

印尼人工增雨近況

2020年初，於印尼蘇拉威西島的拉羅娜盆地(Larona Basin)區域，針對地形雲(orographic clouds)進行了地面焰劑燃放(ground-based generator, GBG)為手段的增雨操作。相關資料發表於 Atmosphere 期刊(Renggono et al. 2022)，服務團閱讀後綜整有關於操作方法與成效評估資訊如下，提供水利署參考。

(1)操作設計與方法

- 地面種雲，於海拔 500 公尺左右的迎風面坡地，共建置 5 座高 50 公尺的金屬網架(圖 1)，以滑輪升降焰劑籃(flare basket)，一次可裝 8 支、每支 1kg，每次作業燒 2 支，4 天需人工補充焰劑一次，操作時透過短訊(short message service, SMS)遙控擊發，通信、遙控所需電力由太陽能電池提供。

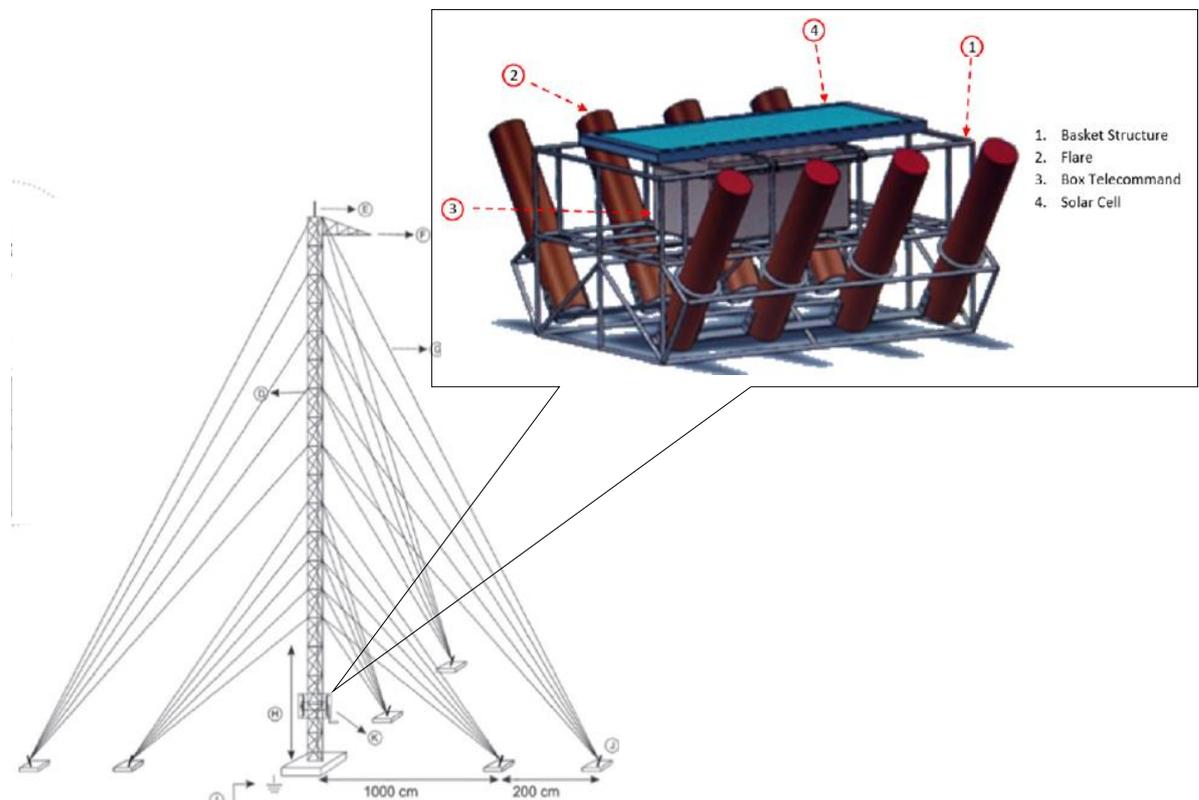


圖 1 印尼蘇拉威西島拉羅納盆地地面種雲架與焰劑籃。

- 使用的吸濕性焰劑，成分主要為 NaCl，次要為 KClO₃ 以及其他助燃劑，包括 Mg；粒徑主要集中於 0.3、0.5 及 1 μm ，並沒有 2.5、5 及 10 μm 。
- 操作使用印尼國營企業(PT Pindad)自製之焰劑，型號為 Cloud Seeding Agent Tube 1000(CoSAT-100)。
- 中午過後，湖面向坡地局部環流建立，並於迎風面舉升凝結，在接近雲底高度處點燃焰劑，加速形成降雨。操作環境與時機之概念如下圖：

