

海洋邊界層頂高度(MBLH) 技術報告文件

中華民國 114 年 12 月

1. 前言

邊界層高度 (Planetary Boundary Layer Height, PBLH) 是連結大氣環流以及雲演變的關鍵物理量。它不僅調控動量、熱量與水氣的垂直混合，也會影響污染物的累積與傳輸，其中，海洋邊界層高度 (Marine Boundary Layer Height, MBLH) 因受海氣交換過程影響，與層雲的形成機制有高度密切相關。Karlsson et al. (2010) 指出，在中緯度與副熱帶地區，大範圍層雲的雲底高度與 MBLH 具有高度相關性；在數值模式中，MBLH 亦常被用作洋面雲高的代表。因此，準確掌握邊界層高度對於天氣診斷、數值天氣模式的預報能力以及空氣品質評估皆具有關鍵意義。

然而，PBLH 並非可直接觀測的物理變數，而是一種需透過間接方法加以診斷，其結果常隨大氣環境與方法選擇而有所不同。常見的判定方式包括以 Richardson 數 (Ri) 為指標 (Grachev et al., 2013; Zhang et al., 2014)，或利用溫度、水氣剖線與雲頂高度等突變層界定 (Von Engelmann and Teixeira, 2013)。雖然在中緯度地區各方法差異相對較小 (平均 1 - 1.5 公里)，但在熱帶低緯度地區則差異顯著 (0.5 - 3 公里)，其中，以折射率或比濕為基礎的診斷的方式易受低層水氣干擾，而使用 Ri 方法則較接近雲底高度。除了方法不一致外，全球觀測資料的不足亦使得建構長期且廣域的 PBLH 統計分析充滿挑戰。

掩星觀測 (Global Navigation Satellite System - Radio Occultation, GNSS RO) 因具全球分布均勻、垂直解析度高，且相對不受天氣型態、地理位置與日夜變化影響，近年逐漸被應用於 PBLH 的診斷 (Guo et al., 2011; Ao et al., 2012; Xie et al., 2012; Ho et al., 2014)。研究顯示，利用 GNSS RO 折射率 (N) 剖線變化判定之 PBLH 與探空資料診斷結果，具有高度相關 (Basha and Ratnam, 2009)，而利用偏折角 (BA) 的垂直變化亦能有效揭示邊界層頂位置 (Sokolovskiy et al., 2006, 2007)。不過，RO 的水平解析度約為 100 公里，對於受地形與熱通量驅動影響較大的陸地區域適用性有限，目前主要應用於洋面 (Guo et al., 2011; Chien et al., 2016)。

基於上述背景，本研究發展一套多變數輔助診斷方法，以 GNSS RO 偏折角

的不連續變化為主要依據，並輔以折射率及水氣壓(V_p)的變化作為輔助條件，以提升 MBLH 判定的可靠性。此方法不僅能減少使用單一變數診斷所帶來的不確定性，也有助於探討不同大氣環境對 RO 觀測資料的影響，進一步為高階大氣加值產品之開發奠定基礎。

2. 研究背景與方法說明

本研究參考 Sokolovskiy 等人 2007 年的研究，提出一套以偏折角 (Bending Angle, BA) 剖線的梯度與斜率變化(maximum peak, mxp index)為核心的多變數輔助判定方法：

1. 主要指標 (mxp_BA)

- 定義： $\text{mxp_BA} = \text{dBA} \times \frac{\text{dBA}}{\text{dz}}$
- 含義：mxp_BA 的極大值對應於氣溫與水氣的急遽變化，使折射率出現不連續，RO 折射率剖線在此高度產生明顯偏折，即視為邊界層頂 (PBLH)。

2. 輔助指標

為提高可信度，另加入兩種輔助判定：

- mxp_N：以折射率 (N) 為基礎，定義 $\text{mxp_N} = \text{dN} \times \frac{\text{dN}}{\text{dz}}$ ，對應高度記為 N_PBLH_ref。
- mxp_Vp：以水氣壓 (Vp) 與位溫 (θ) 剖線為基礎，先篩選符合 $\frac{\text{dN}}{\text{dz}} < -50 \text{ km}^{-1}$ 且 $\frac{\text{d}\theta}{\text{dz}} \geq 0$ 的區域，再於此範圍內取最大水氣遞減率 (dVp) 的高度，記為 Vp_PBLH_ref。

