



科學改變下雨的故事

— 淺談「空中人工增雨」 —

空軍上校 林得恩

提 要

全球氣候暖化加上極端天氣異常，導致各地降水狀況相當不穩定；台灣地區自去（2009）年起，中南部降水不豐、缺水嚴重，根據實際觀測統計資料顯示：逐月累積降雨量普遍均低於氣候平均值。其中，曾文—烏山頭、南化及牡丹等水庫紛紛拉起警報，除水位變化持續下降、累積雨量不顯著外；再加上連日酷熱、水庫淤積，導致蓄水量顯著下滑，缺水狀況一度緊張。

為能解決現階段台灣中南部地區旱象，增加水庫之蓄水量及充沛水源，行政院防災中心於去年即展開啟動人工增雨的先期整備作業機制，今年更密集於2、3月間召集水利署、中央氣象局及本軍相關單位進行密集商討，並預劃於今年3月中、下旬，在天氣系統配合下，於中南部水庫上游的集水區附近同時進行地面及空中的人工增雨作業，期能紓解民困、裨益國計民生，並落實「防災」、「救災」及「減災」的目標。

而在此旱象時刻，我軍氣象單位肩負著「空中人工增雨」執行任務，除需主動掌握最佳人工增雨最佳時機，就綜觀天氣形勢進行科學分析與診斷掌握外；對於人工增雨過程的掌握、空中施灑裝具的建製、催化劑的購補安排、空中施灑作業的執行以及作業完畢後的資料統計分析等，均需事先做好妥善的規劃以及作業人員的訓練和風險管理的評估。此又與現階段中央氣象局在地面進行碘化銀的燃燒作業內容以及執行效益有別！

空中人工增雨的重要

古代旱災發生之際，人們最原始的做法就是祭天求雨，祈禱普降甘霖。別看這個動作過程，從雲物理的科學角度來檢視，或

許就是現今「人工增雨」作業的最早啟發。因為當人們在地面上燒香膜拜時，所燃燒的灰燼順著上升運動就來到了空中，並逸入雲內，如果這時大氣環境條件又配合的話（諸如：雲層夠厚、水汽夠多等），這無疑是雲

內運動中使得雨滴凝結效率提昇最好的催化劑！因此，降雨的機率或許還會大大提高，這可能是數千年來人們遇旱時，歪打正著、莫名其妙的唯一且有效的解套作法；但這卻是現今無論是地面人工增雨或空中人工增雨作業遂行的最原始的概念模式。

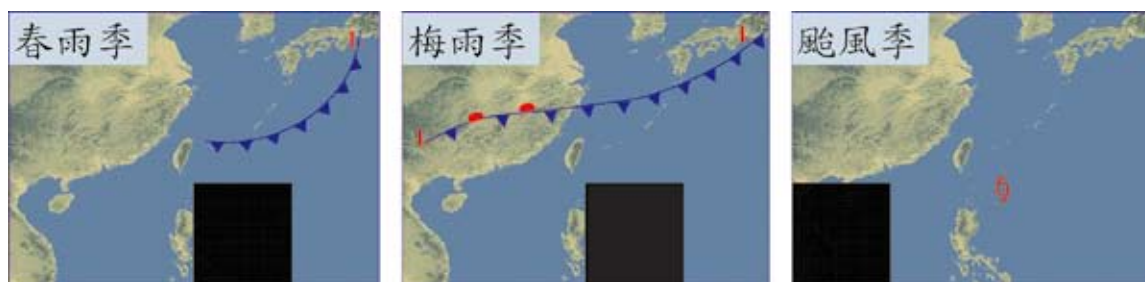
水是生活中必備的重要資源之一，我們或許可以3、5天不吃東西，但身體的結構卻無法允許我們3、5天不喝水。根據氣候統計，通常在每年的3、4月份是台灣地區的春雨季節，5、6月份則是梅雨季節以及7至9月份的颱風季節，這3個不同時段（圖一）所帶來的降雨總量是供應台灣地區全年用水資源的主要來源（而冬季東北季風季節的降水總量相對不夠顯著）；如果此時的降水現象明顯低於氣候平均值，甚至上下振幅過於劇烈的話，乾旱缺水的現象就會發生，尤其是對農耕用水、民生用水、工業用水以及水力發電等方面的限制與影響，可謂相當嚴重且深遠。因此，今年經濟部所召開的全國抗旱會議中，水利署就呼籲全民節約用水，力保汛期前民生及工業用水的穩定。

