

雷射雲幕儀應用於台灣各種地貌之混合層高度量測

呂佳穎¹ 林博雄^{1*} 李育棋² 游志淇²

¹國立臺灣大學大氣科學系

²中央氣象局

(中華民國一〇五年一月十八日收稿；中華民國一〇五年六月十四日定稿)

摘 要

環境工程應用上常以 Holtzworth 方法推估混合層高度，據此台灣常利用中央氣象局板橋探空站和空軍屏東機場探空站每日 00 UTC 和 12 UTC 施放的無線電探空資料，配合當地氣溫推估混合層高度。然而台灣無線電探空儀施放時間，剛好是當地大氣邊界層日夜交替過渡期。學術界在實驗計畫中應用繫留氣球，或聲波雷達及氣膠光達等遙測儀器短期觀測大氣邊界層，僅能作為邊界層模式模擬、驗證的參考，無法提供長期性邊界層的連續觀測資料。本研究首先使用較低階 Vaisala CL31 雲幕儀光達(Ceilometer Lidar)與一部較高階的氣膠光達(Aerosol Lidar)進行同地、同步觀測比較，以驗證 CL31 硬體性能；然後再進行 CL31 與板橋探空站無線電探空儀冬夏季節 2 個月同步觀測比較實驗，以確認 CL31 對混合層高度反演的可用性；最後於 2013~2015 年期間，將 CL31 分別在台灣不同的城市、郊區、海濱與山區作短期觀測，反演不同地貌在晴空和多雲天氣下混合層高度的日夜發展。結果顯示，透過各機場現有雲幕儀來建構台灣常態與連續性的混合層高度觀測網是可行的。

關鍵字：混合層高度、無線電探空儀、雲幕儀光達

*通訊作者：林博雄

一、前言

行星邊界層(Planetary Boundary Layer, PBL)為對流層與地表交界處，直接受到地表影響，使得 PBL 有紊流和顯著日夜變化的特性。大氣不穩定時，垂直混合作用很強，使得位溫、比濕、動量和大气污染物等垂直均勻混合，不隨高度變化，稱之為混合層(mixed layer)，一般混合層高度(Mixing Layer Height, MLH)約離地幾十公尺到 2 公里左右，常為近地面污染物排放後，向上擴散可能的最大高度。當 MLH 高度偏高時，污染物擴散空間越大而稀釋濃度；反之，混合層高度偏低時，污染物擴散垂直空間小而升高污染物濃度，因此 MLH 監測與數值模擬，是 PBL 研究與應用領域的重要議題(Sokhi, 1998)。

美國海洋大氣總署 Earth System Research Laboratory 轄下的 Physical Science Division/PBL Group，對於 PBL 觀測設備與方法有長年經驗與發展(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/psd3/pbl/>)；台灣過去曾在各地進行短暫 PBL 觀測(洪，1994；彭，1994；吳與吳，1988；江與倪，2007；Chou *et al.*, 2007)，包括氣球無線電探空儀(radiosonde)、繫留氣球(tethered balloon)、聲波雷達(Sodar)、光達(Lidar)，PBL 數值模式模擬方面則有 MM5、WRF 相關研究(黃與莊，2002；Cheng *et al.*, 2012)。環境保護署「開發行為環境影響評估作業準則」在環境影響評估需求方面，必須在空氣品質模式輸入當地 MLH 高度參數，因此環境開發業者經常選擇中央氣象局板橋、花蓮探空測站或是空軍屏東、馬公探空儀觀測資料，或是在當地進行一年四季探空氣球臨時性施放，搭配 Holzworth 法加以估算 MLH (黃與張，2012)。

經由單一測點一天兩次的氣球探空剖面觀

測，難以得知當地 MLH 全天變化，並且台灣地區氣球探空作業時間是 08 LST (00 UTC)和 20 LST (12 UTC)，這兩觀測時段剛好是大氣日夜變化過渡時刻(transition period)，因此更難以表徵台灣地區 PBL 統計特徵。相較於一天兩次的無線電氣球探空觀測，繫留氣球探測工具的發展，有了較高時間解析度的觀測，然而氣球繫放高度受限於絞線長度、絞盤升降控制策略以及風場紊流干擾，在都會區或是空曠程度不大的環境都有操作上的風險，難以常態進行 PBL 氣象參數觀測，一些懸浮微粒研究仍透過這一平台進行低空採樣觀測(Malettoa *et al.*, 2003; Lin *et al.*, 2004)以降低研究成本。聲波雷達以及氣膠光達等遙測設備，則能提供時間連續性的 MLH 變化特徵，但是聲波雷達低頻噪音難以被居民接受；氣膠光達則屬研究等級設備，造價高昂而且設備運作前後準備程序甚高，因此僅止於研究實驗性質，以其做為常態性大氣剖面觀測用途仍有困難。

在機場天氣監測設備中，雷射雲幕儀(Ceilometer)已經在全球各機場運行多年，其構造類似氣膠光達(但波長不同)，其提供機場跑道端點上空無間斷的雲底高度監測；Eresmaa *et al.* (2006)首度討論雷射雲幕儀在 PBL 監測，Hicks *et al.* (2015)也提議美國海洋大氣總署(NOAA)和聯邦航空總署(FAA)，將全美各地機場的雲幕儀資訊進階轉化出 PBL 參數，形成大範圍空間的 PBL 監測網。

2012 年臺灣大學大氣科學系購入一套 Vaisala CL31 Ceilometer Lidar (以下簡稱為 CL31)，隨後被安排在台灣不同城市、海濱與山區地區進行短期雲霧和 PBL 觀測，下節將描述 CL31 硬體特徵以及它和中央研究院環境變遷研究中心(RCEC)氣膠光達同地校驗之結果，第三節為研究方法，

第四節則說明 2014 年 9 月及 2015 年 1~2 月 CL31 在中央氣象局板橋探空站，與氣球無線電探空同地同時比對實驗和結果；最後綜合 CL31 觀測資訊在台灣各地 PBL 觀測結果和討論。

二、CL31 特徵以及其和光達同步比對

CL31 是芬蘭 Vaisala 公司所製造的，具有 310W 功率 Class 1 M 等級的 InGaAs 雙極管雷射，提供 910 奈米(nm)波長電磁波來量測受到霾、霧、降雨和雲等反散射的光學訊號，垂直解析度為 5 公尺並且可及 25000 英尺 (7.6 公里) 高度，時間間距可調範圍是 2~120 秒。在本研究的垂直解析度為 5 公尺，時間間距為 5 秒。觀測原理為從儀器垂直向上發出雷射脈衝後，光被霾、霧、降雨和雲等散射後，被地上儀器接收，從雷射發出和接收到散射訊號的時間差，便可推測出雲高或是反散射高度。為了確認 CL31 標定 MLH 的準確性，我們安排這套 CL31 設備與 RCEC Aerosol Lidar (532 奈米、355 奈米雙波長)，於 2013 年 12 月 28 日至 2014 年 1 月 27 日期間，CL31 與 RCEC 氣膠光達 (532 奈米、355 奈米雙波長)，被安排於臺灣大學大氣科學系觀測坪，進行同地量測比對實驗，以了解這兩種雷射光達對於 PBL 內，氣膠與含水粒子偵測異同程度。圖 1 和圖 2 是這兩套 Lidar 在 2013 年 1 月 1 日和 1 月 8 日兩天同步觀測結果，結果顯示兩套設備均能偵測同一高度的雲層，但是 CL31 在白晝周期間對於陽光漫射有明顯雜訊，因此在訊號分析上必須利用滑動平均方法來降低雜訊影響。RCEC Lidar 發射功率較強而有 PBL 低層懸浮微粒較顯著訊號。透過這次同地同步比對實驗，我們可以掌握 CL31 和高階 Aerosol Lidar 在不同天氣情境下的異同程度。

三、研究方法

本研究利用 CL31 估計混合層高度的方法如下：首先參考 Münkel *et al.* (2007)和 Emeis *et al.* (2008)，先將 CL31 白晝期間原始訊號進行 30 分鐘和 160 公尺滑動平均，以處理雜訊，然後再利用梯度法及下列限制來標定 MLH：

1. 二次微分後上下兩層異號。
2. 一次微分數值小於 $-3 \times 10^{-11} \times (srad \times km)^{-1}$ 。
3. 該高度層的反散射訊號數值小於 $2 \times 10^{-8} \times (srad \times km)^{-1}$ 。

此外，CL31 在 50 m 高度以下有顯著不連續雜訊，因此本研究的 PBL 標定最低層設定在 150 m。透過以上方法進行資料分析來辨定顯著訊號梯度發生高度，由下而上一律標示兩層 MLH 做為主觀判別的參考。

經過不同天氣個案資料診斷分析後，發現夜間常有 PBL 上下分層情況，因此標示兩層 MLH 可以有利於我們了解夜間殘餘層和近地面穩定層的高度起伏情況，除此之外，雖然大部份雜訊如上描述是在 50 m 以下，但有時梯度法偵測到的第一層還是會受到影響，如圖 6(b) 18 LST 前之白色記號處，因此判斷出兩層也可以讓我們篩選出不合理的地方，而以目前的案例來看，有日照時挑第二層的高度，夜間則挑第一層，會比較符合一般的理論值以及較能排除雜訊的影響。

而本研究參考 Wang and Wang (2014)，將探空儀的溫度與濕度資料轉置成位溫(θ)、相對溼度(RH)、比濕(q)和大氣折射率(refractivity, N)四個參數，這些參數隨高度變化的梯度值再被用來判斷 MLH，其中大氣折射率(N)的計算如下 (參見 Xie *et al.*, 2012; Seidel *et al.*, 2010)：

