

包括美國、以色列、澳大利亞和中國大陸等，全世界約有25個國家，均持續投入人工增雨之研究或進行常態作業。了解國際間人工增雨科技發展現況，對臺灣而言，是在作業以外的最重要課題。由美國懷俄明州的種雲實驗(ASCII-12)、澳洲的昆士蘭種雲計畫(QCSR)及中國大陸的人工增雨實驗，服務團摘要相關文獻、書籍與報告之重要建議如下，供水利署參考：

- (1)依天氣系統特性選擇種雲成分與施作策略，有機會達到「增強回波與降水」之目的。
- (2)人工增雨的成效檢驗，需針對地理與大氣凝結核特性進行分類，規劃合適的控制與實驗區進行比對，配合評估過的觀測(儀器與位置)策略，透過隨機種雲方式，經過長時期的統計分析，方能得到有意義的結論。
- (3)偏極化雷達的觀測與參數分析及雲中雲物理攝影的應用，應是提供具體證據的必要設備。
- (4)除地面作業外，空中作業(機載焰劑燃放或火箭投射焰劑)是確保作業成效的重要手段。

以下分別記錄美國懷俄明州、澳洲昆士蘭及中國大陸種雲實驗的重要資訊。

(一)美國懷俄明州種雲實驗

從2007~2008起，於懷俄明州東南部山區進行了「懷俄明天氣改造先驅計畫」(Wyoming Weather Modification Pilot Project, WWMPP)；此計畫針對冬季的地形雲，於地面施作碘化銀，在隨機種雲實驗架構下進行。其中於2012年，在美國國家科學基金會(national science foundation)的支持下，整合了固定式Ka-band氣象雷達、微波輻射計、雲幕儀、雨滴譜儀、雨量計、探空及其他傳統地面觀測，並特別規劃了移動式觀測平台，包括車載X-band偏極化雷達與飛機觀測(含機載的3-mm雲雷達)，收集到許多極富價值的觀測資料，用來檢驗在冬季富含過冷水的層狀地形雲環境下，透過碘化銀種雲增加地面降雪的效果；2012年的實驗期間還被特別指定為ASCII-12(the 2012 AgI Seeding Cloud Impact Investigation campaign)。儘管目前國內種雲作業已捨棄

碘化銀為種雲媒介，服務團仍從該計畫相關文獻(Geerts et al. 2013；Jing et al. 2015；Jing and Geerts 2015)中摘要出重要論述，作為臺灣人工增雨作業與成效評估技術發展之參考。

利用迎風面的上升氣流，將地面AgI送進雲層中，在恰當的環境氣溫下，額外的冰核就能更有效率地將過冷水轉換為降雪，此機制為冷季常使用的冰核種雲(glaciogenic cloud seeding)概念，也就是所謂的靜力種雲(static seeding)。若氣流不穩定度較大，潛熱釋放的回饋很可能促使雲層中局部深對流的發展，這種情況則為所謂的動力種雲(dynamic seeding)。ASCII-12期間的9次實驗環境，便區分為層雲與對流雲環境兩種，各包含6次與3次個案。

ASCII-12的AgI產生器，分別排列於在迎風面上游相對低海拔的山腳下；更上游的區域，不會受到AgI的影響，是所謂的控制區；而迎風面及背風面均可視為受AgI影響的目標區，但與AgI產生器的距離遠近，關係到AgI的影響程度，故可再區分為迎風面目標區及背風面目標區；在前述控制/目標區的設計下，再將各種觀測儀器或平台，佈署於最適當之位置以發揮最大之觀測能量(圖2-9-1-1)，尤其是偏極化雷達觀測參數所提供的訊息，對冰粒子的辨識有相當大的幫助。

地形性層雲環境下，在ASCII-12期間的單一個案(2012年2月11日)中，水相攝影(圖2-9-1-2)於種雲前多觀測到近圓形凇化粒子、種雲後多為雪片及樹枝狀結晶，迎風面目標區的低層回波強度(Z)於種雲後增強、差異回波(ZDR)於種雲後增至0.5、相關係數(ρ_{HV})高，以及迎風面目標區的高ZDR(如0.5)的頻率於種雲後增加(圖2-9-1-3)等，皆為靜力種雲機制的特徵。而6次層雲環境個案的合成分析，也呈現與上述單一個案相同的特徵，即傾向靜力種雲機制存在的結論；但因目標區雲頂附近的合成回波強度，在種雲前後有顯著可辨的增強，由於地面種雲應不致影響超過邊界層以上的雲層，所以雲頂附近回波強度的變化，很可能是天氣系統增強所致，因此並不能排除系統增強對目標區低層回波的影響，因此並不能就此6次個案的合成結果，驟下種雲有效之結論。但建議可進行更多個案分析。

在地形性淺對流雲層裡，稍強的上升運動，有機會將冰核送至更冷、更多過冷水的高度，或是潛熱釋放激發更顯著的對流，往往比層狀雲更適合進行地面冰核增雨。不過ASCII-12期間3次包含淺對流個案的合成觀測分析，淺對流核心(20 dBZ)的種雲前後差異回波頂高(echo top)，在目標區並沒有比控制區更大(圖2-9-1-4)，顯然這3次淺對流個案中的動力種雲效果並不顯著；但由於目標區的低層回波(降雪)強度，在種雲前較控制區弱而種雲後較控制區強(尤其在背風面)，此回波的增強代表種雲應有作用(圖2-9-1-5)。分析回波強度Z與偏極化雷達參數ZDR的分布(圖2-9-1-6)，呈現(1)種雲後目標區Z~20dBZ對應的ZDR~1dBZ(應代表較大冰晶)頻率增加、(2)種雲前後水相均以樹枝狀冰晶結構為主，在雲中液態水量(4 km高度，0.09~0.14 gm⁻³)偏低環境下，回波增強是少量過冷水在冰核上呈現樹枝狀晶體結構成長所致。因此，AgI seeding並未顯著改變在地形性淺對流環境裡的原有冰晶成長過程，回波(即降雪)的增強仍是以static seeding機制為主。同樣地，3次個案的分析只是增加了信心，還需要更多個案的統計結果來支持種雲有效的結論。