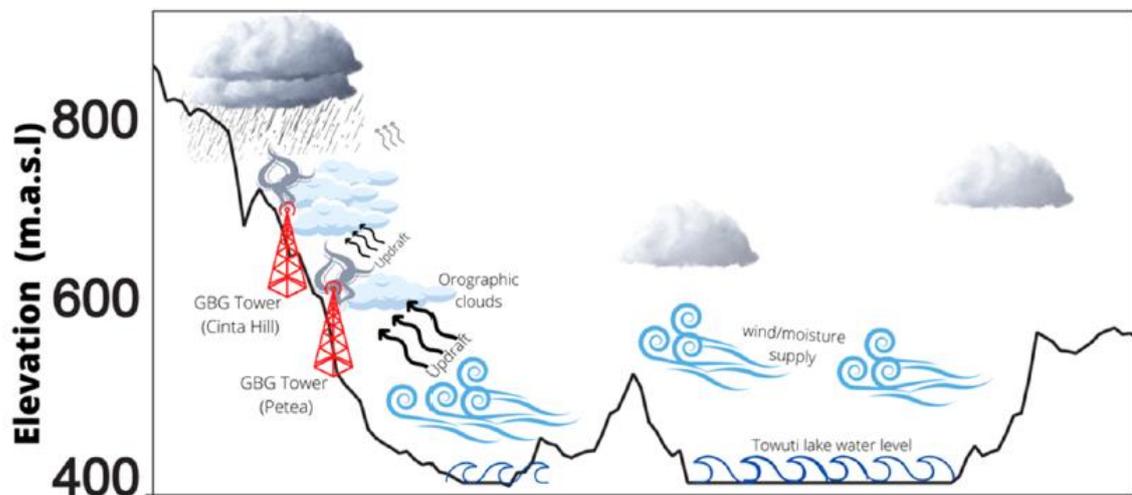


圖 2 印尼蘇拉威西島拉羅納盆地吸濕性地面種雲示意。

- 依每日天氣型態，決定當日作業的網架位置，並記錄盆地內的湖水水位高度、各雨量站雨量及湖區空間雨量。

(2)操作結果

- 在拉羅納盆地 GBG 運行的 120 天(2019 年 12 月 31 日至 2020 年 4 月 28 日)期間，每日分析盆地內時空平均降雨量。日平均(圖 3 上)降雨量是從盆地內的 10 個雨量站獲得的(各站每日降雨量相加再除以地點數量)值變化很大，月雨量(圖 3 下)較氣候值高(1~3 月為 79~17%)或差不多(4 月略少 4%)。