在此情境下，積極的應變作為需賴以有效的人工增雨作業執行，藉以適時解決旱

象。現階段，作業模式又可劃分為中央氣象局或水利署所執行的地面燃燒碘化銀之「地面人工增雨」作業，以及空軍所執行的空中施灑催化劑之「空中人工增雨」作業等兩種，其主要原理均是藉助催化劑的使用（圖二），讓雲滴加速長大，使得整個降雨過程更有效率。一般而言，地面人工增雨作業器具相對簡單，容易攜帶，成本較低，且機動性高，所需人力較少，增雨時間通常可維持在10小時以上；而空中人工增雨作業成本高（需考慮飛行器與催化劑等的使用），所需人力多，作業流程複雜且危險性高，增雨時間受限乾冰或食鹽水裝載量與融解緣故，通常都只在2小時上下，但因可有效地進入有利的雲層施灑，故成效相對提高。在最近幾次的人工增雨執行作業，為求降雨效率提昇，多採「地面人工增雨」作業與「空中人工增雨」作業同步實施，以收「事半功倍」之具體成效。

空中人工增雨的有利條件

空中人工增雨任務的執行，需賴以合宜且有利的大氣環境條件配合下進行，始有「事半功倍」的顯著作業成效，其有利條件



圖一 供應台灣地區全年用水主要來源的三個時段示意圖，分別為春雨季、梅雨季以及颱風季



圖二 空中人工增雨作業主要原理均是藉助催化劑的使用，讓雲滴加速長大，使得整個降雨過程更有效率，圖為在機上進行空中施灑催化劑作業實況



圖三 空中人工增雨任務執行前，機上需先進行空中噴灑催化劑之容器安裝、水管佈建與整備等前置作業

分述如下：

一、大氣環境之相對溼度需高於70%

目標區種雲附近大氣環境的相對溼度需夠大，且持續性要夠久，方使得空中人工增雨作業中催化效能精進到最高、飽和效率提昇到最大；一般執行內容多要求環境之相對溼度能夠在70%以上，透過空中噴灑催化劑的人工增雨效益得以彰顯（圖三）。

二、作業區雲量需以裂雲（或密雲）為主

為使得空中人工增雨作業中種雲選取的進展順遂，任務提示中有關作業區雲量的提報將以裂雲（或密雲）為首要蒐尋目標（圖4），一般要求雲量是需大於5/8，且雲體垂直結構完整厚實，以利作業效益的提昇；至於雲種的選取，一般多以積雲或層雲為主，大範圍、長時期的雨層雲尤佳（含水量充沛），而積雨雲或雷雨雲等對流發展極為旺盛的系統（執行的危險性偏高）以及夜間作業（無法研判種雲的位置），在飛安風險管

理的前提考量下，均排除列入種雲選取的範疇內。

三、低層風速需小於25浬／時，作業高度風速小於50浬/時

為能強化空中施灑催化劑作業之凝結效率，作業高度要求需小於50浬/時為最佳，低層風速亦需小於25浬/時，尤其在增雨區附近之大氣層無逆溫層存在時，作業效益將可有效提昇。

四、整層大氣環境具潛在不穩定特性，且低層要有顯著的西南風（或南風）

降雨的三個基本必要條件分別為充沛的水汽、不穩定的大氣環境以及合宜的舉升機制。而其中充沛的水汽可透顯著西南風（或南風）挾帶促成；在不穩定的大氣環境下，尤其是在潛在不穩定度較高的區域內最易發生降雨現象；合宜的舉升機制在於諸如鋒面或低壓系統等媒介，提供有效的上升運動機制，而此時所進行空中人工增雨作業施灑的



