

中國文化大學理學院地學研究所大氣科學組  
碩士論文

Master Thesis  
Graduate school of Earth Science (Atmospheric Sciences Section)  
College of Science  
Chinese Culture University

近地面降水粒子落速之觀測研究  
Observational study of near-surface precipitation fall velocities

指導教授：游政谷  
Advisor: Cheng-Ku Yu

研究生：謝佩蓉  
Graduate Student: Pei-Rong Hsieh

中華民國 101 年 7 月  
July 2012

## 摘要

本研究在中國文化大學華林校區(24°53'N, 121°34'E)佈署了一台光學式雨滴譜儀(Parsivel, Particle Size and Velocity disdrometer)，利用這部儀器可同時測量水滴的粒徑與落速分布的特性，分析在 2010 年 06 月至 2011 年 06 月期間總降雨時數裡的水滴粒徑與落速之觀測特徵。同時搭配華林站內高解析度的三維超音波風速計觀測，藉以評估風場對水滴落速的影響。

分析結果顯示，小(大)水滴的落速傾向比理想終端速度來的較快(較慢)。對於較小顆水滴( $D < 0.9$  mm)而言，較強降雨環境時水滴落速與終端速度的偏差情形更為顯著，其表示著有可能是受到水滴間的合併與破裂交互過程的影響。在弱降雨強度和弱水平風場環境條件下，伴隨著向下(向上)空氣運動時的水滴落速相對於平均落速有正(負)速度偏差情形。而在較小顆水滴( $D < 1.1$  mm)時，尤其處於弱降雨強度和弱向下空氣運動環境下，當水平風強度增強時相對於平均落速之速度偏差更為顯著。此特徵很可能與周圍的環境風作用於水滴上時，使其托曳力調節有所相關。整體而言，向下空氣運動、較強水平風場及較強降雨率的降水環境裡皆使觀測到的水滴落速傾向有較快的情形。

## 誌謝

本論文得以順利完成，首先要感謝指導老師 游政谷博士在這三年的指導與督促。在研究過程中給予學生多方面的協助，讓我學習到與研究相關的知識以及面對研究時應有的熱忱態度，更在精神層面上耐心地予與開導。在此致上最誠摯的感謝！

感謝台灣大學 陳正平老師與中央大學 朱延祥老師兩位口試委員的寶貴建議，使本研究更加充實。感謝系上老師們的教導，培養我勇於發問、多方角度切入問題與嘗試解決問題的能力。感謝紹欽學長與菁華學姊的叮嚀，讓我在使用觀測資料時更加謹慎。感謝實驗室的嘉倫學長、凌文學長與哲佑學長以及陳滢學姊的研究經驗分享，使我能夠勝任研究過程中的許多小插曲。更謝謝凌文學長在我碩一剛入學的暑假與開學期間，總是仔細又耐心的傳授程式撰寫技巧。也謝謝亦堅學長在我碩一期間擔任我的關懷小天使，尤其是大半夜裡傾聽與回應我遇到的挫折。感謝欽國總不辭辛勞(中壢→樹林→台北→華林)的與我一同前往華林測站維護 Parsivel 雨滴譜儀。以及品峻學長在關鍵時刻出現兩、三次，使程式得以順利執行。

課堂學習中，感謝同學們(書正、紹盛、逸翎、建儒、政安與正偉)相互幫忙與切磋，讓 701 研究室裡充滿著笑聲與調侃聲。特別是正偉的苦口婆心，但固執的我聽進去有限。以及政安的默默惡作劇，在生活中增添一些趣味。還要謝謝美伶、方婷學妹、漢宇與文軒學弟們在日常生活中的支援與協助，以及之翰助理與美伶在我正準備口試的前一晚鼎力幫忙。

最後要感謝我的父母及家人，做我的經濟後盾，當我的精神支柱，讓我在求學生涯中能專心扮演學生的角色，面對不如意的事也能換個角度去看待，協助我分析與釐清事情的一體多面。最後再次感謝我所接觸過的人，因為有你(妳)才能造就現在的我，本碩文研究絕非以我一人之力所能完成，在此僅將這份成果與大家一同分享！謝謝！

# 目錄

摘要.....	I
誌謝.....	II
目錄.....	III
圖表說.....	IV
一、前言.....	1
(一) 文獻回顧.....	1
(二) 研究動機與目的.....	4
二、資料來源及研究方法.....	6
(一) 資料.....	6
1. 資料來源.....	6
2. Parsivel 光學式雨滴譜儀概述.....	6
(二) 研究方法.....	9
1. 降雨時數定義與統計.....	9
2. 空氣密度修正.....	9
3. Parsivel 之系統性誤差.....	10
4. Parsivel 之量化誤差.....	11
三、降雨期間之環境特徵.....	13
(一) 降雨期間的水滴粒徑與落速.....	13
(二) 降雨期間的環境風場.....	14
四、影響水滴落速之氣象因子.....	15
(一) 周圍環境風場強弱(水平風速與空氣垂直速度).....	16
(二) 降雨強度.....	21
(三) 亂流環境.....	23
五、結論與未來展望.....	25
(一) 結論與討論.....	25
(二) 未來展望.....	26
參考文獻.....	28
附表.....	31
附圖.....	35

## 圖表說

表 1	Parsivel 儀器的粒徑與速度各 32 類別對照表 .....	31
表 2	Parsivel 儀器的觀測資料格式說明 .....	33
表 3	2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日期間共 214016 筆觀測資料(每 30 秒一筆觀測值)裡單位粒徑下之整體平均、一倍標準差、兩倍標準差及三倍標準差內之速度量化誤差，其中假設水滴在可解析的區間內為均勻分布。(搭配圖 2.4).....	34
表 4	環境風場(水平風和垂直速度)與降雨強度之類別 .....	34
圖 2.1	(a)中國文化大學華林地面自動測站位置以及(b)華林測站內的氣象儀器分布位置。 .....	35
圖 2.2	降水粒子落下通過感應區時的訊號。(a)小顆粒徑與大顆粒徑，(b)Parsivel 儀器原始訊號，以及(c)量測後將訊號顛倒並且放大訊號。(圖取自 Löffler-Mang and Joss 2000).....	37
圖 2.3	2010.08 月至 2011.06 月期間，靜風環境下觀測不同水滴直徑 (a) $D=0.313$ mm、(b) $D=0.438$ mm、(c) $D=0.563$ mm、(d) $D=0.688$ mm、(e) $D=0.813$ mm、(f) $D=0.938$ mm、(g) $D=1.063$ mm、(h) $D=1.188$ mm、(i) $D=1.375$ mm、(j) $D=1.625$ mm 的落速相對於終端速度之速度偏差值。空心(實心)圓表示落速大於(小於)一倍標準差，第二組數據為在一倍標準差之內的資料，再求其平均值與標準差。 .....	38
圖 2.4	Parsivel 觀測到水滴粒徑與落速之水滴數目分布圖，統計時間為 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日期間，共 214016 筆觀測資料(每 30 秒一筆觀測值)。橫軸為水滴直徑(單位為 mm)，縱軸為水滴落速(單位為 $m s^{-1}$ )，色階為水滴累積數目(間距如圖右側所標示，係數為 10 的次方)，單位粒徑下的水滴平均落速以 X 記號標誌，粗實線、細虛線及細實線分別為一倍標準差、兩倍標準差及三倍標準差之速度範圍。(搭配表 3) .....	40
圖 3.1	同圖 2.4，黑實線表示理想水滴終端速度(Atlas et al. 1976 after Gunn and Kinzer 1949)。 .....	41
圖 3.2	瞬時周圍環境風場頻率圖，統計時間為 2010 年 06 月 24 日至	

2011年06月19日，降雨期間的三維超音波風速計資料(每秒10筆觀測值)，共64150470筆觀測數據。橫軸為水平風速(單位為 $m s^{-1}$ ，間距為 $0.5 m s^{-1}$ )，縱軸為空氣垂直運動(單位為 $m s^{-1}$ ，間距為 $0.5 m s^{-1}$ ，正值代表上升運動，負值代表下降運動)，色階表示次數分布(間距如圖右側所標示，係數為10的次方).....42

- 圖 4.1 (a)平均30秒之周圍環境風場頻率圖，統計時間為2010年06月24日至2011年06月19日，降雨期間之三維超音波風速計資料(每秒10筆觀測值)，共214016筆觀測數據。橫軸為水平風速(單位為 $m s^{-1}$ ，間距為 $0.5 m s^{-1}$ )，縱軸為空氣垂直運動(單位為 $m s^{-1}$ ，間距為 $0.5 m s^{-1}$ ，正值代表上升運動，負值代表下降運動)，色階表示次數分布(間距如圖右側所標示，係數為10的次方)。(b)降雨強度頻率統計，橫軸為降雨強度(單位為 $mm hr^{-1}$ ，間距為 $1.0 mm hr^{-1}$ ，除了第1格之區間條件為 $0.1$ 至 $1.0 mm hr^{-1}$ )，縱軸為總次數。.....43
- 圖 4.2 當空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 m s^{-1}$ )分別與(a)降雨強度( $0.0 < RR < 1.0 mm hr^{-1}$ )、(b)降雨強度( $1.0 < RR < 2.0 mm hr^{-1}$ )以及(c)降雨強度( $2.0 < RR < 3.0 mm hr^{-1}$ )條件相同時，不同水滴直徑在四種水平風強度(空心符號)下之速度偏差情形。橫軸為水滴平均直徑(單位為 $mm$ ，不等間距)，縱軸為水滴落速相對於平均落速之偏差(單位為 $m s^{-1}$ )，色階表示統計次數(間距如圖右側所標示，黑色表示少於10次)。.....44
- 圖 4.3 五種水滴粒徑(如線條所示)落下時相對空氣運動的速度( $|V-V_a|$ )增加時，雷諾數( $N_{Re}$ )、拖曳係數( $C_d$ )和  $C_d |V-V_a|$ 項的變化情形。.....46
- 圖 4.4 同圖4.2，但當水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5 m s^{-1}$ )分別與(a)降雨強度( $2.0 \leq RR < 3.0 mm hr^{-1}$ )、(b)降雨強度( $3.0 \leq RR < 4.0 mm hr^{-1}$ )條件相同時，不同水滴直徑在四種空氣垂直運動(空心符號)下之速度偏差情形。.....47
- 圖 4.5 同圖4.2，但當水平風強度( $0.0 \leq WS < 0.5 m s^{-1}$ )分別與(a)空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 m s^{-1}$ )、(b)空氣垂直運動( $0.0 <$

Wair  $\leq 0.5$  m s<sup>-1</sup>)以及(c)水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5$  m s<sup>-1</sup>)和空氣垂直運動( $-0.5 < Wair \leq 0.0$  m s<sup>-1</sup>)條件相同時，不同水滴直徑在四種降雨強度(空心符號)下之速度偏差情形。.....48

圖 4.6 同圖 4.2，但為不同水滴直徑在四種風場穩定度(靜風、穩定、次穩定和不穩定風場，以空心符號表示)下之速度偏差情形。靜風環境為 30 秒內的每筆水平風速小於 1.0 m s<sup>-1</sup> 且垂直運動之絕對值小於 0.1 m s<sup>-1</sup>。並將非靜風條件依標準差分成穩定、次穩定和不穩定風場：穩定風場為 30 秒內的水平風一倍標準差與垂直速度一倍標準差皆小於 0.5 m s<sup>-1</sup>；不穩定風場為兩者標準差皆大於 1.0 m s<sup>-1</sup>；而其餘的皆屬於次穩定風場。  
.....50

## 一、前言

無論在降水過程中或不同的氣象參數積分量(如降雨率)，水滴落速都是其重要的微物理參數之一。在許多的氣象雷達相關運用和模式研究上，水滴落速常以終端速度表示。從理論推導或風洞實驗室觀察到，水滴的終端速度與粒徑大小之間呈現不錯的一對一關係，透過這些理想數據中得到一些資訊(如了解在靜止環境下一顆水滴掉落時之基本行為)，但實際降雨環境裡水滴落速與終端速度之間的一致性，在目前研究中尚未很清楚。本文主要科學目的是探討實際降雨環境下的近地面水滴落速分布情形，再透過高解析度的三維風場資料，進一步釐清風作用於水滴落速的影響，並歸納出影響水滴落速的氣象參數和可能的物理原因。

### (一) 文獻回顧

在水滴落下的過程中，受到重力加速度影響，使水滴落速變快，同時間的空氣托曳力也逐漸增加；當空氣拖曳力與重力達平衡時，水滴落速不再向下加速度而是維持等速度運動，此時相對於空氣運動時的速度稱為水滴終端速度( $V_t(D)$ , terminal velocity)。

在過去研究裡分析水滴粒徑與速度的方法有很多種：(a)目測法：Lenard (1904)利用水滴落在吸收劑紙上產生的痕跡，藉此測量其粒徑大小。Laws (1941)藉由極精緻的麵粉吸收水滴後，會形成一顆顆球狀麵糰，再用精密的儀器秤其重量並回推估粒徑大小，且透過頻閃觀測儀技術(stroboscopic methods)測量水滴速度。(b)風洞實驗室：Gunn and Kinzer (1949) 在風洞實驗室中以「標準且靜止的大氣下溫度  $20^{\circ}\text{C}$ 、相對溼度 50 %」的氣象條件作為觀測水滴落速的環境，並透過兩個已知間距的金屬環，其可感應到當一顆帶有電性的蒸餾水滴通過兩個不同極性的金屬環時產生的電流變化訊號，再轉換成通過的時間差，此時測量的落速稱為終端速度( $V_t(D)_{G-K}$ , Gunn and Kinzer 1949)。而粒徑測量是以高靈敏度磅秤量測水滴落下後，隨即被油包覆時(抑制水滴蒸發)



的重量差，藉以回推水滴粒徑。(c)撞擊式的技術：Joss and Waldvogel (1967)透過撞擊式雨滴譜儀(JWD, Joss-Waldvogel disdrometer)測量不同粒徑的水滴落入感應區時，其感應器會收到不同程度大小的衝擊力所造成的訊號差異，再經由儀器內部處理器換算後，辨別 20 種不同類別的水滴粒徑，而終端速度是採用 Gunn and Kinzer (1949)提出的理想環境條件下水滴粒徑與終端速度的經驗式，藉以獲得水滴粒徑相對應的終端速度。(d)影像技術：Löffler-Mang and Joss (2000)透過光學式雨滴譜儀(Parsivel, Particle Size and Velocity disdrometer)量測水滴粒徑與落速，其主要是利用雷射光感應到水滴通過時，造成的電壓下降，再估計水滴粒徑與落速。此外，現今的氣象模式等等的研究上，水滴終端速度多數是採用 Gunn and Kinzer (1949)的風洞實驗室數據當作水滴終端速度與粒徑關係式。

水滴粒徑譜可從數百微米( $\mu\text{m}$ )至數毫米(mm)，普遍認為較大顆水滴的終端速度相對於較小顆水滴的終端速度會更快些，從許多研究和實驗也再度證實水滴的粒徑與終端速度有一對一的相關性(Gunn and Kinzer 1949; Beard and Pruppacher 1969; Beard 1976; Hosking and Stow 1991; Testik and Barros 2007)。在實際降雨環境中，受到環境條件( $W_{envi}$ )因素影響，使得水滴終端速度與實際觀測到的落速( $F_s(D)$ , fall speeds)之間的關係又多了一項考慮因子( $F_s(D) = V_t(D) + W_{envi}$ )，究竟實際降雨環境下所觀測到水滴是不是以終端速度掉落呢？

在水滴落下過程中，作用在水滴上的空氣托曳力逐漸增加，使空氣托曳力與重力達平衡時的終端速度亦隨高度而有些差異，許多研究已針對此現象提出空氣密度修正因子( $(\rho_0/\rho)^{0.5}$ , Lin et al. 1983; Zrnić et al. 1993;  $(\rho_0/\rho)^{0.4}$ , Foote and DuToit 1969; Atlas et al. 1973; Niu et al. 2010)，使理論或實驗室的水滴粒徑與終端速度關係式能適用於不同海拔高度。本研究則採用空氣密度修正因子為 $(\rho_0/\rho)^{0.4}$ 。 $(\rho_0$  為標準大氣下的空氣密度  $1.199315 \text{ kg m}^{-3}$ ， $\rho$  為當地空氣密度)。