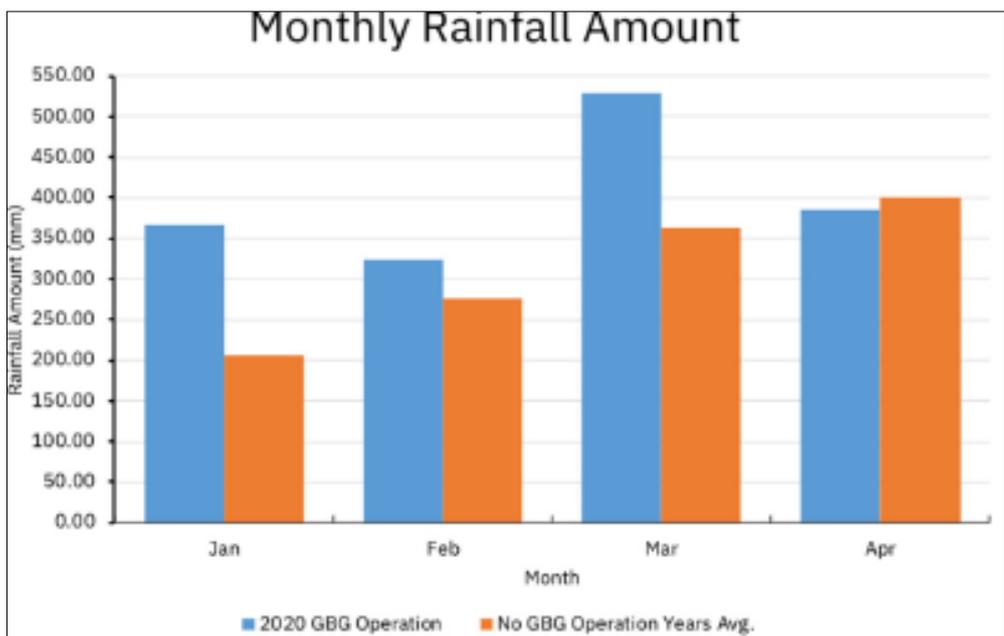
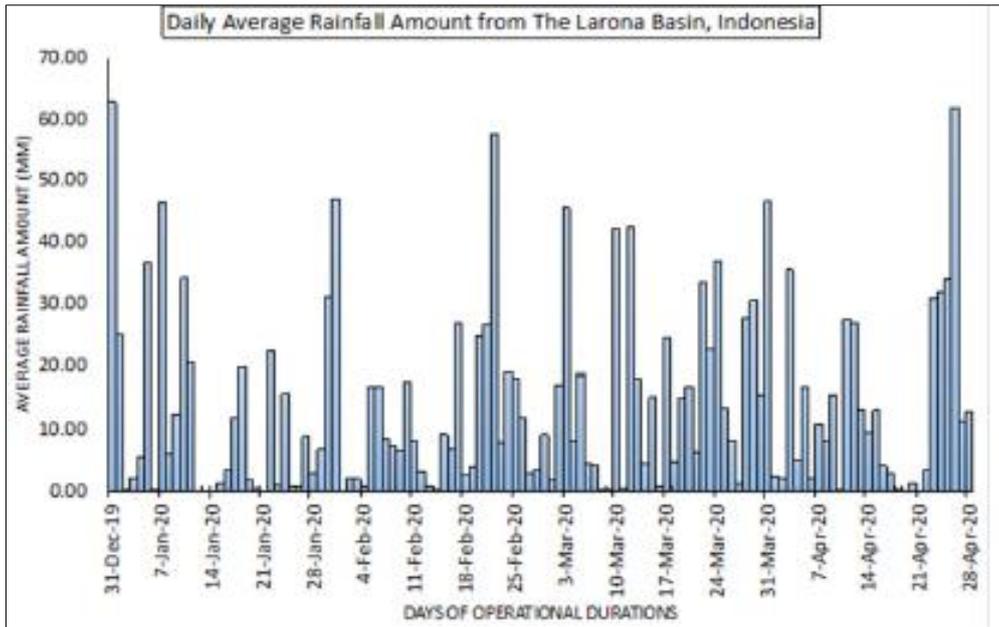


圖 3 盆地區域(上)日、(下)月均雨量。

- 每日記錄盆地內兩個湖泊的水位、流入量及流出量。其中 Towuti 湖於 1~4 月間的水位增加量，在 GBG 後與歷史均值之間的差別(圖 4)，可觀察出前者增加量(黃線)比後者(黑線)多。顯示在 GBG 之前，湖水水位(藍色)與歷史水位(灰色)有差距(如 1 月，湖水水位和歷史水位均值有明顯差距)，但經過幾個月的 GBG 操作之後，湖水水位很快接近歷史平均

值(如 5 月，湖水水位和歷史水位均值差距微小)，紅色線是各月份湖水水位和歷史均值的差距，呈現在 1~5 月逐漸減小之趨勢，而黃色線是各月份與 1 月的湖水水位差距，在 2~5 月期間呈現的迅速拉大的特徵。

