

專 論

蒸發散量 Penman-Monteith 估算方程式  
蒸汽壓力差計算式檢測與評估

**Assessment on the Optimal Applicability of  
Vapor-Pressure-Deficit Calculation Methods  
in the Penman-Monteith Equation for  
Estimating Evapotranspiration**

農業工程研究中心助理研究員

農業工程研究中心副研究員

宋 易 倫\*

黃 振 昌

Yi-Lun Sung

Cheng-Chang Huang

摘 要

蒸汽壓力差(vapor pressure deficit, VPD)是表達大氣蒸發能力重要指標,在蒸發散量混合法或 Penman-Monteith 型態估算模型亦居重要成分。眾多蒸發散量估算方程式中涉及 VPD 之計算,由於地域性氣候環境背景特性、氣象因子選用考量、取樣資料頻率多寡、資料平均方式及資料組合方式等之不同,目前遂有超過二十種以上 VPD 計算式,廣為國內外著名機構或學者推荐在世界各地應用。

本文以台灣地區各地農業氣候分區 2002-2003 年實際氣象觀測記錄,應用頻率分析法及統計指標法進行檢測評估。其中,頻率分析法係藉誤差、全距、優劣排序及出現頻率,並匹配權重指數予以量化方式;統計指標法係採根均方差(root mean square error, *RMSE*)、相關係數(coefficient of correlation,  $R^2$ )及效率係數(coefficient of efficiency, *CE*)三項客觀統計指標,分別進行國內外機構或學者所推荐 3 種型態共計 26 款 VPD 計算式,在國內本土環境應用時適用性之評估。

分析結果顯示,以頻率分析法而言,各地農業氣候分區均呈現,VPD 計算式以 24 個時溫度日平均為飽和蒸汽壓力,與濕球下陷量為實際蒸汽壓力,具誤差最少、全距最小、出現頻率最多及最高權重指數,性能表現最佳,這樣的結果,對照統計指標法之檢測評估,同樣具最低 *RMSE*、 $R^2$  值 0.99 以上及最大 *CE*,性能表現優於其他所有 VPD 計算式,兩者結果一致。因此,綜合上述兩項方法評估結果,本文建議 24 個時溫度日平均為飽和蒸汽壓力,與濕球下陷量為實際蒸汽壓力,堪稱最適台灣

\*通訊作者,農業工程研究中心助理研究員,32061 桃園縣中壢市中園路 196-1 號, yilun@aerc.org.tw

氣候環境本土化 VPD 計算式，可在台灣各地農業氣候分區應用，而國際性著名機構或學者所推薦 VPD 計算式，並不適合在台灣繼續應用。

**關鍵詞：**蒸發散量，Penman-Monteith 方程式，蒸汽壓力差。

## ABSTRACT

Vapor pressure deficit (VPD) is a significant index for the capacity of evaporation, and also plays an important parameter for estimating evapotranspiration, particularly in the combination or Penman-Monteith type equations. Due to the difference on the environmental climate characteristic, climate variables selected, number of records sampled, averaging means and compoundable ways, there are 3 types 26 VPD calculation methods which were widely used for estimating evapotranspiration around the world.

Those methods for VPD calculation were analyzed and compared using 2002-2003 data from meteorological stations to determine the most appropriate method that can be applied in Taiwan. Frequency Approach (FA) and Statistical Index Approach (SIA) were used to evaluate and compare the results and applicability among these methods in Taiwan. Error, range, frequency, and weighted index (WI) were used in FA. Three objective statistical indexes, root mean square error (*RMSE*), coefficient of correlation ( $R^2$ ), and coefficient of efficiency (*CE*), were used in SIA.

For the FA, the results indicated that the VPD calculation using mean of 24 hourly temperature values as saturation vapor pressure, and wet-bulb depression as actual vapor pressure yielded the lowest error, the least range, and the most frequency with the highest WI. These outcomes were as well as the SIA with the lowest *RMSE*,  $R^2$  higher than 0.99 and the highest *CE*. The performance of this VPD method was proved better than all other VPD methods. The findings were consistent with attempts at FA and SIA in this paper. Accordingly, this VPD method was recommended to apply in Taiwan. However, the other VPD calculation methods in literature were not recommended to be used in Taiwan.

**Keywords:** Evapotranspiration, Penman-Monteith equation, Vapor pressure deficit.

## 一、前言

Penman-Monteith 方程式係歷經過全世界 11 個(涵蓋乾燥及潮溼氣候)地區、20 個國際著名蒸發散量估算式加以檢測評估後，於 1990 年獲美國土木工程師學會(American Society of Civil Engineers, ASCE)推薦(Jensen *et al.*, 1990)，也在 1994 年為國際灌溉排水委員會(International Committee of Irrigation and Drainage, ICID)頒布(Allen *et al.*, 1994)，及聯合國糧食與農業組織

(Food and Agriculture Organization, FAO)不斷應用與驗證下，相繼從 1975 年建議、1977 年更新(Doorenbos *et al.*, 1975、1977)，再結合作物冠層阻力(crop canopy resistance)及空氣動力阻力(aerodynamic resistance)觀念(Monteith, 1981; Monteith *et al.*, 1990)，復於 1998 年改版推薦(Allen *et al.*, 1998)，受世界著名專業學術及國際性機構，唯一一致認可推荐之蒸發散量估算模型，包含有：提供蒸發散熱量來源之輻射項  $ET_{rad}$ ，與驅動蒸發散力量來源之空氣動力項  $ET_{aero}$ ，

$$ET_o = ET_{rad} + ET_{acro}$$

$$= ET_{rad} + \frac{\gamma \frac{900}{T+273}}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} u_2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

(1)式中， $ET_o$ ：蒸發散量(mm/day)； $\gamma$ ：乾溼度常數(psychrometric constant, mb/°C)； $T$ ：日平均溫度(°C)； $\Delta$ ：飽和蒸汽壓力曲線斜率(slope of saturated vapor pressure curve, mb/°C)； $u_2$ ：離地面 2 公尺高風速(m/s)； $e_s$ ：飽和蒸汽壓力(mb)； $e_a$ ：實際蒸汽壓力(mb)； $e_s - e_a$  即為空氣動力項蒸汽壓力差(vapor pressure deficit, VPD)，或稱飽和差(saturation deficit)。

蒸汽壓力差 VPD，與水份供應、熱量來源併列，同為構成蒸發現象三大物理條件，是表達大氣蒸發能力重要指標，亦是混合模型蒸發散量估算重要成分。蒸發散量混合模型估算式，從早期 Penman (1948) 率先發表混合法方程式，及隨後幾年研究成果論文發表(Penman, 1956, 1963)，到當今唯一獲 ASCE 推薦，國際性機構 ICID 頒布，及聯合國組織 FAO 認可、更新、改版推薦之 Penman-Monteith 方程式(Allen *et al.*, 1994, 1998)，以及 ASCE (2005) 再度以專業學術立場，建立指針級、水準標記級蒸發散量方程式，如下(2)式所示 ASCE 標準化 Penman-Monteith 方程式(Allen *et al.*, 2005)，歷經近一甲子歲月不斷演變，VPD 一直都是空氣動力項考慮要素。

$$ET_o = ET_{rad} + \frac{\gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+C_d u_2)} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式中， $C_n$ 、 $C_d$ ：常數，隨參考作物及時間期距不同而異， $C_n$  範圍 37~1,600， $C_d$  範圍 0.24~1.7。餘同(1)式。

VPD 計算式之決定，會影響蒸發散量之估算，誤差程度從 81% 之低估到 108% 之高估(Sadler *et al.*, 1989)，精確度差異範圍-0.9%~-8.4% (Yoder *et al.*, 2005)，也會改變風速函數(wind function)之型態(shape)與大小(magnitude) (FAO, 1975, 1977; Cuenca *et al.*, 1982)，亦即同一地區同樣試驗數據，引用不同 VPD 計算式，風速函數可以是線性(linear)亦可以是幕次(power)型態呈現，而

函數內含數值大小亦隨之不同(FAO, 1975, 1977；宋易倫等，2006)；不同 VPD 計算式，致 VPD 估算誤差從低估 329% 到高估 575% (黃振昌等，2003)；晝間 VPD 與全天 VPD 間關係，具 127~152% 高度關聯之環境特性(Howell *et al.*, 1995；宋易倫等，2004)；乾燥氣候環境估算蒸發散量所致高估偏差現象，VPD 是主要氣象指標(Hargreaves *et al.*, 2004)；不同氣候環境估算蒸發散量，在所有氣象變數中，VPD 是最為敏感氣象參數，經檢測 VPD 提高 4mb 時，蒸發散量將增加 0.54~1.22 mm (Irmak *et al.*, 2006)。

在農藝領域探討作物模型相關課題上，VPD 亦具舉足輕重，如影響作物用水及乾果產量關係(Tanner *et al.*, 1983)、輻射光能利用效率(Stockle *et al.*, 1990; Manrique *et al.*, 1991; Kiniry *et al.*, 1992)、溫室設施盆栽花卉或作物用水量化指標(Baille *et al.*, 1994；陳加忠，1999)、作物水份逆境指標(CWSI)要項(Yazar *et al.*, 1999; Al-Faraj *et al.*, 2000; Irmak *et al.*, 2000; Payero *et al.*, 2005)等；即使在今日應用尖端先進之遙測技術，探討大面積(區域)蒸發散量估算，VPD 亦是不可偏廢之重要考量因子(Howell *et al.*, 1984)。

蒸發散量估算涉及 VPD 之計算，從 Penman (1948) 在當時試驗儀器設備簡陋條件下之建議，到現今觀測儀器設備質量提昇且日新月異，以及無數國內外機構或學者不斷反覆檢測評估下，推薦在世界各地廣泛應用者很多，而由於：

1. 地域性氣候環境特性，如乾燥、溼潤，海島型、內陸型、地中海型氣候等；
2. 氣象因子選用不同，如最高溫度  $T_{max}$ 、最低溫度  $T_{min}$ 、清晨 8 點露點溫度  $T_{dp8}$ 、最高相對溼度  $RH_{max}$ 、最低相對溼度  $RH_{min}$ 、最低露點溫度  $T_{dpmin}$ 、乾球溫度  $T_{dry}$ 、濕球溫度  $T_{wet}$  等；
3. 氣象因子(如  $T$ 、 $RH$ 、 $T_{dp}$  等)取樣資料頻率個數多寡，如一天一個或二個或四個或六個或多個時點資料等；
4. 氣象資料平均方式不同，如最高與最低之平均、二個或四個或六個或多個時點資料之平均；
5. 氣象資料組合方式不同，前述 2-4 項各種不同選擇組合等；

所以，國內外機構或學者推荐在世界各地廣泛應用之不同 VPD 計算式，目前已超過二十種以上。

有鑒於國內以往在蒸發散量相關課題探討研究，於涉及空氣動力項蒸汽壓力差 VPD 計算之同時，均未曾視國內氣候環境條件加以檢測後應用，大多仍以不甚嚴謹地援引國外推薦方程式或查表或內插等方式取得，如陳尙等(1967)引進 Penman (1963)混合法試算及檢討旱作物需水量；徐森雄等(1987)應用 Penman (1948)方程式估算台灣地區台北等七個測站蒸發量；張本初(1990)應用 modified Penman 在內共八組蒸發或蒸發散模型，分析各項氣象因子對模式之相對敏感度，進而探討作物需水量最佳模式；梁仁有等(1995)引用 Penman-Monteith 等 10 款方程式，應用 Simmeteo 動力模式，進行氣候改變對台灣地區蒸發散量影響的模擬研究；甘俊二等(1996a)應用 Penman-Monteith 方程式，推估台灣地區玉米、高粱、大豆及落花生四種主要旱作物，不同區域不同期作下需水量，並以所推估之模式進一步做合適性研究(甘俊二等，1996b)；童慶斌等(2000)採用 Penman-Monteith 方程式計算作物需水量，模擬在氣候變遷下對灌溉需水量之影響；郭振民等(2002)、陳姜琦等(2002)利用衛星遙測輔以 Penman-Monteith 方程式估算區域蒸發散量；葉信富等(2005)以 Penman-Monteith 方程式，比較數個潛勢蒸發散量經驗公式，在台南地區最佳化之探討；陳述等(2008)應用 Penman-Monteith 方程式估算水稻作物係數…等。

因此，本文以頻率分析法(frequency approach)及統計指標法(statistical index approach)具科學、客觀的研究分析方法，進行國內外機構或學者所推荐 3 種型態共計 26 款 VPD 計算式，在國內各地農業氣候分區本土環境應用時，其適用性之檢測與評估。其中，頻率分析法係藉誤差(error)、優劣排序、出現頻率(frequency)及全距(range)，並匹配權重指數(weighted index, WI)予以量化方式分析；統計指標法係採根均方差(root mean square error, RMSE)、相關係數(coefficient of correlation,  $R^2$ )及效率係數(coefficient of efficiency, CE)三種

客觀統計指標分析。

## 二、材料及方法

### 2.1 蒸汽壓力差 VPD 計算式

蒸汽壓力差 VPD 之研究先驅，最早可回溯到二百多年前，Dalton(1802)探討蒸發現象時，認為自由水面蒸發率  $E$ ，可以汽壓梯度(vapor pressure gradient)與風速函數(wind function)  $f(u)$ ，予以綜合表徵，

$$E = f(u)(e_{srf} - e_a) \dots\dots\dots(3)$$

(3)式中， $E$ ：單位時間水深。 $f(u)$ ：風速  $u$  的函數。 $e_{srf}$ ：蒸發面飽和蒸汽壓力，單位 mb 或 kpa 或 mmHg。而由於蒸發面(如水面或植物面或地面等)資料不易量測，造成應用上不便，Penman (1948)於是透過若干假設，以空氣中飽和蒸汽壓力  $e_s$  取代  $e_{srf}$ ，並以露點溫度之飽和蒸汽壓力代表  $e_a$ ，應用 Dalton (1802)理念，並擴大延伸(3)式實際應用層面，得國際上廣泛應用很久的蒸發散量混合空氣動力項，

$$E = 0.35(1 + 0.0098u_2)(e_s - e_a) \dots\dots\dots(4)$$

(4)式中， $e_s - e_a$  即是 VPD，Penman (1948)當年於英國 Rothamsted 試驗站的試驗， $e_s$  是以每 4 小時量測一次，一天共計 6 次之平均氣溫取得， $e_a$  是由鄰近測站每 6 小時量測一次，一天共計 4 次之平均露點溫度獲得，Penman 在隨後幾年研究論文之發表，如 1956、1963 年，因計量單位(英制、公制)，以及參考標的(水、牧草)引用之不同，僅改變空氣動力項內含地域性參數，如(4)式中的 0.35、1 及 0.0098，對上述  $e_s - e_a$  項，亦即 VPD 之計算，並未做任何修正或建議。

蒸發散量估算涉及 VPD 之計算，由於氣候乾溼環境特性、氣象因子引用考量、取樣資料頻率個數多寡、資料平均方式及資料組合方式等之不同，因此，繼 Penman(1948)測試建議後，VPD 計算式發展至目前，為國內外機構或學者推荐在世界各地廣泛應用，已超過二十種以上。

依據 Cuenca *et al.* (1982)之歸類，VPD 計算式大致可區分為三種型態：

1. 溫度平均法 (temperature averaging method, TAM), 即溫度先行平均後, 再代入飽和蒸汽壓力式, 如表 1 所示包含有 m1、m2...m12, 計 12 種不同 VPD 計算式;
2. 蒸汽壓力平均法 (vapor pressure averaging method, VPAM), 即溫度先代入飽和蒸汽壓力式後, 再行平均方式, 如表 1 所示包含有 m13、m14...m23 等 11 種不同 VPD 計算式;
3. 混合法 (hybrid method, HM), 上述兩款並混合乾濕球溫度方式, 如表 1 所示包含有 m24、m25、m26, 計 3 種不同 VPD 計算式。