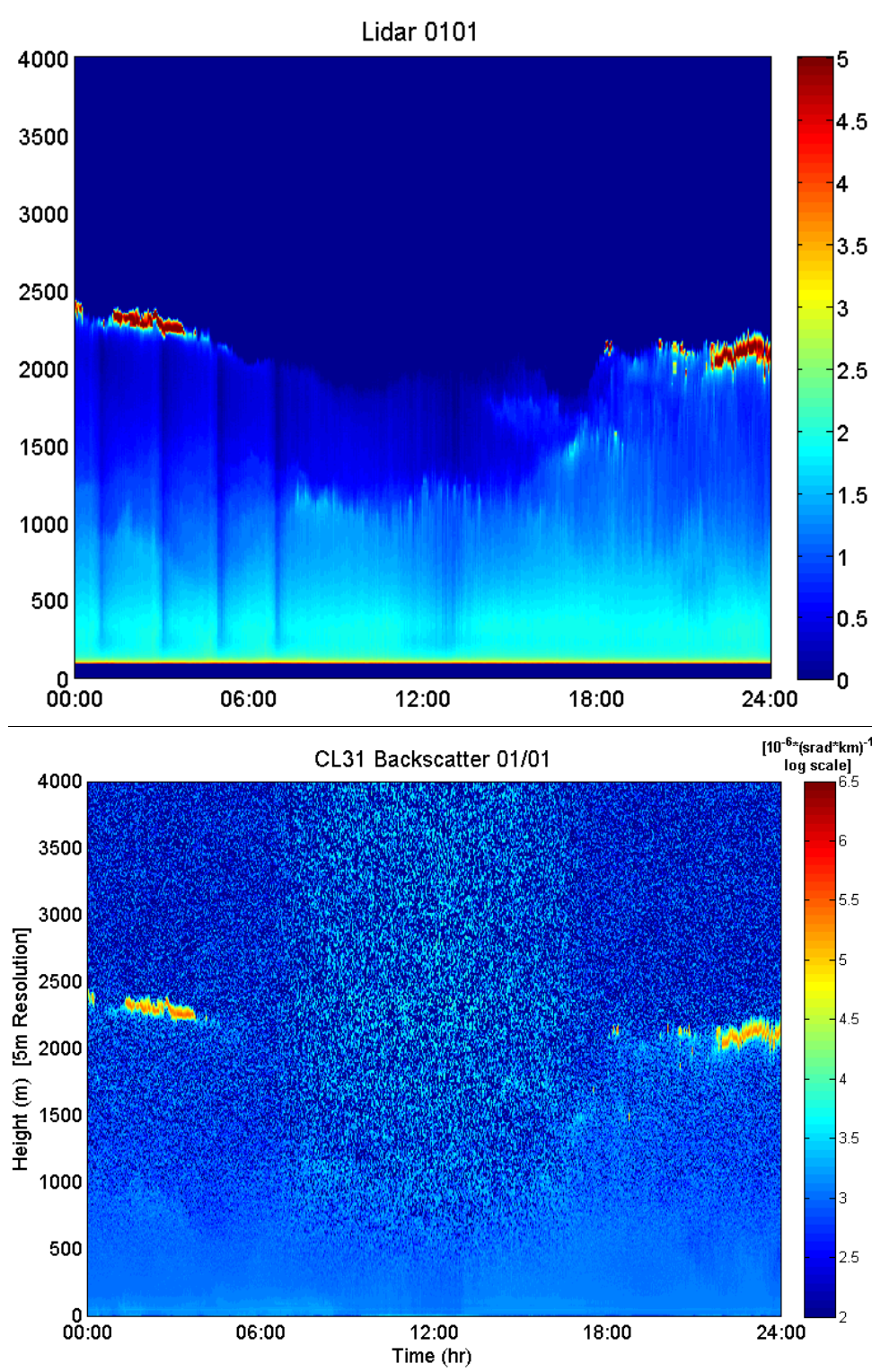


圖 1 2013 年 1 月 1 日的 (上) RCEC 的光達和 (下) CL31 的訊號比對。x 軸為地方時，y 軸為離地高度(m)。

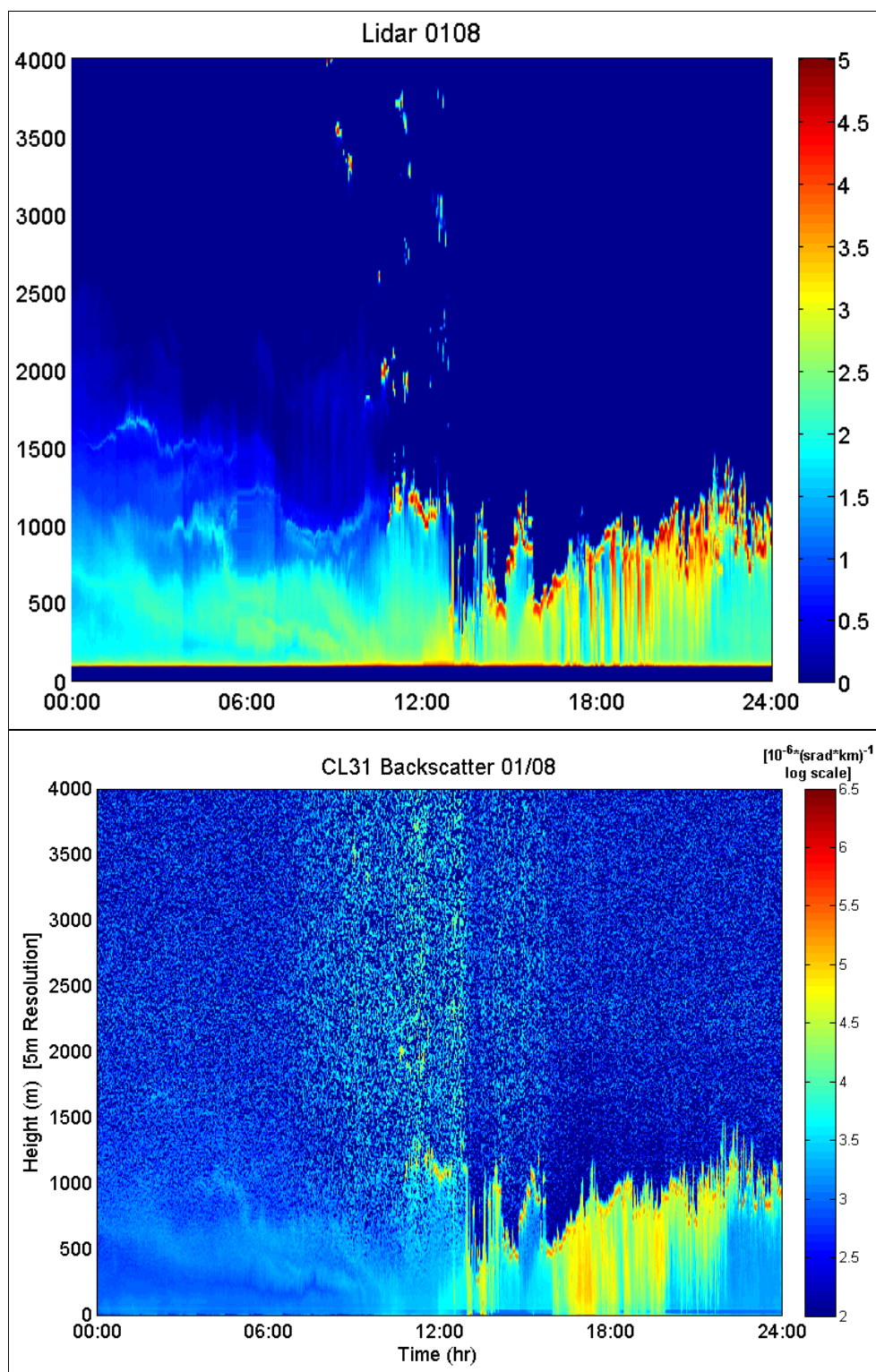


圖 2 2013 年 1 月 8 日的 (上) RCEC 的光達和 (下) CL31 的訊號比對。x 軸為地方時，y 軸為離地高度(m)。

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

其中，

P ：大氣壓力（單位 hPa）

T ：溫度（單位 $^{\circ}\text{C}$ ）

e ：水氣壓（單位 hPa）

由公式(1)可知 N 是大氣壓力、溫度和水氣含量的函數，通常被運用在電磁波傳導速率研究上。這四個參數的垂直梯度法用來綜合判定 MLH 的流程如下(Wang and Wang, 2014)：

1. 找出這四個參數垂直剖面的前十大梯度值高度。
2. 對比這四個參數梯度大值的高度（容忍誤差 $\pm 50 \text{ m}$ ），若有某一高度同時被這四種參數梯度大值標定，則將此一高度標定為 MLH。
3. 若沒有四個同時都有梯度大值的高度，則取其中三個參數同時有梯度大值的高度標定為 MLH。
4. 以上方法標定的 MLH 低於雲層高度或是當時為無雲晴朗狀態時，則不用修正雲的影響。若是標定的 MLH 高於雲層高度時，則改由雲層中梯度大處代表 MLH。

本文採用 Zhang *et al.*, (2010) 利用探空儀的 RH 剖面來判斷雲層位置，判斷條件如表 1 和圖 3 所示，當連續 300m 高度以上的 RH 都大於表中 min-RH（在地面大於 92%，到 2 km 時則需大於 90%）則被認為潮濕層，在潮濕層厚度中若有某高度的 RH 再大於表中 max-RH（在地面大於 95%，到 2 km 時則需大於 93%）時就判斷為雲層，圖 3 左圖為無雲情況，圖 3 右圖則在 1000 m~1300 m 有一層雲存在。

四、CL31 與探空儀同地探空比對實驗

為了進一步確認上一節由 CL31 訊號來標定 MLH 的概念，本文進一步進行 CL31 與無線電探空的同地同步觀測比對；實驗地點在中央氣象局板橋探空測站，分別在 2014 年 9 月 11 日~28 日（代表夏季）及 2015 年 1 月 5 日~2 月 9 日（代表冬季）兩段期間進行。實驗期間之天氣概述如下：

夏季密集觀測期間的天氣型態分為三大區段：(一) 海鷗颱風(Kalmaegi)穿越呂宋島進入南海登陸海南島（9 月 15 日~16 日），台灣位於沉降區而高溫炎熱、(二) 9 月 20 日~21 日鳳凰颱風(Fungwong)由台灣南部經東部外海向北移動，台灣受其影響各地皆有降雨、(三) 鳳凰颱風遠離，台灣北部受到弱鋒面和東北風影響。氣球探空所推估的混合層高度平均值為 788.6 公尺，雲幕儀則是 754.3 公尺，推測因 2014 年 9 月部分晴空個案受到當年度接近台灣的颱風外圍高壓沉降影響而不利於對流發展，造成混合層平均值不高。