ASCII-12的經驗顯示，依天氣系統特性選擇合適的方法，有機會達到增雨目的；例如在冬季地形性層雲環境下，適合以地面施放AgI增加冰核的方式進行。而人工增雨的成效檢驗，則是需要量身訂作施作與觀測策略，經過長時期的統計分析，方能得到有意義的結論。尤其是偏極化雷達與雲物理攝影的應用，應是提供具體證據的必要設備。

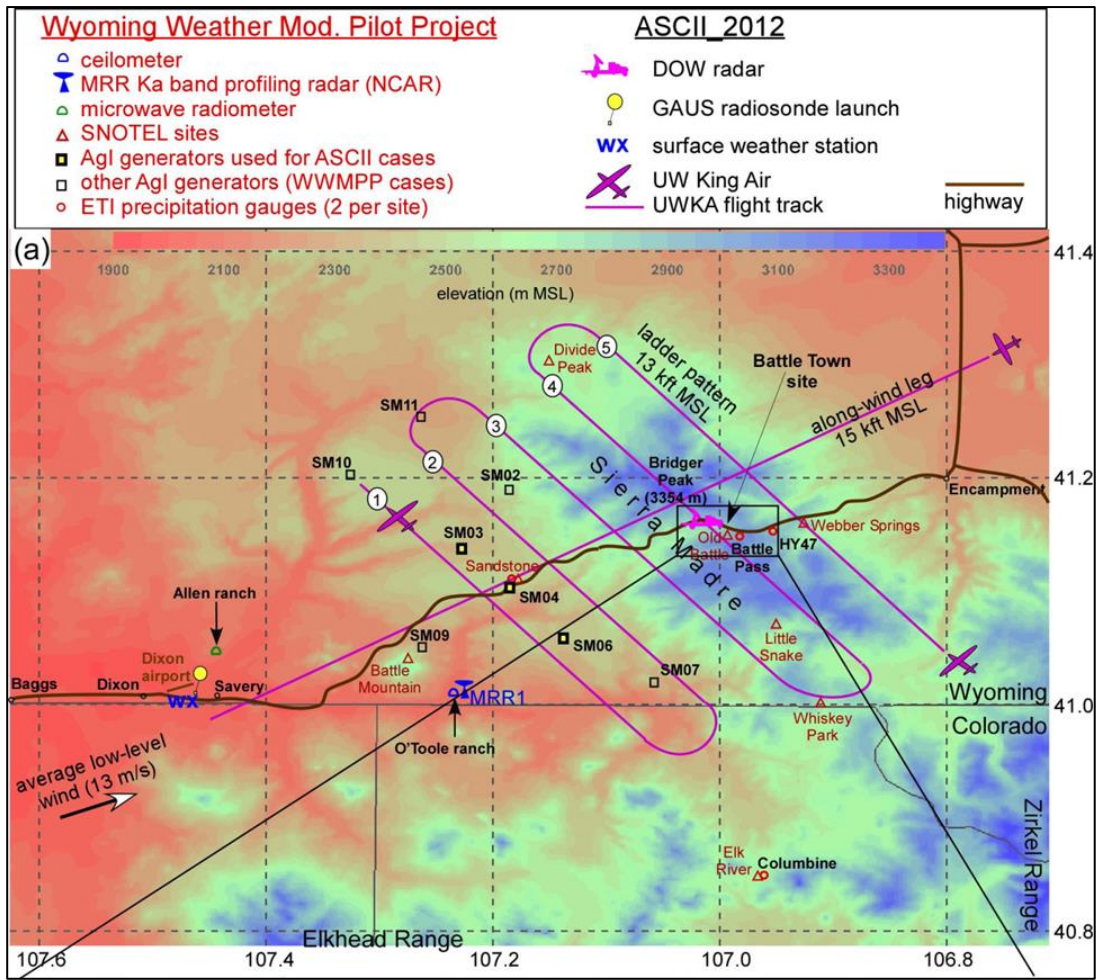


圖2-9-1-1 ASCII-12期間之實驗與觀測策略(摘自 Geerts et al. 2013)。

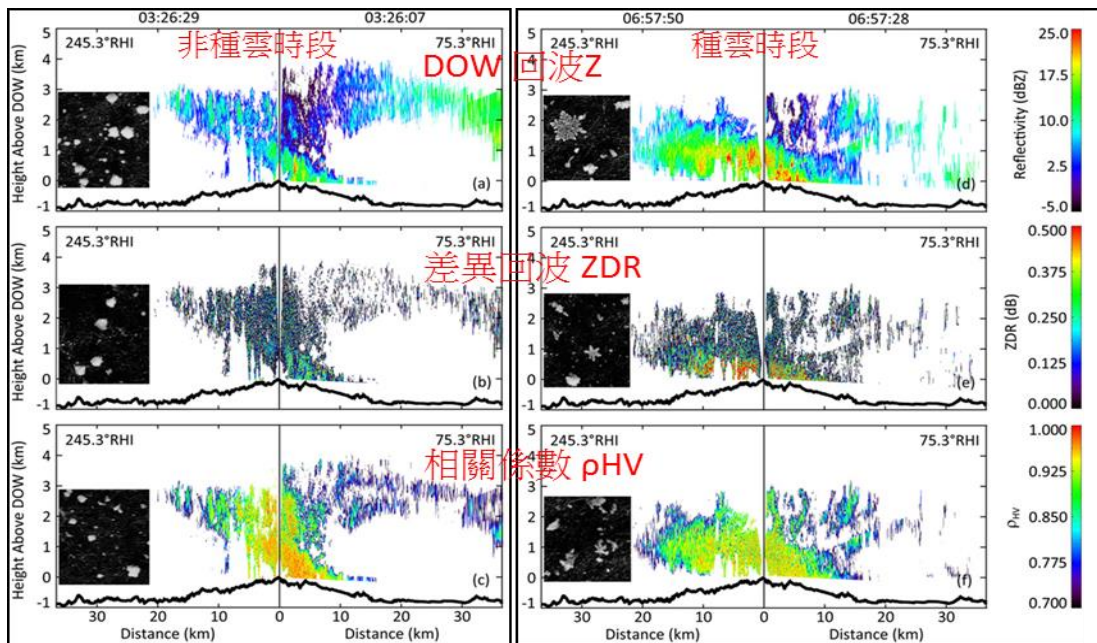


圖2-9-1-2 ASCII-12期間層雲環境之個案觀測(摘自 Jing et al. 2015)。

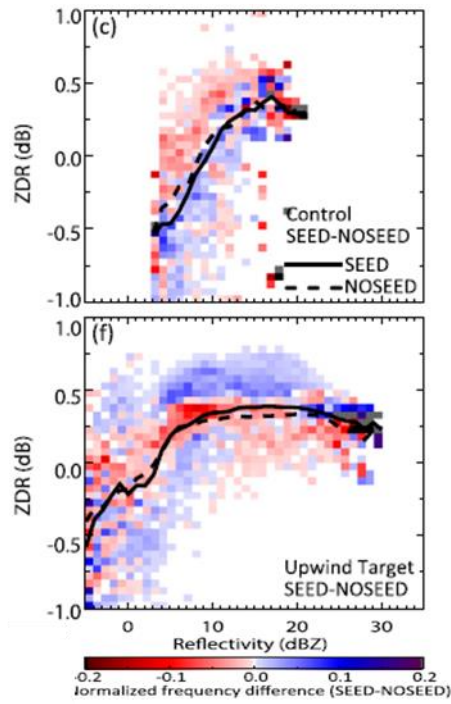


圖2-9-1-3 同圖2-9-1-2，但為種雲前後ZDR—Z分布之頻率差異(摘自Jing et al. 2015)。

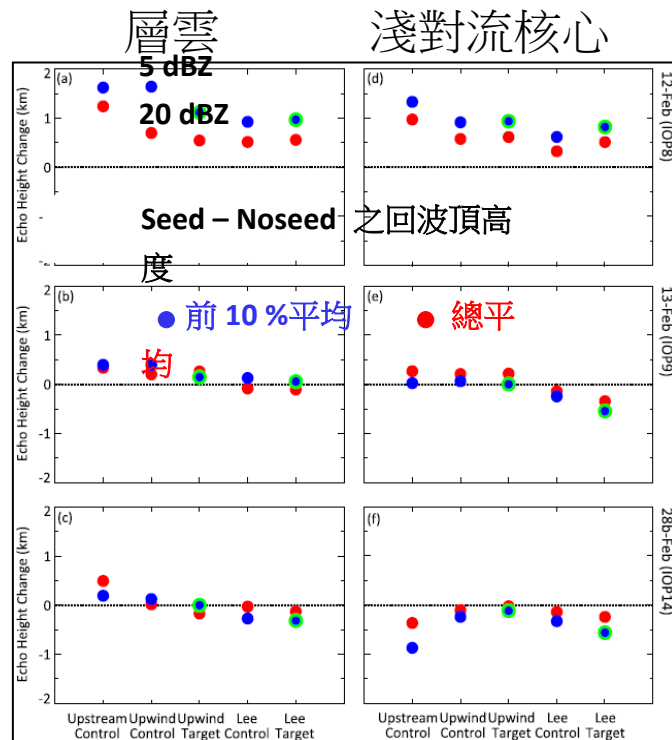


圖2-9-1-4 ASCII-12期間3次淺對流個案於種雲前後之合成差異回波頂高(摘自Jing and Gerrts 2015)。

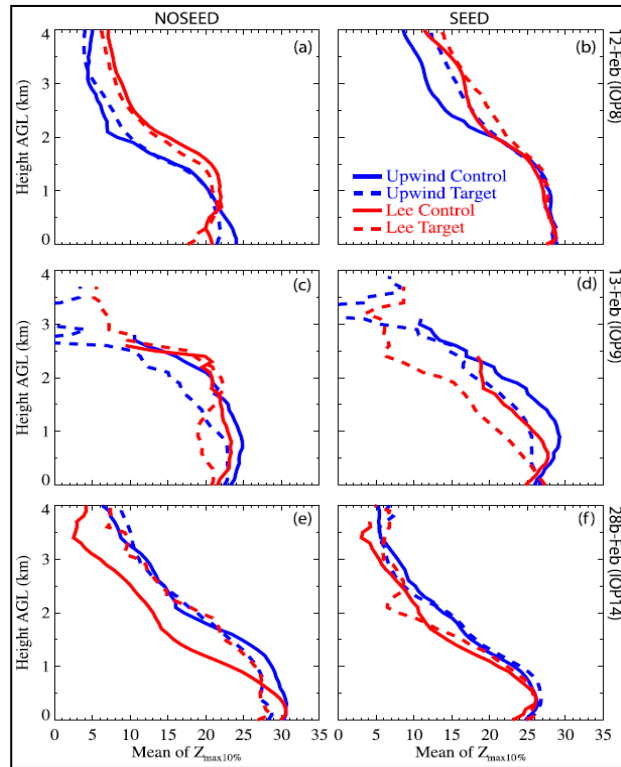


圖2-9-1-5 ASCII-12期間3次淺對流個案於種雲前後之低層回波結構(摘自 Jing and Gerrets 2015)。

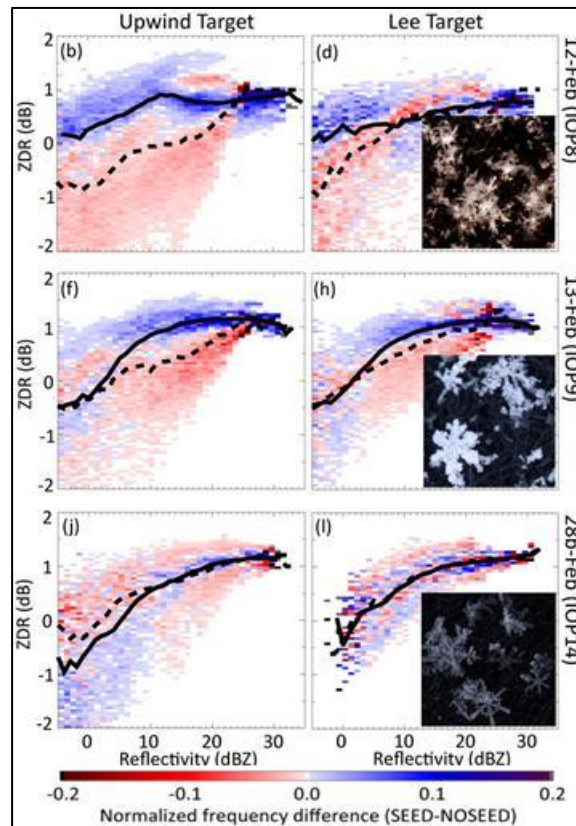


