

人造雨



丘台光、齊祿祥／
中央氣象局氣象衛星中心

前言

臺灣地區四面環海，位於全球最大陸表（歐亞大陸）與最大洋（太平洋）交會之中低緯區，為典型的亞熱帶海島型氣候，年平均降雨量超過2000公釐。唯臺灣冬季受乾冷之西伯利亞高壓之東北季風，夏季則有盛行之西南風與颱風影響，5~6月間受兩大高壓系統消長影響，而經常有滯留之梅雨鋒面存在，再加上臺灣地區崗巒起伏，錯綜複雜之地形與多變的風向，造成降雨在時間、空間上分布極不平均。從歷年的降雨資料顯示，臺灣地區主要的降雨來源為鋒面與颱風所帶來的雨水，如冬季至春季之鋒面不顯著，春末至秋季，颱風無法直接帶來充沛降雨，造成長期降雨量偏低的情形，水庫無法提供充裕之民生、農業灌溉、工業用水，部分地區即發生缺水現象。由於人口增加與工商經濟活動的不斷成長，預期今後臺灣地區對於水資源的需求，將與日俱增。因此，人造雨(cloudseeding)（即人工增雨）的研究與作業以求紓解旱象，遂成為氣象領域裡處理乾旱問題的重點工作項目。

「天上無雲就不可能下雨」是大家所熟知的常識，但是縱使天上有雲，卻也不一定會下雨。人造雨的理念即是：選擇有雲的天氣條件下，撒播適當的雲種，增強自然降雨的機制，以提高降雨的效率及增加降雨量。以下就人造雨的原理、國外及臺灣人造雨發展史、成效及對環境的影響作一概要說明。

人造雨的原理

一般在對流層裡，大氣溫度隨高度增加而下降，因此形成雲所在的高度越高則溫度愈低，高度愈低則溫度越高。雲的溫度高於 0°C 時稱為暖雲，低於 0°C 時稱為冷雲。在暖雲裡，小水滴經由碰撞與合併過程，變成大水滴，終至克服雲內浮力而掉離雲底，成為地面上的降雨。同樣的，在冷雲中，冰晶成長至能克服雲內浮力時而掉離雲底，在降落過程中經過 0°C 高度時，融化為水滴，亦成為地面上的降雨。當雲內水滴太小或缺乏冰晶而無法降雨時，我們利用人工方法去產生冰晶，或使小水滴長大，促使其產生降雨現象，稱為人造雨。

依大氣環境中雲所存在的高度與撒播於雲中不同的造雨種雲劑，人造雨大致可分為兩大類別：

一、暖雲造雨

暖雲中無法產生有效降雨的原因，往往是由於雲中缺乏大水滴致使碰撞作用不易進行。因此促成暖雲內水滴相互碰撞長成大水滴，為暖雲造雨關鍵。一般作法是在雲中噴灑吸溼性藥粉與液體（水、二氯化鈣、氯化鈉、硝酸銨等），促成水滴在低飽和環境下凝結，並透過碰撞與合併過程使水滴成長，終至降落成雨。過去一般均認為暖雲造雨需要由飛機攜帶大量鹽水或食鹽在雲中進行播撒，以達到促成降雨目的。但近年來南非學者 G.K.Mather 提出「吸水性凝結核燃燒火焰



棒」方法，其利用二氯化鈣 (CaCl_2) 與氯化鉀 (KCl) 等吸水性粒子，經由燃燒後可釋出 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 粒子，有不錯成效。美國國家大氣研究中心 (NCAR) 在墨西哥南部利用氯化鉀與氯化鈉作為雲種，美國伍理氣象顧問公司 (Woodley Weather Consultants, 簡稱 WWC) 在泰國北部廣泛使用二氯化鈣與氯化鉀作為雲種，都有很好的效果 (陳, 1995)。

