

天氣改造之研究發展概況

The Recent Research and Development of Weather Modification

劉復誠

Henry Fu-Cheng Liu

一、前言

「水」是人類賴以生存的要素之一，而其來源由空中降雨（或雪）得之。由於天氣結構與氣候變化的複雜性，世界各地區的降雨量時有不同，過多者泛濫成災，反之，引起乾旱。諸如此種澇旱不均的異常天氣常引起一國的經濟、社會、政治、民生等問題，為世界各國執政當局所關注。

為了解決水的供需問題，天氣改造（Weather modification）乃成為一項可行性的技術。記得民國六十九年台灣地區夏季的久旱現象，我空軍氣象單位曾在北部實施多次的大規模人造雨（Artificial rain）行動（過去也曾實施人造雨多次），其成效相當不錯，故已帶給了我們很多希望，顯示我們也能與歐美先進國家，執行乾旱期的造雨任務。其實，造雨（rain-making）就是天氣改造的一種技術，為使各界能夠對天氣改造有所認識，本文特對（近年來）天氣改造研究發展概況介紹如下。

二、定義

天氣改造是利用人造凝結核去改變天氣的一種行為或技術，也有人用氣候改造（Climate modification）稱呼它。嚴格說，前者時間範圍較短，後者時間範圍較長。從大的環流系統來看，它又可分為兩大類：

(1) 有計畫行動，例如：①消霧行為；②消閃電行為；③破風行為；④其他增加或減少降水行為。

(2) 無意（Inadvertent）行動，例如：①汽車、工廠廢氣、火山爆發等引發的污染物（Pollutants）使氣溫上升，降水量增加等。②宇宙塵等

外太空之竄入地球大氣。

三、歷史沿革

「一九三〇～一九四〇」——歐洲科學家如威尼爾（Wegner）白吉龍（Bergeron）及范得森（Findeisen）等早已著手從事雲物理之研究及建立一套「成雲降水理論」。如一九三八年Wegner-Bergeron Process。

「一九三二」——蘇俄已有人造雨研究所（Institute of artificial rain）以尋求天氣改造之可能性。

「一九四二」——范得森曾在德國的柴可羅斯克亞（Zechoslovakia）用「沙」去作種雲凝結核，但未成功。

「一九四六」——美國人西佛（Schaefer）與蘭格米爾（Langmuir）在一次偶然機會裡發現冰箱內的乾冰（CO₂）會有很快凍結現象。因此西佛第一次在麻州西邊的柏克雪（Berkshire）山附近，將1.5公斤的CO₂投入一塊冷的層積雲後，大約5分鐘，這些雲層即變為雪花（Snowflakes）其垂直雲高達六百公尺左右。

「一九四七」——握尼高（Vonnegut）（GE公司）：研究AgI的晶格（lattice），當於冰晶時，發現AgI具有最小的移置（Misfit）因此他確認AgI可作為最有效的IN（Ice nuclei）在種雲技術上。且AgI的最始（Threshold）結冰溫度很高，僅負三度C且極為活化（Activated），其費用不貴，在地面撒種時約US\$2～3元/時，在飛機上約US\$25元/時（當時幣值）。

「一九五一～一九五二」——我空軍第一次應台電邀請，在明潭上空實施人造雨22次，台電人造雨研究所成立。

「一九七四」——South Dakota 有反對人造雨團體出現。

「一九八二」——泰國使用塩粒實施人造雨行動，頗具效果。

四、天氣改造與相關科學

由於天氣改造是一門非常複雜而深奧的科技，相對的它所涉及的學術範疇也就極為廣泛，其中以與熱力學（Thermodynamics），動力或動力氣象學，綜觀天氣學（Synoptic Meteorology），晶體結構學（Crystallography），表面化學（Surface chemistry），物理化學、機械工程學、環境污染及生態學以及統計學等為最有關聯。

五、儀器與設備

對於天氣改造技術之發展與作業，除了從學術上研究外，在野外播種（Seeding）時也需要許多儀器與設備配合，方能成功。一般具有完善的天氣改造機構需具有下列設備：(1)雲實驗室（Cloud

