

TCo639 模式之地形重力波參數化

江建霆¹ 陳建河¹ 劉邦彥²

¹中央氣象局資訊中心

²中央氣象局科技中心

摘 要

中央氣象局之天氣模式 TCo639L72 持續不斷的改進數值預報能力，而在模式模擬的過程中會透過參數化的幫助，協助模式修正預報誤差，地形重力波參數化(Orographic Gravity Wave Parameterization)即是其中的一種。其概念為當大氣流體遇到地形，受到山脈阻擋而使流體產生一系列的重力波波動與拖曳減速作用，空間尺度橫跨數公里至數百公里，在過去諸多研究顯示，若是忽略掉重力波拖曳的影響，會導致北半球中緯度地區西風帶與平流層出現過強的風速，許多與地形之交互作用也無法被有效解析。

因此本研究將針對地形重力波參數化進行分析，分析的時間選取了 2021 年 1 月的 10 個個案，藉由垂直風剖面進行探討，而地形拖曳參數化包含了重力波拖曳(Kim & Arakawa,1995)以及山脈阻擋(Lott and Miller,1997)，初步將地形重力波拖曳(Orographic Gravity Wave Drag)以及山脈阻擋(Mountain Blocking)效應兩種參數化的影響進行分離，結果顯示 OGWD 主要影響高對流層至平流層，Mountain Blocking 則以中、低對流層為主。在充分了解各項參數化方程之作用原理後，針對其餘數進行實際預報上的影響量化，以瞭解模式對於該系數之敏感度表現，幫助建立未來調整地形重力波拖曳參數化的準則。有了對模式地形重力波拖曳參數化的概念後，針對現階段模式預報表現誤差較大的部分，利用重力波拖曳參數化的調整對預報進行改善。

關鍵字：地形重力波、山脈阻擋

一、前言

目前中央氣象局之短期天氣模式更新至 TCo639L72，而新一代 GEPS 系集預報即是透過 CWBGFS-TCo639L72 模式降解析度至 TCo383L72，搭配 SIT 海洋模組及 1Tier MOM3 預報海溫之決定性預報測試。我們知道在模式模擬的過程中，會受到海洋和地表的影響，其中模式對於地表上地形的表現，則可能受限於模式解析度的高低，或目前對於地形作用的影響了解並不充足，導致其無法完整的解析出變數受地形所影響的變化，

便可能導致北半球中緯度西風帶出現明顯過強的風速，為了改善這種情況的影響，發展出了針對地形作用之物理參數化，其概念上就是當大氣流體遇到地形，受到山脈阻擋而使流體產生一系列的重力波波動與拖曳減速作用，因此稱之為地形重力波參數化 (Orographic Gravity Wave Parameterization)。

對於先前所使用的地形重力波參數化，進行了調整所發展出的新版重力波拖曳參數化中包含了地形重力波拖曳(Kim &

Arakawa,1995)以及山脈阻擋(Lott and Miller,1997)，但目前仍未對此部分進行較完整的分析與結果，因此我們嘗試將地形重力波拖曳(Orographic Gravity Wave Drag)以及山脈阻擋(Mountain Blocking)效應兩種參數化對模式預報的影響進行分離，在充分了解各項參數化方程之作用原理後，針對其係數進行實際預報上的影響量化，以瞭解模式對於該系數之敏感度表現，幫助建立未來調整地形重力波拖曳參數化的準則概念。有了對模式地形重力波拖曳參數化的概念後，針對現階段模式預報表現誤差較大的部分，利用重力波拖曳參數化的調整對預報進行改善。

第二章將介紹模式使用的地形重力波拖曳(Kim & Arakawa,1995)，其中各項所代表的意義與原理，以及接下來敏感度實驗所選定的時間、空間範圍。第三章的結果與討論，將會呈現目前分析的表現，第四章作總結。