冬季密集觀測期間的天氣型態可參見表 2，在表中統整了此一期間的天氣概況，主要天氣型態是典型的冬季氣候，包括鋒面通過、冷氣團南下、冷氣團減弱、受東北季風或是華南雲系影響，2 月上旬也出現 2015 年第一波寒流。氣球探空所推估的混合層高度平均值為 1101.8 公尺，雲幕儀則是 990.1 公尺，其可能和冬季時台灣北部經常有層雲(~1000m)覆蓋天空，若是層雲底下的大氣汙染物濃度較低以及垂直梯度不明顯，則會造成混合層高度判定會對應到雲層位置，造成 CL31 在板橋冬天所判斷的平均混合層高度比預期來的高。

表 1 利用探空的 RH 剖面判斷雲層的條件(Zhang et al., 2010)。

Altitude range	Min-RH (%)	Max-RH (%)	Inter-RH (%)
0~2 km	92~90	95~93	84~82
2~6 km	90~88	93~90	80~78
6~12 km	88~75	90~80	78~70
>12km	75	80	70

表 2 2015 年 1 月（上表）和 2 月（下表）天氣概況（表中數字為日期）。

冷氣團減弱	鋒面通過	冷氣團南下	東北季風影響	東北季風減弱
6	6	7、8		
9			10~12	
	13、14		15~19	20、21
		22~24		
25			26~29	
		30、31		

冷氣團減弱	冷氣團南下	華南雲系影響	寒流
	1		
2		3、4	
	5、6		7~9

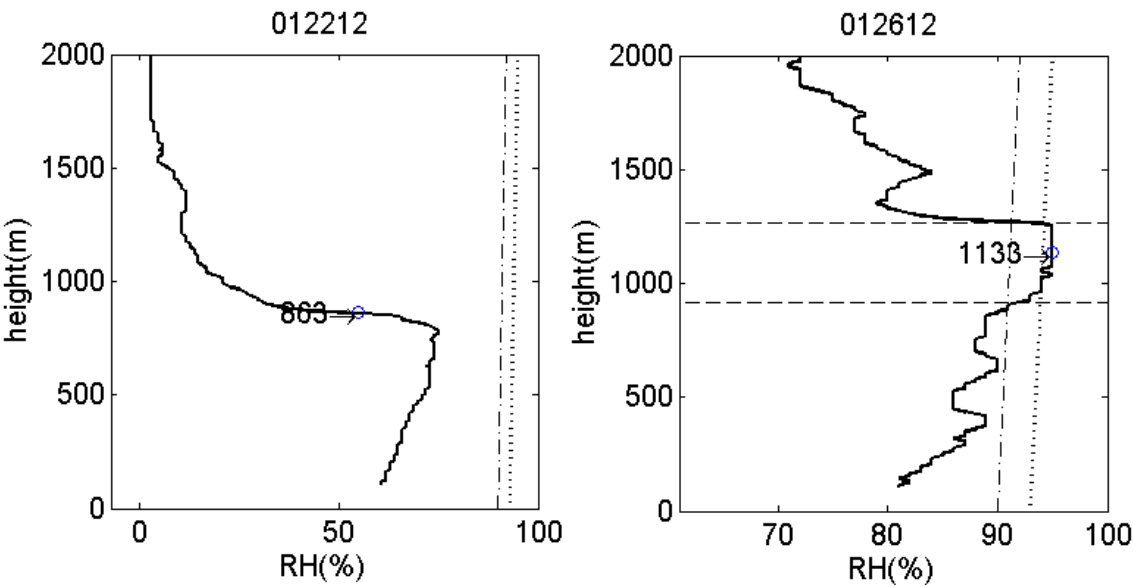


圖 3 利用 RH 探空判斷雲層位置示意圖，點虛線和點線分別為表 2 中 min-RH 和 max-RH 的判定標準線，即有連續 300mRH>點虛線該層為潮濕層，其中有層 RH>點線則判斷為雲，雲層推測位置以橫虛線框出。

由於板橋站探空於 00 UTC 和 12 UTC 施放，CL31 則是連續觀測，因此本文截取比對實驗期間 CL31 在 00 UTC 與 12 UTC 觀測訊號來反演 MLH，並與探空推估的結果比較（圖 4）。這兩季節的比對實驗結果顯示，CL31 雲幕儀和探空氣球所判定的混合層高度差距都不到 200 公尺， R^2 值也都有 0.8 以上，因此我們認為利用雲幕儀來連續監測與研判混合層起伏變化概念是可行的。

五、台灣各地 MLH 短期觀測結果

本節依據地景條件分成四種地貌，討論 2012 ~ 2015 年間無降水天氣條件，CL31 雲幕儀在台灣各地短期觀測反演所得的 MLH 特徵。

5.1 都市情境

5.1.1 台北三重

CL31 安裝於新北市三重區二重疏洪道一旁的穀保家商屋頂，觀測期間為 2012 年 11 月 9 日到 2013 年 1 月 8 日。此期間台北盆地受到冬季東北季風和冷鋒系統影響，CL31 訊號經分析後，約有 50% 受到降雨影響，無法判斷 MLH。本文將剩餘 50% 可用資料區分成晴空（一天小於 6 小時時間有雲出現）、時有 2000 m 高度以下的低雲、2000 m 高度以上有雲三種天空情境。

冬季晴空情境下三重地區 MLH 從清晨 06LST 的 200m 高度發展到 1400 m（正午），之後逐漸下降並再區分成高層殘留層（~1000 m）和低穩定邊界層（~300m）兩層特徵（圖 5a）。時有低雲的情境下（圖 5b），顯示三重全天都被 1000 m ~ 1200 m 低雲覆蓋，在 06 LST 之前是上層殘餘層和下層穩定邊界層，到 12 LST 後 MLH（雲層）可達 1100 m，雲下的熱力梯度都不明顯，直到 22 LST 以後再轉變成降到 700 m 殘餘層和 200 m 穩

定邊界層。高層有雲的情境（圖 5c），則是顯示當天 MLH 似無顯著高度變化（中午時刻約有 1000 m）；當鋒面通過降雨發生後，潮濕冷空氣會造成雲幕儀低高度訊號增強。

5.1.2 高雄澄清湖

CL31 安裝於高雄澄清湖畔的正修科技大學屋頂，觀測期間為 2013 年 1 月 20 日到 1 月 28 日。相較台灣北部冬季潮濕多雨天氣情境，此期間高雄天氣相對穩定，因此每天的 MLH 也相對明顯。這週資料區分為晴空與有低雲的兩種天空情境。晴空情境（圖 6a）顯示 MLH 在中午以後才明顯升高，並到黃昏時刻發展到最高（1000m ~ 1500 m 高度），入夜後 PBL 明顯分為上方殘餘層（~1000 m）與下方是穩定邊界層（~300 m）。低雲情境（圖 6b）則顯示 MLH 沒有顯著發展，大多維持在 200 ~ 500 m 高度。

5.2 郊區盆地

CL31 安裝於南投縣埔里鎮內某民宅透空屋頂，觀測期間為 2013 年 3 月 2 日至 4 月 30 日，這期間有 10 天受降雨影響，另有數天有霧（如 3 月 3 日整天和 4 月 15 日清晨），因此資料被區分為晴空、日出前有霧和有雲三種情況。

埔里為中部山區盆地城鎮，晴空太陽升起前，PBL 有顯著上下分層現象，上層殘餘層約在 800 m，下層穩定邊界層約在 200 m，日出後 MLH 逐漸升高到 1300 m，直到日落後 MLH 下降並轉為 400 m 高度殘餘層，並且在 200m 以下有穩定邊界層存在（圖 7a）。日出前有霧發生（圖 7b），08 LST 之前 MLH 保持在 200 m 高度以下，霧層上方因 CL31 訊號被近地表的霧水吸收與散射而相當微弱；08 LST 之後太陽加熱使得地表可感熱增加而促成近地面霧層消散，CL31 訊號顯示含水粒

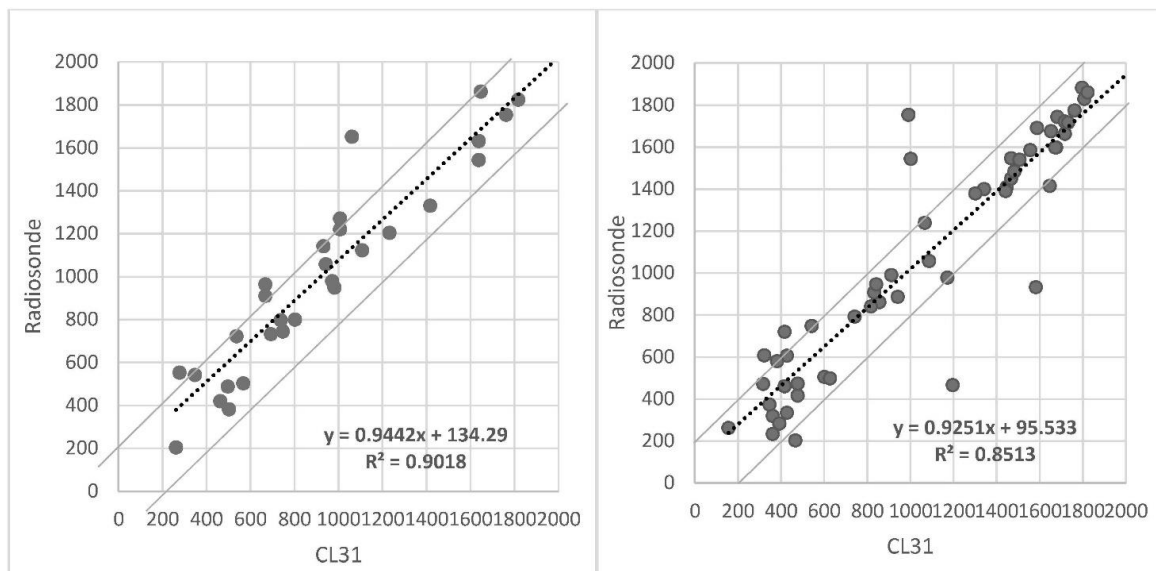


圖 4 CL31 與板橋探空觀測推估之 MLH (m) 散佈圖及迴歸方程式。(左) 2014 年 9 月, (右) 2015 年 1 月。x 軸為 CL31, y 軸為板橋探空, 灰色實線為兩者相差 200 m 的輔助線。2014 年 9 月之資料數為 29, MLH 標準差分別為 493.9 m (CL31) 和 491.1 m (探空); 2015 年 1 月之資料數為 55, MLH 標準差分別為 548.0 m (CL31) 和 549.5 m。