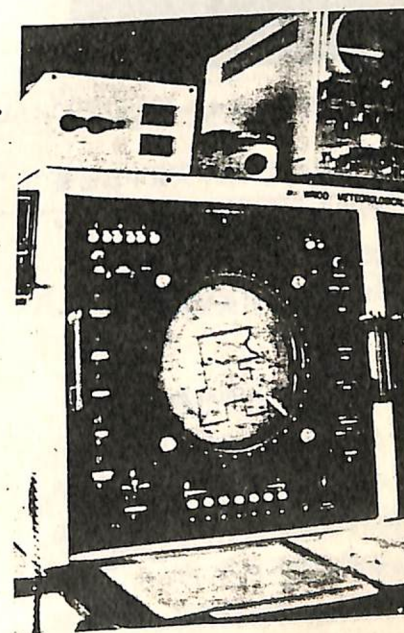
chambers）——作為雲物理結構與雲種材料之實驗分析之用。(2)綜觀天氣實驗室（含通訊）或氣象中心——作為種雲前各種氣象條件之測量與種雲後雨量之觀測與分析。(3)雷達（圖一）——作為種雲後雲層變化之追蹤與降雨量之評估（當然有人造衛星時也可彌補一些）。(4)自動化觀測站網——作為各種氣象要素之測定與種雲後雨量報告之評估。(5)飛機（圖二）——此為天氣改造中重要之工具，以作為運送各種雲種（如乾冰）等之用。(6)發射器或投射傳送器（圖二）——作為撒播碘化銀及其化合物等雲種材料之用。(7)火箭——如用為消雲時，作為發射用。(8)其他輔助設備還有電子析光譜儀、電腦等。

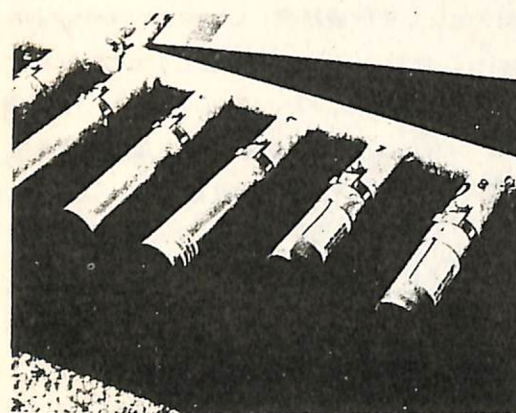
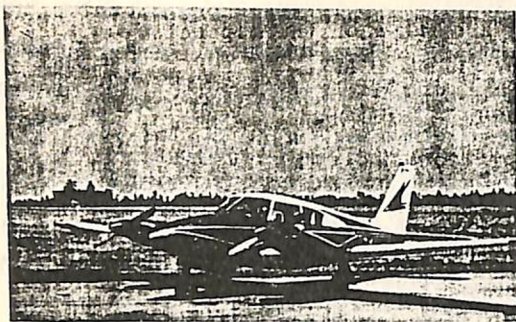
六、大氣凝結過程或原理

我們都知道雨滴必須由雲滴發展而成，而這些雲滴又是從空中的凝結核（Cloud Condensation Nuclei，簡稱CCN），或冰核（Ice Nuclei，簡稱IN）經過同質凝結（Homogeneous）或異質凝結（Heterogeneous）所形成的。其間可分為三種型態：(一)由汽相變成液相的凝結作用（Condensation）(二)由氣相直接變成固相的沈積作用（deposition）(三)由液相變成固相的凍結作用（freezing）三種方式。



圖一 雷達作為天氣改造之研究與偵測降水設備





圖二 天氣改造之必要設備飛機和發射器

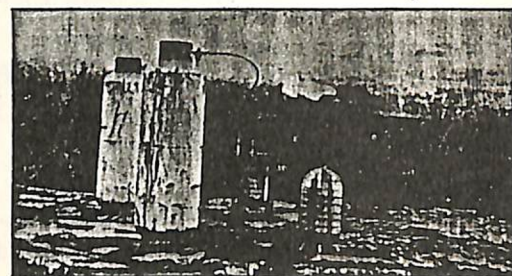
不管以何種凝結作用成爲雲滴，大氣中都必須具有CCN或IN，否則很難成雲致雨（除非大氣中擁有如乾冰那種天然強烈凍化物）。這些CCN或IN之主要來源均來自大氣層的氣懸膠體（Aerosols）。

CCN 在自然界中的地理分析各地均不相同，如以過飽和比（Supersaturation爲一點〇〇一估計，乾性大陸區（以每立方公分計）有一〇〇〇個，一般大陸區有五〇〇個，海岸區有一〇〇個，海洋上只有五〇個。如以過飽和比爲一點〇一估計，乾性大陸區有七〇〇個，一般大陸區有一〇〇〇個，海岸區有三〇〇個，而海洋上所含凝結核粒比陸