水滴終端速度與粒徑之一對一理想關係式已廣泛應用於都卜勒雷達氣象學、降水測量、許多基礎的水文應用(Doviak and Zrnić 1993; Collier 1996; Salles and Creutin 2003)與數值模擬以及衛星遙測觀測(Pruppacher and Klett 1998; Cotton and Anthes 1989)。在現今氣象雷達已是不可缺少的觀測設備之一，將每小時觀測到的回波與降雨率(RR, Rain rate)資訊即時應用於劇烈天氣監測系統(QPESUMS, Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)，進行即時的天氣監測，降低突發性大雨釀成的災害。其中降雨率又與終端速度有關( $RR = \int_0^{D_{max}} N(D)D^3V_t(D)dD$ , unit: mm hr<sup>-1</sup>)，表示終端速度是影響降雨率的重要因子之一。

本研究藉由 Parsivel 光學式雨滴譜儀，透過可同時觀測到降雨期間近地面水滴粒徑與落速的特性，求出降雨率和回波等氣象參數，此實際降雨觀測數據是大多數實驗室數據所缺乏的。觀測到的水滴落速亦可應用於與垂直指向雷達的徑向速度做校正；或與雷達回波估計的終端速度經驗式(Joss and Waldvogel 1972)比對，透過雙都卜勒雷達合成的垂直速度與雷達回波估計的終端速度求得降水粒子的下降速度，再經過向前時間積分可推估降水粒子的軌跡情形，藉以了解其降水粒子的來源(鄭 2006)。

以往觀測水滴落速的研究中，指出落速相對於理想終端速度是偏慢的情形(Laws 1941; Stow and Jones 1981)與落速主要是偏慢居多，少數偏快的情形(Hosking and Stow 1991)；亦有觀測到非靜風環境時落速偏快的情形(Donnadieu 1980)與較小顆水滴有落速偏快的情形(Hauser et al. 1984; Montero-Martínez et al. 2009; Niu et al. 2010)。表示現今水滴落速相對於終端速度之間的一致性尚未很確定，而應用在遙測、模式或氣象雷達上的水滴速度多以終端速度( $V_t(D)_{G-K}$ )為主，其中隱含著與實際觀測到水滴落速是有差異性的。

從過去文獻可歸納出造成觀測上水滴落速有偏快或偏慢的可能原

因，主要分成兩方面：儀器誤差與環境條件所導致。

其一在儀器誤差方面，包含水滴濺起、邊緣落速(margin fallers)或同時有兩顆以上粒子通過感應區；以及水滴剛合併或破裂時即被觀測到(Donnadieu 1980; Hauser et al. 1984; Hosking and Stow 1991; Kruger and Krajewski 2002)。

其二在環境條件方面，通過數值模擬證明亂流的風切與大氣亂流裡粒子的慣性加速度可造成大量的水滴速度差異(Pinsky and Khain 1996)。再者 Gunn and Kinzer (1949)是以蒸餾水為凝結核進行水滴終端速度之分析，而實際大氣中多以親水性懸浮微粒當凝結核，其組成水滴的密度不同，導致終端速度也不盡相同。Löffler-Mang and Joss (2000)與 Niu et al. (2010)提出在降水環境中常伴隨複雜的空氣運動(上沖流(updrafts)、下沖流(downdrafts)和亂流(turbulence)的發生)，導致水滴落下的軌跡、形狀或速度皆有偏差。例如：當地面有顯著上升氣流時，水滴落速偏慢且較大顆水滴的數目居多；地面有顯著下降氣流時，水滴落速偏快且中小顆水滴的數目居多。Montero-Martínez et al. (2009)表示水滴之間的合併與破裂之相互關係將導致破裂後的小水滴落速會比其相同粒徑水滴應有的終端速度更快些，稱為 superterminal velocity；而合併後的較大水滴落速會比其相同粒徑水滴應有的終端速度更慢些，稱為 subterminal velocity。

## (二) 研究動機與目的

上述提及的觀測與模擬研究顯示水滴落速與理論的終端速度不盡相同，與我們普遍觀念認為水滴以終端速度落下有些差異。尤其當降水環境條件不同時，亦影響著水滴落速變化。特別是台灣地處亞熱帶，屬於季風海島型國家，不僅受到副熱帶高壓(夏季)與西伯利亞高壓(冬季)影響外，還有西南氣流(夏季)夾帶的豐沛水氣，以及春雨、梅雨、午後對流雨與颱風等等多樣的降水天氣類型。在前人研究裡對於理想終端速度式提出不同海拔高度下的空氣密度修正，但不同緯度與氣候

條件地區的水滴速度是否有所不同？此外，文獻與觀測資料中顯少有提供降雨環境下的風場資料加以佐證，以及探討影響水滴落速之氣象條件因子為何，至今仍未很清楚。

本研究主要目的是透過中國文化大學華林地面自動氣象觀測站內的多種氣象設備(例如高解析度的三維超音波風速計(3-Axis Ultrasonic Anemometer)與 Parsivel 光學式雨滴譜儀)，著重研究降雨環境下的環境風作用於水滴落速的關係。統計近 1700 小時降雨時數，再透過不同的氣象參數分析並說明影響水滴落速分布情形的可能物理原因。

本文第二章說明本研究使用的資料來源與研究方法，並針對直接觀測到水滴粒徑與落速之 Parsivel 儀器的觀測原理作詳細說明。第三章主要是對總降雨時數之水滴落速分布情形以及周圍環境風場變化做概括性描述。第四章則從不同氣象參數因子(環境風場強度、降雨強度與風場穩定度)逐項探討影響水滴落速的物理因素。最後，將主要的研究結果與未來工作統整於第五章。

## 二、資料來源及研究方法

### (一) 資料

#### 1. 資料來源

中國文化大學華林地面自動氣象觀測站：(圖 2.1)

- (1) Parsivel 光學式雨滴譜儀，直接觀測到降水粒子粒徑與速度譜，每三十秒一筆資料。
- (2) 三維超音波風速計(3-Axis Ultrasonic Anemometer)，觀測 U、V 及 W 風場，每秒十筆資料。
- (3) 華林地面自動氣象觀測站，觀測輸出之氣象參數包含氣壓、溫度與相對溼度等等，每六十秒一筆資料。

#### 2. Parsivel 光學式雨滴譜儀概述

第一台 Parsivel (North Carolina State University)是由 Sandra E. Yuter 教授提供並且為期兩年(2009.04/16-2011.06/16)的合作研究觀測計畫；隔年加入第二台 Parsivel (Chinese Culture University)，從 2010 年 06 月 24 日起開始觀測，觀測地點皆在中國文化大學華林校區。

觀測原理：當紅色雷射光由發射端發出時，降水粒子正通過感應區，造成降水粒子遮蔽部分的電壓量，使得另一端接收到電壓下降訊號，再經由儀器內部精密計算後，其電壓減少幅度量可換算成降水粒子的平均直徑，電壓下降持續時間則換算成降水粒子的平均落速(圖 2.2)。儀器可量測的最大平均直徑為 24.5 mm，共分成 32 種不等間距類別，可從 0.0 mm 延伸至 26.0 mm。其中最小的兩類別，由於本身訊號太過微弱故不採用，開始記錄的最小粒徑類別為第 3 類(可辨別 0.25 mm 以上的粒子)；在落速上可察覺之最小平均速度為  $0.05 \text{ m s}^{-1}$ ，最大平均速度是  $20.8 \text{ m s}^{-1}$ ，亦區分成 32 種不等間距類別，從最小的  $0.0 \text{ m s}^{-1}$  到最大  $22.4 \text{ m s}^{-1}$  (詳細類別參考表 1)。

Parsivel 觀測到降水粒子之後，經由電腦 ASDO 軟體分析統計，以

即時圖像呈現粒徑和速度譜分布特徵，同時自動辨別當下的天氣類型，並轉成天氣現象代碼輸出；其中天氣型態可分為無降水、毛毛雨、雨、雪及雪粒子等等，且強度可區分為強、中、弱三種，而冰雹和凍雨的強度則區分為中和弱兩種。此外即時的降水強度與累積降水量顯示亦可取代傳統雨量筒與傾斗式雨量筒觀測(詳細輸出參數如表 2)。

脈衝回復頻率(PRF, Pulse Repetition Frequency)：Parsivel (NCSU)， $50 \times 10^3$  Hz；Parsivel (CCU)， $100 \times 10^3$  Hz。波長(wavelength)：650 nm。觀測範圍：皆為 180x30 平方毫米(mm<sup>2</sup>)；觀測厚度 1 mm。時間解析度：可設定為 10 秒、15 秒、20 秒、30 秒、60 秒、2 分鐘、5 分鐘、10 分鐘、15 分鐘、30 分鐘與 60 分鐘記錄一筆觀測值。觀測強降雨時，建議調高時間解析度(10 秒至 30 秒)，以減少水滴累積數目超出儀器負荷的機率；毛毛雨則可調整為 60 秒至 120 秒的時間解析度較佳。

觀測期間：Parsivel (NCSU)：2009.04/16 至 08/03 期間，設定每 10 秒鐘記錄一次。在 2009.08/04 至 2011.06/16，設定 30 秒記錄一筆觀測值，其中 2009.10/17 至 10/20 無觀測和 2010.03/11 至 08/12 儀器出入境，亦無觀測；並於 2011.06/16 結束兩年合作觀測計畫。Parsivel (CCU)：從 2010.06/24 開始觀測至 2012.01/31 止皆設定為每 30 秒記錄一筆觀測值。本研究考量儀器穩定性與觀測資料的連續性因素，決定採用 Parsivel (CCU)觀測數據進行分析與統計。

儀器限制方面，Yuter et al. (2006)指出 Parsivel 測量出一維空間內最大直徑的降水粒徑會比實際上降水粒徑的最大直徑來得更小或是相等，且觀測期間水滴直徑  $D$  (mm)與落速  $V$  ( $\text{m s}^{-1}$ )排列成 32 x 32 的矩陣，表示粒徑與速度並非都是一對一的理想關係。由於 Parsivel 無法辨別單一粒徑或單一速度類別內的差異性，故觀測得到的降水粒子粒徑與速度皆以該類別之平均值表示，即產生了量化誤差(quantization error，在本章後半段的第 4 小節處有進一步說明與分析)。尤其當直徑大於 10.0 mm 以上時，可解析的間距是 2.0 mm 以上，無法辨別此 2.0 mm 以內

的粒徑與速度之差異性，其潛在誤差就更大。

降水粒子自高空落下的過程中，受到周圍環境或本身內部流體場影響，降水粒子有可能發生振盪、旋轉與非軸對稱的情形。Battaglia et al. (2010)提及雨滴可視為是一個等體積的球形直徑，在平均直徑(D)介於 1.0 mm 到 5.0 mm 之間的所有雨粒子都被假設為水平方向是扁圓球體，其軸比(定義為高/寬的比值)為 $(1.075 - 0.075D)$ ，即粒徑與軸比呈現線性關係。當降水粒子直徑大於 5.0 mm 時，其軸比為 0.7；當直徑小於 1 mm 時，軸比為 1(正圓球體)。

觀測限制方面，當觀測到水滴直徑較大且速度很慢(相較於 $V_t(D)_{G-K}$ )時，有可能是水滴濺到觀測蓋後隨即破裂，再落入感應區內被觀測的現象；或者同一時間裡有兩顆以上降水粒子通過感應區，遮蔽的電壓量較大，辨別為較大的單一降水粒子其速度反而慢。或觀測較小顆降水粒子時，其速度卻很快，有可能是降水粒子僅一小部分的體積落入感應區內被觀測到，又稱邊緣落下(margin fallers)；或是降水粒子太小( $D < 1.0$  mm)，其造成的電壓下降訊號很微弱，求得的落速差異較大，使降水粒子落速有潛在誤差(Löffler-Mang and Joss 2000; Yuter et al. 2006)。但有關 Parsivel 研究分析中提到，同一時間內觀測到兩顆以上的降水粒子是很罕見的情形。

降水粒子自高空落下的過程中，經過的環境空氣密度不同，達到終端速度值也不全然相同。此外，也不能排除是儀器量測粒徑之誤差導致粒徑與速度分布趨勢有所偏移。

Parsivel 可應用於即時道路天氣監測，在雷達氣象上也可用於求得 Z-R 關係式，亦較傳統的雷達回波與地面測站的雨量筒觀測資料之間的關聯性來得更準確。

## (二) 研究方法

### 1. 降雨時數定義與統計

第 1 筆觀測資料之降雨強度(根據 Parsivel 自動觀測之輸出值)RR  $\geq 0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  時，為降雨時數的起始時間。當降雨強度  $< 0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  條件符合持續 30 分鐘以上(60 筆觀測資料)時，則之前的最後一筆符合 RR  $\geq 0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  為降雨時數的結束時間，如此在起始時間與結束時間的降雨強度皆符合 RR  $\geq 0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  且該降水時段期間需累積 10 分鐘以上的 RR  $\geq 0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  條件(相當於 20 筆觀測資料，時間解析度為 30 秒)，才能稱為一個降雨事件，並列入降雨時數統計。

本研究分析的降雨時段為：2010.06/24 至 2011.06/19 UTC(世界時，臺灣時區+8)，共 231302 筆觀測數據，相當於 1927.5 小時的總降雨時數。考量同時皆觀測到空氣密度與環境風場資料後，共 214016 筆觀測數據，約 1783.5 小時的累積降雨時數。

### 2. 空氣密度修正

目前最被廣泛使用的水滴終端速度經驗式是源自 Gunn and Kinzer (1949)在風洞實驗室中以「標準且靜止之大氣下溫度  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相對溼度 50%」的氣象條件，測量蒸餾水滴落下的速度，即終端速度(此時的空氣密度( $\rho_0$ )為  $1.199315 \text{ kg m}^{-3}$ )。而當水滴實際由高空落下的過程中，海拔高度降低、氣壓升高與環境空氣密度增加，使得作用在水滴上的空氣托曳力逐漸增加，預期在其他環境條件相同且水滴上的空氣托曳力與重力達平衡時，在高層觀測到的  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式會比標準大氣下的  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式更快些(Niu et al. 2010)。

華林校區海拔高度約 421 公尺處，採用當地測站觀測後輸出之氣象資料(氣壓 P(mb)、溫度 T( $^{\circ}\text{C}$ )、露點溫度 Td( $^{\circ}\text{C}$ ))求出當地空氣密度  $\rho(\text{kg m}^{-3})$ ，並引用 Foote and DuToit (1969)與 Atlas et al. (1973)提出的空氣密度修正因子 $(\rho_0/\rho)^{0.4}$ ，使  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式更適用於華林地區。(計算公式如下，2.1~2.5 方程式)



$$e_s = 6.112 \cdot \exp(17.67 \cdot T_d / (T_d + 243.5)) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$W = 0.622 \cdot e_s / (P - e_s) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

$$T_v = (T + 273.15)(1.0 + 0.61 \cdot W) \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\rho = P \cdot 100 / 287.05 / T_v \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

$$V_{t_{Atlas \text{ after G-K}}} = [965 - 1030 \cdot \exp(-6 D_{Atlas \text{ after G-K}})] \cdot (\rho_o / \rho)^{0.4} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

其中 2.1~2.4 式中  $e_s$  代表飽和水氣壓(mb)， $W$  代表混和比( $^{\circ}C$ )， $T_v$  代表虛溫( $^{\circ}C$ )，2.5 式中  $D_{Atlas \text{ after G-K}}$  代表水滴直徑(cm, 0.06 cm ~ 0.58 cm)， $V_{t_{Atlas \text{ after G-K}}}$  代表水滴終端速度( $cm \ s^{-1}$ )。

### 3. Parsivel 之系統性誤差

理論上，當實際降雨環境接近靜風條件時，觀測到的水滴落速應該更趨近於加入空氣密度修正因子後的  $V_t(D)_{G-K}$  經驗式。為了驗證此說法，於是我們先篩選符合靜風條件的觀測資料，分析此時水滴落速與終端速度之間的關係。本研究定義靜風環境條件為 30 秒內(風速每秒 10 筆，共 300 筆觀測資料)的每筆觀測值皆須符合水平風速  $\leq 1.0 \ m \ s^{-1}$  且空氣垂直速度之絕對值  $\leq 0.1 \ m \ s^{-1}$ 。故在 214016 筆(雨滴譜儀每 30 秒 1 筆資料)觀測數據中，靜風環境下的降水時數共佔了 2267 筆，相當於 1.06% 比例。(而溫度與濕度條件造成水滴落速的影響程度不大，在此先不做討論。)

