

渦動對積雲形成之影響

徐士哲 王業鈞

中山科學研究院

海軍軍官學校

摘要

本文採用一半一次元、有時序、無降水、有一氣源的積雲模式，分為六組實驗，前三組實驗目的在研究大氣中原有渦動對積雲的影響，後三組實驗則在於研究雲中運動所引起的渦動對積雲的影響。其中氣源強度的變化係分別以氣源的垂直上升速度、相對濕度及溫度超值表示，考慮在不同的渦動強度下，Wang(1983)所發現的氣源參變數兩個關鍵值的變化。結果發現此三種氣源參變數的高、低關鍵值均隨大氣渦動強度之增而增加，且高關鍵值的增加遠較低關鍵值為迅速。雲中運動所引起的渦動，對積雲發展影響較小；結果顯示，雲中渦動的增強對低關鍵值幾無影響，僅令高關鍵值做小幅度的增加。由上述結果，我們可推論出一空間座標系。由高、低關鍵值曲面可將此空間分為三區：積雲區，氣罩雲區及無雲區。

緒論：

本文為對積雨雲之生成與發展之一系列研究的第四份報告，在WANG(1983，此後稱為文A)，我們曾提出一半一次元、有時序、無降水、有一穩定氣源的積雲模式。令氣源強度變化，發現其具有兩個關鍵值：一低關鍵值及一高關鍵值。當氣源強度低於低關鍵值時，無雲生成；當氣源強度介於高低兩關鍵值之間時，則形成完全由其下穩定氣源供應的平淺的氣罩雲；當氣源強度高於高關鍵值時，則可形成深厚的積雲，除由氣源供應外，並能吸取大氣中的潛熱，自行發展。由於此二關鍵值均甚小且甚為接近，故很明確的解釋了Glass和Carlson(1963)所觀測到的山頂上小型雲的形成及發展現象。

在文(A)的模式中，將逸入作用分為動力逸入和渦動逸入兩種；這種處理方式，1951年Houghton和Cramer即曾提即；1959年，Haltiner氏的數值模式實驗中，亦將渦動混合分為兩種型式討論：一為大氣中原有的渦動，與雲中上升速度無關；另一為雲內空氣運動所引起的渦動。但Haltiner(1959)的模式中，未能考慮這兩種渦動的並存。1959年，Priestley認為在提出一模式時應同時納入這兩種渦動，此一觀點已由Turner(1963)首先採納，文(A)次之。在文(A)的研究中，因有其特定的目的，故僅將渦動混合係數視為常數，事實上，渦動強度會因高度及雲內對流強度之不同而改變。本文中將令此二渦動係數為變數，以研究環境風對積雲之生成與發展的影響。

二、模式：

此一研究乃是文(A)的系列發展，其所採用的模式與文(A)中所用完全相同，故此處不再重述本文所採用的各方程式，僅將吾人所作對渦動混合係數的處理加以描述。

吾人採用Prandtl的混合長度理論，以處理邊界上的渦動混合。今以A1、A2分別表內、外區的某一變數， ν 為渦動混合係數， l 為混合長度

，且令 $l = \Delta r$ ，則可將渦動項寫為 $-\nu \frac{\partial A}{\partial r}$ ，且

$$-\nu \frac{\partial A}{\partial r} = -\nu_r^1 (A2-A1) \quad (2-1)$$

此處 $\nu_r^1 = \frac{\nu}{l}$ 。假定 l 為100公尺，並將 ν_r^1 分

為兩部份，即 $\nu_r^1 = \nu_r + \beta |w2-w1|$ (2-2)

(2-2)式中，右側第一項代表大氣中原有的渦動混合強度，第二項則代表雲內對流所引起的渦動混合強度。在文(A)中，係令 ν_r 及 β 為定數，但實際大氣並非如此，故在本文中，將令 ν_r 及 β 為變數，以探討在不同的渦動混合強度下，不同的氣源強度所生成及發展的積雲，各受何種影響。

為與文(A)成一系列的研究，以資比較。本文中採用文(A)中第二組實驗雲為標準雲，其有關之參變數如下：

- Zs (氣源高度) = 540m
- Ps (氣源氣壓) = 950m
- Rs (氣源半徑) = 1584m
- Ws (氣源垂直上升速度) = 2m/sec
- Ts (氣源溫度) = 285.5° K ($\Delta Ts = Ts - Tf(Zs) = 1^\circ C$)
- RHs (氣源相對濕度) = 90%
- $\nu_r = 0.1m/sec$
- $\beta = 0.01$
- ν_z (垂直方向的渦動混合係數) = 0.1m²/sec

而環境大氣仍採用NACA標準大氣，與氣源同高的

環境區的溫度為284.5° K，相對濕度為75%。

此一研究將分為六組實驗，分別令氣源垂直上升速度Ws、氣源溫度Ts及氣源相對濕度RHs對不同的渦動係數 ν_r 及 β 值變化，以研究大氣原有的渦動混合及雲中運動所引起的渦動混合，對於動量不同、浮力不同、濕度不同的氣源所產生之雲的生成及發展，各具何種影響。

三、結果與討論：

下面將分為六組實驗，研究兩種不同的渦動混合，對模式雲最後高度的影響。第一、四組實驗中，氣源強度的變化，係以動量的改變表示，亦即氣源垂直上升速度Ws的改變。第二、五組實驗中，則為氣源相對濕度RHs的變化。第三、六組實驗中，則改變氣源的浮力，亦即改變氣源溫度超值 ΔTs ，同時，第一、二、三組實驗中，令 ν_r 為變數，代表大氣原有渦動強度的變化。四、五、六組實驗中，則令 β 為變數，代表雲中運動所產生的渦動強度之變化。

(一)第一組實驗雲：

第一組實驗中，令 ν_r 由0.0變化至9.1m/sec，對每一 ν_r 值，令氣源垂直上升速度Ws變化，其餘氣源參數均保持不變。圖1(a)中各曲線表示雲頂高度隨時間的變化情形，其中所示各實驗雲的氣源參變數與標準雲相同，僅令Ws分別為0.4、0.6、0.8、1.2、2.0、3.0、4.2、5.6、7.2、9.0m/sec，如圖中右側註標所示。當Ws=0.4m/sec時，始能成立，表示在此有一低關鍵值 W_{sl} 的存在，當Ws=0.6m/sec時，雲頂高度增加約100m，Ws再增至0.8m/sec，雲頂高度驟增2800m，這表示在0.6至0.8m/sec之間，Ws有一關鍵值存在，文(A)中稱之為高關鍵值， W_{su} ；當 $Ws > W_{su}$ 時，即能形成高聳的積雲，雲內溫度較環境為高。當 Ws 介於高、低關鍵值之間，只能發展平淺的氣層雲，有的雲內溫度較環境為低，完全由氣源所支持。

