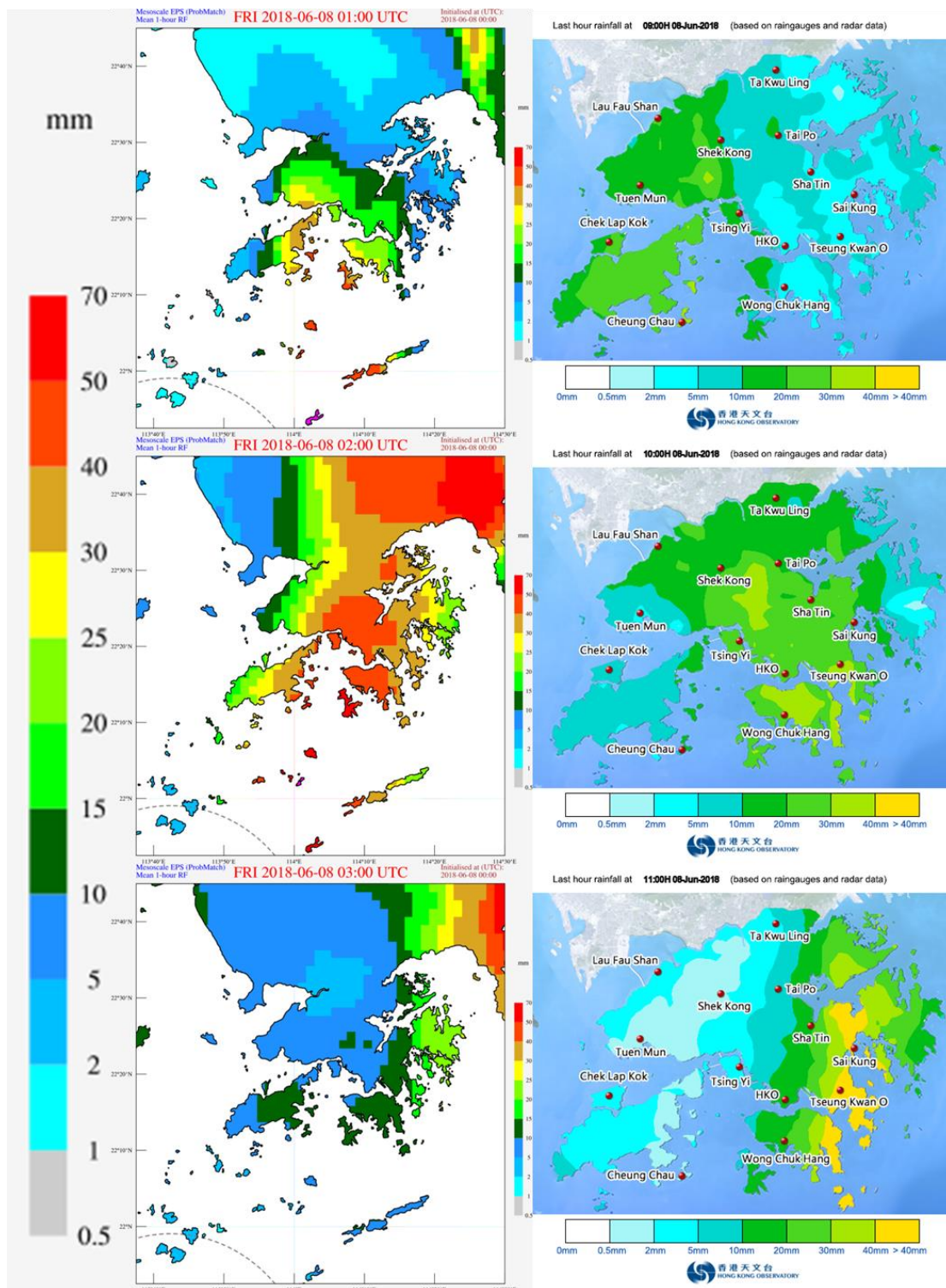


图二 以对流尺度集合卡尔曼滤波技术逐分钟循环同化大帽山天气雷达快速扫描观测示意图。

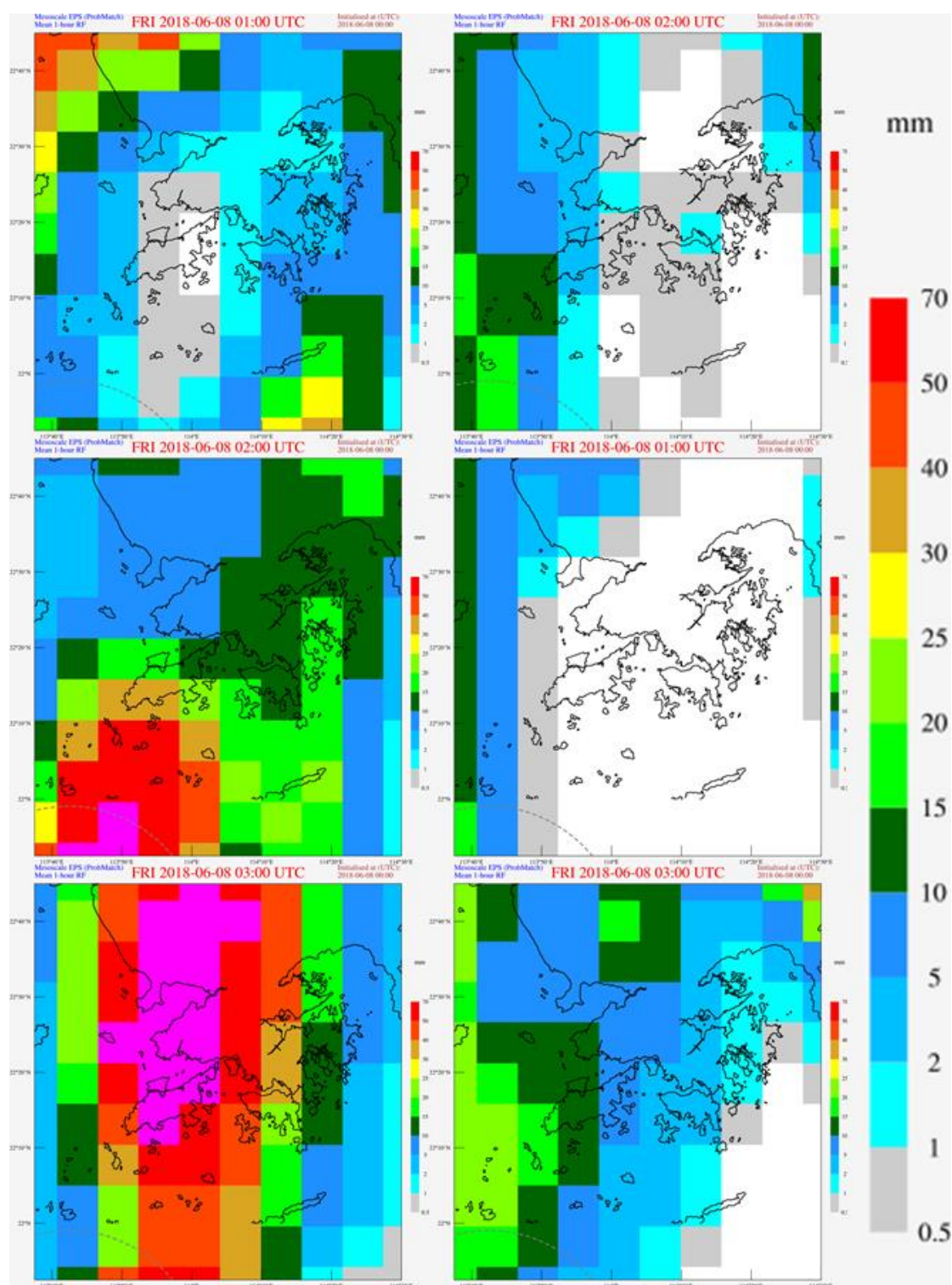
日期/Date: 08.06.2018 香港時間/HK Time: 08:00 香港天文台 Hong Kong Observatory



图三 2018年6月8日00 UTC的天气图。其中可见热带风暴艾云尼正逐渐移入广东内陆并减弱。



图四 经循环集合同化的雨量预报（左栏）与2018年6月8日早上本港各区实际雨量分布（右栏）的比对。（请留意左右两栏分别采用稍有不同的雨量值间距。）



图五 与图四左栏一样同化窗口时间，但分别为观测数据时间密度下调至每 5 分钟（左栏）和 10 分钟（右栏）一次的对照试验预报结果。