圖四 空中人工增雨作業進行種雲蒐尋，需以裂雲（或密雲）為主，以利增雨效益的提昇

催化劑，則可適時供應凝結核，提早且完成凝結過程，使得降雨更有效率。

五、飛行作業高度需在-4℃至-12℃間高度執行，且選擇在大氣環境目標處上風處盤旋施灑

空中人工增雨作業需選取在結冰高度以上的飛行作業高度成效最佳，尤其在具有過冷卻水的大氣環境，其凝結飽和的效率也最高，因此在選取種雲施作的考量會以-4℃至-12℃間的高度執行成效最佳；而且施灑催化劑作業多建議在目標處的上風位置採盤旋來回方式進行（圖五）。

六、選取種雲厚度以大於5公里為佳，小於3公里厚度不宜

雲體厚度與催化效果關係相當密切，一般而言，雲體愈厚，催化降雨效率愈高；根據過往統計結果發現，選取種雲厚度多以大於5公里為佳，因其雲內無論是水滴粒子數量或水汽含量均較多且雲體發展已經到相當程度，催化降雨較易發生，而小於3公里厚度不



圖五 空中人工增雨施灑催化劑作業，建議在目標處的上風位置，採盤旋來回方式進行

宜作業，執行效率較不顯著。

空中人工增雨的過程

空中人工增雨作業主要是經由飛行器將催化劑直接施灑在有利的雲層內，進而改變雲內的環境條件（諸如：氣塊溫度、液滴數量以及液滴大小等），創造最佳雲滴凝結、成長的情境；同時改變雲內的動力條件，導致雲層成長加厚、增加雲內水氣的垂直傳送、延展雲滴的水平範圍分佈，使得整個降雨過程更有效率（圖六）。

一般作業可概分為以下兩大類：

一、過冷雲的人工增雨

透過施灑乾冰或碘化銀，促使冰晶加速成長，形成有效的降水。因為乾冰本身的溫度很低，是一種很好的致冷劑，當它昇華時，必須吸收大量熱量，導致在其四週空氣溫度快速下降，因而使雲中的水氣過冷，有效凝結成小雨滴，隨後在雲中碰撞合併過程中繼續增大而產生降雨。至於碘化銀也是一

種性能良好的凝華核，只要其溫度下降的夠（通常在 -5°C 或以下），水汽就能以它為核心進行凝華並形成冰晶，過冷水凍結所釋放的潛熱亦將增加空氣浮力，隨後雲內碰撞合併過程中繼續長大而產生降雨。目前就理論上則有兩個不同觀點來改造過冷雲以增加降水量，即靜力種雲(static seeding)與動力種雲(dynamic seeding)等兩類。

