



Reprint 1522

支持天文台高影響天氣業務的技術發展

黎宏駿、譚曉晴、莊民諾、張冰、江偉、羅家偉、  
韓啟光

第 34 屆粵港澳氣象科技研討會

暨

第 26 屆氣象業務合作會議

(澳門 2021 年 11 月 3 日 - 5 日)

## 知識產權公告

本刊物的所有內容，包括但不限於所有資料、地圖、文本、圖像、圖畫、圖片、照片、視像，以及數據或其他資料的匯編(下稱「資料」)，均受知識產權保護。資料的知識產權由香港特別行政區政府(下稱「政府」)擁有，或經資料的知識產權擁有人授予政府，為本刊物預期的所有目的而處理該等資料。任何人如欲使用資料作非商業用途，均須遵守《香港天文台刊物資料的使用條件(非商業用途)》的條款和條件(可於此網頁瀏覽：<https://www.hko.gov.hk/tc/publica/non-commercialuse.htm>)。此外，除非擬議用途符合《香港天文台刊物資料的使用條件(商業用途)》的條款和條件(可於此網頁瀏覽：<https://www.hko.gov.hk/tc/publica/commercialuse.htm>)，並事先取得香港天文台(下稱「天文台」)代表政府所給予的書面授權，否則資料一律嚴禁用作商業用途。如有任何查詢，請以電郵(電郵地址：[mailbox@hko.gov.hk](mailto:mailbox@hko.gov.hk))、傳真(+852 2311 9448)或郵遞方式與天文台聯絡。

## 免責聲明

本刊物載列的資料由政府轄下的天文台編製，只供一般參考。政府雖已盡力確保該等資料準確，但政府(包括其僱員及代理人)對於本網站所載資料的準確性、可用性、完整性、是否侵權、可靠性、安全性、適時性、適用性或效用，概不作出明確或暗示的保證、聲明或陳述；在中華人民共和國香港特別行政區法律許可的範圍內，對於任何因使用或不當使用或依據這些資料或不能使用這些資料所產生或與之相關的任何損失、毀壞、損害、傷害或死亡(除因政府或其僱員在受僱工作期間疏忽所引至的傷害或死亡外)，政府亦概不承擔任何法律責任(包括但不限於疏忽責任)、義務或責任。

政府保留權利，按其絕對酌情權隨時略去、刪除或編輯由其編製並載列於本刊物的一切資料，而無須給予任何理由或事先通知。使用者有責任自行評估本刊物所載的各項資料，並在根據該等資料行事之前，加以核實(例如參照原本發布的版本)和徵詢獨立意見。

# 香港天文台高影響天氣業務的技術發展

黎宏駿 譚曉晴 莊民諾 張冰 江偉 羅家偉 韓啟光

香港天文台

## 摘要

香港位處華南沿岸，地理、氣候條件複雜，一年四季或受來自中高緯度及熱帶地區的不同尺度天氣系統交替影響，高影響天氣時有發生，對社會、民生、經濟等方面均有機會構成一定影響。本文介紹天文台在過去一兩年為加強高影響天氣分析及預報業務的一些技術發展，內容涵蓋不同科研範疇，其中包括基於人手的加密地面分析和綜合大氣中尺度分析、基於客觀方法的多參數區域中尺度分析產品、佐以歷史數據的多參數探空分析工具、基於風險的風暴潮預報服務，以及利用人工智能的酷熱天氣概率預報等，有助進一步提升預報中心的高影響天氣應對能力，並為推進新一代基於影響的公眾天氣服務提供技術基礎。本文亦討論高影響天氣分析及預報技術的未來發展方向。

## Technical Developments of High-Impact Weather Operations at the Hong Kong Observatory

ANDY WANG-CHUN LAI, TINA HIU-CHING TAM, JOHN MAN-LOK CHONG, PING CHEUNG, WAI KONG, KENNY KA-WAI LO, KAI-KWONG HON

*Hong Kong Observatory*

## ABSTRACT

Hong Kong is subject to the complex geographical and climatological conditions over the South China coast, affected by weather systems of various scales originated from mid to high latitudes as well as the tropics, seeing occasional development of high impact weather posing adverse effects to its society, livelihood and economic. This paper presents a series of technical advancements over the last couple of years introduced in the Hong Kong Observatory for improving its high impact weather analysis and forecast operations. A wide spectrum of technical areas had been explored including the manually analysed high resolution surface and upper air high impact weather charts, a mesoscale automatic ingredient based high impact analysis tool, a climatology-aided multi-parameter sounding analysis guidance, risk-based storm surge forecast, and a machine-learning based very hot weather warning probabilistic assessment, all with a view to enhancing the capability of the Central Forecasting Office for a better response to high impact weather events and laying the foundation of future risk-based weather service for general public. Future developments in high impact weather analysis and forecasting techniques are also discussed.

