

天氣改造與人造雨

陳泰然

台灣大學大氣科學系

一、簡介

人類研究大氣的目的在於了解大氣。研究大氣所獲得的科學知識，一方面可用於發展成技術以預報未來天氣的演變，使人類得以趨吉避凶減少災變天氣所帶來的損害，並利用天氣預報以增加收益。當然，預報技術的改進與預報準確率的提高有賴不斷的研究。另一方面，人類更進一步希望將科學知識發展成技術，以用於改造天氣，適應需求。天氣被改造的原因可分成兩類，一為計畫的 (planned) 或有意的，一為無意的 (inadvertent)。前者例如：種雲 (cloud seeding) 以增加降水量 (雨或雪)、消霧 (fog dissipation)、消雲 (cloud dissipation)、抑雹 (hail suppression)、抑閃電 (lightning suppression)、颱風風力削減 (typhoon winds mitigation) 等。後者即指因工業化、都市化及人類其他活動無意的對大氣所造成的改造而言。

台灣地區顯著的災變天氣現象，除颱風、寒潮與梅雨之外，還有乾旱。前三種現象發生之時，人們所關心的大都集中在其預報問題。但每當乾旱嚴重之時，人們所關心的即由預報問題轉變為改造問題。這時的乾旱災害，首當其衝的就是農民，他們擔心農作物的收成。一般老百姓的日常生活，則因乾旱導致的限電限水措施感到極大的不便。工商界亦可因限電限水措施而蒙受損失。政府官員則更關心乾旱導致的經濟及其他問題。因此，舉國上下莫不希望有關單位能夠進行人工造雨以紓解旱象。此時，執行人造雨的重責大任立刻落到氣象界。

種雲以增加降水量 (即人造雨) 的工作，可分為二個不同的層次。第一個層次的工作是屬於科學性的試驗研究計畫 (experiment program)，由此獲得足夠的科學知識與證據之後，就可進到第二個層次的工作，即作業性的計畫 (operational pro-

gram)，此時人造雨的結果才可預期。因此，在執行人造雨任務之前，了解現階段的知識變得非常重要。本文目的即在將與天氣改造有關的雲物理基本知識作一簡介，介紹美、蘇、日與其他國家在天氣改造方面所做的努力，並綜合國際上現階段天氣改造研究與實作的成就，以作為今後台灣地區人造雨試驗研究與實作計畫在策畫、設計、執行與校驗 (或評估) 各階段的參考。1973年10月22-24日有60位著名的雲物理學者及相關的大氣科學家，代表美國氣象學會雲物理委員會在科羅拉多全國大氣研究中心 (NCAR) 進行有關現階段雲物理的評介討論。分成四個小組討論有關雲物理的成就，對未來的預期、重要的科學問題、雲物理與國家社會的相關及雲物理研究的優先次序等。評介內容詳見Braham et al (1974)，在此不擬贅述，僅就最基本的雲物理知識介紹於下。

二、雲物理基本知識

成雲過程一般可區分為二，一為雲微物理過程，一為雲動力過程。後者通常考慮有關凝結及凍結所釋放潛熱導致的浮力以及低層大氣的穩定度等問題。而前者則因雲內溫度不同而可區分為暖雲過程及冷雲過程。所謂暖雲即指雲內溫度均在 0°C 以上，反之則屬冷雲。在暖雲裡，由水氣到降水之間須經歷凝結 (condensation) 及合併 (coalescence) 過程。而冷雲內所經歷的過程或機制種類較多，包括白奇龍 (Bergeron) (或冰晶) 過程、冰晶塊化 (crystal clumping)、淞化 (riming) 及水滴凍結 (drop-freezing) 等，本節將偏重在這些雲微物理過程的討論與介紹。

1. 凝結成長過程

水氣變相成水滴的過程叫凝結。凝結過程可區

分為同質 (homogeneous) 與非同質 (heterogeneous) 兩類。後者即水氣凝結於凝結核 (cloud condensation nuclei; CCN) 上, 僅需小量的過飽和水氣即可。例如, $0.1-10 \mu$ 大小的凝結核僅需 100.1% 相對溼度 (即 0.1% 的過飽和) 即可有效凝結水氣。觀測發現雲內通常可有 0.1% 的過飽和, 而大氣亦有足夠 $0.1-10 \mu$ 大小的凝結核。同質凝結過程不需凝結核, 在大氣內並不重要, 因為約需有 8 倍的過飽和此過程才能開始。大氣內的過飽和從未超過 1%, 因為凝結核存在之故。凝結核之中包括有海鹽 (即氯化鈉) 及可溶性硫酸鹽及其他, 氯化鈉為良好的凝結核, 吸水性極強, 在相對溼度 78% 時即可開始凝結水氣。水氣凝結到凝結核上之後, 小水滴開始成長, 成長之初先受小水滴曲率效應 (即 Kelvin 效應) 及溶液效應 (即 Raoult 效應) 控制。長大超過臨界半徑之後, 此兩效應立刻消失, 而由水氣擴散過程取代, 小水滴可繼續成長到 $20-30 \mu$ 左右。

對於半徑 r 的小水滴, 考慮曲率效應與溶液效應, 則溶液上之平衡飽和水氣壓 (e_r) 與純水水平面上之飽和水氣壓 (e_∞) 之比可由下式表示 (參見 Byers, 1965; Fletcher, 1962)。

$$\frac{e_r}{e_\infty} = 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3} \quad (1)$$

(1) 式右邊第 2 項 $\frac{a}{r}$ 為曲率效應, 顯見較小水滴需較大飽和水氣壓, 故大小水滴共存時, 曲率效應將使較小水滴蒸發, 較大水滴長大。第 3 項 $\frac{b}{r^3}$ 為溶液效應, 顯見較大水滴需較大飽和水氣壓, 故大小水滴共存時, 溶液效應將使較大水滴蒸發, 較小水滴長大。此處 $a \approx 3.3 \times 10^{-5} \frac{1}{T}$, $b \approx 4.3 i \frac{m}{M} \approx 8.6 \frac{m}{M}$, i 為 Van't Hoff 因子, i 隨溶液濃度而變, 約等於 2, m 為凝結核質量, M 為凝結核克分子量。描述 (1) 式內 $\frac{e_r}{e_\infty}$ 與 r 關係的曲線稱為 Köhler 曲線, 此曲線存在一臨界半徑 $r^* = \frac{3b}{2a}$, 當 $r < r^*$ 時, 小水滴將受曲率效應及溶液效應控制而隨過飽和度的增加而長大。由 (1) 式計算可知在小水滴很小時 (約小於 10μ) 溶液效應較顯, 故較小水滴將長大, 較大水滴將蒸發。當小水滴成長至半徑超過臨界半徑 r^* 後, 曲率效應與溶液效應立刻消失, 小水滴成長即由水氣擴散過程控制。考慮前述兩效應及水氣擴散及熱量傳導過程, 小水滴的成長可由下式描述之。

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{\rho_v}{\rho_L} D \left(S - \frac{a}{r} + \frac{b}{r^3} \right) \quad (2)$$