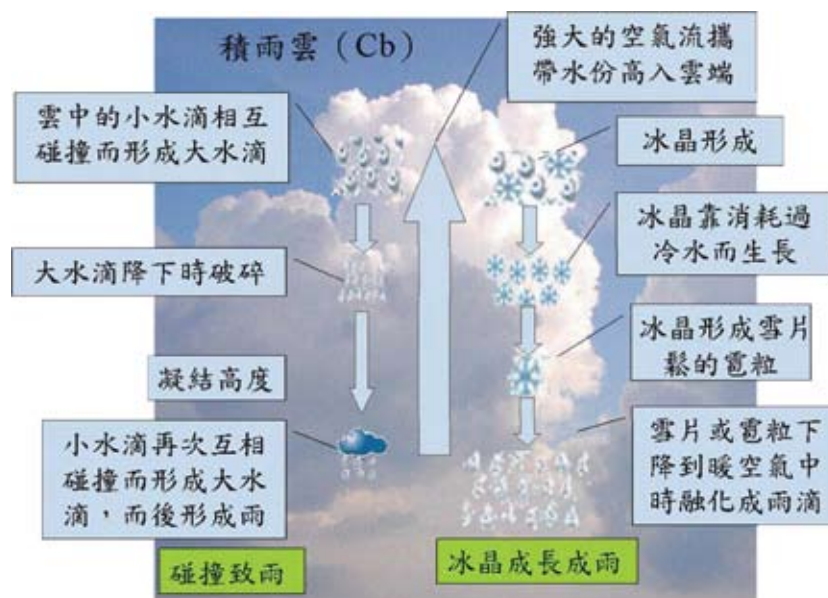
二、暖雲的人工增雨

所謂暖雲多是由大小不同的水滴所組成的，雲內溫度也多在 0°C 以上，透過吸水性凝結核（諸如：食鹽等）或小水滴（以噴霧狀方式進行尤佳）種雲，以改變液滴凝結、碰撞及合併之成長過程在雲底之上升氣流內釋入吸水性凝結核，使其在水汽含量未達飽和時，亦可吸附水氣繼續成長，並且藉由氣流之趨使作用，加速雲中液滴的碰撞、合併或

破裂過程，使得降雨過程更有效率。

空中人工增雨的成效

世界氣象組織（WMO）現階段對人工增雨作業的效益評估，認為若以晶化種雲的方式，對於地形過冷雲的增雨最具成效，長期種雲計劃之統計結果顯示季節降水量應可增加10-15%的效益。另一方面，透過實驗與數值模擬的結果也顯示，層狀雲種內某些區域因存在的過冷水可經由晶化種雲的方式來提昇其降雨效率；從靜力與動力種雲的假設與實驗驗證，結果均顯示一些無法經由自然降水的孤立冷雲（尤其是層積雲），可以透過晶化種雲過程，使得降雨效率提昇，但總降雨量較之前的少。以色列多年來在東地中海區對積雲的種雲進行人工增雨計畫實驗的經驗也顯示可增加13-15%的總降雨量。巴西在



圖六 空中人工增雨作業，經由飛行器將催化劑直接施灑在有利的雲層內，進而改變雲內的環境條件，創造最佳雲滴凝結、成長的情境；同時改變雲內的動力條件，使得整個降雨過程更有效率

2003年多次的空中人工增雨作業成效評估中發現，多產生了近31%的總降水量，有效減緩當時旱象。中國大陸的福建古田水庫進行長達12年的人工增雨實驗，也得出23.05%的增雨成效（曾，1991）。

從現今國際上約有25至30個國家持續進行人工增雨作業經驗來看，增雨的效益會因不同的天氣型態以及不同的種雲技術，而產生極大的差距，其上下振幅可在0至30%之間。但可以肯定的是，若能結合地面與空中人工增雨作業同步實施的話，預期的降雨效率則可有效提昇！

由於我空中人工增雨作業（圖七）執行過程中對於降雨成效的評估，並未考慮隨機性（random）增雨項目，以比較相似雲雨系統而未增雨與增雨之間的差別。在目標區與控制區的增雨作業實際降雨量統計設計中，並無法明確區分降雨是否來自增雨作業成效所致，因此，也無法有效呈現增雨作業執行



圖七 空中人工增雨作業後，對於降雨成效的評估，必須考慮隨機性的增雨項目，以比較相似雲雨系統而未增雨與增雨之間的差別

後降雨量分佈的科學數據，對於後續評估分析常造成一定程度上的困擾。至於，未來在分析長期性降雨特徵上，透過統計、迴歸與歸納等算術技巧，分析氣候降雨量與造雨後降雨量的差別（柳與劉，1987），可以使得整個人工增雨作業在成效評估分析上，得到更為科學且有力的支撐。