## 1. 背景

香港位處華南沿岸，地理、氣候條件複雜，一年四季或受來自中高緯度及熱帶地區的不同尺度天氣系統交替影響，高影響天氣時有發生，對社會、民生、經濟等方面均有機會構成一定影響。

保障公眾安全是天文台的首要任務，因此天氣預報及警告服務多年來一直是天文台重中之重的工作。現今，公眾已能從多種渠道免費取得天氣資訊，對預報時間及空間尺度（精細至長期）有更高的需求，並期望天氣警告能更貼近日常生活及運作。天文台須發展多災種及基於影響和基於風險評估的公眾天氣服務，以及無縫天氣預報服務（揉合臨近、短期、中期以至長期預報），以滿足市民、政府部門、公共事業、各持份者等在未來的需要。在極端天氣將會變得更頻繁的趨勢下，天文台要持續提升預報中心的高影響天氣應對能力，並為推進新一代基於影響的公眾天氣服務提供技術基礎。

## 2. 中尺度綜合大氣分析

影響香港的強對流天氣往往由中尺度甚至更小的系統觸發，其時空尺度小、變化劇烈，對於目前的數值預報是一項艱鉅挑戰。對中尺度天氣配置進行人手科學分析及診斷，可提升短期強對流發展的預報技巧[1]。

天文台自 2021 年 5 月開展高空及地面中尺度分析業務工作流程，定時繪制中尺度高空綜合分析及地面加密分析圖，預期對暴雨的發生時機能更好掌握，及早應對。分析的總體思路以“配料法”為主，從探空儀、風廓線儀、衛星風等實況數據，輔以物理量診斷分析產品，找出有利觸發強對流的天氣特徵，然後使用規定的識別符號繪製綜合分析天氣圖，作中尺度強對流天氣的環境綜合分析。標識符號主要參考國家氣象中心中尺度天氣分析技術規範[2]並與本地慣用符號融合、簡化以配合業務環境。當中熱力及動力學分析所用的物理量閾值有所修訂，亦參考了廣東省天氣預報技術手冊[3]中的數值。詳細的標識符號及相關的參考閾值見表 1。

在業務產品製作，分析及制圖均在天文台自行研發的 MET-GIS 網上氣象資訊綜合平台上進行。圖 1 及圖 2 為 2021 年 6 月 28 日早上 8 時的高空及地面中尺度分析圖，當日本港受活躍西南氣流影響，早上有大雨及頻密狂風雷暴，天文台更在早上 8 時 20 分發出當年的第一個黑色暴雨警告。高空分析產品的更新頻率約為每 12 小時一次，地面分析則為 3 小時一次，遇上重要天氣系統時更可逐小時進行追蹤分析。

### 3. 基於客觀方法的多參數區域中尺度分析產品

上述段落介紹了基於人手的加密地面分析和綜合大氣中尺度分析。除此之外，天文台還開發了基於客觀方法的多參數區域中尺度分析產品。產品採用了以兩分里水平分辨率的 Weather Research and Forecast (WRF) 模式分析，以提供每小時區域的水汽條件、有關熱力及動力學的診斷物理量分析圖，藉此協助實時判斷各類有利強對流發展的環境場條件，而彌補實況數據的更新頻率的限制。

圖 3 為 2020 年 6 月 6 日上午四時的多參數區域中尺度分析圖，當中各參數有利對流天氣發展的閾值參考了不同文獻 [2-5]，另圖 4 則顯示每個格點上超過閾值的參數數量，提供了有關強對流天氣的綜合分析。分析圖顯示，當時受明顯的地面風輻合，加上中層波動和高空輻散，以及大氣的不穩定條件，為珠江口一帶帶來了暴雨及狂風雷暴，天文台亦發出了黑色暴雨警告信號。

### 4. 高影響天氣探空分析

為了加強使用京士柏高空探空的觀測來分析和預測短期的高影響天氣，我們開發了一個輔助工具：「高影響天氣探空分析」“High-impact weather Sounding Analysis (HSA)”，以補充現有基於無線電探空儀的產品。

基於最新京士柏探空的觀測數據，HSA 計算出一套十六個有關高影響天氣的參數。該參數可分為濕氣相關的、風切變相關的、及不穩定

度相關的（圖 5a）。每一個參數會與其在過去約二十年探空觀測數據的統計分佈作比較，以分析當天大氣有利惡劣天氣的條件（圖 5b）。根據統計，一般來說，越多參數高於統計分佈的 75%，高影響天氣（例如暴雨、狂風雷暴等）出現的機會就越高。HSA 會用紅色來強調某參數已高於統計分佈的 75%，讓預報員可以一目瞭然快速評估當天的大氣條件是否有利一些惡劣天氣的發展。

2020 年 5 月 30 日的 00Z 探空分析顯示（圖 5a）在十六個高影響天氣參數裡，有九個高於統計分佈的 75%，表示大氣條件有利惡劣天氣。當天早上香港受一道強雷雨帶影響（圖 6a），廣泛地區錄得超過一百毫米雨量（圖 6b），天文台更需要在上午九時正至十時二十五分發出紅色暴雨警告信號。

## 5. 基於風險的風暴潮預報服務

熱帶氣旋是影響華南沿岸地區的主要災害性天氣之一，其帶來的極端風暴潮可能為低窪地區帶來嚴重水浸，造成重大傷亡和基礎設施的破壞。

針對香港沿岸易受風暴潮影響的地點，天文台正開發基於風險的風暴潮預報服務，應用數值風暴潮模型和集合預報策略，計算這些地點可能出現的風暴潮情景的概率並製作相關風險矩陣。目的是提供各類水浸風險的評估產品，供天氣預報員及應急管理部門作參考及啟動應急回應行動，以應對即將到來的風暴潮，尤其是一些無法提前被確定性預報準確地描述出來的極端事件所帶來的威脅。