初步分析顯示(圖 2.3)，觀測到不同水滴粒徑( $D < 1.625 \ mm$ )的平均落速皆與  $V_t(D)_{G-K}$  經驗式有很顯著且一致性的速度偏差(計算方法如下，2.6 方程式)，

$$\Delta V(D_i) = \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j) \cdot \frac{\text{drops}(D_i, V_j)}{\text{alldrops}(D_i)} \right] \right\} - [V_t(D)_{G-K}] \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

其中  $V(D_i, V_j)$  代表靜風環境下某直徑( $D_i$ )的某速度( $V_j$ )，單位  $m \ s^{-1}$ ； $V_t(D)_{G-K}$  代表理想終端速度，單位  $m \ s^{-1}$ ； $\text{drops}(D_i, V_j)$  代表靜風環境下某直徑( $D_i$ )與速度( $V_j$ )下的水滴累積顆數， $\Delta V(D_i)$  代表靜風環境下某直

徑( $D_i$ )的速度相對於理想終端速度的速度偏差，單位  $\text{m s}^{-1}$ 。

從最小粒徑(0.313 mm)到較大粒徑(1.625 mm)之速度偏差逐漸由正偏差(落速較  $V_t(D)_{G-K}$  快)轉為負偏差(落速較  $V_t(D)_{G-K}$  慢);尤其在  $D = 1.063$  mm 時的平均速度偏差為  $0.103 \text{ m s}^{-1}$  且一倍標準差為  $0.249 \text{ m s}^{-1}$ ，其速度偏差幅度很小，又落在基準值( $V_t(D)_{G-K}$ )附近，表示此時的水滴落速極近似於終端速度落下。

相較於其他粒徑下的速度偏差，在 2267 筆觀測結果皆保持著規律性的分布特徵(如觀測值傾向基準值的某一側)，本研究裡稱此規律性為系統性誤差所表現的特徵。有可能是降雨環境不同或內部儀器設定等等所導致，詮釋分析時需先將觀測資料加入此誤差後，才能算是真實的觀測值。系統性誤差隨著降雨環境不同等因素，亦有些許不同的規律性分布，於是本研究分析時改以觀測到的整體水滴平均落速值取代理論終端速度值，再分析水滴落速與平均落速之間的速度偏差。由於觀測值與平均觀測值本身皆潛藏著系統性誤差，在探討速度偏差時其誤差也相互抵消，進而排除系統性誤差所造成的影響。

#### 4. Parsivel 之量化誤差

另一項儀器限制條件是，由於 Parsivel 將觀測到的粒徑與落速資訊分為  $32 \times 32$  個不等間距類別輸出(如表格 1 與表格 2 所示)，表示在任一粒徑與速度類別( $V(D_i, V_j)$ )中，無法辨識其中的每一顆水滴最真實的粒徑與落速值，研究上我們取平均值當作此類別的平均直徑與平均落速。但越大水滴的粒徑間距和速度間距越大，潛藏的誤差訊號也越大；反之，越小水滴之間的類別間距越小，表示相對上感應較為靈敏，只要觀測值有一點差異就會分在不同類別裡，其準確性也相對上較高。

從實際觀測資料分析在單位粒徑下的總平均、一倍標準差與兩倍標準差及三倍標準差內之速度量化誤差情形(表格 3，速度標準差分布搭配圖 2.4)，方法是由於以該類別內的平均值當作平均直徑或平均落速，使得在計算量化誤差時，是以平均值分別與該類別的上、下邊界值作

差值，故每一類別的量化誤差都是該間隔的一半數值，並加入水滴顆數作權重的量化誤差分析；換言之，在一倍標準差、兩倍標準差及三倍標準差內的量化誤差計算時，假設水滴數在該類別內是均勻分布情形，其權重分析的水滴數比例即為標準差速度與上、下邊界之間的差值佔整體(該類別間距)的比例。

表格 3 顯示在整體平均或是不同標準差範圍，速度量化誤差趨勢可分成兩部分，一是在水滴直徑小於 0.87 mm 以下的速度量化誤差低於  $0.3 \text{ m s}^{-1}$ ，且越小粒徑時的誤差就越小；反之，當水滴直徑超過 0.87 mm 的速度量化誤差在  $0.4 \text{ m s}^{-1}$  左右，且隨粒徑增大時的速度量化誤差無顯著差異。

### 三、降雨期間之環境特徵

在 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日期間，不分天氣類型(春雨、梅雨、颱風、午後對流雨、鋒面及冷氣團)與降水型態(對流性降水和層狀性降水)，共約 1783.5 小時列為本研究的總降雨時數。本研究先透過 Parsivel 的觀測資料，初步分析總降雨期間的水滴粒徑與落速的基本分布特徵，再藉由三維超音波風速計的觀測資料，了解在降雨過程中的周圍環境風場分布。

#### (一) 降雨期間的水滴粒徑與落速

圖 3.1 顯示降雨期間，相同直徑下的降水粒子之不同落速裡多數記錄到觀測值(該區間以平均值表示)。隨著水滴粒徑越大，水滴數目分布呈現一顯著的拋物線趨勢，隱含著水滴粒徑與速度之間有明顯相關，又不完全屬於一對一的關係(即相同粒徑卻不同速度)。此特徵與  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式提出水滴達到終端速度時的粒徑大小兩者為一對一理論不符，可能原因是受到周圍環境場條件的影響，使水滴落速不一定是以終端速度落下，或者有其他因素影響。

再者，當水滴直徑( $D_i$ )介於 1.25~2.5 mm 之間的平均速度(X 標記)比  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式(黑實線)較慢一點；水滴直徑介於 2.5~5.0 mm 之間的平均速度比  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式較快一點。表示較大顆水滴( $D = 1.25 \sim 5.0$  mm)的落速雖然分布廣泛，但平均落速仍很接近  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式。小於 1.0 mm 的水滴落速比  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式更快速許多，且粒徑越小落速越快。(本研究裡的  $Vt(D)_{G-K}$  已考慮空氣密度因子修正)

此外，水滴數目主要集中在直徑小於 1.25 mm 以下，且越小的粒徑其水滴數超過 1000 顆(深灰色)的主要速度分布範圍越寬(例如  $D = 0.312$  mm 時的落速介於  $0.9 \sim 6.4 \text{ ms}^{-1}$ )；反之，越大粒徑則主要的速度譜越窄(例如  $D = 2.375$  mm 時的落速介於  $0.9 \sim 6.4 \text{ ms}^{-1}$ )。其原因應該是受到粒徑與落速的解析度影響有關。

## (二) 降雨期間的環境風場

上一小節提及觀測實際降雨期間的水滴粒徑與落速之間並非理想的對應關係，與前人提出的理想終端速度( $V_t(D)_{G-K}$ )經驗式之間一對一關係有所差異，可能的主要原因是當時降水環境條件的不同所導致。故在本小節先初步分析降雨期間的周圍環境風場分布特徵。

首先，藉由三維超音波風速計每秒 10 筆高解析度的觀測資料(U、V 和 W 風場)，透過其中的 U、V 風場求出水平風速(WS)，再以 W 風場表示為空氣垂直速度( $W_{air}$ )，並以  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  為單位間距，統計降雨期間的瞬時風速之頻率分布情形(圖 3.2)。

從圖 3.2 指出降雨期間裡的氣流瞬間變化很廣泛。環境的水平風速變化可從  $0.0$  至  $20.0 \text{ m s}^{-1}$ ，垂直空氣運動也從  $-10.0$  至  $+10.0 \text{ m s}^{-1}$  之間。風場主要的分布頻率在水平風速介於  $0.0$  至  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  之間，空氣垂直速度在  $-1.0$  至  $+1.0 \text{ m s}^{-1}$  之間，說明降雨期間伴隨較微弱的風場居多。

此外，當水平風速的越強( $4.0 \sim 18.0 \text{ m s}^{-1}$ )時，空氣垂直運動(上升運動介於  $2.0$  至  $9.0 \text{ m s}^{-1}$  與下降運動介於  $-2.0$  至  $-9.0 \text{ m s}^{-1}$ )也隨之有明顯增強的趨勢，表示環境氣流流動較屬於三維方向變化，並非單純的水平向或垂直向的傳遞。

#### 四、影響水滴落速之氣象因子

從上一章研究分析指出實際降雨過程中的水滴粒徑較小(大)顆時，觀測的平均落速較理想終端速度來的快(慢)與速度分布範圍也有較寬(窄)的情形，以及環境風場的瞬時強度分布廣泛。於是在本章節的研究中，需要更仔細區分影響水滴落速分布的氣象條件，進一步從中釐清影響水滴落速的物理原因。

首先，再度檢視  $Vt(D)_{G-K}$  經驗式的環境條件為標準大氣下的停滯空氣、溫度  $20^{\circ}\text{C}$  與相對溼度 50%，此與華林地區的環境條件不盡相同。其中最為顯著差異是風場條件與降雨強度，而這兩者氣象參數皆很可能影響水滴落速分布，亦為本章節的重點分析。

為了更區分環境風場與降雨強度對於水滴落速的影響，將環境風場與降雨強度做交互分析(圖 4.1)，此處分成  $20 \times 40 \times 80$  個類別(水平風速、垂直空氣速度與降雨強度，參考表格 4)，單獨分析在相同條件下(控制其兩者因素)之第三因素對於水滴落速的影響程度。舉例說明，當水平風速與空氣垂直速度的條件固定時，其降雨強度的變化即為造成水滴落速差異的主要因素。

為配合 Parsivel 的採樣時間為 30 秒記錄，代表環境風場的水平風速與垂直空氣速度，也皆取 30 秒的平均觀測值，相當於 30 秒內共 300 筆的風速觀測資料。水平風速與垂直空氣速度分別介於在  $0.0$  至  $10.0 \text{ m s}^{-1}$  與  $-10.0$  至  $10.0 \text{ m s}^{-1}$  之間，並以  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  為間距，兩者分成 20 類別與 40 類別；降雨強度(數值取自 Parsivel 自動觀測之輸出值)則在  $0.0$  至  $80.0 \text{ mm hr}^{-1}$  之間，以  $1.0 \text{ mm hr}^{-1}$  為間隔，共分成 80 類別。

從圖 4.1a 分析出環境風場的 30 秒平均風速分布較窄些(相較於瞬時風場分布，圖 3.2)，其中主要的風場變化仍集中在水平風速在  $0.0$  至  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  之間，垂直空氣運動也集中在  $-1.0$  至  $+1.0 \text{ m s}^{-1}$  之間，以弱風場頻率居多。隨著水平風速越強，空氣垂直運動也有增強的趨勢。此外，圖 4.1b 的降雨強度頻率累積指出，降雨期間降雨強度主要的分布在  $0.0$

至  $1.0 \text{ mm hr}^{-1}$  區間。隨著降雨強度越強，頻率累積呈現迅速遞減，顯示降雨強度變化與發生頻率，兩者之間不是線性關係。接著可進行上述的獨立氣象參數之分析研究。

## (一) 周圍環境風場強弱

### 1. 水平風速變化

從水平風速、空氣垂直速度與降雨強度彼此之間相互獨立(如表格 4)的特性下，分析造成水滴落速有所變化的原因。由於在第二章考量 Parsivel 儀器系統性誤差影響，使得研究水滴落速分析時，不與理論終端速度經驗式做比較，改與實際降雨期間的水滴平均落速值為比較之基準值，藉此將儀器內的系統性誤差予以排除。在本小節裡，透過不同的水平風速、空氣垂直速度與降雨強度條件，單獨分析在相同空氣垂直速度與降雨強度條件時之不同水平風速強弱下的水滴落速與其平均速度之間的速度偏差程度。(計算方式如下，4.1 方程式)

$$\begin{aligned} \Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR) &= \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR) * \frac{\text{drops}(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR)}{\text{alldrops}(D_i, WS, W_{air}, RR)} \right] \right\} \\ &- \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V\_mean(D_i, V_j, W_{air}, RR) * \frac{\text{drops\_mean}(D_i, V_j, W_{air}, RR)}{\text{alldrops\_mean}(D_i, W_{air}, RR)} \right] \right\} \\ &\dots\dots\dots(4.1) \end{aligned}$$

其中  $V(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場(WS)、空氣垂直運動(Wair)、降雨強度(RR)、某直徑(Di)與某速度(Vj)條件區間下的水滴速度，單位  $\text{m s}^{-1}$ ； $\text{drops}(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場(WS)、空氣垂直運動(Wair)、降雨強度(RR)、某直徑(Di)與某速度(Vj)條件區間下的水滴累積顆數； $\text{alldrops}(D_i, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場(WS)、空氣垂直運動(Wair)、降雨強度(RR)與某直徑(Di)條件區間下的水滴總累積顆數； $\Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場(WS)、空氣垂直運動(Wair)、降雨強度(RR)與某直徑(Di)條件區間下水滴速度相對於平均速度(相同

Di、Wair 和 RR 區間)的速度偏差程度，單位  $m s^{-1}$ ；而  $V\_mean(Di, Vj, Wair, RR)$ 、 $drops\_mean(Di, Vj, Wair, RR)$ 與  $alldrops\_mean(Di, Wair, RR)$ ，不考慮水平風場外，與  $V(Di, Vj, WS, Wair, RR)$ 、 $drops(Di, Vj, WS, Wair, RR)$ 以及  $alldrops(Di, WS, Wair, RR)$ 解釋相同。

研究指出，就環境水平風速強弱方面，當環境條件處於弱下降氣流( $-0.5 < Wair \leq 0.0 m s^{-1}$ )且降雨強度分別為( $0.0 < RR < 1.0 mm hr^{-1}$ )、( $1.0 < RR < 2.0 mm hr^{-1}$ )以及( $2.0 < RR < 3.0 mm hr^{-1}$ ) (圖 4.2a~c)時，不同水滴直徑在四種水平風強度下之速度偏差情形皆有很顯著的變化。

綜合圖 4.2a~c 特徵表示在弱降雨強度和弱向下空氣運動環境裡，水滴主要分布在弱水平風( $WS < 1.0 m s^{-1}$ )的小水滴( $D < 1.0 mm$ )居多。在小水滴( $D < 1.0 mm$ )裡顯示當水平風速增強(空心圓逐漸往空心方形)時，相同粒徑水滴下所觀測到的水滴速度偏差(即相同垂直速度條件與相同降雨強度條件下之某水平風速條件相對於相同垂直速度條件與相同降雨強度條件下的速度差異)情形有趨向正偏差，尤其在越小水滴其偏差幅度越明顯，表示越小顆水滴受到水平風速增強作用在水滴上影響，使水滴受到的拖曳力方向改變，其托曳力的調節進一步使速度偏差變化越大。隨著小水滴粒徑逐漸變大( $D < 1.0 mm$ )其偏差程度越小，尤其水滴粒徑  $0.8 \sim 1.0 mm$  的水平風強弱對於速度偏差較無差異。

觀測到的水滴落速是相對於空氣運動時的速度，根據水滴運動方程式中(如下，4.2~4.6 方程式，Pinsky and Khain (1996))，發現到垂直向的水滴落速與垂直向的托曳力相關，而垂直向的托曳力裡的托曳係數會受到環境風場改變而影響。

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_a + \vec{F}_d \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} \rho_a S C_d |\vec{V} - \vec{V}_a| (\vec{V} - \vec{V}_a) \dots\dots\dots(4.3)$$

$$C_d = \frac{24}{N_{Re}} [1 + f(N_{Re})] \dots\dots\dots(4.4)$$



$$N_{Re} = \frac{2r\rho_a}{\eta} |\vec{V} - \vec{V}_a| \dots\dots\dots(4.5)$$

$$f(N_{Re}) = a_1 N_{Re}^{b_1} + a_2 N_{Re}^{b_2} \dots\dots(4.6)$$

其中 $\vec{V}$ 代表水滴速度， $\vec{F}_a$ 和 $\vec{F}_d$ 分別代表浮力和托曳力， $S$ 代表水滴穿過的截面， $\vec{V}_a$ 代表環境空氣的速度， $C_d$ 代表拖曳係數， $N_{Re}$ 代表雷諾數， $r$ 代表水滴半徑(m)， $\rho_a$ 代表空氣密度( $1.199315\text{kg m}^{-3}$ )， $\eta$ 代表空氣動黏滯性( $1.818 \times 10^{-5} \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ , Wang and Pruppacher 1977)， $a_1=0.17$ ， $a_2=1.0 \times 10^{-6}$ ， $b_1=0.632$ ， $b_2=2.25$ 。