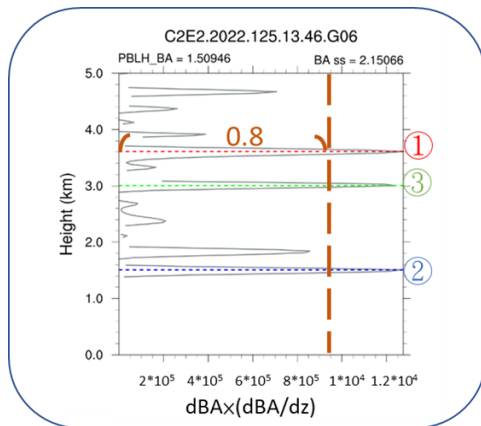
3. 搜尋範圍與異常定義

- 僅搜尋 0.15 - 4 公里範圍，以符合海洋邊界層物理特性。
- 高於 4 公里的極值另定義為 BA peak，代表 RO 訊號傳輸遇到強不連續層的高度。

4. 判定流程

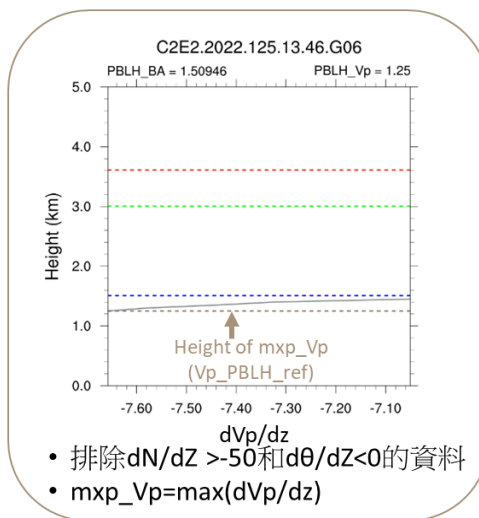
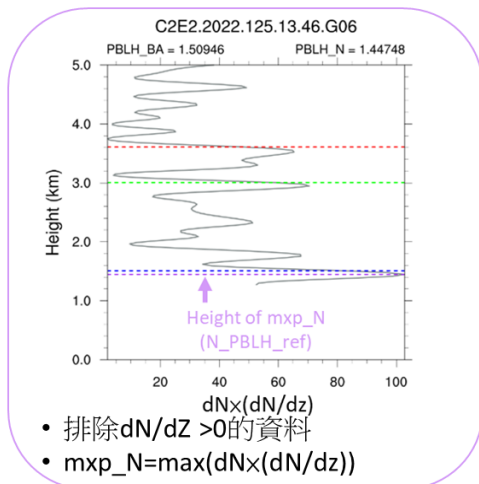
- 取 mxp_BA 最大值 0.8 倍以內的前三名作為候選高度。
- 若僅有一個值落在此範圍，直接定義為 PBLH。
- 若有多個候選值，依序比對：
 - 與 N_PBLH_ref 差異 < 500 公尺，定義為 PBLH。
 - 若不符合，再與 Vp_PBLH_ref 比對，條件同上。
 - 若皆不符，則該個案不定義 PBLH。