上爲少，但其直徑則較大。至於冰核（IN）在自然界中有樹葉、硫化銅、高嶺土、中國黃土、黑雲母、火山灰、石膏、蒙脫石、石英等，依各種凝結起始溫度之不同在結冰程序中扮演著不同的角色。

七、凝結原理在種雲技術上之應用

種雲之基本方法在於如何產生CCN或IN粒子及如何傳送這些細小凝結核。一種能用爲產生此粒子之設備叫產生器（Generator，見圖三）。由於每克碘化銀（AgI）所能產生之粒子約有 10^{16} 個，故必須使用名爲烟火式產生器（Pyrotechnic Generator），再利用飛機、火箭、大砲或炸彈托帶入雲中。



圖三 凝結核產生器（generator）設備圖

早期唯一不用產生器（我空軍單位種雲時都用此法）的凝結核爲乾冰（ CO_2 ）技術。它只要將乾冰盛裝在飛機上，藉着飛行斗形散擴器（hopper）即可將乾冰灑入雲中，並利用乾冰本身的強烈凍化功能（freezing）——低於攝氏零下六十五度，使濕空氣因同質凝結作用（homogeneous nucleation）形成較大雲滴，再配合空氣對流（Convection），使（雲層）附近大小水滴發生碰撞，進而加大雲塊的成長，造成下雨機會。

爲了有效產生凝結粒子，一般天氣改造時並非僅用純碘化銀固體，而是採用可燃性的溶液。最早期的溶液爲通用公司（GE）蘭格米爾（I. Langmuir et al）等人發明的丙酮（Acetone）加碘化銀溶液，此溶液截至一九七〇年仍被廣泛採用。之後美國南達科他州立工礦學院大氣科學研究所（IAS）的科學家戴維斯（B. L. Davis）發現加入碘化銨（Ammonium）後，其效果將更爲良好

可信（表一）。

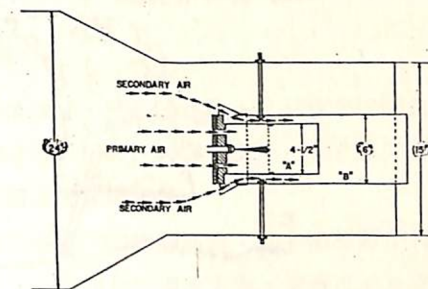
表一 典型的AgI— NH_4I —Acetone溶液組成表

化合物 (Compound)	重量 (gm)	磅 / 每加侖丙酮	重量比
丙酮 (CH_3COCH_3)	766	6.600	95.75
碘化銀 (AgI)	24.0	0.206	3.00
碘化銨 (NH_4I)	6.6	0.057	0.82
水 (H_2O)	3.4	0.030	0.43

（註：3.83%總固體，溶液密度爲 0.823 gm cm^{-3} 在 23.5°C ）

這種混合雲種溶液或材料，均以加壓式的管嘴（nozzle）以火焰或燃燒火炬噴灑入雲層中，圖四爲一種典型的噴射式種雲器（Jet seeder），內分一個主空氣管道（Primary air），用來供給火焰燃料本身，兩個次空氣管道（Secondary air），用來降低或控制火焰溫度。大體上，這種種雲器必須使溫度升高到八百至一千二百度方能將溶液變爲細小凝結核，傳播至雲層中。

