

Penman-Monteith 方程式蒸汽壓力差計算式 適用性評估：統計指標法

黃振昌¹、張德鑫²、宋易倫^{1,2}

¹農業工程研究中心

²中原大學土木系

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。蒸發散量估算涉及 VPD 之計算，由於氣候乾溼環境特性、溫度濕度露點等氣象因子引用考量、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，目前遂有二十種以上 VPD 計算式，為國內外機構或學者推荐在世界各地廣泛應用。本文以台灣各地農業氣候分區氣象觀測記錄，藉根均方差(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，檢測評估國內外推荐 VPD 計算式，在國內應用時適用性之比較與探討。

分析結果揭示，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，濕球下陷量為實際蒸汽壓力，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(2005)採頻率分析法評估之發現是一致，因此，建議可在台灣地區各農業氣候分區應用。

關鍵詞：Penman-Monteith、蒸汽壓力差、蒸發散量、統計指標。

一、前言

蒸汽壓力差(vapor pressure deficit, VPD)是表達大氣蒸發能力重要指標。隨著水資源日益珍貴、標的間水源競用案例日增，在愈發引起國內外機構或學者廣泛探討研究蒸發散量(evapotranspiration)相關課題之同時，VPD 至今不僅仍是混合法(combination approach)估算式考慮要素，也特別是獲世界著名專業學術美國土木工程師學會(American Society of Civil Engineers, ASCE, 1990、2005)，及國際性機構國際灌溉排水委員會(International Committee of Irrigation and Drainage, ICID, 1994)與聯合國

糧食與農業組織(Food and Agriculture Organization, FAO, 1998)，唯一認可推荐之 Penman-Monteith 型態估算方程式(Jensen *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2005)內含重要成分。

VPD 計算式之決定或取捨，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

以是冪次(power)型態呈現，而函數內含數值大小亦隨之不同(FAO, 1975、1977)；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)；在農藝領域探討作物模型(crop model)相關課題上，VPD 亦具舉足輕重、主要支配角色，如影響作物用水及乾果產量關係(the relation between crop dry-matter and water use)(Tanner *et al.*, 1983)、作物輻射光能利用效率(radiation-use efficiency)(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(crop water stress index, 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，探討大面積蒸發散量估算，VPD 亦是不可偏廢之重要考量因子(Howell *et al.*, 1984；康紹忠等, 1994；陳鈞華, 2002)。

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、溼潤條件；2.氣象因子引用不同，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.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薦在世界各地廣泛應用之不同 VPD 計算式，目前已有二十種以上。

本文擬以根均方差(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，應用台灣各地農業氣候分區氣象觀測記錄，檢測評估國內外推薦之 26 種 VPD 計算式，在台灣地區農業氣候分區應用時適用性之比較與探討。

二、材料及方法

2.1 蒸汽壓力差 VPD 計算式

蒸汽壓力差之研究先驅，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，

$$E = f(u)(e_{srf} - e_a) \dots\dots\dots (1)$$

(1)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 or kpa or mmHg。 e_a ：蒸發面實際蒸汽壓力，單位 mb or kpa or 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，於是 Penman(1948、1956、1963)延伸(1)式理念，透過若干假設，得國際上廣泛應用的蒸發散量混合法空氣動力項，

$$E = 0.35(1 + 0.0098u_2)(e_s - e_a) \dots\dots\dots (2)$$

(2)式中， u_2 ：離地面 2 米高風速，單位 mile/day。 e_s ：空氣中飽和蒸汽壓力(mmHg)，取代 e_{srf} 。 e_a ：露點溫度飽和蒸汽壓力(mmHg)。 $e_s - e_a$ 即是 VPD，於混合著能量與空氣動力兩項之方程式，或如下 Penman-Monteith 型態方程式(Allen *et al.*, 2005)都是組成要項，

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (3)$$

(3)式中， ET_o ：蒸發散量； Δ ：飽和蒸汽壓力曲線斜率(slope of saturated vapor pressure

表一 蒸汽壓力差(vapor pressure deficit, VPD)計算式一覽表

Table 1. Methods used for vapor-pressure-deficit calculation

方法	蒸汽壓力差(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)
蒸汽壓力平均法(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)
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。

curve)； γ ：溼度常數(psychrometric constant)； R_n ：淨輻射(MJ/m²/day)； G ：土壤熱通量(soil heat flux)，單位 MJ/m²/day； T ：日平均溫度(°C)； 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。餘同前。

