

空中人工造雨

柳中明

摘 要

本文將整體空中人工造雨作業規劃為造雨需求、造雨哲學、造雨理論與方法、造雨作業，和造雨評估等五部份，並詳細說明其內涵。且分析國內過去造雨資料，作整體性的探討。指出未來造雨需求仍將屬於短期見效型態。要進入長期規劃型態必須長期分析各水庫需求，蓄水量等資料，並確切作到晚梅、空梅或少颱風雨等天氣狀況的預報。未來石門水庫水源區在晚梅或空梅期仍將為最可能之造雨需求地區。此外造雨評估技術的發展亦應是國內當前之急，以確切評估造雨成敗，並為修正造雨作業之基礎。發展雲模式數值模擬天氣改造現象，以檢討造雨理論，評估造雨成果，將為突破目前國內外天氣改造瓶頸之最重要工具。至於雲物理與動力觀測，應配合其他實驗計畫，獲取資料，再用以決定造雨理論與方法之修正，種雲物質之決定，種雲器械之設計、裝置……等。

一、簡介

空中人工造雨在國內已有近三十餘年的歷史，劉（1985）曾詳細整理各次造雨資料，作有系統性的造雨先導研究，指出人工造雨在本省有其必須性，而若能把握良好的天氣條件，造雨的效果是可以肯定的。據劉（1978）對民國六十六年春造雨評估，其效益約為 25%，較地面造雨效果（約為 12%，Hsu（1981））略佳。劉（1985）建議國內應更進一步的透過嚴格的科學規劃，做有條理的研究與實驗。

本文將整體空中人工造雨作業作一系統性的規劃，而區分出造雨需求；造雨哲學，造雨理論與方法，造雨作業，和造雨評估等五部份。首先，人造雨是在民生與經濟的需求下，才會進行的。過去國內各次造雨需求可以表一列出，而區分為水力發電，農業灌溉與水庫水源等三類需求，此結論與 Hsu（1981）所言類似。但各次造雨均是定在乾旱期後才緊急進行，其在時間上的需求型態，是屬於“短期見效需求”型態，而非“長期規劃需求”型態。

那麼，未來國內造雨能否進入長期規劃型態呢？此問題在第二節中有一初步的定性分析討論。

需求成立後，為進行造雨作業，首要建立哲學觀點，確立整體結構，才能分工合作，完成任務。尤其造雨最有效的方式，是在配合自然降雨，促使降雨雲將所含水份儘力傾倒入目標區中。此觀點為一切的基礎，必須確切體認。過去空軍進行造雨工作，曾受評為降雨來自自然因素。殊不知此點正表示所選取造雨時機之正確，事實上要無中生有地去造雨，是神話故事中的手段。在科學現實中，配合自然降雨，施種成雲降雨物質，將雲雨中潛在“水能”完全釋放，才是確切可以追求的。第三節中更進一步地將整體造雨計畫區分為五部份十步驟的觀點，作詳細闡明。

當然要進行造雨，必要發展科學性基礎理論與方法。第四節中將國內外對冷、暖性層雲或積雲的造雨理論、方法，決定因素與評估等作一系統性整理。並強調雲物理與動力觀測才是決定造雨理論的基礎。國內由於無飛機觀測設備，尚無法深入雲中，詳細分析。未來應配合其他如豪雨實驗計畫，獲

表一：民國 40 年～73 年，台灣空中人工造雨需求一覽表，本表資料乃自林與梁（1981），劉（1985）等。

需求年度	水力發電	農田灌溉	水庫水源
40 年	(1~4月)與(10~12月) 6 次造雨，日月潭上游。	9 月間，3 次造雨，北部農田上空。	
41 年	(1~4月)與(10~12月) 16 次造雨，日月潭上游。		
43 年		6 月 22 日，西部平原。	
66 年	5 月 8 日，日月潭上空。	3 月 24 日，台中嘉南一帶；利用鋒面過境造雨。 4 月 18 日，西部平原。利用鋒面過境造雨。 5 月 8，12 日，中部平原	5 月 7，8，13 日，新店溪上游，石門水庫，積雲造雨。
67 年			8 月 5 日，新店溪上游，台灣東方有顯著低壓環流及 850-700mb 有輻合現象時。
69 年		6 月 23 日，7 月 27 日，7 月 28 日，嘉南平原。	7 月 23 日～8 月 25 日，新店溪上游，積雲造雨。
72 年			8 月 27 日，31 日，石門水庫上游。
73 年			1 月 16 日，2 月 17 日，2 月 18 日，石門水庫上游。