現階段世界各國執行人工增雨作業現況

現階段世界各國執行人工增雨作業的時機，除期望解除旱象外，對於特殊天氣災害的減緩或遏止，也具有相當程度的貢獻。

2009年1月中旬起，在蘇丹的西亞齊（West Aceh）發生該國有始以來最大的森林大火事件，該事件除摧毀近500公頃的區域付之一炬外；也迫使200個家庭撤離住所、遠離家園。由於狀況一度失控，於是2月份就由該國之災害管理控制中心啟動人工增雨作業任務的機制，派遣了一組飛行與作業人員前往西亞齊進行人工增雨作業，結果適時有效減緩蔓延的火勢，使得森林大火得以控制。泰國氣象局2009年2月也配合國家防災組織進行多次人工增雨作業，一方面消弭缺水旱情，一方面防煙霾災害擴大蔓延。無獨有偶地，該月中國大陸由於春旱嚴重、災情四起，立即啟動人工增雨作業，包含空中施灑、火砲催化以及地面增雨等大規模人工增雨作為，雖然最後大部分地區平均增雨約2至3公釐，但所降甘霖已使得受旱面積減少200萬畝，災情得到相當程度的紓解。

另一方面，人工增雨作業也可應局部



地區大氣環境改變（或惡化）來彈性進行，2001年馬來西亞大範圍地區的煙霧霾害以及2007年4月中國大陸上海地區長時期高溫極端天氣(39.5°C)等，也都啟動增雨消災的作業機制，並均達到一定程度的效果。美澳大利亞雪山上的水庫，主要提供澳大利亞東南部大部分地區的電力、用水及灌溉，經濟評估認為，若能於冬季在雪山集水區透過人工增雨作業，只要增加1%的降水量，則其經濟效益就足以與人工增雨種雲作業所需消費相抵，因此，政府積極投諸經費與人力進行長期的研究。巴西最大的供水公司Sabesp因長期嚴重缺水乾旱，進行空中人工增雨作業，單在2003年就多生產了全年31%的降雨總量，增雨成效可謂卓著，並有效改善旱象。而列為全球旅遊勝地的杜拜2008年7月也因連日高溫炙熱，啟動人工增雨作業，藉以降雨絕熱冷卻，改善高溫惡劣天氣所帶來的困擾與不適。

至於中國大陸的人工增雨工作已具有相當的歷史，自1958年即投入大批人力、財力與資源進行研究、實驗與實作，主要的研究動機，一方面做為抗災的手段，因此廣受政府和公眾重視與肯定，另一方面則透過人為改造天氣，讓一些重要任務或活動得以順利遂行。目前已超過30個省、自治區、直轄市加入這項工作，其中專業技術人員2,000多人，作業人員超過20,000人，1,000多個縣發展高砲人工增雨和防雹，年耗用砲彈70多萬發、高砲5,000多門，甚至動用到空軍安-26、伊爾-14、運-12、里-2、C-46等飛行器進行空中人工增雨作業，可謂「陸空聯合」執行任

務，成效相當顯著。

而我空軍人工增雨作業自1951年起就開始執行，其中種雲物質的選取不外乎乾冰、碘化銀、食鹽水或清水等，使用機型以運輸機為主，並多採一批兩架次同步實施，執行以無減壓方式進行空中作業，執行區域以當時主要旱象所在區域的上風區，執行成效個案差異性頗大（如表一）。

結論與建議

全球氣候暖化加上極端天氣異常，導致各地降水狀況相當不穩定；台灣地區自去(2009)年起，中南部降水不豐、缺水嚴重，其中，曾文-烏山頭、南化及牡丹等水庫紛紛拉起警報，蓄水量顯著下滑。為能解決現階段台灣中南部地區旱象，增加水庫之蓄水量及充沛水源，行政院防災中心於去年即展開啟動人工增雨的先期整備作業機制，今年更密集於2、3月間召集水利署、中央氣象局及本軍相關單位進行密集商討，並預劃於今年3月中、下旬，在天氣系統配合下，於中南部水庫上游的集水區附近同時進行地面及空中的人工增雨作業，期能紓解民困、裨益國計民生，並落實「防災」、「救災」及「減災」的目標。

為使降雨效率提昇，現今多採「地面人工增雨」作業與「空中人工增雨」作業同步實施；而空中人工增雨任務之有利環境條件，分別為大氣環境之相對溼度需高於70%、作業區雲量需以裂雲（或密雲）為主、低層風速需小於25浬／時，作業高度風速小於50浬／時、整層大氣環境具潛在不穩