為提供更好的風險評估，天文台須與相關應急管理部門合作，參考他們業務運作的經驗及要求，為每個易受風暴潮影響的地點，制定獨立的風暴潮風險矩陣，以提高預警風暴潮威脅的效用。

基於過去誤差統計生成的概率預報，現階段開發了基於風險的風暴潮預報產品原型並進行試用。在熱帶氣旋山竹的個案研究中，圖 7 和圖 8 分別顯示香港大澳的水位概率預報的時間序列和風暴潮風險矩陣。

風險矩陣顯示在 2018 年 9 月 16 日下午，大澳的水位有 50%至 75%機會超出海圖基準面 3.8 米或以上。

現階段試用的預報產品原型仍有不少限制，後續的工作包括進行更全面的驗證和優化演算方法，特別是測試及改良對集合預報系統產品進行後處理的相關方法。

## 6. 酷熱天氣機器學習模型

受到全球暖化及城市化熱島效應影響，香港的酷熱天氣變得更頻繁。以 2020 年為例，香港出現酷熱天氣的日數為破紀錄的 47 天。2021 年首 7 個月亦已錄得 33 日酷熱天氣。為了更有效預測酷熱天氣，以提醒市民作出適當避暑措施，天文台採用了機器學習模型中的一種類別型梯度提升決策樹(Catboost)[6]來進行酷熱天氣概率預報。

酷熱天氣機器學習模型收集了香港各區氣象站包括溫度、濕度、香港暑熱指數等觀測資料，以及不同模式對各氣象要素的估值作為機器學習模型的特徵。在訓練過程中，以 2017-2018 年的數據為訓練集，以 2019 年的數據為驗證集以調校模型的超參數，並以 2020 年數據為測試集以判定模型沒有擬合過度。

現時酷熱天氣機器學習模型於每天早上六時和下午三時運行，分別預測當日和翌日香港發生酷熱天氣的概率，並以「非常可能」(Very Likely)、「很可能」(Likely)、「有可能」(possible)、「沒有可能」(None)等四種類別表示，為天氣預報員在發出或取消酷熱天氣警告時提供參考。圖 9 顯示 2021 年 7 月 24 日的案例，相比較傳統的邏輯回歸模型，機器學習模型能更早預警發生酷熱天氣的風險。

## 7. 討論及展望

本文介紹了天文台為加強高影響天氣分析及預報業務的一些技術發展，涵蓋不同的中尺度分析產品，多參數探空分析工具，基於風險的風暴潮預報服務，以及利用人工智能的酷熱天氣概率預報。期望日後

能透過業務運作所累積的經驗和更深入的研發使高影響天氣服務能進一步發展。

## 9. 參考文獻

- [1] Doswell and Maddox, 1986: The Role of Diagnosis in Weather Forecasting.  
[https://www.researchgate.net/publication/237627845\\_The\\_Role\\_of\\_Diagnosis\\_in\\_Weather\\_Forecasting](https://www.researchgate.net/publication/237627845_The_Role_of_Diagnosis_in_Weather_Forecasting)
- [2] 中尺度天气分析业务技术规范（修订稿），国家气象中心，二零一三年三月
- [3] 广东省天气预报技术手册 2009 年修订版
- [4] Weisman, M. L., and J. B. Klemp 1986. Characteristics of isolated convective storms. Mesoscale Meteorology and Forecasting. P. Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., ch. 15, . 504–520.
- [5] Davies-Jones, R.P., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conference on Severe Local Storms, 588 - 592.
- [6] Prokhorenkova et al., 2018: CatBoost: unbiased boosting with categorical features, NeurIPS 2018.  
<https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/file/14491b756b3a51daac41c24863285549-Paper.pdf>





強對流相關特徵	分析層次及符號		建議閾值
濕舌/濕區 (指向濕區)	925hPa		$T_d \geq 20^\circ\text{C}$
	850hPa		$T_d \geq 16^\circ\text{C}$
乾舌/乾區 (指向乾區)	700hPa		$T - T_d \geq 15^\circ\text{C}$
	500hPa		$T - T_d \geq 15^\circ\text{C}$
暖脊	850hPa		/
	700hPa		/
槽/切變線	925hPa		/
	850hPa		/
	700hPa		/
	500hPa		/
乾線 (指向濕區)	925hPa		/
	850hPa		/
急流核	925hPa		12 m/s
	850hPa		12 m/s
	700hPa		16 m/s
	500hPa		20 m/s
	200hPa		30 m/s
輻合線	Surface		/
	925hPa		/
	850hPa		/
	700hPa		/
	500hPa		/

