

台灣北部冬夏季空中人造雨的分析比較

劉廣英

張儀峯

摘 要

我空軍於民國 40 年春首次實施空中人造雨開亞洲先河，其後於 41、43、66、67、69、71、72 及 73 年均曾派機執行是項任務，其中以民國 69 年 6 月至 9 月先後派機 109 架次執行長達 27 天最為突出。其間造雨時間有在冬季者、有在春季者，亦有在夏季者。有關的詳估結果顯示造雨效果約可使雨量增加 15 - 20 %。本文除對上述情形略作回顧外，將透過對冬夏季各種條件下可降水量的計算結果以及造雨任務中所觀測之大氣與雲狀特性，比較分析雨季中空中人造雨的效果，以為今後有關任務執行上的參考。

一、前 言

民國 40 至 41 年間本省北中部缺雨日月潭水位下降，影響電力甚鉅，空軍應台灣電力公司之請在日月潭集水區上空實施空中人造雨 22 次，當時使用的雨種為乾冰，碘化銀液及清水，其中有 8 次被認定有成效。此為我國亦為亞洲地區空中人造雨之始，有關經過台灣電力公司人造雨研究所（40 年 4 月 9 日成立）盧禎先生知之甚詳。在過去 33 年中空軍在這方向的貢獻實在不容忽視，而空軍氣象中心也因而獲得了不少榮譽，計當選國軍莒光連隊及全國好人好事（69 年國軍莒光連隊長羅季康；好人好事代表劉廣英）各 1 人次；空軍莒光連隊（67 年空軍莒光連隊長王時鼎；71 年空軍莒光連隊長劉

廣英）2 次；國軍愛民模範（71 年俞川心）1 次。

經檢查有關記錄可知在先後 9 年的造雨任務中，曾在三種不同的季節中實施，即冬季、春季與夏季。此種分配與本省氣候直接相關，而主要形成乾旱的原因則是颱風與梅雨失調，有關檢討可參閱吳與王（1981）、林與梁（1981）、劉（1981）等的分析報告。

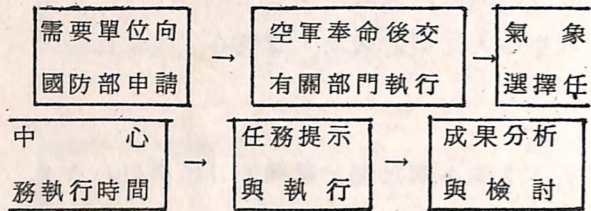
去（72）年全球氣候異常，本省梅雨末期少雨加上無颱風來臨，致入夏後石門水庫嚴重缺水，乃有協調空軍實施空中人造雨之議，而空軍亦循例籌備待機出動，惜天氣條件始終未能配合，致雖曾實施數次，效果均不彰。時序入冬報刊在報導石門水庫位屢續下降之餘，偶

有專訪發布，認冬季造雨較夏季有利（中國時報），本文之目的即在以科學方法探討上述認定之真偽，以免積非成是，造成損害。

本文採用之比較方式有二，一是計算冬夏季降水日大氣中的可降水量，以探討人工造雨可獲得的最大可能效果，在此步驟中並同時計算冬夏二季中無降水時的空氣含水量做為對比的參考。其次則根據造雨任務中所做的空中觀測記錄比較冬夏兩季中大氣與雲的垂直特性與分布，以探討何者對實施空中人造雨較為有利。

二、回顧與檢討

綜觀空軍歷年實施空軍人造雨記錄可知其作業流程如下：



同時，一般而言，歷次任務亦有相當程度的效果（曲，1978；林與梁，1981；俞，1981），顯示在適當自然條件配合下，為解除乾旱，空軍人造雨是可行的。經驗告訴我們低層（1000呎以下）高空風小（≤10 hts），自由對流面低（夏季≤9000呎）、700mb 溫度低（夏季≤12℃）均有利於人造雨。