二、地形重力波參數化方法、實驗範圍與設定

2.1 地形重力波參數化方法

本研究所使用的地形重力波參數化方法是由 Young-Joon Kim & Akio Arakawa(1995)所提出的，主要是透過前人 Pierrehumbert(1986)與 Miller & Palmer(1986)的研究做為基礎，再加入針對地形中，山脈的凸出程度與次網格中高山的比例對方程進行修正。而 Pierrehumbert(1986)提出的方程經過修正後如下：

$$\tau_0 = E \frac{m' \rho_0 U_0^3}{\Delta x N_0} G'$$

其中 τ 代表重力波所造成的拖曳量(此亦即重力波產生層)，E 為限制整體拖曳量的控制項， Δx 為一個網格間距， m' 為根據網格內高

山比例修正項， ρ 為流體(空氣)密度，U 為風速大小，N 為 Brint-Vaisala frequency， G' 為山的凸出修正項，0 表示位在參考層，參考層為該網格地形計算出的標準山高高度。其中的控制項 E 如下：

$$E=(OA+2)^\delta ; \delta=C_E F_{r0} / F_{rc}$$

影響主要是 OA 為網格中高山的比例性(-1<OA<1，上風處為正，下方處為負)，以及 Froude number(F_{r0})， F_{rc} 為臨界的 Froude number(=1)， C_E 為常數，此研究預設為 0.8。高山比例修正項 m' 如下：

$$m'=C_m \Delta x (1+\sum_x Lh/\Delta x)^{OA+1}$$

m' 代表網格內高山的數量，主要受到地形的對稱性以及網格內高山比例所影響。

山的凸出度 G' 如下：

$$G' = \frac{Fr_0 * Fr_0}{Fr_0 * Fr_0 + a^2} ; a^2 = C_G OC^{-1}$$

OC 地形的凸出度，越大代表地形越陡峭，在參考層所產生的重力波也越大，反之則相反(0<OC<10)， C_G 為可調係數，本研究預設為 0.5。透過上述式子可算出在該層產生之重力波拖曳量，而重力波會隨高度向上(高空)傳播，因此在參考層之上依據 Miller & Palmer(1986)提出如下：

$$\tau = \frac{m}{\Delta x} \rho N U (h^2 d) ; h^2 d = \frac{m \tau_{i+1}}{\Delta x \rho_i N_i U_i}$$

i 表示為不同大氣層，假設 $\tau_i = \tau_{i+1}$ ， $h^2 d$ 為波動在不同層的位移(振幅)，即可求得各層的拖曳，直到波動破碎為止，其判斷的依據參考 Lindzen (1981) 如下：

$$Ri_m = \frac{Ri(1 - Fr_d)}{(1 + \sqrt{Ri} * Fr_d)^2}$$

當 $Ri_m < Ri_c (=0.25)$ 時會發生破碎，類似穩定度的概念。透過上述式子不斷的計算重力波拖

曳 τ ，來修正模式中過大的風速。

2.2 實驗範圍與設定

本次實驗的時間為 2021/01/10-1/19 每日的 00Z，共十個個案，預報時間為 24 小時，使用的資料為 TCo639L72 本身經過資料同化處理後之 cycle 資料作為初始場，選定的區域是喜馬拉雅山之青岡藏高原地區，經度為東經 60 度至東經 125 度，緯度為北緯 20 度至北緯 50 度(如圖 1 紅框區域)。

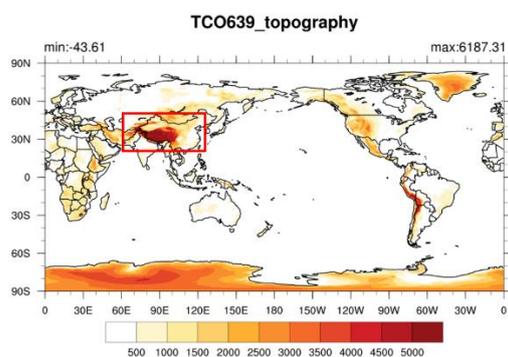


圖 1、全球地形高度圖，圖中紅色框線為實驗選定之青藏地區。(單位:m)