取資料。目前則應儘力採用雷達資料作初步造雨分析。事實上，在實際造雨作業中，迅即判定造雨時機，將完全依賴雷達觀測。

第五節中將造雨實際作業區分為三步驟，並強調應收集過去造雨作業實際經驗，不斷模擬，修改與熟練，以①迅即判定造雨時機存在，②確切完成種雲工作，與③收集資料檢討細節。

最後，也是最重要的工作，就是要建立“造雨評估”技術。要能定量的決定造雨效率，才能確定整體工作的信心，不斷修改理論、方法、作業……等。由於過去國外的許多天氣改造單位，從事各類不同人工造雨或類似工作，往往由於評估技術未作到面面俱顧，合乎科學客觀性，是以所作結果都無法得到科學界廣泛支持。一般將此視為天氣改造工作中最嚴重的瓶頸問題，非為國內所獨有。是以，

國外雖在發展造雨理論，研究種雲物質特性，設計種雲器械等各方面均有相當突破，甚至造雨時亦能目睹其可觀成果，但卻仍困於定量的說明“因與果”的關係。

二、造雨需求

空中人造雨耗資鉅大，若無絕對之經濟與民生需求，純為學術研究，其實行可能性不高。國內空軍過去均是在水力發電，農田灌溉與水庫水源等三大需求下，統籌策劃與作業。尤其是在乾旱期，應各方緊急要求，立刻作業。

若細研之，造雨需求應區分為「長期規劃需求」與「短期見效需求」二種型態。譬如美國西中部猶他，科羅拉多……等各州，夏季嚴熱，乾燥，雨水稀少，又且人口漸增，工商業發展，用水需求大

，暑期易於發生嚴重缺水現象。為儲備用水，各州在冬季均有人造雪計畫，亦即利用冬季風暴過境時，促使山區降雪量增加，待來春時，積雪融化流入各水庫中，以供夏季之需。此即“長期規劃需求”下造雨/雪的工作形態。

又如美國中部常有夾帶大冰雹的暴雷雨發生，嚴重影響農作物生長與人類建築物等安全。為改變冰雹之生成環境，破壞雷雨之物理與動力結構，許多研究與作業單位均投資於發展有效之天氣改造方法，實行如同人造雨之作業，製造抑制冰雹成長之物理環境，避免暴雷雨生成對經濟民生之重大傷害。由於對象為短時期內發展成熟的暴雷雨，且造雨後要立刻達成效果，故為“短期見效需求”之型態。

細分辨“長期規劃需求”與“短期見效需求”，前者要求長時期規劃，慢慢形成效果，是以每一次造雨並不要求成果驚人，但是要逐次累積成果，漸次達到預訂目標。後者則要求立刻見效，造雨後立刻達到預期目標，立刻解決問題。二者所要對付的大氣現象，有時可能是一樣的。但由於工作需求與計畫大大不同，所採用之造雨哲學、理論、方法與成果要求，就全然不同。其對工作人員之工作與心理負擔亦是大大不同。

國內過去造雨需求，雖以經濟目的的不同可分為三類，但若以見效時間需求分辨，其皆屬於“短期見效需求”之形態。即皆在乾旱期發生後，匆忙準備造雨，冀望立刻收到實效。曲（1981）即曾建議要“在乾旱未發生前先行造雨以增水庫之蓄水量及節省水庫之水量”，以進入“長期規劃需求”之工作形態。

要判別國內人造雨需求之未來形態，必須先了解“需求乾旱”與“水庫設計”二點對於需求決定的影響。“需求乾旱”不同於“氣象乾旱”。中央氣象局訂定“氣象乾旱”為 20 日內降雨量均小於 1 公厘之時期。而“需求乾旱”則類似水利，農業等乾旱，為需水時嚴重缺水乾旱期，其決定因素在於需水量與蓄水量。國內過去“氣象乾旱”發生時不一定發生“需求乾旱”，但“需求乾旱”問題發生時，却多半是在“氣象乾旱”期。“需求乾旱

”的存在才決定了“造雨需求”是否成立。

再談“水庫設計”，國內東部多雨，山區多雨。西南部 10～4 月少雨易形成乾旱，其主要雨源來自梅雨與颱風雨，各水庫設計之初，即考慮 10～4 月為乾旱期，儲備梅雨與颱風雨，又且利用山區水源多雨，建於河道中適當位置。是以在正常狀態，除看天田一灌溉設施較差區域，一年中各區水量分配尚可控制。但水庫之蓄水量有其極限，當度過 10～4 月乾旱期後，若逢晚梅，即有缺水問題。若又逢空梅與少颱風，就超越水庫設計之考慮，易於進入“需求乾旱”形態。

