

# 南海蒸發導管模擬研究

侯昭平<sup>1</sup>

喬孟聆<sup>1</sup>

隋中興<sup>2</sup>

林博雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院 <sup>2</sup>國立臺灣大學

## 摘要

本研究運用2017年南海季風雙島實驗計畫(South China Sea Two-Island Monsoon Experiment, SCSTIMX)東沙島、太平島及海研一號高解析探空觀測資料和理想Paulus-Jeske(PJ)蒸發導管模式計算結果進行比對，結果發現PJ蒸發導管模式計算結果與觀測資料相比偏低，透過氣海象相關環境參數敏感度測試分析後，發現大氣為不穩定狀態時，海(氣)溫影響最為顯著，相對濕度在大氣未飽和前，對於蒸發導管高度的影響亦相當明顯；另外使用WRF模式模擬低層大氣環境參數，並以WRF模式邊界層敏感度測試和PJ模式來計算南海區域蒸發導管高度，可得到接近觀測值之結果。

關鍵字：蒸發導管、南海季風雙島實驗計畫、Paulus-Jeske蒸發導管模式、WRF 模式

## 一、前言

在二次世界大戰之後，科學家們開始對此期間雷達所接收到的訊號予以分析研究，並發現了一些訊號突然衰減或增強的異常現象，於是開始注意到電磁波在對流層傳播特性研究的重要性。電磁波在對流層的傳播現象可由1864年Maxwell的電磁理論中得知其與介質的介電常數(Dielectric Constant)有關，而大氣中介質的介電常數又與大氣折射指數(Refractive Index,  $n$ )[1]有關，其又與大氣環境的氣壓、水蒸氣壓及溫度相關。因此，電磁波在對流層中會受到大氣折射指數隨空間的分佈變化而影響其傳播路徑，以及受到對流層內的天氣與氣候因素(如降雨與水氣)影響，而所受影響的電磁波頻率可由VHF(Very High Frequency)至UHF(Ultra High Frequency)，影響傳播距離達到100甚至1000公里以上[2]。

一些學者指出在標準大氣時大氣折射指數可用指數模型表示(Bean and Thayer, 1959) [3]，此時電波傳播路徑可以用某些標準化的模式來描述。然而當大氣的溫度與溼度在垂直方向有異常的分佈現象，導致所對應的大氣折射指數的垂直梯度偏離指數型的變化時，顯然在此情況下標準的電波傳播模式將不再適用，而必須依據實際的大氣折射指數的垂直分佈計算實際電波傳播的路徑，進而推估出對於雷達通信與偵測能力的影響。

根據電磁波傳播路徑之彎折情形，基本上可將電波在大氣的折射現象分成四類(圖1)：亦即正常折射(Standard)、次折射(Subrefractive)、超折射(Superrefractive)和陷捕(Trapping) [4]。其中的陷捕即表示大氣環境存在有某層狀結構，其內的大

氣折射指數的垂直梯度值小於 $-157 \text{ N/km}$ 時電磁波在此種層狀結構中的傳播將發生異常現象，亦即電磁波在垂直方向的傳播將被此層狀結構，所侷限而無法逸出的傳播現象。這種結構宛如波導管(Waveguide)，會使得低仰角的電波侷限在此種結構中，造成電波的異常傳播，此種的結構體特稱為大氣導管(Atmospheric Duct)。

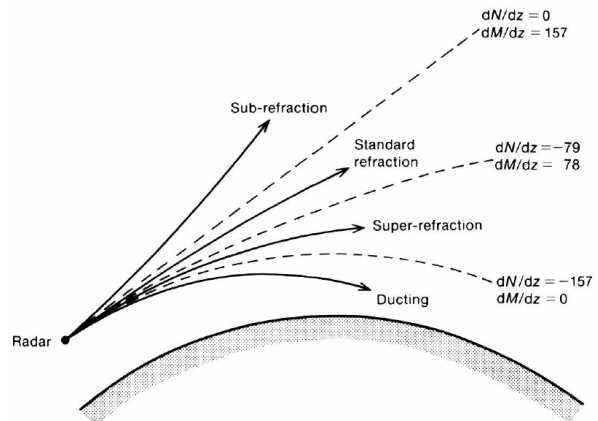


圖 1 電磁波傳播路徑偏折情形。

大氣導管現象主要發生於溼度直減率(Hydrolapse)變化大及逆溫的區域，以下五種類型天氣條件最適合導管發生：(1)海洋上的蒸發(2)反氣旋的下沉運動(3)鋒面系統的下沉運動(4)夜間輻射效應(5)平流效應[4]，又可依大氣修正折射率剖面輪廓與發生高度來分成三種型態：地面導管(Surface-Based Duct)、高空導管(Elevated Duct)和蒸發導管(Evaporation Duct)等三類(圖2) [5]。



