探討臺灣氣象實驗的奧秘：從 TAMEX 到 TAHOPE 的發展之路

文／柯緁盈

臺灣的主要水資源來源於每年五至六月的梅雨鋒面、夏季西南季風以及颱風。由於臺灣位於特殊的地理位置，且擁有高聳的山脈，這使得天氣系統與地形的相互作用變得格外複雜。梅雨鋒面經常引發淹水災害，造成顯著的經濟損失。然而，由於對這些天氣系統的結構和演變了解不足，臺灣的天氣預報和防災能力仍然相對有限。

因此，自 1980 年代起，科學家們開始規劃並與國際單位合作，致力於研究臺灣的致災天氣系統，以提升預報的準確性，並提前制定防災應變措施。

本文將介紹三項在梅雨季節期間進行的與國際合作的大型觀測實驗，這些實驗涵蓋了臺灣北部和南部的研究。通過這些觀測實驗，科學家們逐步加深了對天氣系統的理解，並找出了強降雨的關鍵因素。此外，隨著計算能力的提升，科學家們獲得了更多已知的資料，從而改進了數值模式預報，顯著增強了臺灣地區對極端強降雨的預測能力。深入研究這些中尺度天氣系統的結構，使我們能夠更好地理解和預測未來的劇烈天氣現象。

1987 年 Taiwan Area Mesoscale Experiment（TAMEX）

臺灣中尺度實驗（Taiwan Area Mesoscale Experiment, TAMEX）是臺灣與美國科學家合作進行的一項研究計劃，旨在探討導致臺灣山洪暴發的強降雨的中尺度動力學和微觀物理過程，同時提升這類天氣事件的預報能力。該計劃的三個核心科學目標為：（1）梅雨鋒相關的中尺度環流；（2）梅雨鋒內部中尺度對流系統的形成和演變；（3）臺灣地形對大氣環流、梅雨鋒與中尺度對流系統的影響。

TAMEX 計劃聚集了超過 125 名來自臺灣和美國的科學家，是兩國科學界首次在如此大規模上合作的研究計劃。參與單位包括美國國家海洋和大氣管理局（NOAA）、美國海軍研究實驗室（The U.S. Naval Research Laboratory）、美國國家大氣研究中心（NCAR），以及阿拉巴馬、科羅拉多、佛羅里達、夏威夷、北卡羅來納、奧克拉荷馬、普渡、聖路易斯、華盛頓和耶魯等多所大學。

TAMEX 採用了多層次的綜合觀測方法，結合了地面觀測站、氣象雷達、衛星與飛機等工具，進行了從地面到高空的全面氣象探測。地面觀測部分設置了密集的氣象站網絡，收集溫度、濕度和風速等氣象數據。雷達部分利用多台氣象雷達觀測降水的強度與

分佈。衛星數據則提供了大尺度天氣系統的資訊，而飛機觀測則深入探測鋒面系統的三維結構。研究發現，梅雨鋒具有顯著的垂直分層結構，且明顯受到地形的影響。尤其是在梅雨季節，低層噴流起到了關鍵作用，加強了水汽輸送，進而增強了降水過程。梅雨季節的降水來自層雲和對流雲的共同作用，鋒面活動和地形因素對降水強度和範圍有著重要影響。

TAMEX 的研究大大提升了對梅雨鋒系統的理解，並改進了預報模型的準確性。尤其是在梅雨季節，降水預測的偏差顯著降低，這對於災害預防和減少災害損失具有重要意義。該計劃提供的關鍵數據，有助於制定和實施更有效的防災措施。總的來說，TAMEX 在理解梅雨鋒面系統及其引發的劇烈天氣現象方面取得了豐碩成果，對提升台灣及周邊地區的天氣預報能力具有重要貢獻。