至於台灣北部，一年多雨，目前有“翡翠谷”與“石門”二水庫，調節所需。但人口增加快速，工商業蓬勃集中發展，用水需求與日鉅增。過去新店溪直潭壩尚可應付所需，但民國 69 年 5，6，7 等三個月空梅少雨期，立刻造成嚴重缺水現象。目前翡翠谷水庫在運轉中，當可應付如此情況。但若空梅再加上少颱風，且於盛暑，少雨期由 5 月延續至 10 月，則必造成嚴重缺水問題。至於石門水庫目前在春耕後晚梅或空梅期，已有缺水現象，未來尚未見改善計畫，仍易進入“需求乾旱”期。

綜合而言，目前各水庫設計已考慮平均氣候狀況下之水量供需，需求乾旱的發生將是在水量需求增加過速與不正常空梅和少颱風雨的情況下發生。但是水庫之最大蓄水量是有極限的，不大可能儲備一次最大蓄水量，即可度過長期之乾旱。必須定期調整，保持最佳之蓄水量，就易長期控制水源與用水量分配。此項工作近似於“長期規劃需求”下之工作形態，但要能付諸實行，必須作到以下二項工作：

1. 追蹤各水庫用水需求的成長；分析進水量與雨量之相關性；監視蓄水量之儲備。
2. 正確作到晚梅或空梅、少颱風雨等之預報。

短期內上述工作尚無法完成，而將待各界有興趣人士們共同努力。目前國內造雨需求，將不會進入長期規劃形態，而仍如過去之乾旱期後短期見效需求形態。表二詳列台灣北部與西南部未來發生造雨需求之可能情形。

表二：台灣各地造雨需求情形一覽表

北 區		天 氣 狀 況	經濟民生需求
北 部	翡翠谷、新店溪上游	空梅加上少颱風雨，少雨期由 5 月延至 9，10 月時。	水庫水源 水力發電
	石門水庫上游	晚梅、空梅或少颱風雨時。	水庫水源 水力發電 農田灌溉
中 部	農田上空	晚梅、空梅或少颱風雨時。	農田灌溉
西南部	各水庫、埤水壩等		水力發電

前述分析純以用水需求來考慮，但是否缺水時絕對需要耗資作空中人造雨，解決臨時問題？台灣電力公司於民國 41 年曾請空軍支援人造雨，而後即以地面造雨方式調節日月潭水力發電廠之水位。而國內近年來農業生產過剩，農田灌溉需求已不易形成充份經濟需求條件，除非往後情況又異。所以最可能之造雨需求情況，將是在人口增加，工商業發達，用水量與日鉅增之“水源水庫”缺水乾旱時，才形成足夠之經濟民生需求。未來最可能需要造雨之地區，仍將為晚梅或空梅期之石門水庫水源區。而若空梅後加上少颱風雨，少雨期延至 10 月，北部與西南部各地均需造雨。

以上討論，主要是依據國內過去造雨需求資料，以及基本水庫設計觀念，作“定性”之造雨需求分析。未來仍需作定量之需水量，蓄水量與雨量之相關性研究，以確切證明或修正所推測之看法。

三、造雨哲學

造雨需求條件形成後，即要規劃造雨工作，理想之造雨境界，當然是由無到有，能在毫無降雨預兆下與雲佈雨。其次就是促使乾旱期中不斷被蒸發的雲雨降落地面。但最實際與有效的，乃是幫助將要或正在降雨的雲區，儘力將所含有的雨量全數傾倒地面，就如同扭乾一條濕毛巾一般地去擠擰降雨雲，所以在地面雨量站上所測量到的雨量，應該是自然界原本計畫要下的雨量，加上人工扭擠後多下的雨量。

但是大自然的變化甚大，人力無法完全控制。

人工造雨可能會造成正效果、零效果或負效果，正效果當然是造雨者所期望的。零效果則表示人為控制天氣尚未到達理想。最糟糕的就是負效果，通常是在過份種雲 (overseeding) 的情況下發生，所謂欲速而不達。譬如冰相種雲，造成太多的小冰晶集中在有限的區域內搶奪有限的水汽；反而無法長成多數的大冰晶，以促發降雨。所以造雨後一定要看到降雨，否則即代表 2 種可能：1 是所選取之種雲時機不對，1 是造雨負效果之影響。當然即使降雨，也可能由於負效果影響，使得大自然原計畫要下的雨量大大減少。要確切的判定造雨成果，就一定要訂定有效的“造雨評估”，定量地去估計成果，才能用以改進造雨方法與作業等，並修正整體造雨計畫。