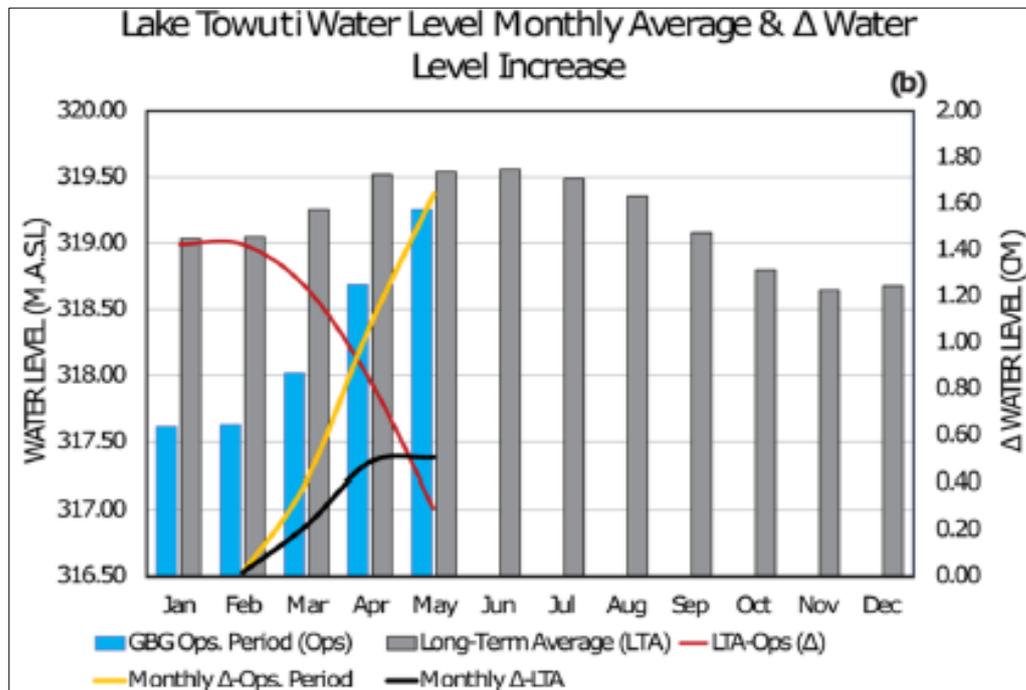


圖 4 GBG 期間 Towuti 湖月均水位變化趨勢。

(3)建議與結論

- GBG 開始以後，在 2020 年 2 月下旬至 4 月下旬期間，流入量與降雨量的增加同時發生，比起未進行增雨的歷史平均水位，水位上升的幅度更明顯。
- 從增加的比例來看，GBG 期的月降雨量，相比 1 月、2 月和 3 月氣候值，分別增加了 79%、17%和 46%，但 1 至 3 月水位增加卻低於 0.5%，顯示水位變化也可能只是時間序列上的自然狀況而已。
- GBG 期間一併調查湖水的物理與化學特徵，並與 WHO 與印尼政府的飲用水標準相比較，結論是，GBG 運作對湖水的電導率、Li、Al、Cl、K、Na 和 Mg 含量的物理影響非常低或微不足道，就 pH 值而言，GBG 作業有微小影響。

以色列人工增雨近況

以色列北部進行冷雲種雲已有數十年歷史，但最近一期(Israel 4)的種雲實驗並未顯示降雨量顯著增加，與上世紀所進行的一系列種雲實驗(Israel 1~Israel 3)結果不同。相關資料發表於 Journal of Applied Meteorology and Climatology (Benjamini et al 2023)，服務團閱讀後綜整有關資訊如下，提供水利署參考。

(1)冷雲種雲近期發展

- 雲微物理研究(雷達、機載儀器及模擬)一致認為，以冰晶雲微物理(glaciogenic seeding)效應為種雲手段(以色列採用的種雲方式)時，在自然降水效率較低時，會出現最高的種雲效率。故 Israel 4 期間的空中與地面作業，都是燃燒 AgI 溶液(濃度為 4.5%)。
- 儘管在山區種雲的潛力有科學依據，但大多數實驗未能證明有效(WMO, 2010 年)。例如，懷俄明州為期 6 年的人工影響天氣計畫(Breed et al 2014)，雖然得到種雲具有微小正面影響的結果，但遠不足以推翻「種雲沒有影響」的虛無假設(Rasmussen et al 2018)。澳洲的增雪計畫結果類似(Manton and Warren 2011)。
- 20 世紀 60~70 年代起，以色列進行過一系列實驗，結論是種雲在以色列北部有效，並成為 21 世紀繼續進行操作的基礎。然而在這麼長的操作期裡，大氣環境改變以及空汙加重導致氣溶膠濃度增加，種雲效果在統計上似乎愈來愈不明顯，同時為了和海水淡化比較效益，需要進行新的種雲實驗來求證，於是設計了 Israel 4。

(2)以色列種雲概要回顧

- 最早的 Israel 1 實驗是 1961 年 2 月~1967 年 4 月，總計 364 個實驗日的分析結果，降雨增強 15%，統計檢定拒絕了種雲無效的假設，p 值為 0.009。

- Israel 2 實驗在 1969~75 年間進行 388 天。分析種雲後降雨量增加 13%(p 值為 0.028)。詳細分析呈現，雲頂溫度在 $-20^{\circ}\sim-15^{\circ}\text{C}$ 之間時，種雲成效尤其明顯。
- 儘管 Israel 1 和 Israel 2 的結論與科學認知一致，即種雲最有可能對地形雲產生正面影響，但 1975~95 的 Israel 3 實驗結果，並未顯示出種雲有效。
- 2007~2012 年有兩項研究結果，為統計種雲實驗提供更好的科學支持。其一是，目標區域雲中的銀集中程度具有統計顯著性(與灰塵指標鋁相比)，這支持了目標區域雲中存在種雲成份(碘化銀)的假設；其二是，從混合相雲中收集雨水時，可以看到最大的銀集中度，這與碘化銀在降水形成過程中的作用的科學認識一致。