三、結果與討論

3.1 地形重力波之影響

首先透過 TCo639L72 預報過程中的地形拖曳作用，可以發現到影響最顯著的區域在北半球的中緯度地區(圖 2)，另外我們知道拖曳的原理是因為受到地形所導致的，因此分析了全球的地形高度，可以看到青岡藏高原一帶的地勢與其他地區對比下，相對地更為高聳與廣大(圖 1)，且在 Sandu et al.(2019)從大氣角動量的觀點進行研究，也同樣指出北半球中緯度地區的拖曳淨值最大，主要是因為該區域的地形造成的力矩最大所致，因此接下來將會以青岡藏地區作為主要的分析區域。

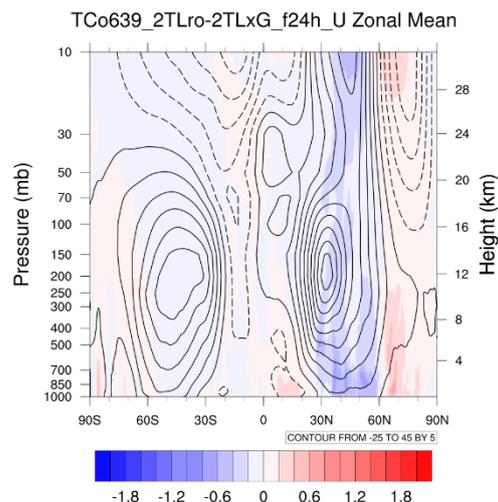
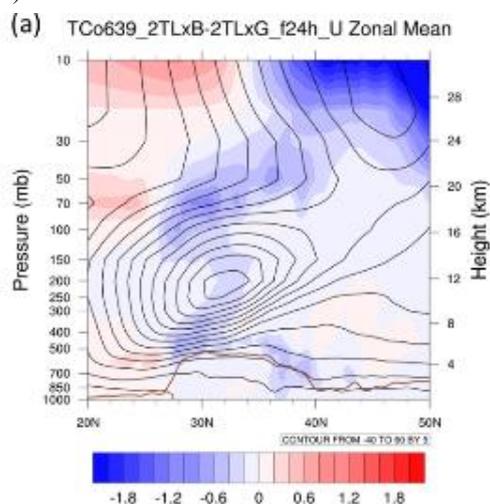


圖 2、地形拖曳參數化影響之全球平均 U 風垂直剖面圖(單位:m/s)。等值線為控制組，色階為無地形參數化之差值。

針對青藏高原地區進行分析發現，地形拖曳減速相當的明顯，但同時包含了兩種地形拖曳作用，為了瞭解各自的影響大小與區域，我們將兩種地形拖曳作用區分開(如圖 3)。如此一來便可以清楚發現到，重力波拖曳的作用在高對流層與低平流層(約 100hPa 以上)對於風速的減速相當大，對於中、低對流層也有部分的影響(如圖 3a)，而 Mountain Blocking 則恰好相反，主要影響在中、低對流層(約 200hPa 以下)受到山勢阻擋造成的減速最顯著，但亦會有部分影響至平流層(如圖 3b)。



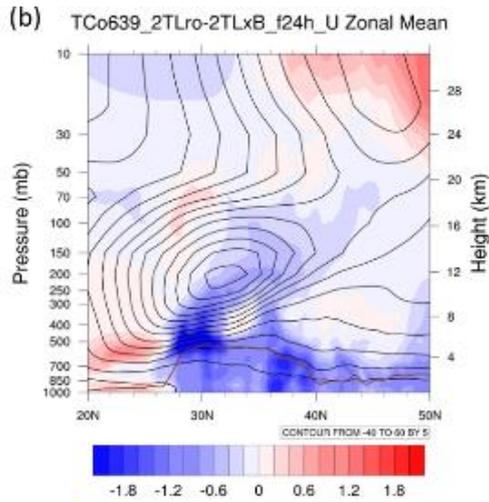


圖 3、地形重力波拖曳與山脈阻擋影響之 U 風垂直剖面圖(單位:m/s)，圖中咖啡色線為青藏高原之平均高度(取 90°W 至 105°W 為代表)。(a) 地形重力波拖曳之影響，(b)山脈阻擋之影響。