爰此, Penman (1948)所推荐 VPD 計算式即屬 TAM 型態, 如表 1 所示之 m1。

ASCE (Jensen *et al.*, 1974, 1990)視可利用的氣象資料情況, 如  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{dp8}$ , 最高最低溫度時相對溼度  $RH_{min}$ 、 $RH_{max}$ , 加以組合設計, 建議如下 VPD 計算式, 屬 TAM 型態有 m9、m12, 屬 VPAM 型態有 m15、m23, 如表 1 所示。

$$VPD = e_s(T_{ave}) - e_a(T_{dp8}) \dots\dots\dots (5)$$

$$VPD = e_s(T_{ave})(1 - 0.01 \times RH_{ave}) \dots\dots\dots (6)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{dp8}) \dots\dots\dots (7)$$

$$VPD = 0.5 \times \left[ e_s(T_{max}) \left( 1 - \frac{RH_{min}}{100} \right) + e_s(T_{min}) \left( 1 - \frac{RH_{max}}{100} \right) \right] \dots\dots\dots (8)$$

其中,  $T_{ave}$ , 代表日最大值( $T_{max}$ )與日最小值( $T_{min}$ )之日平均。

FAO (Doorenbos *et al.*, 1975, 1977)以實用的觀點, 免除應用上須視環境條件予以校驗之困擾, 在 VPD 計算式氣象因子之考慮, 包括  $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 、 $T_{dpave}$ 、 $RH_{max}$ 、 $RH_{min}$ 、 $T_{dry}$  與  $T_{wet}$  等項, 建議國際上著名且在世界各地廣泛使用之 4 款 VPD 計算式, 其中, 第 1 及第 4 款 VPD 計算式, 分別如上述(6)、(8)式所示, 其餘第 2 及第 3 款 VPD 計算式如下,

$$VPD = e_s(T_{ave}) - [e_a(T_{wet}) - \gamma(T_{wbd})] \dots\dots\dots (9)$$

$$VPD = e_s(T_{ave}) - e_a(T_{dpave}) \dots\dots\dots (10)$$

式中,  $T_{wet}$ , 代表乾濕球溫度計之濕球(wet bulb)數據。 $T_{wbd}$  係濕球下陷量(wet bulb depression, wbd), 代表乾球溫度  $T_{dry}$  與濕球溫度  $T_{wet}$  之差值。

復經不斷應用與驗證, FAO 於 1998 年改版, 除原列第 4 款計算式之(8)式保留, 並改列為新版之第 2 款 VPD 計算式外, 再推荐另三種 VPD 計算式(Allen *et al.*, 1998)如下,

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{min}) \dots\dots\dots (11)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{min})(0.01 \times RH_{max}) \dots\dots\dots (12)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] (1 - 0.01 \times RH_{ave}) \dots\dots\dots (13)$$

基於灌溉系統設計經常須應用混合法方程式估算作物需水量, 以及不同 VPD 計算式導致不同風速函數之型態與大小, Cuenca *et al.* (1982) 選取  $T_{dpmin}$ 、 $T_{dpave}$ 、 $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 、 $RH_{min}$ 、 $RH_{max}$ 、 $T_{dry}$  與  $T_{wet}$  等氣象因子並加以組合, 建議共計 6 款 VPD 計算式, 其中, 第 2、第 3、第 5 及第 6 款 VPD 計算式, 分別如上述(10)、(6)、(8)及(9)式所示, 餘第 1 及第 4 款 VPD 計算式如下,

$$VPD = e_s(T_{ave}) - e_a(T_{dpmin}) \dots\dots\dots (14)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{dpave}) \dots\dots\dots (15)$$

Burman *et al.* (1983)就灌溉科技先進專業領域, 建議應以理論健全、廣泛應用的 Penman 混合方程式, 以為農業灌溉需水量之推估, 在 VPD 部分, 推荐四式, 依序分別如上述(10)、(6)、(15)及(5)式所示。

施嘉昌等(1987)應用 Penman 混合方程式, 以 1985 年秋作玉米試驗資料, 分析作物需水量之同時, 依 Cuenca *et al.* (1982)建議, 以玉米種植期間每月任取一天, 共計選取 4 天, 分析比較結

表 1 蒸氣壓力差(vapor pressure deficit, VPD)計算式一覽表

方法	蒸氣壓力差(vapor pressure deficit, VPD)計算式	推薦者(西元年-方法)
溫度平均法(temperature averaging method, TAM)		
m1	$e_s(T_{\text{mean}}) - e_a(T_{\text{dpmean}})$	Penman (1948); Yoder <i>et al.</i> (2005-11)
m2	$e_s(T_{\text{mean}}) - e_a(T_{\text{min}})$	Yoder <i>et al.</i> (2005-12)
m3	$e_s(T_{\text{mean}}) - e_a(T_{\text{mean}}) \times 0.01 \times \text{RH}_{\text{mean}}$	Howell <i>et al.</i> (1995-2A)
m4	$e_s(T_{\text{mean}}) - e_a(T_{\text{max}}) \times 0.01 \times \text{RH}_{\text{min}}$	Yoder <i>et al.</i> (2005-9)
m5	$e_s(T_{\text{mean}}) - e_a(T_{\text{min}}) \times 0.01 \times \text{RH}_{\text{max}}$	Yoder <i>et al.</i> (2005-8)
m6	$e_s(T_{\text{mean}}) - 0.005 \times [e_a(T_{\text{max}}) + e_a(T_{\text{min}})] \times \text{RH}_{\text{mean}}$	Yoder <i>et al.</i> (2005-10)
m7	$e_s(T_{\text{mean}}) - 0.005 \times [e_a(T_{\text{min}}) \times \text{RH}_{\text{max}} + e_a(T_{\text{max}}) \times \text{RH}_{\text{min}}]$	Yoder <i>et al.</i> (2005-7)
m8	$e_s(T_{\text{ave}}) - e_a(T_{\text{dpmin}})$	Cuenca <i>et al.</i> (1982-1)
m9	$e_s(T_{\text{ave}}) - e_a(T_{\text{dp8}})$	ASCE (1974-1;1990-1) ; Burman <i>et al.</i> (1983-4) ; 施嘉昌等(1987) ; 陳清田(1991) ; 陳清田等(1997)
m10	$e_s(T_{\text{ave}}) - e_a(T_{\text{dpave}})$	FAO (1977-3); Cuenca <i>et al.</i> (1982-2); Burman <i>et al.</i> (1983-1)
m11	$e_s(T_{\text{ave}}) - e_a(T_{\text{dpmean}})$	Howell <i>et al.</i> (1995-1)
m12	$e_s(T_{\text{ave}}) - e_a(T_{\text{ave}}) \times \frac{\text{RH}_{\text{ave}}}{100}$	ASCE (1974-2; 1990-2); FAO (1977-1) Cuenca <i>et al.</i> (1982-3) Burman <i>et al.</i> (1983-2); Howell <i>et al.</i> (1995-2)
蒸氣壓力平均法(vapor pressure averaging method, VPAM)		
m13	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{dpave}})$	Cuenca <i>et al.</i> (1982-4); Burman <i>et al.</i> (1983-3)
m14	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{dpmean}})$	ASCE (2005-2); Yoder <i>et al.</i> (2005-5)
m15	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{dp8}})$	ASCE (1974-3; 1990-3; 2005-4)
m16	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{min}})$	ICID (1994-3); FAO (1998-1) ASCE (2005-8); Yoder <i>et al.</i> (2005-6)
m17	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{max}})(0.01 \times \text{RH}_{\text{min}})$	ASCE (2005-7); Yoder <i>et al.</i> (2005-3)
m18	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{min}})(0.01 \times \text{RH}_{\text{max}})$	FAO (1998-3); ASCE (2005-6); Yoder <i>et al.</i> (2005-2)
m19	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{mean}})(0.01 \times \text{RH}_{\text{mean}})$	ASCE (2005-1)
m20	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - e_a(T_{\text{ave}})(0.01 \times \text{RH}_{\text{ave}})$	ASCE (2005-9)
m21	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})](1 - 0.01 \times \text{RH}_{\text{ave}})$	FAO (1998-4)
m22	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})](1 - 0.01 \times \text{RH}_{\text{mean}})$	Yoder <i>et al.</i> (2005-4)
m23	$0.5 \times \left[ e_s(T_{\text{max}}) \left( 1 - \frac{\text{RH}_{\text{min}}}{100} \right) + e_s(T_{\text{min}}) \left( 1 - \frac{\text{RH}_{\text{max}}}{100} \right) \right]$	ASCE (1974-4; 1990-4; 2005-5); FAO (1977-4; 1998-2); Cuenca <i>et al.</i> (1982-5); ICID (1994-1); Yoder <i>et al.</i> (2005-1)
混合法(hybrid method, HM)		
m24	$e_s(T_{\text{ave}}) - [e_a(T_{\text{wet}}) - \gamma(T_{\text{wbd}})]$	FAO (1977-2); Cuenca <i>et al.</i> (1982-6)
m25	$e_s(T_{\text{mean}}) - [e_a(T_{\text{wet}}) - \gamma(T_{\text{wbd}})]$	黃振昌等(2003-6A; 2005-6A; 2006- m25)
m26	$0.5 \times [e_s(T_{\text{max}}) + e_s(T_{\text{min}})] - [e_a(T_{\text{wet}}) - \gamma(T_{\text{wbd}})]$	ICID (1994-2); ASCE (2005-3)

註：1.資料來源，本研究整理。

2.由於資料取樣頻率個數不同，部分推薦者，係以近似的方式歸類，如施嘉昌等(1987)歸類於最為接近之 m9，Penman (1948)歸類於最為接近之 m1...等。

3.下標 ave，係最大值(max)與最小值(min)之日平均；mean，代表 24 個時資料之日平均，其餘同本文前述定義。

果，建議以  $T_{max}$  及  $T_{min}$  和之均值為  $e_s$  之變數，以  $T_{dp}$  或  $T_{min}$  為  $e_a$  之變數，兩者差值最能代表學甲地區 24 小時實際飽和差，即歸類如表 1 所示 TAM 型態之 m9，這樣的結論發現，堪稱國內經歷長久之作物需水量相關課題研究探討上，在當時是首見對 VPD 應用予以本土化，此後國內的研究，都得同樣結論(陳清田，1991；陳清田等，1997)。

ICID (Allen *et al.*, 1994)建議 Penman-Monteith 方程式為唯一作物需水量估算方法，有關 VPD 計算共推荐 3 式，其中第 1 及第 3 款 VPD 計算式，分別如(8)及(11)式所示，第 2 款 VPD 計算式如下(16)式所示，

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - [e_a(T_{wet}) - \gamma(T_{wbd})] \dots\dots\dots (16)$$

Howell *et al.* (1995)依 ASCE (1990)推荐 4 款 VPD 計算式為基礎，另斟酌研究地區環境特性，自行設計 4 種予以匹配，共計 8 種 VPD 計算式，氣象記錄係以每隔 15 分鐘取樣一次方式，一天共計 96 次，在美國 Great Plains 地區加以應用及探討，驗證結果，建議 3 式 VPD 計算式適用於半乾燥氣候環境，其中，第 2 款 VPD 計算式即為 ASCE(1990)所推荐，餘第 1 及第 2A 款 VPD 計算式，如下(17)、(18)式所示。

$$VPD = e_s(T_{ave}) - e_a(T_{dpmean}) \dots\dots\dots (17)$$

$$VPD = e_s(T_{mean})(1 - 0.01 \times RH_{mean}) \dots\dots\dots (18)$$

式中，Tmean 代表 96 個記錄之日平均。

黃振昌等(2003)參酌 VPD 內含氣象參數之考量，配套設計 24 款 VPD 計算式，經誤差(error)、根均方差(RMSE)、相關係數( $R^2$ )及效率係數(CE)四項統計指標檢測分析與探討，原編碼 6A 計算式具 Error 最小、RMSE 最低及 CE 最大，性能表現優於所有 24 款 VPD 計算式，分析結果證實，(19)式 VPD 計算式在台灣地區適用性最佳。

$$VPD = e_s(T_{mean}) - [e_a(T_{wet}) - \gamma(T_{wbd})] \dots\dots\dots (19)$$

應美國灌溉協會(irrigation association)請

託，ASCE (2005)再度以專業學術立場，建立指針級、水準標記級蒸發散量方程式，經包含海拔 2~2,900 m、年降雨 150~1,500 mm、跨越美國 16 州、涵蓋 49 地區、篩選 82 年樣本資料，亦即在多樣性氣候環境條件檢測驗證下，推荐如(2)式所示之 ASCE 標準化 Penman-Monteith 方程式(Allen *et al.*, 2005)，其中 VPD 部份，繼 1990 年之後，更新改版並優先順序建議如表 1 所示之 m19、m14、m26、m15、m23、m18、m17、m16 及 m20，計 9 款，其中，第 3、4、5、6 及 8 款，依序如上述(16)、(7)、(8)、(12)及(11)式所示，其餘第 1、2、7 及 9 款，依序如下(20)~(23)式所示。

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{mean})(0.01 \times RH_{mean}) \dots\dots\dots (20)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{dpmean}) \dots\dots\dots (21)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{max})(0.01 \times RH_{min}) \dots\dots\dots (22)$$

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})] - e_a(T_{ave})(0.01 \times RH_{ave}) \dots\dots\dots (23)$$

Yoder *et al.* (2005)於美國東南方 Tennessee 地區，以長達 5 年氣象觀測及滲漏計(lysimeter)試驗記錄，應用 ASCE 標準化 Penman-Monteith 方程式，檢測驗證潮溼環境下，作物蒸發散量估算精確程度，而所採用之 VPD 計算式，建議有如表 1 所示之 m23、m18、m17、m22、m14、m16、m7、m5、m4、m6、m1 及 m2，共 12 種 VPD 計算式，其中，第 1、2、3、5 及 6 款 VPD 計算式，依序如上述如(8)、(12)、(22)、(21)及(11)式所示，其餘各款，即第 4、7、8、9、10、11 及 12 款 VPD 計算式，依序如下(24)~(30)式所示。

$$VPD = 0.5 \times [e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})](1 - 0.01 \times RH_{mean}) \dots\dots\dots (24)$$

表 2 國內外機構或學者所推荐 VPD 計算式應用(或適用或驗證)地區與優先順序

推薦者(年)	應用或適用或驗證												
	地區	優先順序											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Penman (1948)	英國 Rothamsted 地區	m1											
ASCE (1974, 1990)	美國 Idaho 地區	m9	m12	m15	m23								
FAO (1975, 1977)	世界各地	m12	m24	m10	m23								
Cuenca <i>et al.</i> (1982)	—	m8	m10	m12	m13	m23	m24						
Burman <i>et al.</i> (1983)	—	m10	m12	m13	m9								
施嘉昌等(1987)	台灣學甲地區	m9											
陳清田(1991)	台灣嘉義地區	m9											
ICID (1994)	世界各地	m23	m26	m16									
Howell <i>et al.</i> (1995)	美國 Great Plains 地區	m11	m12	m3									
陳清田等(1997)	台灣地區	m9											
FAO (1998)	世界各地	m16	m23	m18	m21								
黃振昌等(2003)	台灣南北環境	m25											
ASCE (2005)	美國 16 州	m19	m14	m26	m15	m23	m18	m17	m16	m20			
Yoder <i>et al.</i> (2005)	美國 Tennessee 地區	m23	m18	m17	m22	m14	m16	m7	m5	m4	m6	m1	m2
黃振昌等(2005)	台灣地區	m25											
黃振昌等(2006)	台灣地區	m25											