圖2-9-1-6 ASCII-12期間3次淺對流個案於種雲前後ZDR—Z分布之頻率差異(摘自 Jing and Gerrets 2015)。

(二) 中國大陸人工增雨實驗

1. 簡介

臺灣與中國大陸進行人工增雨作業皆已有60年左右的歷史。臺灣自1950年代初起，在需求導向目標下，台電、水利事業、中油、地方政府、氣象局及國防部等各單位，已合作進行過數百次地面、空中增雨作業，其中也包括於1991年引進北美天氣顧問公司及工研院的空中及地面種雲技術；2007年起，則由水利署統一事權，從事本土種雲理論研發並標準化增雨實作，滿足增雨理論的流程已盡可能地落實於常態作業。而中國大陸於1958年首次飛機增雨作業起，持續以防減災(減雹、減汗、消霧、滅火)及空中水資源開發(增雨)為目的，除了就理論與實作領域，成立多處分工細密的國家級研究中心以外，也在中國氣象局系統下建立了四級(國家-省-市-縣)人工影(響天氣)作業體系，依法開展飛機、火箭、高砲及地面燃燒爐的人影作業。

雖然因目標不同導致規模、方法各異，但在人工增雨部分，兩岸的歷程則頗有相似之處。本節概述中國大陸在人工增雨實作與驗證兩部分的發展歷程，並以各自擅長之領域為基礎，在取長補短的前提下，探討兩岸人工增雨的可能合作方式。

2. 中國大陸人工增雨發展概要

以緯度相近的臺灣及福建而言，自1990年迄今，都在增雨環境、增雨對策、校驗方法及成效討論等投入甚多。臺灣著重於本土環境下的最適種雲策略開發，以及種雲平台的測試，尤其近年偏極化雷達觀測網及詳盡雲物理模式的發展漸具規模，在各種法令與社會條件規範下，除繼續進行實作之外，將朝向物理與模擬驗證發展；福建則很早即展開系統性的調查及實作，除曾以模式對旱季雲降水的人工影響進行驗證之外，也執行過多項增雨效果檢驗方法研究、增雨環境的調查，以及飛機人工降雨條件分析和效果分析，2015年起福建氣象局在中國氣(象)科(學研究)院的支持與協助下，在福建省古田水庫開闢實驗區進行大規模空中、地面觀測實驗與校驗(其他三處實驗區分別於遼寧、山東及海南省)。