我們嘗試從水滴運動方程式並搭配圖 4.3 去理解水平風強弱是如何影響水滴落速。假說，當水平風增強的瞬間，假設水滴除了以本身的終端速度落下外，並無水平向的速度，而環境風場除了水平風速外，亦無垂直向的空氣運動。此時發現到水平風的增強，即相對空氣運動的速度( $|\vec{V}-\vec{V}_a|$ )增加時，雷諾數( $N_{Re}$ )也增加，而拖曳係數( $C_d$ )則迅速遞減，其  $C_d|\vec{V}-\vec{V}_a|$ 項遞增，表示水平風的增加，使得垂直向的托曳力數值增加(負號僅代表力的方向)，使得落速需要變慢以維持平衡。這結果與實際觀測(圖 4.2a~c)到的情形不一致。顯示著當水平風速一作用在水滴上時，水滴即有所調節，並不會如上述所假設的一項參數影響完一項參數後再去影響另一項參數，只是之間的物理機制則目前還不是很清楚，但可以肯定的是水平風速越強有助於水滴落速變快。

## 2. 空氣垂直速度變化

根據上一小節已得知水平風速越強有助於水滴落速的加快，在本小節則繼續探討垂直向的運動是否亦對於水滴落速有所影響。(計算方式如下，4.7 方程式)

$$\begin{aligned} \Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR) &= \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR) * \frac{\text{drops}(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR)}{\text{alldrops}(D_i, WS, W_{air}, RR)} \right] \right\} \\ &- \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V_{\text{mean}}(D_i, V_j, WS, RR) * \frac{\text{drops\_mean}(D_i, V_j, WS, RR)}{\text{alldrops\_mean}(D_i, WS, RR)} \right] \right\} \\ &\dots\dots\dots(4.7) \end{aligned}$$

4.7 方程式裡的各項變數解釋可參考 4.1 方程式，並依照不同參數 ( $D_i$ 、 $V_j$ 、 $WS$ 、 $W_{air}$ 、 $RR$ ) 分別代入各變數裡，而  $\Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場( $WS$ )、空氣垂直運動( $W_{air}$ )、降雨強度( $RR$ )和某直徑( $D_i$ )條件區間下水滴速度相對於平均速度(相同  $D_i$ 、 $WS$  和  $RR$  區間)的速度偏差程度，單位  $\text{m s}^{-1}$ 。

研究指出，對於環境空氣垂直速度變化方面，當水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5 \text{ m s}^{-1}$ )與降雨強度分別為( $2.0 \leq RR < 3.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )與( $3.0 \leq RR < 4.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )(圖 4.4a~b)條件時的不同水滴直徑在四種空氣垂直運動下之速度偏差情形皆有很明顯的特徵。

從圖 4.4a~b 分析，水滴主要分布在弱垂直運動 $|W_{air}| < 0.5 \text{ m s}^{-1}$  的小水滴( $D < 1.1 \text{ mm}$ )居多，越大顆水滴、越強環境風速或越強降雨環境下的水滴數目分布則越少。整體而言，在弱降雨強度和弱水平風場環境條件下，同一粒徑下的水滴所觀測到的落速偏差(即相同水平風速條件與相同降雨強度條件下之某垂直速度條件相對於相同水平風速條件與相同降雨強度條件下的速度差異)，普遍都有規律性。

當降水環境從空氣垂直運動為向下運動(空心圓)逐漸轉成向上運動(空心方形)影響時，水滴速度偏差亦由正速度偏差轉為負速度偏差。

尤其在垂直速度介於 $-0.5 \sim 0.5 \text{ m s}^{-1}$ 之間時的不同水滴粒徑觀測到的空氣垂直運動為向下運動與向上運動所影響的速度偏差亦分布在零值線的上下兩側。表示水滴在掉落過程中，受到一股下沉氣流的向下作用力，額外施加在水滴上時，將進一步加速水滴落速。反之，水滴在掉落過程中，受到一股上升氣流的向上作用力，額外施加在水滴上時，將進一步減緩水滴向下的落速。

## (二) 降雨強度

從上一節的環境風場變化，得知水平風速的增強與空氣垂直運動向下的氣流，都有助於加快水滴落速。但在實際降水環境中除了風場變化導致水滴落速改變，水滴與水滴之間的碰撞合併與破裂過程亦可能導致水滴落速有差異。當降雨強度越強時，表示著單位時間內收集到的水滴數越多，發生碰撞合併與破裂的過程機率就越大，於是本節主要探討降雨期間的降雨強度變化與水滴落速之間的關係。(計算方式如下，4.8 方程式)

$$\begin{aligned} \Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR) &= \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR) * \frac{\text{drops}(D_i, V_j, WS, W_{air}, RR)}{\text{alldrops}(D_i, WS, W_{air}, RR)} \right] \right\} \\ &- \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j, WS, W_{air}) * \frac{\text{drops}(D_i, V_j, WS, W_{air})}{\text{alldrops}(D_i, WS, W_{air})} \right] \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots(4.8)$$

4.8 方程式裡的各项變數解釋可參考 4.1 方程式，並依照不同參數 ( $D_i$ 、 $V_j$ 、 $WS$ 、 $W_{air}$ 、 $RR$ ) 分別代入各變數裡，而  $\Delta V(D_i, WS, W_{air}, RR)$  代表在某水平風場( $WS$ )、空氣垂直運動( $W_{air}$ )、降雨強度( $RR$ )和某直徑( $D_i$ )條件區間下水滴速度相對於平均速度(相同  $D_i$ 、 $WS$  和  $W_{air}$  區間)的速度偏差程度，單位  $m s^{-1}$ 。

研究指出，當環境風場條件為水平風強度( $0.0 \leq WS < 0.5 m s^{-1}$ )分別與空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 m s^{-1}$ )、( $0.0 < W_{air} \leq 0.5 m s^{-1}$ )以及水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5 m s^{-1}$ )與空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 m s^{-1}$ )(圖 4.5a~c)條件時的不同水滴直徑在四種降雨強度下之速度偏差情形有很顯著的差異。

從圖 4.5a~c 來看，大致上水滴主要分布在弱降雨強度( $0.0 < RR < 1.0 mm hr^{-1}$ )的小水滴( $D < 1.0 mm$ )居多，越大顆水滴的水滴數目分布則越少。此時在相同粒徑下的降雨強度越大時，觀測到的水滴落速偏差(即

相同水平風速條件與相同垂直速度條件下之某降雨強度條件相對於相同水平風速條件與相同垂直速度條件下的速度差異)情形越偏向正偏差，且越小水滴之不同降雨強度下的偏差幅度越顯著。

再將圖 4.5 與圖 4.2 以及圖 4.4 的速度偏差值做比較時，發現到降雨強度造成的速度偏差幅度比環境風場強弱變化影響水滴落速的程度更大。

越強降雨率環境下觀測到水滴落速偏差越大的原因，研判是在強降雨環境裡，水滴之間的碰撞機率大大增加。當兩顆水滴合併成一顆較大水滴後(合併過程)，大水滴內部尚未調節好，此時的速度會較近似於先前的兩顆合併前的水滴之間較大顆者的速度落下，此時觀測到的大水滴落速會較本身粒徑應有的終端速度來的慢。同樣的，當一顆水滴破裂成兩顆小水滴時(破裂過程)，兩顆小水滴的速度會先近似於一顆水滴尚未破裂前的速度，此時觀測到的兩顆小水滴速度會較本身粒徑應有的終端速度來的快。

不僅是大水滴會捕獲小水滴(合併過程)，較大水滴在落下過程中也會受到水滴內部的流體力學不穩定影響，導致水滴破裂成許多顆形狀不一的小水滴(破裂過程)，此時小水滴是以破裂前的母體速度落下，尚未達到本身應有的終端速度。

### (三) 亂流環境

上述兩小節中提到水平風速的增強、空氣垂直速度向下與較強的降雨強度皆有助於加速水滴的落速。在降雨過程中，整個環境風場的穩定度或許也是影響水滴落速的因子之一，故本小節主要探討當環境風場的穩定度改變時，不同粒徑大小的水滴速度偏差是否也有明顯的變化。此處不沿用上述兩小節將水平風速與空氣垂直速度及降雨強度做獨立參數影響分析，改以每 30 秒內的水平風速之一倍標準差和空氣垂直速度之一倍標準差當作環境穩定度的條件定義。

根據本文第二章定義的靜風條件，即靜風環境為 30 秒內的每筆水平風速小於  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  且垂直運動之絕對值小於  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ 。將風場資料分成靜風環境與非靜風環境，非靜風環境依水平風速與空氣垂直速度的標準差再分成穩定、次穩定和不穩定風場，其中的穩定風場表示為這 30 秒內的水平風一倍標準差與垂直速度一倍標準差皆小於  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ ；不穩定風場為兩者標準差皆大於  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ；而其餘的非靜風觀測資料則皆屬於次穩定風場。(計算方式如下，4.9 方程式)

$$\Delta V(D_i, \text{Wind}) = \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V(D_i, V_j, \text{Wind}) * \frac{\text{drops}(D_i, V_j, \text{Wind})}{\text{alldrops}(D_i, \text{Wind})} \right] \right\} - \left\{ \sum_{j=1}^{32} \left[ V_{\text{mean}}(D_i, V_j) * \frac{\text{drops\_mean}(D_i, V_j)}{\text{alldrops\_mean}(D_i)} \right] \right\} \dots\dots\dots(4.9)$$

其中  $V(D_i, V_j, \text{Wind})$  代表在某風場穩定度(Wind)、某直徑( $D_i$ )和某速度( $V_j$ )條件區間下的水滴速度，單位  $\text{m s}^{-1}$ ； $\text{drops}(D_i, V_j, \text{Wind})$  代表在某風場穩定度(Wind)、某直徑( $D_i$ )和某速度( $V_j$ )條件區間下的水滴累積顆數； $\text{alldrops}(D_i, \text{Wind})$  代表在某風場穩定度(Wind)和某直徑( $D_i$ )條件區間下的水滴總累積顆數； $\Delta V(D_i, \text{Wind})$  代表在某風場穩定度(Wind)和某直徑( $D_i$ )條件區間下水滴速度相對於平均速度(相同  $D_i$  區間)的速度偏差程度，單位  $\text{m s}^{-1}$ 。

研究指出(圖 4.6),不同水滴直徑在四種風場變化程度(靜風、穩定、次穩定和不穩定風場)下之速度偏差情形有明顯的特徵。水滴分布的範圍主要集中在小水滴,且次穩定與穩定的風場環境下水滴數目也較多顆。

在相同粒徑下的水滴觀測到的落速偏差(即某風場變化條件相對於整體平均值的速度差異),主要在小粒徑( $D < 0.9 \text{ mm}$ )有規律的顯著性,即風場條件從靜風環境(空心圓)逐漸轉為不穩定風場環境(空心方形)時,水滴速度偏差亦由負偏差轉為正偏差。尤其在越小水滴的速度偏差幅度越明顯,即表示越小顆水滴越容易受到不穩定風場(亂流)的影響。

當環境為穩定風場時,不同粒徑大小的水滴的速度偏差值都很接近零值線,表示此時水滴落速與平均落速較為相近,顯示穩定風場下水滴落速較以終端速度落下。

當環境風場越不穩定時,小水滴的落速偏差程度越顯著,結果與環境風場作用在水滴上的拖曳力調節有關,進一步使速度偏差變化更為明顯。

綜合本章節的各小節結果,較強的水平風速、向下的空氣垂直運動、較強的降雨強度與越不穩定的環境風場條件下,都有助於加快水滴落速。

## 五、結論與未來展望

### (一) 結論與討論

本研究透過中國文化大學華林地面自動觀測站的 Parsivel 光學式雨滴譜儀、三維超音波風速計與地面自動觀測資料，分析 2010 年 06 月至 2011 年 06 月期間總降雨時數裡的水滴粒徑與落速之分布特徵，並分析降雨期間的周圍環境風場與降雨強度變化影響水滴落速的程度，嘗試釐清之間的物理機制。整合前幾章的結果，其主要結論如下：

小(大)水滴的落速傾向比理想終端速度( $V_t(D)_{G-K}$  經驗式)來的較快(較慢)。其中越小顆水滴的平均落速會較終端速度來的更快且速度差異更顯著，而較大顆水滴的平均落速則較終端速度來的稍慢且速度差異較小。

對於較小顆水滴( $D < 0.9 \text{ mm}$ )而言，較強降雨環境時水滴落速與終端速度的偏差情形更為顯著，有可能是受到水滴間的合併與破裂交互過程的影響。例如兩顆水滴合併成一顆較大水滴時，此時的較大水滴的速度較接近於合併前的兩顆水滴之間較大顆的速度，即合併後的較大水滴速度會比相同粒徑下應有的終端速度來的慢些，Parsivel 記錄為水滴落速較終端速度偏慢。同樣的，當一顆水滴可能因內部流體不穩定而破裂成許多形狀不一的小水滴時，此時許多小水滴的落速較接近破裂前的一顆水滴速度，即破裂後的小水滴速度會比相同粒徑下的水滴終端速度來的快些，Parsivel 記錄水滴落速較終端速度偏快。

在弱降雨強度和弱水平風場環境條件裡，伴隨著向下(向上)空氣運動時的水滴落速相對於平均落速有正(負)速度偏差情形。顯示周圍環境風場的向下氣流作用在水滴落下時，水滴受到的作用力改變，進一步使落速有加速趨勢。

較小顆水滴( $D < 1.1 \text{ mm}$ )時，處於弱降雨強度和弱向下空氣運動環境下，當水平風強度增強時相對於平均落速之速度偏差更為顯著。此



特徵很可能與周圍的環境風作用於水滴上時，使其托曳力調節有所相關，進一步有助於水滴落速的加速。

整體而言，本研究探討環境風場與降雨強度條件下，較強水平風場、向下空氣運動、較強降雨率及越不穩定風場(亂流)的降水環境裡皆有助於加速水滴落速。

## (二) 未來展望

水滴落速在降水過程中是很重要的微物理參數之一，透過水滴的粒徑與落速可計算當時降雨強度與回波強度，再透過即時天氣監測，進一步得到防災預警效果。希望能以更客觀的研究方法解決研究中提及的系統性誤差現象。

水滴落速與終端速度差異之可能原因：風洞實驗室的環境條件裡氣壓 760mm、溫度 20°C、相對溼度 50%以及靜風環境下測量一顆蒸餾水滴的落速( $V_t(D)_{G-K}$  經驗式)。未來可朝向以人為方式製造靜風環境下之蒸餾水滴落速觀測，分析與理想終端速度之間的差異性。並搭配高速照相機觀察每一顆水滴落下的瞬間變化情形，分析其落入 Parsivel 觀測區間時的水滴粒徑與速度變化特徵。或在不同海拔下觀測水滴落下時的分布特徵，了解在空氣密度有很顯著差異時，對於水滴落速的影響程度。

降雨強度不僅與水滴落速有關，水滴粒徑與數目的分布情形也是影響條件之一。在相同的降雨強度條件下，當降水形態不同，使水滴粒徑分布趨勢不同，使估計的回波強度有所差異。而目前降水估計研究中，多數採用氣象雷達觀測到的回波，代入 Z-R(回波-降雨強度)關係式後估計降水量，其中有很大的潛在誤差。未來亦可探討不同降水形態下水滴粒徑的分布，以及與 2-DVD (2-D Video disdrometer)光學式雨滴譜儀觀測的水滴粒徑譜特徵相互分析。

此外，在華林地面自動觀測站裡，同時也有其他降雨量參數的觀

測設備，如撞擊式雨滴譜儀(JWD)和傾斗式雨量筒，可以與 Parsivel 進行降雨強度資料比對與校正。

## 參考文獻

- 鄭凌文，2006：北臺灣地形對颱風降水分佈及強度之影響：象神颱風雷達觀測研究。私立中國文化大學地學研究所碩士論文，71頁。
- Atlas, D., R. C. Srivastava, and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 1–35.
- Battaglia, A., E. Rustemeier, A. Tokay, U. Blahak, and C. Simmer, 2010: PARSIVEL Snow Observations: A Critical Assessment. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, 333–344.
- Beard, K. V., 1976, Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 851– 864.
- Beard, K. V., and H. R. Pruppacher, 1969: A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1066– 1072.
- Collier, C. G., 1996: Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of radar Data in Meteorology and Hydrology, 390 pp., John Wiley, New York.
- Cotton, W. R., and R. A. Anthes, 1989: *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press, 880 pp.
- Donnadieu, G., 1980: Comparison of results obtained with the VIDIAZ spectropuviometer and the Joss-Waldvogel rainfall disdrometer in a "rain of a thundery type". *J. Appl. Meteorol.*, **19**, 593– 597.
- Doviak, R. J., and D. S. Zrnić, 1993, Doppler Radar and Weather Observations. *2nd ed.*, 562 pp., Academic, Mineola, N. Y.
- Foote, G. B., and P. S. DuToit, 1969: Terminal velocity of raindrops aloft. *J. Appl. Meteor.*, **8**, 249–253.
- Gunn, R., and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air. *J. Meteorol.*, **6**, 243–248.