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(如溫度、相對濕度、露點、乾溼球等)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，所以，目前遂有超過二十種 VPD 計算式，為國內外機構或學者推荐在世界各地廣泛應用。

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，如表一所示包含有 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，如表一所示包含有 m13、m14...m23 等 11 種不同 VPD 計算式；3.混合法(hybrid method, HM)，上述兩款並混含乾濕球溫度方式，如表一所示包含有 m24、m25、m26，計 3 種不同 VPD 計算式。上述所稱平均方式，又有最大值與最小值之日平均，與 24 個時資料之日平均，再進一步搭配不同氣象因子引用及組合，因此，經整理共有 26 款 VPD 計算式。

眾多 VPD 計算式中，首推 Penman(1948)於英國 Rothamsted 試驗站測試之建議，係 e_a 以每 4 時量測一次氣溫 T ，共計 6 次，再平均計之， e_a 是以每 6 小時量測(於鄰近測站)一次露點溫度 T_{dp} ，一天共計 4 次，再平均採計，所推荐 VPD 計算式屬 TAM 型態，本文歸類如表一所示之 m1。

ASCE(Jensen *et al.*, 1974、1990)就專業技術角度，選擇 T_{max} 、 T_{min} 、 T_{dp8} 、 RH_{min} 與 RH_{max}

等氣象因子，以及日平均係採最大值(max)與最小值(min)方式，以下標 ave 表示，推荐屬 TAM 型態有 m1、m12，屬 VPAM 型態有 m15、m23，共四款 VPD 計算式。並援引美國 Idaho 一天之實測資料，對上述四式與 24 小時平均蒸汽壓力差加以比較，誤差分別是-20%、-26%、2%及 1%。

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 VPD 計算式，如表一所示之 m12、m24、m10 及 m23，三種 VPD 計算型態都有。

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，在 TAM、VPAM 及 HM 型態，分別各建議 3、2 及 1 款 VPD 計算式，即依序是 m8、m10、m12、m13、m23 及 m24。

農業灌溉需水量推估之準則，Burman *et al.*(1983)建議應以理論健全、廣泛應用的 Penman(1948)混合方程式估計，其中在 VPD 部分，推荐依序為 m10、m12、m13 及 m9。

施嘉昌等(1987)經五種 VPD 計算式檢驗分析，建議 T_{ave} 與 T_{dp8} 之組合，最能代表學甲地區 24 小時實際飽和差，即歸類如表一所示 TAM 型態之 m9，是國內首見 VPD 之探討，此後國內學者陳清田(1991)、陳清田等(1997)亦獲同樣結論。

ICID(Allen *et al.*, 1994)以國際上灌溉排水領域尖端領導角色，建議 Penman-Monteith 方程式為唯一作物需水量估算模型，並推荐 m23、m26 及 m16 為 VPD 計算式，亦透過美國 Utah 地區七個月實測資料與 24 小時平均蒸汽壓力差，加以驗證與比較，誤差分別是 16%、

16%及-21%。

Howell *et al.*(1995)於美國 Great Plains 地區，依 ASCE(1990)推薦四款 VPD 計算式外，另再斟酌研究地區環境特性研發設計四種，共計 8 種 VPD 計算式，以每隔 15 分鐘頻度取樣氣象記錄一次方式，加以應用及探討，驗證結果，適用於半乾燥氣候環境 VPD 計算式，建議類如 m11、m12 及 m3 三式 VPD 計算式，全都屬 TAM 型態，唯在表一所示之 m11 與 m3 方法中，下標 mean 係 96 個記錄之日平均。

FAO(1998)繼 1977 年後，所推薦 VPD 計算式經不斷應用與驗證，復於 1998 年改版並推薦 m16、m23、m18 及 m21(Allen *et al.*, 1998)，四種 VPD 計算式都屬 VPAM 型態，已捨去以往 TAM 及 HM 型態計算式。

黃振昌等(2003)參酌 VPD 內含氣象參數之考量，設計 24 款 VPD 計算式，以桃園區農業改良場、學甲旱作灌溉試驗中心農業氣象站資料為例，分別代表台灣北部較潮溼、南部較乾燥環境，經檢測分析探討，建議 m25 為 VPD 最佳計算式。

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 2~2,900m、年降雨 150~1,500mm、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(3)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一所示之 m19、m14、m26、m15、m23、m18、m17、m16 及 m20，計 9 款，對照以往所推荐的，已摒棄 TAM 型態，VPAM 型態佔 8 種，HM 型態僅有 1 種。