空軍實施空中人造雨累計已有9年的經驗，由於空地勤人員的密切配合冒險犯難成效有目共睹，但檢討起來仍有甚多需要大家共同努力克服困難與必須改進的地方：

- (一) 任務編組均為臨時性者，致工作無法累積；不但作業時備極辛勞而有關問題的研究

亦無法進行。

- (二) 任務飛機均為臨時調派，同時亦無儀器可用，致除飛機上現有儀表所可指示之高度，溫度與可推算之風向風速外，均無法觀測，影響作業及研究。

- (三) 地面，尤其是雷達，觀測不能密切配合，影響成效評估。

- (四) 任務為臨時性的，但需要迫切，致無法先行規畫，設定限制區，以供比較分析。

- (五) 應有數值模擬或實驗，以確定使用兩種量的多少。

如果我們能解決以上的問題，相信空中造雨的績效更容易評估，而對有關科學上的研究亦必有更大的貢獻。

三、問題分析

雲為大氣中水份轉為降水的媒介，是以造雨的先決條件是要有雲，而後使用外加物引發雲系中的不穩定而形成或增加降水。根據統計熱力學可知水汽核化（nucleation）的臨界飽和率（critical saturation ratio = $e / e_s(\infty)$ ）約為4至5之間（Rogers, 1979），亦即水汽要達到4-5倍過飽和時才會產生單質凝結，此種情況在實際大氣中顯然甚難發生。實際上雲的形成是由水汽在溶水性凝結核上凝結而成的；在此種凝結過程中平衡飽和水汽壓（ e_r ）與平面純水之飽和水汽壓（ e_∞ ）的比可以下式（參閱陳，1981）表之，

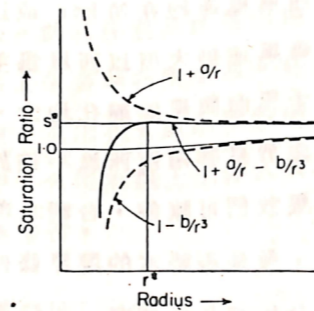
$$\frac{e_r}{e_\infty} \approx 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3} \dots \dots \dots (1)$$

式中

$$a \approx 3.3 \times 10^{-5} / T ; T \text{ 為絕對溫度 } (^\circ\text{K})$$

$b \approx 4.3 \text{ iM} / \text{m}$ ；M，m 分別為溶水性凝結核的質量與克分子量。

式(1)的圖示（如圖一）稱為 Köhler 曲線。此曲線的最大特徵為當小水滴很小時需要較大的過飽和，但成長到臨界半徑（ r^* ）後所需過飽和程度反略降低，顯示小水滴半徑超過臨界值後只要環境不變即可成長。



圖一 Equilibrium saturation ratio as a function of size of solution droplet.

觀測結果告訴我們並非有雲就有雨，此乃由於雲滴半徑約為10 μm 即每立方公分中雲滴的個數約100之譜，此時個體成長緩慢整體極端穩定，即個別雲滴成長與合併的趨勢均甚微，致許多雲均於生成後又自行消失而不能產生降水，亦即由雲至雨滴需其他作用來輔助才行，有關自然成雨的過程不是本文所要討論的，讀者可參閱有關文獻（如Mason, 1971）。就人造雨而言，促使雲中的水降下來不外採取兩種方法，一是促使雲中產生較大水滴（每立方公尺約200個）引發由碰撞合併而成長的過程；一是投入乾冰碎粒或碘化銀微粒（經燃燒放出）引發由冰晶作用而成長的過程。使雲中有較大水滴的方式亦有二即直接投入或利用食鹽在雲中造成。根據世界氣象組織的報告（WMO，

1978；參閱陳，1981）國外實施人造雨亦多以上述方法為依據，而在國內亦復如此，可說其來有自不是無地放矢，問題在於效果究竟如何？

筆者認為人造雨的效果應由兩方面來看，一是透過自然降水與人造雨後改變量的分析比較，決定其效果，這可由比較造雨區與控制區降水獲得（WMO，1978）；一是由分析空氣中的可降水量，而後估計最大可降水量，並由而分析人造雨實際上能解決乾旱問題的程度，做為成效的參考。如果以科學為第一着眼點，第一種也就是傳統的效果評估是絕對重要的。如果就解除乾旱為著眼，則第二種效果評估就不能忽視，而本文所欲探討的也正是這一點。

四、台灣北部冬夏季大氣中的可降水量等因子與降水之關係

空氣柱中的可降水量等於該空氣柱中單位面上所含水份的總質量，即（Haltiner & Martin, 1972）

$$P_w = \int_{z_0}^{z_t} \rho_w \delta z \approx - \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_t} W \delta p \approx \frac{1}{g} \sum_i \bar{W}_i \delta P_i \dots \dots \dots (2)$$

式中 \bar{W}_i 為 δP_i 大氣層內的平均混合比。

將大氣分為若干層，利用探空資料，透過公式(2)即可求得當時大氣中的可降水量。本文中我們將大氣分為1000-850mb, 850-700mb, 700-550mb 及 550mb 以上等四層來計算 P_w 。