(3) Israel 4 實驗目的與方法

- 從業務需求角度看待種雲成效：在能讓冰晶雲微物理過程發揮最佳效益的情境下，評估碘化銀種雲對特定區域(以國北部 Kinneret 湖盆地)降雨量的影響。
- 虛無假設是種雲對主要目標區域的降雨量沒有正面影響，透過單邊假設檢驗進行評估，並以 0.05 作為宣佈種雲影響達到統計顯著性的門檻值。
- 天氣條件合適時，依照隨機種雲判斷結果，啟動空中與地面(16 站)種雲，都是燃燒碘化銀。規劃 2013 年起的冬季(11~4 月)進行種雲實驗(其他季節不降雨)，預計進行 8 年可以累積 300 次施作個案。
- 所謂氣象條件合適，包括模式預期雲頂溫度夠冷(低於 -8°C ，AgI 才能活躍)、有日累積降雨量(2 mm 以上，降雨太少被視為不符效益，排除於 SOP 之外)、風向支持碘化銀傳送到目標區、碘化銀藉地形舉升到雲中(1000 公尺)等等。

- 分析對象採用的是 Double Ratio： $DR = \frac{R_s/R_u}{C_s/C_u}$ ，當 $DR > 1$ 表示種雲有正面影響。其中 $R_s(R_u)$ 是種雲(非種雲)平均雨量，分母是控制比，有助於抵消降雨資料中固有的一些較大變化，從而提供更精確地估計種雲效果。

(4) Israel 4 實驗結果與建議

DR 為 1.018，標準誤差(SE)為 0.07；也就是說，種雲造成的降雨量估計增加了 1.8%。單邊顯著性檢定的 p 值為 0.40。因此，Israel 4 實驗沒有提供證據來支持拒絕原假設，即種雲對主要目標區域的降雨沒有正面影響。圖 1 為觀測日雨量與 COSMO 模式預報日雨量的散布圖，其中實(空)心圓為種雲日(非種雲日)，種雲日的相關係數為 0.85。

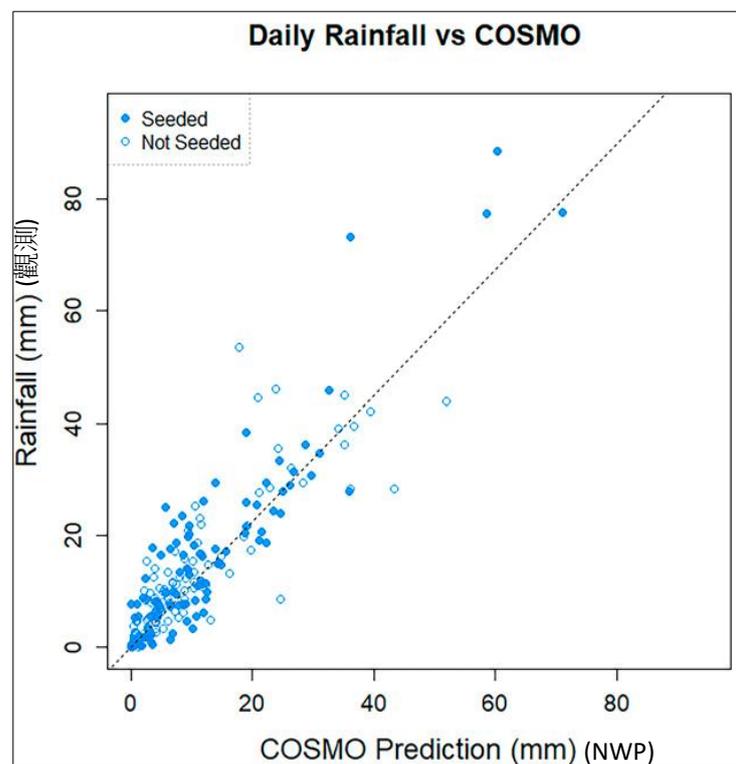


圖 1 隨機實驗日之觀測(縱軸)與 COSMO 模式預報雨量散布。種雲(非種雲)為實(空)心圓；虛線為種雲日之迴歸線。

- 從冰晶的雲微物理角度而言，在自然降水效率較低的冷雲環境中，實施碘化銀種雲，催化雲層的效果較明顯。但在此規則下，Israel 4 的施作個案，都是降雨量相對較弱的情境，使得施作的實質效益(雨量增量)不彰。

- 以色列水務局基於作業成本與額外降雨價值的權衡，暫停種雲操作，但並不意味著在某些氣象條件下，人工降雨不能增加以色列或其他地方的降雨量。