而造雨的正效果，也並非完全是造雨者所期望的。降雨可能下在不適當地點與時機，或者達不到預期目的，或者會造成豪雨釀成巨禍。1983 年美國猶他，科羅拉多，阿里桑那州等，由於冬季積雪太多，初春融雪流入負荷沉重的科羅拉多河，沿河的各水庫在無法容納大量進水下實施洩洪，造成下游嚴重洪水。事後分析，就是水利單位對於降雪量、融雪速度，進水量與容水量等判斷錯誤，未在前適當調節儲水。此為長期規劃中最擔心的問題，就是預判錯誤，所蓄水量反成禍源。

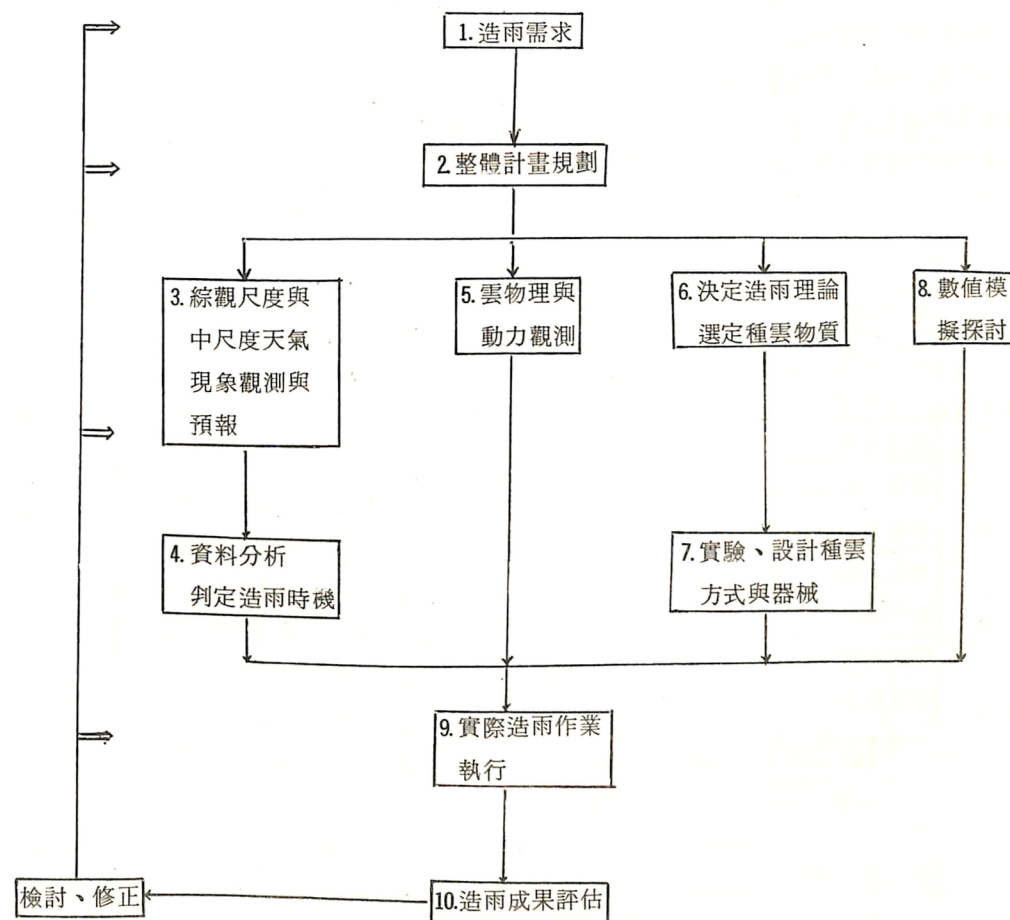
此外，1974 年美國南達可達州農民即曾抗議州政府所採行的控制冰雹計畫，反而全面影響本州降雨，使得原本雨量豐富的地區，竟變成缺水區。此為短期見效中擔心的情況，就是原本期望達成的目標或已達到，但同時也造成嚴重之併發後患。國

內乾旱期中，短期見效造雨，最佳對象為山區積雨雲，若效果極佳，則易形成山區豪雨，造成短期內之不便與意外之損害。

綜合而言，人造雨的工作是配合自然降雨時機，幫助降雨落在預定的地區。期望的是降雨雲在通過目標區時，將所蘊藏的水量集中灑落目標區，而不要散落在其他不重要區域。若屬長期規劃需求下的工作，一定要配合未來雨季或乾季的預報，控制各水庫之蓄水量，避免造雨後雨季却來臨的尷尬與洪水之患。若屬短期見效需求下的工作，則要避免