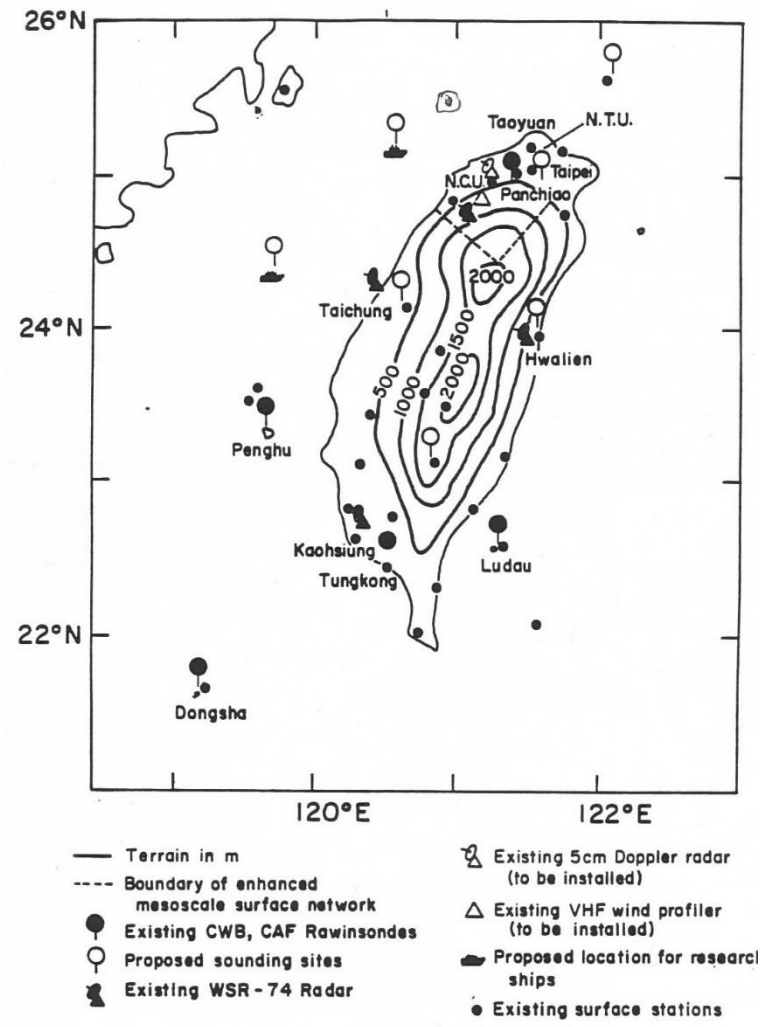

圖 1、TAMEX 觀測實驗儀器分布圖

2008 年 Southwest Monsoon Experiment / Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment （SoWMEX / TiMREX）

有了過去 1987 年的大型觀測實驗經驗，當時專注在北部的強降雨，這一次的實驗規劃，主場轉向中南部地區，以夏季所引進的西南氣流為主角，了解西南氣流為中南部帶來強降雨事件的實地觀測資訊。

西南氣流觀測與豪雨預測實驗（簡稱西南氣流實驗，英文縮寫為 SoWMEX，即 Southwest Monsoon Experiment），也被稱作 TiMREX（Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment），於 2008 年 5 月 15 日至 6 月 30 日間進行，研究範圍涵蓋南中國海北部、台灣本島及鄰近海域。該實驗旨在應對豪雨預警和防災減災需求，強化對西南氣流引發豪大雨天氣系統的科學認識，並提升短期定量降雨估算與預報的準確性。

實驗中，研究團隊透過增加南中國海和台灣海峽的氣象探空數據（包括機載投落送和船舶探空），探索台灣梅雨季期間西南氣流的熱動力特性。所使用的設備包括環繞台灣的都卜勒雷達、台灣首部移動式 X 波段雙偏極雷達、美國國家大氣研究中心（NCAR）的 S 波段雙偏極雷達，以及自動氣象站和地面 GPS 測站。

這次實驗的科學目標主要集中在理解西南氣流的熱動力性質，及其與梅雨鋒面和中尺度對流系統的發展、組織及維持的關係。此外，實驗還探討了中尺度對流系統中的運動熱力學和微物理降雨過程，特別是與豪大雨相關的微觀物理過程。研究團隊還研究了台灣地形和海陸交界如何影響中尺度對流系統的激發與消散，並致力於發展雷達資料同化技術以及極短期降雨預報技術。

這項實驗與美國科學家密切合作，美方提供了 NCAR 的 S 波段雙偏極化雷達（SPOL）參與觀測。美國科學家希望通過高精度的觀測系統，進行台灣山區的精密降雨估算與預報，深入理解地形對豪雨系統的影響。實驗也吸引了來自澳洲、加拿大、日本及韓國的研究人員參與，他們攜帶了高解析度的雨滴譜儀、垂直降雨雷達及超高解析度雲動力模式，進行定量降雨監測與資料同化預報實驗。