資料來源：本研究整理。

$$VPD = e_s(T_{mean}) - 0.005 \times [e_a(T_{min}) \times RH_{max} + e_a(T_{max}) \times RH_{min}] \dots\dots\dots (25)$$

$$VPD = e_s(T_{mean}) - e_a(T_{min}) \times 0.01 \times RH_{max} \dots (26)$$

$$VPD = e_s(T_{mean}) - e_a(T_{max}) \times 0.01 \times RH_{min} \dots (27)$$

$$VPD = e_s(T_{mean}) - 0.005 \times [e_a(T_{max}) + e_a(T_{min})] \times RH_{mean} \dots\dots\dots (28)$$

$$VPD = e_s(T_{mean}) - e_a(T_{dpmean}) \dots\dots\dots (29)$$

$$VPD = e_s(T_{mean}) - e_a(T_{min}) \dots\dots\dots (30)$$

黃振昌等(2005)為比較探討國內外推荐 VPD 計算式在國內應用時之適用性,首見以頻率分析法,針對包括設計配套及國內外推荐在內,共計 24 種 VPD 計算式,評估探討在台灣各地農業氣候分區之應用性能,分析結果以原編碼 6A 計算式,具誤差最少、全距最小、出現頻率最多及最高權重指數,性能表現最佳,最為適用在台

灣各地農業氣候分區之應用,惟考量應用上的嚴謹度,仍有參酌 ASCE (2005)、Yoder *et al.* (2005) 所建議 VPD 計算式,進一步加以檢測評估之必要。

黃振昌等(2006)從國內外著名機構或學者所推荐 VPD 計算式彙整中,總共釐出計三種型態 26 款 VPD 計算式,並以 RMSE、R<sup>2</sup> 及 CE 三項統計指標,進行在國內應用時適用性之比較與探討,評估結果顯示,以原編碼 m25 計算式,具最低 RMSE、R<sup>2</sup> 值 0.99 以上及最大 CE,性能表現優於其他所有 VPD 計算式,這樣結果對照黃振昌等(2005)採頻率分析法評估之發現是一致,因此建議(19)式,可在台灣各地農業氣候分區加以應用。

綜合以上所述,若從 VPD 計算式應用(或適用或驗證)地區、優先順序與型態觀點而言,從彙整之表 1、表 2 及表 3 中,不難發現,單單一個國際化蒸發散量 Penman-Monteith 估算方程式,截至目前為止,內含 VPD 計算式,卻高達有 26 種之多,為國內外著名機構或學者推荐,推荐者各視地域氣候環境特性、氣象變數選用與組合,

表 3 國內外著名機構或學者推薦 VPD 計算式型態分類與被推荐次數一覽表

推薦者(年)	蒸汽壓力差 VPD 計算式型態																										
	溫度平均法 TAM												蒸汽壓力平均法 VPAM										混合法 HM				
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13	m14	m15	m16	m17	m18	m19	m20	m21	m22	m23	m24	m25	m26	
Penman (1948)	●																										
ASCE (1974, 1990)								●			●			●									●				
FAO (1975, 1977)									●		●												●	●			
Cuenca <i>et al.</i> (1982)								●		●	●	●											●	●			
Burman <i>et al.</i> (1983)									●	●		●	●														
施嘉昌等(1987)									●																		
陳清田(1991)									●																		
ICID (1994)																●							●				●
Howell <i>et al.</i> (1995)			●								●	●															
陳清田等(1997)									●																		
FAO (1998)																●		●			●		●				
黃振昌等(2003)																											●
ASCE (2005)															●	●	●	●	●	●	●		●				●
Yoder <i>et al.</i> (2005)	●	●		●	●	●	●							●		●	●	●				●	●				
黃振昌等(2005)																											●
黃振昌等(2006)																											●
被推荐次數	2	1	1	1	1	1	1	1	5	3	1	5	2	2	2	4	2	3	1	1	1	1	7	2	3	2	
	23												26										7				

資料來源：本研究整理。

建議 1~12 式不等且不同的 VPD 計算式，在世界各地廣泛應用，最少的有 Penman (1948)、施嘉昌等(1987)、陳清田(1991)、陳清田等(1997)、黃振昌等(2003)、黃振昌等(2005)及黃振昌等(2006)，僅推薦一式，其次依序是 ICID (1994)及 Howell *et al.* (1995)建議有 3 式，ASCE (1974, 1990)、FAO (1975, 1977)、Burman *et al.* (1983)及 FAO (1998)推薦有 4 式，Cuenca *et al.* (1982)建議有 6 式，ASCE (2005)幾乎是大改 1974 及 1979 年 4 式的版本，推薦式高達 9 款，更有甚者，亦是歷來之最，Yoder *et al.* (2005)建議式高達 12 款。

同樣的 VPD 計算式，在不同應用(或適用或驗證)地區，卻有不同地優先順序，如 m9，ASCE (1974、1990)在 1974、1990 年於美國 Idaho 地區、施嘉昌等(1987)的台灣學甲地區、陳清田(1991)的台灣嘉義地區及陳清田等(1997)的台灣地區，不是被推薦第一優先，就是唯一 VPD 計算式，然在 Burman *et al.* (1983)認為，卻是排列在

m10、m12 及 m13 之後，排序第 4。同樣的情形，如 m1，是 Penman (1948)在英國 Rothamsted 地區試驗，唯一 VPD 計算式，然在 Yoder *et al.* (2005)於美國 Tennessee 地區應用，卻是排序在第 11；如 m10，Burman *et al.* (1983)建議是第 1 優先，而 FAO (1975, 1977)及 Cuenca *et al.* (1982)卻分別推薦並排序在第 3 及第 2，顯示，地域氣候環境特性對 VPD 計算式之取捨或應用，影響至鉅。

VPD 計算式同樣的推薦者，在不同的年代或不同的應用(或適用或驗證)地區，也有不同的推薦順序，如 1974、1990 年，ASCE (1974、1990)在美國 Idaho 地區推薦 4 式，依序為 m9、m12、m15 及 m23，然在 2005 年時，ASCE (2005)大幅度改變以往推薦方式，僅保留原第 3 及第 4 的 m15 及 m23，改列為第 4 及第 5 外，另加 m14 等 7 款 VPD 計算式；於 1975、1977 年，FAO (1975、1977)推薦 m12、m24、m10 及 m23，然在 1998 年更新改版時，也幾近是大幅度改變的手法，僅保留 m23，另加 m16、m18 及 m21 (FAO,

表 4 台灣地區各地農業氣候分區氣象資料取樣背景

農業氣候分區	代表測站(站號)	經度	緯度	資料分析期限	樣本數(日, N)
西北區(II 區)	桃園區農業改良場(No. 72C44)	121°01'	24°57'	2002 年全年	348
	農業工程研究中心(No. A2C56)	121°14'	24°59'	2002/6/1~2003/5/31	352
中彰區(III 區)	中央氣象局台中測站(No. 46749)	120°40'	24°09'	2002 年全年	359
雲嘉區(IV 區)	中央氣象局嘉義測站(No. 46748)	120°25'	23°30'	2002 年全年	365
西南區(V 區)	學甲旱作灌溉試驗中心(No. 12O57)	120°11'	23°13'	2002 年全年	358
南部區(VI 區)	中央氣象局恆春測站(No. 46759)	120°44'	22°00'	2002 年全年	359
東岸區(VII 區)	中央氣象局花蓮測站(No. 46699)	121°36'	23°58'	2002 年全年	360
東北區(I 區)	中央氣象局宜蘭測站(No. 46708)	121°45'	24°46'	2002 年全年	365

1998), 前後兩次建議, 同樣都是推薦可以在世界各地應用, 然歷經反覆試驗、應用下, 不同年代卻有不同的推薦式。

VPD 從早期原創者 Penman (1948) 推薦唯一計算式開始, 隨後歷經近一甲子的研究與探討, 現階段發展規模, 大致可以 TAM、VPAM 及 HM 計 3 種型態, m1~m26, 26 款加以分類。從表 3 所示之黑點分佈, 每個推薦者所推薦 VPD 及其歸屬型態, 甚至推薦前後版本差異情況, 均清晰可見, 以國際性著名組織或機構的推薦為例而言, 如 1974、1990 年, ASCE (1974, 1990) 是屬 TAM 及 VPAM 型態各 2 式, 在 2005 年, 已改版並推薦 8 款 VPAM 型態及 1 款 HM 型態的 VPD; 如 FAO (1975, 1977) 於 1975、1977 年推薦, VPD 計算式是 TAM、VPAM 及 HM 型態, 3 種都有, 然在 1998 年更新改版時, 已全為 VPAM 型態; 如 ICID (1994) 於 1994 年推薦, VPD 計算式無 TAM 型態, 是屬 VPAM 及 HM 型態等等。

VPD 計算式應用於 Penman-Monteith 估算方程式, 現階段的研究探討上, 被推薦(或應用或適用或驗證)次數, 經統計, 在 m1~m26, 26 款計算式中, 以 VPAM 型態之 m23 最多, 高達 7 次, 其次是 TAM 型態之 m9 及 m12, 有 5 次, m16 有 4 次, m10、m18 及 m25 各有 3 次, 其餘各式是 1~2 次。若從 VPD 計算式 3 大型態角度來看, 以 VPAM 型態最多, 26 次, 其次是 TAM、HM 型態分居 23、7 次。

以上說明 VPD 計算式, 不同推薦者, 不同年代, 都有其不同應用(或適用或驗證)地區及不同優先順序, 在在顯示, VPD 計算式的適用性,

需視地域氣候環境特性加以檢測評估後, 應用才具意義。

## 2.2 VPD 計算式檢測評估方法

本文採用頻率分析法(frequency approach, FA)及統計指標法(statistical index approach, SIA)兩種, 整個流程可繪如圖 1 所示, 各項評價分析方式, 詳述如下。

### 1. 頻率分析法(frequency approach, FA)

誤差(error of vapor pressure deficit, error), VPD 第 i 式第 j 日計算式  $VPD_{i,j}$  與  $VPD_{24,j}$  之差值百分比, 以量度  $VPD_i$  偏差程度,  $error_{i,j}$  為正值, 表示  $VPD_{i,j}$  大於  $VPD_{24,j}$ , 屬高估現象,  $error_{i,j}$  為負值, 表示  $VPD_{i,j}$  小於  $VPD_{24,j}$ , 則呈低估。(下標 i 表示 1~26; 下標 j 表示分析樣本數,  $j = 1 \sim N$ , N 如表 4 所示)

$$error_{i,j}(\%) = \frac{VPD_{i,j} - VPD_{24,j}}{VPD_{24,j}} \times 100\% \dots\dots\dots(31)$$

優劣排序, 係  $VPD_{i,j}$  與  $VPD_{24,j}$  比較後, 以誤差絕對值  $|error_{i,j}|$  評等優劣並予排序, 絕對值最小為最優, 記為 rank (1), 次優者為 rank (2)... , 定義如下。

$$\min |error_{i,j}(\%)| \dots\dots\dots(32)$$

出現頻率(frequency,  $F_{ij}$ ), 係  $VPD_{i,j}$  與  $VPD_{24,j}$  比較後, 累計各式計算式  $VPD_i$  在各名次  $rank_i(n)$  出現次數  $F_{ij}$ 。

$$F_{i,j} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{26} rank_{i,j}(i) \dots\dots\dots(33)$$

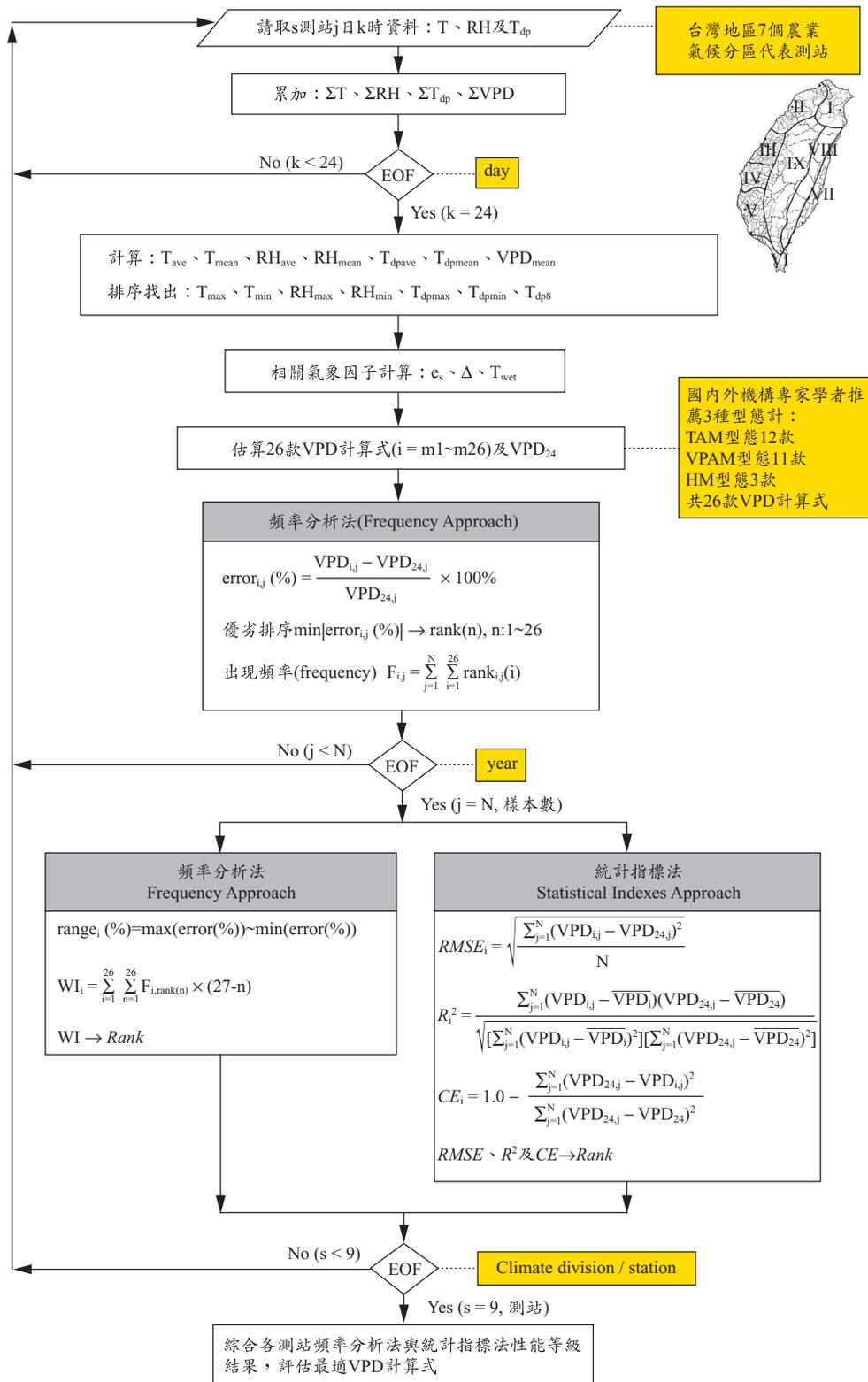


圖 1 台灣地區最適蒸汽壓力差(VPD)計算式評估流程圖

全距(range)，表示  $VPD_i$  誤差分佈範圍，以 (31)式分析所得最大值( $error_{max}$ )與最小值( $error_{min}$ ) 差值計之， $range_i$  值愈大，代表  $VPD_i$  與  $VPD_{24}$  離異程度愈大，反之， $range_i$  值愈小，代表  $VPD_i$  與  $VPD_{24}$  離異程度愈小， $range_i$  值，界定如下。

$$range_i(\%) = \max(error(\%)) - \min(error(\%)) \dots (34)$$

權重指數(weighted index,  $WI_i$ )，將  $VPD_i$  與  $VPD_{24}$  優劣比較之等級出現頻率  $F_{ij}(f)$ ，給予相對權重，最優者 26，次優者 25，...並予累總， $WI$  值係  $VPD_i$  優劣等級出現頻率之量化指標。

$$WI_i = \sum_{i=1}^{26} \sum_{n=1}^{26} F_{i,rank(n)} \times (27 - n) \dots (35)$$

