

## WMO專家組回顧「2010年以後人工增雨領域的研究進展」

因應氣候變遷，可靠的水資源日漸珍貴，許多國家均正計畫或持續進行人工增雨，世界氣象組織的人工增雨專家小組(Flossmann et al., 2019)認為，有必要回顧近年(上一次回顧報告於2010進行)研究成果，為增雨研究或施作奠立堅實的科學基礎。

### (1)理論與作業現況

- 近期在數值模式、分析與觀測能力的進展，對於作為雲凝結核或冰核的環境氣膠，如何影響水象粒子粒徑分布與後續的降雨機制鏈，以及個別雲過程以及雲間交互作用，都已有相當程度的理解。故任何增加地面降雨的作為，都必須建立於細緻的科學理解之上，以精確地進行增加或取代自然氣膠粒子的程序。
- 目前國際間最常作為人工增雨施作對象的雲層類型為(1)冬季地形雲與(2)對流雲。前者使用冰核粒子激發降雪以增加雪覆蓋量，後者採吸濕性或/與冰核粒子，以激發液相或混合相降雨過程。

### (2)雲系的自然特性與其多變性

#### (a)雲凝結核(cloud condensation nuclei, CCN)的雲微物理

- 柯勒理論(Köhler theory)指出，雲滴核化與氣膠粒徑分布、氣膠化學成分、上升氣流速度及過飽和情況等四項環境因素有關。氣膠粒徑大小從數奈米(nanometer,  $10^{-9}\text{m}$ )到數十微米(micrometer,  $10^{-6}\text{m}$ )不等，其作用是為雲的形成，提供了液體凝結或固體沉澱的表面。多數種雲操作的基礎，都是添加特定的氣溶膠顆粒，並與天然顆粒競爭水蒸氣，達到活化(成長)之目的。
- 少量的CCN若是在粒徑大小差異顯著的情況下核化，則透過碰撞-合併(collision-coalescence)過程成長為大雨滴會很有效率；反之在汙染環境下，通常是許多小粒徑CCN被活化，繼續碰撞-合併為大雨滴效率低。

#### (b)冰核粒子(ice nucleating particles, INP)的雲微物理

- 雖然冰核數量濃度正比於(1)氣溫下降與(2)過飽和程度增加，但冰晶核化過程機制並不清楚，所以目前還無法根據氣膠數量濃度與化學成分，就預測出冰核粒子(INP)的數量濃度。不過，一旦冰核形成，環境中液態水的蒸發與擴散，向冰晶沉積、即所謂的淞化(riming)而使冰晶迅速成長。因此，增加人工冰核(AgI)數量或降環境氣溫(乾冰)是可行方法。

#### (c)與增雨有關的雲動力

- 伴隨冬季地形雲的雲層，只要隱藏在含的對流不是太強，降雨的時、空間分布通常較好估計。
- 適當增加CCN與INP的濃度可加強對流雲內的潛熱釋放，而對流雲會因潛熱釋放而增強，故適合進行吸濕性種雲的對流雲，發展初期須具有液態雲過程以及深厚的暖雲層(即雲底至結冰高度之間厚度較深厚)。不過對流雲發展還牽涉逸入、垂直風切，邊界層動力、地表通量等，這都使對流降雨量難估計。

### (3)增雨潛力

#### (a)冬季地形雲

- 冰核種雲，藉由人工INP(ice nucleation particle，通常是AgI)加入迎風面氣流上升所形成的SLW(supercooled liquid water)區域，激發冰粒子形成，冰粒子再繼續沉澱與彼此碰撞而成長，最後於山區降水。在Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)期間的種雲/非種雲空中觀測比對，可證實效果存在，且 $Fr(=U*N^{-1}*H^{-1})$ 愈大(穩定度愈小)，種雲的影響增加(圖1)。
- 機載flare(焰劑)燃放、飛機投射flare再燃放，或陸基投射至雲中燃放，都是目前被使用的機制。對地面投射機制而言，確保能投射INP至合適的高度是最大困難，所以直接在雲中種雲比陸基投射有效。

#### (b)對流雲

- 吸濕性種雲，通常是藉由，在對流雲底增加大( $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ )CCN粒子來活化合併過程；若對流較淺，則人工增加的大CCN也會增加雲滴碰撞機會

(圖2)。

- 較深厚的對流雲內也會同時存在冰相或混合相的雲過程，也可同時進行冰核種雲，額外INP活化冰晶成為大冰粒子後降落至地面，加入乾冰使雲內降溫，SLW得以凍結(圖3)。

#### (4)由調查研究推進到集水區尺度實作

##### (a)可能面臨情境

- 實驗及模擬都顯示，種雲的確對雲系統的降雨發展有幫助，但能夠證明這種效果在時空間可被有展延更久、更寬(例如長期對一個面積至少1000 km<sup>2</sup>的集水區施作仍然有效果)，才有經濟上的效益。但這種升尺度問題容易回答嗎?實驗設計的時空間尺度，必須從探索型向上升至考慮到多重尺度交互作用。
- 隨著對雲微物理基礎的理解漸增，增雨的實驗設計一直改變，並不利於結果的統計分析。
- 種雲的平均效益有限(<20%)，而自然降雨變動顯著，導致種雲增量與自然降雨之間比值始終很小。
- 部分研究建議，除非能找出更有效率的雲中投射機制，否則在單一風暴尺度所看到的種雲效果，並不容易等比例地長期在集水區尺度中得到。