(2) 式內 ρ_v 為水氣密度, ρ_L 為小水滴溶液密度, D 為有效擴散係數, S 為環境過飽和度。顯見, 只要過飽和狀態能夠維持, 小水滴可無限長大。大氣內的過飽和通常是由空氣塊絕熱冷卻所造成的。在積雲的情況是由上衝氣流 (updraft) 將空氣塊舉升至較低氣壓處而造成膨脹冷卻。在層雲或高層雲的情況, 則膨脹冷卻係由緩慢上升運動及由雲所在的大幅度天氣系統之動力發展所伴隨的降壓而來。在山區則可由地形引發上升運動提供膨脹冷卻。(2) 式亦可簡化成下式

$$\frac{dr}{dt} \propto \frac{S-1}{r} \quad (3)$$

因此較小水滴的成長速率較快, 但較小水滴並不會長到大過原來就較大的水滴。成長速率在小水滴半徑到達 $20-30 \mu$ 之後變得很慢, 成長過程就由碰撞合併過程所取代。

研究發現不同地區的凝結核含量有極大差異, 且不同地區的凝結核分布波譜差異為其對流雲雲滴波譜差異的主因 (例如, Twomey, 1959; Squires and Twomey, 1960; 1966)。Howell (1949)、Mordy (1960) 及 Neiburger and Chien (1960) 們的研究發現, 凝結核對雲滴數目及大小的影響局限於雲底之上數百公尺之內, 更高處則已受碰撞合併過程改變。圖 1 為冬季加勒比海、夏季美國中部及西南部地區濃積雲雲滴波譜分布 (Braham, 1968)。這些波譜的雲滴含量及雲中含水

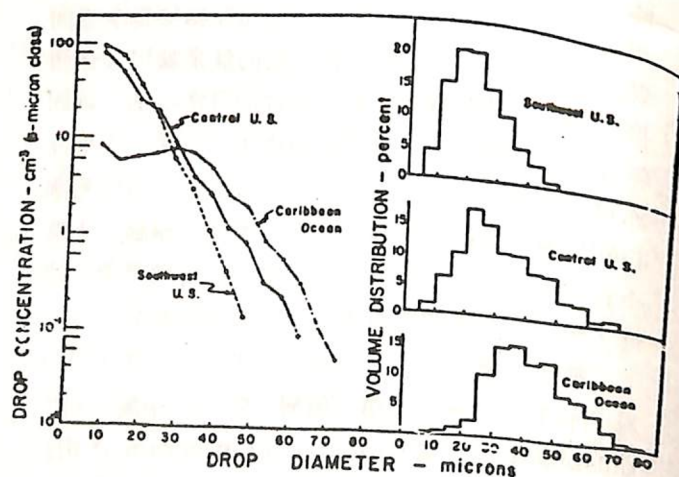


圖 1. 加勒比海 (Caribbean Ocean)、美國中部 (Central U. S.) 與美國西南部 (Southwest U. S.) 濃積雲雲滴波譜分布 (摘自 Braham, 1968)。

量 (liquid water content) 分別為加勒比海 52 cm^{-3} , 0.8 gm m^{-3} ; 美國中部 188 cm^{-3} , 0.6 gm m^{-3} ; 美國西南部 230 cm^{-3} , 0.3 gm m^{-3} 。圖中顯示, 由西南乾燥地區至較潮濕的中部及更潮濕的加勒比海, 其濃積雲雲內各種參數有逐漸轉變的特徵, 包括波譜的增寬、衆數直徑移至較大雲滴、雲滴含量減少及含水量增加。

2. 碰撞合併成長過程

當小水滴長大到 $20-30 \mu$ 之後, 水滴的成長開始由碰撞合併過程控制。碰撞合併過程的基本概念為當有大小不同水滴共存時, 因其下降速度不同, 大水滴落入小水滴羣中, 收集小水滴而長大。由 Stokes 定律, 水滴下落的終端速度 (V_T) 可由下式表示。

$$V_T = \left\{ \frac{2}{9} \frac{(\rho_L - \rho_a) g}{\eta} \right\} r^2 \quad (4)$$

此處 ρ_L 為水滴密度, ρ_a 為空氣密度, η 為動力黏滯性, r 為水滴半徑。當水滴半徑小於 20μ 時 (4) 式可適用, 並可簡化成

$$V_T = 1.2 \times 10^6 r^2 \text{ cm s}^{-1} \quad (5)$$

對於較大水滴, 使用 (4) 式的誤差增大, 此時水滴開始變形而呈非圓球體, 故終端速度需由實驗求得 (詳見 Mason, 1971)。一般我們也興趣在直徑 mm 大小的水滴, 在 2-3 mm 內的終端速度隨直徑變大甚速, 3 mm 以上則終端速度隨直徑增加非常緩慢, 此時底部變成扁平, 再長大則容易破碎。一般在片流的情況下, 水滴可大至 9 mm。但在亂流之中, 則在 5.5-6 mm 時水滴即開始破碎成較小水滴。

水滴由碰撞合併過程長大, 將由以下四個因子決定其成長速率。

- 大小水滴不同的下降速度。
 - 雲內含水量及雲滴波譜。
 - 碰撞效率; 較小水滴可順氣流繞過大水滴而不碰撞。
 - 合併效率; 由水滴表面性質及外界電場決定。
- 大水滴的成長速率可由下式表示。

$$\frac{dM}{dt} = \pi r^2 (U_T - u_T) W \cdot E \quad (6)$$

此處 M 為大水滴的質量, r 為半徑, U_T 為終端速度, u_T 為小水滴的終端速度, W 為含水量, E 為收集效率, 即碰撞效率與合併效率的乘積, 一般均

小於 1, 若在大水滴之下的小水滴全被收集, 則 $E = 1$ 。(6) 式可簡化成下式。

$$\frac{dr}{dt} = \frac{U_T - u_T}{4 \rho_L} W \cdot E \quad (7)$$

此處 r 為大水滴半徑, ρ_L 為水滴密度。

圖 1 所示雲滴波譜的差異對於由合併過程導致的水滴成長速率有很大的決定性。Braham (1968) 利用圖 1 資料, 計算由水滴合併過程成長至某一大小所需的時間, 如圖 2 所示。顯見, 原水滴波譜在合併

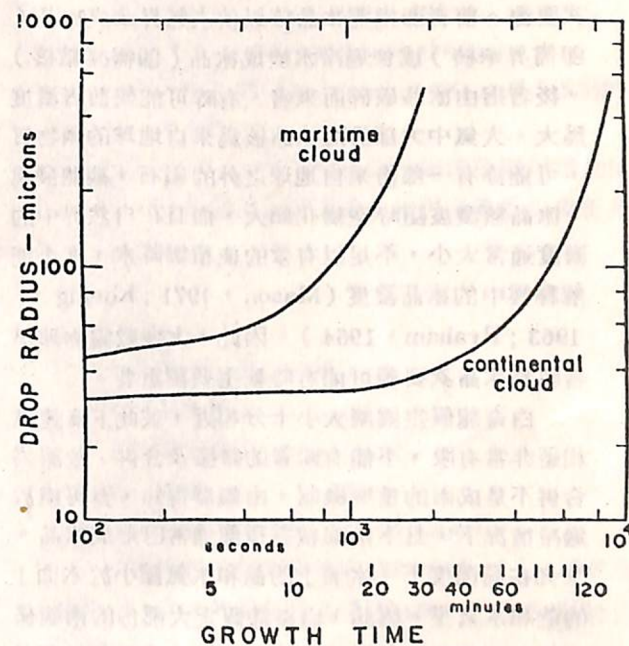


圖 2. 海洋性雲與大陸性雲的雲滴波譜 (圖 1) 由碰撞合併過程成長至某一大小所需的時間 (摘自 Braham, 1968)。

成長過程的重要性。計算結果並顯示圖 1 內的海洋性雲應可在 30 分鐘內發展出 1 mm 直徑的水滴 10^4 m^{-3} 個以上, 但乾燥地區的雲則需 2.5 小時。若將含水量增至 1 gm m^{-3} 而不改變水滴波譜, 則時間將分別縮短至 20 分及 1 小時。可見海洋性雲有利合併過程, 因其有較大的含水量且含水量集中在較少數目的大水滴。雲內平均含水量多寡亦隨不同雲種而異, 層雲及層積雲為 $0.2-0.9 \text{ gm m}^{-3}$, 高層雲為 $0.15-0.35 \text{ gm m}^{-3}$, 積雲為 $0.2-1.7 \text{ gm m}^{-3}$, 積雨雲為 $0.4-6.0 \text{ gm m}^{-3}$ 。碰撞合併過程在暖溼氣團內的雲中最為有效, 在暖雲及過冷雲內均可同樣地有效運作。