表 1：中尺度高空分析所使用的標識符號及參考閾值。

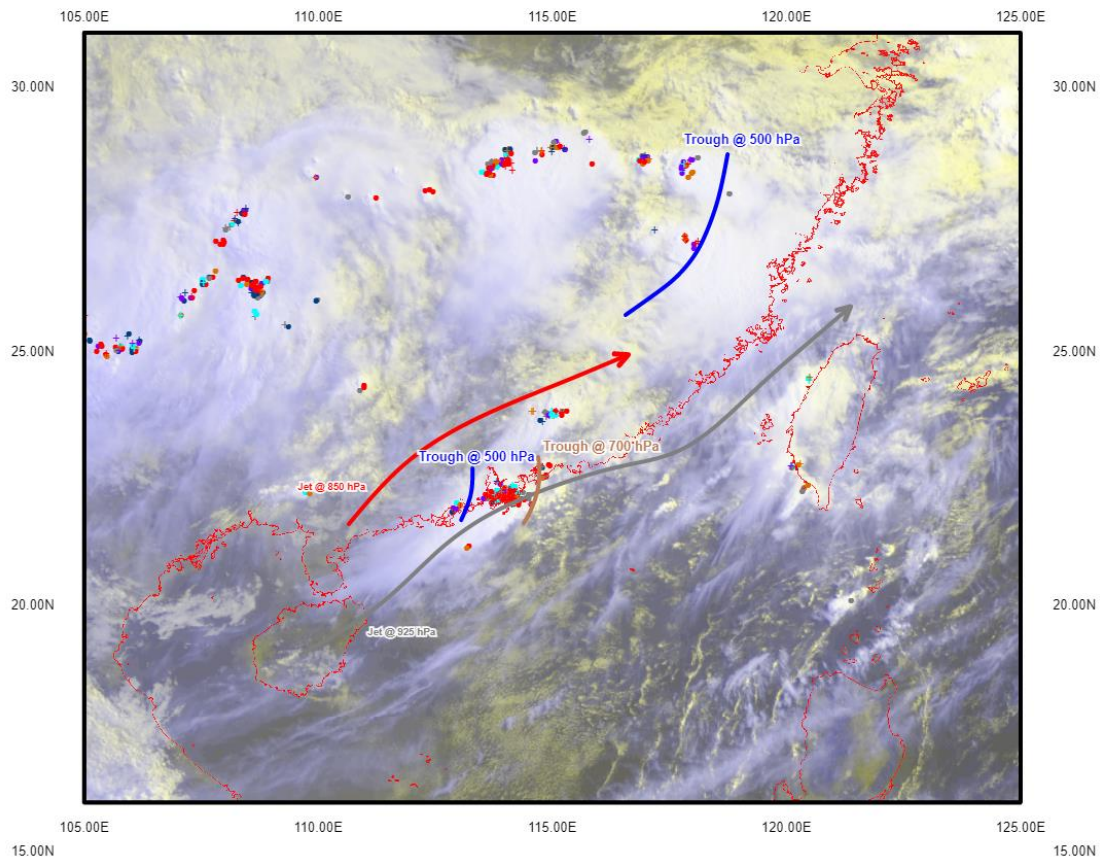


圖 1：2021 年 6 月 28 日早上 8 時的高空中尺度分析圖，疊加向日葵 8 號衛星圖像及 GLD360 閃電產品。低層暖濕西南急流當時影響廣東一帶，加上沿岸地區的中層短波提供有利抬升的條件，在珠江口附近觸發暖區暴雨。