隨後令 ν_r 變化，為免重複，本文僅取 $\nu_r = 0.3m/sec$ 一圖與之比較，其餘同類圖形均予以省略。圖1-(b)所示為 $\nu_r = 0.3m/sec$ 時的一組雲頂時變曲線，此時 $W_{sl} = 0.6m/sec$ ， $W_{su} = 2.0m/sec$ ，顯示高、低關鍵值均隨 ν_r 之增而增，同時雲頂高度較圖1-(a)的一組為降低；此種趨勢隨 ν_r 的增加更明顯，當 $\nu_r \geq 9.1m/sec$ 時，則在本文研究的Ws最大值9.0m/sec，亦不能成雲。茲將此一實驗的結果，雲頂最後高度在各不同 ν_r 值時，隨Ws的變化以曲線表於圖2，圖中縱座標為雲頂最後高度，橫座標為氣源的垂直速度，其中各實曲線為雲頂最後高度與Ws的關係，右方註腳表示不同的 ν_r 值，兩點線分別表示高、低關鍵值的可能位置，長虛線則表示高關鍵值並未確定，乃是在長虛線範圍之內，並非表示雲頂高度隨長虛線變化。

為進一步說明 ν_r 和Ws對積雲發展的影響，特將本組實驗所得，相對於每一 ν_r 值之 W_{su} 及 W_{sl} 表於圖3，圖中縱座標為Ws，橫座標為 ν_r ，將 W_{su} 、 W_{sl} 畫入，即可得兩條曲線而將 $\nu_r - W_{sl}$ 平面分為三區：(1)積雲區：其特徵為 ν_r 較其他二區為小，故稀釋較小，可發展為高聳的積雲。(2)氣層雲區：此區內之特徵為若須在 ν_r 大的情況下成雲，Ws即需增大。(3)無雲區： ν_r 太大，稀釋太強烈，或Ws太小，無法成雲。

(二)第二組實驗雲：

令 ν_r 由0.0變化至7.3m/sec，對每一 ν_r 值，令氣源相對濕度RHs變化，其餘氣源參數均不變。其處理方法與第一組實驗雲相同，仍由雲頂時變曲線找出雲頂最後高度，並將雲頂最後高度在各不同 ν_r 值時，隨RHs的變化曲線表於圖4，圖中縱座標為雲頂高度，橫座標為氣源相對濕度RHs，與圖2相同，我們仍以長虛線表明高關鍵值的可能位置，並以兩點線分別表明高、低關鍵值的可能位置。

將此組實驗結果所得之高、低關鍵值RHsu

、 RH_{sl} 點入圖5，連接可得兩曲線而將RHs- ν_r 平面分為三區：(1)積雲區、(2)氣層雲區、(3)無雲區，其形狀與圖3相似，此一相似的性質，將於第三組實驗中一併解釋。

(三)第三組實驗雲：

令 ν_r 由0.0變化至9.1m/sec，對每一 ν_r 值，並令氣源的熱能 ΔTs 由0.0變化至4.0°C，其餘氣源參變數均保持不變。

由於雲頂時變曲線圖均與圖1形狀相似，此處不將此種圖片一再重覆，但知隨著 ν_r 的增加，發現兩個關鍵值 ΔTs_u 、 ΔTs_l 亦漸次增大，雲頂高度則漸減。茲對各 ν_r 值，將雲頂最後高度對 ΔTs 的關係曲線畫於圖6，圖中實曲線為雲頂高度曲線，兩點線代表高、低關鍵值的可能位置，圖中可見，當 $\nu_r > 1.3$ 時，曲線漸趨平滑，已無法判斷高臨界值；當 $\nu_r \geq 9.1$ 時，本文中所取的最大溫度超值4°C，亦無法成雲。將此組實驗所尋求的高、低關鍵值點於圖7，圖7中縱座標為 ν_r ，橫座標為 ΔTs ，將高、低關鍵值各點連為兩條曲線，分別代表高、低關鍵值對 ΔTs 、 ν_r 的關係，此二曲線可將 $\nu_r - \Delta Ts$ 平面分為三區：(1)積雲區、(2)氣層雲區、(3)無雲區。

今將圖3、圖5、圖7相比較，發現這三種氣源參變數： Ws 、 RHs 、 ΔTs 的兩個關鍵值，當 ν_r 變化時，均具相似的變化；即當 ν_r 漸增時，氣源參變數的高關鍵值 S_u (S 代表 RHs 、 ΔTs 、 Ws 中任一)迅速增高， ν_r 繼續增大，即無法形成高聳的積雲，故 S_u 的值消失。低關鍵值 S_l 雖亦有隨 ν_r 漸增的現象，但遠較高關鍵值 S_u 的變化和緩。為說明此一現象，我們考慮一氣源發射出濕而熱的空氣，若氣源強度 S 能供給足夠的能量，到達凝結高度，即能開始成雲，此一能量即以 S_l 表示；若再能上升至自動對流高度，即可自動上舉，發展為高聳的積雲，所需氣源強度即為 S_u 。由於上述兩高度不同，到達自動對流高度所受的渦動稀釋的總量當較到達凝結高度者為大；當 ν_r 增大時，

大氣的稀釋效應更為強烈，故其對Su值的影響當較 S_L 為大。

同時，圖3、圖5、圖7均具同一性質，即高、低關鍵值在 ν_r 小時均甚小，且甚為接近；文A中曾對Glass和Carlson(1963)的觀測資料加以解釋，說明由於渦動混合，可能使氣源強度波動於兩關鍵值左右，此時氣源的活動將呈間歇性而生成一系列的雲，這些雲的高度，則呈散亂的分布。在此我們以數值實驗進一步的說明，當受環境風影響，使大氣渦動強度做微小的變化時，亦將使兩關鍵值改變，雖然 ν_r 小時，其變化量甚小，但由於高、低關鍵值甚小而且接近的特性，縱使氣源強度未變，由於關鍵值的改變，亦可能使雲高有很大的不同。依本實驗的結果觀之，文(A)的結果有相當的可靠性。

