

## 航空氣象的應用-「空中人工增雨」作業簡介

林得恩

今年春季因北台灣降水不豐、缺水嚴重，1至4月份逐月累積降雨量普遍均低於氣候平均值，各主要水庫水情拉起警報，其中又以石門水庫的水位變化持續下降，除累積雨量不顯著外；再加上連日酷熱、水庫淤積，導致蓄水量一度下滑至45%以下，水位高更逼近嚴重下限標準的220公尺；為能解決台灣地區旱象，增加水庫之蓄水量及充沛水源，行政院防災中心立即啟動人工增雨的先期整備作業機制，分別於2、3月間召集水利署、中央氣象局及空軍等相關單位進行密集商討，期能透過後續人工增雨的執行，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，肩負著「空中人工增雨」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；此又與現階段水利署或中央氣象局在地面所進行碘化銀的燃燒作業內容以及執行效益有別！

### 壹、什麼是「空中人工增雨」？

航空氣象人員對於降雨現象的發生是相當敏感且重視的，尤其是對其降雨程度、降雨結構和降雨過程，甚至於降雨機制等，對於飛安維護影響甚鉅，因此，在我氣象守視監測與診斷分析的作業任

務中，自然成為工作要求的重點。

降雨的過程一定要先有雲，而空中的雲朵通常是由飄浮在空中的小水滴或小冰晶所形成，雲內的微物理過程相當複雜，有碰撞過程、破裂過程，也有合併過程，重量開始有所增加，當所伴隨之上昇運動不再足夠支撐雲內的水滴或冰晶時，落下來的就是雨（或雪）。而「空中人工增雨」作業就是透過空中飛行任務，攜帶合宜適量的催化劑實施種雲，使得原本雲內的水滴或冰晶凝結飽和、加速成長、重量增大，讓整個降雨過程更有效率。

## 貳、空中人工增雨的重要性：

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 1）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（而冷季東北季風季節的降水總量相對則不夠顯著）；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，在此情境下，人工增雨的作業必須有效執行，藉以解決旱象。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。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（圖 2）。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。

### 參、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，除期望降雨顯著、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（今）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，結果適時有效減緩漫延的火勢，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漫延。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、火炮催化以及地面增雨等大規模人工增雨作為，雖然最後大部份地區平均增雨約 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舒解。

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份地區的電力、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（2008年北京奧運，驅雲阻雨，挑戰不可能的任務）。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多個縣發展高炮人工增雨和防雹，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。

而我空中人工增雨作業自 1951 年起就開始執行，主要目的均為解除旱象；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。

#### **肆、空中人工增雨的有利條件：**

空中人工增雨任務的執行，首先需選取在合宜且有利的大氣環境條件配合下進行，始能使得後續整個增雨作業成效彰顯；根據過往飛行作業的經驗，發現其有利條件分述如下：

##### **一、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 3），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、長時期的兩層雲尤佳（含水量充沛），而積雨雲等對流發展極為旺盛的系統以及夜間作業（無法研判種雲的位置），在飛安風險管理的考量下，排除列入種雲選取的範疇內。

##### **二、大氣環境之相對濕度需高於 70%：**

目標區種雲附近大氣環境的相對濕度需夠大，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在 70% 以上；可以透過 850hPa 或 700hPa 的水汽場空間分佈，以及 925 hPa 或 850hPa 的相對濕度場

空間分佈狀況，加以判斷種雲選取之有利範圍。

### **三、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。

### **四、低層風速需小於 25 哩/時，作業高度風速小於 50 哩/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 哩/時為最佳，低層風速亦需小於 25 哩/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。

### **五、飛行作業高度需在-4°C 至-12°C 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°C 至-12°C 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 4）。

### **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；根據過往作業經驗與統計結果發現，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 公里厚度不宜作業，執行效率較不顯著。

#### 伍、空中人工增雨的過程與執行成效：

空中人工增雨作業主要是經由飛行器在空中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），藉以創造最佳雲滴凝結、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 5）。

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 $-5^{\circ}\text{C}$ 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。

## 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（圖 6），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，使其在水氣含量未達飽和時，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，使得降雨過程更為有效率。

世界氣象組織（WMO）現階段對人工增雨作業執行的效益評估，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。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 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）。

## 陸、結論與建議：

今年當台灣地區春季旱象發生之際，為能增加水庫之蓄水量及充沛水源，行政院防災中心立即啟動人工增雨的先期整備作業機制，分別於 2、3 月間召集水利署、中央氣象局及空軍等相關單位進行密集商討，期能透過後續人工增雨的執行，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 哩/時，作業高度風速小於 50 哩/時、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）、飛行作業高度需在 $-4^{\circ}\text{C}$  至 $-12^{\circ}\text{C}$  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舒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。

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，均需投諸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。

**參考文獻：**

- 吳兌，1993：人工降雨—基礎知識與實際技術，氣象出版社。
- 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）。
- 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。
- 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。
- American Meteorological Society，1992：Policy statement：Planned and inadvertent weather modification. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* ,**73**, 331-337.
- 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.
- 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.
- 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.



圖 1、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 2、空中人工增雨作業主要原理，主要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吹化劑作業實況



圖 3、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



圖 4、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

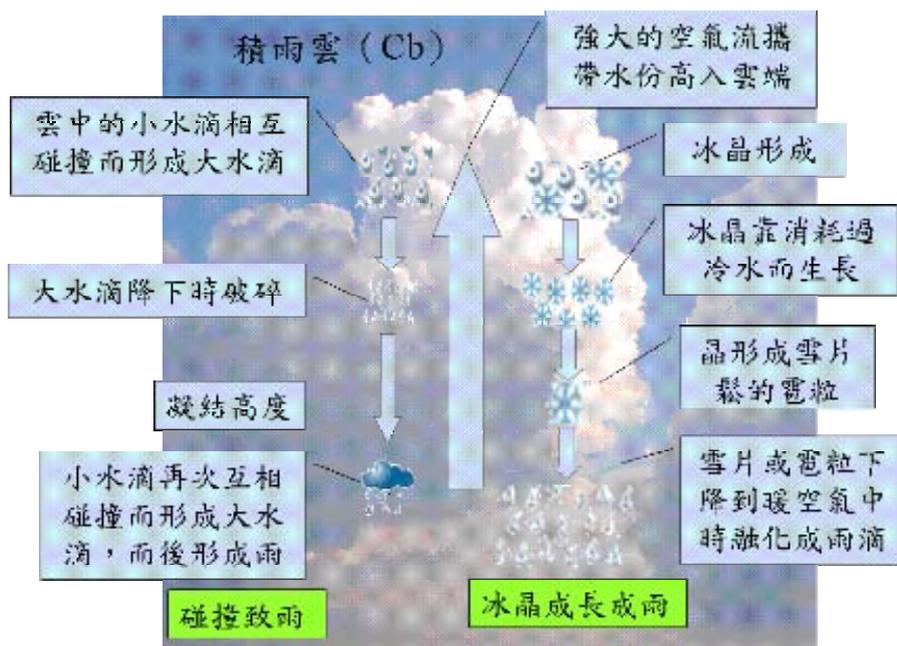


圖 5、空中人工增雨作業，經由飛行器將催化劑直接施灑在有利的雲層內，進而改變雲內的環境條件，創造最佳雲滴凝結、成長的情境；同時改變雲內的動力條件，使得整個降雨過程更有效率



圖 6、於人工增雨作業中，以噴霧狀方式進行食鹽水噴灑種雲的事前地面準備工作