圖 2 各類型大氣修正折射率垂直變化剖面圖與電磁波路徑(a)為地面導管(b)地表S型導管(c)高空導管。

發生於海面上的蒸發導管，係由於近海面的空氣含有來自海水蒸發所釋放出的充足水汽，並且以飽和的方式持續性的存在，導致近海面的溼度遠大於離海面稍高處，因而容易形成所謂的蒸發導管。Brooks等(1999)利用C-130氣象研究飛機及科學研究船艦於波斯灣(Persian Gulf)進行導管觀測，得到空氣經過水面，使濕度劇烈增加及高層穩定層抑制垂直混合，導致逆溫層濕度梯度較大，兩者為蒸發導管發生主因[6]。

## 二、資料來源與分析方法

### (一) 觀測資料

本研究使用南海季風雙島實驗整合計畫(SCSTIMX)觀測資料(林博雄等2016, Sui et al. 2020)[7、8]。主要觀測資料為2017年12月5日20時至12月7日20時，東沙島、太平島與海研一號所施放之探空資料(見圖2)，而東沙海水表面溫度與風速取自中央氣象局東沙浮標觀測資料。

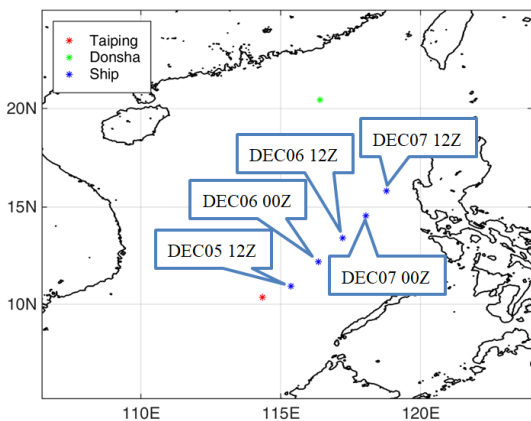


圖 3 南海雙島及探空施放位置圖。圖中綠色點為東沙島，紅色點為太平島，藍色點為船舶觀測位置，其上之說明欄為海上觀測時間。

### (二) 修正後大氣折射率

在探空資料中有大氣氣壓、大氣溫度、露點溫度、相對溼度等氣象參數隨高度的分佈資料，利用這些參數我們可以計算出大氣折射指數隨高度的分佈，其計算方法表示如下[1]：

$$n = 1 + \left( \frac{77.6P}{T} + \frac{373000e}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中P為大氣壓力，單位是百帕(hPa)，T為大氣溫度，單位是K，e為大氣中的水汽壓，單位是百帕(hPa)。要注意到在探空資料中並沒有大氣水汽壓的資料，因此在此要用水汽壓與露點溫度的關係式來計算，表示如下：

$$e = 6.11 \times \text{EXP} \left( 19.7 \times \frac{T_d(^{\circ}\text{C})}{T_d(^{\circ}\text{K})} \right) \quad (2)$$

其中Td為大氣的露點溫度。經過(1)式實際計算的結果發現大氣折射指數的值非常接近1，其值變動範圍大約在1.0001~1.0004之間。因此為了能更清楚的顯示其擾動的情形，定義一個新參數，即大氣折射率(Atmospheric Refractivity)，其計算方式如下：

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 373000 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

而在將地球曲率的因素考慮進去後，可以得到一個新的折射率參數，稱作修正後的折射率(Modified Refractivity)，其定義如下：

$$M(h) = \left[ (n - 1) + \frac{h}{a} \right] \times 10^6 = N(h) + \frac{h}{a} \times 10^6 \quad (4)$$