四第四組實驗雲：

在以下三組實驗中，我們將令 ν_r 值保持與標準雲相同，僅令 β 改變，以研究雲中運動所引起的渦動混合對積雲之生成與發展的影響；在本組實驗中，對每一 β 值，令 W_s 為變數。經過與前三組相似的處理，我們可將各不同 β 值時，雲頂最後高度與 W_s 的關係，以曲線表示於圖9，圖中顯示，隨 β 的增加，雲頂下降，但 β 自0.0、0.01變化至0.91，低關鍵值幾不改變，但高關鍵值則增加較明顯，今仍以點線代表兩關鍵值的可能位置，長虛線代表高關鍵值的可能位置。將兩關鍵值與 W_s 及 β 的關係點於圖11-(a)可連成兩曲線，亦將平面分為三區，可名之為積雲區、氣罩雲區與無雲區，將與下二組結果合併討論。

(五)第五組實驗雲：

本組實驗中，令 β 為變數，由0.0、0.01變化至0.91，對每一 β 值，令 RH_s 為變數。其處理方法同前，而得到圖9的結果，圖中實曲線表示雲頂高度隨 RH_s 的變化情形，長虛線表示高關鍵的可能位置，兩點線分別表示高、低關鍵值的可能位置，將找出的高、低關鍵值點

於圖11-(b)，可連成兩曲線，亦將平面分為三區，即積雲區、氣罩雲區與積雲區。

(六)第六組實驗雲：

令 β 為變數，對每一 β 值，再令 ΔT_s 為變數。其結果可由圖10中看出，圖中曲線表示在不同的 β 值時，雲頂高度與 ΔT_s 的關係，其中點線與長虛線之意義與圖9中相同。將各關鍵值找出，表於圖11-(c)。

比較圖11-(a)、(b)、(c)三圖，發現 β 的改變對氣源參數的低關鍵值幾無影響；唯隨著 β 的增大，高關鍵值將隨之而增大。這是因為雲中渦動強度為垂直速度的函數，在到達凝結高度時，垂直速度尚不甚大，故只須較低的氣源強度即能到達凝結高度，故 β 的改變對低關鍵值影響很小。但當氣流通過凝結高度，到達對流高度前，由於潛熱的釋放，垂直速度已增至相當大，使雲中渦動強度增強，亦即 β 值的加大，而導致高臨界的較明顯增加。

若將圖11-(a)、(b)、(c)分別與圖3、5、7組合，可視為兩個垂直相交的平面，如圖12所示：令 β 、 ν_r 及氣源參數 S (圖12中為 RH_s)分別為三個互相垂直的座標軸，原點為 $(\beta = 0.01, \nu_r = 0.1, S_0, S_0$ 為某一氣源參數值)，圖12中令其為 $RH_s = 73\%$ ，可建立一座標系。由於圖11-(a)與圖3、圖11-(b)與圖5、圖11-(c)與圖7在相交的 $\nu_r = 0.1, \beta = 0.01$ 一線上，圖形均能符合，均應有與圖11-(a)、圖4相似的圖線，這些圖線的聯集當可將 (ν_r, β, S_0) 空間分為三區，即無雲區、氣罩雲區及積雲區。亦即對任一已知強度 S 的氣源，若知當時大氣及雲中渦動的強度，即可斷言其應屬何種雲類。

四結論

在此一研究中，發現氣源參數 S (代表 RH_s 、 W_s 、 ΔT_s 任一)的高、低關鍵值 S_u 、 S_L 將因大

氣渦動的增強而增大，且 S_u 的增大遠較 S_L 為快；當大氣渦動不強時， S_u 與 S_L 甚為接近，隨渦動的加強，兩關鍵值的差值亦加大。雲中對流所引起的渦動，對 S_L 值則幾無影響，但當雲中渦動強度增加時， S_u 值亦隨之做小幅度的增加。由於這兩種渦動強度的改變均能使高、低關鍵值發生變化，我們相信除文(A)中所指出，氣源強度的波動能使雲高呈散亂分佈，同時，當渦動強度受環境風之影響而發生改變時，雖為同樣的氣源強度，由於關鍵值的改變，亦將使雲高發生散亂分佈的現象。上述兩種說法，均能成功的解釋Glass和Carlson(1963)的觀測資料。

將兩種渦動的影響合併討論，本文曾提出一 (β, ν_r, S_0) 空間，將空間分為三區，分別稱為積雲區、氣罩雲區和無雲區，推論當已知氣源強度時，若知渦動強度，應可預測其發展所成雲的類型。

在此模式中，大氣渦動隨高度的變化已予忽略，雲中渦動亦僅受垂直速度的影響，與實際天氣情況相比，顯然太過簡化，但所得結果，仍能對若干現象加以解釋，故我們相信，此一研究仍具其重要性，即對以後進一步的模擬，提供一有力參考。再者，我們希望能在將來，找出 ν_r, β ，與實際觀測到的高空風資料的關係，則我們對渦動混合對積雲的影響，將有更進一步的了解。

參考文獻

Glass, M., and N. T. Carlson, 1963: The growth characteristics of small cumulus clouds. J. Atmos. Sci., 20, 397-406.
Haltiner, G. J., 1959: On the theory of convective currents. Tellus, 11, 4-15.
Priestley, C. H. B., 1959: Turbulence Transfer in the Lower Atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago, 111. pp 130.
Turner, J. S., 1963: The motion of buoyant elements in turbulent surroundings. J. Fluid Mech., 16,
Wang, J. Y. C., 1983: A Quasi-One-Dimensional, Time-Dependent and None-Precipitating Cumulus Cloud Model: On the Bimodal Distribution of Cumulus Cloud Height, J. Atmos. Sci., 40, 651-664.