3.2 各係數之敏感度測試

為了避免各項因素彼此干擾，實驗設計固定只變動某一項係數進行測試，先從地形重力波參數化的部分作手，分別對 C_E 、 C_G 與 C_m 進行測試。考慮到增加山脈凸出度(OC)相關的係數 C_G ，應當能有效地加強有高山區域的重力波拖曳，然而實際上因為青藏高原地區的特徵是屬於高大且廣闊，而 OC 的計算方式是考慮到山的高、寬比值，使得青藏高原地區的 OC 值其實並不大(如圖 4)，因此過透改變 C_G 來調整 GWD 的變化並不是非常的顯著，甚至因為周圍部分網格之 OC 比青藏高原大，反而導致風剖面圖的主要變化的區域不在預期的位置(如圖 5)。 C_E 則屬於控制項 E 的部分，用於調整整體 GWD，因此調整 C_E 會讓風剖面整體風速共同增、減，並無法改善特定區域。

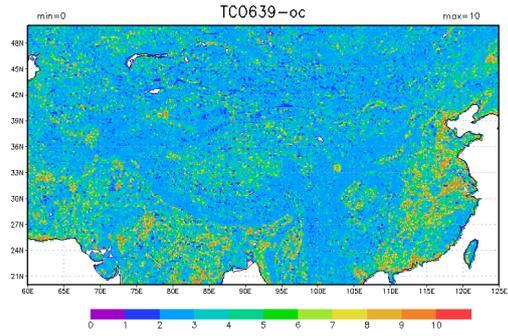


圖 4、地形重力波參數化中使用之地形資訊(OC)，地形凸出度(尖銳度)，為比值無單位。

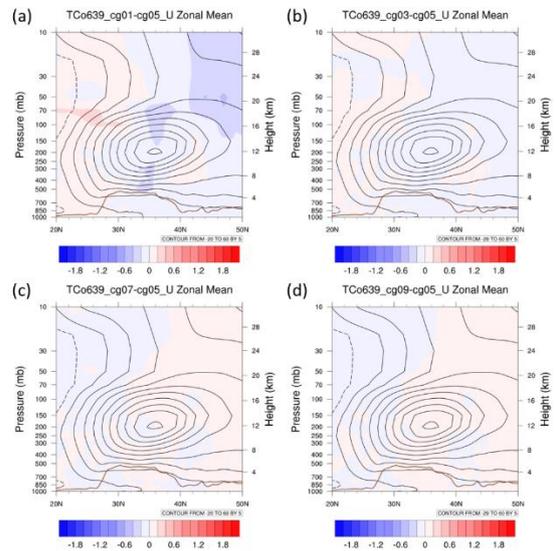


圖 5、測試係數 C_G 之敏感度實驗，此實驗時間為 2020/10/05-2020/11/04 共 30 個案。(a)至(d)依序為 0.1、0.3、0.7、0.9 與控制組 ($C_G=0.5$)之差值。

但 C_m 的部分則有不一樣的結果， C_m 除了控制地形對稱性(OA)外，還包含地形中高山的比例($\sum_x Lh/\Delta x$)，也就是在該網格中有多少比例的地形是屬於有效的高山地形，而青藏高原地區因為屬於高原，此一地形資訊的比值大多趨近於 1(如圖 6)，因此透過調整此係數能有效的加強西藏地區參考層的拖曳，再透過重力波向上傳往高層，讓地形上方的高對流層與低平流層達到風速增、減的效果(如圖 7)。