Yoder *et al.*(2005)於美國東南方 Tennessee 地區，以 5 年氣象及滲漏計(lysimeter)觀測記錄，應用 ASCE 標準化 Penman-Monteith 方程式(Allen *et al.*, 2005)，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 m23、m18、m17、m22、m14、m16、m7、m5、m4、m6、m1 及 m2，共 12 種 VPD 計算式，TAM 型態與 VPAM 型態各佔一半，無 HM 型態。

黃振昌等(2005)以頻率分析法(frequency approach)，比較探討國內外推荐 VPD 計算式在國內應用時之適用性，評估結果以 m25，最適用在台灣各地農業氣候分區之應用。

綜合以上所述，依 VPD 計算式型態予以分類，彙整如表二所示，國內外推荐者所建議 VPD 計算式係屬何種型態及其應用或適用或驗證地區，清晰可見，大體而言，TAM 型態與 VPAM 型態明顯多於 HM 型態。

2.2 相關因子計算

2.2.1 飽和蒸汽壓力 e_s

眾多飽和蒸汽壓力 e_s 以溫度 T ($^{\circ}\text{C}$) 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， $e_s(T) = 33.8639[(0.00738T + 0.8072)^8 - 0.0000191|1.8T + 48| + 0.001316]$ (4)

2.2.2 飽和蒸汽壓力曲線斜率

將(4)式對 T 微分，即得

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = 1.9993(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.001158 \dots\dots\dots (5)$$

2.2.3 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，如表一 HM 系列方法， T_{wet} 可以下式估計(ASCE, 1990)，

$$T_{wet} = \frac{\gamma T + \Delta T_{dp}}{\Delta + \gamma} \dots\dots\dots (6)$$

2.2.4 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, 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

$$VPD_{24} = \frac{\sum_{i=1}^{24} [e_s(T_i) - e_a(T_{\phi i})]}{24} \dots\dots\dots (7)$$

2.3 統計指標

本文採用根均方差(RMSE)、相關係數(R²)及效率係數(CE)三項客觀統計指標，進行國內外推薦 VPD 計算式，應用於國內本土環境適用性之檢測評估。

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，反之愈小。(下標 i 表示第 i 個 VPD 計算式，i=1~26；下標 j 表示分析樣本數，j=1~N，以下表示亦同)。

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - VPD_{24,j})^2}{N}} \dots\dots\dots (8)$$

相關係數(coefficient of correlation, R²)，以

檢測說明 VPD_{24,j} 與各計算式 VPD_{i,j} 間之相關程度，R² 界於 0 到 1 之間，值愈大者愈佳。

$$R_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - \overline{VPD}_i)(VPD_{24,j} - \overline{VPD}_{24})}{\sqrt{[\sum_{j=1}^N (VPD_{i,j} - \overline{VPD}_i)^2][\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - \overline{VPD}_{24})^2]}} \dots\dots (9)$$

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)。

$$CE_i = 1.0 - \frac{\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - VPD_{i,j})^2}{\sum_{j=1}^N (VPD_{24,j} - \overline{VPD}_{24})^2} \dots\dots\dots (10)$$

表二 國內外推薦 VPD 計算式之型態分類

Tabel.2. Classification of types of VPD calculation methods cited in this paper.

推薦者(年)	應用或適用 或驗證地區	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
Penman(1948)	英國 Rothamsted	1 式	—	—
ASCE(1974, 1990)	美國 Idaho	2 式	2 式	—
FAO(1975, 1977)	世界各地	2 式	1 式	1 式
Cuenca <i>et al.</i> (1982)	—	3 式	2 式	1 式
Burman <i>et al.</i> (1983)	—	3 式	1 式	—
施嘉昌等(1987)	台灣學甲地區	1 式	—	—
陳清田(1991)	台灣嘉義地區	1 式	—	—
ICID(1994)	世界各地	—	2 式	1 式
Howell <i>et al.</i> (1995)	美國 Great Plains	3 式	—	—
陳清田等(1997)	台灣地區	1 式	—	—
FAO(1998)	世界各地	—	4 式	—
黃振昌等(2003)	台灣南北環境	—	—	1 式
ASCE(2005)	美國 16 州	—	8 式	1 式
Yoder <i>et al.</i> (2005)	美國 Tennessee	6 式	6 式	—
黃振昌等(2005)	台灣地區	—	—	1 式