以下依發展時間，簡述中國氣科院(中央)與福建

氣象局(地方)在人工增雨議題上的重要歷程。

(1) 中國氣科院人影所

1960~1980年代期間，氣科院人(工)影(響天氣研究)所及其前身的組織架構雖然經常改變，但仍執行了許多觀測及實作測試，運用多數由中國自行研製的地面或機載儀器，配合雲室測量，對大氣核、雲/雨水量、雲滴譜等，在多省山區及空中進行觀測，並且透過南方夏季對流雲實驗，了解種雲環境中的過冷水及水氣分布、雲/雨滴譜結構，以及可能有效的催化劑粒徑與種類，並估計出雲/雨滴被催化的效果。

為了多方面了解增雨自然條件選擇的方式，以得到增雨技術的進展，1980~2000年間，同時推動(a)引進其他國家或改進中國自製的機載觀測儀器、並組織北方層狀雲實驗，(b)探討效果檢驗方法的適用性，及(c)發展數值種雲實驗等三方面的努力。重要的進展包括得到十多省的氣溶膠與冰核分布特徵，確立地形性層狀雲/對流雲的作業條件選擇依據，雲模式的作業化等，並在這些基礎上，建立火箭或高砲發射種雲劑的作業機制。

2000年以後，開始著重於技術整合；包括在完成機載探測/作業之設備/技術整合之後，廣泛地繼續從事多省、市的降水物理調查，都卜勒(偏極化)或衛星反演雲物理參數用於(條件選擇或)成效驗證，繼續改進及推動業務化增雨雲模式，增雨技術整合平台及施作技術的輸出(古巴、沙烏地阿拉伯、智利等國)等。此外，人影作業制度(包含器材與人力管理)的立法與人影作業(含成效檢驗)軟體的開發應用，都已落時至日常作業中。