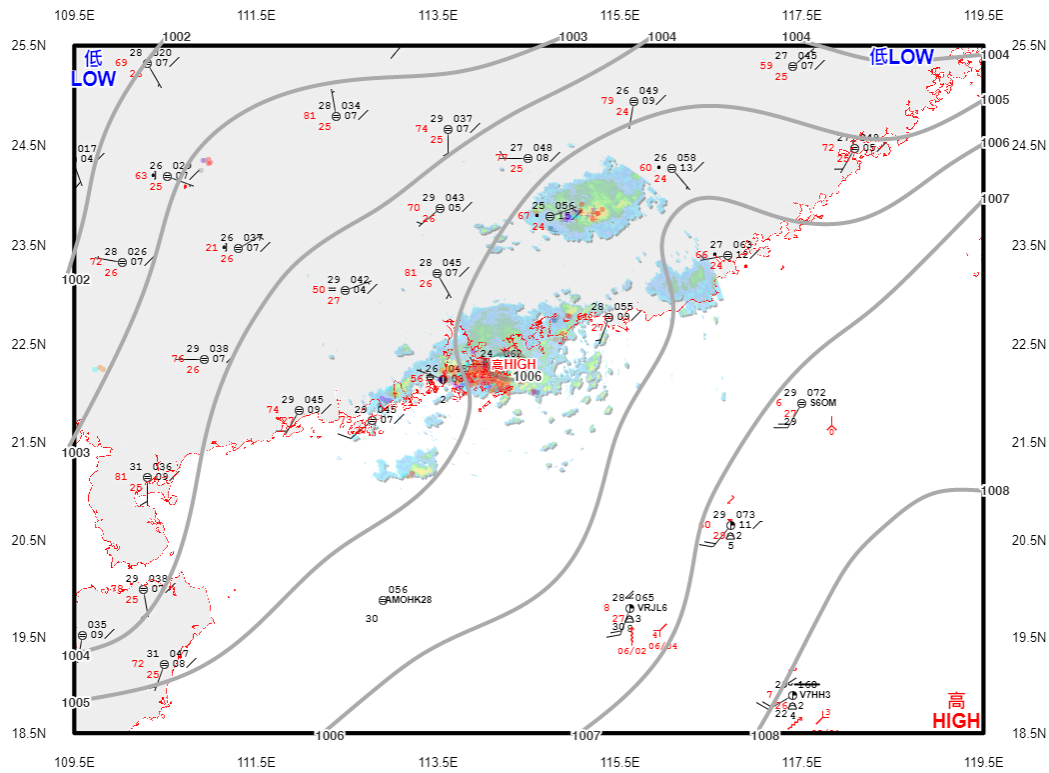


圖 2：2021 年 6 月 28 日早上 8 時的地面中尺度分析圖，疊加天文台雷達圖像及 GLD360 閃電產品。等壓線以每 1 百帕斯卡作間隔。受強對流及頻密雷暴影響，地面分析顯示香港有雷暴高壓。