表一 民國40年至92年空軍人工增雨紀要

時 間	目 標 區	增 雨 次 數	種 雲 物 質	備 註
民國40年9月 民國40年11月至41年4月	北部農田 日月潭水源區	3次 22次	乾冰、碘化銀 、食鹽水 乾冰、碘化銀 、食鹽水	1.積狀雲，雲上或雲內釋放 2.午後3時進行 3.飛行高度1萬英尺－1萬6千英尺 -5.2℃－+10℃ 4.2/3冷雲、1/3暖雲
民國43年6月22日	西部平原	1次	乾冰、碘化銀 、食鹽水	1.台南、新竹地面增雨器燃燒碘化銀 煙霧 2.天氣乾燥、風力不足、積雲發展高度不夠，效果欠佳 3.台電人造雨研究所，43年6－11月進行地面人工增雨工作
民國66年3月24日 4月8日 5月8日 5月7、8、13日	台中嘉南一帶 (鋒面過境增雨) 西部平原 (鋒面過境增雨) 中部平原 日月潭上空 新店溪上游、石門水庫 (鋒面前積雲增雨)	5次	乾冰、碘化銀 、食鹽水	1.上午10-11時，下午2-3時 2.1萬－1萬4千5百英尺 -3.5℃－+11℃ 3.暖雲佔大多數 4.5月7、8日成效顯著
民國67年8月5日	新店溪上游	1次	乾冰、食鹽水	1.台灣東方顯著低壓環流，850-700hPa顯著輻合現象 2.1萬1千－1萬1千2百英尺 3.10℃－12℃
民國69年6月23日 7月25日至8月25日 7月27、28日	嘉南地區 新店溪上游，積雲造雨 嘉南平原	1次 109次 (3000人)	乾冰、鹽粉、 清水	◎8月18日成效顯著，台北烏來大桶山2-3小時100公釐
民國72年8月30日及 31日 73年1月16日 2月17及18日	石門水庫上游 (積雲增雨)	每次2架	乾冰、食鹽水 (或清水)	
民國78年3月18及19日	西部各水庫集水區(鋒面前，潮溼西南氣流)	每次2架	乾冰、食鹽水 (或清水)	◎15-20公釐

民國80年4月30日 5月1日、2日 6月12日 12月19日	石門、德基、曾文水庫等 集水區 (鋒面前，潮溼西南氣流) 曾文、阿公店水庫 (台灣波過境)	C-130運輸機 每次2架	乾冰、食鹽水 (或清水)	◎各地降雨均顯著增加
民國82年9月11日及13日 9月23日	基隆新山水庫、翡翠水庫 (颱風外圍雲系) 翡翠水庫 (鋒面接近)	6次	乾冰、食鹽水	9月11、13日成效不佳 9月23日集水區均有降雨
民國83年2月15日	石門水庫	3次	乾冰、食鹽水	2月15日效果不明顯 2月16日大雨
民國91年3月15日	翡翠水庫、石門水庫、寶 山水庫	C-130運輸機 共4次	乾冰、食鹽水	
民國91年5月16日 5月22日 5月23日	翡翠水庫、石門水庫 (鋒面前，潮溼西南氣流)	C-130運輸機 共4次	乾冰、食鹽水	5月22、23日集水區均有降水 雲上或雲內釋放
民國92年3月19日 3月20日 3月24日	翡翠水庫、石門水庫	C-130運輸機 每次2架 共5次	乾冰、食鹽水	雲上或雲內釋放

定特性，且低層要有顯著的西南風（或南風）、飛行作業高度需在-4℃至-12℃間高度執行，且選擇在大氣環境目標處上風處盤旋施灑、以及選取種雲厚度以大於5公里為佳，小於3公里厚度不宜等。經由飛行器將催化劑直接施灑在有利的雲層內，進而改變雲內的環境條件，創造最佳雲滴凝結、成長的情境；同時改變雲內的動力條件，使得整個降雨過程更有效率。