3. 白奇龍或冰晶機制

雲內產生冰相可透過兩種不同的機制，一為同質核化 (homogeneous nucleation)，一為非同質核化。前者溫度需在 -40°C 以下，水滴才可由同質核化變成冰晶。在大氣內此種機制並不普遍，雲需要很高，例如卷雲可在 -40°C 層以上。另外，因乾冰在 -78.5°C 之下由固體直接昇華成氣體，故由乾冰種雲導致急速冷卻亦將產生同質核化。非同質核化需有冰晶核 (ice nuclei) 存在，又可分成昇華及凍結兩類。

雲內冰晶來源可分為兩類，一為主要源，一為次要源。前者即指需冰晶核以使水氣昇華成冰晶 (即需昇華核) 或使過冷水變成冰晶 (即需凍結核)。後者指由冰晶破碎而來者，有時可能較前者濃度為大。大氣中大部份的冰晶核為來自地球的礦物質，可能亦有一部份來自地球之外的隕石。觀測發現，冰晶核濃度隨時空變化頗大，而且在自然界中的濃度通常太小，不足以有效的使積雲降水，亦不能解釋雲中的冰晶濃度 (Mason, 1971; Koenig, 1963; Braham, 1964)。因此，大多數雲物理學者認為冰晶次要源可能有時較主要源重要。

白奇龍假定雲滴大小十分相近，彼此下降速度相差非常有限，不能有顯著的碰撞及合併，故認為合併不是成雨的重要機制。由觀測得知，雲可處於過冷情況下，且下雨前積雲頂部通常已形成冰晶。又知在同溫度下，冰面上的飽和水氣壓小於水面上的飽和水氣壓。因此，白奇龍假定大部份的雨滴係由過冷雲內的冰晶開始。雲內冰晶 (或雪花、雪片) 由水滴蒸發提供水氣而成長，稱為白奇龍機制。若考慮熱力及動力理論，冰晶成長速率可由下式表示。

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi CD\Delta\rho \quad (8)$$

此處 m 為冰晶質量， D 為空氣內水氣的擴散係數， C 為靜電容 (electrostatic capacitance，為冰晶大小及形狀的函數)， $\Delta\rho$ 為冰晶表面與環境的飽和水氣密度差。實驗室觀測與 (8) 式計算結果，數值有所出入，但最大成長速率所在溫度相近，最大值在 -14°C 附近，次大值在 -5°C 附近 (Hallett, 1965; Mason, 1971)。觀測資料並顯示，在 -12°C 至 -17°C 區域的成長速率約比較高及較低溫度區域大 2 個因次左右。故雲是否伸入 -12°C 至 -17°C 區域，對於雲的降水行為將有極大差異。

4. 冰晶塊化

一般觀測到的雪片 (snowflake) 係由很多個別的雪晶 (snowcrystal) 聚集而成。由雪晶碰撞及聚集而成雪片的過程稱為塊化。研究結果證實此種過程對於造雪非常重要，並發現塊化在 0°C 與 -10°C 之間最為重要。實驗室內研究發現，在冰面飽和條件下冰晶間的聚集在 -25°C 時可忽略，聚集率隨溫度升高而變大，在 0°C 時最大 (Hosler et al, 1957)。Magono (1953) 觀測到最大雪花發生在地面溫度約 -1°C 時，此點與塊化僅在溫度稍低於 0°C 時才重要者一致。

5. 湍化效應

當冰晶掃過過冷雲滴，雲滴碰撞冰晶而凍結於冰晶之上的成長過程稱為湍化 (或撞凍)。在數學上，湍化可用類似碰撞合併的方程式來描述。過冷水凍結時釋放潛熱，增高湍化粒子溫度。湍化粒子則需透過對流熱量傳導及蒸發散熱。顯然，熱量傳導過程將限制湍化成長。當熱量傳導不足以使所有撞及的過冷水滴凍結時將形成 "孔冰" (spongy ice)。一般說來，在層雲內，湍化粒子能充分發散潛熱而保持 "乾燥" 狀態。但在積雲上衝氣流內雪珠 (snow pellet) 及霰 (graupel) 的成長，將由其大小、溫度、含水量來決定其屬 "孔冰" 或 "乾燥" 狀態。計算結果指出，在雲內 -5°C 至 -20°C 區域內，經由水氣擴散至冰晶及湍化的成長速率，在最慢的上衝氣流處有較長時間成長而達到最大。

6. 水滴凍結

過冷水滴凍結成冰晶可分成兩類，一為冰晶核含於水滴內產生的凍結，一為冰晶核由外界打到水滴表面產生的凍結 (即 Contact nucleation，接觸核化)。後者非常有效，Gokhale and Goold (1968) 實驗發現，後者較前者凍結溫度可提高 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 左右，並發現碘化銀在 -5°C ，二氧化矽在 -8°C 即可產生凍結。碘化銀與碘化鉛的物理結構近似冰晶，為非常有效的冰晶核，實驗並發現若碘化銀與碘化鈉混合成效更佳。

Bigg (1953) 研究水滴凍結過程，發現凍結與水滴大小、冷卻速率、水滴內結冰核有無等有關，他利用簡單機率理論解釋試驗結果，導出下式 (即 Bigg 方程)。

$$P_{\theta} = \frac{1}{N} \frac{dN}{d\theta} = \frac{BV}{\alpha} e^{-a\theta} \quad (9)$$

此處 P_{θ} 為在過冷溫度 θ ($\theta = 0^{\circ}\text{C} - T$) 時的凍結機率。 B 為常數，與結冰核濃度、種類、大小、表面結構有關。 V 為水滴體積， α 為冷卻速率， a 為常數。顯見，凍結機率與水滴體積 (大小) 成正比，與冷卻速率成反比，並隨過冷程度 (θ) 呈指數增加。

Braham (1968) 利用 Vali and Stansbury (1965) 和 Gokhale (1965) 導出的常數計算，求得自然界中雲滴凍結的典型溫度應為，半徑 100μ 為 $-16\sim -22^{\circ}\text{C}$ ， 500μ 為 $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$ ， 1000μ (1mm) 為 $-5\sim -10^{\circ}\text{C}$ 。顯見，在 -5°C 的過冷水即可開始凍結，此點非常重要。如此，凍結將使雲內冰相開始得較經由冰晶核主要源而來的冰晶昇華成長更早，且濃度更大。結果將增加雲的降水效率，因為由觀測得知冰珠透過湍化成長較過冷水碰撞合併成長來得快。