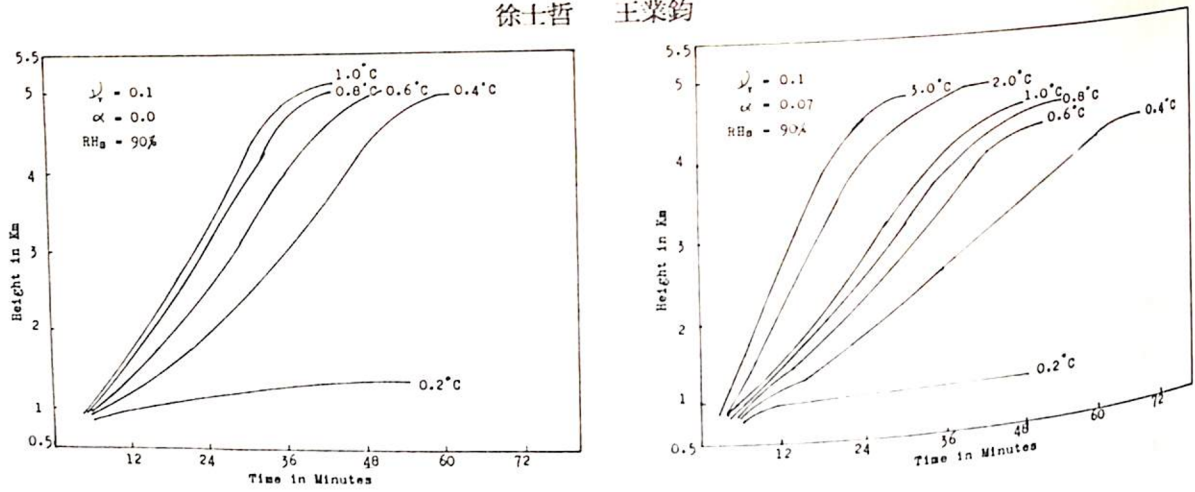


圖1、圖2(a)、(b)分表大氣原有渦動混合係數 ν_r 為0.1、0.3m/sec 時之雲頂時變曲線。曲線右方的註腳係指氣源垂直上升速度 W_s 。圖右上角說明其餘參數條件與標準雲相同。圖中 W_s 的最小值代表成雲的下限，小於此值即無雲。

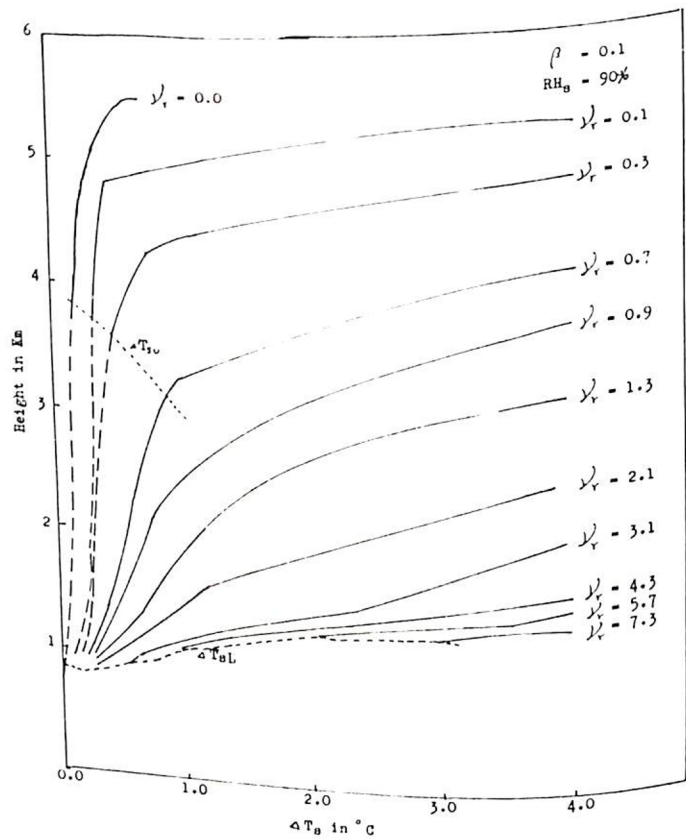


圖2 模式雲的雲頂高度與 W_s 之關係以實線表示，右方註腳指不同的 ν_r 值，左上方為氣源參數。兩點線分別表示高低關鍵值的位置，長虛線則表示高關鍵值的可能位置。 W_{su} 為分隔氣罩雲區與積雲區的高關鍵值， W_{sl} 為分隔氣罩雲區與無雲區的低關鍵值。當 $\nu_r \geq 9.1$ 時，無雲生成。

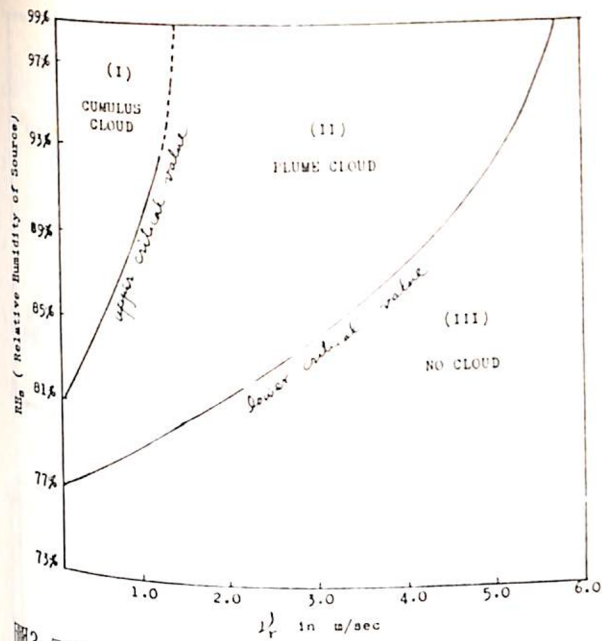


圖3 雲的類型判別圖，考慮 ν_r 與 W_s 對積雲發展的關係；圖中二曲線分別表示二關鍵值隨 ν_r 的變化，高關鍵值的虛線部份表示 W_{su} 的可能位置，因此時 W_{su} 甚難分解。此二曲線將平面分為三區：①積雲區②氣罩雲區③無雲區。