輔助條件的計算方法與篩選流程如下方流程圖(圖 1)所示。



比對對象數量

- 排除 $dBA/dz > 0$ 的資料
- 取得 $dBA \times (dBA/dz)$ 由大至小的前三名做為比對對象
- 未達最大值的0.8倍，則剔除



超過1個

只有1個

與
mxp_N
的高度
(**N_PBLH**
_ref)
比對

差異大於
0.5公里

差異小於
0.5公里

PBLH

與
mxp_Vp
的高度
(**Vp_PBLH**
_ref)
比對

差異大於
0.5公里

不定義**PBLH**

- 1) 若比對對象僅有一名，則為獨佔組，此高度即為**PBLH**，超過一名則進入比對流程
- 2) 將三名比對對象的高度與**N_PBLH_ref**比對，最接近且差異小於0.5公里即為**PBLH**
- 3) 若無符合，則再與**Vp_PBLH_ref**比對，最接近且差異小於0.5公里即為**PBLH**
- 4) 與**mxp_N**和**mxp_Vp**的高度的差異皆大於0.5公里，則不定義**PBLH**

圖 1 PBLH 產品產製流程圖。

為評估本產品之特性，本研究採用來自 TACC 網站所下載的 RO 觀測資料 (TDPC-atmPrf)，分析期間為 2021 年 7 月至 2022 年 6 月，並以此進行 PBLH 統計特性檢驗。作為比對依據的探空觀測資料取自 TDPC-sonPrf。其匹配條件設定如下：

空間條件：RO 與探空觀測點的水平距離差異小於 100 公里；

時間條件：觀測時間差異在 ± 3 小時以內。

探空觀測資料經由溫度與水氣資料診斷所得的 PBLH，被視為參考值，用於校驗 RO 所產製的 PBLH 產品。兩者之間的差異於本研究中定義為「誤差」。需特別注意的是，探空與 RO 觀測在水平解析度上存在差異，且兩者在時間與空間上無法完全匹配。因此，進行全球範圍的大規模統計比對時，誤差在所難免。

本文件所提供之分析結果，僅呈現基於不同觀測資料判定之 PBLH 的統計差異特性。

3. 資料分析

圖 2 則為 2021 年 7 月至 2022 年 6 月福衛七號全球 R0 觀測資料使用本研究發展之多變數方法所判讀的 MBLH 全球分布，單位為公里。

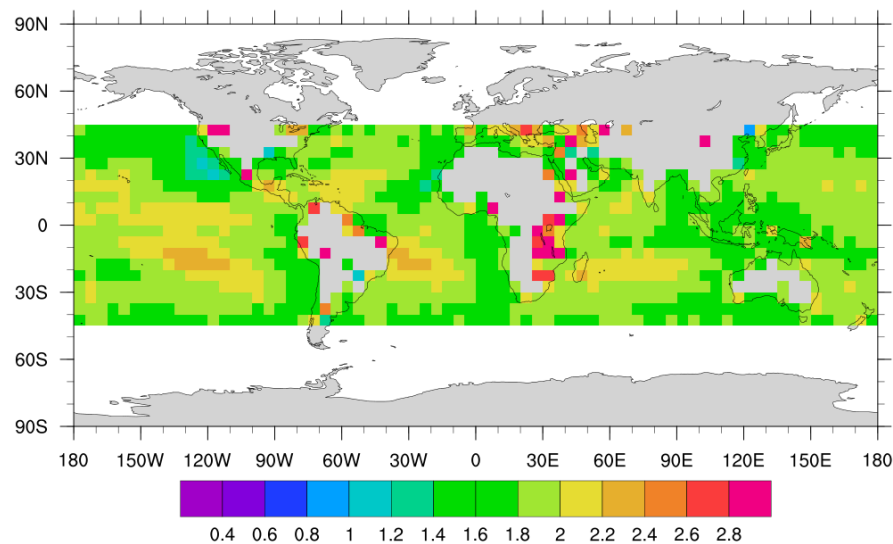


圖 2 2021 年 7 月-2022 年 6 月福衛七號全球 R0 觀測資料所判讀的邊界層頂高度(距離海平面高度)，單位為公里。

另參考 Ao 等人 2012 年提出之方法，提供邊界層清晰度指標(sharpness index)以評估邊界層結構的明顯程度，可作為個案分析或特定議題統計之篩選依據(剔除 $dBA/dz > 0$ 資料)。其計算方式如下：

$$PBLH \ BA_sharpness = \frac{x_{pblh}}{x_{rms}}, \quad x = \frac{dBA}{dz}$$

此指標的概念在於比較邊界層頂位置的偏折角變化量，與該筆資料 5 公里以下平均偏折角變化量之比值。換言之，它反映了溫度與水氣的不連續程度是否顯著到足以被視為邊界層頂。以一年期間所有可產製 PBLH 產品的個案進行統計，結果顯示四分位數為 2.2，中位數與平均值均為 2.5，後四分位數為 2.8。