7. 冰晶次要源

前曾談及假定一個冰晶需有一個冰晶核，則主要冰晶核濃度不足以解釋雲內觀測到的冰晶濃度，兩者差異在 $-5\sim -15^{\circ}\text{C}$ 區域約為 $10^2\sim 10^3$ 之間。這些額外的冰晶從何而來是雲物理上的一個重要問題。這些冰晶的可能來源有二，一為由較高雲提供，另一為由已存的冰晶複化 (ice particle multiplication)。由卷雲播種其下較低雲的概念由來已久，此觀念的困難在於我們不能確定卷雲冰晶在晴空下落可存在多久時間，經歷多長距離，而仍能殘存進入較低雲內不被完全蒸發。觀測發現 (Braham, 1967; Braham and Spysers-Duran, 1967) 鈎卷雲及密卷雲的冰晶可在晴空處下沉 20,000 呎而殘存。但卷層雲冰晶可能較小，下降速度較慢，故經歷深厚晴空下落較少殘存機會。Braham (1967) 的個案研究發現，可由卷雲對其下中雲播種，導致極鋒雨暴。

冰晶複化的過程可分為二類。一為由水滴凍結，外殼分裂而散出小冰塊，即分裂過程 (splintering process)。一為雪花或雪片斷裂破碎成較小雪晶，即破碎過程 (break-up process)。在大氣中何者重要，目前尚無定論。

三、不同幅度的天氣改造

天氣改造的範圍很廣，可按不同幅度過程區分為以下三類。

1. 微幅度過程 (microscale processes)

此類牽涉的過程幅度在 15 公里以內，改造的可能性主要有 6 種。

- (1) 人類微氣候改造：例如空氣調節。
- (2) 植物微氣候改造：例如降霜預防。
- (3) 蒸發抑制：例如以單分子薄膜防止湖泊蒸發。
- (4) 消霧。
- (5) 能見度改造：在暖雲或暖霧內播種氯化鈉或大水滴或碳粒。
- (6) 能見度改造：在過冷雲或過冷霧播種碘化銀或使用乾冰。

2. 中幅度過程 (mesoscale processes)

此類牽涉的過程幅度在 15—200 公里，改造的可能性主要有 7 種。

- (1) 降水改造：此種又可區分為適度種雲以增加降水、過度種雲以抑制降水及過度種雲以重新分佈降水。
- (2) 抑雹。
- (3) 抑閃電。
- (4) 對流過程的動力改造。
- (5) 地形雲改造。
- (6) 無意的改造。
- (7) 颱風改造。

3. 大幅度過程 (macroscale processes)

此類牽涉的過程幅度在 200 公里以上，屬於氣候改造，改造的可能性主要有 4 種，目前均屬猜測性質。

- (1) 風場改造：改變全球大氣風系。
- (2) 輻射平衡改造：例如在高層大氣釋放粒子。
- (3) 極冰融解：改變大氣環流或利用黑色碳粒增加短波輻射吸收。
- (4) 洋流轉向。

四、國外天氣改造研究概況

1. 美國

天氣改造為雲物理學研究成果的重要應用，兩者之間的研究關係密不可分。在美國天氣改造的研究經費除由聯邦政府支持外，亦得到州政府、市郡政府及民間的支援。在聯邦政府各機構中 1963—1975 的逐年經費支持，如表一所示。顯見，除國科會外，內政部及經濟部之支持亦占同等重要的角色，國防部每年支援的經費十分穩定，均約在一百

表一、聯邦政府支持天氣改造的經費 (百萬美元)

會計年度	經濟部	內政部	國科會	國防部	其他	總計
1963	0.19	0.10	1.32	0.96	0.18	2.75
1964	0.18	0.18	1.57	1.41	0.19	3.53
1965	0.11	1.26	2.01	1.45	0.14	4.97
1966	0.65	2.91	2.00	1.28	0.21	7.05
1967	1.23	3.73	3.30	1.33	0.33	9.92
1968	1.53	4.63	3.39	1.41	0.34	11.30
1969	1.44	4.26	2.80	1.62	0.49	10.61
1970	1.70	4.76	3.22	1.85	0.49	12.02
1971	3.28	6.52	4.12	1.44	1.07	16.43
1972	4.56	6.66	4.70	1.82	1.68	19.42
1973	4.40	6.20	5.70	1.40	1.60	19.30
1974	4.67	3.90	4.00	1.10	1.63	15.30
1975	4.33	3.50	4.70	1.30	1.65	15.48

萬左右，其他機構例如交通部、農業部、環境保護署及太空總署亦都支持天氣改造計畫。總共支持經費在 1972 達到最高，約為二千萬元，為 1963 年的 7 倍。因有這些聯邦政府、各級地方政府及民間經費的支援研究，才導致天氣改造在科學及技術上的重大進步。

國家海洋大氣總署 (NOAA) 依據新的 1972 年聯邦法，開始對美國所有民間天氣改造活動進行紀錄，1973 年並擴及聯邦政府支援的計畫。以下僅列舉介紹一些在期刊雜誌上較常見到的人造雨及抑雹試驗研究計畫，以供參考。

- (1) 全國冰雹研究試驗 (National Hail Research Experiment ; NHRE) : 研究計畫在國科會支持下從 1972 至 1974 在科羅拉多東北部進行試驗，以研究在高山地區抑雹的可行性。
- (2) 聖元計畫 (San Juan Project) : 因科羅拉多地形雲造雨試驗的成功，促使屯墾局 (Bureau of Reclamation) 於 1970 開始進行科州河流域先驅計畫，以增加科州西南聖元山脈的降雪量。
- (3) 由科州州政府支持一計畫，在 1964 年開始在科州南部狼溪隘口區域 (Wolf Creek Pass area) 進行人造雨計畫。
- (4) 科州頂點計畫 (Colorado Climax Project) : 冬季地形雲改造以增加降水量，Climax 1

在 1959—60 冬至 1964—65 冬進行，Climax 2 在 1965—66 冬至 1967—68 冬進行。

- (5) 高原計畫 (High Plains Project) : NOAA 1972 年籌劃大型計畫研究 High Plains 的降水改造，1973 年改由屯墾局支持，初步實地試驗在 1974 開始。
- (6) 佛州區域積雲試驗 (Florida Area Cumulus Experiment ; FACE) : 1970 開始至 1977 為 FACE 1，試驗結果顯示動力種雲 (dynamic seeding) 有助於增加特定目標區的降水量。1978 開始的 FACE 2 屬於在證實 FACE 1 結果真確性的研究計畫。
- (7) 大都市改造計畫 (METROMEX Program) : 1971 在聖路易開始，研究無意降水改造，研究結果對於計畫性的天氣改造亦有影響。
- (8) 南達柯達州全州性計畫 (South Dakota "Statewide" Project) : 由州政府及地方政府支持的計畫，於 1972—1975 研究抑雹及增加夏季降水量。
- (9) 北達柯達州西南部計畫 (Southwestern North Dakota Project) : 於 1961 開始的 15 年商業性抑雹計畫。
- (10) 北達柯達州先驅計畫 (North Dakota Pilot Project) : 4 年的天氣改造計畫，目的在抑雹及增加降水。

- (1) 德州計畫 (Texas Project) : 1970—1973 在德州西部的商業性抑雹計畫。
- (2) 白頂計畫 (Project Whitetop) : 1960—1964 芝加哥大學的 5 年天氣改造研究計畫，為隨意性 (randomized) 種雲試驗，主要為非地形性夏季對流雲改造。
- (3) 1957—1960 與 1961—1964 阿利桑納州在南部的 2 個試驗計畫，目的在研究由飛機釋放碘化銀對於夏季對流雲的改造效果。
- (4) 破曉計畫 (Stormfury Project) : 透過動力種雲，擴大颶風範圍以減輕風力。