性能等級(rank of performance,  $Rank$ )，為評估各式  $VPD$  計算式估算性能，頻率分析法運用性能等級  $Rank$  予以評價，以  $WI_i$  值愈大，給予  $VPD_i$  估算性能，在國內環境適用性最佳評價，記以  $Rank1$ ，次佳記以  $Rank2$ ，餘類推；反之，最差者記以  $Rank26$ 。

## 2. 統計指標法(statistical index approach, SIA)

根均方差(root mean square error,  $RMSE$ )，代表第  $j$  日各計算式  $VPD_{i,j}$  與  $VPD_{24,j}$  之變異程度，以正值呈現，值愈大變異愈大，反之變異愈小。

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - VPD_{24,j})^2}{N}} \dots (36)$$

相關係數(coefficient of correlation,  $R^2$ )，以檢測說明  $VPD_{24,j}$  與各計算式  $VPD_{i,j}$  間之相關程度， $R^2$  界於 0 到 1 之間，值愈大者愈佳。

$$R_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - \overline{VPD_i})(VPD_{24,j} - \overline{VPD_{24}})}{\sqrt{[\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - \overline{VPD_i})^2][\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - \overline{VPD_{24}})^2]}} \dots (37)$$

效率係數(coefficient of efficiency,  $CE$ )，評估  $VPD$  計算式估算性能， $CE$  值範圍界於負無窮(minus infinity)到 1 之間，值愈大適合度愈佳，反之愈差，對相關係數在  $VPD_{24,j}$  與各式計算式  $VPD_{i,j}$  間之變異性，不易詮釋及說明的，可以有

效地改善(Nash *et al.*, 1970; Legates *et al.*, 1999; Seibert, 2001)。

$$CE_i = 1.0 - \frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - VPD_{i,j})^2}{\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - \overline{VPD_{24}})^2} \dots (38)$$

性能等級(rank of performance,  $Rank$ )，為評估各式  $VPD$  計算式估算性能，綜合  $RMSE$ 、 $R^2$  及  $CE$  值三項客觀統計檢測指標表現，運用性能等級  $Rank$  予以評價，主要以  $RMSE$  愈小、 $CE$  值愈大、 $R^2$  愈大，給予  $VPD$  計算式估算性能愈佳評價，適用性最佳者，記以  $Rank 1$ ，次佳記以  $Rank 2$ ，餘類推，反之，最差者記以  $Rank 26$ 。

## 2.3 相關氣象因子計算

### 1. 飽和蒸汽壓力 $e_s$

衆多飽和蒸汽壓力  $e_s$  以溫度  $T$  ( $^{\circ}C$ ) 為函數關係式中，在蒸發散量估算課題之應用研究上，以 Bosen (1960) 方程式最為廣泛推荐與運用(ASCE, 1974、1990; ICID, 1994; FAO, 1998)，因此，本文擇 Bosen (1960) 方程式予以計算，

$$e_s(T) = 33.8639 \left[ (0.00738T + 0.8072)^8 - 0.0000191|1.8T + 48| + 0.001316 \right] \dots (39)$$

### 2. 飽和蒸汽壓力曲線斜率 $\Delta$

將(39)式對  $T$  微分，可得

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = 1.9993(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.001158 \dots (40)$$

### 3. 濕球溫度 $T_{wet}$

實際蒸汽壓力若以乾球溫度  $T_{dry}$  與濕球溫度  $T_{wet}$  差值(或稱濕球下陷量，wet bulb depression, wbd)估計， $T_{wet}$  可以下式估計(ASCE, 1990)，

$$T_{wet} = \frac{\gamma T + \Delta T_{dp}}{\Delta + \gamma} \dots (41)$$

### 4. 24 小時平均蒸汽壓力差 $VPD_{24}$

24 小時平均蒸汽壓力差  $VPD_{24}$ ，係評估檢測各式  $VPD$  計算式計算結果之重要憑藉(ASCE,

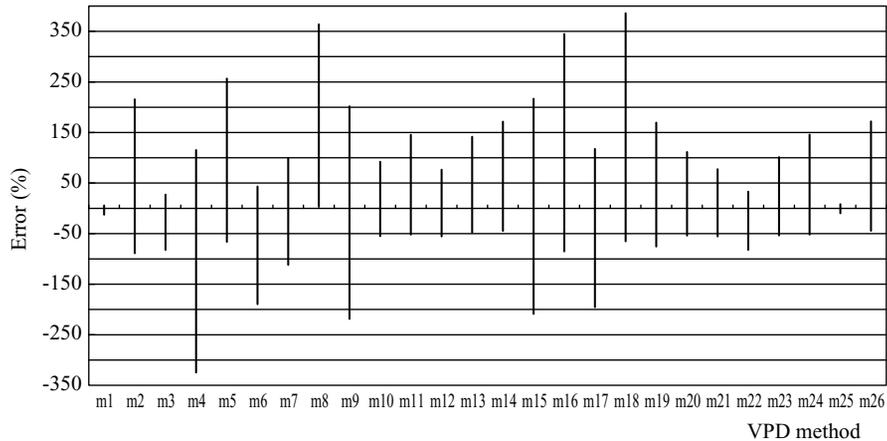


圖 2 桃園區農業改良場測站各式 VPD 計算式誤差全距分佈圖

1974, 1990; FAO, 1975, 1977; ICID, 1994), 定義為第  $i$  時溫度  $T_i$  及露點溫度  $T_{dpi}$  飽和蒸汽壓力之差值, 加以累計後平均, 即

$$VPD_{24} = \frac{\sum_{i=1}^{24} [e_s(T_i) - e_a(T_{dpi})]}{24} \dots\dots\dots (42)$$

#### 2.4 氣象數據資料

農業氣候分區取得, 本文仿照過去黃振昌等 (2005) 分析研究, 採用郭文鏢等 (1981) 九個農業氣候分區結果, 並進一步考量氣候測站設置、屬農田水利會灌區與否, 捨棄中部及東部山區後, 其餘七個氣候分區代表測站、站號、經度、緯度、資料取樣年及樣本數 (已剔除儀器故障或儀器維護或資料異常等情況), 如表 4 所示。收集各代表測站逐時  $T$ 、 $T_{dp}$  及  $RH$  等資料 (中央氣象局、桃園區農業改良場、學甲旱作灌溉試驗中心, 2002; 農業工程研究中心, 2002-2003)。為週全嚴謹起見, 消弭系統量測上可能誤差及代表背景環境正確與否之疑慮, 選擇西北區桃園農改場、農工中心分析結果, 互為比對、佐證。

### 三、結果與討論

以農業氣候分區西北區代表測站, 桃園區農業改良場農業氣象觀測站, 應用 2002 年全年觀測資料分析結果為例, 比較、探討及說明如下:

誤差, 各式 VPD 計算式與  $VPD_{24}$  比較, 分析結果如表 5 所示, 從低估  $VPD_{24}$  二倍以上, 達 324.6% (m4), 到高估  $VPD_{24}$  四倍以上, 達 385.8% (m18); 誤差全距, 以 m18 之 451% 範圍最大, m25 之 18.1% 範圍最小, 各式 VPD 計算式誤差全距分佈, 如圖 2 所示, 圖 2 清楚顯示, 以 m8 而言係屬高估族群, 其餘各式 VPD 計算式高低估現象均存在。

在 348 日樣本數中, 26 款 VPD 計算式與  $VPD_{24}$  比較優劣等級出現頻率、權重指數與性能等級分析結果, 如表 6 所示, m25 在 rank 1 共出現 85 次, 佔 348 日樣本數 24%, rank 2 出現 83 次 (佔 24%), rank 3 出現 52 次 (佔 15%), 在 rank 14~rank 26 之間, 僅在 rank 18 出現 1 次, 其餘皆為 0, 出現頻率分佈彙如圖 3 所示, 圖中清楚顯示 m25 與  $VPD_{24}$  比較優劣等級出現頻率集中在左側; 綜合所有優劣等級, m25 在 348 次中, 出現於最優前三名, 頻率總計佔 220 次 (佔 63%)。同理, m1 在 rank 1 共出現 48 次 (佔 14%), rank 2 出現 45 次 (佔 13%), rank 3 出現 74 次 (佔 21%), rank 4 出現 56 次 (佔 16%), 在 rank 13 之後, 都掛 0, 不再出現, 出現頻率分佈彙如圖 3 所示, 優劣等級出現頻率亦集中在左側; 綜合所有優劣等級, m1 在 348 次中, 於最優前四名出現頻率總計佔 223 次 (佔 64%)。

相反地, 代表與  $VPD_{24}$  離異程度最大的 rank

表 5 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式誤差及全距分析結果一覽表

VPD method	台灣地區農業氣候分區											
	西北區						中彰區			雲嘉區		
	桃園農場(站號: 72C44)			農工中心(站號: A2C56)			台中測站(站號: 46749)			嘉義測站(站號: 46748)		
	Error (%)			Error (%)			Error (%)			Error (%)		
max	min	range	max	min	range	max	min	range	max	min	range	
m1	5.7	-12.5	18.2	11.5	-9.0	20.5	0.9	-9.3	10.2	2.1	-14.8	16.9
m2	215.7	-88.7	304.4	330.6	-83.3	413.9	22.3	-77.1	99.4	50.7	-69.6	120.3
m3	27.3	-82.1	109.4	301.0	-91.1	392.1	0.6	-17.7	18.3	1.5	-26.2	27.7
m4	115.1	-324.6	439.7	123.8	-428.4	552.2	97.7	-52.3	150.0	49.7	-101.6	151.3
m5	256.6	-66.1	322.7	435.7	-63.9	499.6	64.0	-24.5	88.5	104.0	-21.4	125.4
m6	43.2	-189.5	232.7	220.7	-207.1	427.8	8.3	-82.9	91.2	5.1	-88.5	93.6
m7	98.8	-111.8	210.6	271.1	-116.6	387.7	60.3	-21.9	82.2	43.6	-41.9	85.5
m8	363.7	3.1	360.6	565.2	9.2	556.0	141.1	3.1	138.0	204.9	-1.1	206.0
m9	201.7	-218.8	420.5	189.1	-329.2	518.3	78.7	-64.3	143.0	125.4	-76.8	202.2
m10	92.0	-54.9	146.9	92.0	-25.6	117.6	68.8	-19.3	88.1	79.1	-32.0	111.1
m11	145.2	-51.9	197.1	190.9	-55.6	246.5	67.0	-22.7	89.7	70.9	-22.5	93.4
m12	76.5	-55.6	132.1	343.6	-80.0	423.6	75.9	-15.3	91.2	87.2	-24.5	111.7
m13	141.5	-47.6	189.1	141.5	-21.8	163.3	72.5	-18.5	91.0	95.7	-24.8	120.5
m14	171.3	-44.6	215.9	256.6	-30.6	287.2	79.9	-15.3	95.2	91.3	-11.6	102.9
m15	216.8	-208.9	425.7	254.8	-294.8	549.6	82.9	-58.7	141.6	129.4	-66.1	195.5
m16	344.9	-85.2	430.1	311.7	-81.4	393.1	70.1	-71.9	142.0	99.7	-63.7	163.4
m17	117.5	-195.5	313.0	191.9	-314.4	506.3	139.2	-32.7	171.9	117.6	-47.9	165.5
m18	385.8	-65.2	451.0	521.0	-55.8	576.8	111.1	-16.0	127.1	140.5	-23.2	163.7
m19	169.4	-75.4	244.8	386.4	-88.2	474.6	75.7	-16.7	92.4	89.2	-12.9	102.1
m20	111.6	-53.8	165.4	353.8	-75.7	429.5	88.8	-9.1	97.9	101.4	-18.5	119.9
m21	77.4	-55.5	132.9	344.2	-80.0	424.2	78.2	-14.0	92.2	89.9	-22.0	111.9
m22	33.0	-82.0	115.0	306.1	-91.1	397.2	10.1	-10.4	20.5	11.0	-13.0	24.0
m23	101.4	-53.5	154.9	356.4	-79.0	435.4	100.3	-5.3	105.6	114.4	-15.3	129.7
m24	145.8	-51.7	197.5	193.2	-55.1	248.3	67.9	-20.6	88.5	72.4	-20.7	93.1
m25	8.2	-9.9	18.1	13.6	-7.9	21.5	4.5	-6.8	11.3	5.5	-10.7	16.2
m26	171.9	-44.3	216.2	258.9	-30.1	289.0	80.8	-13.3	94.1	93.2	-9.1	102.3
VPD method	西南區			南部區			東岸區			東北區		
	學甲旱灌中心(站號: 12057)			恆春測站(站號: 46759)			花蓮測站(站號: 46699)			宜蘭測站(站號: 46708)		
	Error (%)			Error (%)			Error (%)			Error (%)		
	max	min	range	max	min	range	max	min	range	max	min	range
m1	2.3	-14.7	17.0	1.7	-8.2	9.9	2.4	-6.2	8.6	5.9	-6.6	12.5
m2	47.5	-80.2	127.7	34.3	-88.8	123.1	48.1	-90.5	138.6	506.2	-85.4	591.6
m3	0.3	-25.7	26.0	1.0	-12.9	13.9	1.4	-10.9	12.3	5.6	-11.5	17.1
m4	76.0	-93.5	169.5	48.4	-113.6	162.0	60.1	-98.6	158.7	89.1	-237.9	327.0
m5	57.1	-39.1	96.2	52.9	-47.2	100.1	79.1	-43.3	122.4	506.2	-75.2	581.4
m6	7.6	-66.1	73.7	25.5	-154.4	179.9	11.5	-85.5	97.0	120.7	-75.6	196.3
m7	27.2	-21.5	48.7	28.4	-60.7	89.1	38.4	-43.4	81.8	134.1	-63.1	197.2
m8	217.5	4.3	213.2	183.7	-8.6	192.3	133.5	3.8	129.7	524.6	4.0	52.06
m9	74.3	-52.1	126.4	149.2	-53.4	202.6	80.1	-70.7	150.8	113.3	-161.4	274.7
m10	90.7	-18.1	108.8	110.6	-34.3	144.9	67.1	-23.9	91.0	184.5	-53.5	238.0
m11	47.4	-14.0	61.4	131.3	-43.0	174.3	69.5	-18.1	87.6	62.6	-131.1	193.7
m12	37.3	-15.6	52.9	70.4	-29.3	99.7	66.0	-23.7	89.7	83.2	-32.3	115.5
m13	99.3	-17.0	116.3	135.1	-26.2	161.3	76.2	-22.8	99.0	198.9	-39.2	238.1
m14	62.2	-8.6	70.8	155.8	-35.0	190.8	86.2	-11.8	98.0	77.3	-116.8	194.1
m15	91.8	-43.4	135.2	173.7	-45.4	219.1	97.8	-65.1	162.9	121.8	-154.7	276.5
m16	90.2	-77.8	168.0	162.0	-88.3	250.3	93.3	-88.6	181.9	389.5	-87.8	477.3
m17	83.0	-29.6	112.6	75.6	-65.0	140.6	77.5	-56.4	133.9	97.6	-354.7	452.3
m18	121.0	-33.0	154.0	162.0	-23.9	185.9	120.7	-41.6	162.3	389.5	-73.5	463.0
m19	61.2	-9.3	70.5	152.8	-36.4	189.2	84.3	-12.2	96.5	75.5	-111.2	186.7
m20	58.9	-11.6	70.5	94.9	-22.3	117.2	76.0	-21.3	97.3	97.6	-30.9	128.5
m21	42.7	-14.6	57.3	73.8	-27.6	101.4	67.8	-23.1	90.9	83.7	-32.2	115.9
m22	10.0	-14.9	24.9	13.1	-8.8	21.9	10.3	-7.3	17.6	8.6	-7.0	15.6
m23	72.9	-9.1	82.0	110.5	-16.6	127.1	85.3	-17.3	102.6	98.2	-27.4	125.6
m24	48.8	-10.3	59.1	132.1	-41.6	173.7	70.7	-16.5	87.2	63.5	-131.0	194.5
m25	7.1	-11.3	18.4	6.2	-5.6	11.8	6.2	-4.5	10.7	8.1	-5.0	13.1
m26	63.5	-7.4	70.9	156.5	-33.6	190.1	87.4	-10.3	97.7	78.5	-116.7	195.2