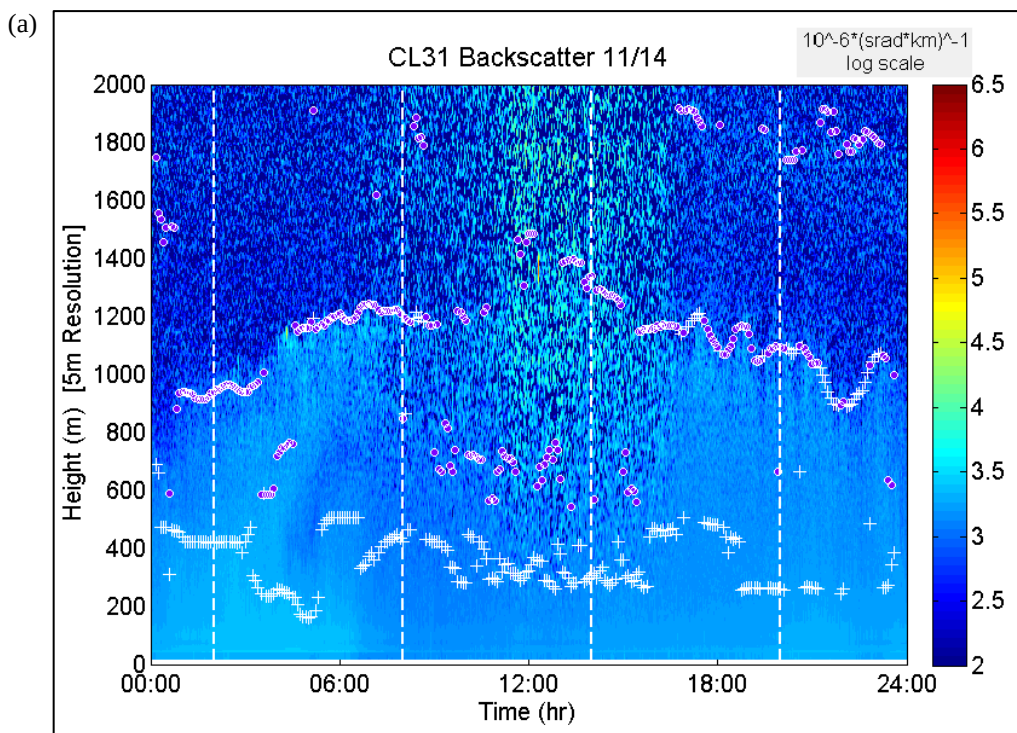


圖 5 2012 年新北市三重 CL31 觀測的反散射剖面。(a) 11 月 14 日 (晴空)。圖上標點為符合第 3 節所敘的兩層顯著梯度層高度, 橘色為雲層。