圖2-9-2-1概要綜整氣科院層級，在過去近60年內所推動與達成的進展。

(2) 福建氣象局人影辦

中國大陸各省、市的人工增雨業務與技術發展，需求導向迫切，早期因組織架構經常變動，雖然基本上仍是依循國家級的政策方向進行，但多半談不上的嚴謹的作業與驗證流程。不過，少數單位仍然在明確的作業目標下，累積相當多對人工增雨後續發展具有意義的成果與經驗，福建氣象局即為其一(圖2-9-2-2)。

在1960~1980年代，除了在有限的理解基礎上，持續增雨、防霜、引雷的作業之外，福建氣象局人(工)影(響天氣)辦(公室)的前身單位，已在古田試驗區進行過為期長達12年的隨機種雲實驗，透過作業前後雨滴譜、冰核、AgI含量、雷達回波特徵分析及暖雲降雨數值實驗等，得到作業效果的驗證；據中國大陸內部文獻(蔡等，2009)指出，此部分研究成果曾多次參與國際交流與國際論文發表，在當時應具相當科學性。

1980~2000年期間，在都卜勒雷達網建立，以及氣科院的協助下，透過基礎或應用研究(表2-9-2-1)，不論在人工增雨業務推動或在成果校驗上，福建氣象局都有相當的進展幅度與寬度。技術成果甚至輸出至其他省、市，漸形成人工增雨發展的指標性省份(其他重點省份尚包含山東、吉林及海南)。

2000年以後，基於上述基礎，進行專門人員培訓(證照化)，法制化人影作業管理，並投入普及至縣級(最基層行政層級)的作業基地建設(氣2008年為止，共計68個縣市級作業單位、553處作業點、141台火箭發射架、都卜勒雷達4部)，至此福建氣象局人影指揮組織架構確立。鑒於過去的實驗及作業的嚴謹性不足，為滿足國際上普遍對增雨驗證的要求，氣科院及福建氣象局於2015年起，重新於古田實驗區合作規劃隨機種雲實驗(圖2-9-2-3)，同時亦已開始根據區域經濟特性發展特色人影作業，但這兩個部份的成果尚不具體。

3. 兩岸合作

國際上普遍認可之人工增雨效果檢驗，必須包括長期隨機種雲實驗(降雨統計驗證)及雲觀測(物理驗證)等流程(Mather et al. 1997)，數值種雲實驗則可在種雲策略制定上扮演重要角色(經濟部水利署，民99，人工增雨作業評估計畫；黃家傑，2014)。受限於地理條件，臺灣很難找到適合作為實驗與對比區的環境，且在需求導向的社經環境裡，也難嚴格落實長期性的隨機種雲，這使得具可信度的成效分析，在臺灣但並不易完整取得。不過自2014年起，在人工增雨成效檢驗的議題上，福建氣象局與臺灣大學開始有所接觸。

臺灣和福建緯度相當，適合作為種雲實作對象(在非汛期內能造成較顯

著區域降雨)的天氣系統多自福建東移而來(經濟部水利署，民103)。既然臺灣推動隨機種雲不易，藉由福建氣象局在增雨操作上的規模優勢，在古田水庫流域所重新展開的隨機實驗，以及都卜勒雷達與密集的天空、地面雲觀測資料，配合臺灣大學擅長的種雲數值實驗，有機會為臺灣較難推動的種雲成效驗證，提供論述的基礎。此外，由於偏大陸型的氣膠背景、大氣環境的季節特性(經濟部水利署，民96)，以及降低對環境影響等因素，臺灣近年全力發展暖雲種雲，此顯與福建氣象局以火箭投射冷雲催化劑為主的概念(圖4)不同，因此，福建隨機種雲個案觀測資料及數值實驗結果的比對，亦可間接評估冷、暖雲種雲效果的差異性，同時也提供了解東移臺灣降雨系統雲物理環境變化的機會。

透過兩岸在古田隨機種雲實驗議題上的合作，臺灣有機會在人工增雨成效校驗議題上，得到足以支撐結論的論述依據，也有機會了解自福建東移影響臺灣天氣系統的雲微物理特徵，福建氣象局則可能在雲模式/種雲模擬領域獲得進展，對於雙方而言，將會是一次互惠的合作，前景應可期。

表2-9-2-1 1987年以後福建氣象局人工增雨科研項目(部分)。

項次	項目名稱
一	人工降雨作業效果檢驗方法研究(1996年福建省科技進步二等獎)
二	人工降雨試驗方案及其成果統計分析方法研究
三	南方夏季對流雲人工增雨效果檢驗方法研究(夏季對流雲人工增雨效果檢驗方法研究子專題)
四	福建省空中水資源分布及開發對策研究
五	福建省飛機人工降雨條件和效果分析
六	人工降水區域外效應(1998年福建省科技進步三等獎)
七	利用雲模式研究我省旱季雲的降水人工影響機制
八	多普勒雷達資料在雲和降水物理學中的應用研究