可能伴同的豪雨水害。

當然科學性的造雨物質與種雲方式的選定，有助於控制造雨成果。但最重要的成員仍是造雨評估的技術，唯有作到科學性定量的成果評估，才能確切修正整體作業，配合整體需求計畫。圖一說明造雨需求條件成立後，整體造雨執行計畫概說，大約 10 個不同因素決定造雨成敗。但唯有確切作好成果評估，其結果才可用以修正其他每一項因素。尤其是造雨需求的不斷檢討，避免浪費無謂之精力與經費。



圖一：整體空中人造雨作業計畫結構

四、造雨理論與方法

造雨最佳對象，是已具降雨能力的雲雨。是以要觸發成功降雨，首先要作到相當的雲物理與動力特性觀測。其目的是在了解自然降雨特徵，以配合發展，順應自然，建立正確的造雨理論與方法。若將雲中低於 0°C 部份定為冷雲區，高於 0°C 部份定為暖雲區，表三詳列所需觀測的各項參考特性。由於雲的空間與時間尺度相當狹小（5～50 公里），觀測上需要飛機，雷達，地面與探空等各類儀器配合。尤其是飛機觀測，才能測量雲內特徵。但在實際造雨作業中，為爭取時間，迅速判定造雨時機，則完全要依賴雷達觀測。

由所獲雲內資料，應可決定採用何類造雨理論，種雲物質和方式。陳（1981），羅與劉（1981）等均曾詳細討論冷、暖雲的改造。表四與表五亦

簡略說明冷性與暖性層雲和積雲的種雲理論、方式、決定因素與評估。這些觀念，可供初步參考。最重要的仍在①種雲時機的正確判定與②設計恰當種雲器械，定量控制種雲物質形狀，大小，數量與種雲方式。如此再配合造雨評估，才能確切定出造雨作業與成果的相關性，尋出修改原則以獲取更佳成果。最理想的情形，就是發展天氣改造雲模式，不斷地模擬造雨情況，在事前與事後檢討作業細節，修改缺漏。

以上所談，仍屬科學界尚未定論的理想問題。由於大氣變化太大，造雨後因與果之間的關係評估，從未有一各界認同的標準模式。而實作與理論者，往往考慮不同，配合不佳。譬如以雲模式來檢討天氣改造的構想，早在 10 數年前即已廣為提出，但直至今日仍未有天氣改造作業採用雲模式來配合造雨。這也所以目前雖然對於各類種雲物質的特性

表三：雲物理與動力觀測表

項 目	冷 雲 區	暖 雲 區
雲頂溫度	✓	✓
雲頂高度	✓	✓
0°C 高度	✓	✓
冷層厚度	✓	
亮帶高度與厚度（亮帶一冰、雪融化區）	✓	✓
冰晶大小與含量	✓	
過冷水滴大小與含量	✓	
雲底溫度		✓
雲底高度		✓
暖層厚度		✓
水滴大小與含量		✓
CCN 大小與含量（CCN-水滴凝結核）		✓
水含量	✓	✓
雲之水平運動	✓	✓
雲內氣流運動（上升或下降氣流速度大小與位置）	✓	✓
雷達 PPI 圖上特徵	✓	✓
雲區水平範圍	✓	✓

表四：層狀雲造雨理論與方法，決定因素和評估。

	冷 性 雲 區	暖 性 雲 區
理論與方法	釋放冰晶凝結核，觸發相當數量冰晶形成，消耗過冷水滴，吸收水汽成長。形成大冰晶或雪片，緩慢墜落。過 0°C 高度後，漸融結為大水滴，經碰撞，凝結與破碎等連續性過程，促發眾多小水滴，形成大型雨滴，造成降雨。	灑播大水滴或含鹽水於雲頂或 0°C 高度以下，促發與小水滴之碰撞，凝結與破碎等連續過程，形成大雨滴，造成降雨。
決定因素	種雲高度（ $-10^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 為最佳）；冷區厚度（需適合冰晶充份時間成長）；過冷水滴大小與含量分布；種雲物質（反應速度，形成冰晶數量）；上升氣流速度與位置；與種雲分佈面積。	暖雲區厚度；上升氣流大小與位置（上升速度通常微弱緩慢，但若所灑水滴太大，迅速墜落雲區，則效果大失。）；水滴大小與含量分布。
評 估	廣為天氣改造界所採用，易於觸發降雨量增加，效果明顯，但需灑播廣大區域，投資大且可能造成過份種雲之負效果。	必須重覆灑播，才會造成顯著效果，但不易造成負效果。