由於近年來天氣改造研究的重大科學成就以及對國家社會潛在的重大經濟效益，因此美國氣象學會於 1973 針對天氣改造活動提出 6 項確切建議，包括 (American Meteorological Society, 1973)

- (1) 加強與天氣改造有關的雲及風暴系統數值模式的發展。
- (2) 在美國主要氣候區執行廣泛的降水實地試驗。
- (3) 加強關於減輕劇烈風暴的基礎研究及實地試驗 (雷雨、雹、颶風、龍捲風)。
- (4) 擴大暖霧消散的作業研究。
- (5) 增加及擴大天氣改造的設備及專業人才。
- (6) 增加研究無意天氣改造的計畫。

國家科學院 (National Academy of Science) 對於天氣改造的建議內容更為豐富 (Committee on Atmospheric Sciences, 1973)，提出 5 個具體建議以支持氣象學會所提三個全國性的研究目標。這些目標包括：

- (1) 辨認降水改造的條件。
- (2) 發展抑制劇烈風暴的技術。
- (3) 建立研究無意天氣改造的國家及國際體系。

具體建議包括：

- (1) 增加實驗室計畫及實地計畫。
- (2) 廣泛利用數值模擬。
- (3) 種雲儀器及雲種 (seeding agent) 的標準化。
- (4) 設置統計研究小組。
- (5) 建立天氣改造資料庫。

此外，在經濟部支持下成立的天氣改造顧問會 (Weather Modification Advisory Board ; WMAB, 1978) 在 1978 年 7 月完成對天氣改造研究的評估 (WMAB, 1978)。該會認為目前已有足夠的天氣改造科學知識以及認識到將被發展出的改造能力對

於國家社會的潛在利益，故建議 20 年的天氣改造研究發展計畫，由每年三千七百萬元增至第 5 年的八千九百萬元。Changnon (1980) 更由科學觀點及經濟觀點大聲疾呼聯邦政府擴大經費支持天氣改造研究與發展計畫的迫切性。

2. 蘇俄

本節有關蘇俄在天氣改造方面的研究及實作計畫概要內容，主要來自美國氣象學會天氣改造代表團最近 2 次，即 1969 年 5 月 6 日—6 月 3 日 (6 人) 及 1976 年 5 月 24 日—6 月 13 日 (5 人) 的訪問報告 (Battan, 1969; 1977) 以及 Battan (1970) 對蘇俄所發表有關天氣改造論文的摘要。由於蘇俄政府對於發展天氣預報服務以及大氣科學的優先支持，近年來有大量年輕人熱衷於進入氣象界工作。為氣象作業單位 (Hydrometeorological Service) 提供訓練及培育氣象、水文及海洋方面人才的任務主要由 Odessa 及 Leningrad 兩學院擔任，每一學院均約有學生 2000 人。蘇俄天氣改造研究及實作計畫主要在抑雹方面。在降水方面較少注重，主要在烏克蘭進行。機場冷霧消散已在作業化階段，暖霧消散則仍在實驗階段。有 9 個不同區域有抑雹作業計畫，保護使不受或減輕冰雹之害，這些計畫所得利益與開銷估計比例視地區不同而異，1969 的訪問估計在 5:1~17:1，1976 的訪問估計降為 2:1~8:1。

蘇俄在天氣改造方面的研究經費支援非常穩定，在作業方面的支援更急速增加。抑雹作業經費由農業部支出。抑雹技術已應用在蘇俄境內，例如南北高加索、Moldavia、中亞以及鄰近國家如保加利亞及匈牙利。在抑雹作業時，種雲主要由大砲及火箭將 AgI, PbI₂, NaCl 等雲種撒入雲內適當區域。這些種雲方式主要又可分成三種。在高加索，High Altitude Geophysical Institute 以 10 厘米大砲向雷雨發射。在 Georgia, Transcaucasian Hydrometeorological Institute 以同樣的大砲將 NaCl 微粒射入雷雨暖雲部分，將冰晶核射入冷雲部分。在蘇俄南部地區，例如，Georgia 的 Alazani Valley、Moldavia 等則以火箭將冰晶核射入可能發展的雹暴內。

茲將與天氣改造有關的幾個重要研究及作業單位簡介如下，以了解蘇俄對這方面的重視。

- (1) 實驗氣象學學院 (Institute of Experiment—

tal Meteorology)

該學院位於離莫斯科約 100 公里的 Obninsk，主要研究雲物理、天氣改造及其他大氣科學。研究設備包括，一座 300 公尺高的氣象鐵塔，上裝有 13 層氣象儀器；複雜的大小雲室；風速可達 100 m s^{-1} 的水平風洞，用以實驗火箭頭的 AgI 煙霧的冰晶效率，發現 AgI 在煙霧內的濃度由 40% 降至 2% 時，則在 -10°C 時 AgI 成為有效冰晶核的數目由 10^{13} gm^{-1} 增至 $10^{14} - 10^{15} \text{ gm}^{-1}$ 。

(2) 中央高空觀測站 (Central Aerological Observatory)

該站的科學家們研究消霧、雷雨及相關現象，並實地試驗成雲及消雲過程。科學家們並密切參與發展及執行 Moldavia 的抑電計畫，該計畫以 AgI 為雲種。他們亦發現較小濃度的 AgI 煙霧 (2%) 比大濃度 50% 的 AgI 煙霧可產生更多的有效冰晶核。研究用丙烷消霧，發現以丙烷及 AgI 混合在 -4°C 以上較純用丙烷更為有效。

(3) 應用地球物理學院 (The Institute of Applied Geophysics)

該學院主要研究目標為利用大氣對流不穩度以發展改造雲的方法，研究增加降水技術，發展破壞對流雲技術。已計畫在 Sevan 湖區進行增加降雨作業，種雲僅將對冬夏冷雲進行，而不對暖雲。由 1978 開始繼續 7—10 年試驗。該計畫裝置包括有：

- 地面冰晶核種雲製造器網。
- 飛機 AgI 及乾冰種雲裝備。
- 對個別對流雲播種的大砲和火箭網。
- 在湖西側裝一造風機 (meteotron)：此裝置包含 6 個噴射引擎，同時在垂直方向造成一股 1000°K ， 600 m s^{-1} 的強勁熱氣流，以研究在不穩定大氣之下發展對流雲的可能性，希望藉此製造對流雲以降雨。
- 雨雪自動測量網。

(4) 外高加索科學研究水文氣象學院 (Transcaucasian Scientific Research Hydrometeorological Institute)

該學院有 350 位工作人員，約分成 12 個部門以研究氣象、氣候、水文、農業氣象、環境污染及其他方面的問題。雲物理及天氣改造所研究的目標包括，綜觀天氣現象與電暴形成及抑電潛勢的關係，利用雷達觀測電暴及電暴，藉一維動力及運動數值

模式研究對流雲以及雲的微物理過程。實驗室內以雲室研究凝結核及冰晶核的性質。雲微物理及電暴發展的研究工作始於 1963，抑電研究由 1963 至 1968 為止，抑電作業計畫於 1966 開始，以 10 厘米大砲將 $5 \sim 20 \mu$ 的 NaCl 粒子打入雲內暖雲部分，使每立方公里雲內有 $500 \sim 700 \text{ gm}$ 的 NaCl，即每立方公尺有 $400 \sim 600$ 個 NaCl 粒子。並將冰晶核打入同一雲內的過冷雲部分 ($-5^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$)，以期製造大量小的冰雹。