二、冷雲造雨

冷雲造雨的基本原理乃根據白吉龍 (Bergeron) 所提出的「冰晶過程」(ice-crystal process)，其認為冰晶的飽和水氣壓比過冷水的飽和水氣壓小，因此只要冷雲中有足夠的冰晶存在，過冷水將逐漸蒸發促使冰晶迅速增大成長。但一般而言，若雲發展得不夠高，雲內冰晶數量就很低。在這樣的冷雲中撒播人工冰晶核便可提高降雨效率、增加降雨量，即為冷雲造雨。目前理論上可分為：

1. 靜力種雲

此方式主要在增加過冷雲之降水效率，其假說為在雲內釋入適量的冰晶核，將可透過冷雲內過冷水滴的蒸發，促成冰晶成長，當冰晶成長後沉降，由凝結及碰撞作用合併為更大質點降落到地面。

2. 動力種雲

動力種雲主要在對於過冷雲中播種大量的冰晶核或冷媒，使冷雲中存在的過冷水滴迅速轉化為冰晶，其為藉由水氣昇華成冰晶及 (或) 過冷水凍結所釋放的潛熱加強對流，導致雲的成長加厚，促成雲體水氣垂直傳送、擴大水平範圍發展，最後導致地面降水量增加。靜力種雲與動力種雲都是以影響雲的微物理結構為手段，不同的是靜力種雲注重於冷雲內過冷水的相態不穩定性，動力種雲則是影響或加強冷雲內的熱力不穩定。

冷雲造雨所使用的雲種亦多，依其性質可分為同質成核 (Homogeneous nucleation) 與異質成核 (Heterogeneous nucleation) 兩大類。同質成核主要應用於具有過冷水滴之雲中，最常使用種核為乾冰，此主要乃因為乾冰溫度為 -78°C ，在缺乏冰晶的冷雲內，撒播乾冰使其溫度驟降，因而不必藉助冰晶核的情況下，將過冷水滴轉變成冰晶，透過冰晶成長過程終至成雨。異質成核則適用於 $-4^\circ\text{C}\sim -15^\circ\text{C}$ 的冷雲，目前被認為較有效之種核為碘化銀，在冷雲內缺乏冰晶的情況下加入碘化銀充當冰晶核，可促使 -5°C 以下的水滴凝固為冰晶，再藉由前述的白吉龍冰晶成長過程而形成降雨。

國際間研究發現，在中緯度地區利用碘化銀煙作為雲種播撒於雲中尤見成效，不過在位於亞熱帶的臺灣，只有當雲頂溫度到達 -10°C 時，碘化銀才能發揮作用。

國外人造雨發展歷史

歐美國家以人工方式來影響或改變天氣的想法與技術的發展已超過一百年的歷史，早在 1839 年艾士輩 (Espy, J.P.) 曾創議在溼潤空氣中，舉巨火使之產生上升氣流，促成積雲而導致降雨。1871 年鮑華斯 (Powers, E.) 曾在其論著戰爭與天氣 (War and Weather) 中提及美國南北戰爭時，發現往往在戰爭之後輒有降雨的經驗 (鄭, 1981)。改造天氣的理論與實驗，隨著近幾十年吾人對雲物理學的研究而有蓬勃發展。1946 年美國之最早諾貝爾獎得主之一藍牟而 (Langmuir, I.) 與其旗下的謝佛 (Schaefer, V.) 等人發現，置於實驗之雲室中的乾冰具有促使水氣凝結為冰晶之功效，並於紐約州灰壩山附近上空雲端作改造雲結構之實驗，經雲種撒播之後，冰晶即見凝結而降落於地面。美國自然科學促進會稱為改造天氣成功之創舉。當時麻省理工學院氣象系馮乃鞏 (Vonnegut, B.) 博士