- Hauser, D., P. Amayenc, B. Nutten, and P. Waldteufel, 1984: A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distribution. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **1**, 256–269.
- Hosking, J. G., and C. D. Stow, 1991, Ground-based measurements of raindrop fall speeds. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **8**, 137–147.
- Joss, J., and A. Waldvogel, 1967: Ein Spektrograph für Niederschlags-tropfen mit automatischer Auswertung (A spectrograph for rain drops with automatical analysis). *Pure Appl. Geophys.*, **68**, 240-246.
- Kruger, A., and W. F. Krajewski, 2002, Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602–617.
- Laws, J. D., 1941: Measurement of the fall velocity of water drops and raindrops. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **22**, 709-721.
- Lenard, P., 1904: Über Regen. *Meteor. Z.*, **21**, 248-262.
- Lin, Y. L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065–1092.
- Löffler-Mang, M., and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 130–139.
- Montero-Martínez, G., A. B. Kostinski, R. A. Shaw, and F. García-García, 2009: Do all raindrops fall at terminal speed? *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L11818, doi:10.1029/2008GL037111.
- Niu, S., X. Jia, J. Sang, X. Liu, C. Lu, and Y. Liu, 2010: Distributions of Raindrop Sizes and Fall Velocities in a Semiarid Plateau Climate: Convective versus Stratiform Rains. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 632-645.
- Pruppacher, H. R., and J. D. Klett, 1998: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic, 954 pp.

- Pinsky, M. B., and A. P. Khain, 1996: Simulations of drop fall in a homogeneous isotropic turbulent flow. *Atmos. Res.*, **40**, 223–259.
- Salles, C., and J. Creutin, 2003, Instrumental uncertainties in Z-R relationships and raindrop fall velocities, *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 279–290.
- Stow and Jones, 1981. C. Stow and K. Jones, 1981: A self-evaluating disdrometer for the measurement of raindrop size and charge at the ground. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1160–1176.
- Testik, F. Y., and A. P. Barros, 2007, Toward elucidating the microstructure of warm rainfall: A survey. *Rev. Geophys.*, **45**, RG2003, doi:10.1029/2005RG000182.
- Wang, P. K., and H. R. Pruppacher, 1977, Acceleration to terminal velocity of cloud and raindrops, *J. Atmos. Sci.*, **16**, 275– 280.
- Yuter, E. S., D. E. Kingsmill, L. B. Nance, and M. Löffler-Mang, 2006: Observation of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1450–1464.
- Zrnić, D. S., N. Balakrishnan, C. L. Ziegler, V. N. Bringi, K. Aydin, and T. Matejka, 1993: Polarimetric signatures in the stratiform region of a mesoscale convective system. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 678–693.

## 附表

表 1 Parsivel 儀器的粒徑與速度各 32 類別對照表

### Classification according to volume-equivalent diameter

Class Number	Class Average in mm	Class Spread in mm
1	0.062	0.125
2	0.187	0.125
3	0.312	0.125
4	0.437	0.125
5	0.562	0.125
6	0.687	0.125
7	0.812	0.125
8	0.937	0.125
9	1.062	0.125
10	1.187	0.125
11	1.375	0.250
12	1.625	0.250
13	1.875	0.250
14	2.125	0.250
15	2.375	0.250
16	2.750	0.500
17	3.250	0.500
18	3.750	0.500
19	4.250	0.500
20	4.750	0.500
21	5.500	1.000
22	6.500	1.000
23	7.500	1.000
24	8.500	1.000
25	9.500	1.000
26	11.000	2.000
27	13.000	2.000
28	15.000	2.000
29	17.000	2.000
30	19.000	2.000
31	21.500	3.000
32	24.500	3.000

**Note:**

Class 1 and Class 2 are limits and are not evaluated at the current time in measurements using the Parsivel since they are outside the measurement range of the device.

表 1 (續)

**Classification according to speed**

Class Number	Class average in m/s	Class spread in m/s
1	0.050	0.100
2	0.150	0.100
3	0.250	0.100
4	0.350	0.100
5	0.450	0.100
6	0.550	0.100
7	0.650	0.100
8	0.750	0.100
9	0.850	0.100
10	0.950	0.100
11	1.100	0.200
12	1.300	0.200
13	1.500	0.200
14	1.700	0.200
15	1.900	0.200
16	2.200	0.400
17	2.600	0.400
18	3.000	0.400
19	3.400	0.400
20	3.800	0.400
21	4.400	0.800
22	5.200	0.800
23	6.000	0.800
24	6.800	0.800
25	7.600	0.800
26	8.800	1.600
27	10.400	1.600
28	12.000	1.600
29	13.600	1.600
30	15.200	1.600
31	17.600	3.200
32	20.800	3.200

表 2 Parsivel 儀器的觀測資料格式說明

Measured value No.	Description	Digits	Form	Units
01	Rain intensity (32 bit*)	8	0000.000	mm/h
02	Rain amount accumulated (32 bit*)	7	0000.00	mm
03	Weather code according to SYNOP w <sub>a</sub> w <sub>a</sub> Table 4680	2	00	1
04	Weather code according to SYNOP ww Table 4677	2	00	1
05	Weather code METAR/SPECI w'w' Table 4678	5	+RASN	1
06	Weather code according to NWS Code	4	RLS+	1
07	Radar reflectivity (32 bit*)	6	00.000	dBz
08	MOR visibility in the precipitation	4	0000	m
09	Sample interval	5	00000	s
10	Signal amplitude of the laser strip	5	00000	1
11	Number of detected particles	5	00000	1
12	Temperature in the sensor	3	000	°C
13	Sensor serial number	6	123456	1
14	Firmware IOP version number	4	V1.01	1
15	Firmware DSP version number	4	V1.01	1
16	Current through the heating system	3	0.0	A
17	Power supply voltage in the sensor	4	00.0	V
18	Sensor status	1	0	1
19	Date/ time measurement begins	20	01.01.2000 _00:00:00_	
20	Sensor time	8	00:00:00	
21	Sensor date	10	00.00.0000	
22	Station name	10	XXXXXXXXXX	
23	Station number	4	XXXX	
24	Rain amount absolute (32 bit*)	7	000.000	mm
25	Error code	3	000	
30	Rain intensity (16 bit*)	6	00.000	mm/h
31	Rain intensity (12 bit*)	6	0000.0	mm/h
32	Rain amount accumulated (16 bit*)	7	0000.00	mm
33	Radar reflectivity (16 bit*)	5	00.00	dBz
90	Field N (d)	223	00.000x	1/m <sup>3</sup> * mm
91	Field v (d)	223	00.000x	
93	Raw data	4095	000x	



表 3 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日期間共 214016 筆觀測資料(每 30 秒一筆觀測值)裡單位粒徑下之整體平均、一倍標準差、兩倍標準差及三倍標準差內之速度量化誤差，其中假設水滴在可解析的區間內為均勻分布。(搭配圖 2.4)

**Quantization error from PARSIVEL : (假設水滴數目平均分布)**

<b>Diameter (mm)</b>	<b>Q<sub>error-avg</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Q<sub>error-σ</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Q<sub>error-2σ</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Q<sub>error-3σ</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>
0.313	0.193	0.200	0.192	0.191
0.438	0.199	0.200	0.199	0.198
0.563	0.203	0.200	0.200	0.202
0.688	0.219	0.200	0.212	0.219
0.813	0.299	0.287	0.302	0.300
0.938	0.380	0.400	0.389	0.383
1.063	0.395	0.400	0.399	0.397
1.188	0.397	0.400	0.399	0.398
1.375	0.398	0.400	0.400	0.400
1.625	0.399	0.400	0.400	0.400
1.875	0.399	0.400	0.400	0.400
2.125	0.401	0.400	0.400	0.400
2.375	0.414	0.400	0.404	0.409

表 4 環境風場(水平風和垂直速度)與降雨強度之類別

<b>Parameter</b>	<b>range</b>	<b>interval</b>	<b>Array</b>
水平風(WS)	$0.0 \leq WS < 10.0$	0.5	20
降雨強度(R)	$0.0 < R < 80.0$	1.0	80
垂直速度(W)	$-10.0 < W < 10.0$	0.5	40

# 附圖

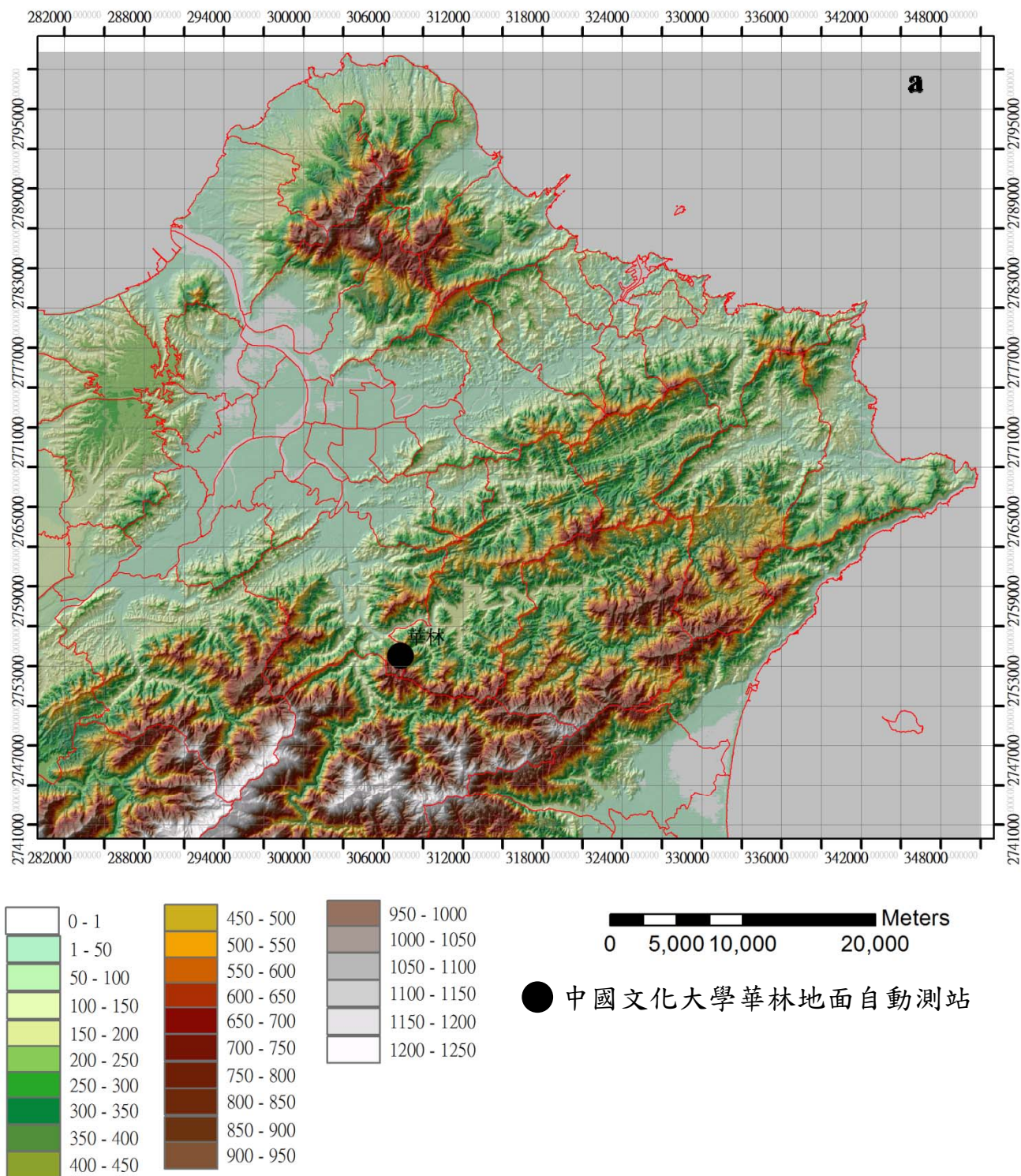


圖 2.1 (a)中國文化大學華林地面自動測站位置以及(b)華林測站內的氣象儀器分布位置。

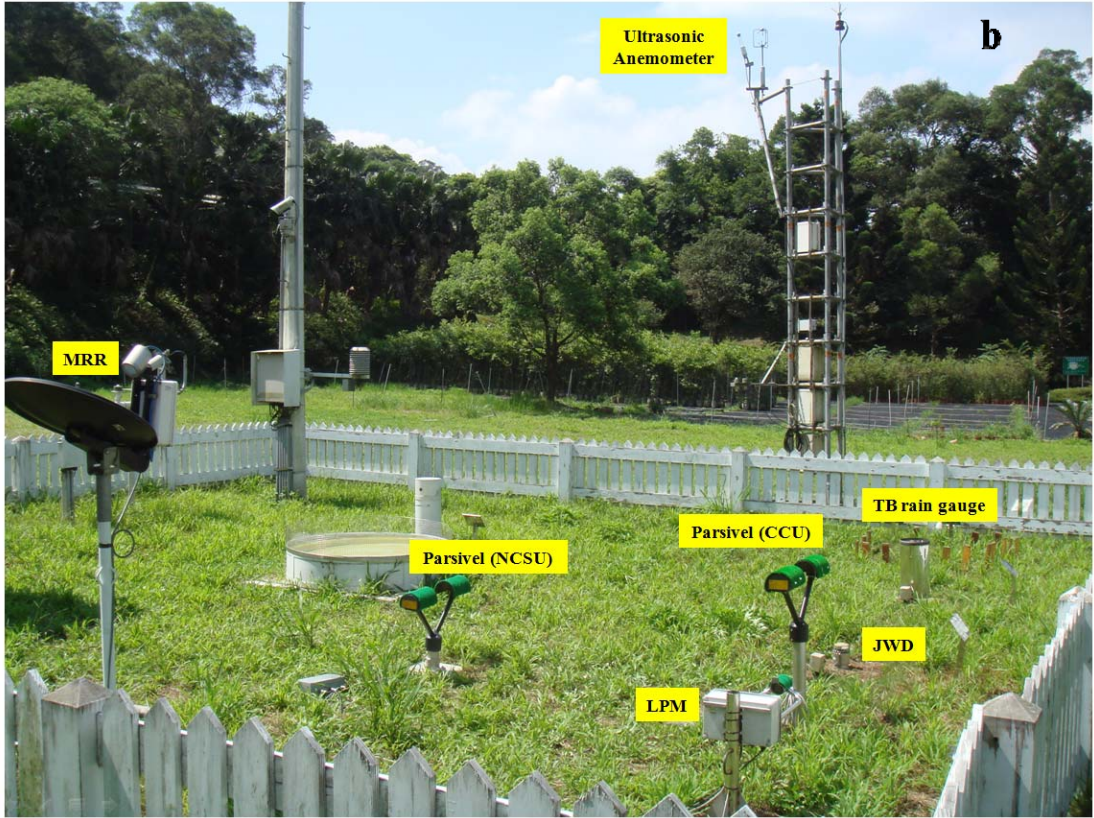


圖 2.1 (續)。

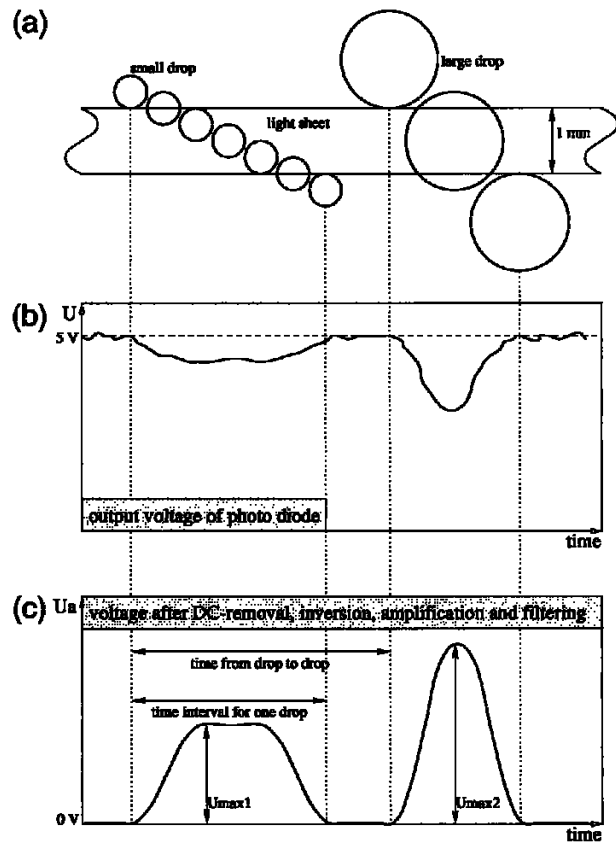


圖 2.2 降水粒子落下通過感應區時的訊號。(a)小顆粒徑與大顆粒徑，(b)Parsivel 儀器原始訊號，以及(c)量測後將訊號顛倒並且放大訊號。(圖取自 Löffler-Mang and Joss 2000)