(5) 喬治亞科學院地球物理所 (Institute of Geophysics of the Georgia Academy of Science)

該所雲物理及天氣改造計畫很大，分成三組。第一組在處理數學模式發展的理論工作。第二組負責實驗室研究，利用龐大且複雜的設備來研究雲的核化、雲微物理、降水與降電的形成。第三組負責 Alazani Valley 及南喬治亞 Khakalaki Plateau 的抑電實地試驗及觀測，此計畫有 53 位研究人員及 250 位操作人員。實地試驗工作在 Alazani Valley 於 1953 開始，1961 前屬於科學試驗階段，此階段研究結論認為可透過冰晶成核過程改造雲的微物理及動力。1967 對試驗的校驗結果認為此類改造活動可對農業產生很大的利益，因此建議政府在其他地區執行。1967 後在 Alazani Valley 及蘇俄其他地區種雲進入實作階段。種雲方法係利用火箭將冰晶核射入雷暴的過冷雲部分。此法亦被用於 Moldavia、克里米亞、哈薩克、保加利亞、匈牙利，亦被瑞士—義大利—法國聯合試驗計畫採用。冰晶核採用 PbI。將 1 kg 含有 0.5 kg PbI 的煙霧撒播於雲內 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$ 區域，在 -10°C 可產生 10^{12} gm^{-1} 的冰晶核。

(6) 高層地球物理學院 (High Altitude Geophysical Institute)

該學院有三個主要部門，即實驗氣象、天氣改造及雪物理。執行很大的抑電計畫，有五個反電探究計畫，包括 16 個雷達分隊，500 位工作人員，25 位科學家。

(7) 烏克蘭科學研究水文氣象學院 (Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute)

該學院在 1953 於 Kiev 成立，有 450 位專任人員，其中有 45 位具有博士學位。該學院的科學問

題研究包括，氣候研究：特別注重劇烈天氣諸如暴風雨、乾旱、霜及雷暴；空氣污染研究；利用綜觀及數值方法發展天氣預報方法；農業氣象：特別注重在以天氣條件來預報農作物產量；以及雲物理與天氣改造。雲物理及天氣改造部門有 65 人，研究工作包括：發展增加降水技術、過冷雲降水量的重新分配與消散過程研究。蘇俄在降水改造的研究大部分集中在本學院。

雲物理及天氣改造部門包含 5 個實驗室：

- 天氣改造實驗室。
- 理論研究實驗室。
- 雲物理實驗室。
- 大氣膠體 (aerosol) 實驗室。
- 雷達氣象實驗室。

烏克蘭的降水增加計畫可分成三類，即對 (a) 層雲、(b) 積雲、(c) 鋒面雲，即高層雲及雨層雲等進行種雲，所有種雲均由飛機撒播乾冰碎粒。

- 過冷層雲改造：發現平均種雲可在 2 小時內產生 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 降水，可使冬季降水量增加 $8 \sim 10\%$ ，即每個冬季平均可增加 $12 \sim 15 \text{ mm}$ 。
- 積雲播種：1969 濃積雲播種試驗工作結束，並開始對 Cb 播種，1973—1976 對 Cb 種雲可增加 30% 降水。1969 以前的積雲試驗結果發現夏季降水量可增加 1% ，此增加量太小，故認為在烏克蘭進行積雲改造沒有經濟上的重要性。
- 鋒面雲播種：1969 以前的結果發現乾冰種雲可增加正常冬季降水量 $20 \sim 25\%$ 。1972 以後亦用飛機播種 AgI，發現可增加鋒面雲的降雪。
- 主要地球物理觀測所 (Main Geophysical Observatory)

該所有 1000 位科學家、工程師及技術人員，並分為動力氣象、動力氣候、物理氣象（諸如：輻射、雲物理及天氣改造、大氣光學……）及其他各組。天氣改造方面在發展增加降水量以撲滅森林火災的技術。種雲以飛機撒播 AgI 或 PbI₂ 在 $-7 \sim -8^\circ\text{C}$ 的高度。對於暖雲播種以 $5 \sim 7 \mu$ 的 NaCl 及水泥粉混合，水泥粉主要在使 NaCl 粒子不致於黏在一起。

(9) 水文氣象學院 (The Hydrometeorological Institute)

實驗及理論研究凝結核及冰晶核以及水的變相

。實驗研究的一個目標在發展雲改造的改良方法，並研究為何有時天氣改造並不見效。

目前在蘇俄的抑電計畫並無研究抑電功效的科學試驗，而均為實作計畫。大約有 600 位科學家及工程師參與雲物理及天氣改造研究工作。在抑電作業計畫方面估計有 3500—5000 人工作。總之，在蘇俄抑電工作已被視為一種技術，研究工作僅屬較低層次，作業方面繼續大幅成長。所有抑電計畫均宣稱非常成功，抑電減少的損害比花費大數倍。雖然如此，但抑電技術的功效仍有些問題尚未解決。降水增加的研究主要在烏克蘭進行，對 Cb 的冰晶核播種，可增加 30% 降水量，鋒面雲播種亦可大量增加降雪。風洞實驗證實 2% AgI 混合物較 40% 混合物能產生更多有效冰晶核。

3. 日本

日本在天氣改造方面的研究工作在 1947 即已開始，此處僅按 Fukuta (1971) 的評介論文將 1947 至 1970 的有關研究概況分成三個階段加以介紹。

(1) 早期計畫：1947—1960

本階段的天氣改造研究及作業計畫主要由 6 個電力公司支持，研究特徵為注重發展種雲作業的技術。冷雲種雲利用地面 AgI 發生器，結果以目視及雨量器校驗。1947 曾在九州區域以飛機撒播乾冰，1952 在該區以氣球載送乾冰撒播。雲種曾以 Al₂O₃ 試驗，發現其冰晶成核溫度太低 ($< -12^\circ\text{C}$)，故放棄，而採用 AgI 及 PbI₂，此兩種冰晶核均以氣球載送或由地面發生器播種。種雲主要在提供水利發電的水庫所在山區進行，故大部分屬於地形雲造雨。東京電力公司支持的地面種雲試驗計畫（完全隨意設計的），5 年的試驗校驗結果增加降水量 20% ，並發現雨水內 AgI 含量與增加的降水量成正比。Maruyama 研究發現 AgI 粒子的有效溫度為 0.82μ 在 -5°C ， 0.55μ 在 -10°C ， 0.34μ 在 -14°C 。有關暖雲則採用 NaCl 播種，利用 NaCl 飽和溶液每秒撒播 15μ 直徑的小水滴 10^{11} 個。暖雲播種的結果，對於降水量是否增加並未能獲得具體結論。

(2) 1961—1967：5 年計畫

1950 年代末期大氣科學家已漸察覺到欲使天氣改造技術有所進展，必須對種雲作業牽涉到的大氣過程有科學上的了解，故天氣改造的研究與作業計畫開始分開，並由科學與技術署 (Science and

Technology Agency) 支援成立日本人造雨研究所 (Japanese Artificial Rainfall Research Corporation), 該所於 1961 進行關東 (Kwanto) 研究計畫, 1962 進行九州研究計畫, 並由各大學、氣象局之氣象研究所及電力公司共同合作參與, 茲將此兩獨立研究計畫簡述如下。

(a) 關東計畫

該計畫主要目的在研究以下諸問題:

- (一) 種雲可增加多少降水量? 可靠程度如何?
- (二) 有什麼方法可用以估計種雲增加的降水量?
- (三) 適於種雲的雲結構如何? 什麼氣象條件適合種雲?
- (四) 地面與高空 AgI 種雲效果比較, 不同種雲方法的比較與改進。
- (五) 播種與不播種對於雲條件改變的差異? 此種差異與種雲效果的關係?