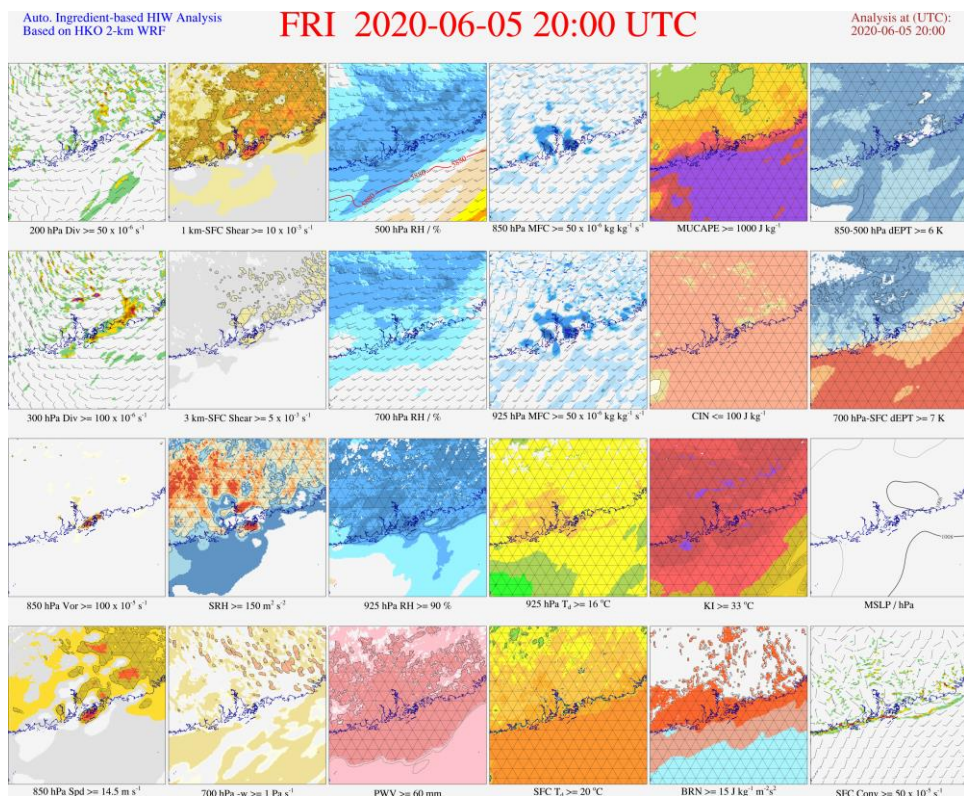


圖 3：2020 年 6 月 6 日上午四時的多參數區域中尺度分析圖，顯

示了高、中、低層大氣的分析場，而動力學和熱力學的不同診斷物理量的數值則以不同顏色所表示(當中陰影線表示數值上超過閾值的地區範圍)。

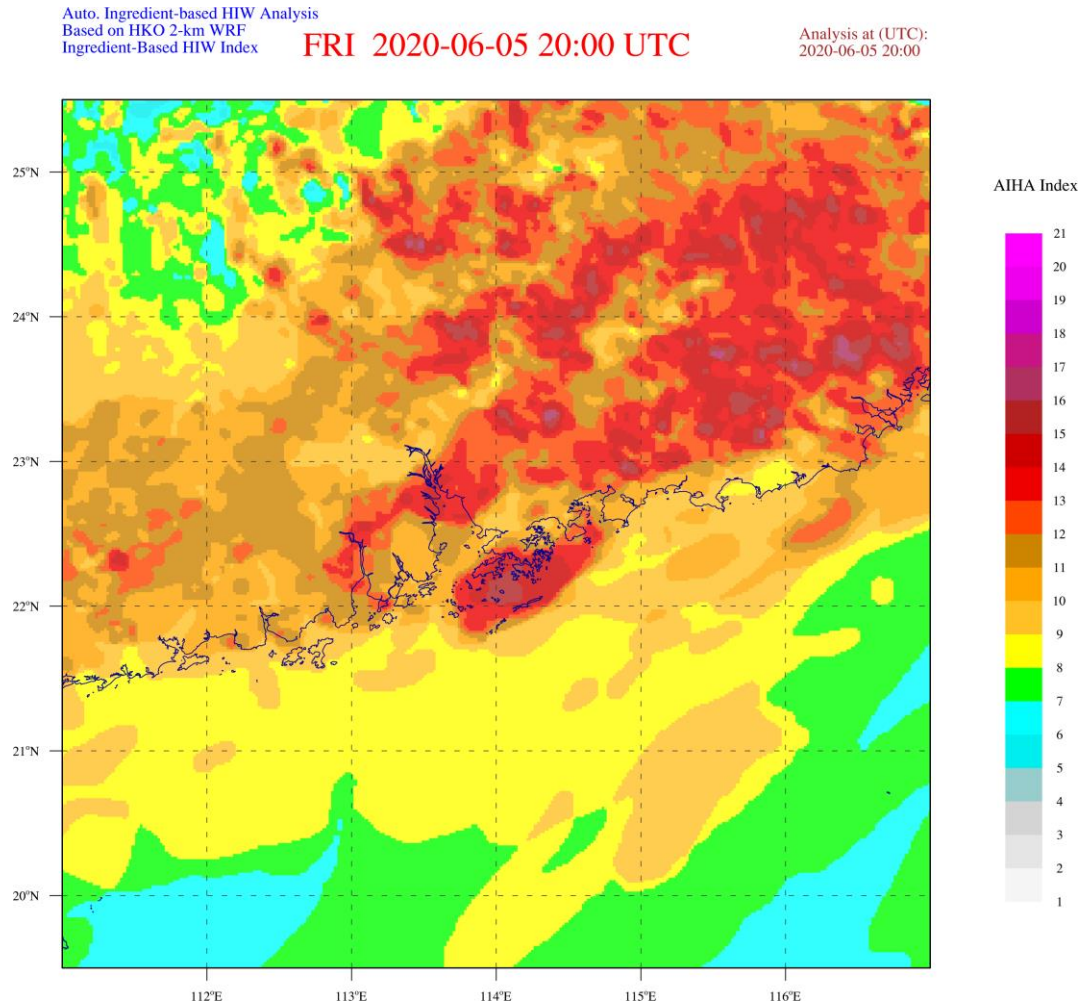
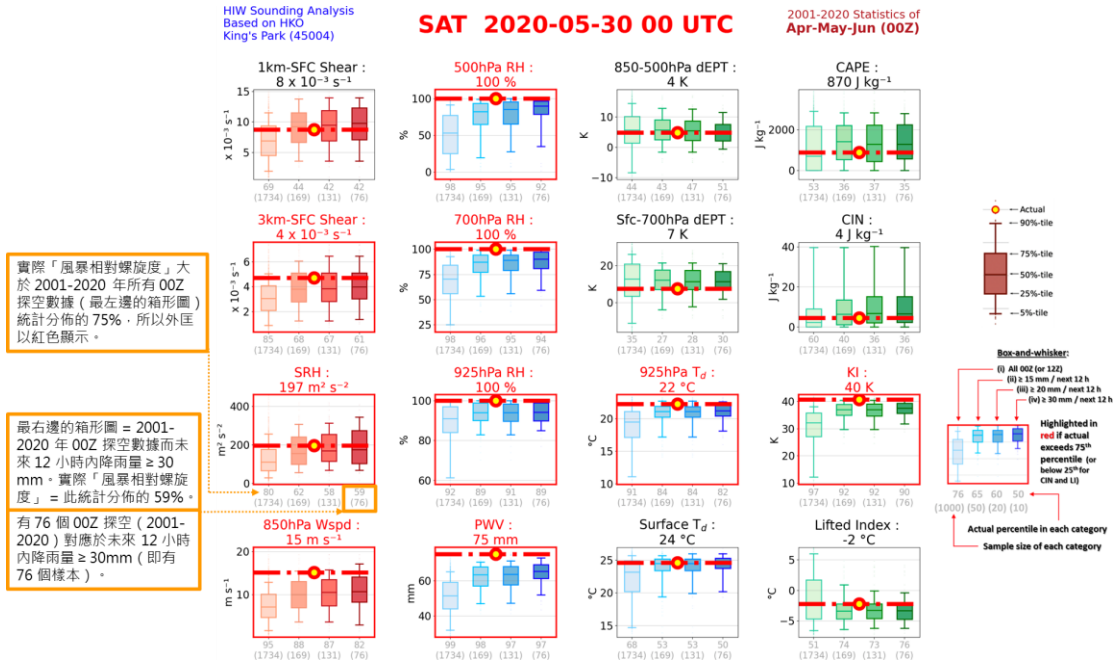


圖 4：對應圖 3 的綜合分析圖顯示珠江口一帶的格點有較多參數超過閾值(深紅色及紫色)，表示有較多有利強對流發展的環境因素。

(a)



實際「風暴相對螺旋度」大於 2001-2020 年所有 00Z 探空數據（最左邊的箱形圖）統計分佈的 75%。所以外框以紅色顯示。

最右邊的箱形圖 = 2001-2020 年 00Z 探空數據而未來 12 小時內降雨量  $\geq 30 \text{ mm}$ 。實際「風暴相對螺旋度」= 此統計分佈的 59%。