註：資料來源，本研究整理。

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。

2.4 氣象資料

台灣地區農業氣候分區歷年相關研究成果豐碩, 如蔣丙然(1954)、陳正祥(1957)、郭文鑠(1978)、郭文鑠等(1981)、徐森雄(1983)、吳明進等(1993)、洪煥琳等(1998)等。本文採用郭文鑠等(1981)九個農業氣候分區研究成果, 再考量有無氣候測站、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、資料期限及樣本數(儀器故障或資料異常等情況已剔除), 如表三所示, 並收集各測站逐時溫度 *T*、露點溫度 T_{dp} 及相對溼度 *RH* 資料(中央氣象局、桃改場、學甲旱灌中心, 2002; 農工中心, 2002~2003)。為週全嚴謹起見, 以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, 選擇西北區農業工程研究中心農業氣象觀測站(站號: A2C56)(Agricultural Engineering Research Center, AERC, No. of Station, A2C56), 與桃園區農業改良場農業氣象觀測站(站號: 72C44)分析結果, 互為比對、佐證之例。

三、結果與討論

以代表農業氣候分區西北區之農業工程研究中心農業氣象觀測站(No. A2C56), 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。

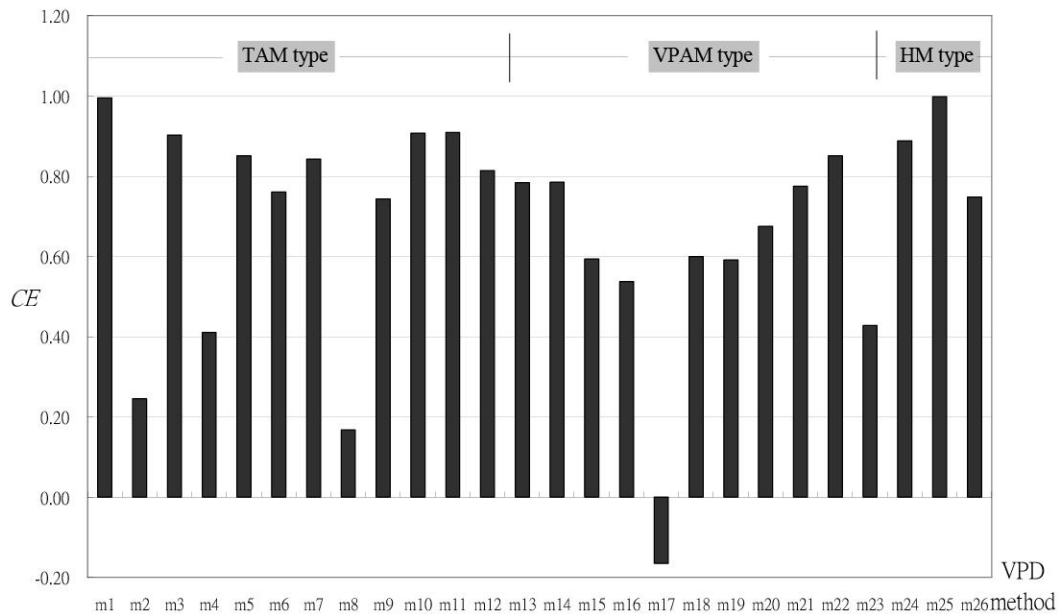
應用 352 日樣本資料, 國內外機構或學者所推荐 26 款 VPD 計算式經統計檢測結果, 整理如表四所示。從 *RMSE* 指標來看, 以屬 HM 型態之 m25 最優, 變異程度僅 0.18 mb/day, 而以 VPAM 型態之 m17 最差, 變異程度達 4.53mb/day, 變異程度最優與最差比值 (4.53/0.18), 高達 25 倍以上。就 R^2 而言, 以屬 TAM 型態之 m1 最高, 達 0.9986, 而以 VPAM 型態之 m16 最小, 僅 0.5769。以 *CE* 值而言, 參照如圖一所示分佈比較圖, 最大值是 m25 之

表三 台灣地區各農業氣候分區氣象資料取樣背景

Table.3. Background of the climate data used for agro-climate divisions in Taiwan

農業氣候分區	代表測站(站號)	資料分析期限	樣本數(日, N)
西北區	農業工程研究中心 (No. A2C56)	2002/6/1~ 2003/5/31	352
	桃園區農業改良場(No.72C44)	2002 年全年	348
中彰區	中央氣象局台中測站(No. 46749)	2002 年全年	359
雲嘉區	中央氣象局嘉義測站(No. 46748)	2002 年全年	365
西南區	學甲旱作灌溉試驗中心(No. 12O57)	2002 年全年	358
南部區	中央氣象局恆春測站(No. 46759)	2002 年全年	359
東岸區	中央氣象局花蓮測站(No. 46699)	2002 年全年	360
東北區	中央氣象局宜蘭測站(No. 46708)	2002 年全年	365