5 年計畫對於該地區冬夏季節內含水量、雲滴大小分配、冰晶含量以及凝結核、冰晶核的特徵均獲得了解, 並發現該區有足夠的水氣但無足夠的自然冰晶核, 故很適合人造雨。此外, 亦發現風切與垂直穩定度亦為影響種雲作業的重要因子。

(b) 九州計畫

過冷雲改造以氣球及飛機撒播乾冰, 或以飛機或在山頂上進行播種 AgI。暖雲改造則以飛機噴灑水滴, 以 C-46 飛機載運 2 噸水, 以每分鐘 60 升速度噴灑, 而以飛機上目視、照相及 3.2 cm PPI 雷達校驗。對夏季積雲播種的結果, 發現雲厚小於 0.83 公里時, 種雲並不產生降水, 對於已降水的雲播種則加速雲的消散, 對於剛開始降水的積雲播種, 則常加強發展並擴大降水區域。

此階段最徹底最科學性的作業計畫為東京大都會水資源供應處 (Tokyo Metropolitan Office of the City Water Supply) 所支援的計畫, 該計畫進行 7 年, 以 AgI 種雲。發現冬季因過量種雲 (overseeding) 可導致 40% 降水量的減少。最後三個冬季的試驗結果, 發現在目標區內增加 20% 降水量。

(3) 1968 以後

此階段研究重點由實地種雲試驗轉移至實驗室形式的研究。注重在雲微物理及雲動力, 包括儀器發展、實地觀測及實驗室內的研究。此時, 抑電計畫開始進行, 由全國災害防治研究中心 (National

Research Center for Disaster Prevention) 執行, 利用火箭種雲。

4. 其他國家

澳大利亞在雪山 (Snowy Mountain) 區域於 1955—1959 試驗, 研究以飛機撒播 AgI 煙霧對增加降水的功效, 各種校驗方法都顯示降水量有增加 (Smith et al, 1963)。以色列於 1961 開始, 亦以飛機撒播 AgI 以進行增加降水量的試驗 (隨意性), 1961—1966 平均各季節因種雲增加的降水量為 15% (Gabriel, 1967)。著名的印度暖雲播種係在 7、8、9 月季風季利用吹風機由地面撒播 NaCl, 18 個試驗季節分析結果發現降水量增加 21% (Biswas et al, 1967)。南非在 1971—1974 的抑電計畫, 係由美國的氣象顧問公司執行, 利用 AgI 撒播於 -20°C 的雲頂, 校驗結果發現農作物 (主要為煙草) 損失, 在種雲期間減少 40% (Changnon and Morgan, 1976)。

Mason (1971) 認為設計最佳的抑電計畫應屬瑞士於 1957—1963 夏季所執行的 "Grossversuch III" 計畫。其目的在減少阿爾卑斯山南麓 Cb 所帶來的災害性大冰雹。在 292 個試驗天裡播種 145 天, 由 20 個地面 AgI 發生器從 0730 至 2130 LST, 播種 5 分鐘停播 10 分鐘。結果發現, 播種天與非播種天發生冰雹的期間、區域及強度並無顯著差異。但播種天的平均降水量增加 33%。範圍最大的抑電計畫應屬法國西南亞奎丹盆地的作業計畫。1951 開始小型計畫, 1967 擴展至 240 個地面 AgI 發生器播種 7 百萬公頃區域。播種最密集的抑電計畫要算肯亞計畫, 利用 1 萬支火箭砲, 每支含 800 克的 TNT 炸藥, 在 1500 公頃範圍內向 150 個雹暴炸射, 而火箭並未攜帶雲種。他們認為爆炸所產生的震波可能使大冰雹破碎成小冰雹以減少損害, 或由絕熱膨脹冷卻而產生大量冰晶以減少形成大冰雹的機會。此外, 阿根廷、保加利亞、加拿大、義大利、南斯拉夫等國家均從事抑電作業計畫, 泰國、菲律賓、馬來西亞、印尼、巴拿馬、葡萄牙等國均從事增加或減少降水量計畫, 可惜結果未見正式刊載。

五、天氣改造研究的進展

天氣改造的方法, 除了肯亞用火箭砲爆炸產生震波或蘇俄利用水泥產生下降氣流或用噴射引擎製造上升氣流之外, 大部份都利用種雲技術。近二十

年來透過天氣改造試驗研究計畫, 或作業計畫所獲得的成就, 不論在增加科學性了解, 改進種雲技術或種雲成果方面都有相當的進展 (Kohan et al, 1969; Mason, 1971; Changnon, 1975; Simpson, 1975)。僅將吾人對於霧、雲 (降水) 及雹等方面改造, 現階段的能力及常用的雲種簡述於下。

1. 霧

- (1) 暖霧: 對於暖霧消散各家所提觀念及方法衆多, 目前仍處於研究階段, 尚未發展出可行的作業性技術, 但熱力法、吸水性凝結核 (hygroscopic nuclei) 播種及直昇機製造下降氣流法可行性較高。
- (2) 冷霧: 冷霧消散技術已在飛機場廣泛使用, 例如美國已有十三個機場有冷霧消散作業, 英、法兩國亦然。

2. 雲 (降水)

- (1) 暖雲: 暖雲改造以增加降水的觀念及方法不下十種之多, 以吸水性凝結核及超大凝結核 ($15-20\mu$) 播種較具可行性。雖然有多種 "動力種雲" 觀念, 例如碳黑化 (carbon black), 具有理論上的基礎, 但目前仍在研究階段。印度季風期間的暖雲改造利用 NaCl 地面播種, 增加降水量 21%, 統計上沒有疑問, 但物理上的圓滿解釋仍缺, 其他國家的試驗, 目前尚無可靠顯著增加降水量的報告。
- (2) 冷雲: 通常以乾冰、AgI、PbI₂ 播種
 - (a) 地形雲: 在美國西部山區、澳洲、日本、瑞士阿爾卑斯山南麓以乾冰或 AgI 播種, 在適當條件下可增加 10—50% 降水量。
 - (b) 熱帶孤立積雲: 以 AgI 做 "動力種雲" (dynamic seeding) 雲種, 在適當條件下, 雲可發展加強且生命期延長, 可增加 2—3 倍降水量。
 - (c) 層雲: 以乾冰或 AgI 播種, 結果可使過冷水變成冰晶, 長大之後下落, 因乾燥而蒸發, 降水不及地面, 結果使種雲區域的層雲消散。烏克蘭冬季乾冰種雲則增加 8—10% 降水量。
 - (d) 鋒面雲: 烏克蘭以乾冰及 AgI 種雲, 對鋒面伴隨的高層雲及雨層雲增加 20—25% 降水。

3. 雹

蘇俄在抑雹方面領先世界各國, 主要以火箭或大砲播種 AgI、PbI₂ 及 NaCl 於雲內適當區域, 已在作業階段。他們宣稱可減少 70—90% 冰雹損害, 利益與花費比在 2—8 倍之間。