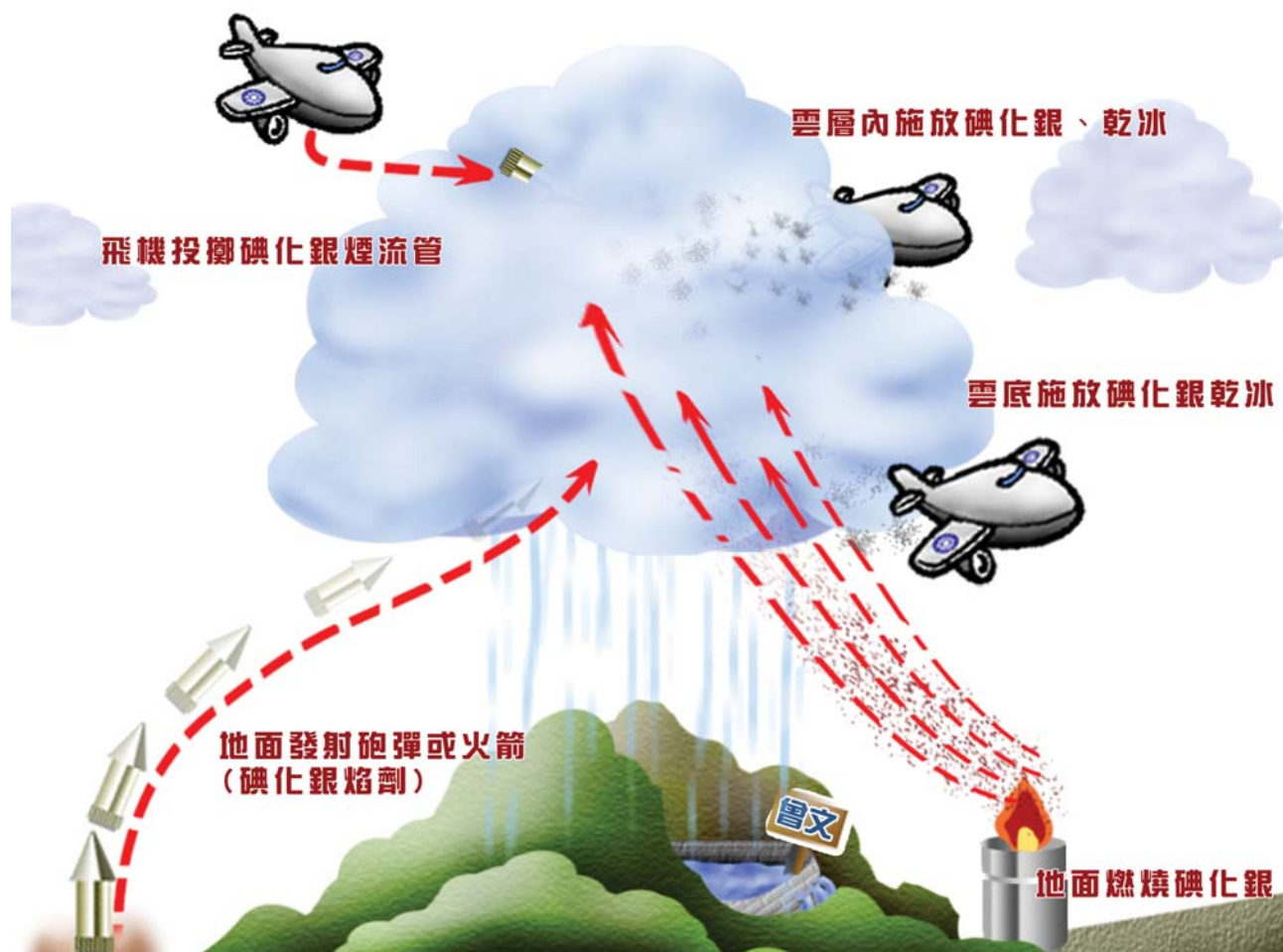
在研究凝結成核過程中，發現碘化銀晶體結構與冰晶類似，利用碘化銀作雲種撒播，其所見之成核溫度可在 -4°C ，但一般自然界之成核作用都見於 $-15^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 間。其後歷經半個世紀的研究發現乾冰、碘化銀、氯化鈉等物質藉由地面燃燒，或飛機、砲彈、火箭等載具（圖一），播撒至雲中均可加速降雨過程及增加降雨量。目前全球約有25個國家曾從事人造雨計畫，以增加降雨量、紓解旱象或是增加水力發電效益。