表五：積雲造雨理論與方法，決定因素，與評估。

	冷 性 雲 區	暖 性 雲 區
理論與方法	灑播冰晶凝結核，於微弱垂直氣流區，觸發冰晶形成，消耗過冷水滴，吸收水汽成長。而後冰晶進入強烈上升氣流中，因具足夠之大小，形狀與重力速度，乃與過冷水滴碰撞、凝結，形成大冰晶或小冰雹等，長成足夠大小，並具克服上升氣流之下墜速度，乃墜落冷雲區；過 0°C 後，迅即融解為大水滴，再與小水滴經碰撞，凝結與破碎等連續性過程，促發大量降雨。	雲底充份灑播小水滴，使其進入上升氣流中，經碰撞，凝結與破碎等連續過程，造成降雨。
決定因素	種雲物質，特性，方式；種雲位置（一般以 -10°C 附近為最佳）；過冷水滴大小與含量分布；上升氣流速度。	水滴大小與含量分布；上升氣流速度；種雲水滴大小，含量，速度與位置。
評 估	此為積雲降雨之自然過程，效果最佳，且由於冰晶形成釋放潛熱，具有動力性天氣改造特性。由於積雲水平範圍有限，若能在適當位置種雲，就不需重覆種雲，但積雲形成過程短促，不易把握造雨時機。	如暖層雲造雨形式，在雲頂灑播大水滴亦能達成效果，但積雲頂部為下降氣流強盛區，造雨效果有限。缺點仍為必須不斷重覆灑播，才見相當降雨。

已可掌握，並已發展出各類不同型式的種雲器械。但種雲後造雨效果，仍未有絕對的定論或一定的決定程序。過去國外許多不同機構從事天氣改造工作，所獲的結論，往往並未為各界所接受，也是肇因於此。國內空軍以往空中人造雨作業，是採用冷暖雲改造齊頭並進的理論與方法，欠缺的就是定量的控制種雲物質，以及科學性造雨評估。但就造雨的終極目的一增加降雨，確是成功的，所採用的方式也是合理的。

分析國外天氣改造的缺失，國內未來應先發展雲模式，模擬造雨過程，分析造雨最佳手段。然後再設計適當種雲器械，定量控制種雲過程。至於不可或缺的雲物理與動力觀測，則需配合其他科學界的需求，爭取資料。由於飛機觀測異常昂貴與不便，應儘量利用雷達觀測。

五、造雨作業

實際造雨作業才是整體計畫中最為艱辛的部份，一切理論與技術的功效，均決定在造雨作業的執行成敗。是以應如部隊演習般，一再操演，直到每位參與人士均熟悉所負職務。仔細分析，造雨作業應可區分為三階段，首先是造雨時機的判定，其次是執行種雲，最後是資料收集，檢討工作步驟。

造雨時機的判定，在事前應已有一定的決定程序，譬如計畫要從事冷雲種雲，且早已決定好種雲區與風向等，則作業中心應設在機場航管中心，或雷達站。首先看 PPI (Plane Position Indicator) 銀幕，判別雲雨是否將臨種雲區，與其涵蓋範圍是否適當。其次再分析 RHI (Range-height Indicator) 銀幕或類似資料，判別雲高是否在 0°C 高度以上；再由最近時間與地區的探空資料，決定其雲頂溫度是否在 -10°C 或 -30°C 以上，符合標準。最後還要考慮種雲與觀測飛機起飛後抵達目標區所需時間，是否正好配合雲區的移動。若一切適合，就立即進入種雲執行階段。整個決定程序必須反覆推敲，一再演練，直到面面俱顧的程度。

種雲執行中，種雲飛機的飛行航向與溫度以及高度等，事前亦應已設計好。最重要的當然是種雲

器械是如何裝置在飛機上，以及要如何控制種雲物質的釋放。要考慮飛航的安全，也要考慮合乎科學要求，同時也要能自動化與定量化。設計種雲器械，應先考慮飛機的配合，並要先在機場裝上飛機中，實驗操作過程。此外，種雲執行中，觀測飛機的飛行配合相當重要。由於種雲飛機的任務明確與重要，所以照相與雲物理觀測等任務均要托觀測飛機來執行。其最擔心的，就是彼此相互干擾與資料收集不具代表性。是以，亦要在事前詳細規劃飛行航向，速度與高度。