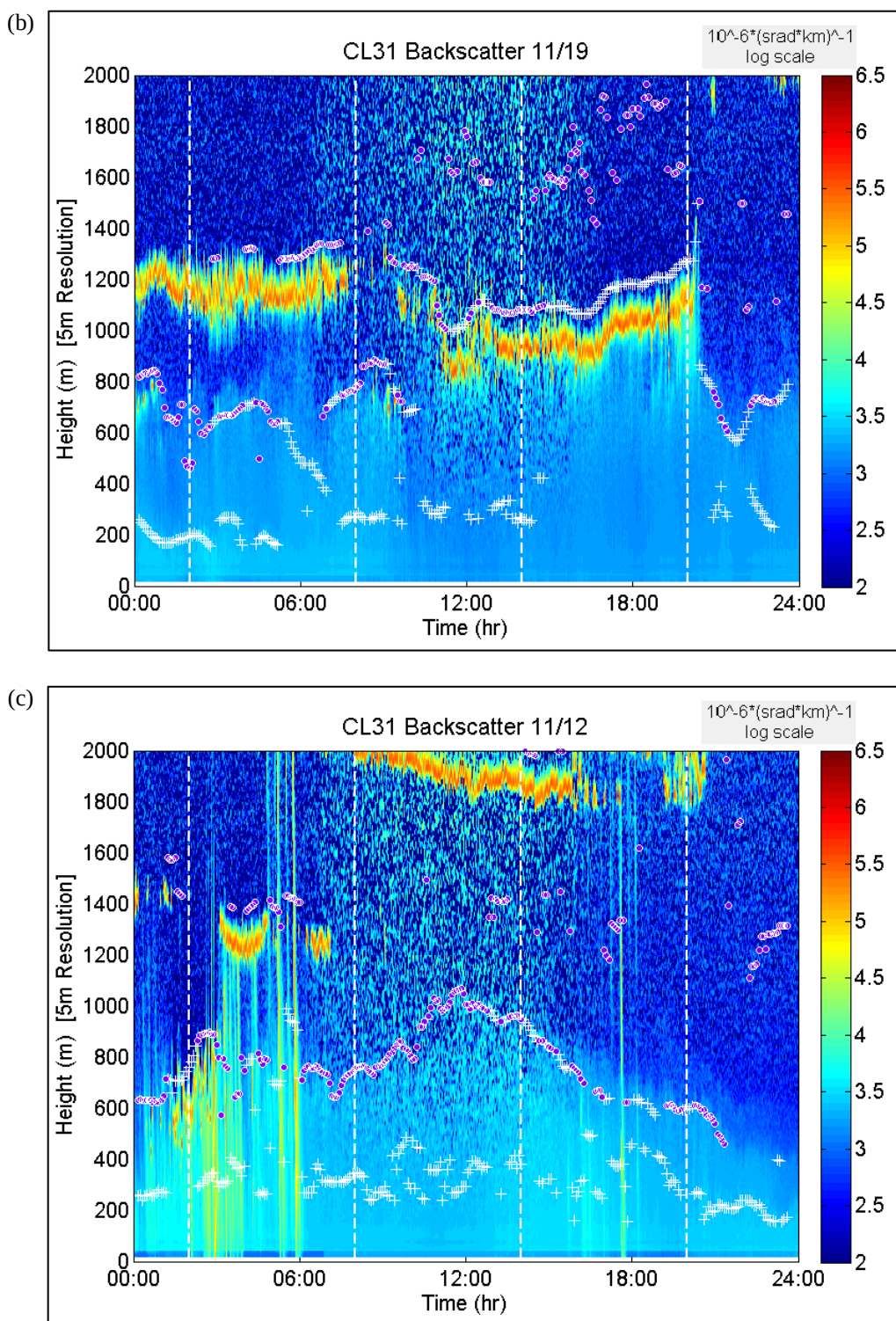


圖5 (續)。(b) 11月19日(時有低雲)，(c) 11月12日(高層有雲)。圖上標點為符合第3節所敘的兩層顯著梯度層高度，橘色為雲層。

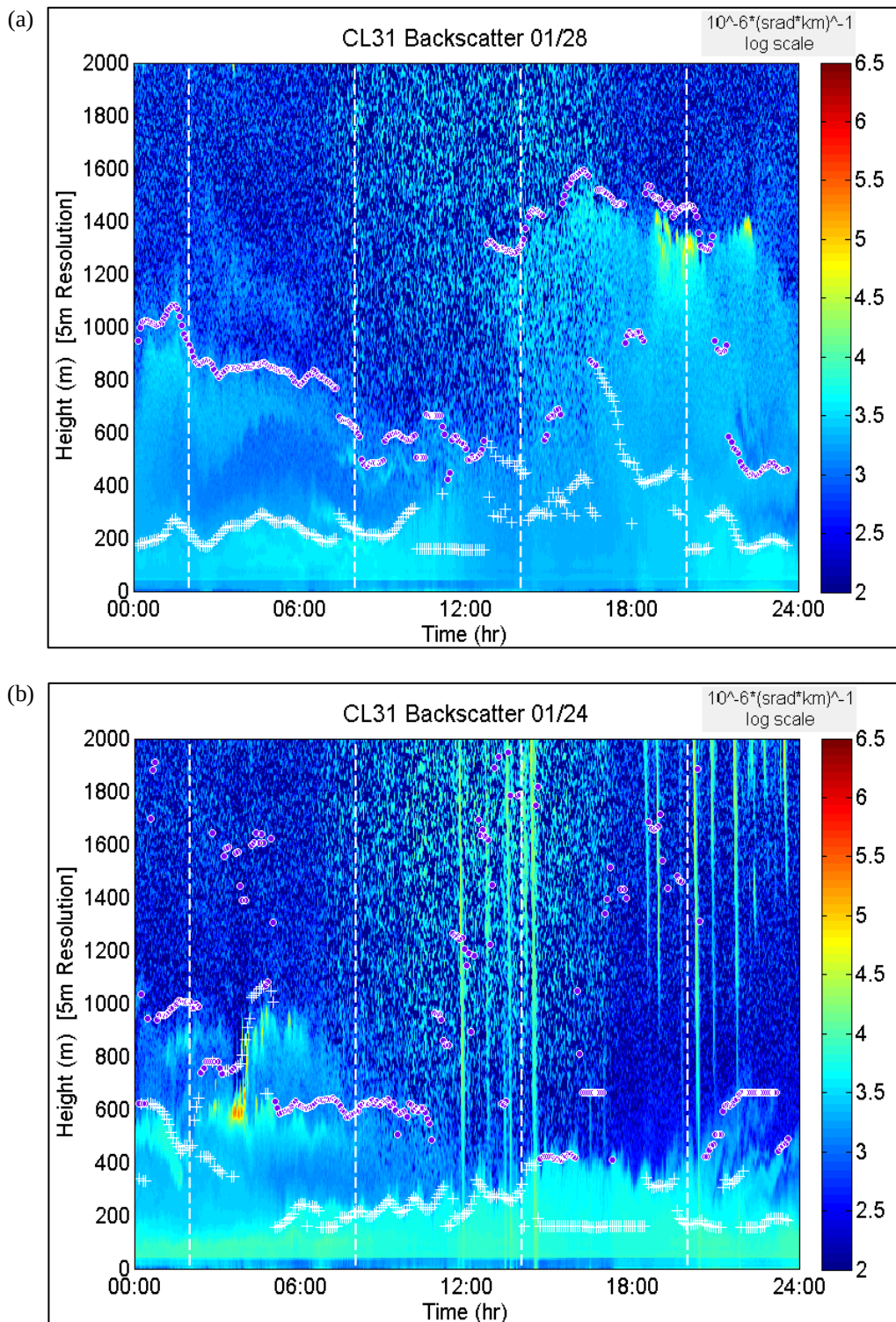


圖 6 同圖 5，但為 2013 年高雄澄清湖。(a) 1 月 28 日（晴空），(b) 1 月 24 日（有低雲）。

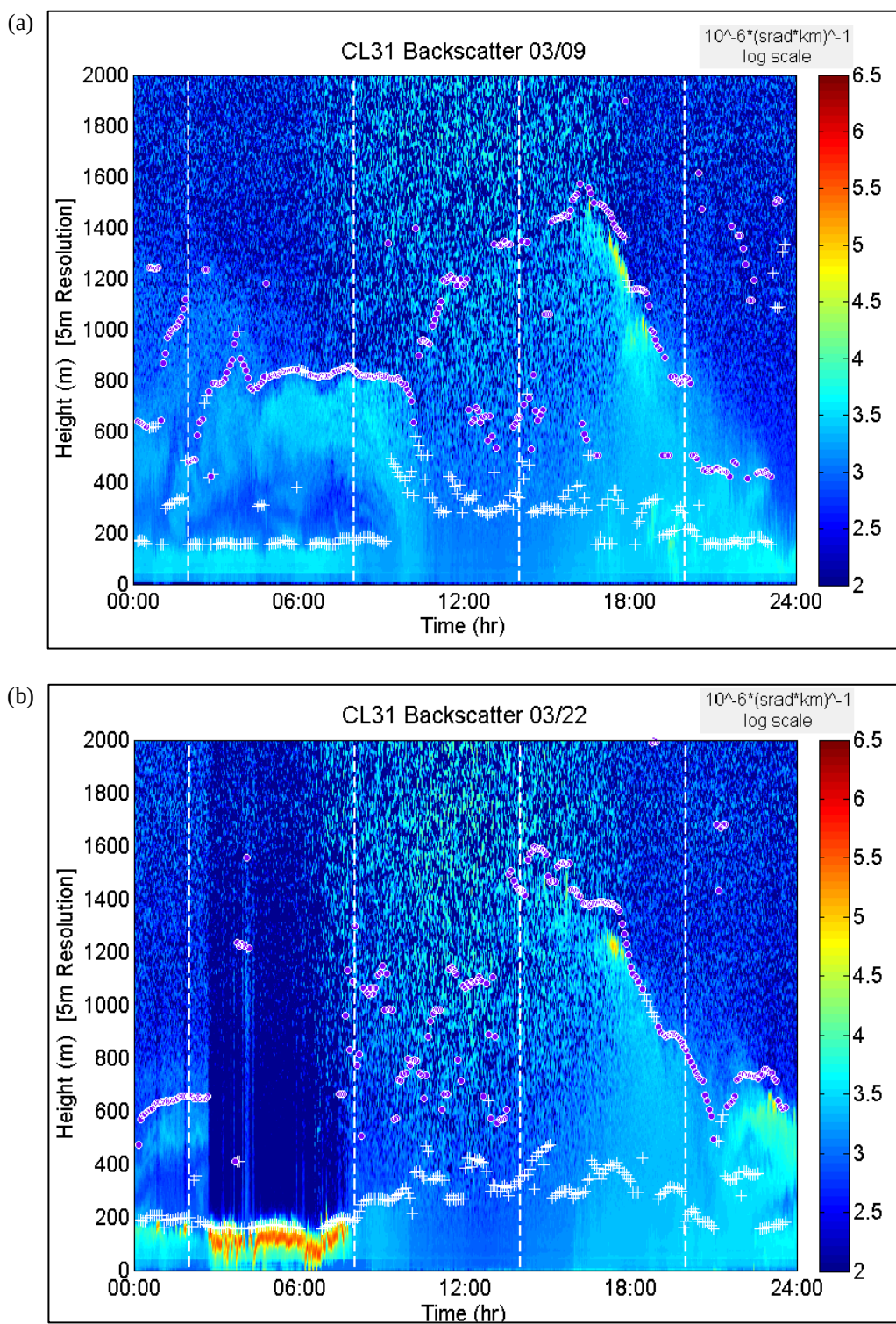


圖 7 同圖 5，但為 2013 年南投埔里。(a) 3 月 9 日 (晴空)，(b) 3 月 22 日 (日出前有霧)。橘色為雲層或霧。

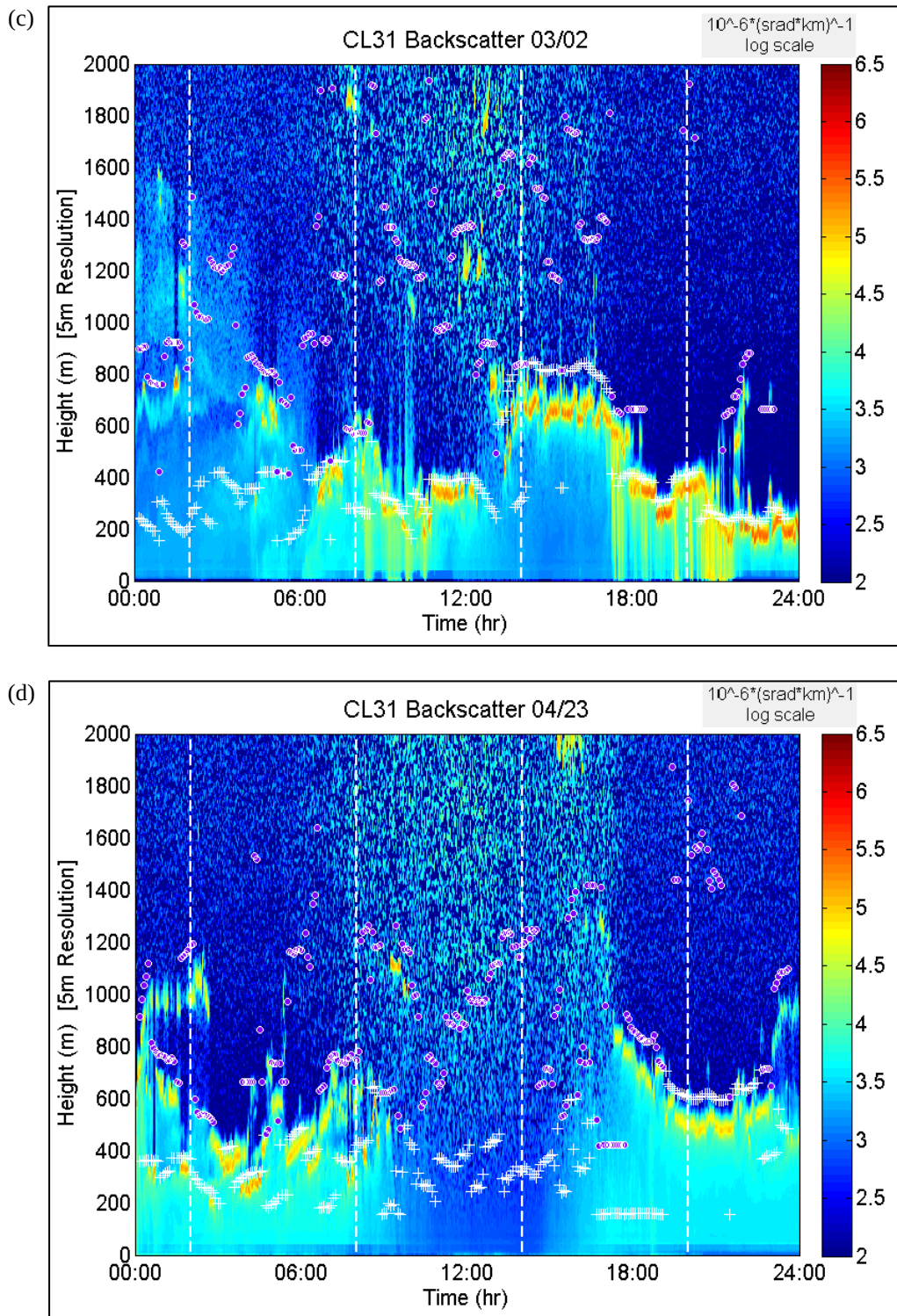


圖7 (續)。(c) 3月2日(整天有低雲)，(d) 4月23日(午間無雲)。橘色為雲層或霧。

子被熱對流擴散到較高層大氣，MLH 可達 1600 m 高度，入夜後再呈現 700 m 殘餘層和 200 m 以下穩定邊界層。埔里在 3~4 月間，雲的高低和持續時間沒有一定特徵，因此將有雲天氣再區分成整天有低雲和午間無雲兩種情境。3 月 2 日整天多有 800 m 高度以下的低雲，MLH 被標定在雲層中或之上（圖 7c）；4 月 23 日則是太陽升起前為低雲（400 m），但中午無雲時，MLH 上升到 1200 m（圖 7d），其他午間無雲個案 MLH 也能達到 1800 m 高度（圖未示）。

5.3 海濱

5.3.1 苗栗苑港

CL31 安裝於苗栗縣苑裡通霄之間的苑港，觀測期間為 2014 年 2 月 9 日到 3 月 20 日。此時段苑港受到大陸冷氣團和東北季風影響。觀測期間除了 5 天受降雨影響，其他時間苑港天氣可區分為晴空、全日低雲情境。晴空時（圖 8a）的 MLH 高度在 800 m 以下，中午也無明顯升高發展。全日低雲情境下，大多時間在 800 m 高度以下有一穩定層雲現象，MLH 被標定在層雲雲頂（圖 8b）。