在造雨理論與技術發展上，以「動力性冷雲造雨」及「吸水性凝結核暖雲造雨」為主。1992年美國氣象學會與世界氣象組織所發表對於天氣改造現況的政策聲明，均指出在某些氣象條件下，已有更多證據顯示晶化種雲(glaciogenic

seeding)，可成功改造過冷霧、某些地形層狀雲與對流雲。目前認為以晶化種雲方法的「動力性冷雲造雨」方式，經美國長期種雲計畫之統計結果顯示季節降水量可增加10~15%。實驗與數值模擬均顯示，層狀雲內某些區域存在的過冷水可經由晶化種雲來增加降水。雲頂溫度高於 0°C 之「吸水性凝結核暖雲造雨」在理論上可行，但目前尚無實際的確切物理評估及可供採用改造之技術。

臺灣地區人造雨發展歷史

臺灣為遠東地區首先實施人造雨試驗的國家，早在民國40年1月22日財團法人臺灣人造雨研究所即接受臺灣省電力公司委託在中部日月



▲圖一 各種造雨方式示意圖



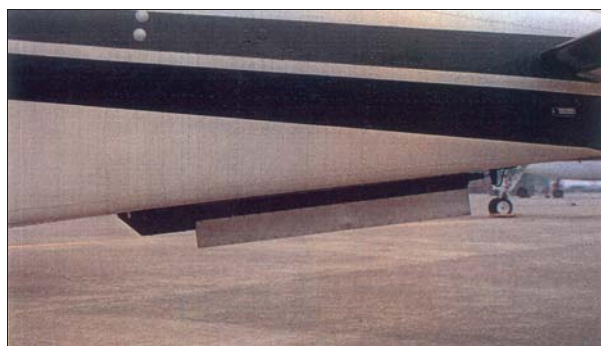
潭蓄水庫上游流域，以飛機在空中散布乾冰、噴射碘化銀乳液及食鹽飽和溶液等雨種。民國 41 年冬改用地面造雨器燃燒碘化銀溶液浸透之木炭，使碘化銀之揮發煙霧進入空中為造雨之冰核（詳見人造雨研究總報告第二集）。配合單位包括空軍總部、臺灣省糧食局、中央氣象局等單位，此為臺灣地區地面與空中造雨實驗肇始。

自民國 40 年至 83 年間，空軍與臺灣電力公司等單位間斷在臺灣地區實施數十次空中、地面造雨作業。在此期間並未有較完整科學性之研究分析與雲物理觀測研究作業配合。民國 81 年中央氣象局為協助臺灣省政府，乃積極進行人造雨之技術開發工作，遂於該年的 5~6 月與北美氣象諮詢顧問公司（North American Weather Consultants，簡稱 NAWC）合作（陳，1995），共同在曾文水庫集水區實施實驗性人造雨計畫。除引進較新式之地面造雨器材（圖二）與碘化銀雲種配方外，更於民國 83 年 5~7 月利用 NAWC 所提供之 Cessna 421 飛機攜帶人造雨設備，執行空中造雨作業，此造雨機配有最新式之可彈射 20 克碘化銀煙流管架（圖三）及碘化銀／丙酮溶液燃燒器（圖四）（丘，1994）。

在此造雨期間並經由 Cessna 421 飛機及地面施放六氟化硫 (SF₆) 追蹤劑，透過六氟化硫分析儀，追蹤並計算碘化銀煙流飄送進入雲中之成功率，進以獲得人造雨效益之科學數據資料。在執行空中造雨與空中追蹤劑研究之時，以 Cessna 421 飛機上所裝置之雲物理觀測儀器，即時量測溫度、露點、冰晶濃度、液態水含量、垂直速度等資料，



▲圖二 碘化銀地面造雨器



▲圖三 Cessna 421 造雨機機腹下方配有最新式之可彈射 20 克碘化銀煙流管架



▲圖四 Cessna 421 造雨專機及其側翼下方之碘化銀燃燒器

並將此項資料與飛機三度空間位置及時間之相關資訊輸入電腦，以供作業評估及造雨研究參考，臺灣地區之人造雨自此建立初步科學上之評估技術。

人造雨的成效

依據國、內外氣象研究人員多年來各種人造雨試驗累積經驗評估顯示，經由長期規劃實施地面燃燒碘化銀溶液之人造雨方式，平均約可增加 10% 降雨；若使用空中造雨方式，於適當的對流性雷雨胞內撒播碘化銀，平均約可增加 20% 降雨。