有 76 個 00Z 探空（2001-2020）對應於未來 12 小時內降雨量  $\geq 30 \text{ mm}$ （即有 76 個樣本）。

(b)

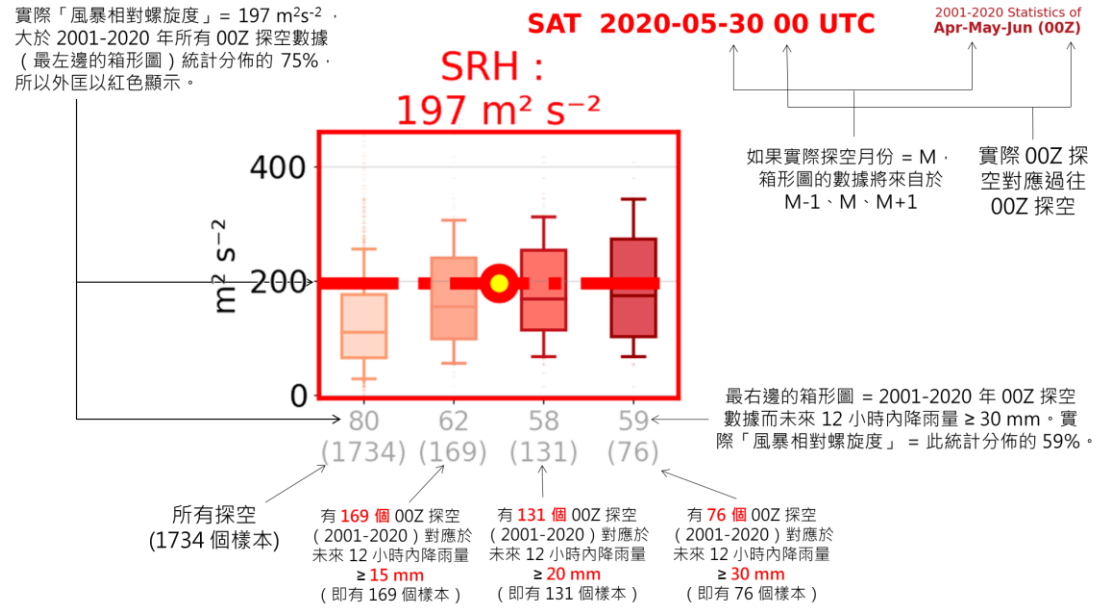


圖 5：(a) 2020 年 5 月 30 日的 00Z 探空分析顯示，在十六個高影響天氣參數裡，有九個高於統計分佈的 75%（外框為紅色）；(b) 顯示如何解讀其中一個高影響天氣參數，圖為「風暴相對螺旋度」。