其中a為實際地球半徑(約6400km)。當dM/dh小於等於0時，代表電波傳遞方向將會偏向地表，而非向上或直線往太空方向行進，並被陷捕在特殊空層中(即導管現象)。因此，藉由上式便可計算出修正後的折射率隨高度分佈的曲線(M\_Profile)，並可以此來判斷是否有蒸發導管的存在並決定其高度、強度等特性參數。圖4為一典型蒸發導管之M\_Profile，A點代表dM/dh由小於0轉為大於0的轉折點，B點代表海表面(或最接近海表面)之M值，圖中A、B兩點的高度差定義為導管高度，而A、B兩點的M值差則定義為導管的強度。

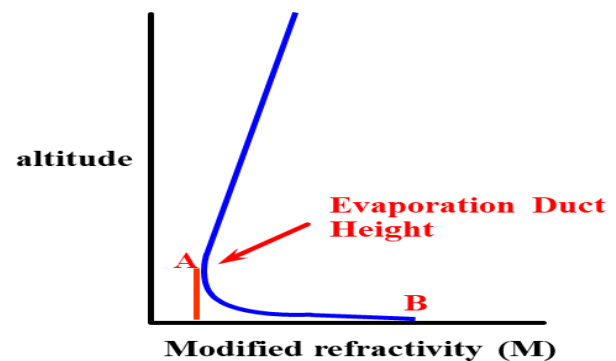


圖 4 蒸發導管修正後大氣折射率剖面示意圖。

### (三) Paulus-Jeske蒸發導管模式

Paulus於1985年提出蒸發導管模式的應用，並延續Jeske的研究於美國海軍海洋系統中心研發出蒸發導管診斷模式，可以藉由輸入當時海洋表面的空氣溫度、海洋表面的海水溫度、相對溼度以及風速等，計算出蒸發導管的高度[9、10、11]。由於蒸發導管發生在海洋與大氣交會之邊界層內，故模式原理導入相當之邊界層理論，其步驟一為計算理查森數(bulk Richardson's number)，以判斷對流穩定度關係：

$$R_{ib} = 369h_1 \frac{(T_a - T_s)}{(u^2 T_{ak})} \quad (5)$$

$h_1$ 為量測參考高度(在此設定為6m)， $T_a$ 為量測參考高度的空氣溫度(單位°C)， $T_{ak}$ 為 $T_a$ 之絕對溫標(單位K)， $T_s$ 為海洋表面的海水溫度(單位°C)， $u$ 為海洋表面的風速(單位knot)，且 $R_{ib}$ 的值被限制必須要小於1。此參數主要是用來判斷海水與其表面附近空氣之間的穩定度關係，同時也將風切對於水汽在垂直方向上分佈的影響因素考慮了進去。接下來利用步驟一求出的理查森數來計算Monin-Obukhov length，其計算方法表示如下：

$$L' = \frac{(10h_1\Gamma_e)}{R_{ib}} \quad (6)$$

其中函數 $\Gamma_e$ 會根據不同 $R_{ib}$ 值而有不同的計算方式，其計算方式如下所示：

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= 0.05 && \text{for } R_{ib} \leq -3.75 \\ \Gamma_e &= 0.065 + 0.004R_{ib} && \text{for } -3.75 < R_{ib} \leq -0.12 \\ \Gamma_e &= 0.109 + 0.367R_{ib} && \text{for } -0.12 < R_{ib} \leq 0.14 \\ \Gamma_e &= 0.155 + 0.021R_{ib} && \text{for } 0.14 \leq R_{ib} \end{aligned} \quad (7)$$

下一步為計算量測參考高度的空氣折射率( $N_a$ )及與海水表面接觸之空氣折射率( $N_s$ )的差值( $\Delta N_p = N_a - N_s$ )，其中兩種折射率計算方法如下：

$$\begin{aligned} N_a &= \frac{77.6}{T_{ak}} \left[ 1000 + 4810 \frac{e}{T_{ak}} \right] \\ N_s &= \frac{77.6}{T_{sk}} \left[ 1000 + 4810 \frac{e_0}{T_{sk}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