人造雨可引發降雨或增加降雨量，具有增加水源之效益。然而人造雨之成效，仍受各地區氣象條件、執行技術及行政配合等綜合因素影響，而呈現某些不確定性。尤其在嚴重乾旱期間，不應利用未經測試過的人造雨技術，以作為增加降

水量的方法。因為在乾旱期間，通常增加降水量之機會最小，所以僅能考慮使用經測試過的方法，且應認知可能產生非常有限的降水量增加。

人造雨雖需適合之氣象條件，且降雨量有限，然性質上其他水源開發項目亦有限制條件，僅規模有別，故廣義而言，人造雨宜視同水資源開發方法之一，但須有計畫、長期性實施，始具成效。

碘化銀對自然環境的影響

碘化銀 (AgI) 為目前全球各造雨國家主要使用的雲種，人造雨後所測得到雨水中銀的濃度約為 $0.1\text{mg}/\ell$ ，其值遠低於美國公共衛生部門所規定自然環境中可接受的銀濃度標準 ($50\text{mg}/\ell$)，而一般我們日常生活中所攝取碘鹽中的碘也遠高於人造雨所產生的碘濃度。根據美國 1998 年在美國達科他州的研究發現，在人造雨年中要平均遍布整個籃球場大小範圍碘化銀達到一克的量，需要 75 年的時間。一般國際間大部分均使用 3 % 碘化銀溶液，經由地面或空中造雨燃燒器將碘化銀煙粒釋放至大氣中，故其在大氣環境中之濃度應低於上述值，目前在國際間並無因使用碘化銀雲種造雨而影響環境的報告出現。

結語

目前全國人造雨工作由經濟部水利署負責統籌、執行，中央氣象局提供造雨所需氣象資訊及提供地面造雨起止時機工作。雖然目前約有 25 個國家繼續從事人造雨計畫，以增加降雨量、紓解旱象或是增加水力發電效益，而人造雨的成效目前在科學上仍受到相當大的質疑，國內並未做好嚴謹的評估工作；但政府碰到乾旱缺水的危機，為民眾所能做的事情，似乎也只能盡人事聽天命，照表操作進行人造雨作業了。本文之完成，特別感謝與懷念中央氣象局林民生組長在人

造雨技術上開創先鋒的日子。

參考資料

中央氣象局，1992：人造雨作業手冊。

臺灣人造雨研究所，1955：人造雨研究總報告第二集，p27。

丘台光，1994：建立臺灣地區人造雨作業技術規範之研究，交通部中央氣象局研究發展專題報告，CWB 84-1A-01 號。

林民生、丘台光、楊清合、王瑞德，1994：赴美觀摩考察人造雨技術模式及行政制度。

陳泰然等，1995：臺灣地區人造雨評估與規劃研究計畫，交通部中央氣象局委託研究計畫研究報告，CWB 84-2M-10。

鄭子政，1981：大氣科學概論（上冊），國立編譯館，臺北，p805。

Keith,B.et al .,1992:Report on a two month ground based Cloud Seeding and Atmospheric Tracer research program in the Tsengwendam area of Taiwan . NAWC Report WM. 92-12.

Keith,B.et al .,1992:Taiwan Weather Modification feasibility program interimreport. NAWC Report WM. 92-2.

Griffith, D. et al .,1994: A proposal to conduct a two or three month weather modification program in Taiwan . NAWC proposal P-04272.

Griffith, D. et al .,1994: Technical and Logistical Preparations for an airborne and ground based cloud seeding program in Taiwan . NAWC Report WM. 94-2.

Griffith, D. et al .,1994: Airborne and Ground-Based Cloud Seeding Operations and research in Taiwan , R.O.C. May-July 1994 NAWC Report WM. 94-8 Project 04272.