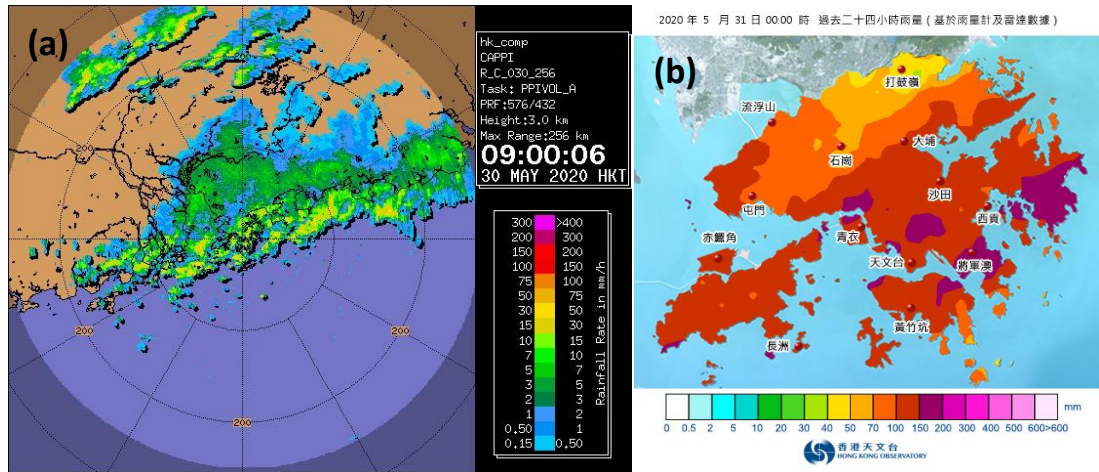


圖 6:(a)2020 年 5 月 30 日香港時間上午 9 時的雷達圖;(b)2020 年 5 月 30 日全日所錄得的雨量 (毫米)。

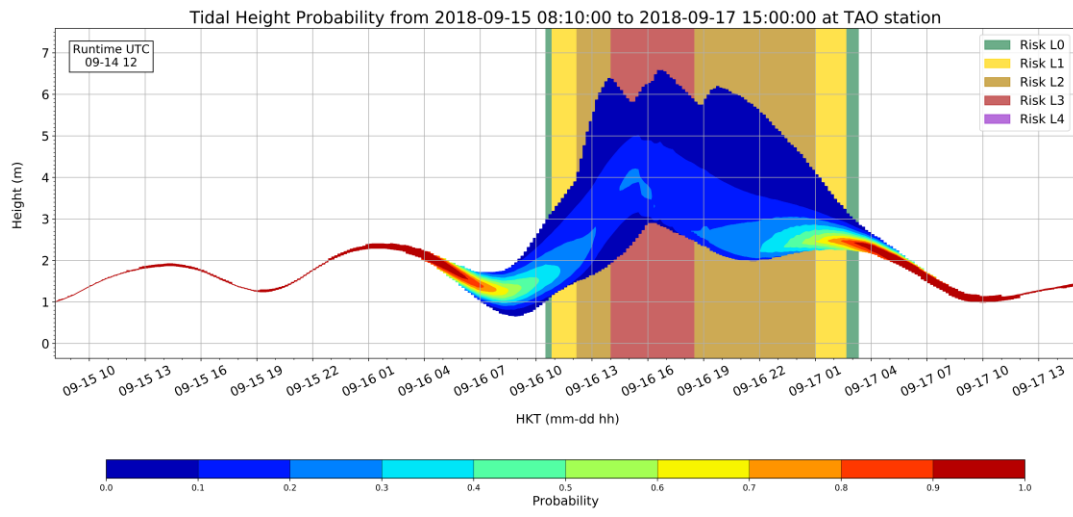


圖 7：熱帶氣旋山竹的個案研究中，香港大澳的水位概率預報的時間序列。

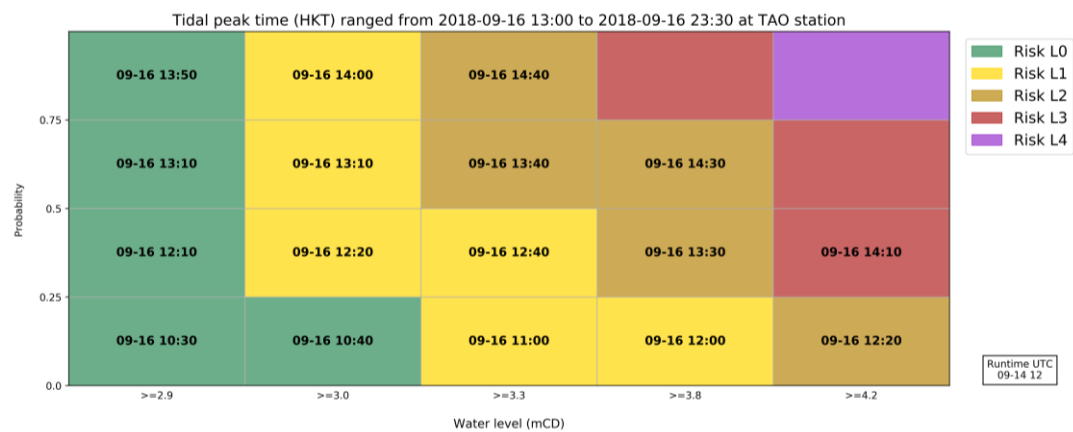


圖 8：熱帶氣旋山竹的個案研究中，香港大澳的風暴潮風險矩陣，矩陣上的時間為預測達到特定水位（X 軸）及機率（Y 軸）閾值的日期和時間。風險矩陣顯示在 2018 年 9 月 16 日下午 2 時 30 分開始，大澳的水位有 50%至 75%機會超出海圖基準面 3.8 米或以上。

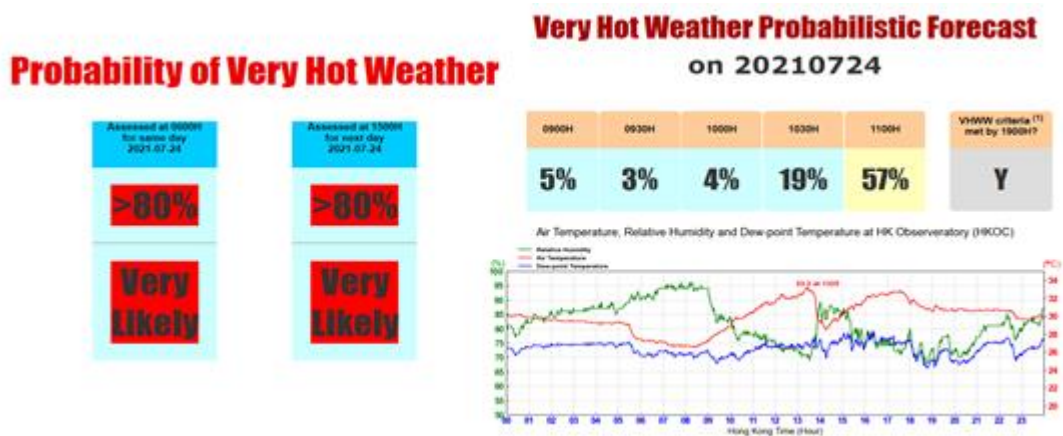


圖 9:(左)酷熱天氣機器學習模型在 2021 年 7 月 24 日早上和 7 月 23 日下午對 7 月 24 日發生酷熱天氣機率的評估均為>80%。(右上) 邏輯回歸模型對 7 月 24 日發生酷熱天氣機率的評估。(右下)當日天文台的溫度時間序列，最高溫度為 33.2 度。