目前最貴而比前者更有效率的烟火配料爲一九六七年西費等人（Schefee et al）發現的CY21及CY25種雲溶液（表二），雖然它很貴，但其



圖四 噴射式種雲之產生器（“Jet seeder” generator）

效率甚高，故仍有許多機關採用。

表二 CY 21 及 CY 25 烟火配料組成表

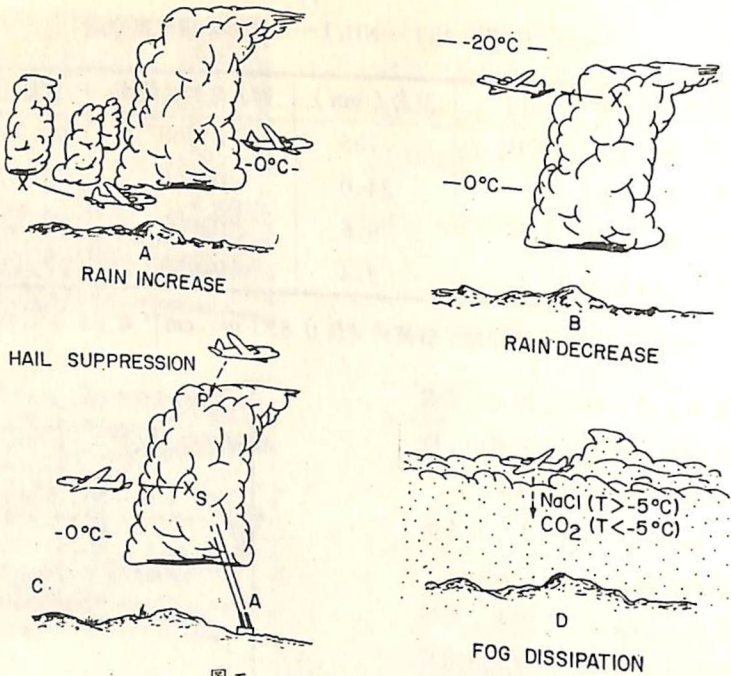
化合物 (Compound)	重 量 比	
	CY 21	CY 25
AgIO_3	89.0	80.0
丁二烯 Trimethylolethane trinitrate	1.5	5.0
羧基 (Carboxym-terminated polybutadiene, $\text{H}_2\text{C}-\text{CHHC}-\text{CH}_2$)	2.5	3.5
Tris 1-(2-methyl) aziridinyl	6.802	11.14
磷化物 (Phosphine oxide)	0.198	0.36

總之，不管以何方式散播雲種，品質控制與維護最重要。此舉數點說明之：

- (1)隨時檢查產生器或容器是否受潮、腐蝕、沾污等。
- (2)混合溶液的化學組成是否純潔。
- (3)烟火產生器的構造是否完善齊備。
- (4)經常校準產生器。
- (5)野外作業時，對雲種材料的凝結效率（nucleation efficiency）是否達到標準應予注意。

八、種雲作業（Seeding Operating）之執行

大多數天氣改造之目的爲增加雨量，不管用氯化鈉（NaCl，即鹽巴）或碘化銀（AgI）等吸濕性添加物（hygroscopic additive）均可從加壓散播器種雲，其最終目標無非能增加凝結中心或增加聚（coalescence）效用。通常種雲以灑播在雲底（圖五A）或上沖流（updrafts）的下部份，以使凝結核能被帶入較冷雲層，加速凝結作用。惟



圖五 四種天氣改造之技術型式圖

有一點必須注意，不過量使用碘化銀或其他種雲材料，以避免「過度種雲 (overseeding)」發生，阻止雲滴之發展 (圖五 B)，使反成爲一種冰化現象 (glaciation) 或消雹 (hail suppression)，如圖五 B 五 C 之飛機飛行位置均爲反行爲——減少雨量。

至於霧的消除 (fog dissipation)，在天氣改造技術上也是值得我們認識的 (尤其對於機場或高速公路)。由於霧的發生是在大氣極度穩定 (stability) 或靜風潮濕的氣象條件下。它又可分爲暖霧 (warm fog, $T > -5^{\circ}\text{C}$) 及冷霧 (Cold fog, $T < -5^{\circ}\text{C}$)，故其消除也需採用不同方法，前者可用氯化鈉 (NaCl) 或鹽水使增加水滴直徑或使其降雨，亦有人建議用熱 (空) 氣使近地層空氣發生渦動 (turbulence)。後者，可用乾冰、液態丙烷 (liquid propane) 及碘化銀，唯其成功機率端賴其他氣象因子，例如風力及穩定度。比較上，暖霧比冷霧難予消除 (參考圖五 D)

九、結語

天氣改造已在世界各國行之多年，且爲各國熱心研究 (追求) 發展 (特別在缺水乾旱或多災害的地區) 的氣象科技。對於增雨、消雲、消雹、消除閃電、消霧及減少颱風風力等所有活動，均可藉助凝結核去改變天氣。惟其成效如何？爲各界所關注。根據有關 (例如美國 National Academy of Sciences) 報告，僅將較有名者，列於表三，以供參考。

最後值得一提的是「天氣改造」雖可增加或減少風力，但如果使用不當也可能造成反效果。此外，天氣改造常常牽涉到複雜的法律、民意、生態及環境污染等問題，雖說其作業僅在某一局部地區 (local area)、某一國或某些州，但若無事先協調或立法，常會遭至民衆的反對或其他國家抗議。因此，美國有許多州已有立法，使天氣改造的單位有所遵循 (報備或不報備)。故爲了全體大眾利益，天氣改造之作業仍有賴於立法人員、科學家、政治家和大眾通力合作，方能克竟全功。

(轉接第 8 頁)