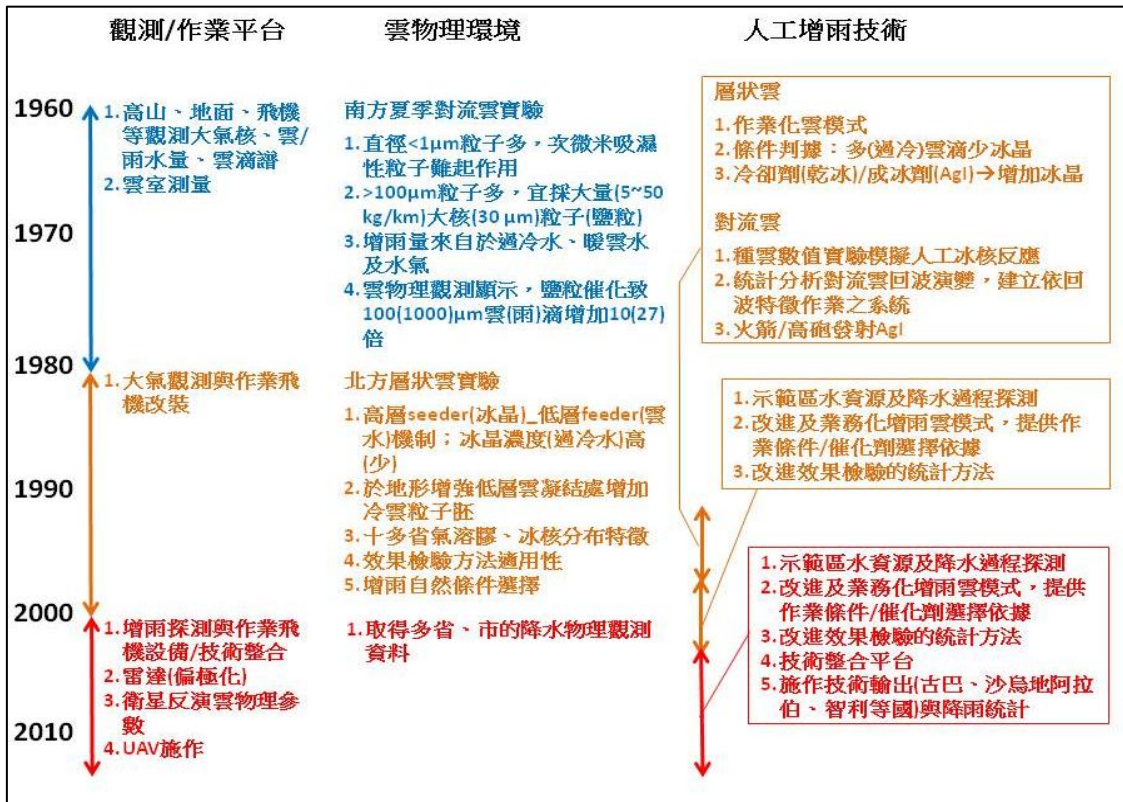


圖2-9-2-1 中國氣科院人工增雨發展簡歷。

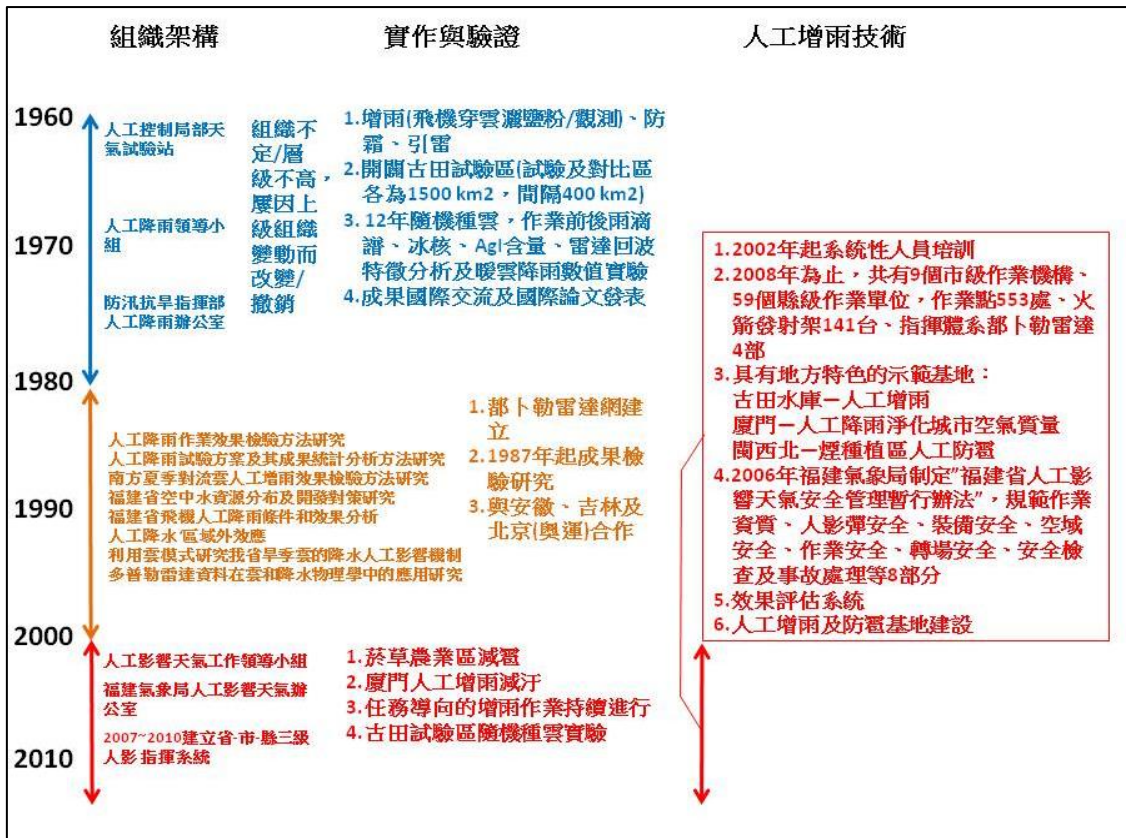


圖2-9-2-2 福建氣象局人工增雨發展簡歷。

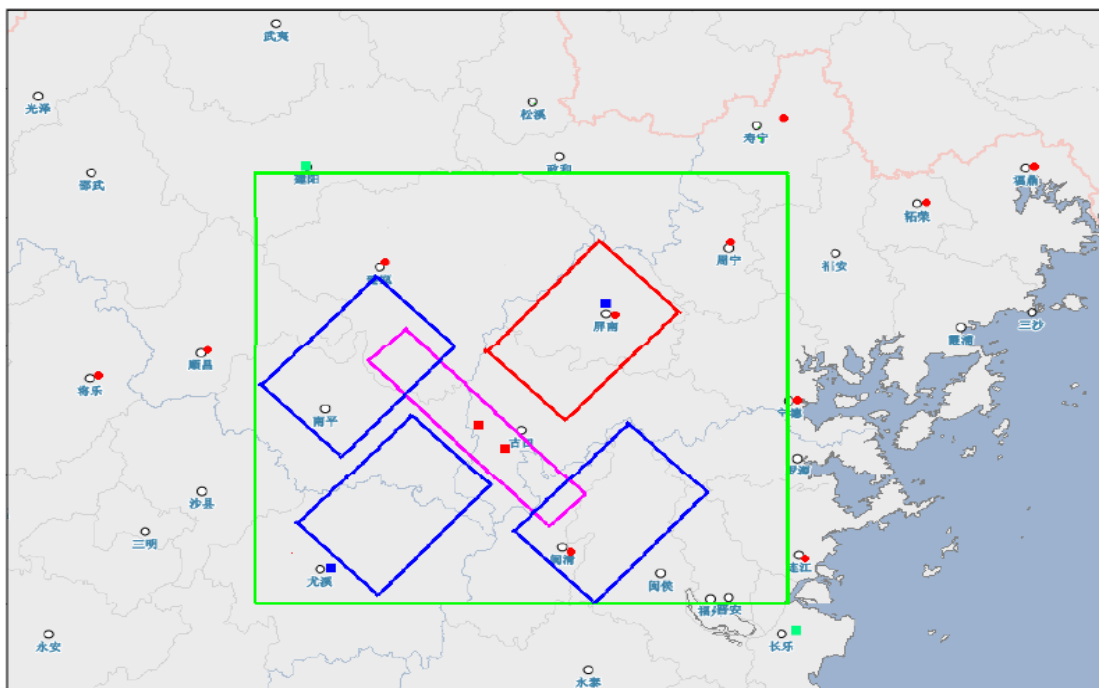


圖2-9-2-3 古田水庫試驗區(綠色方框)圖。紅色方塊為火箭作業點，藍色方塊為雨滴譜儀觀測點，綠色方塊為雷達觀測點，白色圓圈為自動氣象站；紅色方框為作業影響區，藍色方框為待定對比區。資料由中國氣科院姚展予博士提供。



圖2-9-2-4 福建氣象局人工增雨火箭發射車(左)外觀(右)發射管仰視。

(三) 澳大利亞種雲研究計畫

澳洲近年來常為乾旱所苦。昆士蘭(Queensland)政府為瞭解人工增雨是否有機會作為長期水管理策略的一部分，於2006年推動「the Queensland Cloud Seeding Research Program (QCSR)」。

澳大利亞從1947年起就有人工增雨記錄，但過去多使用碘化銀，來進行有利冰核發展過程的種雲方式 (glaciogenic seeding)，而吸濕性種雲 (hygroscopic seeding) 則是在雲下釋放吸濕性物質 (如鹽)，藉由上升氣流送進雲中，以達到加強碰撞 (collision) 及合併 (coalescence) 過程之目的，以利雲水 (cloud water) 轉換為降雨 (rainfall)。

QCSR 於 2007/12~2008/03 與 2008/11~2009/02 兩個夏季期間，在昆士蘭布里斯班區域 (Brisbane area)，使用機載焰劑 (flare) 對氣團雷雨進行 hygroscopic seeding。