##### (b)隨機種雲

- 避免操作者意識到正在進行實驗，需進行隨機種雲；又為了客觀性，隨機進行的種雲/非種雲是件數比例應為1。
- 通常也會指定一個自然降雨與目標集水區高相關的控制區，用來預測自然情況下的目標集水區降雨量，但此控制區在種雲期間的降雨並不受種雲物質影響。
- 單一或交叉的控制/目標區設計都可，但若綜觀天氣系統會隨季節變動，交叉式設計才合理。

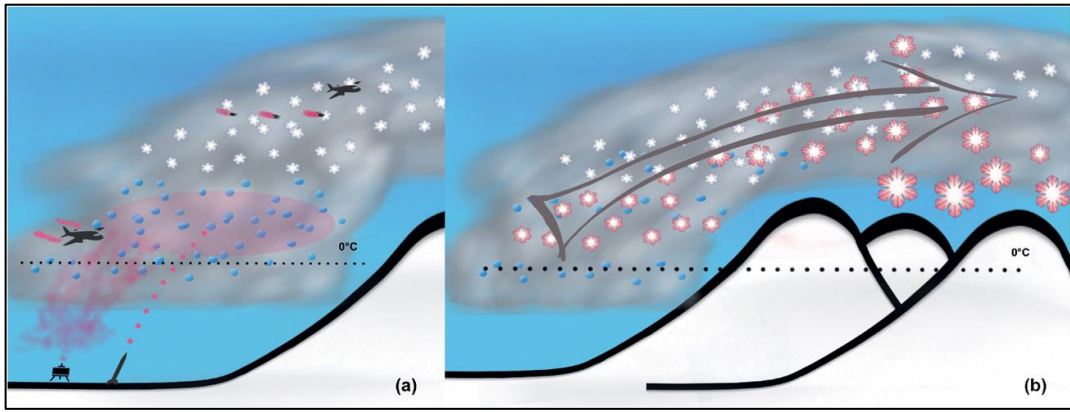


圖1 (a)機載燃放、空中投射後燃放或陸基投射等方式，將額外INP投入SLW(紅色陰影區)之位置，以增加冰粒子(白色)；(b)冰粒子透過環境水蒸氣的沉澱(淞化)或碰撞成長(紅色)後降至地面。

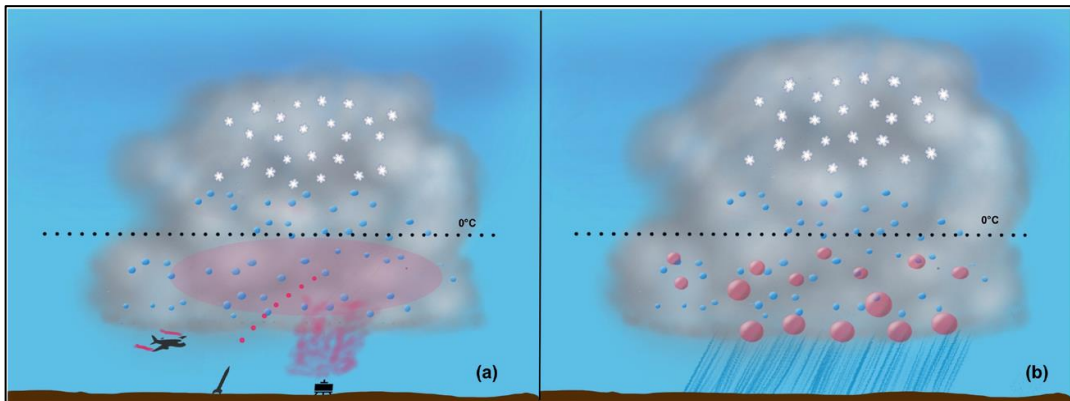


圖2 (a)雲底機載燃放或陸基投射等方式，將額外大CCN投入雲下部(紅色陰影區)，以活化雲滴碰撞與合併。(b)CCN競爭結果，低層雲內形成較大雨滴(紅色)降至地面。

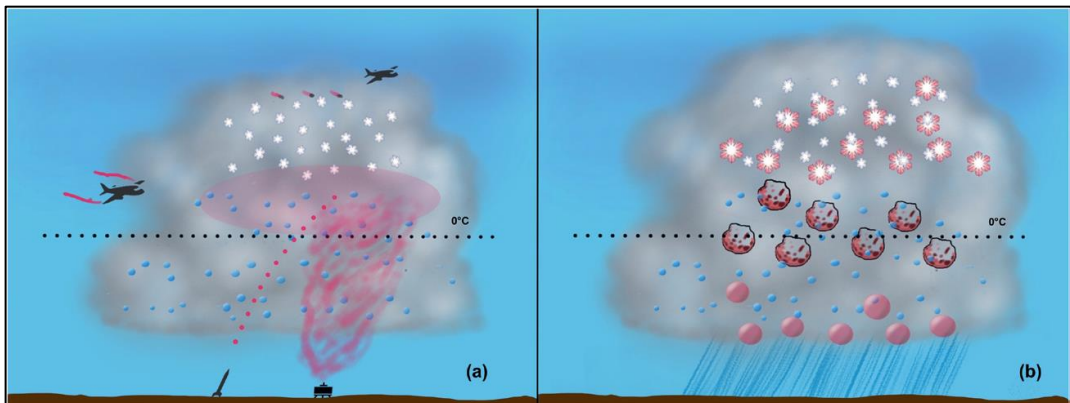


圖3 (a)機載燃放、空中投射後燃放或陸基投射等方式，將額外INP投入SLW(紅色陰影區)之位置，以增加冰粒子(白色)。(b)冰粒子透過環境水蒸氣的沉澱(淞化)或碰撞成長(紅灰色)後掉落至雲雲層融解(紅色)再降至地面。