計算日期的選定條件為

- (一) 無颱風影響。
- (二) 冬季連續數日有雨雨量在 30mm 以上或 10 mm

以下(兩組)

- (a) 冬季僅當日有雨(或個案前一日未下雨)。
- (b) 冬季無雨(數日或當日無雨各一組)。
- (c) 夏季連續兩天以上或僅當日有雨(兩組)。
- (d) 夏季無雨(數日或僅當日無雨各一組)。

根據以上條件共選出 9 組計 36 天,當時桃園站的各項地面觀測及探空分析資料,日雨量以及可降水量歸納如表 1 所示。由表可見

(一) 冬夏季可降水量差異甚大;有雨日夏季可降水量為冬季可降水量的 2.24 倍,無雨日則為 2.15 倍。夏季無雨日的可降水量較冬季有雨日的可降水量尚高 1.69 倍。

(二) 冬季大氣中可降水量等於 2.2 cm 可為降水與否的分界;在選定的降水日中 90% 以上其大氣具有 2.2 cm 或以上的可降水量,而無降水的日子中只有 17% 其大氣的可降水量達到此臨界值。

(三) 夏季大氣中可降水量等於 4.8 cm 可為降水與否的分界;所有有雨的日子其大氣中的可降水量均達此標準,而可降水量達此標準而未降水的只有 8%。

(四) 若訂溫度露點差 ≤ 6 °C 為濕度層頂的高度,則 600mb 與 400mb 可為冬夏季降水與否的條件;高度在臨界值以上有雨,反之則無。冬季有雨與無雨日之濕度層平均溫度露點差為 2.5 °C 與 4.5 °C;夏季者分別為 3.0 °C 及 5.5 °C。

(五) 自由對流面高度在冬季無參考價值;在夏季下雨的日子該面約在 800mb 以下,無雨的日子則多在 800mb 以上。

(六) 冬季有雨的日子若有逆溫層存在多(78%) 在 630mb 以上,無雨的日子則多(75%)

在 660mb 以下。在夏季有雨的日子多(63%) 無逆溫層;無雨的日子多(75%) 有逆溫層,高度約在 500mb 以下。

(七) 冬季低層西南強風為降水的重要指標。連續且日日雨量達 30 mm 以上的日子,700 mb 均為西南風且風速均在 30 kts 以上;連續但日雨量不足 10 mm 的日子 700mb 風為西南西風風速約在 20 kts 或以上;僅當日有雨者風速仍大但以西風為主。至於無雨的日子風向與風速變化均大,尤以風速為甚。至於夏季南南西風不適於降水。由以上結果我們可瞭解,台灣北部冬夏季大氣秉性不同,致是否降水的臨界條件也就不同。如果吾人分析較多的個案,相信對降水的短時預報會有很大的幫助,而對何時實施空中人造雨以增加降水量的選擇亦會有甚大的益處。

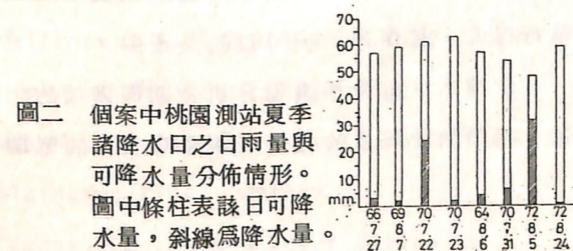
五、民國 73 年 2 月 17、18 日造雨任務分析

去(72)年本省雨量甚不平均致有不同的災害發生(劉等,1984)石門水庫嚴重缺水乃其中之一。空軍方面曾應水庫當局及省主席李登輝博士函請多次派機執行空中人造雨任務,雖因天氣條件不佳,水庫容量龐大,未能發揮足夠的效果,但就如同 69 年一般(時李主席正擔任台北市長,曾親訪我空軍氣象中心,並親赴松山基地參觀人造雨作業,慰問並頒獎工作人員),各參與任務人員均全力以赴,頗為辛勞。此次任務中最近的一梯次是在本(73)年 2 月 17 - 18 日舉行的,表 2 歸納了自 16 日至 18 日共三天的大氣要素,其內容與表 1 同。由表可見各要素中三天都滿足降水條件的只有可降