在上式中的 $T_{sk}$ 為 $T_s$ 之絕對溫標(單位K)， $e$ 為與海水表面接觸之空氣飽和水汽壓(Saturation Vapor Pressure)， $e_0$ 為量測參考高度之空氣的水汽壓(Vapor Pressure)其計算方式表示如下：

$$e = \frac{RH}{100} e_s \quad (9)$$

其中RH代表量測參考高度之相對溼度， $e_s$ 為量測參考高度之空氣飽和水汽壓。而飽和水汽壓的計算方式是利用Kiefer (1941)推導的方程式[12]，表示如下：

$$\begin{aligned} e_0 &= 6.105 \text{EXP} \left[ 25.22 \left( \frac{(T_{sk} - 273.2)}{T_{sk}} \right) - 5.31 \log_e \left( \frac{T_{sk}}{273.2} \right) \right] \\ e_s &= 6.105 \text{EXP} \left[ 25.22 \left( \frac{(T_{ak} - 273.2)}{T_{ak}} \right) - 5.31 \log_e \left( \frac{T_{ak}}{273.2} \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

最後一步要先判斷大氣與海洋表面之間的穩定性(Stability)情況，以決定要用何種方程式來計算蒸發導管的高度。由(5)可以知道，當 $0 \leq R_{ib} \leq 1$ 時，代表量測參考高度的空氣溫度大於海洋表面的海水溫度，此時熱量的傳播方向是由空氣往海水傳播，因此空氣不易產生對流，此為穩定的狀態。在此種狀態下蒸發導管高度的計算方式表示如下：

$$\delta = 0 \text{ for } \Delta N_p \geq 0 \text{ or} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{\Delta N_p}{\left[ -0.125 \left( \log_e \left( \frac{h_1}{h_0} \right) + 5.2 \frac{h_1}{L'} \right) - 5.2 \frac{\Delta N_p}{L'} \right]}$$

如果上式計算出來的 $\delta < 0$ 或 $\delta/L' > 1$ ，那麼蒸發導管的高度改由下式計算：

$$\delta = \frac{(6.2\Delta N_p + 0.65h_1)}{\left[ -0.125 \log_e \left( \frac{h_1}{h_0} \right) \right]} \quad (12)$$

其中 $h_0$ 為空氣動力學(Aerodynamic)上的一個表面粗糙度(Surface Roughness)參數(在此設定為0.00015m)。而當 $R_{ib} < 0$ 時，代表海洋表面週遭的空氣溫度小於海洋表面的海水溫度，此時熱量的傳播方向是由海水往空氣傳播，因此空氣會受熱並上升，造成對流的情形發生，此為不穩定的狀態。在這種狀態下蒸發導管高度的計算方式表示如下：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt[4]{A^4 - 18 \frac{A^3}{L'}}} \quad (13)$$

其中 $A = -0.125B/\Delta N_p$ ， $B = \log_e(h_1/h_0) - \psi$ ，而函數 $\psi$ 的計算方式可表示如下：

$$\begin{aligned} \psi &= -4.5 \frac{h_1}{L'} && \text{for } \frac{h_1}{L'} \geq -0.01 \\ \psi &= 10^{\left[ 1.02 \log_{10} \left( -\frac{h_1}{L'} \right) + 0.69 \right]} && \text{for } -0.01 > \frac{h_1}{L'} \geq -0.026 \\ \psi &= 10^{\left[ 0.776 \log_{10} \left( -\frac{h_1}{L'} \right) + 0.306 \right]} && \text{for } -0.026 > \frac{h_1}{L'} \geq -0.1 \\ \psi &= 10^{\left[ 0.630 \log_{10} \left( -\frac{h_1}{L'} \right) + 0.16 \right]} && \text{for } -0.1 > \frac{h_1}{L'} \geq -1 \\ \psi &= 10^{\left[ 0.414 \log_{10} \left( -\frac{h_1}{L'} \right) + 0.16 \right]} && \text{for } -1 > \frac{h_1}{L'} \geq -2.2 \\ \psi &= 2 && \text{for } \frac{h_1}{L'} < -2.2 \end{aligned} \quad (14)$$