5.3.2 台中梧棲

CL31 安裝於台中梧棲港中國石油公司天然氣儲氣廠員工餐廳屋頂，這地點只與苑港南北相隔約 35 km，觀測期間為 2014 年 4 月 23 日至 6 月 23 日，已是春季、夏初時節，梧棲出現全天穩定的層雲覆蓋情境降低，但是降雨天數也增多。CL31 資料區分為晴空和有雲時多有短暫雨兩種情境。晴空時（圖 8c），MLH 大都在 400 m 以下，中午發展升高現象並不明顯，我們認為當地近地面風速偏大，地表粗糙度介於海洋與陸地之間，機械擾動不利熱力對流垂直發展。有雲時多有短暫雨情境，因間歇降雨而造成 MLH 標定凌亂無

特徵（圖 8d）。

5.4 山區

5.4.1 南投縣鹿谷鄉臺灣大學實驗林溪頭營林區

CL31 安裝於南投縣鹿谷鄉臺灣大學實驗林的溪頭營林區苗圃農業氣象站觀測坪內，觀測期間為 2013 年 9 月 10 日至 11 月 7 日。這段期間太平洋洋面上有 6 個颱風生成，但對台灣都無直接影響，僅 10 月 6 日、7 日受到菲特颱風外圍環流影響，其餘時間溪頭山區天氣都是弱綜觀天氣背景條件。溪頭清晨和午後偶爾有霧，雲高大都低於 1500 m 高度，午後熱對流也少有發展。該地區山谷風氣候特徵明顯，CL31 資料可區分為晴空、多時低雲和午後有霧三種情境。

晴空情境以 10 月 31 日為代表（圖 9a），當日清晨和晚上皆無明顯殘餘層，當天 MLH 從 08LST 開始向上發展至離地 800 m (12 LST)，這一高度也正是溪頭周遭山丘地形高度，谷風所抬升的水氣到了山丘頂部形成雲朵。多時有低雲情境以 10 月 13 日為代表（圖 9b），MLH 高度多被標定在雲層頂部高度。有霧發生的情境則以 10 月 3 日為代表（圖 9c），當日 12 LST 之後底層大氣有明顯含水粒子訊號，午後谷風將南投北勢溪下游水氣推送到山丘下而形成山谷霧氣，MLH 在霧來前有離地 800 m 厚度，但在霧氣壟罩之下，CL31 訊號強度無法穿透霧層而只能標定 MLH 就在霧層頂部高度（厚度約 200 m）。

5.4.2 南投縣和平鄉臺灣大學山地農場春陽分場

CL31 安裝於南投縣和平鄉臺灣大學山地農場春陽分場宿舍屋頂，觀測期間為 2013 年 5 月到至 8 月。這一時段天氣以夏季山區午後對流降雨

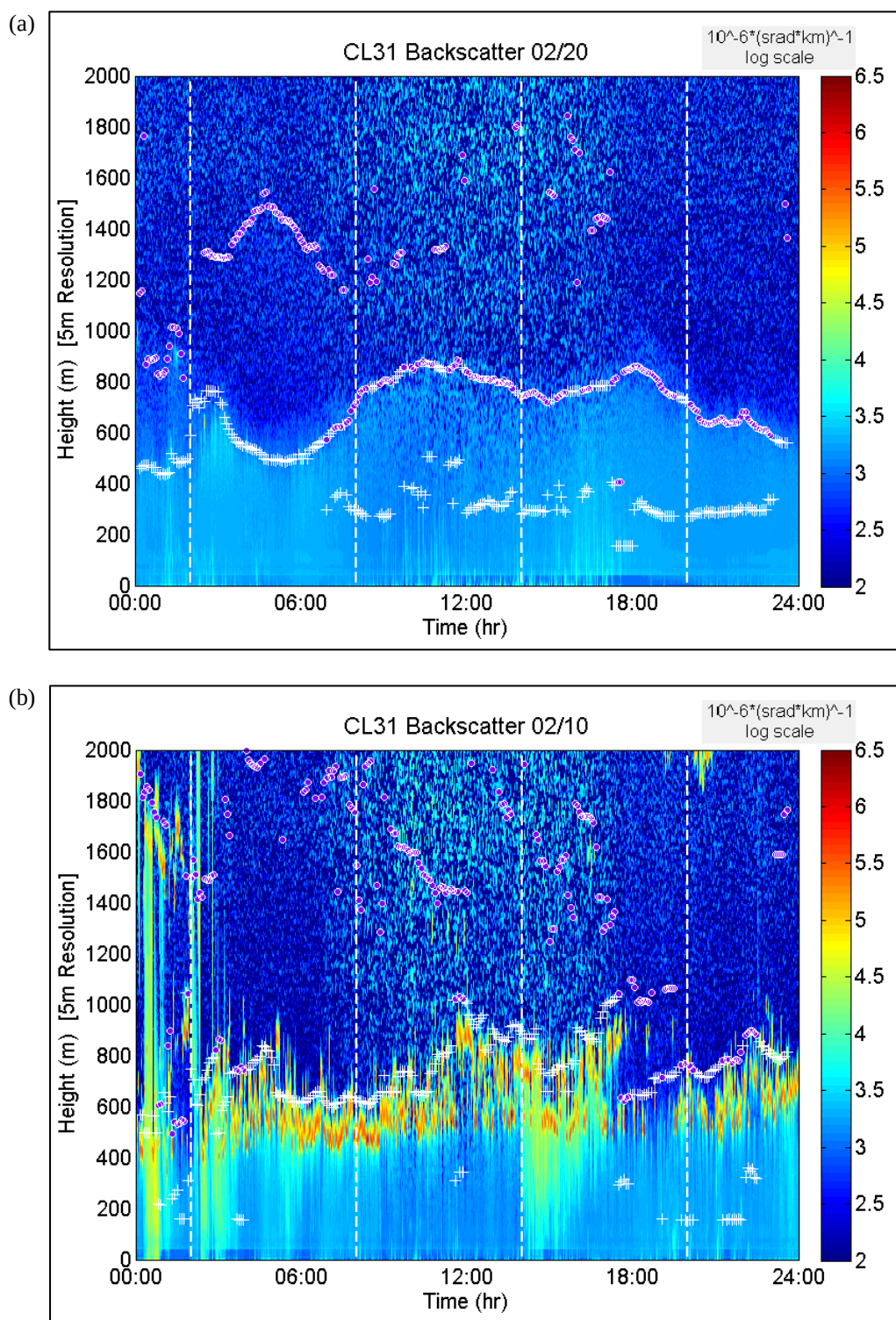


圖 8 同圖 5，但為 2014 年苗栗苑港與台中梧棲。(a) 2 月 20 日 (苑港，晴空)，(b) 2 月 10 日 (苑港，全日低雲)，MLH 標定凌亂、無特徵。