1. QCSR 實驗流程

(1) 根據以下條件，判斷合適的實驗對象：

- 無降雨雲的雲底直徑 $\geq 2 \text{ km}$ 。
- 雲底的上升氣流強度 $\geq 2 \text{ ms}^{-1}$ 。

(2) 依照已預先決定的隨機種雲決策，決定是否對被滿足(1)的對象進行種雲；

因此，在被挑選的對象中，將會有一半是被“種”的個案。在濾除雲系合併、分離及大風暴 (large storm) 之後，引用兩個夏季期間共 39 次種雲個案進行分析。

(3) 對被“種”的個案進行以下觀測及計算：

- 降水通量 (precipitation flux)。
- 雨水質量 (rain mass)。
- 系統生命期 (storm duration)。

(4) 進行物理量測，以瞭解：

- 自然環境的氣膠與降水背景。
- 額外種入的吸濕性物質對雲與降水的影響。

2. 氣膠 (aerosol) 與雲凝結核 (CCN) 的調查結果

- (1)軌跡逆推顯示，雲底氣膠特性大致區分為大陸、海洋及城市(Brisbane city)影響三類型；雲凝結核濃度高的日期，軌跡多屬大陸型，雲凝結核濃度較低(乾淨)的日期，則多屬海洋型(圖2-9-3-1)。
- (2)顯微攝影顯示，三種類型均包含粗模氣膠(礦塵)與細模氣膠(硫酸鹽、氯化鈉鹽及含鎂有機物)，但三種類型的細模氣膠成分變動顯著。
- (3)粗模氣膠會優先形成雲凝結核；細模氣膠粒徑分布越寬廣，所形成的雲滴(cloud droplet)粒徑分布就越寬廣，越有利於碰撞與合併效率。
- (4)細模成分中包含硫酸鹽較多的日期，雲凝結核濃度高，多為大陸型或城市影響型；細模成分中包含氯化鈉鹽較多的日期，雲凝結核濃度低，多為海洋型(圖2-9-3-2)。