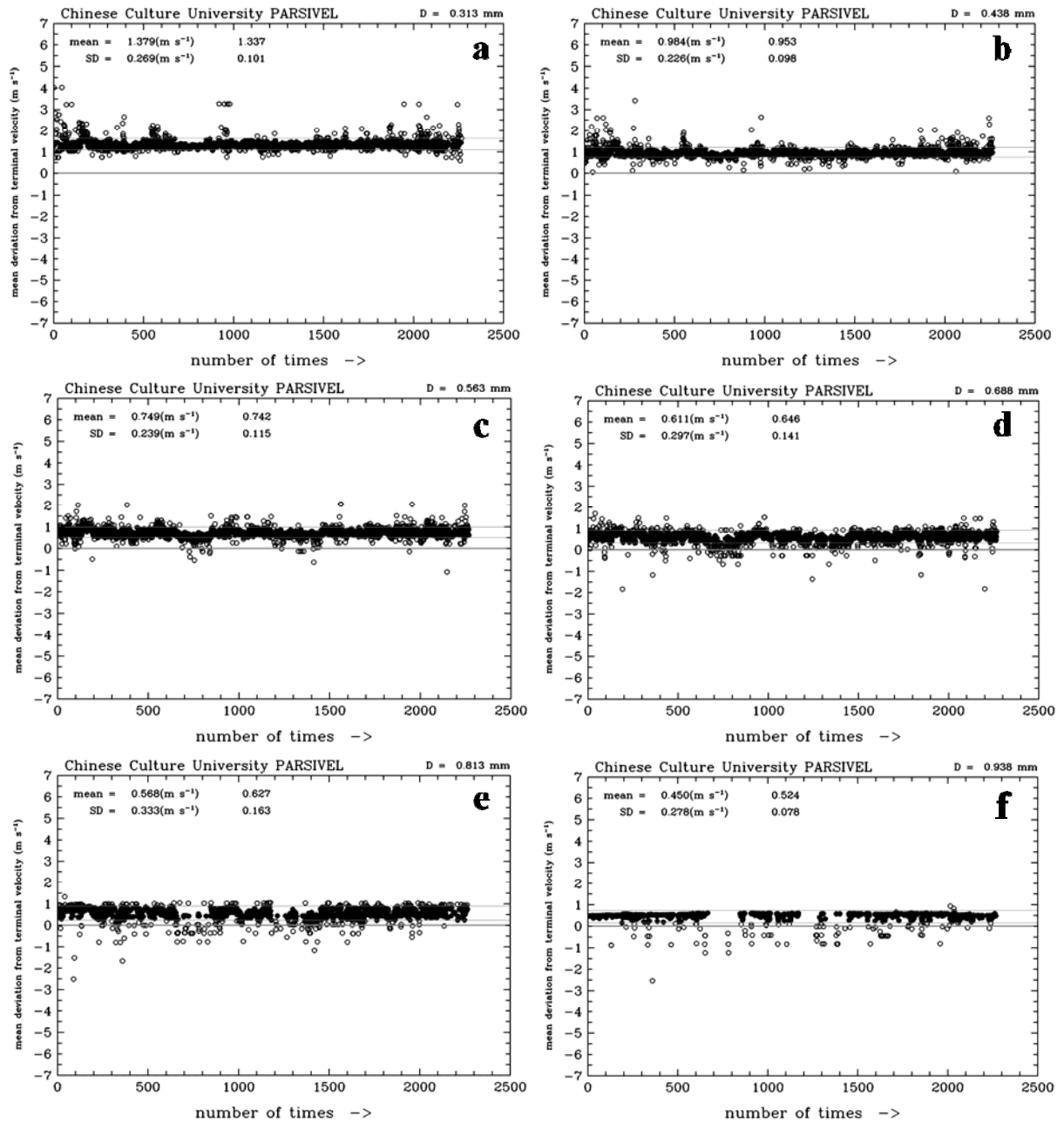


圖 2.3 2010.08 月至 2011.06 月期間，靜風環境下觀測不同水滴直徑(a)  $D=0.313$  mm、(b)  $D=0.438$  mm、(c)  $D=0.563$  mm、(d)  $D=0.688$  mm、(e)  $D=0.813$  mm、(f)  $D=0.938$  mm、(g)  $D=1.063$  mm、(h)  $D=1.188$  mm、(i)  $D=1.375$  mm、(j)  $D=1.625$  mm 的落速相對於終端速度之速度偏差值。空心(實心)圓表示落速大於(小於)一倍標準差，第二組數據為在一倍標準差之內的資料，再求其平均值與標準差。

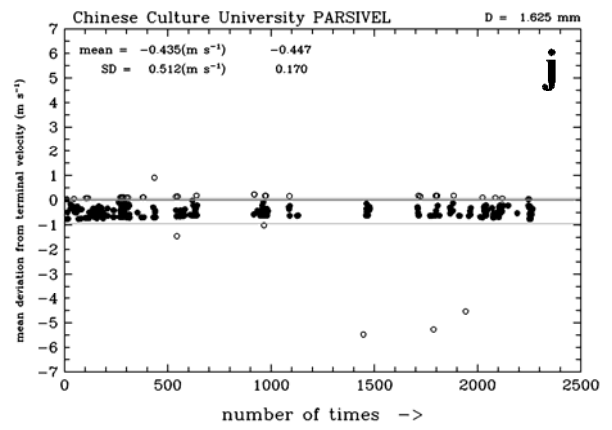
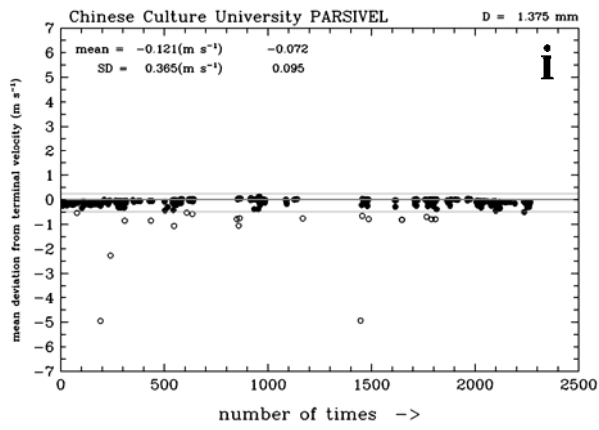
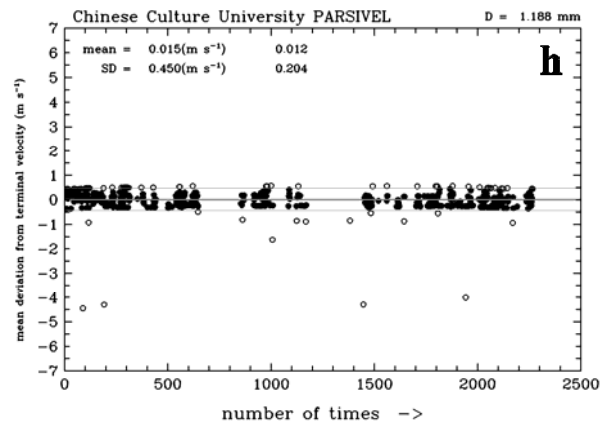
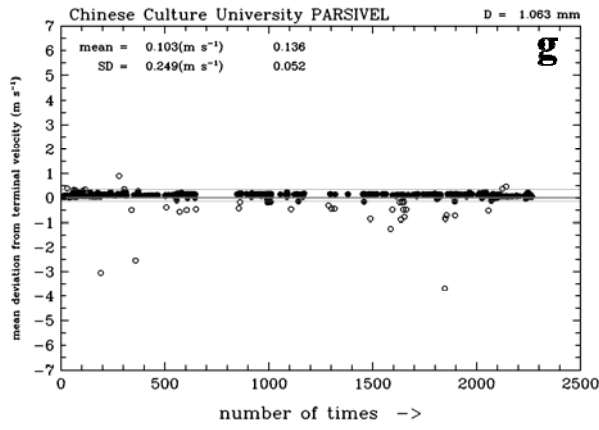


圖 2.3 (續)

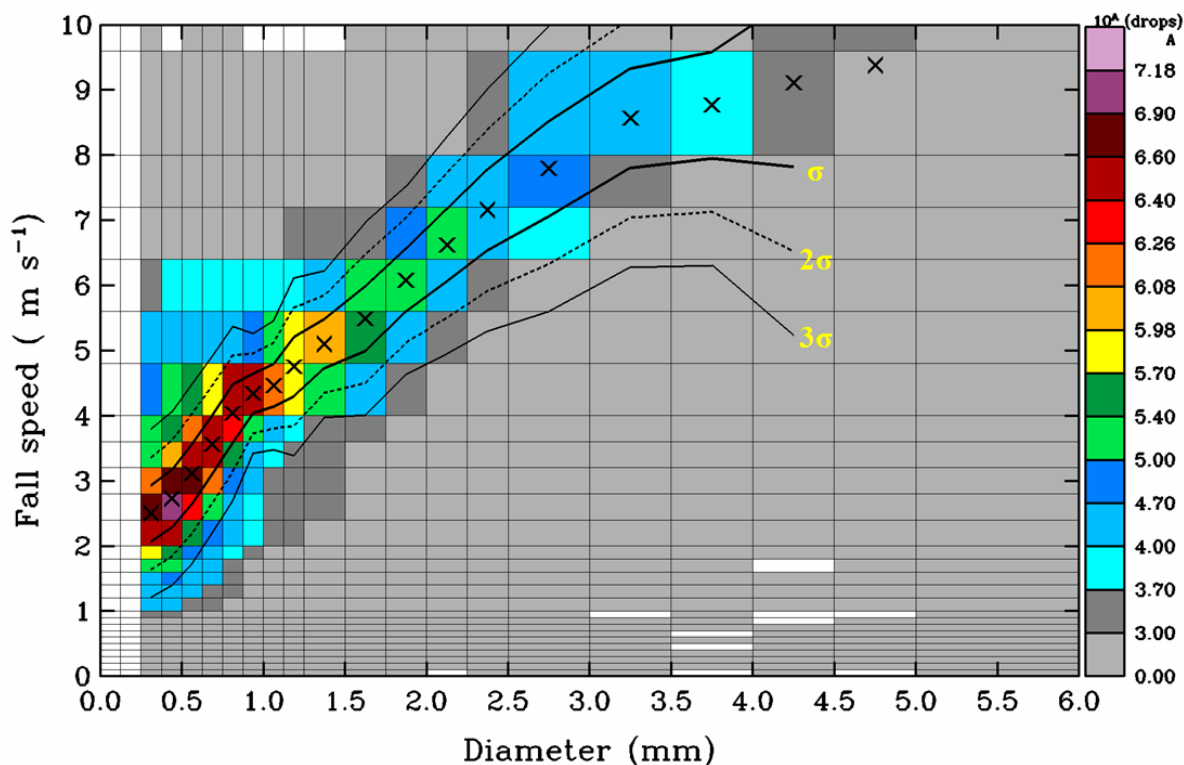


圖 2.4 Parsivel 觀測到水滴粒徑與落速之水滴數目分布圖，統計時間為 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日期間，共 214016 筆觀測資料(每 30 秒一筆觀測值)。橫軸為水滴直徑(單位為 mm)，縱軸為水滴落速(單位為  $\text{m s}^{-1}$ )，色階為水滴累積數目(間距如圖右側所標示，係數為 10 的次方)，單位粒徑下的水滴平均落速以 X 記號標誌，粗實線、細虛線及細實線分別為一倍標準差、兩倍標準差及三倍標準差之速度範圍。(搭配表 3)