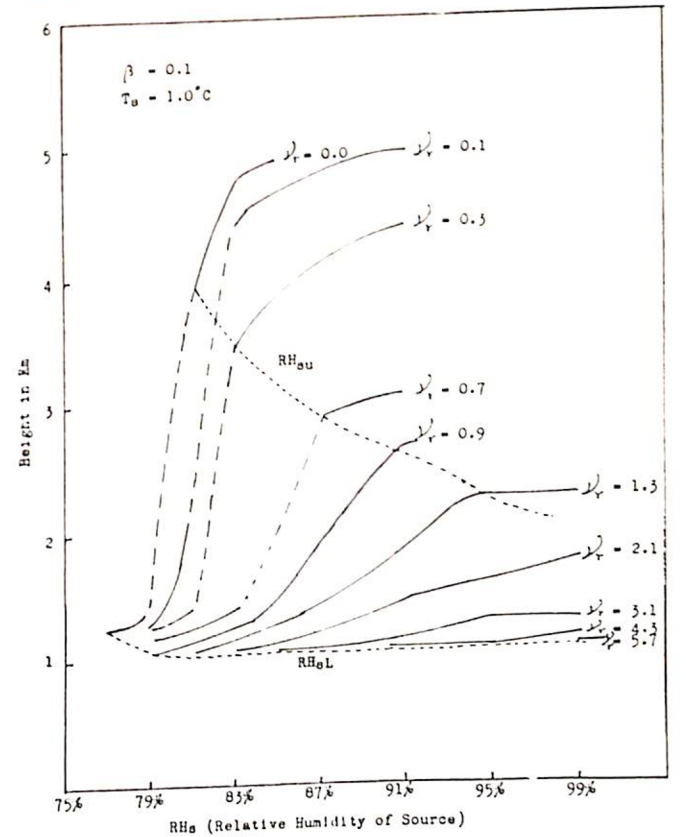


圖4 雲頂高度在不同 ν_r 值時，對 RH_s 的變化曲線，與圖3 意義相同， RH_{su} 及 RH_{sl} 分別表高，低關鍵值。

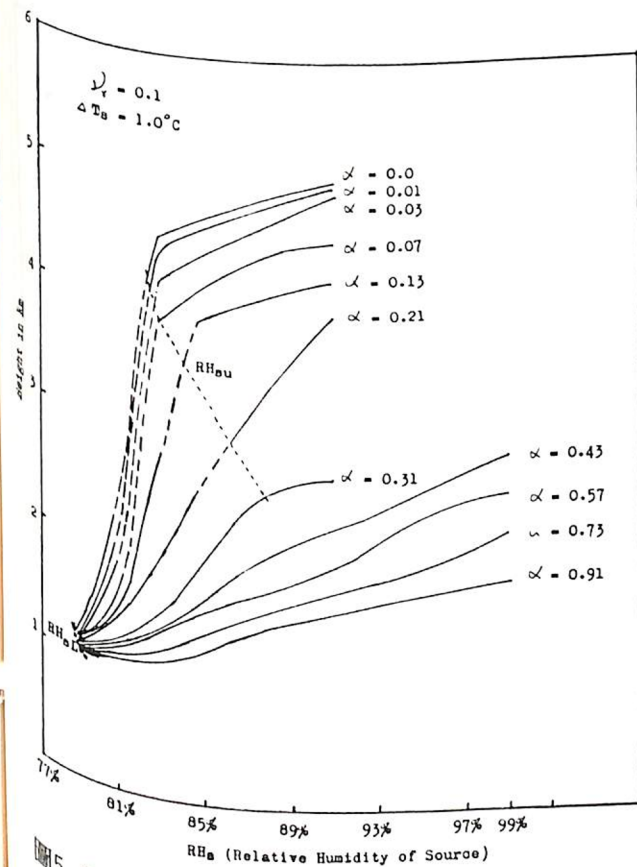


圖5 雲的類型判別圖，與圖4 意義相同，但所考慮者為 RH_s 的關鍵值之變化。

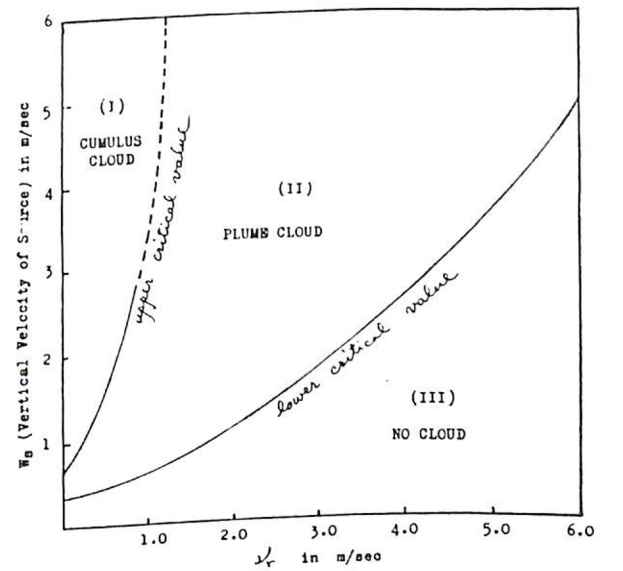


圖6 雲頂高度在不同 ν_r 值時隨 ΔT_s 的變化曲線，與圖3 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s 。