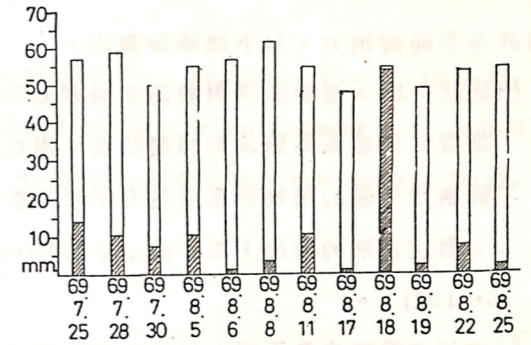
水量(均在 2.2 cm 以上)一項,其他條件以 17 日最佳。我們有興趣的是 17 日前後即 16 與 18 日的比較,亦即造雨日與不造雨日的比較。一般來說 16 與 18 日的大氣結構條件相似,唯 16 日的可降水量為 3.9 cm 較 18 日的 2.5 cm 為大,但區內 16 日無降水而 18 日却有 3.4 mm 的平均雨量。其次,17 日與 18 日比較,山區(造雨區)雨量亦普遍增加,凡此似均顯示該次造雨任務是成功的。該次任務共派運飛機三架,17 日下午與 18 日上午各執行兩架次。任務中乾冰是在雲頂施放,水則在安全高度噴灑。主要作業區均在山中,致所有機上工作人員(含氣象軍官)均備極辛苦。

六、造雨可能效益的檢討(台北市自來水與石門集水區的對比分析)

本文作者之一曾以氣候值與降水天氣型相配合,評估空軍所實施的空中人造雨效益(劉,1978),結果顯示造雨可能增加 15 - 20% 的雨量。附圖二為表一中桃園測站夏季諸降水日之日雨量與可降水量分布圖,圖三則為 69 年 7 月 25 日至 8 月 25 日台北集水區造雨期間各降水日(以台北市集水區測站為準)的雨量與可降水量分佈情形,由二圖中平降水量與平均可降水量之比值,分別為 0.16 與 0.35,後者為前者的兩倍有餘,以及有關本(73)年 2 月造雨任務分析結果可見上述效益評估頗可信賴。



圖二 個案中桃園測站夏季諸降水日之日雨量與可降水量分佈情形。圖中條柱表該日可降水量,斜線為降水量。



圖三 69 年 7 月 25 日至 8 月 25 日台北集水區造雨期間各降水日之日雨量與可降水量分佈情形。

如前文所述,造雨的效益有科學上的,比較容易獲得;有實質上的,需視目標而定。就以空軍 69 年為台北市自來水事業處執行空中造雨,與 72 - 73 年為石門水庫執行造雨任務而言,有效與否就有很大的差異,以下就以台北自來水與石門集水區分析之。

台北自來水靠直潭壩與青潭堰蓄水供應,其集水區面積約為 700 平方公里,如集水區平均降水 10mm,則全部集水量即為 7 × 10⁶ 立方公尺,而台北市自來水最低消耗量約僅 10⁶ 立方公尺,是以只要能多 10mm 的降水即立桿見影獲得人人稱賀的效益。至於石門水庫,其集水區約為 760 平方公里,是以如果集水區的平均降水量也是 10mm,全部集水量即達 7.6 × 10⁶ 立方公尺,較台北集水區的集水量略大,但對於總蓄水量達 250 × 10⁶ 立方公尺之石門水庫而言,即使全都集水都流進去,仍是微不足道,解決不了缺水的問題,我們所能感受到的造雨效果就可想而知了。

七、冬夏季空中造雨的比較

冬夏季大氣結構不同,空中人造雨也就

有許多不同的地方，以下謹略分析之。

(一)雲狀不同。夏季造雨對象為直展雲冬季除把握鋒前雲系外對象均為層狀雲。兩種雲對執行任務的飛機而言自是有不同的影響，而在造雨的做法上亦不同(參閱Mason, 1971)。

(二)大氣的可降水量不同。以本文所分析結果顯示，台灣北部冬夏季大氣可降水量約為1與2之比，準此，冬季實施造雨後期望的最大可能降水量要比夏季造雨後的小很多。

(三)降水形態不同。夏季積雲以陣(雷)雨為主，而冬季層狀雲則以連續性小雨為主。按降水的碰撞結合過程所示，前者的降水效率應較後者為大。以雷雨而論，約有30%的可降水量會降到地面(Haltiner & Martin, 1972)，層狀雲降水效率應較此為小，是以造雨效果亦應較小。