六、結論

台灣的乾旱現象, 以中南部地區發生較為頻繁且較顯著, 發生頻率冬季大於夏季, 南部大於中部。一般說來, 乾旱若發生在春季 (3、4 月), 則其影響與災害較為廣泛且嚴重, 因為此時適逢第一期稻作插播與成長之時, 需要充分水源灌溉。若以六十六年 3—4 月的全省乾旱為例, 除對第一期稻作的成長有不良影響或農地缺水未能及時耕作外, 工業及民間用水亦受極大限制, 進而影響水力發電而導致限水限電措施。六十九年梅雨不顯, 乾旱更為嚴重。南部地區在 5、6 月時乾旱即已顯著, 空軍因而在 6 月 23 日奉命進行第一次人造雨作業。乾旱地區向北蔓延, 使 7、8 月間台北地區的家庭用水亦受影響, 此時不得不採取隔日停水措施, 直到 8 月下旬諾瑞絲颱風帶來雨水, 旱象才稍疏緩, 唯因乾旱程度嚴重, 水庫缺水現象至七十年 4 月仍然持續。

我國已漸步入農工商並重的開發國家之林, 故乾旱帶來的災害將與日俱增, 直接影響農業生產, 導致限水限電措施, 以致影響工商發展及國計民生。長期氣候的研究以求發展預報技術未雨綢繆, 以及人造雨的研究與作業以求紓解旱象為大氣科學處理乾旱問題的兩個重點。美、蘇、日等國人造雨的研究成果與發展出的技術, 均需國內相關科學的研究配合, 才能移植運用。而以大台北地區為例, 人口膨脹使得水源愈來愈感不足, 稍遇乾旱, 嚴重問題立刻顯現, 因而在適當時機進行人造雨以增加水源具有甚高的經濟價值, 特別是在翡翠水庫興建完成之後, 更可利用人造雨技術儲存大量水源以供不時之需。環顧美、蘇、日等國, 其農業部門、電力公司及負責科學發展機構都在大力支持有關人造雨的研究及技術發展工作, 使人造雨技術得以儘速進入作業化階段。吾人認為國內有關單位及氣象界都應有一共同認識, 要使人造雨作業能在乾旱時發生效用, 研究發展的工作必需及時展開, 因此「天氣改造研究所」或「天氣改造研究小組」或「人造雨試驗研究計畫」或「人造雨技術移植研究」或……

……等等亦應早日付諸實現，願有識之士共同

奮鬥，則國家甚幸，國民甚幸。

參考文獻

- American Meteorological Society, 1973: On purposeful and inadvertent modification of weather and climate. Bull. Amer. Meteor. Soc., 54, 694-695.
- Battan, L. J., 1969: Weather modification in the U.S.S.R. - 1969. Bull. Amer. Meteor. Soc., 50, 924-944.
- , 1970: Summary of Soviet publications on weather modification. Bull. Amer. Meteor. Soc., 51, 1030-1041.
- , 1977: Weather modification in the Soviet Union - 1976, Bull. Amer. Meteor. Soc., 58, 4-19.
- Bigg, E.K., 1953: The supercooling of water. Proc. Phys. Soc., 66, 688-694.
- Biswas, K.R., R.K. Kapoor, K.K. Kanuga and B.H. V. Ramana Murty, 1967: Cloud seeding experiment using common salt. J. Appl. Meteor., 6, 914-923.
- Braham, R.R., Jr., 1964: What is the role of ice in summer rain shower? J. Atmos. Sci., 21, 640-645.
- , 1967: Cirrus cloud seeding as a trigger for storm development. J. Atmos. Sci., 24, 311-312.
- , 1968: Meteorological bases for precipitation development. Bull. Amer. Meteor. Soc., 49, 343-353.
- and P. Squires et al, 1974: Cloud physics - 1974. Bull. Amer. Meteor. Soc., 55, 543-586.
- and P. Spyers - Duran, 1967: Survival of cirrus crystals in clear air. J. Appl. Meteor., 6, 1053-1061.
- Byers, H.R., 1965: Elements of cloud physics. The Univ. of Chicago Press, 191 pp.
- Changnon, S.A., Jr., 1975: The paradox of planned weather modification. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 27-37.
- , 1980: The rationale for future weather modification Research. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 546-551.
- and G.M. Morgan, Jr., 1976: Design of an experiment to suppress hail in Illinois, Bull. 61, Ill. State Water Surv., Urbana, 194 pp.
- Committee on Atmospheric Sciences, 1973: Weather and Climate modification, Problems and progress. Washington, Natl. Acad. Sci., 258 pp.
- Fletcher, N.H. 1962: The physics of rain clouds. Cambridge Univ. Press, 122-127.
- Fukuta, N., 1971: Weather modification activities in Japan. Bull. Amer. Meteor. Soc., 52, 4-14.
- Gabriel, K.R., 1967: Recent results of the Israeli artificial rainfall stimulation experiment. J. Appl. Meteor., 6, 437-438.
- Gokhale, N.H., 1965: Dependence of freezing temperature of supercooled water drops on rate of cooling. J. Atmos. Sci., 22, 212-216.
- , and J. Goold, Jr., 1968: Droplet freezing by surface nucleation. J. Appl. Meteor., 7, 870-874.
- Hallett, J., 1965: Field and laboratory observations of ice crystal growth from the vapor. J. Atmos. Sci., 22, 64-69.
- Hosler, C.L., D.C. Jensen and L. Goldshlak, 1957: On the aggregation of ice crystals to form snow. J. Meteor., 14, 415-425.

- Howell, W.E., 1949: The growth of cloud drops in uniformly cooled air. J. Meteor., 6, 134-149.
- Kahan, A.M., J.R. Stimson and R.L. Eddy, 1969: Progress in precipitation modification, Bull. Amer. Meteor. Soc., 50, 208-214.
- Koenig, L.R., 1963: The glaciating behavior of small cumulonimbus clouds. J. Atmos. Sci., 20, 29-47.
- Magono, C., 1953: On the growth of snow flake and graupel. Sci. Rep. Yokohama Natl. Univ. Sci. 1, No. 2, 18-40.
- Mason, B.J., 1971: The physics of clouds Clarendon Press, Oxford, 671 pp.
- Mordy, W.A., 1960: Differences in coalescence tendencies in computed condensation cloud drop spectra. Physics of precipitation, Monogr. No. 5, Washington, D.C., Amer. Geophys. Union, 184-190.
- Neiburger, M., and C.W. Chien, 1960: Computations of the growth of cloud drops by condensation using an electronic digital computer. Physics of precipitation, Monogr. No. 5, Washington, D.C., Amer. Geophys. Union, 191-210.
- Simpson, J., 1975: Concerning weather modification. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 47-49.
- Smith, E.J., E.E. Adderley and D.T. Walsh, 1963: A cloudseeding experiment in the Snowy Mountains, Australia. J. Appl. Meteor., 2, 324-332.
- Squires, P., and S. Twomey, 1960: The relation between cloud drop numbers and the spectrum of cloud nuclei. Physics of precipitation, Monogr. No. 5, Washington, D.C., Amer. Geophys. Union, 211-219.
- and ——, 1966: A comparison of cloud nucleus measurements over central North America and the Caribbean Sea. J. Atmos. Sci., 23, 401-404.
- Twomey, S., 1959: The nuclei of natural cloud formation, II Geophys. Pura. Appl., 43, 243-249.
- Vali, G., and E.J. Standbury, 1965: Time-dependent characteristics of the heterogeneous nucleation of ice. Sci. Rpt. NW-41, Mc Gill Univ., 31 pp.
- Weather Modification Advisory Board, 1978: The management of weather Resources. U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 210 pp.