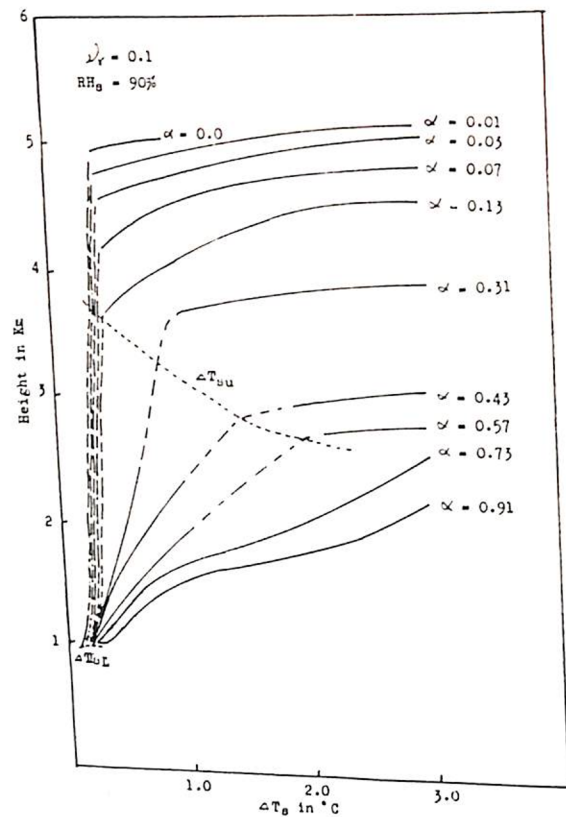


圖7 雲的類型判別圖，與圖4 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s 。

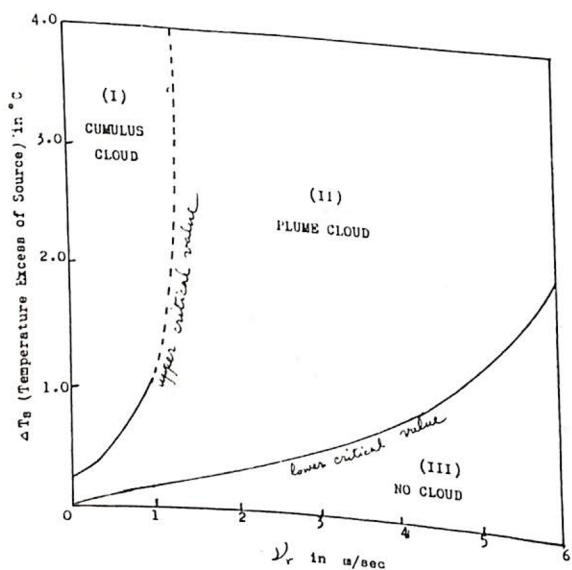


圖8 對各不同 β 值雲頂高度隨 W_s 的變化曲線，右方註腳指不同的 β 值，左上方說明各氣源參變數。與圖3 意義相同。

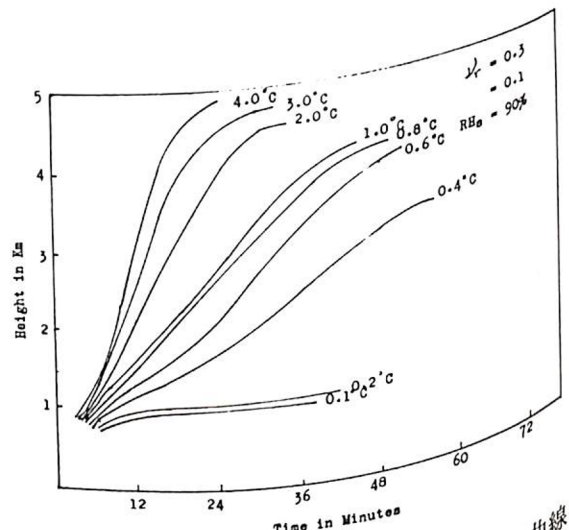
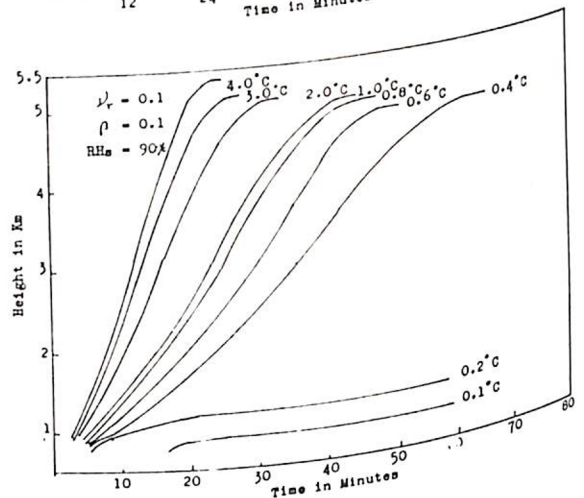
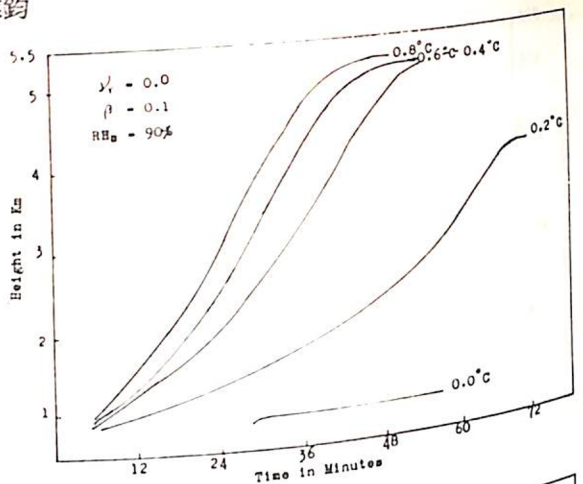