(四)大氣穩定度不同。除鋒前對流雲外，冬季大氣一般較夏季穩定，而降水強度(R)與持續時間主要受制於雲低溫度，雲的厚度與上升速度(見式(3))，因冬季降水強度一般較小，而造雨的效果亦應較小。

$$R_i = -\frac{0.622}{RT} \left(\frac{de}{dz} + \frac{eg}{RT} \right) W \Delta Z$$

$$R = \sum_i R_i \dots\dots\dots(3)$$

式中符號均為慣用者。

(五)地形作用因冬夏盛行風不同而異，對降水以及造雨效果均有影響。

由以上分析比較可知，冬夏兩季實施空中人造雨以夏季者效益較大。如果說我們可以確

定空中人造雨可增加15 - 20%的雨量，由於冬季本身的自然降水就比夏季少，造雨而增加的量也一定少。申請與執行空中人造雨的單位或人士應有此認識。

八、結語與建議

我國已漸步入開發國家之林，由於乾旱不但直接影響農業生產，對於國計民生的影響更大，是以如何防範與克服有旱作策劃的必要。在國際上如WMO等組織或個別政府(陳, 1981; 劉, 1981)對人造雨已有規劃完整的方案在進行，較之我國空軍多年來的辛苦工作自是好了很多，我國大氣科學界實有多做支援的必要。

根據本文的分析，人造雨期間降水量與可降水量之比值(0.36)較不造雨時之比值(0.16)為高，也高過一般估計的降水效率0.30，所以可以看出人造雨對增加降水實有肯定之效果。然而造雨降水之實際效益應視空氣之含水量而定，由文中個案統計知，台灣北部夏季大氣中的可降水量約為冬季者的兩倍以上，加以自然降水條件的差異，使得冬季人造雨可能獲得的效益會較夏季小。同時，由於地區與乾旱問題的大小異，也會使實際的相同的效益在感覺上發生很大的差異，對此無論申請支援者或執行造雨任務者均應有所體認。

無論就本文有限的資料或過去分析的結果(劉, 1978)來看，空中人造雨只要時機及執行得當，其作用至少可以說是正的。

依據本文的分析過程分析長期而連續的記錄，相信對於降水的短時預報會有很大的幫助

六致謝

本文撰寫中承莊玉瑜同學整理資料，同仁等大力支援，在此謹致謝意。

參考資料

曲克恭, 1978 : 空軍實驗人造雨報告。台灣地區災變天氣研討會論文彙編。氣象預報與分析86期轉載。

林則銘、梁瑞禎, 1981: 我國空中人造雨之回顧與展望。氣象預報與分析, 86期, 空軍氣象中心。

吳宗堯、王時鼎, 1981 : 民國69(1980)年台灣乾旱研討。大氣科學第八期。

俞家忠, 1981: 民國69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, 86期。

陳泰然, 1981: 天氣改造與人造雨。同上。

劉廣英, 1981: 暖雲降水的形成與改造。同上。

劉廣英, 1981: 民國69年夏季我國降水分布及環流特徵。氣象預報與分析, 89期

劉廣英、張儀峯、葉文欽、李隸萍、李紀恩, 1984: 民國72年台灣地區重要天氣概述。大氣科學十一期。

劉廣英, 1978: 人造雨成效評估, 人造雨研究所總結報告第八集。

Haltiner, G. J., & F. L. Martin, 1972: Dynamical and Physical Meteorology.

Mason, B. J., 1971: The Physics of Clouds. Clarendon Press. Oxford.

Rogers, R. R., 1979: A Short course in

cloud physics. Pergamon Press, Oxford. WMO, 1978: PEP design document. Precipitation Enhancement Project Report No.9.

表一：各個案時間地面觀測探空分析資料及可降水量一覽表

Table with columns for case number, time, wind speed/direction, temperature, LFC, precipitation, and remarks. It contains detailed meteorological data for various cases.

表二：73年2月17~18石門水庫造雨任務桃園站地面觀測探空分析資料以及可降水量一覽表。表中並附石門集水區造雨期間雨量。

Table with columns for case number, time, wind speed/direction, temperature, LFC, precipitation, and remarks. It includes data for specific cases and a summary of rainfall in the Shimen watershed.

On the Winter and Summer Time Cloud Seeding
over Northern Taiwan

Koung-Ying Liu I-Fong Chang

Abstract

During the period from Spring, 1951 to Feb. 1984, the Chinese Air Force carried out many times of cloud seeding mission. Among them those fulfilled in 1970, from June through September, are very outstanding. In this paper, after a brief review of the missions, a comparative study on winter and summer time cloud seeding operations is presented. Our result indicates that cloud seeding in winter can not be as successful as in summer. The main reasons for this result is as follow: (1) precipitable water content in the atmosphere above the considered region in winter is less than $\frac{1}{2}$ of that in summer; (2) all other factors, which affecting precipitation amount in summer are also better than that in winter.