註: 消弭系統量測上可能誤差及背景環境代表正確與否之疑慮, 以西北區二個測站為例, 加以比較、佐證。



圖一 不同 VPD 計算式效率係數分佈圖(農工中心測站, 站號:A2C56)

Fig.1. Bar chart of CE for all different VPD methods at AERC. (No. A2C56)

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, 如圖二所示, 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 為次優, 性能等級給予 Rank 2 評價, 圖二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, $RMSE$ 、

表四 台灣地區各農業氣候分區各式 VPD 計算式統計檢測結果一覽表

Table 4. Summary of statistics and ranking of all VPD methods for Taiwan's agro-climate divisions

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 ²	CE		RMSE (mb)	R ²	CE		RMSE (mb)	R ²	CE		RMSE (mb)	R ²	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	0.9097	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	1.47	0.9162	0.7054	16	1.89	0.9219	0.5598	18	1.96	0.8529	0.3318	20

表四 台灣地區各農業氣候分區各式 VPD 計算式統計檢測結果一覽表(續)

Table.4. Summary of statistics and ranking of all VPD methods for Taiwan's agro-climate divisions(continued)

VPD 方法	西南區				南部區				東岸區				東北區			
	學甲旱灌試驗中心(站號：12057)				恆春測站(站號：46759)				花蓮測站(站號：46699)				宜蘭測站(站號：46708)			
	統計指標			Rank	統計指標			Rank	統計指標			Rank	統計指標			Rank
	RMSE (mb)	R ²	CE		RMSE (mb)	R ²	CE		RMSE (mb)	R ²	CE		RMSE (mb)	R ²	CE	
m1	0.38	0.9953	0.9782	3	0.22	0.9970	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

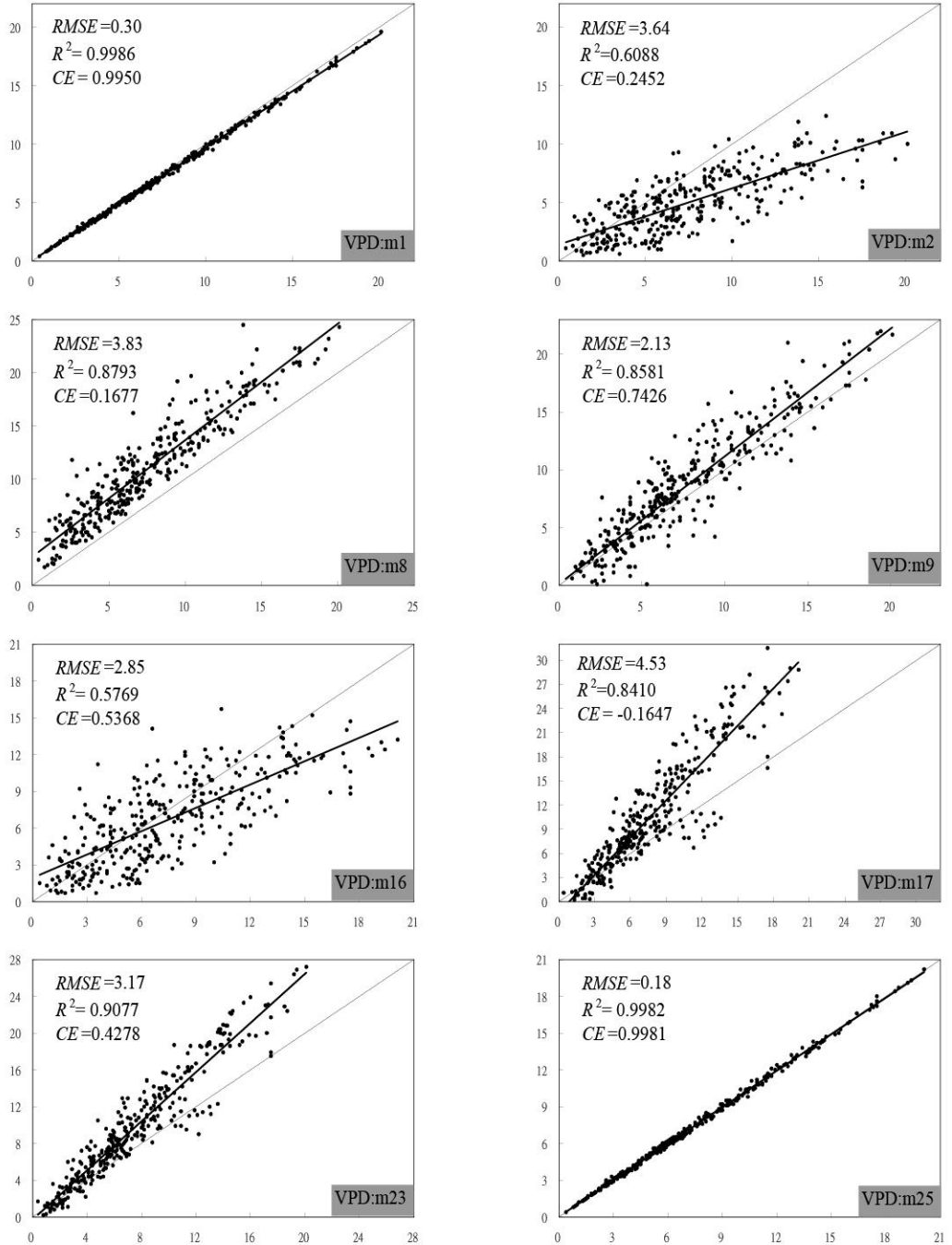
R^2 及 CE 分別是 3.64、0.6088 及 0.2452，適用性能等級評價，已大幅下降到 $Rank$ 24，圖二所示黑點分佈，大致是零亂散佈在 1:1 斜線下方。顯示 VPD 計算式在氣象因子引用之重要，以西北區農業氣候分區而言，選用 T_{dpmean} 較 T_{dpmin} 為優，這在同樣以蒸汽壓力平均方式下之 m14 與 m16，亦獲印證。