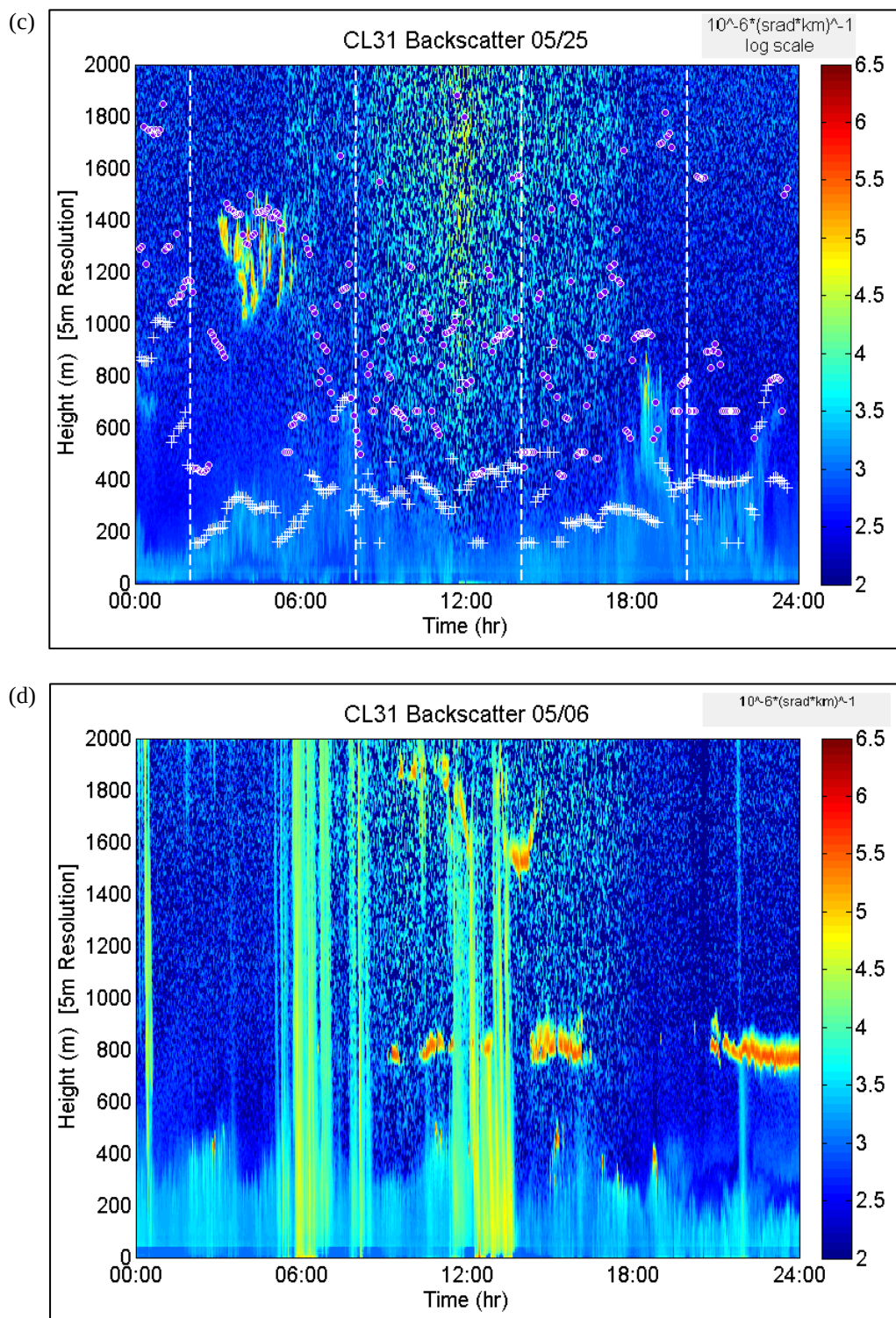


圖8 (續)。(c) 5月25日(梧棲, 晴空), (d) 5月6日(梧棲, 間歇降雨), MLH 標定凌亂、無特徵。

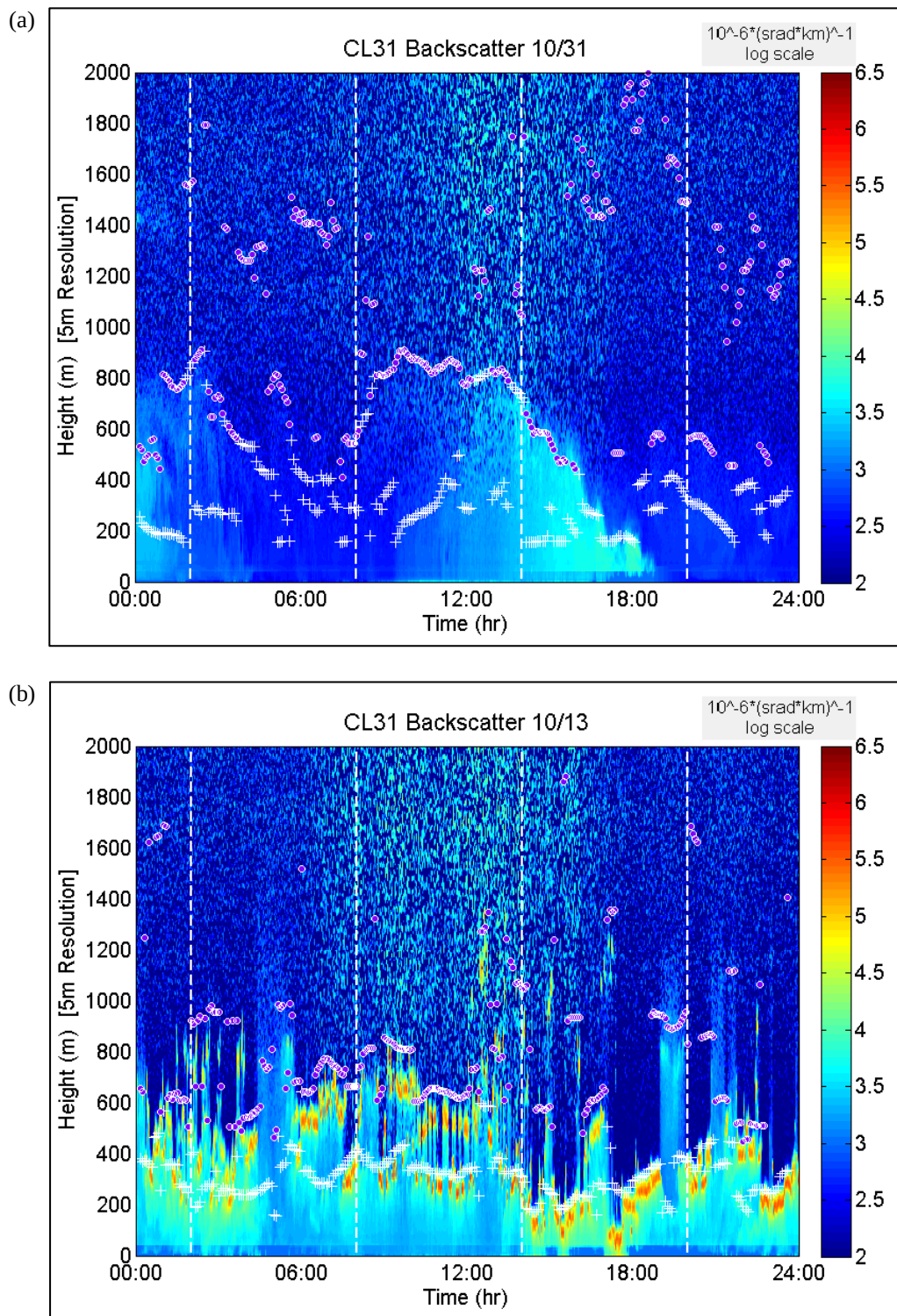


圖 9 同圖 5，但為 2013 年南投溪頭。(a) 10 月 31 日 (晴空)，(b) 10 月 13 日 (多時有低雲)。橘色為雲層或霧。

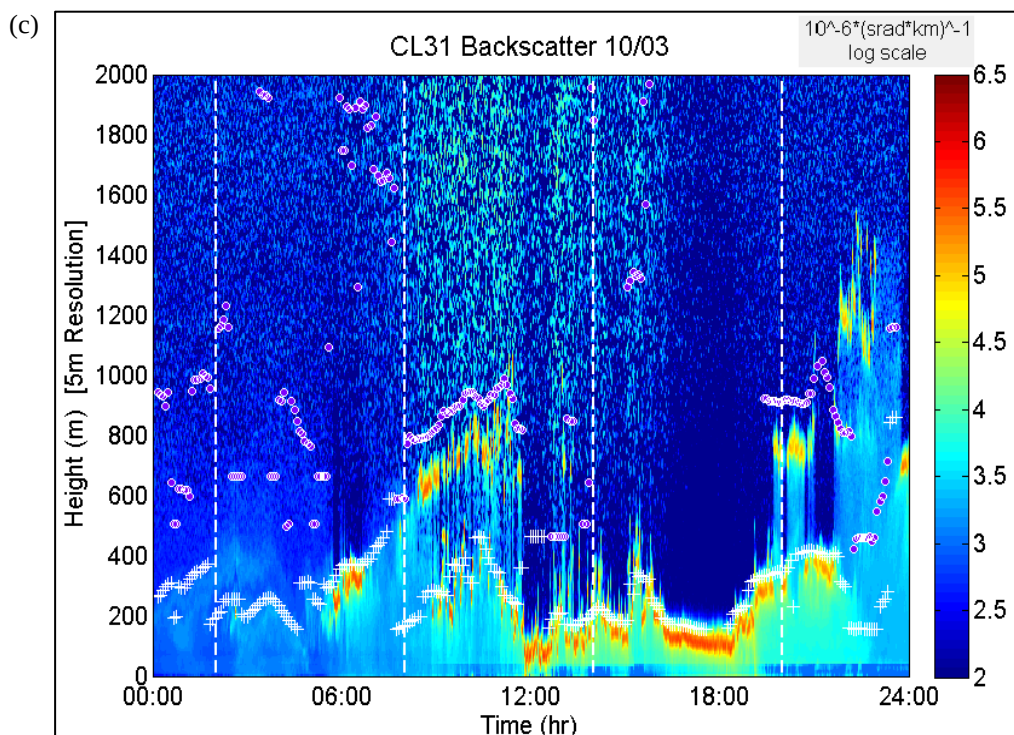


圖9 (續)。(c) 10月3日(有霧)。橘色為雲層或霧。

為主。春陽地勢特徵和溪頭不同，因此鮮少發生大霧現象。除降雨之外，CL31 資料分成晴空和午後有雲兩種天空情境來討論。圖 10a 顯示當地晴空時時，晚間沒有顯著殘餘層，午間 MLH 發展不明顯；即使午後有雲（圖 10b），也和晴空情境大致雷同。我們認為該地受到河道和山丘地形影響，熱對流促成 MLH 升高的機制不若平地顯著，午後的 MLH 被標定在雲層之中（離地 400~800 m 高度之間）。

本節所說明的台灣各地不同季節透過 CL31 所標定的 MLH 特徵整理於表 3，這些特徵包括晴空情境之下 MLH 的白晝（每日 6~18 時，約 8640 筆資料）平均高度和標準差，殘餘層和穩定近地邊界層是否有分離、4000 m 海拔高度以下有雲時的 MLH 高度，以及雲層出現時間、有霧發生時間等等。

六、結論與未來展望

本研究目標是檢視已在各機場運作多年的雲幕儀設備，原始資料是否再加以分析運用，成為長時間連續觀測近地層大氣混合高度變化的有利工具。首先，經過第四節的冬夏兩季在板橋探空站的同地觀測比對實驗，發現 CL31 雲幕儀和探空氣球所判定的混合層高度差距都不到 200 公尺， R^2 值也都有 0.8 以上（圖 4），先框定了本文動機的正確性，也就是透過雲幕儀來連續監測與研判台灣地區混合層起伏變化概念是可行的。

其次，經由第五節台灣各地不同地貌的 CL31 觀測結果，我們預期當某地有較高的汽機車、工業區等地表排放濃度時（表 3 中的「城市」和「郊區」兩類別），CL31 低層梯度分層訊號確實也有越顯著的現象，這一結果和 Munkel *et al.* (2007) 研