圖9 對不同 β 值，雲頂高度隨 RH_s 的變化曲線

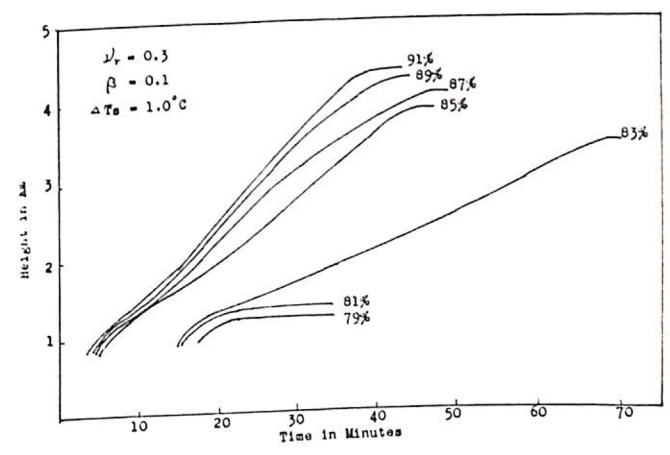
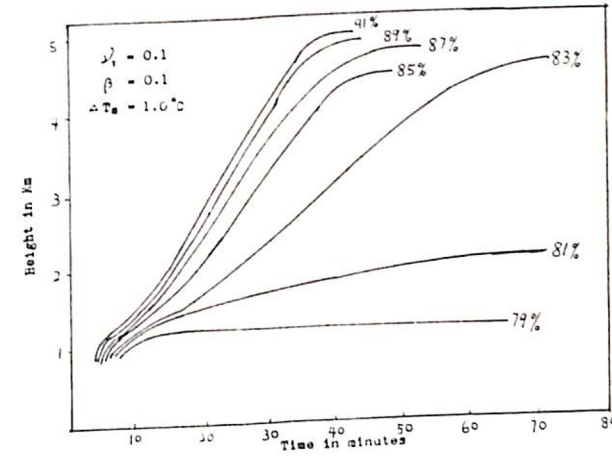
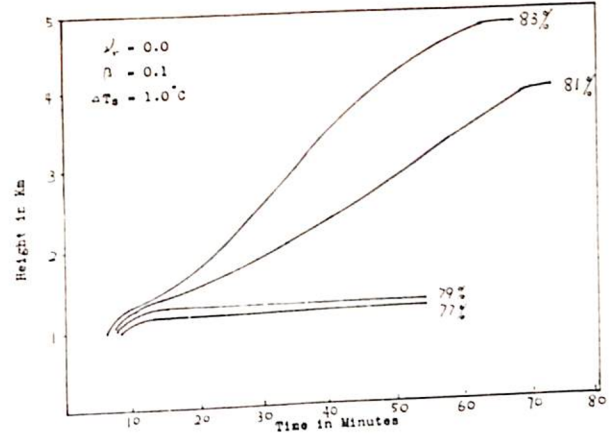
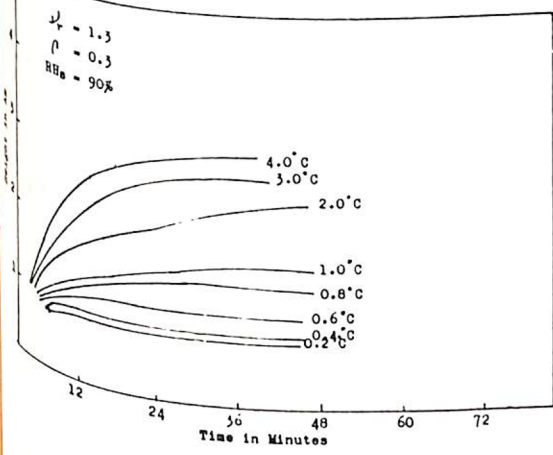
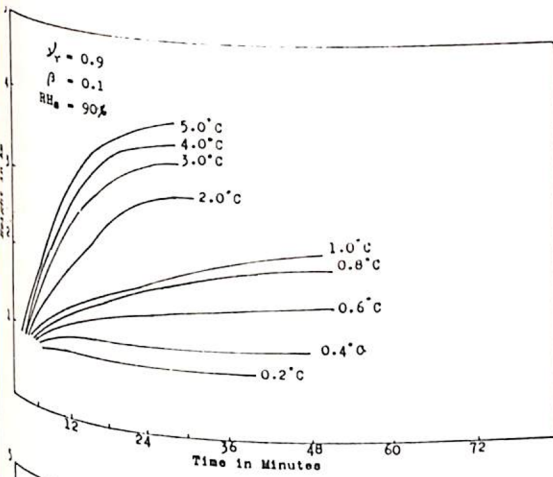
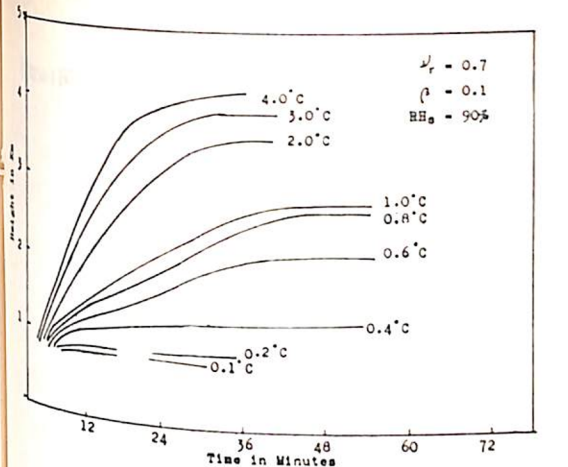


圖10 對不同 β 值，雲頂高度隨 ΔT_s 的變化曲線。與圖9 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s 。

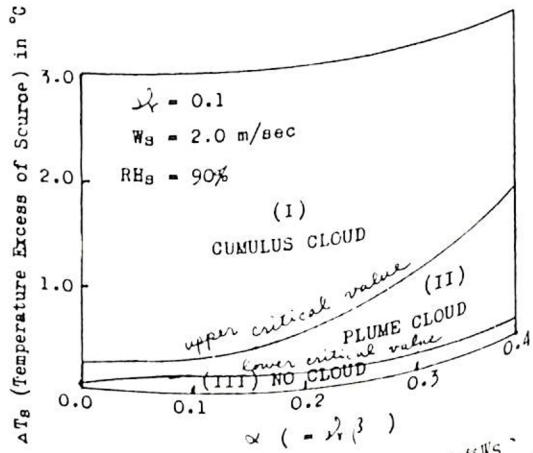
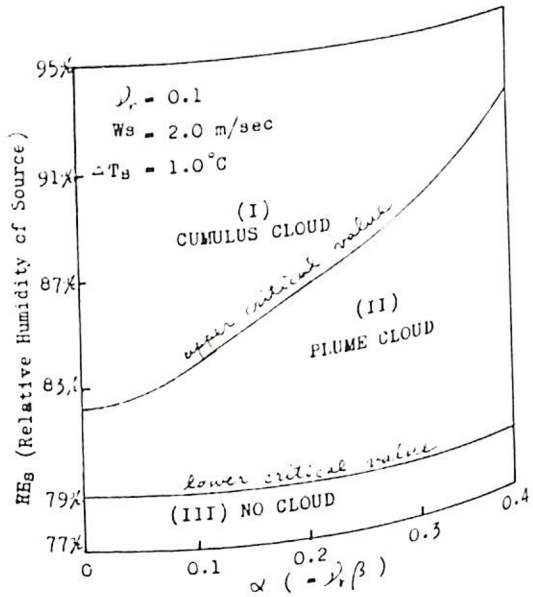
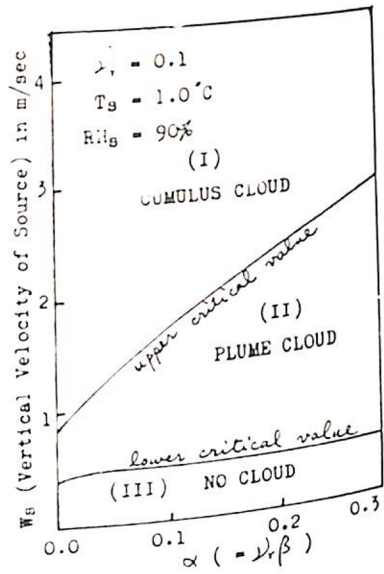
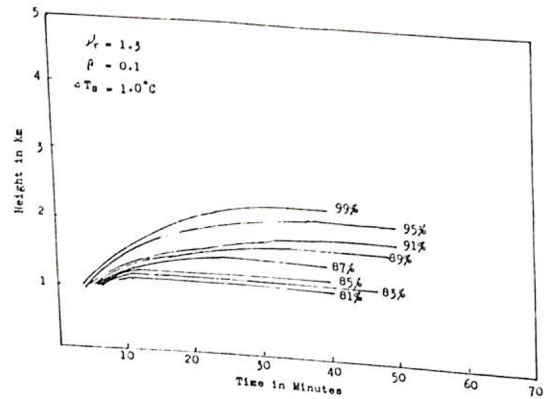
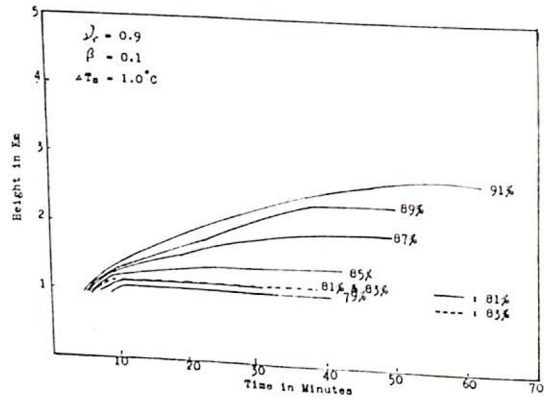
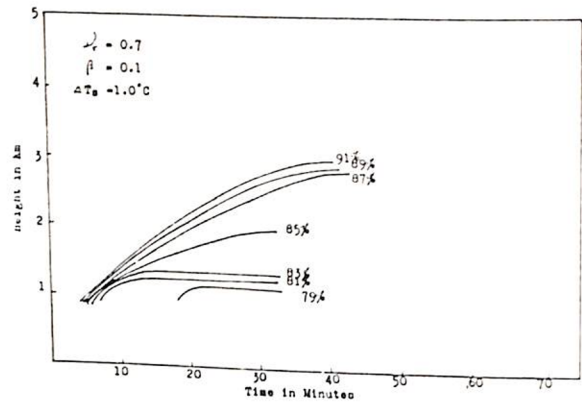