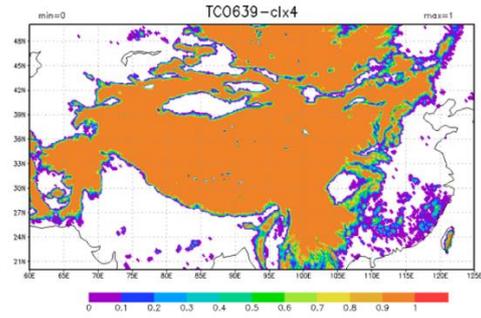


圖 6、地形重力波參數化中使用之地形資訊(網格中高山的比例)，為比值無單位。

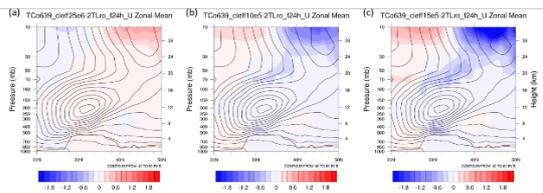


圖 7、測試係數 C_m 之敏感度實驗(單位:m/s)。(a)至(c)依序為控制組乘上 0.5、2、3 倍與控制組($C_m=0.5e-5$)之差值。

四、結論

透過將 GWD 中的 C_m 調整為兩倍，能讓原先平流層過大的風速大幅的降低，雖然目前的表現風速仍偏強，但此結果顯示了能夠透過 C_m 的調整改善此部分(如圖 8)，另一個問題是中、低對流層風速仍偏強，高對流層則偏弱，這部分仍需要其他更多的測試，像是嘗試調整 Mountain Blocking 來測試中、低層對流層的反應，但如同先前提及的，Mountain Blocking 的調整或多或少同時也會影響到高層的 GWD，因此需要更為謹慎的測試。

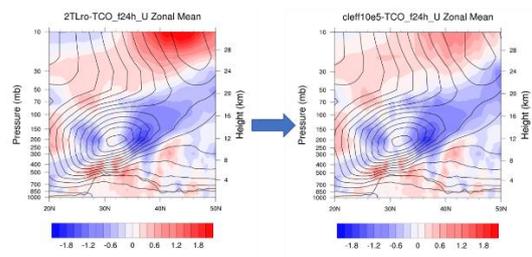


圖 8、調整 GWD 後改善平流層風速過大之 U 風垂直剖面圖(單位:m/s)。

另一個探討的問題是，因為 GWD 造成的拖曳作用主要影響高對流層至平流層的風場，因此分析的部分著重於 U 風的偏差，在其他變數與層場沒有過多的著墨，但就目前調整 GWD 的部分在其他變數與層場似乎沒有很顯著的改變，可能的原因除了確實影響不大之外，另一可能是預報時間的關係，我們分析的結果都是 24 小時的表現，但誤差的結果實際上會隨著預報時間的拉長而逐漸變大，因此之後能夠嘗試探討長時間與其他變數的預報影響。

後續工作會繼續以調整 TC0639 的地形參數化為主，期望找到一個合理且較理想的狀態，在瞭解各個係數的變化影響後，不同模式會因為解析度(網格數)的差異，導致同樣的變量卻產生不同的變化，因此會針對 GEPS 所使用的 TC0383 的地形參數化部分來進行分析，為考量到 GEPS 是需要跑長時間的系集，因此除了原先重點檢視的風速 bias 以外，風速以外的其他變數與層場也會加入考量。

參考文獻

- Hong, S.-Y., Choi, J., Chang, E.-C., Park, H., & Kim, Y.-J., 2008: Lower-tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model. *Weather and Forecasting*, 23, 523– 531.
- Kim, Y. J. and Arakawa, A., 1995: Improvement of Orographic Gravity Wave Parameterization Using a Measoccale Gravity Wave Model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875-1902.
- Sandu, I., Niekerk, A., Shepherd, T. G., Vosper, S. B., Zadra, A., Bacmeister, J., Beljaars, A., Brown, A. R., Dörnbrack, A., McFarlane, N., Pithan, F. and Svensson, G., 2019: Impacts of orography on large-scale

atmospheric circulation. *Climate and Atmospheric Science.*, 2. 10.

Van Niekerk, A., Shepherd, T. G., Vosper, S. B. & Webster, S., 2016: Sensitivity of resolved and parametrized surface drag to changes in resolution and parametrization. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 142, 2300–2313.

Van Niekerk, A., Sandu, I., & Vosper, S., 2018:

The circulation response to resolved versus parametrized orographic drag over complex mountain terrains. *J. Adv. Model. Earth Syst.*,10.

<https://doi.org/10.1029/2018MS001417>.