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)所推荐，分別是 4.53、0.8410 及 -0.1647，對照圖二所示黑點分佈，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)所推荐，分別是 1.25、0.8636 及 0.7722，性能等級評價 $Rank$ 12，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)所推荐的 m8，分別是 3.83、0.8793 及 0.1677，比對圖二所示黑點分佈，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荐式，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)所推荐， $RMSE$ 、 R^2 及 CE 分別是 2.13、0.8581 及 0.7426，圖二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)、

所建議， $RMSE$ 、 R^2 及 CE 分別是 2.85、0.5769 及 0.5368，圖二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~ $Rank$ 22 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)推荐， $RMSE$ 、 R^2 及 CE 分別是 3.17、0.9077 及 0.4278，圖二所示黑點散佈在 1:1 斜線上方，呈高估現象，綜合性能等級評價 $Rank$ 22。

從推荐觀點，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)推荐四式，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，



圖二 農工中心測站(站號:A2C56)部份代表性 VPD 計算式(y 軸)與 VPD₂₄ (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。

Fig.2. Relationship between some VPD calculation methods and VPD₂₄ for AERC.(No. A2C56). X and y-axis represent as VPD₂₄ and VPD methods, respectively, and are same unit of mb/day. For reference, the line of equality and regression (bold) are also shown.