圖11雲的類型判別圖：圖12(a)至(c)分別表 W_s 、 RH_s 、 ΔT_s 的兩個關鍵值與 β 的關係，均可畫出兩曲線，將平面分為三區：(1)積雲區(2)氣草雲區(3)無雲區。

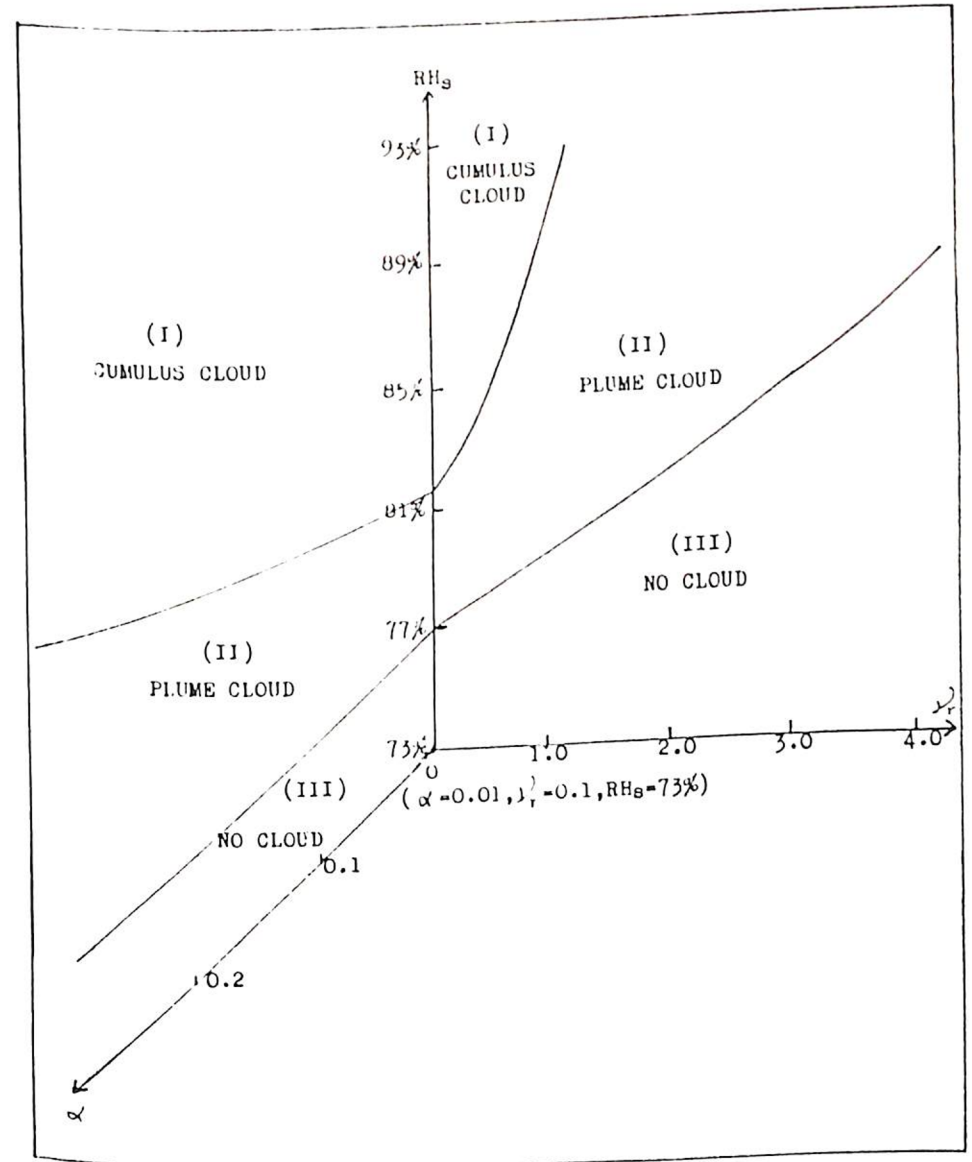


圖12立體座標系：以 β 、 ν_r 、氣源參數 S_0 為互相垂直的三個軸，以 $(\beta=0.01, \nu_r=0.1, S_0)$ (S_0 為任一參數值，此圖中令為 $RH_s=73\%$)為原點，所有類似 $\nu_r=0.1$ 及 $\beta=0.01$ 兩平面上的圖線所成的聯集，將空間分為三區，即：(1)積雲區(2)氣草雲區(3)無雲區。