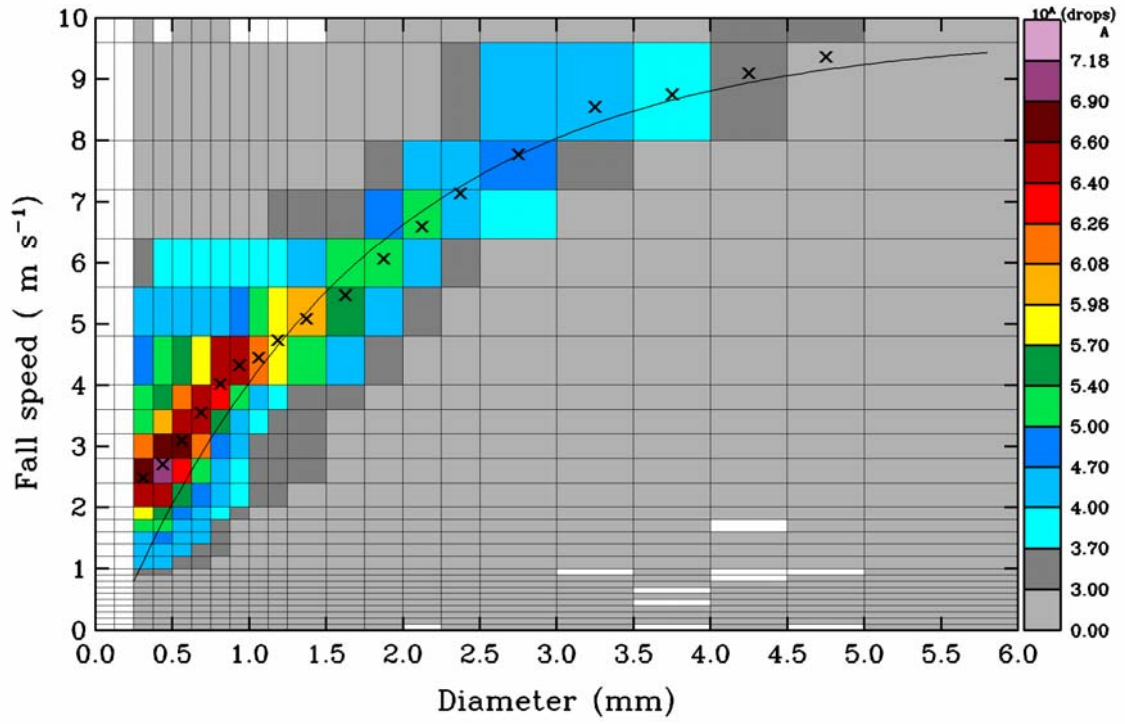


圖 3.1 同圖 2.4，黑實線表示理想水滴終端速度(Atlas et al. 1976 after Gunn and Kinzer 1949)。



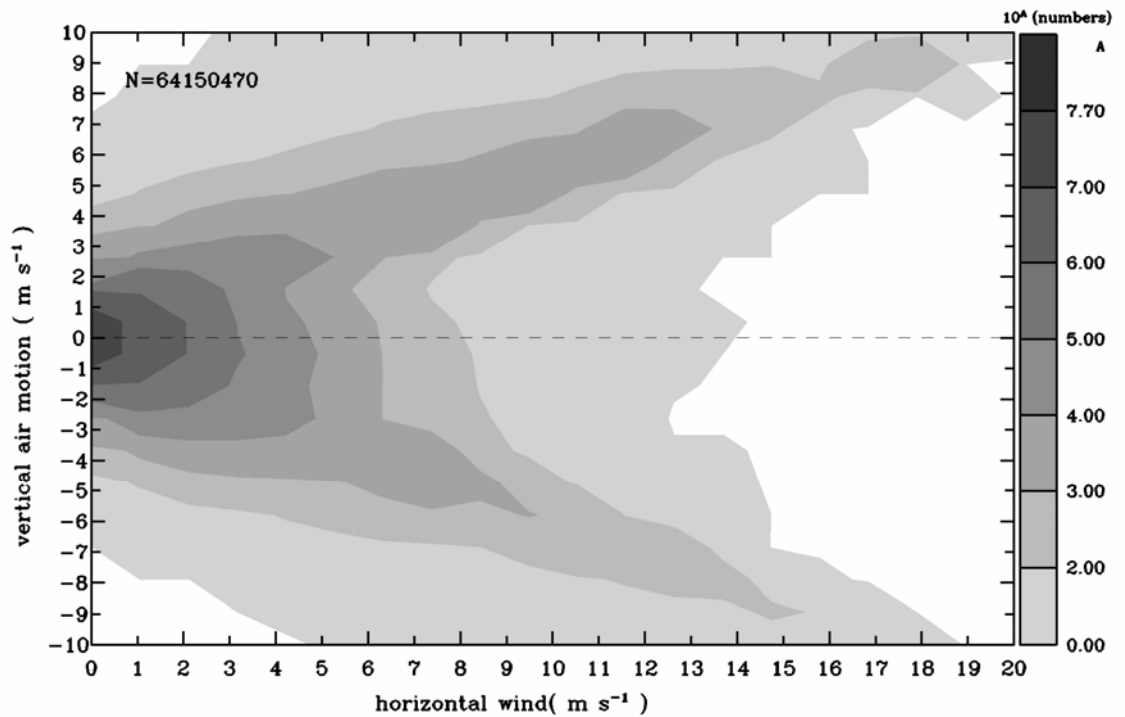


圖 3.2 瞬時周圍環境風場頻率圖，統計時間為 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日，降雨期間的三維超音波風速計資料(每秒 10 筆觀測值)，共 64150470 筆觀測數據。橫軸為水平風速(單位為  $\text{m s}^{-1}$ ，間距為  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ )，縱軸為空氣垂直運動(單位為  $\text{m s}^{-1}$ ，間距為  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ ，正值代表上升運動，負值代表下降運動)，色階表示次數分布(間距如圖右側所標示，係數為 10 的次方)。

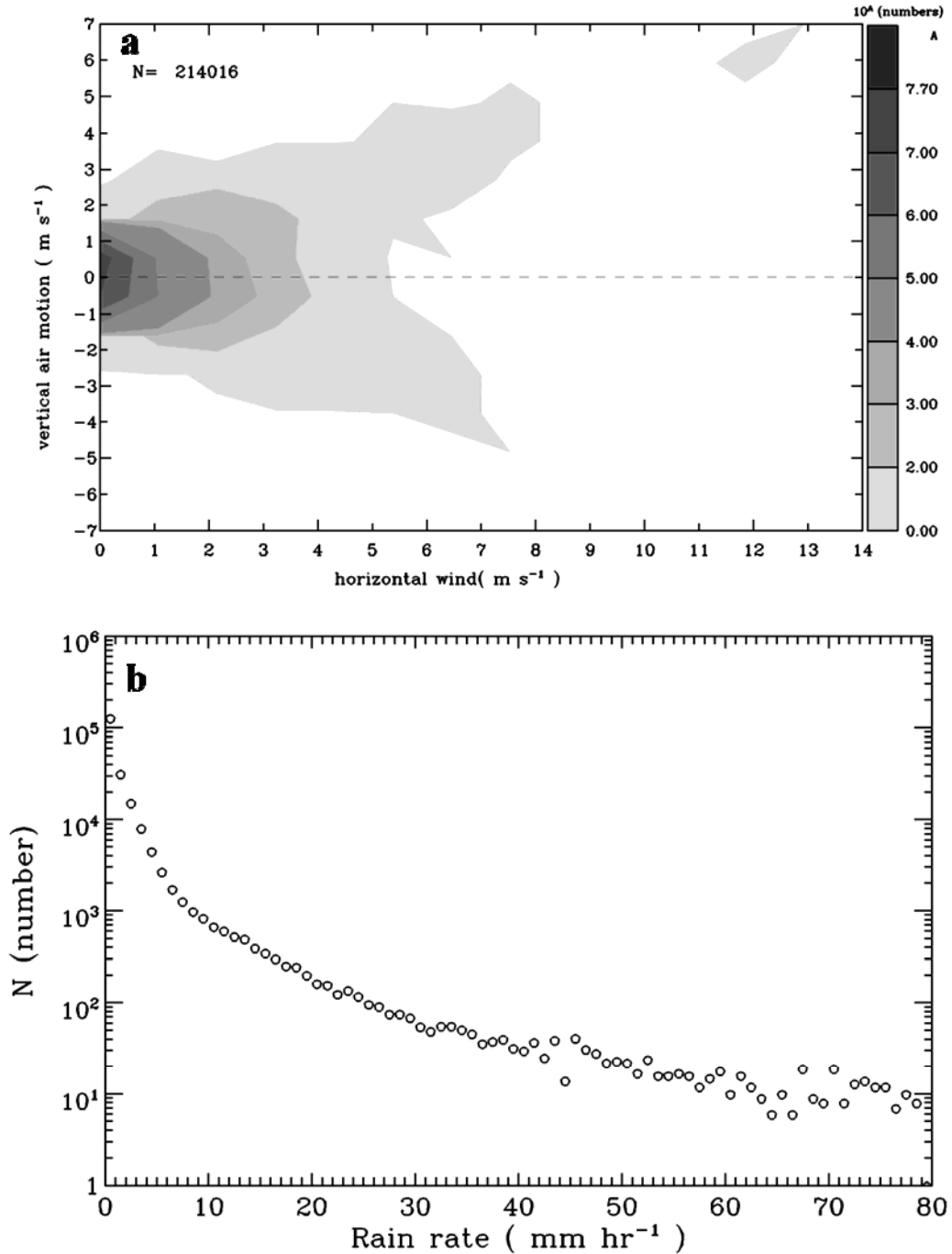


圖 4.1 (a)平均 30 秒之周圍環境風場頻率圖，統計時間為 2010 年 06 月 24 日至 2011 年 06 月 19 日，降雨期間之三維超音波風速計資料(每秒 10 筆觀測值)，共 214016 筆觀測數據。橫軸為水平風速(單位為  $\text{m s}^{-1}$ ，間距為  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ )，縱軸為空氣垂直運動(單位為  $\text{m s}^{-1}$ ，間距為  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ ，正值代表上升運動，負值代表下降運動)，色階表示次數分布(間距如圖右側所標示，係數為 10 的次方)。(b)降雨強度頻率統計，橫軸為降雨強度(單位為  $\text{mm hr}^{-1}$ ，間距為  $1.0 \text{ mm hr}^{-1}$ ，除了第 1 格之區間條件為  $0.1$  至  $1.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )，縱軸為總次數。

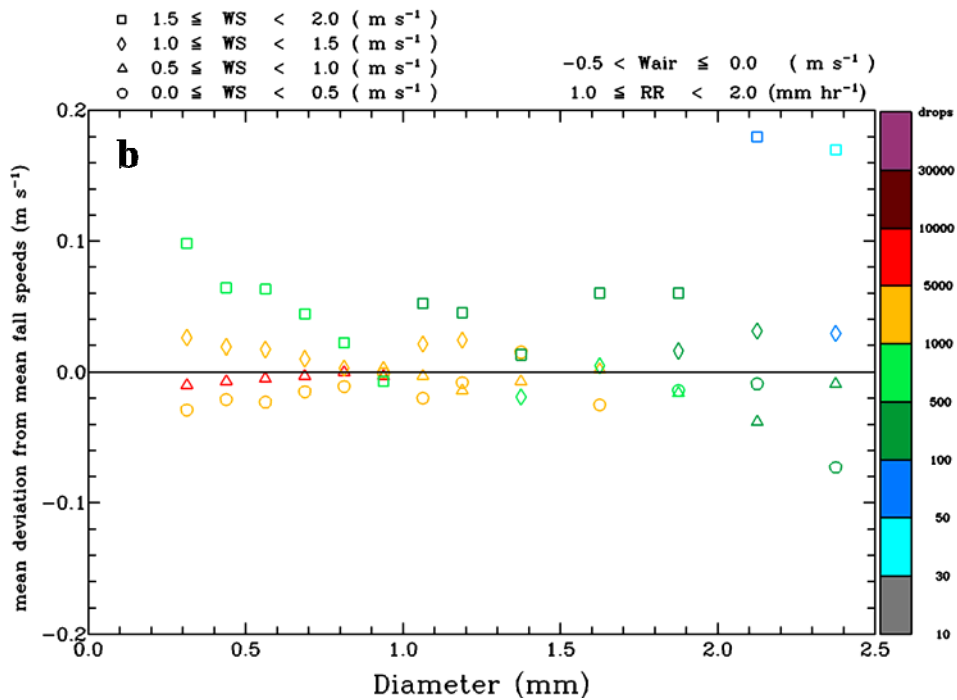
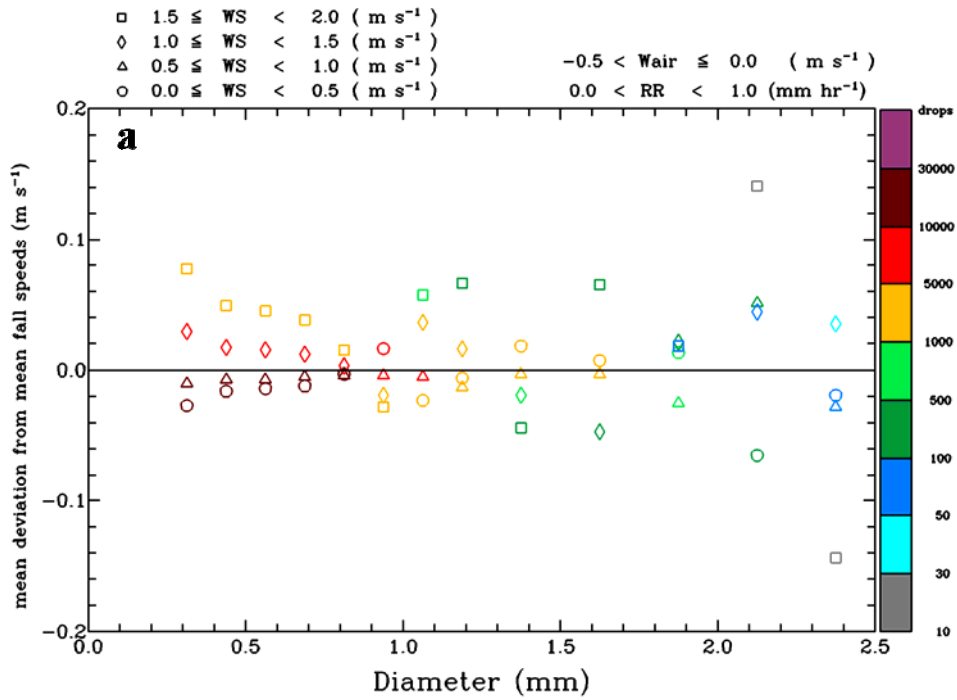


圖 4.2 當空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 \text{ m s}^{-1}$ )分別與(a)降雨強度( $0.0 < RR < 1.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )、(b)降雨強度( $1.0 < RR < 2.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )以及(c)降雨強度( $2.0 < RR < 3.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )條件相同時，不同水滴直徑在四種水平風強度(空心符號)下之速度偏差情形。橫軸為水滴平均直徑(單位為 mm，不等間距)，縱軸為水滴落速相對於平均落速之偏差(單位為  $\text{m s}^{-1}$ )，色階表示統計次數(間距如圖右側所標示，黑色表示少於 10 次)。

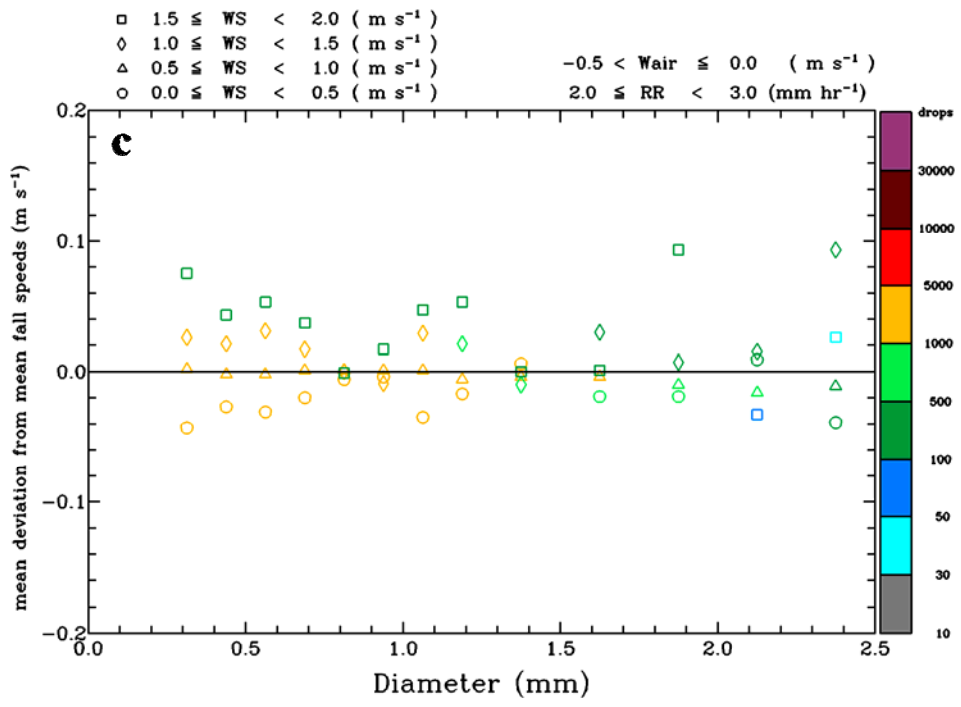


圖 4.2 (續)