研究重點放在西南季風背景下豪雨個案的密集觀測及分析，深入剖析西南氣流的熱動力特徵、豪大雨天氣系統的觸發機制，以及中尺度對流系統內部的雲微物理和雲動力結構。實驗也進行了高解析度數值模擬和雷達資料同化，以改進現有的降雨預報模型。SoWMEX 通過多樣化的觀測技術和數值模擬，為未來的豪雨預測提供了寶貴的科學依

據，顯著提升了預測的準確度，對台灣及其周邊地區的防災減災工作具有深遠影響。

實驗結果豐碩，不僅建立了在梅雨季進行機載投落送探測的有效方法，還為改進數值模式初始場和資料同化技術奠定了基礎，從而提升了預報精確度。大量的雲物理和雲熱動力資料被收集並應用，讓科學家能更全面地理解豪雨的成因，並建立涵蓋豪雨系統整個生命週期的模型，這些模型為數值模式的參數化提供了重要的依據。

此外，實驗還創建了雷達和衛星資料同化技術的測試平台，這些技術幫助研究人員掌握高精度氣象儀器的應用，進一步提升了短期和極短期降雨預報的能力，增強了洪水預測和土石流預警的準確性。這次實驗不僅促進了基礎氣象科學的發展，還強化了國際間的合作，推動了相關研究領域的整體進步。

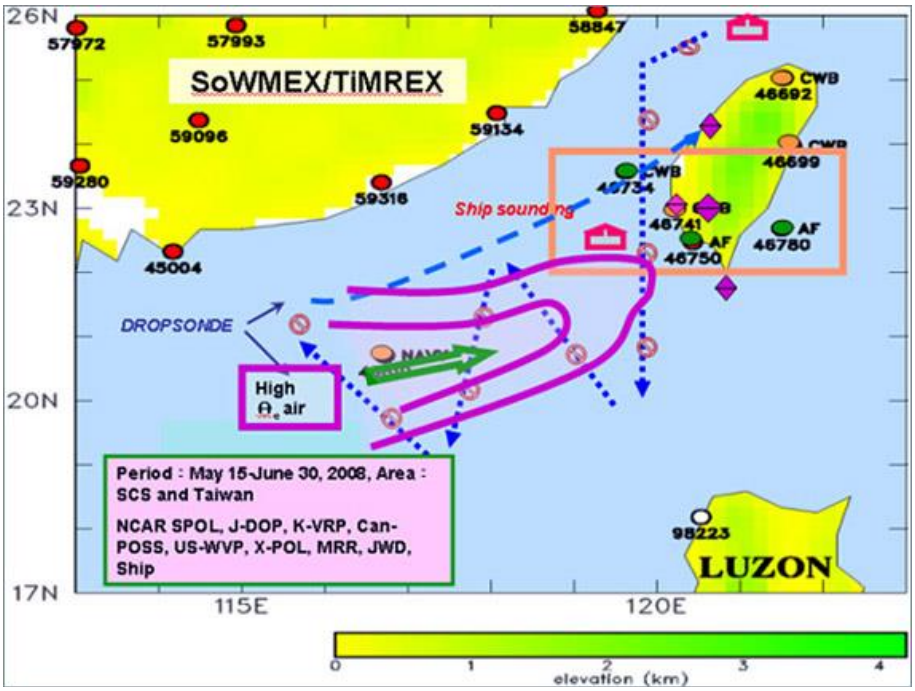

圖 2、SoWMEX 觀測實驗儀器分布圖

2022 年 Taiwan-Area Heavy rain Observation and Prediction Experiment / Prediction of Rainfall Extremes Campaign in the Pacific（TAHOPE/PRECIP）

此次實驗有別於 1987 年與 2008 年，將實驗從梅雨延伸到颱風觀測，與台灣東邊的日本完成實驗三方共同的大型國際聯合觀測實驗。

臺灣區域豪雨觀測與預報實驗（TAHOPE）是一項由臺灣主導的大型觀測與預報計劃，預計自 2019 年 8 月至 2022 年 7 月為期三年。該實驗於 2020 年 5 月至 8 月