透過上述的步驟便可以利用量測到的海水溫度、空氣溫度、相對溼度和風速等氣象參數，計算出蒸發導管高度。

### 三、結果分析

#### (一) 數值模擬及觀測值

為了瞭解不同邊界層參數化方案計算蒸發導管高度的正確性，我們分別使用MRF, Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), 及YonSei University (YSU)三種不同的邊界層參數化方案，蒸發導管發生在近海面的高度，受到邊界層的通量變化影響甚深，所選擇的參數設定在模擬低層大氣的演變過程中十分重要。Hariprasad等(2014)使用各種邊界層參數來模擬3公里高度以下溫度、相對濕度與風速。他們發現2m溫度模擬在YSU及Mellor – Yamada Nakanishi-Niino (MYNN)表現較好，濕度則以MYJ與Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE)誤差最小，在10m風速模擬則是誤差最大[13]。Cohen等(2015)使用各種邊界層參數模擬美國東南部在寒冷季節時的天氣環境，使用非局部的邊界層參數MRF與YSU在模擬3公里以下的溫度遞減率較為準確[14]。以WRF進行48小時的計算，並將計算結果和觀測值比對，期能瞭解WRF模式進行蒸發導管預報的可行性。

由於太平島皆為地面導管或無導管發生，而東沙島僅兩個時段有蒸發導管發生，高度皆在10m以下，海研一號觀測資料則皆有蒸發導管發生，故以海研一號觀測資料為主要對照組。

#### (二) 數值模擬修正後大氣折射率

使用WRF模式並挑選模擬時間自2017年12月5日12時至7日12時，共計48小時，模擬結果與2017年12月5日至7日南海季風雙島實驗整合計畫(SCSTIMX)，海研一號在南海區域所施放探空觀測資料作對照。

由各邊界層參數方案模擬結果中取出100公尺高度以下溫度、氣壓與相對濕度作修正後大氣折射率垂直剖面圖(見圖5)。由於本研究設定模式最低層高度為2.49m，至100m高度間以每近5m為區間，單一格點垂直層共計19筆資料，模擬結果顯示在近地面層WRF模式皆能表現出蒸發導管的修正後大氣折射率垂直剖面特性，尤其在12月7日12時，MYJ的模擬結果與觀測資料十分接近。

透過修正後大氣折射率垂直剖面圖來計算導管發生高度與四個時段均方根(見表1)，MRF在各時段導管高度幾乎沒有變化，MYJ在12月6日00時至7日00時導管高度幾乎沒有變化，在12月7日12時導管高度增加至50.9m，導致其RMS為三者中最高者，YSU的導管高度在四個時段中有逐漸增加的趨勢，其RMS為11.19，亦為三者中最低。

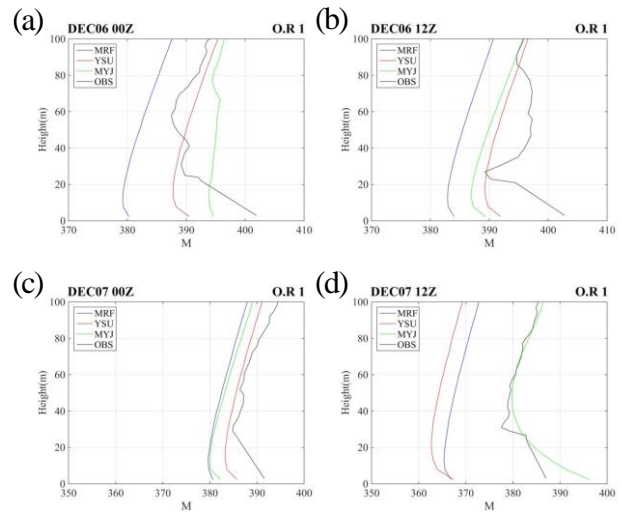


圖 5 修正後大氣折射率垂直剖面圖，其中(a)12 小時 (b)24 小時(c)36 小時(d)48 小時，圖中藍色實線為 MRF，紅色實線為 YSU，綠色實線為 MYJ，黑色實線為觀測資料。

表 1 海上蒸發導管高度實測與模擬結果比對

項目	蒸發導管高度 (m)				RMS
	12 小時	24 小時	36 小時	48 小時	
觀測	31	27	29	27	
MRF	13.27	13.25	13.23	13.19	15.35
MYJ	13.14	13.23	13.2	50.9	18.23
YSU	13.28	18.64	18.61	23.9	11.19