根據 sharpness 的全球分布圖（圖 3），MBLH 結構清晰的區域主要位於中緯度海洋層積雲廣泛生成的地區；相較之下，熱帶地區的 MBLH 對應之折射率與偏折角垂直變化則較不明顯。

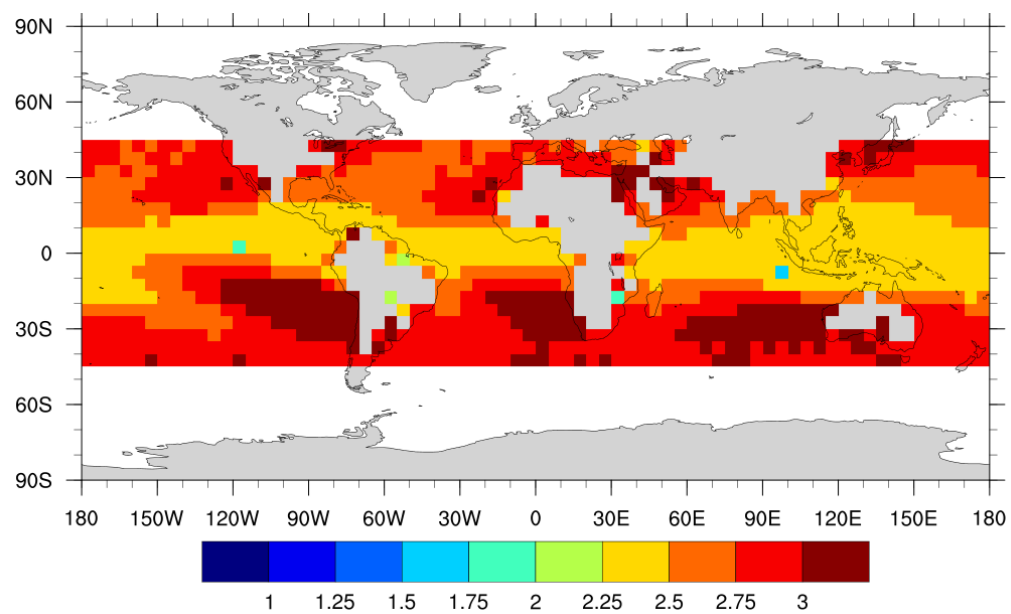


圖 3 一年期間(2021 年 7 月至 2022 年 6 月) sharpness 值之全球分布圖。

4. 參考資料

- Ao, C. O., Chan, T. K., Iijima, B. A., Li, J. L., Mannucci, A. J., Teixeira, J., ... & Waliser, D. E. (2008, June). Planetary boundary layer information from GPS radio occultation measurements. In GRAS SAF Workshop on Applications of GPSRO Measurements (pp. 123-131).
- Ao, C. O., Waliser, D. E., Chan, S. K., Li, J. L., Tian, B., Xie, F., & Mannucci, A. J. (2012). Planetary boundary layer heights from GPS radio occultation refractivity and humidity profiles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D16).
- Basha, G., and M. V. Ratnam, (2009). Identification of atmospheric boundary layer height over a tropical station using high resolution radiosonde refractivity profiles: Comparison with GPS radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.*, 114, D16101, doi:10.1029/2008JD011692.
- Chen, Y. H., Lin, C. C., Huang, C. Y., Chen, S. Y., & Hong, J. S. (2025, January). Determination of the marine boundary layer height from the GNSS RO data by using a multivariate statistical method. In *Advancement on GNSS-based Measurements and Applications* (Vol. 13268, pp. 27-30). SPIE.
- Chien, F. C., Hong, J. S., & Kuo, Y. H. (2016). Estimation of marine boundary layer heights over the western North Pacific using GPS radio occultation profiles. *SOLA*, 12, 302-306.
- Chien, F. C., Hong, J. S., & Kuo, Y. H. (2019). The marine boundary layer height over the western north pacific based on GPS radio occultation, island soundings, and numerical models. *Sensors*, 19(1), 155.
- Desroziers, G., Berre, L., Chapnik, B., & Poli, P. (2005). Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 131(613), 3385-3396.
- Garratt, J. R., (1994). *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press 315 pp.
- Gorbunov, M. E., Lauritsen, K. B., Rhodin, A., Tomassini, M., & Kornbluh,