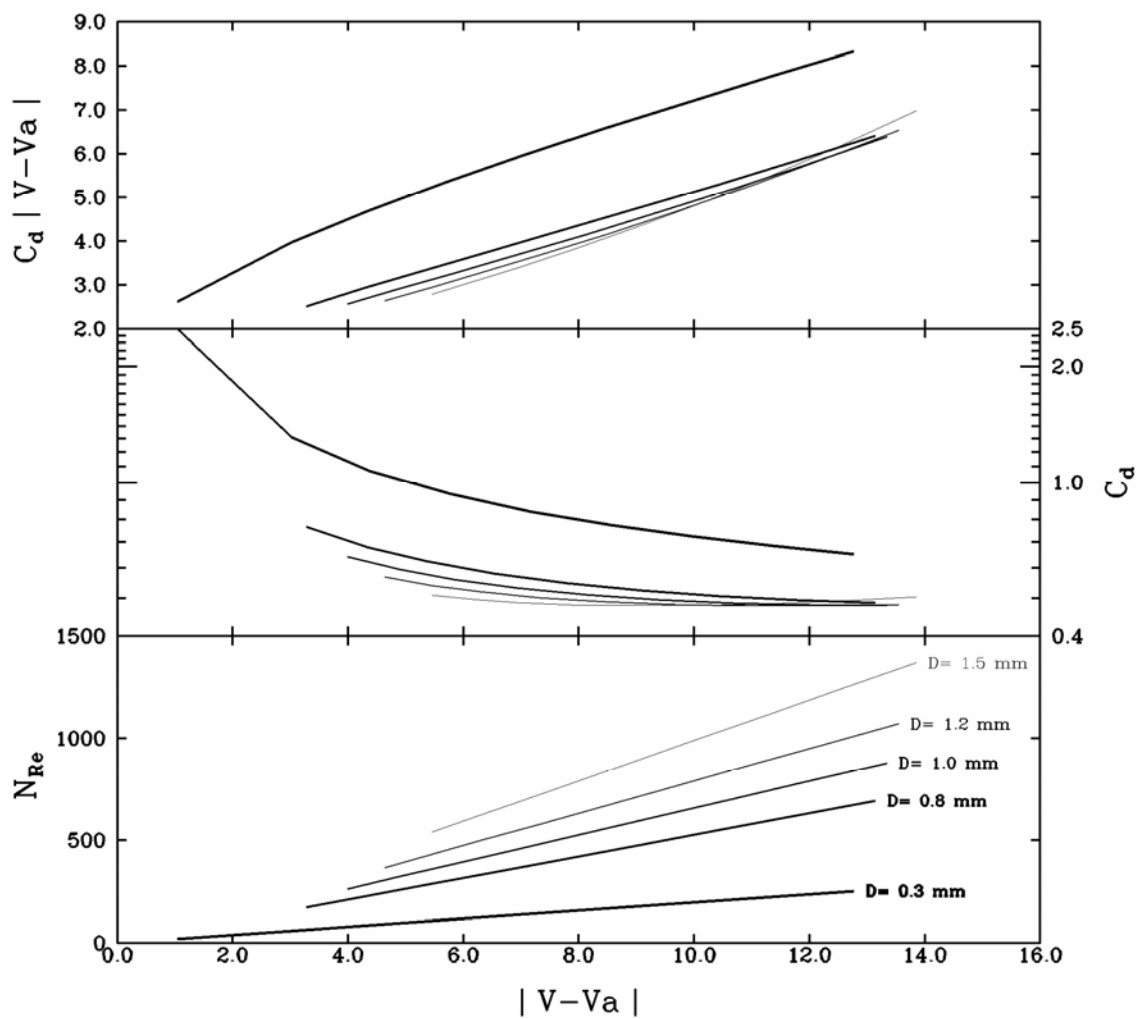


圖 4.3 五種水滴粒徑(如線條所示)落下時相對空氣運動的速度( $|V-Va|$ )增加時，雷諾數( $N_{Re}$ )、拖曳係數( $C_d$ )和  $C_d|V-Va|$ 項的變化情形。

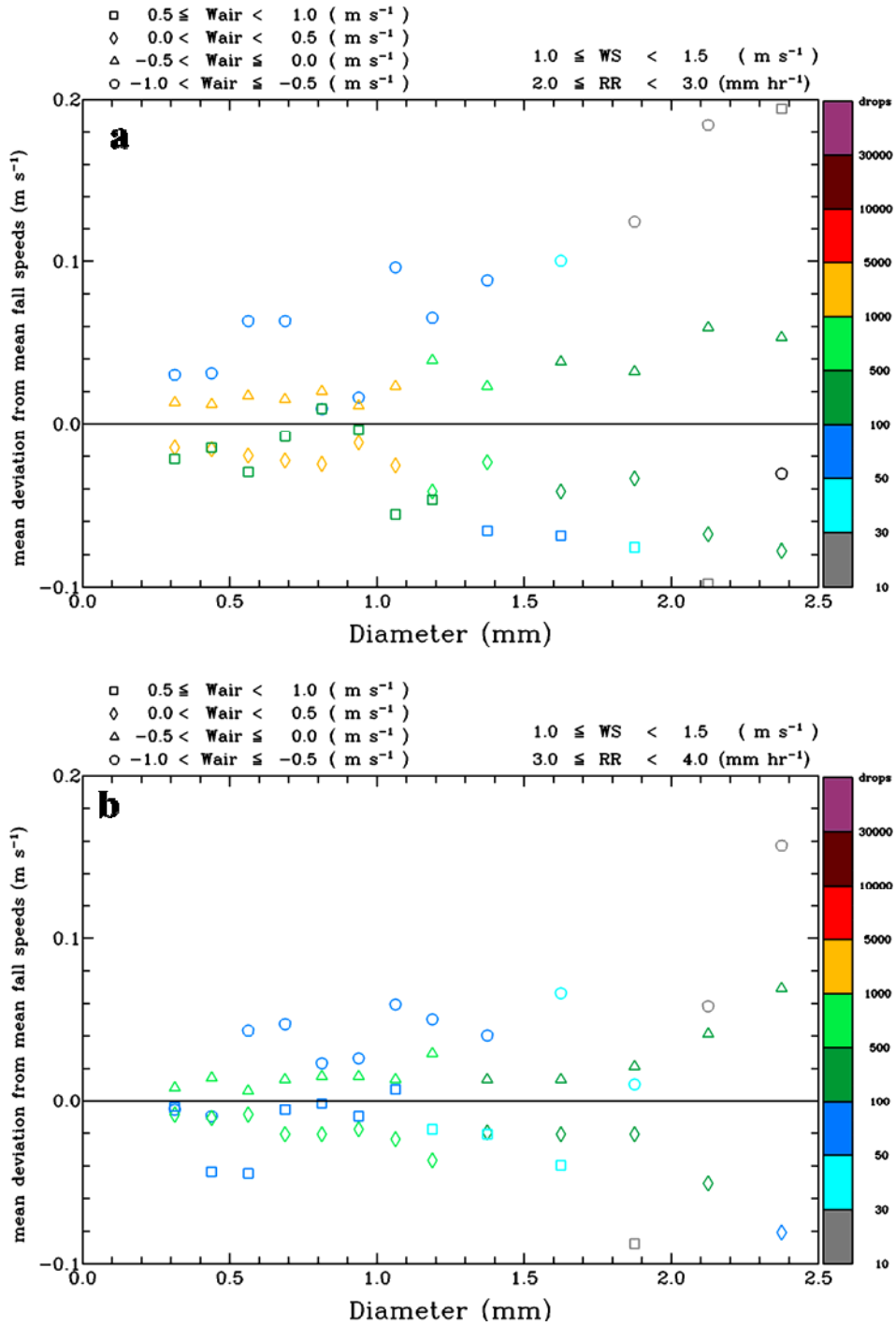


圖 4.4 同圖 4.2，但當水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5 \text{ m s}^{-1}$ )分別與**(a)**降雨強度( $2.0 \leq RR < 3.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )、**(b)**降雨強度( $3.0 \leq RR < 4.0 \text{ mm hr}^{-1}$ )條件相同時，不同水滴直徑在四種空氣垂直運動(空心符號)下之速度偏差情形。

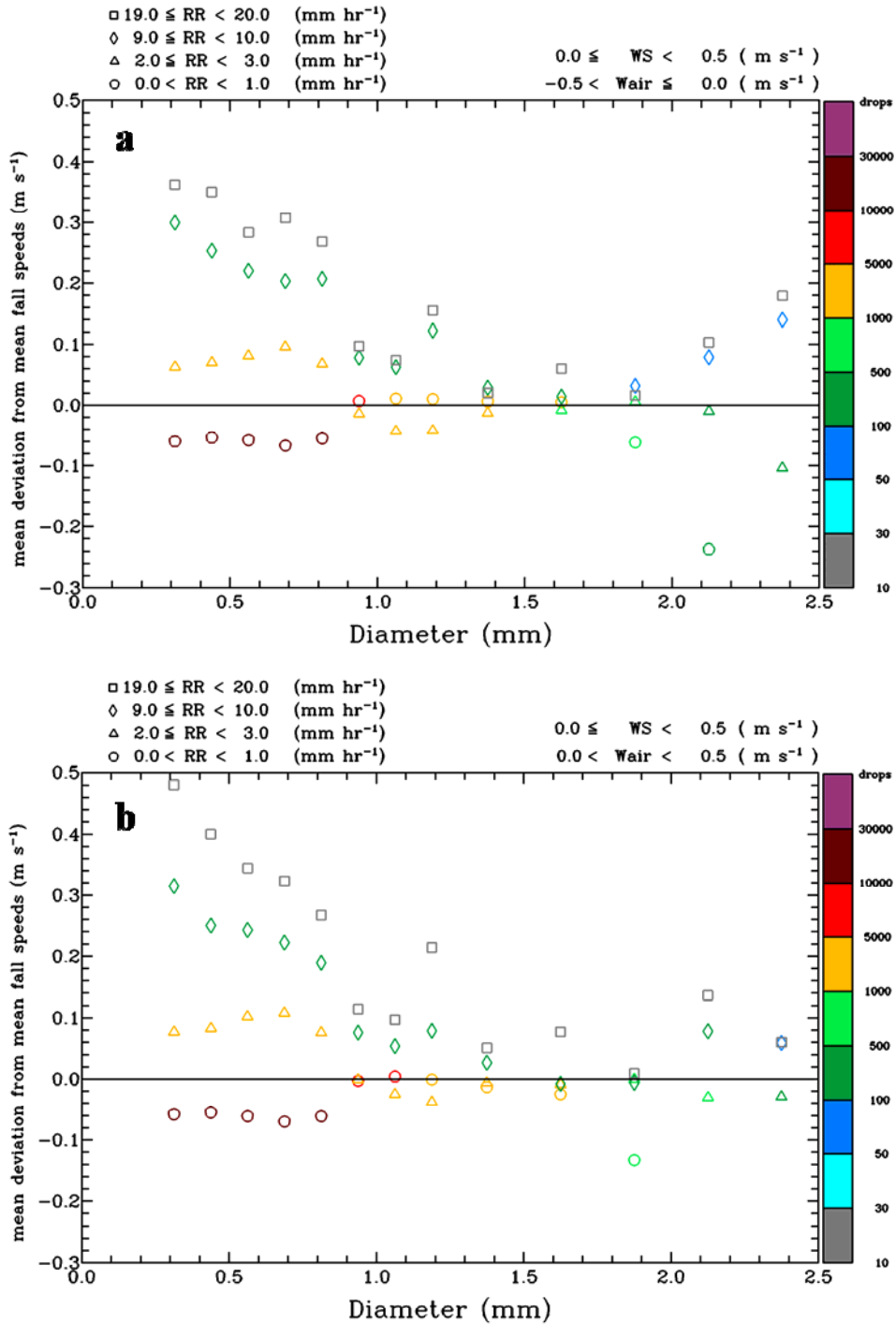


圖 4.5 同圖 4.2，但當水平風強度( $0.0 \leq WS < 0.5 \text{ m s}^{-1}$ )分別與**(a)**空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 \text{ m s}^{-1}$ )、**(b)**空氣垂直運動( $0.0 < W_{air} \leq 0.5 \text{ m s}^{-1}$ )以及**(c)**水平風強度( $1.0 \leq WS < 1.5 \text{ m s}^{-1}$ )和空氣垂直運動( $-0.5 < W_{air} \leq 0.0 \text{ m s}^{-1}$ )條件相同時，不同水滴直徑在四種降雨強度(空心符號)下之速度偏差情形。

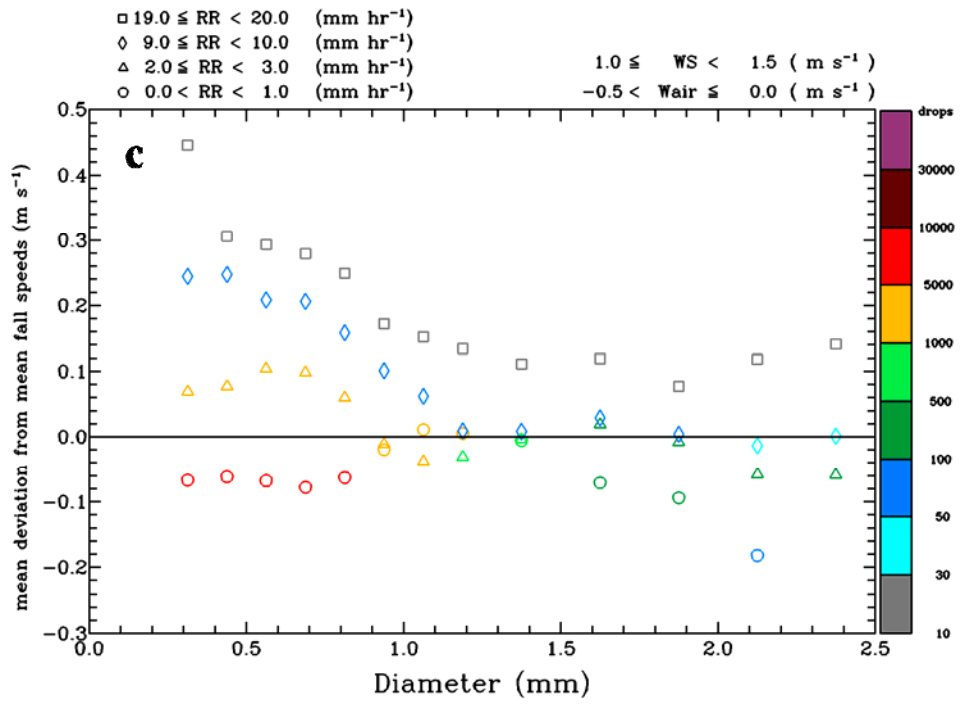


圖 4.5 (續)



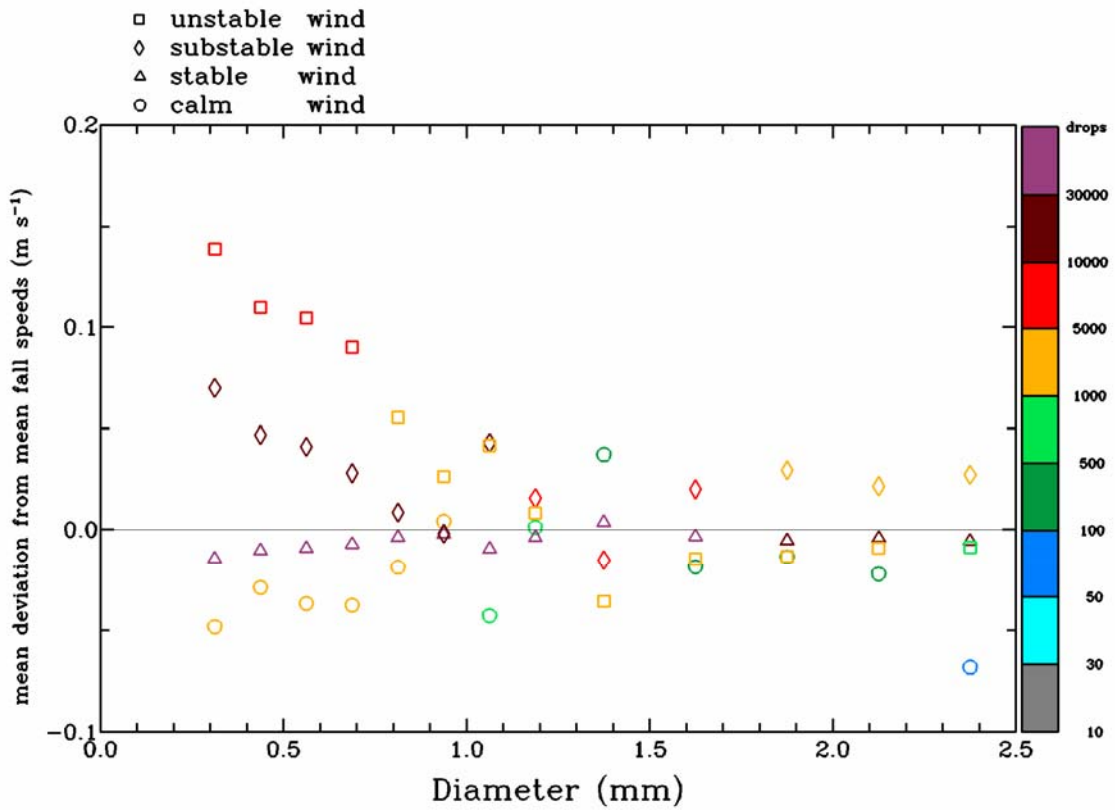


圖 4.6 同圖 4.2，但為不同水滴直徑在四種風場穩定度(靜風、穩定、次穩定和不穩定風場，以空心符號表示)下之速度偏差情形。靜風環境為 30 秒內的每筆水平風速小於  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  且垂直運動之絕對值小於  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ 。並將非靜風條件依標準差分成穩定、次穩定和不穩定風場：穩定風場為 30 秒內的水平風一倍標準差與垂直速度一倍標準差皆小於  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ ；不穩定風場為兩者標準差皆大於  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ；而其餘的皆屬於次穩定風場。