3. QCSRП實驗資料的優勢

- (1)因地面組織了密集的雙偏極化及傳統都卜勒雷達觀測網，可搭配雙都風場，運用垂直速度頻率—高度分布(Contoured frequency by altitude diagrams, CFADs; Yuter and Houze 1995)法，過濾出熱動力(thermal dynamic)及垂直速度結構(vertical motion structure)類似(圖2-9-3-3)的獨立胞(isolated cells)種雲個案，以排除環境變異性對種雲效果的影響。
- (2)對結構相近的種雲個案，分析機載雲物理觀測結果，以獨立出吸濕性種雲前後對於獨立氣團雷雨的影響。

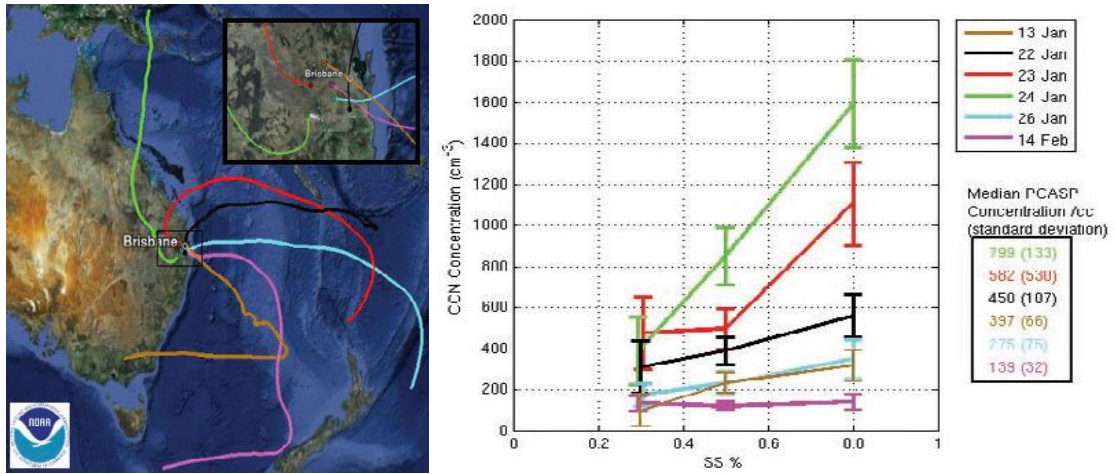


圖2-9-3-1 6次種雲個案的(左)120-h軌跡逆推與(右)0.3%、0.5%及0.8%過飽和(橫軸)下的CCN濃度(縱軸)。

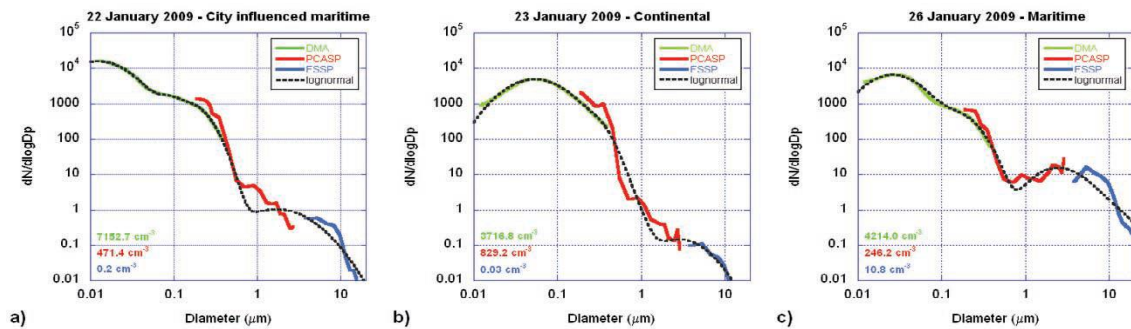


圖2-9-3-2 由三種雲微物理量測儀所組成的(左)城市影響型、(中)大陸型與(右)海洋型的氣膠粒徑分布。各小圖左下角為平均濃度。

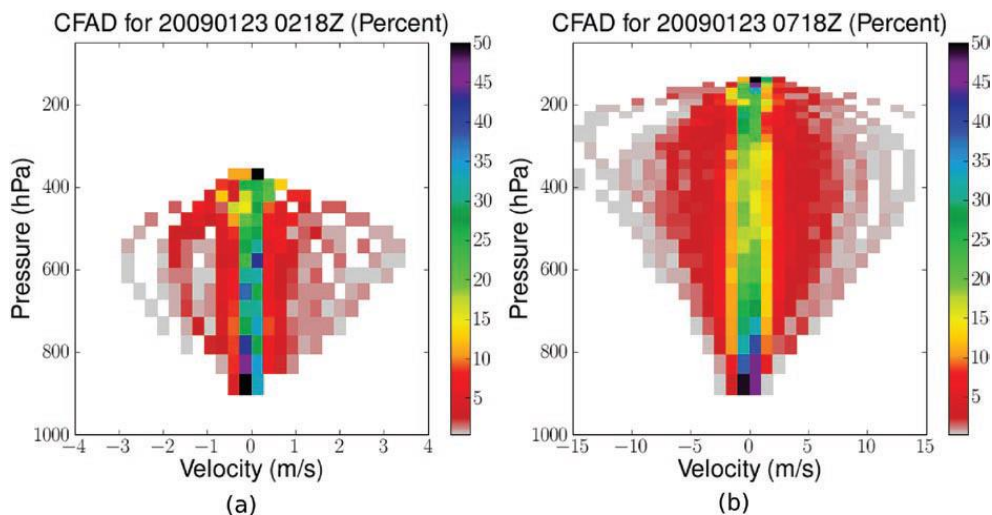


圖2-9-3-3 2009年1月23日前後相差5小時之種雲個案的獨立氣團雷雨CFADs分析。(a)0218與(b)0718 UTC之懸浮微粒濃度均介於500~550。