現階段世界各國執行人工增雨作業現況，除可消弭缺水旱情外；對於防煙霾災害擴大漫延、適時有效減緩漫延的火勢，使得森林大火得以控制以及改善紓緩長時期高溫

極端天氣的具體成效。至於現階段人工增雨作業的效益評估，世界氣象組織長期種雲計劃之統計結果顯示季節降水量應可增加10-15%的效益；以色列多年進行人工增雨計畫實驗的經驗也顯示可增加13-15%的總降雨量；中國大陸實作經驗發現可達23.05%的增雨成效；巴西的成效評估，更提出可產生了近31%的總降水量。

然而，如果每次只有等到了乾季或旱象時，才會開始思索到需要人工增雨的話，其所執行的功效會相當有限。因為若期待增雨效率高的話，當時大氣環境條件亦需充分配合；隨機化的作業，無法覓擇到最佳種雲與

條件，成效將大打折扣。從台灣地區氣候統計資料顯示，最適合執行人工增雨的時機應在冬季，因此，建議國家行政院防救災中心應結合氣象、水利等單位，未來應設置常態性的人工增雨工作小組，透過長期的監控、研發、校對與實驗等作業，每年固定於冬季時段進行人工增雨的研究與作業，以備春季乾旱之需，方可收作業執行之最大功效。

為祈未來人工增雨的作業成效得以有效提昇與彰顯，對於雲與降水過程的瞭解，以及雲物理參數的觀測技術發展與改進，均需投資更多人力來進行研究。在有利特定的大氣環境條件下，同步進行地面與空中人工增雨作業，亦應強化作業後的統計分析、整合作業後的觀測經驗，甚至透過合理的數值模擬或實驗計劃，嘗試釐清在此物理發展過程可能影響的關鍵因子。可惜的是，現今本軍氣象單位投諸在此領域的專才與研究尚嫌不足，後續「為用而訓」的精進深造教育，可以加以思考調整。

最後，當然需要感謝空軍499聯隊、松指部以及氣象聯隊所有參與空中人工增雨作業的無名英雄們，因為大家無怨的付出與奉獻，才使整個增雨作業得以順遂執行、圓滿達成所交付任務。

參考文獻

- 一、吳兌，1993：人工降雨－基礎知識與實際技術，氣象出版社。
- 二、陳泰然，1995：台灣地區人造雨評估與規畫研究計畫，交通部中央氣象局委託研究計畫（84-2M-10）。

- 三、柳中明與劉廣英，1987：台灣北部地區人工造雨研究。國科會防災報告，76-18，NSC-76-0414-P002-04B。
- 四、曾光平、方任珍與肖鋒，1991：1975-1986年古田水庫人工降雨效果總分析。大氣科學，15，97-108。
- 五、American Meteorological Society，1992：Policy statement：Planned and inadvertent weather modification. Bull. Amer. Meteor. Soc.，73，331-337。
- 六、Hu, Z. J. , X. B. Wang, L. G. You, and G.. B. Liu,1994：Primary results of numerical study on mesoscale effect of ice seeding in stratiform cloud system. Sixth WMO Sci, Conf. on Weather Modification, Paestum, Italy, 30May-4June 1994, WMO/TD-NO. 596, 483-486。
- 七、Mainerici, A. M. ,2006：Experiments with artificial rain on different types of soil and vegetation covering in experimental basins in Romania. G.R.A, 8, 06051。
- 八、Murakami, M. , T. Matsuo, H. Mizuno, and Y. Yamada, 1994：Mesoscale and microscale of snow clouds over the Sea of Japan. Part I：Evolution of microphysical structures in short-lived convective snow clouds. J. Meteor. Soc. Japan, 72, 671-694。

作者簡介

林得恩上校，空軍通校54期，曾任區隊長、教官、預報長、課長、科長、副主任、主任，現任空軍作戰指揮部氣象聯隊上校參謀長。