最後就是資料收集與工作檢討，由於作業的設計純是紙上談兵，實際應用執行時可能問題發生，是以必須立刻檢討，分析，改進。所以必須另外分出一組科學家，客觀地判別造雨執行工作情形，收集各項參考資料，討論與分析執行成敗。一般均期望能應用雲模式，立刻檢討，指出科學思考上不週全之處。但直至今日，尚未能在短暫時間內，數值模擬整個過程。原因之一乃是大氣觀測資料的不週全之故，無法確切代表大氣現象。

六、造雨評估

要評估人造雨的效果，就是要能將雨量站所測之雨量，分清楚為大自然原要下的部份與人工造雨的部份。若人工造雨的部份愈大，則顯示造雨的效果愈佳。反之，則造雨的技術尚需改進。但要如何作到定量的計算造雨效率呢？當然就是要知道“大自然原要下的雨量， R_N ”，再由“雨量站所測雨量， R_M ”中減去，就是“人造雨的部份， R_H ”。如此造雨效率， E_H ，即可以下式計算：

$$E_H = 100\% \times \frac{R_H}{R_N} = 100\% \times \frac{R_M - R_N}{R_N} \quad (1)$$

但是，人造雨是不可能定點進行的，而是在一個面上進行，所以要考慮的雨量，應該是一個廣大受影響區域內的整體雨量。是以①式中的 R_M ， R_N ，與 R_H 等值，應指的是目標區內的整體雨量值，而非是少數幾個雨量站的定點雨量值。

細分析，要應用①式以評估造雨效果的困難有二。一是要實際測量造雨目標區內整體降雨量， R_M

值，二是估計大自然在造雨目標區內的預計整體降雨量， R_N 值。要獲得正確的 R_H 值，當然是要雨量站多，最好是密密麻麻地分佈滿目標區，但總是有個極限。而降雨又是屬於小尺度的大氣現象，在雲區內降雨大小分佈，不具固定的地形分布情形。所以要由有限的雨量站資料，去推定目標區整體降雨量，殊為困難，除非配合雷達或衛星雲圖的降雨估計技術。

至於估計 R_N 值則更為困難。大自然在造雨目標區內的預定降雨，並無一定的法則加以估計。一般將探空垂直大氣的水氣含量相加，即是可降水量 (Precipitable Water)。但其並非雲內水含量 (Liquid water content) 或冰含量 (ice crystal content)。也即可降水量為具凝結成水滴或冰晶的潛在能力的水氣，但非為已凝結成水滴或冰晶，且將降落的水含量。此外，即若能測知雲內水含量與冰含量，也無法決定是否全數將形成降雨抵達地面。終結而言，即是測量技術的發展並無法幫助決定 R_N 值。是以國外均採二種不同方式去估計 R_N 值。一是採用過去同一地區、相似大氣狀況的降雨量 R_M 值，作統計分析，外延至造雨時期，以估計自然界原預定降落的雨量 R_N 值。二是選定一造雨評估地區，具有相似於目標區的地形，並受相似的降雨雲所籠罩，同時人工造雨的影響由目標區不會蔓延至估計區等條件。再採用在評估區內所測 R_M 值為目標區的 R_N 值。在選擇評估區時，最重要的決定因素是在分析評估區與目標區間過去降雨量資料的相關係數。其係數愈高，所決定的 R_N 值愈可靠，但愈要顧慮評估區受造雨區的種雲影響。此外國外研究者一再提倡，却少付諸實行的估計 R_N 值的方式，即是採用數值雲模式來模擬大自然降雨。

國內台電公司人工造雨研究所嘗以上述二類估計 R_N 值的方法，來評估地面人造雨。Hsu (1981) 指出估算後，造雨效率約為 15%~20%。此外空軍劉 (1978) 亦曾分析民國六十六年造雨成果，以松山和造雨區 (台北集水區) 雨量資料相配合，得出效益約為 25%。以上估算均是定點估算，

即是考慮 1 個或少數個雨量站的資料，而非考慮整個目標區的情形。計算結果可能不具代表性，也可能低估造雨效率。同時所採用資料的統計特徵，均未詳細討論。若能加以闡明，其可信度則相對增高，所代表含義亦能確實瞭解。

不過，在國外估算造雨效率 E_H 值，仍是最為具挑戰性的。往往費盡心力定點執行一個造雨作業，評估後結果却難為各界所接受。所以才有採用雲模式為評估工具的構想，可惜目前各類雲模式仍無法實際模擬降雨過程，也並未為各個造雨機構所採用。