表 6 各式 VPD 計算式優劣等級出現頻率、權重指數與性能等級分析結果一覽表(桃園區農業改良場，站號：72C44)

method	Rank (n)																										total	W1	Rank	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
m1	48	45	74	56	33	29	21	21	10	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	348	7,953	2	
m2	5	8	4	9	9	11	3	7	13	5	5	10	9	9	8	5	10	15	10	8	13	18	27	14	29	84	348	3,029	24	
m3	10	15	15	31	29	40	21	22	23	21	16	15	15	15	12	11	12	3	5	6	1	5	2	2	1	0	348	6,222	4	
m4	7	11	8	12	14	7	11	6	12	8	13	12	10	11	7	13	10	11	11	24	21	21	28	34	19	7	348	3,909	17	
m5	10	8	8	12	10	14	21	13	11	8	10	8	8	9	13	9	20	11	15	20	19	27	23	23	14	4	348	4,208	14	
m6	5	4	3	2	3	3	2	8	6	5	14	8	10	7	18	15	24	17	22	32	36	37	29	17	17	4	348	3,217	23	
m7	14	13	17	14	19	25	19	18	17	27	14	15	15	16	19	10	15	13	13	18	8	7	1	1	0	0	348	5,641	8	
m8	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	1	1	1	0	1	1	4	4	7	5	14	27	55	66	156	348	934	26	
m9	8	7	6	10	9	7	19	14	12	15	16	13	11	15	9	9	9	8	13	19	24	24	24	27	16	4	348	4,102	15	
m10	9	11	8	13	13	18	21	13	18	20	25	20	22	24	21	21	15	17	8	7	6	7	6	2	2	1	348	5,320	10	
m11	14	12	17	12	19	21	19	21	21	19	22	33	27	23	18	22	11	3	4	3	3	1	2	1	0	0	348	5,893	7	
m12	17	12	18	14	13	25	31	29	32	30	16	15	14	8	14	10	11	12	12	8	0	2	0	4	1	0	348	6,017	5	
m13	6	3	5	13	1	6	9	6	12	10	10	14	18	19	25	19	24	25	26	23	29	16	12	12	5	0	348	4,038	16	
m14	6	7	4	4	12	8	7	13	7	12	19	11	24	21	29	23	30	39	29	21	16	6	0	0	0	0	348	4,503	13	
m15	3	7	5	3	9	7	7	5	6	12	12	15	11	13	13	10	11	15	18	22	14	24	34	33	26	13	348	3,387	21	
m16	6	3	7	6	12	5	5	11	9	9	13	9	6	10	7	12	7	9	10	16	24	19	28	37	63	5	348	3,239	22	
m17	10	7	7	5	10	3	13	5	11	4	7	14	12	9	15	5	14	17	11	22	26	12	25	23	33	28	348	3,478	20	
m18	3	4	2	3	5	9	11	6	8	12	2	10	11	6	4	11	9	9	17	12	19	33	30	28	43	41	348	2,860	25	
m19	12	8	8	7	5	9	9	17	16	13	17	20	26	32	20	37	25	26	12	9	4	4	8	1	2	1	348	4,902	12	
m20	7	11	10	6	9	10	19	24	16	19	25	18	18	28	18	20	15	19	18	13	15	8	2	0	0	0	348	5,106	11	
m21	8	13	22	14	19	19	30	27	27	22	28	14	13	17	10	16	10	19	10	3	2	3	2	0	0	0	348	5,937	6	
m22	36	37	31	37	36	19	17	24	12	21	12	8	8	11	7	4	6	4	6	1	5	1	2	2	1	0	348	6,913	3	
m23	6	9	6	7	8	8	6	7	13	10	18	14	14	14	11	19	13	9	21	15	26	34	23	27	10	0	348	3,907	18	
m24	9	3	11	10	12	17	9	20	21	22	20	34	30	24	34	24	14	15	11	5	3	0	0	0	0	0	348	5,386	9	
m25	85	83	52	48	34	14	12	6	3	3	2	4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	348	8,253	1	
m26	4	7	0	0	5	13	4	5	12	14	7	12	14	6	16	22	32	27	42	34	29	25	13	5	0	0	348	3,794	19	
sum	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348			

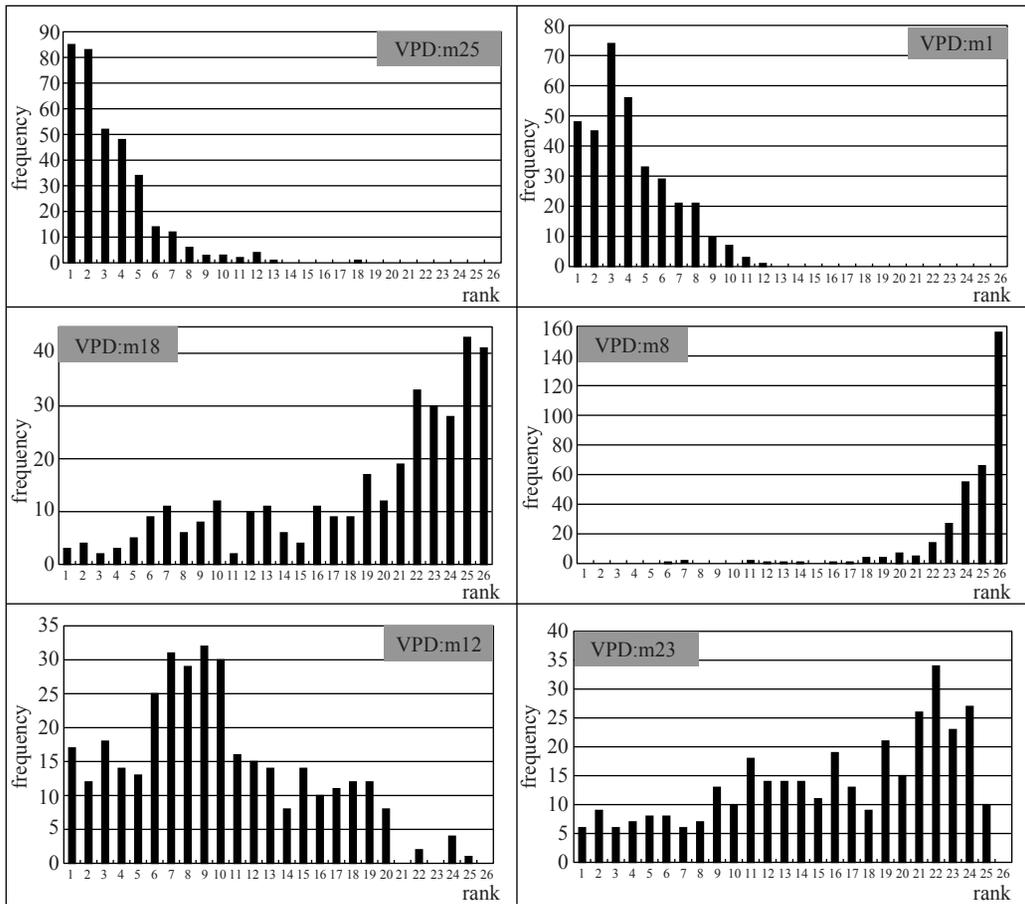


圖 3 桃改場 VPD 計算式 m25、m1、m18、m8、m12 及 m23 出現頻率分佈圖

26，以 m8 出現頻率 156 次(佔 45%)最多，其次是 m2 出現頻率 84 次(佔 24%)，m18 出現頻率 41 次(佔 12%)；rank 25 以 m8 出現頻率 66 次(佔 19%) 為最多，其次是 m16 之 63 次(佔 18%)，m18 之 43 次(佔 12%)；rank 24 以 m8 出現頻率 55 次(佔 16%) 為最多，其次是 m16 之 37 次(佔 11%)，m4 之 34 次(佔 10%)。綜合所有優劣等級，m18 在 348 次中，出現於最劣三名，頻率總計佔 112 次(佔 32%)；以 m8 出現於最劣三名頻率總計 277 次(佔 80%)。m18 及 m8 出現頻率分佈，如圖 3 所示，清楚揭示 m8 及 m18 分別與 VPD<sub>24</sub> 比較優劣等級出現頻率均集中在右側。

權重指數分析，以 m25 之 WI = 8,253，居 26 款 VPD 計算式最大值，性能表現最優，居 Rank 1，顯示以 24 個時點資料日平均之  $e_s$ ，與濕球下

陷量之  $e_a$ ，兩者差值為 VPD 計算式，在農業氣候分區西北區最為適用；m1 之 WI = 7,953 為次之，即經改良之 Penman (1948) 推荐式，係所有 VPD 計算式次高值，性能表現次佳，為 Rank 2，相反地，以 m18 之 WI = 2,860，即 FAO (1998)、ASCE (2005)、Yoder *et al.* (2005)、所推荐，係所有 VPD 計算式次差值，性能表現次差，居 Rank 25，m8 之 WI = 934，係所有 VPD 計算式最差值，居所有 VPD 計算式最低值，性能表現最差，居 Rank 26，顯示 Cuenca *et al.* (1982) 之 VPD 計算式，在西北區農業氣候分區適用性最不理想。

從推荐觀點，看國內外著名專業學術或國際性機構或專家學者，所建議 VPD 計算式在國內應用時之適用性，以 ASCE (1974、1990) 建議之四款 VPD 計算式，m9、m12、m15 及 m23 而言，

WI 值分別是 4,102、6,017、3,387、3,907，性能表現分別是 Rank 15、5、21、18，在 26 種 VPD 方法中，於農業氣候分區西北區適用性，最佳的僅 m12 排行第 5，其餘三式已在排名 15 之後，就更不甚理想。FAO (1977, 1998)前後共推薦 VPD 七式，按“年代-方法”排列，有 m12、m24、m10、m23、m16、m18 及 m21，WI 值分別是 6,017、5,386、5,320、3,907、3,239、2,860 及 5,937，性能評價結果依序是，Rank 5、9、10、18、22、25 及 6，以 m12 較優於其他六式，不過充其量它僅排行第 5。ICID (1994)建議 m23、m26 及 m16，分別是 18、19 及 22，在農業氣候分區西北區適用性，最好的 VPD 計算式是排行 18 之 m23，比起 ASCE 或 FAO 推薦的 m12，又更為遜色，從表 1 顯示，m12 及 m23 紛獲多數國外著名專業學術或國際性機構或專家學者認同並推薦，其出現頻率分佈，如圖 3 所示，清楚揭示 m12 及 m23 分別與 VPD<sub>24</sub> 比較優劣等級出現頻率，大致均勻散佈在各名次。Cuenca *et al.* (1982)推薦 VPD 計算式：m8、m10、m12、m13、m23 及 m24，WI 值分別是 934、5,320、6,017、4,038、3,907 及 5,386，性能表現分別是 Rank 26、10、5、16、18 及 9，以 m12 較佳，m13 較差。Burman *et al.* (1983)建議 m10、m12 及 m13 三種 VPD 計算式，以 m12 較好，m8 較差。Howell *et al.* (1995)推薦 m11、m12 及 m3 三款 VPD 計算式，性能等級分別是 Rank 7、5 及 4。國內推薦的 m9 (施嘉昌等, 1987；陳清田, 1991；陳清田等, 1997)經檢測結果，WI = 4,102，性能等級排行第 15。

綜觀檢測分析結果初步顯示，26 種 VPD 計算式中，以 24 個時點資料日平均之  $e_s$ ，與濕球下陷量之  $e_a$ ，兩者差值為 VPD 計算式，即 m25，WI=8,253，性能表現最優，居 Rank 1，揭示在農業氣候分區西北區適用性最佳。

同理，應用距桃改場東北方約 20km，同屬農業氣候分區西北區之農工中心測站，以 352 日樣本數分析，各式 VPD 計算式與 VPD<sub>24</sub> 比較，誤差分析結果如表 5 所示，誤差從低估 VPD<sub>24</sub> 之 428.4% (m4)，到高估 VPD<sub>24</sub> 之 565.2% (m8)；誤

差全距分佈，以 m18 之 576.8% 範圍最大，m1 之 20.5% 範圍最小，再經 WI 指標檢測結果揭露，如表 7 所示，m25 之 WI = 8,613，在 24 種 VPD 方法中，獲性能等級排行最優，為 Rank 1，而以 m1 之 WI = 8,387，排行次佳，居 Rank 2，相反地，以 m8 之 WI = 1,481，性能表現最差，為 Rank 26，而以 m17 之 WI = 2,563，性能等級次差，為 Rank 25；其它 VPD 計算式性能表現排序，與桃改場比較，縱有些微前後變化或差異，然仍不脫桃改場所獲結論，因此，系統量測上可能所致誤差之疑慮，及背景環境代表之正確性，都分別通過消弭與確認之測試。

同理，將分析擴及中彰區、雲嘉區、西南區、南部區、東岸區及東北區，各式 VPD 計算式經與 VPD<sub>24</sub> 比較、判別優劣等級、計算出現頻率後，權重指數 WI 與性能等級 Rank 分析結果，彙如表 7 所示，性能等級分佈，彙如圖 4 所示。

以中彰區為例而言，WI 值最高者為 m25，達 8,695，性能表現 Rank 1，如表 7 所示，係 26 種 VPD 方法中，適用性最佳，以 m8 之 WI = 1,299，性能表現最不理想，為 Rank 26。這樣的評估結果，在雲嘉區、西南區、東岸區及東北區，皆獲同樣評價，僅在南部區是以 m2 之 WI = 1,074，為 Rank 26。

若從台灣地區層面觀之，將各農業氣候分區所得權重指數 WI 予以加總平均，綜合 WI 值最高者為 m25，達 = 8,505，性能表現 Rank 1，係 26 種 VPD 方法中，適用性最佳。Penman (1948) 所推薦 VPD 計算式 m1，原建議一天 4 或 6 次 T、T<sub>dp</sub> 資料，經改良一天 24 個，分析結果以 WI = 8,024，性能表現排名 Rank 2，在台灣地區之適用性次佳。以 m8 之 WI = 1,099，性能表現最不理想，為 Rank 26，而以 m2 之 WI = 2,456，性能等級次差，為 Rank 25。為國外著名專業學術 ASCE (1974, 1990) 或國際性機構 ICID (1994)、FAO (1975, 1977, 1998)，認同並推薦之 m12 及 m23，WI 分別是 6,346、3,658，Rank 依序是 6、20，顯示在台灣地區之適用性並不理想。