都不盡理想，顯示 VPD 推荐式在國內環境之應用，有加以檢測及評估之必要。

小結，經三項統計指標檢測結果顯示，表一所示屬 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。

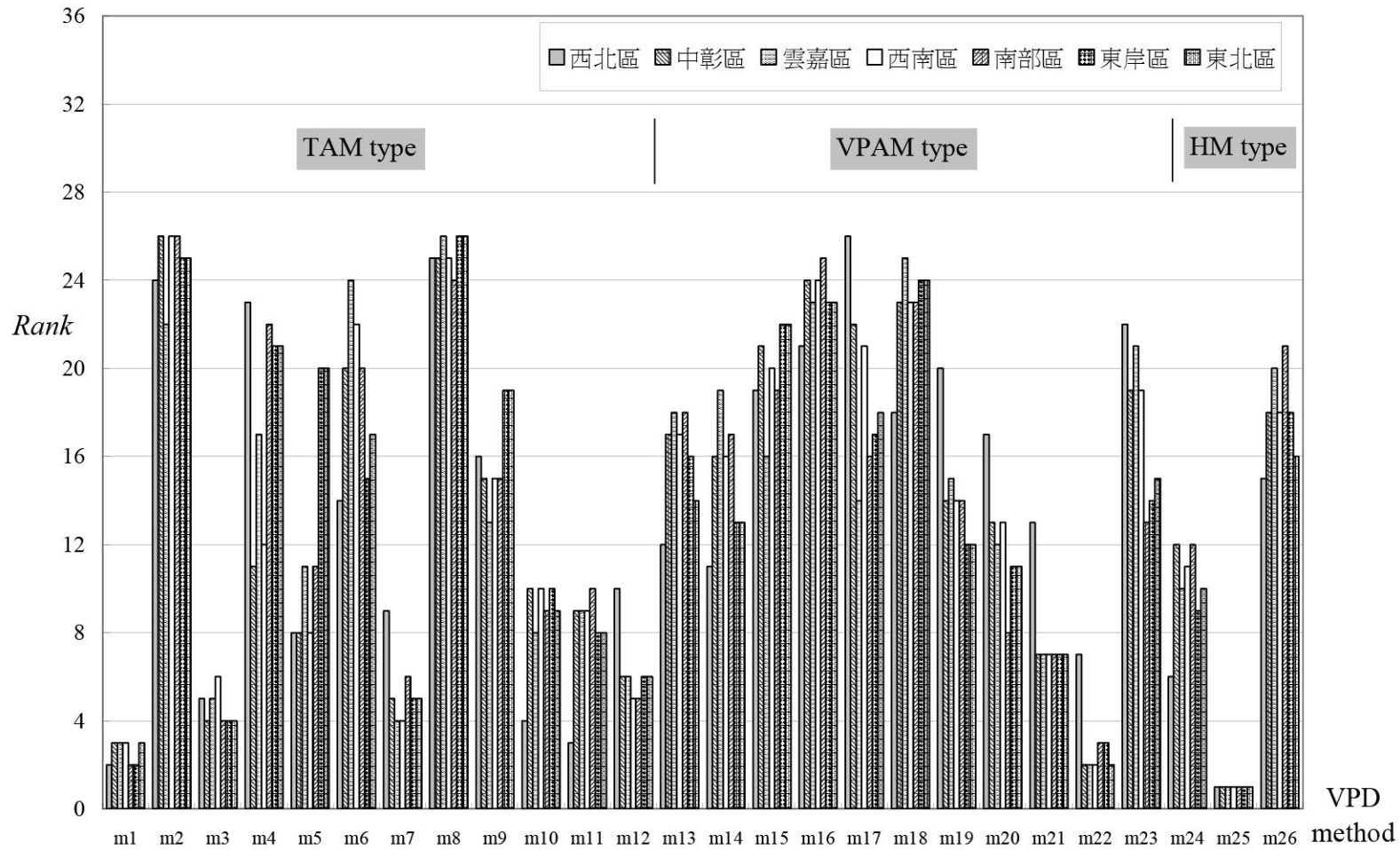
同理，應用在農工中心測站西南方約 20km，同屬農業氣候分區西北區之桃改場測站 (No.72C44)，以 348 日樣本數分析，各式 VPD 計算式經 $RMSE$ 、 R^2 及 CE 三項統計指標檢測結果揭露，m25 分別是 0.16、0.9965 及 0.9963，在 26 種 VPD 方法中，獲性能等級排行最優，評價 Rank 1；而以 m1 之 0.23、0.9973 及 0.9927，排行第 2，評價 Rank 2，相反地，以 m8 之 3.15、0.8452 及 -0.3429，性能表現最差，評價 Rank 26，而以 m2 之 2.52、0.4115 及 0.1360，性能等級次差，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. 12O57)，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，詳如表四所示。

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，進一步繪如圖三所示 Rank 柱狀圖，由圖三清楚顯示，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 7 及 Rank 11，充其量僅排行第 7；國外著名專家學者推荐的最優性能評價，是出現在 m1



圖三 台灣地區農業氣候分區各式 VPD 計算式性能等級分佈圖

Fig.3. Ranking chart of all VPD methods for agro-climate divisions in Taiwan.

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 在臺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,最適臺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(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

混合法或 Penman-Monteith 方程式估算蒸發散量涉及 VPD 之計算,目前有超過二十種以上 VPD 計算式,為國內外機構或學者推荐在世界各地廣泛應用。本文採 $RMSE$ 、 R^2 及 CE 三項統計指標,檢測評估 26 款 VPD 計算式應用在臺灣地區之適用性,結果揭示,台灣地區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,濕球下陷量為實際蒸汽壓力,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,因此建議可在台灣地區本土環境應用,而大多數國內外 VPD 推荐式,在台灣地區之適用性都不甚理想。