七、結論

本文仔細介紹造雨需求，哲學，理論與方法，作業和評估等觀念，並指出國內未來之造雨需求，仍將屬於短期見效需求形態。若要進入長期規劃需求形態，除非確切判明水量需求情形與作到預報晚梅、空梅和少颱風雨情形。而石門水庫在晚梅或空梅期，將仍是造雨需求最可能時期。當然未來仍應作定量分析各水庫需水量資料，以證明或修正以上結論。

此外國外在天氣改造方面的發展，早已指出造雨評估技術是最為重要的。可信賴的評估結果，才足以增進參與人員之信心，確定造雨理論與技術之價值，並可用以修正造雨技術。而評估技術的發展，必須及早開始。先由估計目標區內整體降雨量起，然後收集各區資料，找出彼此之相關性，決定評估區等。

至於發展數值雲模式亦是國內目前能努力的方向，其功效應能發揮在模擬造雨程序，檢討造雨理論與方法，以及評估造雨成果。國外目前仍無造雨作業與數值雲模式相配合，而要突破天氣改造界目前的瓶頸，發展雲模式將是最為重要。

有關雲物理與動力的觀測問題，由於國內觀測飛機缺乏，無法立刻進行。目前應儘量採用可取得之觀測資料，尤其是雷達觀測資料，分析雲內情形，並用以決定造雨時機的判定程序。未來則當配合其他實驗計畫，譬如豪雨實驗計畫，獲取雲內物理資料。

而造雨理論與技術的發展，由於國外在此方面的發展較為深入，應可參考並配合國內雲物理觀測資料，先決定種雲物質，次依種雲飛機形式設計種雲器械，定量，控制形狀，大小與數量等。

由於未來國內造雨，將仍屬短期見效需求形態，即是需求乾旱期來臨後才決定是否需要造雨，且必須要立即獲得成果，所以過去的造雨作業程序之經驗，仍需詳細記錄保存，並一再反覆分析修正，以備下次造雨需求時，熟練地執行。

終結而言，目前國內在從事人造雨前，應先作到水量需求資料的分析，造雨評估技術的發展，以及數值雲模式的模擬。此些成果，均可立刻應用於未來短期見效造雨需求期的造雨工作計畫中。未來在雲物理觀測資料更為豐富下，才能逐漸修正造雨理論與方法，並設計更佳種雲器械。

致 謝

本文作者感謝空軍劉副聯隊長廣英提供各項建議、資料與討論機會，以及台大各位教授們的意見，還有台電公司盧禎先生的鼓勵，才得以完成本篇。

參考文獻

- 林則銘，梁瑞禎，1981：我國空中人工造雨的回顧與展望，氣象預報與分析第 86 期。
- 俞家忠，1981：民國六十九年夏季烏來坪林自來水集水區實施人工造雨成效之研究，氣象預報與分析第 86 期。
- 陳泰然，1981：天氣改造與人造雨，氣象預報與分析第 86 期。
- 劉廣英，1978：人造雨成效評估，人造雨研究所總結報告第八集。
- 劉廣英，張儀峯，1984：台灣北部冬夏季空中人造雨的分析比較，氣象預報與分析第 98 期。
- 劉廣英，1985，台灣地區人工造雨的先導研究，國科會防災報告 73～49 號。
- 羅季康，劉廣英，1981：暖雲降水的形成與改造，氣象預報與分析第 86 期。
- Hsu, Chin-Fei, 1981：Weather Modification activities in TAIWAN, 1951～1978, J. of Weather Modification.

The cloud Seeding Operating

ABSTRACT

In this paper, an idealized cloud seeding operation has been carefully divided into five different main organs. They are: the needs, the philosophy, the theory and method, the operational procedure and the evaluation. Judging from the past cloud seeding experience in Taiwan, the paper has pointed out that in the immediate future the demands for seeding in Taiwan will still belong to "short-term effectiveness" type. Unless the analysis of long-term water usage in each reservoir and the forecast of future rainfall have prompted for the needs of the "long-term planned" type of seeding control. The most possible seeding demanding area will probably be the upstream area of the Shih-Men Dam. Also, the paper has pointed out the need of establishing a useful seeding evaluation system in order to quantitatively evaluate the whole cloud seeding operation. Besides, the numerical simulation of cloud seeding process will be also helpful in evaluating the seeding idea and timing control, which is also the bottle-neck problem currently faced by the weather modification community all over the world. As to the cloud physics and dynamics observation, it would be wise to cooperate with many other research experiments to obtain such important data, so as to evaluate the seeding theory, method, material, device, ... etc.