綜合誤差、全距分佈、出現頻率，輔以權重指數量化方式，分析結果闡明：

表 7 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式權重指數與性能等級分析結果一覽表

VPD method	台灣地區農業氣候分區																台灣地區	
	西北區				中彰區		雲嘉區		西南區		南部區		東岸區		東北區		平均 WI	Rank
	桃園農改場 (站號： 72C44)		農工中心 (站號： A2C56)		台中測站 (站號： 46749)		嘉義測站 (站號： 46748)		學甲旱灌 中心(站號： 12O57)		恆春測站 (站號： 46759)		花蓮測站 (站號： 46699)		宜蘭測站 (站號： 46708)			
	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank	WI	Rank		
m1	7,953	2	8,387	2	7,800	3	7,686	3	7,628	3	8,275	2	8,197	3	8,266	2	8,024	2
m2	3,029	24	3,024	24	1,818	25	4,100	17	2,166	25	1,074	26	2,049	24	2,384	25	2,456	25
m3	6,222	4	5,560	6	6,596	6	6,515	6	6,295	7	7,519	4	7,341	4	7,380	4	6,679	4
m4	3,909	17	3,339	22	5,495	11	3,885	18	5,353	12	3,696	21	3,489	22	3,492	22	4,082	16
m5	4,208	14	5,048	11	5,988	9	5,191	11	6,047	9	4,956	12	3,781	19	3,682	20	4,863	12
m6	3,217	23	4,569	14	2,625	24	2,219	24	2,218	24	3,738	20	3,852	18	3,874	19	3,289	23
m7	5,641	8	5,257	8	6,906	4	7,140	4	7,120	5	6,484	6	6,279	5	6,077	6	6,363	5
m8	934	26	1,481	26	1,299	26	1,124	26	1,154	26	1,170	25	831	26	798	26	1,099	26
m9	4,102	15	4,531	15	4,666	15	4,712	14	5,002	13	4,760	13	4,054	17	4,039	17	4,483	14
m10	5,320	10	6,261	4	5,757	10	6,177	8	5,764	10	5,634	9	5,676	10	5,814	10	5,800	9
m11	5,893	7	6,651	3	6,196	8	6,122	9	6,275	8	5,658	8	6,178	6	6,185	5	6,145	7
m12	6,017	5	5,363	7	6,637	5	6,820	5	7,186	4	6,563	5	6,140	7	6,043	7	6,346	6
m13	4,038	16	4,819	13	3,613	17	3,697	19	3,051	20	3,986	18	4,057	16	4,434	14	3,962	18
m14	4,503	13	5,088	10	3,667	16	3,694	20	3,549	18	3,890	19	4,563	13	4,738	13	4,212	15
m15	3,387	21	3,616	20	3,297	20	4,273	16	3,729	17	4,359	17	3,101	23	3,526	21	3,661	19
m16	3,239	22	3,853	18	3,425	19	3,660	21	3,306	19	1,967	24	3,504	21	3,397	23	3,294	22
m17	3,478	20	2,563	25	3,584	18	5,174	12	3,746	16	5,130	11	4,561	14	4,317	15	4,069	17
m18	2,860	25	3,572	21	2,739	22	1,362	25	2,568	23	2,367	23	1,989	25	2,389	24	2,481	24
m19	4,902	12	3,728	19	4,677	14	4,434	15	4,648	15	4,454	16	5,097	12	5,331	11	4,659	13
m20	5,106	11	4,232	17	4,954	13	5,043	13	4,942	14	5,467	10	5,202	11	5,171	12	5,015	11
m21	5,937	6	5,000	12	6,365	7	6,514	7	6,729	6	6,373	7	6,109	8	5,957	8	6,123	8
m22	6,913	3	5,186	9	8,049	2	8,044	2	7,747	2	8,053	3	8,248	2	8,251	3	7,561	3
m23	3,907	18	3,294	23	2,976	21	3,314	22	2,844	21	4,548	15	4,208	15	4,176	16	3,658	20
m24	5,386	9	6,125	5	5,465	12	5,692	10	5,500	11	4,702	14	5,716	9	5,818	9	5,551	10
m25	8,253	1	8,613	1	8,695	1	8,564	1	8,482	1	8,323	1	8,482	1	8,627	1	8,505	1
m26	3,794	19	4,392	16	2,720	23	2,959	23	2,609	22	2,863	22	3,656	20	3,949	18	3,368	21

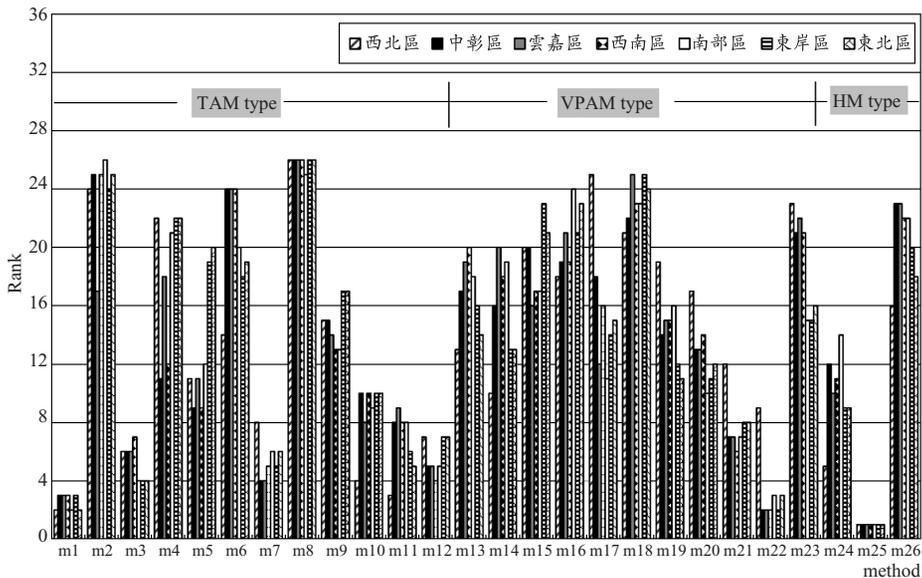


圖 4 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式應用頻率分析法檢測評估性能等級分佈圖

表 8 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式統計檢測結果一覽表

VPD 方法	西北區								中彰區				雲嘉區			
	農業工程研究中心 (站號：A2C56)				桃園區農業改良場 (站號：72C44)				台中測站 (站號：46749)				嘉義測站 (站號：46748)			
	統計指標			Rank	統計指標			Rank	統計指標			Rank	統計指標			Rank
	RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE		RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE		RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE		RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE	
m1	0.30	0.9986	0.9950	2	0.23	0.9973	0.9927	2	0.35	0.9967	0.9852	3	0.41	0.9923	0.9710	3
m2	3.64	0.6088	0.2452	24	2.52	0.4115	0.1360	25	3.81	0.5235	-0.7887	26	2.23	0.4720	0.1314	22
m3	1.31	0.9463	0.9023	5	0.75	0.9498	0.9235	3	0.63	0.9894	0.9509	4	0.70	0.9777	0.9155	5
m4	3.22	0.8375	0.4105	23	1.75	0.8192	0.5848	20	1.16	0.8763	0.8339	11	1.80	0.8314	0.4315	17
m5	1.62	0.8648	0.8508	8	1.38	0.7742	0.7432	13	0.95	0.8945	0.8899	8	1.29	0.8582	0.7096	11
m6	2.05	0.8756	0.7602	14	1.65	0.8459	0.6312	18	1.98	0.9061	0.5181	20	2.28	0.8469	0.0927	24
m7	1.66	0.9287	0.8428	9	0.95	0.9108	0.8781	7	0.64	0.9524	0.9499	5	0.65	0.9413	0.9258	4
m8	3.83	0.8793	0.1677	25	3.15	0.8452	-0.3429	26	2.87	0.8830	-0.0137	25	3.17	0.7849	-0.7506	26
m9	2.13	0.8581	0.7426	16	1.63	0.7849	0.6379	17	1.48	0.8096	0.7297	15	1.54	0.6334	0.5831	13
m10	1.28	0.9515	0.9068	4	1.02	0.9081	0.8601	10	1.10	0.9074	0.8496	10	1.07	0.8545	0.7988	8
m11	1.27	0.9544	0.9088	3	0.93	0.9190	0.8816	6	1.01	0.9211	0.8737	9	1.10	0.8467	0.7868	9
m12	1.81	0.9223	0.8142	10	0.93	0.9746	0.8838	5	0.80	0.9307	0.9210	6	0.85	0.8791	0.8742	6
m13	1.95	0.9366	0.7835	12	1.46	0.8993	0.7121	15	1.74	0.9052	0.6266	17	1.81	0.8398	0.4280	18
m14	1.94	0.9401	0.7853	11	1.36	0.9115	0.7486	12	1.65	0.9178	0.6630	16	1.81	0.8464	0.4277	19
m15	2.67	0.8525	0.5941	19	1.95	0.7914	0.4864	21	2.01	0.8100	0.5006	21	1.79	0.6666	0.4374	16
m16	2.85	0.5769	0.5368	21	2.17	0.4518	0.3601	23	2.60	0.4753	0.1642	24	2.18	0.3410	0.1719	23
m17	4.53	0.8410	-0.1647	26	2.24	0.8322	0.3177	24	2.12	0.8446	0.4441	22	1.58	0.7677	0.5627	14
m18	2.65	0.8535	0.5992	18	2.06	0.7701	0.4255	22	2.19	0.8491	0.4071	23	3.09	0.7260	-0.6633	25
m19	2.68	0.9240	0.5912	20	1.45	0.8948	0.7164	14	1.43	0.9184	0.7487	14	1.60	0.8458	0.5516	15
m20	2.39	0.9191	0.6753	17	1.27	0.9034	0.7806	11	1.35	0.9223	0.7760	13	1.43	0.8649	0.6441	12
m21	1.99	0.9214	0.7753	13	1.00	0.9088	0.8641	8	0.92	0.9310	0.8965	7	0.92	0.8802	0.8510	7
m22	1.62	0.9452	0.8508	7	0.78	0.9464	0.9167	4	0.30	0.9898	0.9890	2	0.35	0.9837	0.9780	2
m23	3.17	0.9077	0.4278	22	1.75	0.8913	0.5863	19	1.99	0.9022	0.5139	19	2.00	0.8334	0.3042	21
m24	1.40	0.9574	0.8884	6	1.01	0.9231	0.8606	9	1.18	0.9263	0.8282	12	1.18	0.8570	0.7549	10
m25	0.18	0.9982	0.9981	1	0.16	0.9965	0.9963	1	0.16	0.9969	0.9966	1	0.27	0.9928	0.9873	1
m26	2.11	0.9440	0.7479	15	1.74	0.9162	0.7054	16	1.89	0.9219	0.5598	18	1.96	0.8529	0.3318	20

1. 不同 VPD 計算式估算，誤差從低估 428% 到高估 565%，顯示 VPD 計算式之選取，須考量氣候環境特性之重要。
2. 各地農業氣候分區均呈現，以 24 個時溫度日平均為飽和蒸汽壓力，與濕球下陷量為實際蒸汽壓力之 VPD 計算式，具誤差最少、全距最小、出現頻率最多及最高權重指數，性能表現最優，在台灣各地農業氣候分區應用時之適用性最佳。

再看統計指標法，以代表農業氣候分區西北區之農工中心農業氣象觀測站，2002~2003 年農業氣象觀測資料分析結果為例，比較、探討及說明如下。

應用 352 日樣本資料，國內外機構或學者所推荐 26 款 VPD 計算式經統計檢測結果，整理如

表 8 所示。從 RMSE 指標來看，以屬 HM 型態之 m25 最優，變異程度僅 0.18 mb/day，而以 VPAM 型態之 m17 最差，變異程度達 4.53 mb/day，變異程度最優與最差比值(4.53/0.18)，高達 25 倍以上。就 R<sup>2</sup> 而言，以屬 TAM 型態之 m1 最高，達 0.9986，而以 VPAM 型態之 m16 最小，僅 0.5769。以 CE 值而言，參照如圖 5 所示分佈比較圖，最大值是 m25 之 0.9981，最小值是 m17 之 -0.1647，也是唯一負值之 VPD 計算式，除 m8 及 m2 小於 0.4，其餘 VPD 計算式皆在 0.4 以上，整體 CE 值而論，VPD 計算式大致是呈現 HM 型態較優於 TAM 型態，而以 VPAM 型態較差。這樣的結果，大體反映，三種不同 VPD 計算式型態，在國內西北農業氣候分區適用性之差異，以乾濕球下陷考量特色之混合法較優，以溫度平均方式次

表 8 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式統計檢測結果一覽表(續)

VPD 方法	西南區 學甲旱灌試驗中心 (站號：12057)				南部區 恆春測站 (站號：46759)				東岸區 花蓮測站 (站號：46699)				東北區 宜蘭測站 (站號：46708)			
	統計指標				統計指標				統計指標				統計指標			
	RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE	Rank	RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE	Rank	RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE	Rank	RMSE (mb)	R <sup>2</sup>	CE	Rank
m1	0.38	0.9953	0.9782	3	0.22	0.9907	0.9919	2	0.19	0.9979	0.9937	2	0.17	0.9983	0.9947	3
m2	3.60	0.3703	-0.9086	26	5.12	0.1396	-3.4321	26	3.02	0.5372	-0.5498	25	2.44	0.5993	-0.0321	25
m3	0.71	0.9853	0.9259	6	0.35	0.9928	0.9789	4	0.31	0.9961	0.9840	4	0.29	0.9963	0.9851	4
m4	1.25	0.8636	0.7722	12	1.70	0.8070	0.5112	22	1.82	0.6698	0.4368	21	1.56	0.7020	0.5762	21
m5	0.95	0.8700	0.8674	8	1.23	0.8306	0.7453	11	1.52	0.8113	0.6095	20	1.46	0.7954	0.6275	20
m6	2.16	0.9040	0.3144	22	1.49	0.9020	0.6261	20	1.33	0.8989	0.7002	15	1.19	0.9062	0.7537	17
m7	0.61	0.9496	0.9458	4	0.77	0.9325	0.9005	6	0.66	0.9313	0.9256	5	0.65	0.9349	0.9275	5
m8	3.07	0.8436	-0.3803	25	3.01	0.8036	-0.5305	24	3.35	0.8357	-0.9088	26	2.94	0.8752	-0.5069	26
m9	1.52	0.7532	0.6623	15	1.37	0.7389	0.6803	15	1.51	0.7984	0.6103	19	1.34	0.7977	0.6898	19
m10	1.22	0.8988	0.7828	10	1.05	0.8937	0.8124	9	0.97	0.8982	0.8398	10	0.78	0.9214	0.8930	9
m11	1.04	0.9139	0.8407	9	1.06	0.8819	0.8100	10	0.87	0.9000	0.8700	8	0.76	0.9226	0.9001	8
m12	0.70	0.9397	0.9285	5	0.76	0.9150	0.9019	5	0.71	0.9180	0.9139	6	0.66	0.9283	0.9240	6
m13	1.93	0.8985	0.4525	17	1.46	0.8876	0.6384	18	1.37	0.8976	0.6788	16	1.10	0.9225	0.7888	14
m14	1.73	0.9151	0.5588	16	1.45	0.8781	0.6447	17	1.24	0.8974	0.7367	13	1.06	0.9240	0.8038	13
m15	2.01	0.7626	0.4060	20	1.46	0.7573	0.6375	19	1.95	0.7915	0.3552	22	1.58	0.8118	0.5678	22
m16	2.42	0.3452	0.1381	24	4.10	0.1151	-1.8482	25	2.41	0.4668	0.0141	23	1.94	0.5723	0.3486	23
m17	2.05	0.8692	0.3829	21	1.37	0.7867	0.6802	16	1.38	0.7262	0.6765	17	1.33	0.7749	0.6920	18
m18	2.35	0.7985	0.1904	23	2.19	0.7946	0.1866	23	2.45	0.7559	-0.0170	24	2.13	0.7765	0.2133	24
m19	1.48	0.9093	0.6767	14	1.35	0.8817	0.6921	14	1.16	0.8987	0.7729	12	0.98	0.9238	0.8338	12
m20	1.33	0.9292	0.7385	13	1.04	0.9110	0.8182	8	1.01	0.9105	0.8275	11	0.89	0.9286	0.8613	11
m21	0.83	0.9406	0.8988	7	0.81	0.9159	0.8883	7	0.75	0.9175	0.9031	7	0.69	0.9304	0.9177	7
m22	0.38	0.9818	0.9790	2	0.26	0.9894	0.9881	3	0.20	0.9936	0.9935	3	0.17	0.9958	0.9951	2
m23	2.00	0.9107	0.4123	19	1.32	0.8960	0.7038	13	1.25	0.9023	0.7329	14	1.14	0.9293	0.7760	15
m24	1.22	0.9186	0.7808	11	1.24	0.8887	0.7410	12	0.96	0.9072	0.8448	9	0.82	0.9290	0.8835	10
m25	0.22	0.9943	0.9926	1	0.20	0.9955	0.9930	1	0.14	0.9970	0.9968	1	0.11	0.9978	0.9978	1
m26	1.97	0.9197	0.4320	18	1.67	0.8876	0.5300	21	1.38	0.9059	0.6763	18	1.17	0.9302	0.7635	16