#### (三) Paulus-Jeske蒸發導管模式計算結果比較

將模擬結果輸入Paulus-Jeske (PJ)模式計算(見圖6、圖7、圖8)，在12月6日00時至7日00時，大部分區域蒸發導管高度在20m以下，所得模擬值與觀測值比較後，最低RMS(Root Mean Square)(見表2)為MRF方案的11.04，顯示觀測值的導管高度較模擬值高出10m以上的差距。

表2 海上蒸發導管高度觀測與PJ模式比對

項目	蒸發導管高度 (m)				RMS
	12 小時	24 小時	36 小時	48 小時	
觀測	31	27	29	27	
MRF	16.97	18.6	17.49	17.61	11.04
MYJ	5.74	12.26	11.38	5.86	20.07
YSU	14.11	13.91	12.96	19.45	13.88



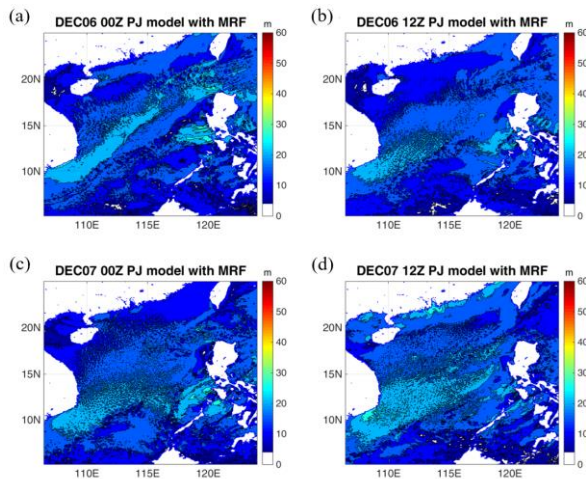


圖 6 PJ模式蒸發導管高度分布圖(使用MRF方案模擬結果)。(a)2017年12月6日00時(b)2017年12月6日12時(c)2017年12月7日00時(d)2017年12月7日12時。

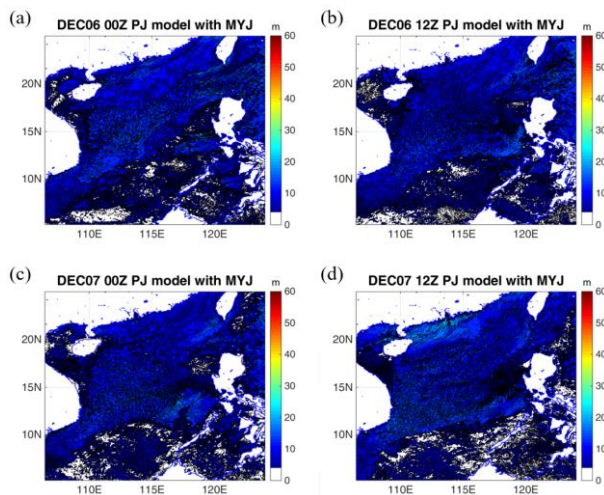


圖 7 同圖 6，但使用MYJ方案模擬結果計算。

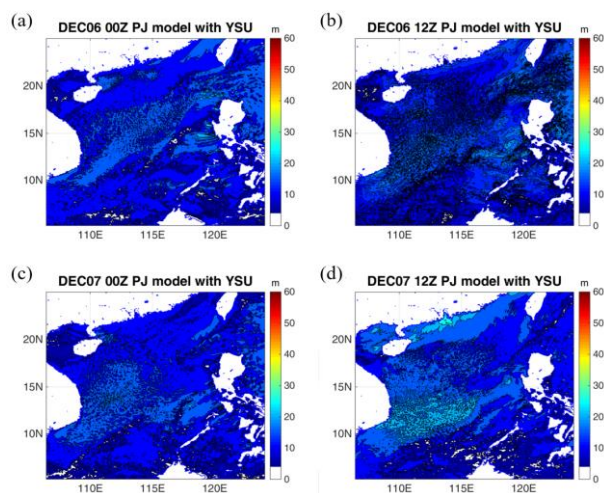


圖 8 同圖 6，但使用YSU方案模擬結果計算。

## 四、結論及未來展望

Paulus-Jeske模式為藉由近地表觀測資料來推算垂直高度的修正後大氣折射率變化，進而計算導管高度，而與觀測資料導管高度差距較大的案例中發現，如近地表的濕度雖大，但較高層的濕度變化急遽降低的話，則會造成兩者的蒸發導管高度差距甚大，顯見Paulus-Jeske模式不適用於濕度較低的天氣系統。