- L. (2006). Radio holographic filtering, error estimation, and quality control of radio occultation data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D10).
- Guo, Peng, et al. "Estimating atmospheric boundary layer depth using COSMIC radio occultation data." *Journal of the atmospheric sciences* 68.8 (2011): 1703-1713.
- Jensen, Arne Skov, et al. "Geometrical optics phase matching of radio occultation signals." *Radio Science* 39.3 (2004).
- Ho, S. P., Peng, L., Anthes, R. A., Kuo, Y. H., & Lin, H. C. (2015). Marine boundary layer heights and their longitudinal, diurnal, and interseasonal variability in the southeastern Pacific using COSMIC, CALIOP, and radiosonde data. *Journal of Climate*, 28(7), 2856-2872.
- Kalmus, P., Ao, C. O., Wang, K. N., Manzi, M. P., & Teixeira, J. (2022). A high-resolution planetary boundary layer height seasonal climatology from GNSS radio occultations. *Remote Sensing of Environment*, 276, 113037.
- Karlsson, J., Svensson, G., Cardoso, S., Teixeira, J., & Paradise, S. (2010). Subtropical cloud-regime transitions: Boundary layer depth and cloud-top height evolution in models and observations. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(9), 1845-1858.
- Liu, H., Kuo, Y. H., Sokolovskiy, S., Zou, X., Zeng, Z., Hsiao, L. F., & Ruston, B. C. (2018). A quality control procedure based on bending angle measurement uncertainty for radio occultation data assimilation in the tropical lower troposphere. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(10), 2117-2131.
- Medeiros, B., A. Hall, and B. Stevens. (2005). What controls the mean depth of the PBL? *J. Climate*, 18, 3157 - 3172.
- Ratnam, M. V., & Basha, S. G. (2010). A robust method to determine global distribution of atmospheric boundary layer top from COSMIC GPS RO measurements. *Atmospheric Science Letters*, 11(3), 216-222.
- Sokolovskiy, S., Y.-H. Kuo, C. Rocken, W. S. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes. (2006). Monitoring the atmospheric boundary layer by GPS radio

- occultation signals recorded in the open-loop mode. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L12813, doi:10.1029/2006GL025955.
- Sokolovskiy, S., C. Rocken, D. H. Lenschow, Y.-H. Kuo, R. A. Anthes, W. S. Schreiner, and D. C. Hunt. (2007). Observing the moist troposphere with radio occultation signals from COSMIC. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18802, doi:10.1029/2007GL030458.
- von Engel, A., J. Teixeira, J. Wickert, and S. A. Buehler, (2005). Using CHAMP radio occultation data to determine the top altitude of the planetary boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06815, doi:10.1029/2004GL022168.
- von Engel, A., & Teixeira, J. (2013). A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data. *Journal of Climate*, 26(17), 6575–6590.
- Zeng, Zhen, et al. "Representation of Vertical Atmospheric Structures by Radio Occultation Observations in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere: Comparison to High-Resolution Radiosonde Profiles." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 36.4 (2019): 655–670
- Zhang, Y., Gao, Z., Li, D., Li, Y., Zhang, N., Zhao, X., & Chen, J. (2014). On the computation of planetary boundary-layer height using the bulk Richardson number method. *Geoscientific Model Development*, 7(6), 2599–2611.