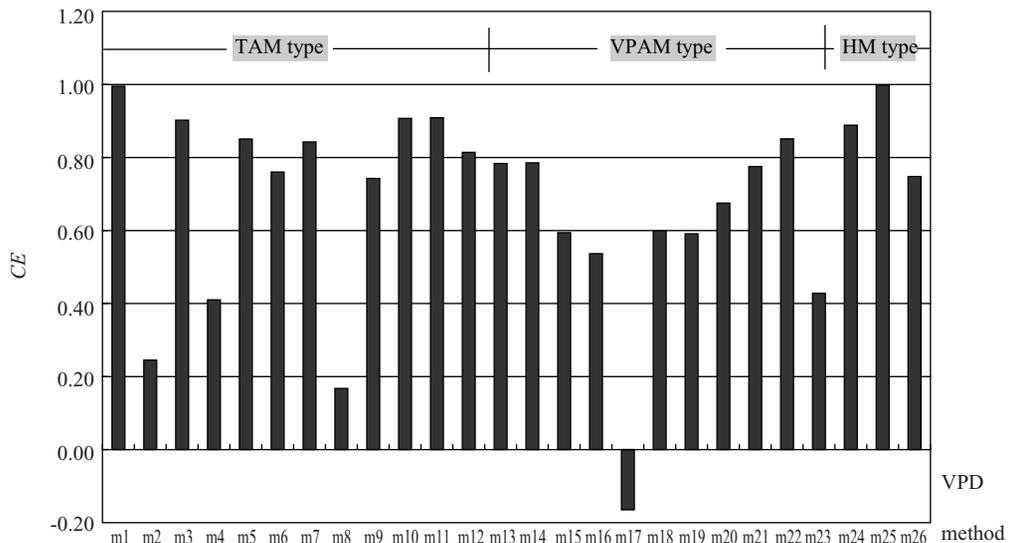


圖 5 不同 VPD 計算式效率係數分佈圖(農工中心測站, 站號：A2C56)

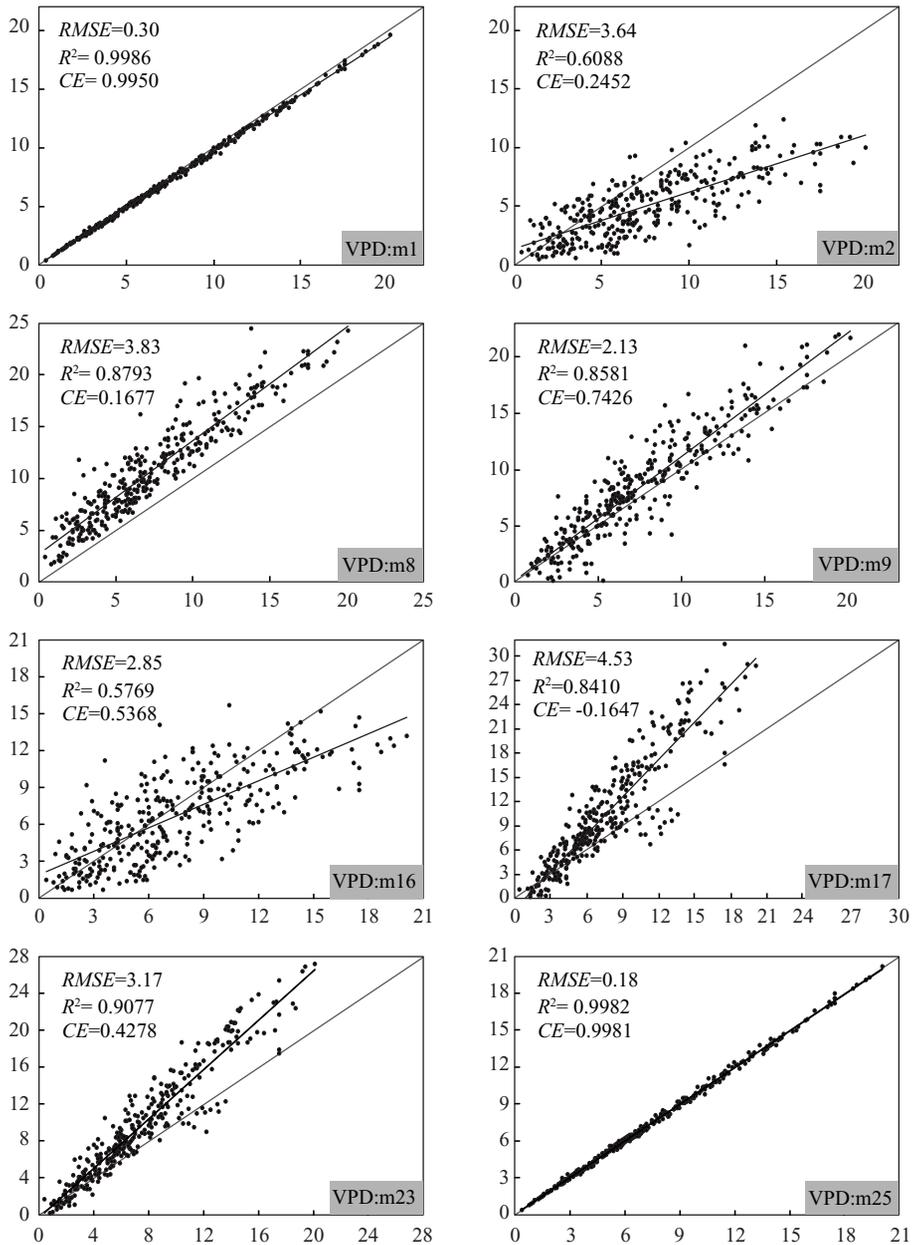


圖 6 農工中心測站(站號:A2C56)部份代表性 VPD 計算式(y 軸)與  $VPD_{24}$  (x 軸)相關分佈圖。圖示單位 mb/day，對角斜線比例是 1:1。粗體直線係最佳迴歸線

優，再其次是蒸汽壓力平均方式。

綜合  $RMSE$ 、 $R^2$  及  $CE$  三項統計指標檢測表現，26 款 VPD 計算式，以 HM 型態之 m25，分別是 0.18、0.9982 及 0.9981 為最優，進一步觀察與  $VPD_{24}$  相關比較，如圖 6 所示，黑點以幾近 1:

1 斜線分佈，最佳迴歸粗體直線也幾為貼近 1:1 斜線，因此，性能等級給予 Rank 1 評價，顯示黃振昌等(2003、2005)所推薦 VPD 計算式，即以 24 個時點資料日平均之  $e_s$ ，與濕球下陷量之  $e_a$ ，兩者差值，應用於國內西北區農業氣候分區本土

環境之適用性最佳。而與 m25 同屬 HM 型態，卻僅差別在平均方式不同的 m24，即 FAO (1977) 及 Cuenca *et al.* (1982) 所推薦 VPD 計算式，以及 ICID (1994) 與 ASCE (2005) 所推薦的 m26，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 1.40、0.9574 及 0.8884，2.11、0.9440 及 0.7479，在西北農業氣候分區適用性能等級評價，已分別滑落到 Rank 6、Rank 15。顯示 VPD 計算式在氣象資料平均方式與計算型態之差異，以西北區農業氣候分區而言，同樣考慮乾濕球下陷量下，24 個時點資料平均較優於最大值與最小值之均值，而且這兩者 VPD 均以溫度平均型態，又較優於蒸汽壓力平均型態。

歸屬 TAM 型態之 m1，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 0.30、0.9986 及 0.9950 為優，性能等級給予 Rank 2 評價，圖 6 所示之黑點亦幾為貼近 1:1 斜線，呈微微偏下之分佈，係經改良之 Penman (1948) 及 Yoder *et al.* (2005) 所推薦 VPD 計算式。而與 m1 僅是  $T_{dpmean}$ 、 $T_{min}$  引用上的差異，如 Yoder *et al.* (2005) 所建議的 m2，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 3.64、0.6088 及 0.2452，適用性能等級評價，已大幅下降到 Rank 24，圖 6 所示黑點分佈，大致是零亂散佈在 1:1 斜線下方。顯示 VPD 計算式在氣象因子引用之重要，以西北區農業氣候分區而言，選用  $T_{dpmean}$  較  $T_{dpmin}$  為優，這在同樣以蒸汽壓力平均方式下之 m14 與 m16，亦獲印證。

性能等級評價最不理想是 VPAM 型態之 m17，此式係由 ASCE (2005) 及 Yoder *et al.* (2005) 所推薦，分別是 4.53、0.8410 及 -0.1647，對照圖 6 所示黑點分佈，不僅在 1:1 斜線偏上方，而且呈現零亂、高估現象，給予 Rank 26 評價，而與 m17 僅在溫度與壓力平均方式不同的 m4，由 Yoder *et al.* (2005) 所推薦，分別是 3.22、0.8375 及 0.4105，性能等級評價 Rank 23，優於 m17，由這樣的結果觀之，亦印證 TAM 型態在國內西北農業氣候分區環境，適用性較 VPAM 型態為優。性能等級評價 Rank 25，即 Cuenca *et al.* (1982) 所推薦的 m8，分別是 3.83、0.8793 及 0.1677，比對圖 6 所示黑點分佈，全數在 1:1 斜線上方，亦呈現零亂、高估現象。而與 m8 相類似之 VPD 計算式，即同屬 TAM 族群的 m9、m10、m11 及

m12，發現同是最大與最小值之均值計算下，因為氣象資料引用及平均方式的不同，所致性能等級評價頗有差異，分別是 Rank 16、Rank 4、Rank 3 及 Rank 10，顯示引用  $T_{dpmean}$  較優，其次依序是  $T_{dpave}$ 、 $T_{ave}$  與  $RH_{ave}$  乘積及  $T_{dp8}$ ，亦即氣象資料同樣考量  $T_{dp}$ ，mean 較 ave 具代表性，此結果亦與前面論述一致。

再看幾個國內外多數認同的推薦式，如 m9、m16 及 m23，應用在西北區農業氣候分區環境之適用性評價。m9，獲 ASCE (1974、1990)、Burman *et al.* (1983)、施嘉昌等(1987)、陳清田 (1991) 及陳清田等(1997) 所推薦，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 2.13、0.8581 及 0.7426，圖 6 所示黑點零亂散佈在 1:1 斜線上下，綜合性能等級評價 Rank 16。m16，由 ICID (1994)、FAO (1998)、ASCE (2005) 及 Yoder *et al.* (2005) 所建議，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 2.85、0.5769 及 0.5368，圖 6 所示黑點亦呈零亂散佈在 1:1 斜線上下，綜合性能等級評價 Rank 21。與 m16 同為 VPAM 型態的 VPD 計算式，有 m13~m23，其性能等級評價結果散佈在 Rank 7~Rank 26 之間，優劣差異不小，此可歸因於氣象資料取捨、平均方式、取樣頻率及組合方式等之不同，如  $T_{dp}$  若是 ave 或 mean 或清晨 8 點，適用性順序依序為  $T_{dpmean}$ 、 $T_{dpave}$  與  $T_{dp8}$ ，顯示同是選取氣象資料  $T_{dp}$ ，24 個時點資料頻率較優，二個數據頻率次之，單一清晨 8 點數據最差。再如同樣引用 RH 族群，即 m17~m23 七款 VPD 計算式，以 m22 的  $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 、 $RH_{max}$  及  $RH_{min}$  及的組合較佳，亦較優於 m13~m16 所選用的  $T_{dp}$  或 T。其中，上述 m23，係 ASCE (1974, 1990, 2005)、FAO (1977, 1998)、Cuenca *et al.* (1982)、ICID (1994) 及 Yoder *et al.* (2005) 推薦，*RMSE*、 $R^2$  及 *CE* 分別是 3.17、0.9077 及 0.4278，圖 6 所示黑點散佈在 1:1 斜線上方，呈高估現象，綜合性能等級評價 Rank 22。

從推薦觀點，探討國外著名專業學術或國際性機構，所建議 VPD 計算式在西北區農業氣候分區環境之適用性，ASCE (2005) 建議之九款 VPD 計算式中，性能表現最佳者係 m14，評價 Rank 11，最為遜色的是 m17，評價 Rank 26。

FAO (1998)推薦四式，即 m16、m23、m18 及 m21，性能評價結果依序是，21、22、18 及 13，以 m21 較優於其他三式，不過充其量僅排行第 13。ICID (1994)建議 m23、m26 及 m16，三項統計指標檢測之綜合性能等級，分別是 22、15 及 21，在國內適用最好的 VPD 計算式是排行 15 之 m26，比起 ASCE (2005)或 FAO (1998)推荐的 VPD 計算式，又更為遜色。以上結果揭示，VPD 計算式獲國際性機構的推薦，不論是 ASCE (2005)或 FAO (1998)或 ICID (1994)，由於皆具有其地域環境應用或適用背景特性，所以應用在國內西北農業氣候分區環境之適用性，都不盡理想，顯示 VPD 推荐式在國內本土環境之應用，有加以檢測及評估之必要。

經三項統計指標檢測結果顯示，表 1 所示屬 HM 型態之 m25，即以 24 個時溫度日平均為  $e_s$ ，濕球下陷量為  $e_a$ ，具最低  $RMSE$ 、 $R^2$  值 0.99 以上及最大  $CE$ ，性能表現優於其他所有 VPD 計算式，最能適用西北區農業氣候分區環境的 VPD 計算式。經改良後的 Penman (1948)及 Yoder *et al.* (2005)推荐式，即屬 TAM 型態的 m1 為次佳。Cuenca *et al.* (1982)建議的 m8，及 ASCE (2005)與 Yoder *et al.* (2005)之 m17，分別為次差、最差 VPD 計算式，而其他諸如 FAO (1998)、ICID (1994)等國內外著名專業學術或國際性機構或專家學者所推荐 VPD 計算式，初步不建議在國內繼續使用。

同理，應用在農工中心測站西南方約 20 km，同屬西北區之桃改場測站，以 348 日樣本數分析，各式 VPD 計算式經  $RMSE$ 、 $R^2$  及  $CE$  三項統計指標檢測結果揭露，m25 分別是 0.16、0.9965 及 0.9963，在 26 種 VPD 方法中，獲性能等級排行最優，評價  $Rank$  1；而以 m1 之 0.23、0.9973 及 0.9927，排行第 2，評價  $Rank$  2，相反地，以 m8 之 3.15、0.8452 及 -0.3429，性能表現最差，評價  $Rank$  26；而以 m2 之 2.52、0.4115 及 0.1360，性能等級次差，評價  $Rank$  25，其它 VPD 計算式性能表現排序，與農工中心測站比較，縱使有些微前後變化差異，然仍不脫農工中心所獲結論：VPD 計算式以 24 個時溫度日平均為  $e_s$ ，濕球下

陷量為  $e_a$ ，具最低  $RMSE$ 、 $R^2$  值 0.99 以上及最大  $CE$ ，性能表現優於其他所有 VPD 計算式，也因此，可以消弭系統量測上可能所致誤差之疑慮，並通過環境背景代表性之測試。

再將探討標的擴展至農業氣候分區中彰區，以台中測站之 359 日樣本數分析，各式 VPD 計算式經  $RMSE$ 、 $R^2$  及  $CE$  三項統計指標檢測結果，發現在 26 種 VPD 方法中，仍以 HM 型態之 m25，分別是 0.16、0.9969 及 0.9966，獲性能等級排行最優，評價  $Rank$  1，堪稱最適合在中彰農業氣候分區環境之應用，而以 m22，即 Yoder *et al.* (2005)所推荐 VPD 計算式，分別是 0.30、0.9898 及 0.9890，排行次佳，評價  $Rank$  2；相反地，性能表現最差的，評價  $Rank$  26，係 3.81、0.5235 及 -0.7887 之 m2，性能等級次差的，即評價  $Rank$  25，是 2.87、0.8830 及 -0.0137 之 m8；其它 VPD 計算式性能表現排序，與農工中心、桃改場比較，即使有些微上下起伏差異，依舊與農工中心及桃改場所得結論一致。