在數值模擬部分，WRF數值模式YSU和MYJ兩種方案，在模擬南海區域蒸發導管時表現最佳，尤其MYJ在修正後大氣折射率垂直分佈幾乎與觀測資料相同，而在模擬48小時的蒸發導管高度則以YSU所得之模擬結果最好。

而將模擬結果帶入PJ模式計算後，以MRF方案的模擬結果表現最好，惟各組均方根誤差均在11m以上，與觀測值差距甚大，PJ模式在南海環境下的準確性仍有待驗證，未來將使用不同的參數設定，並持續分析PJ模式內各項參數，以提升蒸發導管高度預報的可行性。

## 五、誌謝

感謝國立臺灣大學大氣科學系及南海季風雙島實驗整合計畫(SCSTIMX)相關團隊、海軍大氣海洋局提供觀測資料。

## 六、參考文獻

- [1] Smith, E. K. and Weintraub, S., 1953: "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies," Proceedings of the IRE, Vol. 41, pp. 1035-1037, 1953.
- [2] Dougherty, H. T. and Hart, B. A., 1976: Anomalous Propagation and Interference Fields, U.S. Department of Commerce Office of Telecommunications Institute for Telecommunication Sciences, Boulder, Colorado, pp. 9
- [3] Bean, B.R., and G.D. Thayer, 1959: "Models of the atmospheric refractive index", Proc. IRE, 47, No. 5, 740-755
- [4] Turton, J. D., Bennetts, D. A. and Farmer, S. F. G., 1988: "An introduction to radio ducting," Meteorological Magazine. Vol. 117. pp. 245-25
- [5] Babin, Steven., M., Young, G. S., and Carton, J. A., 1997: "A New Model of the Oceanic Evaporation Duct," Journal of Applied Meteorology, Vol. 36, pp. 193-204

- [6] Brooks, I. M., Goroch, A. K. and Rogers, D. P., 1998: "Observations of Strong Surface Radar Ducts over the Persian Gulf" , Journal of Applied Meteorology, Vol. 38, Issue 9, pp. 1293-1310
- [7]林博雄 楊穎堅 劉清煌 徐世裴 楊菁華 吳靜軒 游政谷 詹森 隋中興 2016:南海－海洋大陸區對流與大尺度環流交互作用：2016冬季風預實驗, 大氣科學第四十四期第四號 329-350 doi: 10.3966/025400022016124404003
- [8] Sui, C.-H., P.-H. Lin, W.-T. Chen, S. Jan, C.-Y. Liu, Y.-J. Yang, C.-H. Liu, J.-M. Chen, M.-J. Yang, J.-S. Hong, L.-H. Hsu, L.-S. Tseng, 2020: "An Overview of the SCSTIMX for studying subseasonal to seasonal variability in the SCS and Maritime Continent. Terrestrial", Atmospheric and Oceanic Sciences, DOI: 10.3319/TAO.2019.11.29.02
- [9] Hitney, H. V., Barrios, A. E., and Lindem, G. E., 1988: Engineer's Refractive Effects Prediction System(EREPS) Revision 1.00 User's Manual, Naval Ocean Systems Center, San Diego, California, U.S.A..
- [10] Paulus, R. A., 1984:Practical application of the IREPS evaporation duct model, NOSC Tech. Rep. 966, pp.68.
- [11]Paulus, R. A., 1985:"Practical application of an evaporation duct model", Radio Science, Vol. 20, pp. 887-896
- [12]Kiefer.P.J., 1941:"The thermodynamic properties of water and water vapor", Monthly Weather Review, Vol. 69,No.11
- [13] Hariprasad, K. B. R. R., Srinivas, C. V., Bagavath Singh, A., Vijaya Bhaskara Rao, S., Baskaran, R., Venkatraman, B.,2014:"Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different PBL schemes in WRF using experimental observations at a tropical site," Atmospheric Research, Vol.145-146, pp. 27-44
- [14] Cohen, A. E, Cavallo, S. M.,Coniglio, M. C. and Brooks,H.E.,2015:"A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments," Weather Forecasting, Vol. 30, pp. 591-6