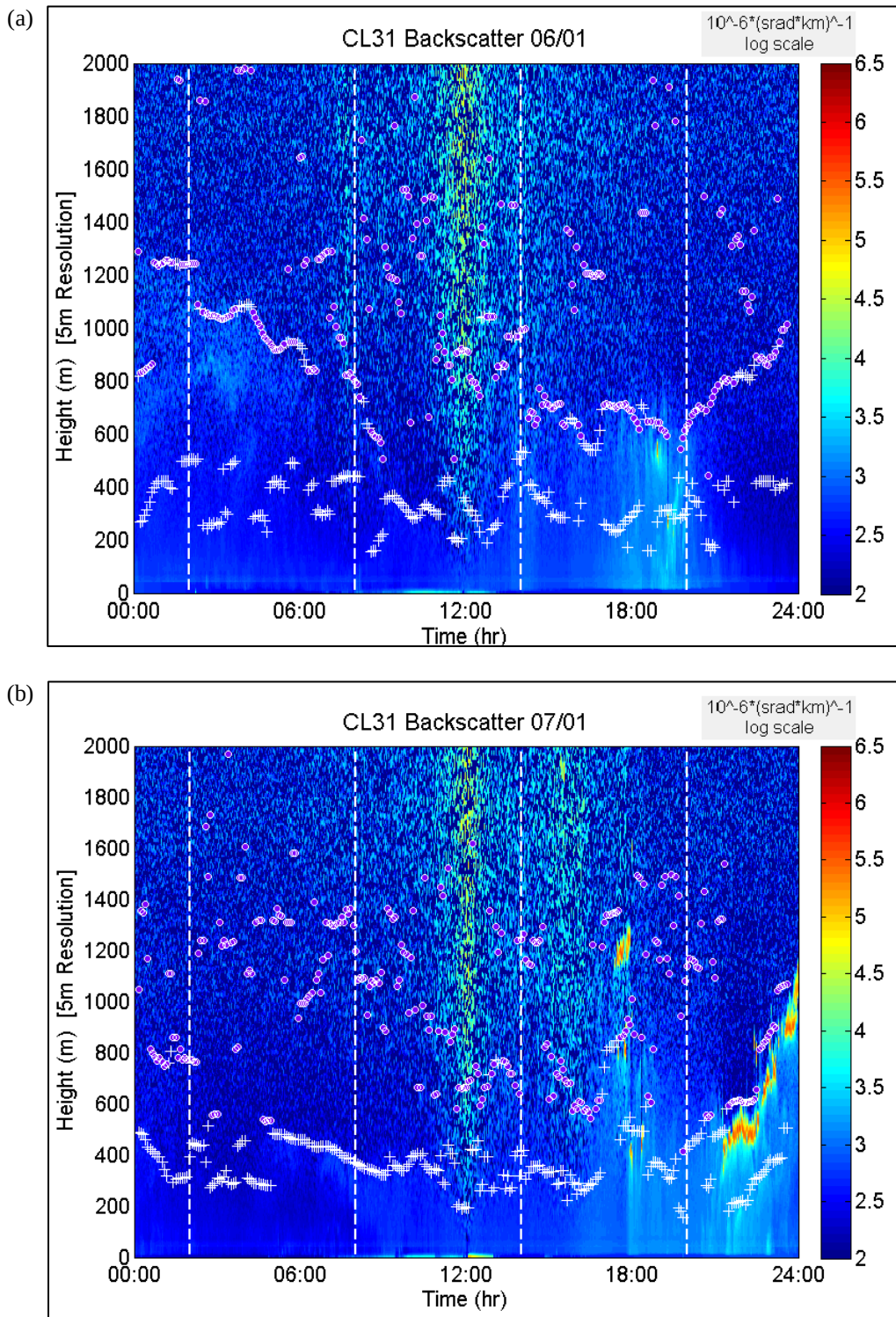


圖 10 同圖 5，但為 2013 年南投春陽。(a) 6 月 1 日（晴空）、(b) 7 月 1 日（午後有雲）。

表 3 不同地貌之雲幕儀觀測特性整理。

地景類別	都市	郊區	海濱	山區
殘餘層	有	有	不明顯	不明顯
雲出現時間	整天（冬季）	不定	整天（苑港冬季）	多午後
霧出現時間	無	多清晨	無	多午後
底層訊號強度 （晴朗時）	較大	中	中偏小	較小
晴空時混合層 平均高度 （標準差）	三重 11/14 1108.1m (334.6m) 高雄 1/28 917.9m (415.6m)	埔里 3/9 996.9m (316.3m)	苑港 2/20 838.9m (218.9m) 梧棲 5/25 355.2m (148.4m)	溪頭 10/31 342.0m (190.9m) 春陽 6/1 416.9m (204.5m)

究有一致的結果，證明雲幕儀資料分析程序的大方向無誤，並且將是局地性環境空氣品質監測的另一種簡便又有利的工具。

Thomas (2013)曾倡議機場雲幕儀除了雲底高度記錄之外，資訊更被其他領域需求分析使用；Hicks *et al.* (2015)也提出結合美國 NOAA 和 FAA 共同合作之雛形，透過美國各地機場雲幕儀數據，來建構美國境內不間斷與大範圍的 PBL 觀測網絡。這一概念也應能在台灣發展，比如我們將蒐集空軍氣象聯隊所採用的澳洲 METCH 8200-CHS 雲幕儀，以及評估民用航空局新進採用的美國 Campbellsci CS135 雲幕儀原始訊號資料樣本，將 CL31 分析方法運用在台灣本島和離島各地民用和軍方機場雲幕儀，解析出當地的 MLH 高度，以補足台灣五處無線電探空儀氣球所提供的 PBL 片段資訊，以建構出更大的空間尺度和時間更連續的 PBL 即時觀測網，提供台灣地區在大氣環境監測以及汙染擴散程度的即時重要資訊。

下一階段我們將探討各種天氣系統對於雲幕儀判斷混合層高度的誤差範圍與原因，進一步強化雲幕儀連續監測與研判混合層起伏的可信度。

參考文獻

- 江智偉，倪簡白，2007:光達遙測中壢地區夜間邊界層變化和低層噴流之討論，*大氣科學*，**35**，1-12。
- 吳清吉，吳志宏，1998: 大氣邊界層污染物擴散之日夜變化，*大氣科學*，**26**，181-204。
- 洪逸文，1994：台北混合層高度之氣候研究。國立台灣師範大學碩士論文，pp91。
- 彭啟明，1994：台灣北部地區混合層高度的觀測與模擬。國立中央大學碩士論文，pp94。
- 黃清勇，莊博清，2002:中尺度模式 MM5 與大氣擴散模式之整合應用：核廠汙染擴散研究，*大氣科學*，**30**，377-407。

- 黃隆明, 張台聖, 2012: 混合層高度簡易估算法之探討, *水土保持學報*, **44**, 231-250。
- Cheng, F.-Y., Chin, S.-C., Liu, T.-H., 2012: The role of boundary layer schemes in meteorological and air quality simulations of the Taiwan area. *Atmospheric Environment*, **54**, 714-727, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.029.
- Chou, C.C.-K., C.-T. Lee, W.-N. Chen, S.-Y. Chang, T.-K. Chen, C.-Y. Lin, J.-P. Chen, 2007: Lidar observations of the diurnal variations in the depth of urban mixing layer: a case study on the air quality deterioration in Taipei, *Sci Total Environ.*, **374**, 156-166, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.11.049.
- Emeis, S., Schafer, K., and Munkel, C., 2008: Long-term observations of the urban mixing-layer height with ceilometers, *2008 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **1**, 012027, doi:10.1088/1755-1315/1/1/012027.
- Eresmaa, N., A. Karppinen, S. M. Joffre, J. Räsänen and H. Talvitie, 2006: Mixing height determination by ceilometer. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 1485-1493. doi:10.5194/acp-6-1485-2006.
- Hicks M., D. Atkinson, B. B. Demoz, K. C. Vermeesch and R. Delgado, 2015: The National Weather Service's Ceilometer Planetary Boundary Layer Project. *Seventh Symposium on Lidar Atmospheric Applications*. 4-8 Jan., Phonex, Arizona, doi:10.1007/BF00121973.
- Lin, C. H., Y. L. Wu, C. H. Lai, P. H. Lin, H. C. Lai, P. L. Lin, 2004: Experimental investigation of ozone accumulation effects on a wintertime ozone episode at south Taiwan. *Atmospheric Environment*, **38**, 4267-4278, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.05.003.
- Malettoa, A., I.G. McKendrya and K.B. Strawbridge, 2003: Profiles of particulate matter size distributions using a balloonborne lightweight aerosol spectrometer in the planetary boundary layer. *Atmospheric Environment* **37**, 661-670, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00860-9.
- Munkel, C., N. Eresmaa, J. Räsänen, and A. Karppinen, 2007: Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. *Bound.-Layer Meteor.*, **124**, 117-128.
- Seidel, D. J., Ao, C. O., and Li, K., 2010: Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis, *J. Geophys. Res.*, **115**, D16113, doi:10.1029/2009JD013680.
- Sokhi, R. S., 1998: Urban Air Quality Monitoring and Modelling. Proceedings of First International Conference on Urban Air Quality Monitor and Modelling. *Environmental Monitoring and Assessment*, **52**, Nos. 1-2.
- Thomas, W., 2013: Transitioning to Operations: Lidars and Ceilometers. WMO TECO-2012, Brussels, Belgium, pp14.
- Wang, X. Y. and K. C. Wang, 2014: Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data, *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 1701-1709, doi:10.5194/amt-7-1701-2014.

- Xie, F., Wu, D. L., Ao, C. O., Mannucci, A. J., and Kursinski, E. R., 2012: Advances and limitations of atmospheric boundary layer observations with GPS occultation over southeast Pacific Ocean, *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 903-918, doi: 10.5194/acp-12-903-2012.
- Zhang, J., H. Chen, Z. Li, X. Fan, L. Peng, Y. Yu, and M. Cribb, 2010: Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar, *J. Geophys. Res.*, **115**, D00K30, doi: 10.1029/2010JD014030.

The Measurement of Mixing Height by Lidar Ceilometer at Differential Landscapes in Taiwan

Chia-Ying Lu¹ Po-Hsiung Lin^{1*} Yu-Chi Lee² Zhi-Chi You²

¹Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

²Central Weather Bureau

(manuscript received 18 January 2016 ; in final form 14 June 2016)

ABSTRACT

In order to get estimation of mixing layer height in the atmospheric boundary layer in Taiwan, the environmental engineering people always use the solution of Holtzworth method which needs the radiosonde data and local air temperature for input. Unfortunately, Radiosonde is released at Banchiao station of Central Weather Bureau and Pingtung airport station operated by Air Force twice a day during the transition period (08:00 LST and 20:00 LST) of atmospheric boundary layer at Taiwan. Tethered balloon, acoustic sounder and aerosol Lidar were used for providing major validation source on numerical model boundary layer simulation. But they were only operated for short-term research missions. In this study, a cheaper Vaisala CL31 ceilometer was compared with another advanced aerosol Lidar for performance check. Then 2-monthly intercomparison data with radiosonde at Banchiao station in summer and winter season was collected to validate the algorithm of mixing layer height (MLH) detection. Finally, the MLH of clear sky and cloudy weathers derived from CL31 ceilometer at different landscape (city, urban, coast and mountain regions) in Taiwan under was analyzed. We believe an operation and continuous monitor network on atmospheric boundary layer with existed airports ceilometer is expected.

Key Words: Mixing Height, Radiosonde, Lidar Ceilometer

* Communication Author: Po-Hsiung Lin