期間，與美國的 PRECIP2020 和日本的 TPARC-II 共同推動了國際聯合劇烈天氣觀測計劃，集中觀測梅雨季節和颱風活動。此國際合作旨在研究包括大尺度環境影響、中尺度對流系統、登陸颱風以及小尺度雲微物理過程等主題。透過台灣的獨特地形，如高山與海島環境，實驗進行了大氣密集觀測，並結合先進的大氣預報模型，實現即時或準即時的資料同化與數值預報。

臺灣被選為 PRECIP 計劃的主要觀測地有幾個原因。首先，梅雨季節和初期熱帶氣旋期間，臺灣常發生極端降雨事件。此外，臺灣環境濕度高，提供了研究水汽傳輸和其他影響降水因素的理想條件。其多樣化的地形與海洋環境，使得研究結果可以應用於全球其他相似地區。臺灣擁有密集的氣象觀測網絡，增強了 PRECIP 專案在野外觀測中的精度。

PRECIP 與臺灣的 TAHOPE 和日本的 TPARC-II 計劃密切協調，這三項大型研究專案共同推進極端降雨事件的預測技術。這將有助於提升天氣預警、風險溝通以及應對這些破壞性事件的能力。此外，對地形降水、濕氣輸送和模型物理過程的理解也將應用於其他天氣現象的研究。PRECIP 所收集的數據將對降水估算、數據同化、雷達氣象學和水文學產生深遠影響。這次與 TAHOPE 和 TPARC-II 的協同合作也增強了國際間的科學合作，並對 2020 年東京奧運會前後的颱風偵測和預報提供了技術支持。PRECIP 還為年輕科學家、研究生及本科生提供了研究與實地觀測的機會，尤其鼓勵了代表性不足群體的參與。

太平洋極端降雨預測運動（PRECIP）專案的目標是提升我們對產生極端降雨的多尺度動力學、熱力學及微物理過程的理解。2022 年春季與夏季，該專案在東亞地區進行了密集觀測，以探索各類強降雨事件的共性，並充分利用北太平洋西部這個天然的濕潤實驗場所。美國提供的觀測儀器包括科羅拉多州立大學的 SEA-POL 雷達、無線電探空儀、輻射計、國家大氣研究中心的 S-Pol 雷達以及三個微脈衝差分吸收鐳射雷達（DIAL）。2022 年 5 月至 8 月期間，PRECIP 與 TAHOPE 和 TPARC-II 展開合作，使用研究型 X 波段雷達以及中央氣象局與日本氣象廳的雷達網路進行觀測。

這項研究將綜合分析來自野外運動雷達網路的新觀測數據，並結合無線電探空儀和 DIAL 測得的熱力學數據，對強降雨過程進行深入理解。本次研究的重點在於展示在劇烈天氣下，觀測資料如何促進我們對降水過程的理解，進而改進預報模型。