同理，其他農業氣候分區，26 款 VPD 計算式經  $RMSE$ 、 $R^2$  及  $CE$  統計指標檢測結果，在雲嘉區之嘉義測站(No. 46748)，分別是 0.27、0.9928 及 0.9873，在西南區之學甲旱作灌溉試驗中心(No. 12057)，分別是 0.22、0.9943 及 0.9926，在南部區之恆春測站(No. 46759)，分別是 0.20、0.9955 及 0.9930，在東岸區之花蓮測站(No. 46699)，分別是 0.14、0.9970 及 0.9968，在東北區之宜蘭測站(No. 46708)，分別是 0.11、0.9978 及 0.9978，均揭露屬 HM 型態之 m25，性能等級表現最優，評價為  $Rank$  1，顯示在上述的農業氣候分區環境適用性最佳，這個結果亦與農工中心、桃改場所得結論一致，其餘各款 VPD 計算式性能等級評價，詳如表 8 所示。

綜合台灣地區七個農業氣候分區各式 VPD 計算式性能等級檢測結果，進一步繪如圖 7 所示  $Rank$  柱狀圖，由圖 7 清楚顯示，在台灣地區本土環境之適用性，以 VPD 計算式型態而言，大致是 HM 型態較優於 TAM 型態，而以 VPAM 型態較不適；國外著名專業學術或國際性機構推荐，如 ICID (1994)、FAO (1998)及 ASCE (2005)，最

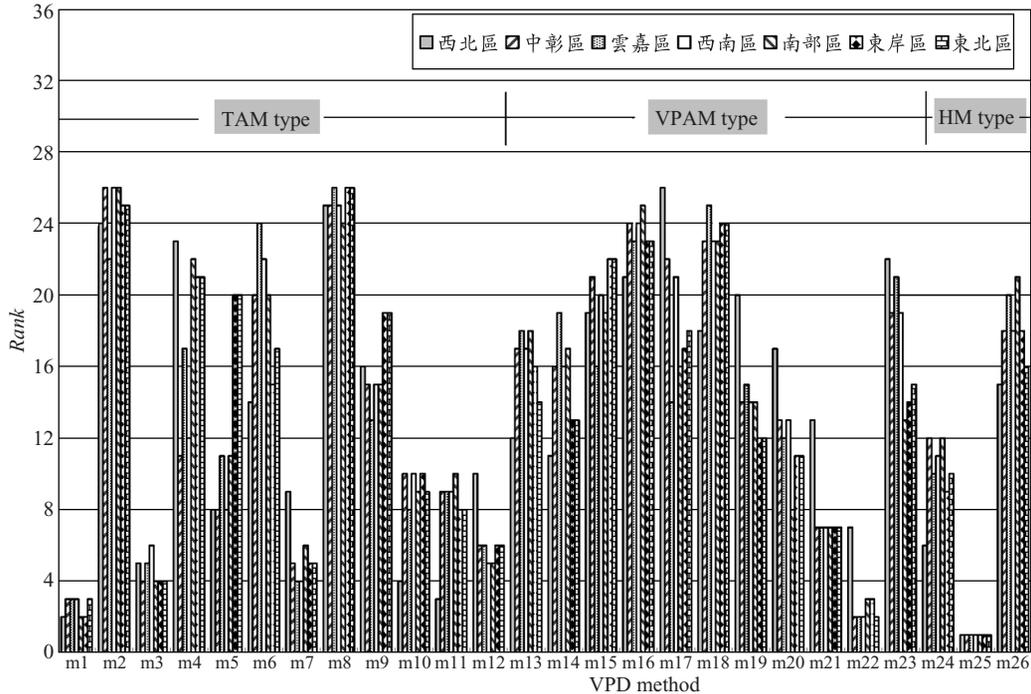


圖 7 台灣地區各地農業氣候分區各式 VPD 計算式應用統計指標法檢測評估性能等級分佈圖

優的性能評價是出現在，分別是 m26、m21 及 m14，評價依序是 Rank 15、Rank 13 及 Rank 11，充其量僅排行第 11；國外著名專家學者推薦的最優性能評價，是出現在 m1 及 m22，即經改良後的 Penman (1948)及 Yoder *et al.* (2005) 推荐式，評價 Rank 2；現有國內外所有推荐 VPD 計算式，以 m25 在台灣地區七個農業氣候分區環境適用性最佳，性能等級表現最優，評價為 Rank 1。

爰此，以統計指標法證實，最適台灣地區本土環境應用之 VPD 計算式，係以 24 個時溫度日平均為  $e_s$ ，濕球下陷量為  $e_a$ ，具最低 RMSE、 $R^2$  值 0.99 以上及最大 CE，性能表現優於其他所有 VPD 計算式，這樣結果對照黃振昌等(2003, 2005) 採頻率分析法評估之發現是一致，而其他諸如 ICID (1994)、FAO (1998)及 ASCE (2005)等國內外著名專業學術或國際性機構或專家學者所推荐 VPD 計算式，不建議在國內繼續使用。

#### 四、結論與建議

本文針對國內外機構或學者所推荐 26 款

VPD 計算式，應用台灣地區 7 個農業氣候分區 8 個代表測站，2002-2003 年實際氣象觀測記錄，綜合頻率分析法及統計指標法之檢測評估結果，兩者皆發現並顯示，以 24 個時溫度日平均為飽和蒸汽壓力，與濕球下陷量為實際蒸汽壓力之 VPD 計算式，在各地農業氣候分區均呈現，具誤差最少、全距最小、出現頻率最多、最高權重指數、最低 RMSE、 $R^2$  值 0.99 以上及最大 CE，性能表現優於其他所有 VPD 計算式，堪稱最適台灣本土氣候環境 VPD 計算式，建議可在台灣各地農業氣候分區應用，而過去國內常以國際性著名機構或學者所推薦 VPD 計算式，建議不適合在台灣繼續應用。

#### 五、謝 誌

本文部份內容係摘自行政院農業委員會農業水利科技計畫，承蒙行政院農業委員會(計畫編號：92 農科-2.1.2-林-F1(19))、農業工程研究中心經費資助，中央氣象局、桃園區農業改良場、學甲旱灌中心提供氣象資料，謹致謝意。

## 六、參考文獻

1. 中央氣象局(2002), 「氣候資料年報」。
2. 甘俊二、陳清田、陳鈞華(1996a), 「台灣區域性旱作物需水量之推估」, 85 年度農業工程研討會論文集, p.99-105。
3. 甘俊二、陳清田、陳焜耀(1996b), 「臺灣地區作物需水量推估模式之合適性研究」, 中國農業工程學報 Vol. 42, No. 2, p. 8-19。
4. 宋易倫、張德鑫、黃振昌(2006), 「蒸發散量 Penman 估算方程式風速函數型態之建立」, 95 年度農業工程研討會論文集, p. 634-645。
5. 宋易倫、黃振昌、張德鑫(2004), 「晝間蒸汽壓力差與全天蒸汽壓力差關係之探討」, 93 年度農業工程研討會論文集, p. 375-384。
6. 施嘉昌、黃振昌(1987), 「作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究」, 中國農業工程學報, Vol. 33, No. 2, p. 1-27。
7. 郭文鑠、楊之遠(1981), 「台灣地區農業氣候區域之劃分」, 氣象學報, Vol. 27, No. 1, p. 16-28。
8. 郭振民、陳姜琦、游保杉(2002), 「應用 NOAA 衛星遙測估算蒸發散之氣象因子」, 中國農業工程學報, Vol. 48, No. 3, p. 19-30。
9. 徐森雄、宋義達(1987), 「從氣象資料估算蒸發量」, 中華水土保持學報, Vol. 18, No. 2, p. 83-89。
10. 桃園區農業改良場(2002), 「農業氣象觀測資料」。
11. 梁仁有、劉復誠、耿旭、林深林(1995), 「氣候改變對臺灣地區蒸發散量影響的模擬研究」, 氣象學報, Vol. 41, No. 4, p. 246-271。
12. 陳加忠(1999), 「溫室內盆栽花卉蒸散量之研究」, 中華農業氣象, Vol. 6, No. 4, p. 159-170。
13. 陳尚、蔡奇成(1967), 「旱作需水量之測算法與試算結果之檢討」, 中國農業工程學報, Vol. 13, No. 4, p. 26-49。
14. 陳述、姚銘輝、陳守泓(2008), 「利用潛熱通量資料驗證水稻田蒸發散模式」, 作物、環境與生物資訊 Vol. 5, No. 1, p. 29-39。
15. 陳姜琦、郭振民、游保杉(2002), 「應用衛星遙測區域蒸發散量之估算」, 第 13 屆水利工程研討會論文集, p. B-44~p. B-52。
16. 陳清田(1991), 「嘉義地區作物需水量推估之研究」, 中國農業工程學報, Vol. 37, No. 1, p. 82-109。
17. 陳清田、甘俊二(1997), 「台灣地域性作物需水量之推估研究」, 中國農業工程學報, Vol. 43, No. 4, p. 1-18。
18. 黃振昌、宋易倫(2003), 「Penman-Monteith 方程式蒸汽壓力差最佳計算式之探討」, 氣象學報, Vol. 45, No. 2, p. 53-70。
19. 黃振昌、張德鑫、宋易倫(2005), 「Penman-Monteith 方程式蒸汽壓力差計算式適用性評估: 頻率分析法」, 氣象學報, Vol. 46, No. 1, p. 13-30。
20. 黃振昌、張德鑫、宋易倫(2006), 「Penman-Monteith 方程式蒸汽壓力差計算式適用性評估: 統計指標法」, 氣象學報, Vol. 46, No. 3, p. 33-p.50。
21. 葉信富、陳進發、李振誥(2005), 「潛勢能蒸發散量經驗公式之最佳化比較」, 農業工程學報 Vol. 51, No. 1, p. 27-37。
22. 張本初(1990), 「作物需水量最佳模式之探討」, 國立台大農工所碩士論文。
23. 農業工程研究中心(2002~2003), 「農業氣象觀測資料」。
24. 童慶斌、連宛渝(2000), 「氣候變遷對灌溉需水量之影響」, 中國農業工程學報, Vol. 46, No. 1, p. 57-68。
25. 學甲旱作灌溉試驗中心(2002), 「農業氣象觀測資料」。
26. Al-Faraj, A., Meyer, G. E., Schade, G. R., and Horst, G. L., (2000), Dynamic analysis of moisture stress in tall fescue (*festuca arundinacea*) using canopy temperature, irradiation and vapor deficit, *Trans. ASAE* 43(1): 101-109.
27. Allen, R. G., Pereira, L.S., Rase, D., and Smith, M., (1998), Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements, FAO

- Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
28. Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L.S., (1994), An update for the definition of reference evapotranspiration, *ICID Bulletin*. Vol. 43, No. 2, p. 1-34.
  29. Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., and Jensen, M., (2005), The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, ASCE, p. 59.
  30. Baille, M., Ballie, A., and Delmon, D., (1994), Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops, *Agri. For. Meteorol.*, Vol. 71, p. 83-97.
  31. Bosen, J. F., (1960), A formula for approximation of the saturation vapor pressure over water, *Monthly Weather Review*. Vol. 88, No. 8, p. 275-276.
  32. Burman, R. D., Cuenca, R. H., and Weiss, A., (1983), Techniques for estimation irrigation water requirements, D. Hillel, ed., *Advances in irrigation*, Academic Press, Inc., New York, N.Y., p. 336-394.
  33. Burman, R. D., and Pochop, L. O., (1994), Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data, Elsevier Science, Netherlands., p. 275.
  34. Cuenca, R. H., and Nicholson, M. T., (1982), Application of the Penman equation wind function, *J. Irrigation and Drainage*, ASCE 108(IR1): 13-23.
  35. Dalton, J., (1802), Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from waters and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat, *Mem. Proc. Manchester. Lit. Phil. Soc.*, Vol. 5, p. 535-602.
  36. Doorenbos, J., and Pruitt, W. O., (1975), Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
  37. Doorenbos, J., and Pruitt, W. O., (1977), Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2<sup>nd</sup>ed, FAO, Rome.
  38. Hargreaves, G. H., and Allen, R. G., (2004), Closure to History and evaluation of hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrigation and Drainage*, ASCE 130(IR5): 448-449.
  39. Howell, T. A., and Dusek D. A., (1995), Comparison of vapor-pressure-deficit calculation methods-Southern High Plains, *J. Irrigation and Drainage*, ASCE 121(IR2): 191-198.
  40. Howell, T. A., Meek, D. W., Phene, C. J., Davis, K. R., and McCormick, R. L., (1984), Automated weather data collection for research on irrigation scheduling, *Trans. ASAE*, Vol. 27, No. 2, p. 386-391, 396.
  41. Irmak, S., Haman, D. Z., and Bastug, R., (2000), Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn, *Agronomy J.* 92(6): 1221-1227.
  42. Irmak, S., Payero, J., Martin, D., Irmak, A. and Howell, T. A., (2006), Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation, *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 132(6): 564-578.
  43. Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G., (1990), Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE, p. 332.
  44. Jensen, M. E. Ed., (1974), Consumptive use of water and irrigation water requirements, ASCE, p. 215.
  45. Kiniry, J. R., Blanchet, R., Williams, J. R., Texier, V., Jones, C. A., and Cabelguenne, M., (1992), Sunflower simulation using the EPIC and ALMANAC models, *Field Crops Res.*, Vol. 30, p. 403-423.
  46. Legates, D. R., and McCabe, Jr. G. J., (1999), Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, p. 233-241.
  47. Manrique, L. A., Kiniry, J. R., Hodges, T., and Axness, D. S., (1991), Dry matter production and

- radiation interception of potato, *Crop Sci.*, Vol. 31, p. 1044-1049.
48. Monteith, J. L., (1981), Evaporation and surface temperature, *Quart. J.Roy. Meteorol. Soc.* 107: 1-27.
49. Monteith, J. L., and Unsworth, M. H., (1990), Principles of Environmental Physics, 2<sup>nd</sup> ed., Edward Arnold, London.
50. Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., (1970), River flow forecasting through conceptual models-A discussion of principles, *J. Hydrol.*, Vol. 10, p. 282-290.
51. Payero, J. O., Neale, C. M. U., and Wright, J. L., (2005), Non-Water-Stressed baselines for calculation crop water stress index (CWSI) for alfalfa and tall fescue grass, *Trans. ASAE* 48(2): 653-661.
52. Penman, H. L., (1948), Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, A193, p. 120-146.
53. Penman, H. L., (1956), Estimating evaporation, *Trans. Am. Geoph. U.* Vol. 37, No. 1, p. 43-50.
54. Penman, H. L., (1963), Vegetation and hydrology, Tech. Comm. No.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. p. 125.
55. Sadler, E. J., and Evans, D. E., (1989), Vapor pressure deficit calculations and their effect on the combination equation, *Agri. For. Meteorol.*, Vol. 49, p. 55-80.
56. Seibert, J., (2001), On the need for benchmarks in hydrological modelling, *Hydrol. Process*, Vol. 15, p. 1063-1064.
57. Stockle, C. O., and Kiniry, J. R., (1990), Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor pressure deficit, *Field Crops Res.*, Vol. 25, p. 171-181.
58. Tanner, C. B., and Sinclair, T. R., (1983), Efficient water use in crop production: research or re-search?, H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair, eds., Limitations to efficient water use in crop production, Am. Soc. of Agronomy, Inc., Madison, Wisc., p. 1-27.
59. Yazar, A., Howell, T. A., Dusek, D. A., and Copeland, K. S., (1999), Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated com, *Irrigation Sci.*, 18(4): 171-180.
60. Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., and Wright, W. C., (2005), Effects of vapor-pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized Penman-Monteith equation in a humid climate, *J. Irrigation and Drainage*, ASCE 131(IR3): 228-237.

收稿日期：民國 97 年 7 月 31 日  
修正日期：民國 97 年 11 月 6 日  
接受日期：民國 97 年 11 月 10 日