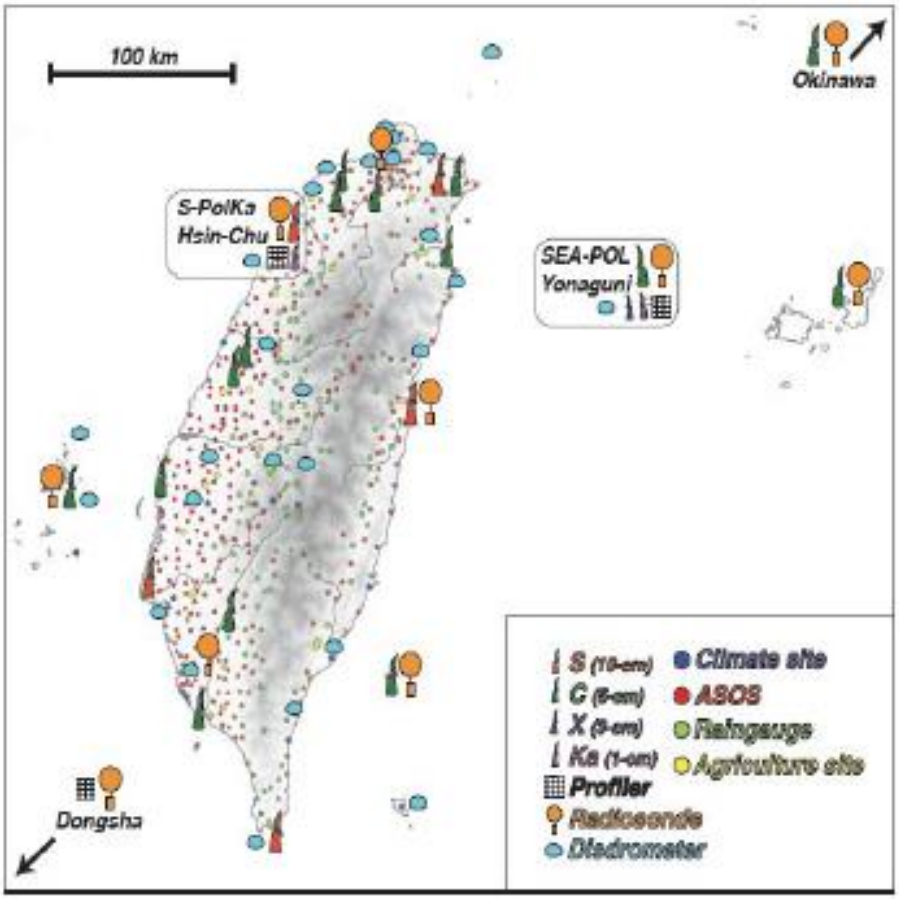

圖 3、TAHOPE 觀測實驗儀器分布圖

結語

根據臺灣近年來的一系列大型氣象觀測與預報實驗，包括「臺灣中尺度實驗」（TAMEX）、「西南氣流觀測與豪雨預測實驗」（SoWMEX）以及「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」（TAHOPE），科學家在強降雨、颱風和梅雨季節的預測上取得了顯著進展。這些實驗通過結合臺灣特殊的地形條件與天氣模式，並與國際合作夥伴攜手，實現了對極端天氣事件的更精確預測與防範。

TAMEX 是最早的一次重大合作，旨在探索梅雨鋒系統的結構以及中尺度天氣系統的動力學，該實驗強調了臺灣地形對氣流和對流系統的深遠影響。透過地面觀測站、雷達、飛機探測等多樣化的數據收集方式，TAMEX 在提升梅雨季降雨預報準確性方面取得了關鍵成果，為後續天氣預測技術奠定了基礎。

接下來的 SoWMEX 聚焦於研究西南季風所引發的豪雨，特別是在增強對中尺度天氣系統的理解方面，該實驗顯著提高了定量降雨預報的精度。通過與國際科學家的合作，SoWMEX 利用多種觀測技術來探索氣流結構及其對劇烈降雨的影響，為防災減災提供了寶貴的數據支持。

最近的 TAHOPE 實驗則進一步將研究範圍擴大至梅雨和颱風等劇烈天氣事件，並透過與美國、日本等國的國際聯合觀測，推動了即時資料同化技術的發展，並加強了短期和極短期的天氣預測能力。TAHOPE 不僅為提升降雨預報的精度提供了新工具，還強化了颱風登陸後的預警系統，對防災減災具有重要的實際意義。

這些實驗的接連成功，大幅提升了對臺灣及周邊區域複雜氣候系統的理解，改進了對極端天氣事件的預測精度。透過跨國合作與先進的觀測技術，科學家能更準確地預測降雨強度和範圍，及時發布洪水、土石流等災害的預警，從而減少生命與財產損失。同時，這些研究也促進了全球氣象科學的發展，為培育新一代的氣象專才打下基礎。隨著未來觀測技術的不斷進步和更多國際合作的推動，臺灣的天氣預測和防災能力將會更加精確，惠及更多人群。

柯緁盈

國立中央大學大氣科學學系博士後研究員

參考資料

[1] TAMEX | Earth Observing Laboratory (ucar.edu): https://www.eol.ucar.edu/field_projects/tamex

[2] Kuo, Y., and G. T. Chen, 1990: The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): An Overview. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71, 488–503, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1990)071<0488:TTAMEA>2.0.CO;2.

[3] SoWMEX Home (pccu.edu.tw): https://exp.pccu.edu.tw/sowmex/index.php?Page=Scientific_TW.htm

[4] TIMREX | Earth Observing Laboratory (ucar.edu): TIMREX | Earth Observing Laboratory (ucar.edu)

[5] TAHOPE22 HOME (ntu.edu.tw): https://rain.as.ntu.edu.tw/TAHOPE/TAHOPE-home.html

[6] PRECIP | Earth Observing Laboratory (ucar.edu): https://www.eol.ucar.edu/field_projects/precip