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,以及審查委員中肯又寶貴之建言,謹致謝意。

八、參考文獻

- 中央氣象局,2002,「氣候資料年報」。
- 宋易倫、黃振昌及張德鑫,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。
- 吳明進及陳幼麟,1993,「臺灣的氣候分區域」,大氣科學, Vol.21, No.1, p.55-66。
- 洪煥琳、蘇明道及葉一隆,1998,「以作物需水量為基礎之氣象分區研究」,台灣水利 Vol.46, No.3, p.35-49。
- 施嘉昌及黃振昌,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。
- 徐森雄,1983,「台灣各地氣候類似性之分析」,科學發展月刊, Vol.11, No.2, p.85-95。
- 郭文鑠,1978,「臺灣農業氣候區域研究」,中央氣象局。
- 郭文鑠及楊之遠,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。
- 桃園區農業改良場,2002,「農業氣象觀測資料」。
- 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。
- 陳正祥,1957,「氣候之分類與分區」,臺大農學院實驗林林業叢刊第七號。
- 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。
- 陳清田及甘俊二,1997,「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。
- 康紹忠、劉曉明及熊運章,1994,「土壤-植物-大氣連續體水分傳輸理論及其應用」,水利電力出版社, 228pp。
- 陳鈞華,2002,「水田蒸發散量對區域涼化作用功能效益評估之研究」,國立台灣大學生物

- 環境系統工程學研究所博士論文。
- 黃振昌及宋易倫，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。
- 黃振昌、張德鑫及宋易倫，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。
- 農業工程研究中心，2002~2003，「農業氣象觀測資料」。
- 蔣丙然，1954，「臺灣氣候誌」，臺灣研究叢刊第二十六種，臺灣銀行經濟研究室。
- 學甲旱作灌溉試驗中心，2002，「農業氣象觀測資料」。
- 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.
- 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.
- 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.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., and Jensen, M., 2005., "The ASCE standardized reference evapotranspiration equation" ASCE, 59pp.
- Baille, M., Ballie, A., and Delmon, D., 1994., Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops? *Agri. For. Meteorol.*, Vol.71, p.83-97.
- Bosen, J. F., 1960., Formula for approximation of the saturation vapor pressure over water? *Monthly Weather Review*. Vol.88, No.8, p.275-276.
- 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.
- Cuenca, R. H., and Nicholson, M. T., 1982., Application of the Penman equation wind function? *J. Irrigation and Drainage*, ASCE 108(IR1):13-23.
- 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.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W. O., 1975., Guidelines for predicting crop water requirements? FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W. O., 1977., Guidelines for predicting crop water requirements? FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd/ed, FAO, Rome.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G., 1990., vapotranspiration and irrigation water requirements? ASCE, 332pp.
- Jensen, M. E. Ed., 1974., consumptive use of water and irrigation water requirements? ASCE, 215pp..
- Kiniry, J. R., Blanchet, R., Williams, J. R., Texier, V., Jones, C. A., and Cabelguenne, M., 1992., unflower simulation using the EPIC and ALMANAC models? *Field Crops Res.*, Vol.30, p.403-423.
- Legates, D. R., and McCabe, Jr. G. J., 1999., valuating the use of goodness-of-fit? measures in hydrologic and hydroclimatic model validation? *Water Resources Research*, Vol.35, No.1, p.233-241.
- Manrique, L. A., Kiniry, J. R., Hodges, T., and Axness, D. S., 1991., ry matter production and radiation interception of potato? *Crop Sci.*, Vol.31, p.1044-1049.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970., iver flow forecasting through conceptual models-A discussion of principles? *J. Hydrol.*, Vol.10, p.282-290.
- 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.
- Penman, H. L., 1948., atural evaporation from open water, bare soil and grass? *Proc. Roy. Soc. London*, A193, p.120-146.
- Penman, H. L., 1956., stimating evaporation? *Trans. Am. Geoph. U.* Vol.37, No.1, p.43-50.
- Penman, H. L., 1963., egetation and hydrology? *Tech. Comm. No.53*, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125pp.
- Sadler, E. J., and Evans, D. E., 1989., apor pressure deficit calculations and their effect on the combination equation? *Agri. For. Meteorol.*, Vol.49, p.55-80.
- Seibert, J., 2001., "On the need for benchmarks in hydrological modelling ", *Hydrol. Process*, Vol.15, p.1063-1064.
- Stockle, C. O., and Kiniry, J. R., 1990., ariability in crop radiation-use efficiency associated with vapor pressure deficit? *Field Crops Res.*, Vol.25, p.171-181.
- 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.
- Yazar, A., Howell, T. A., Dusek, D. A., amd Copeland, K. S., 1999., "Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated com" *Irrigation Sci.*, 18(4): 171-180.
- 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.

Assessing the Applicability of Vapor-Pressure-Deficit Calculation Methods in the Penman-Monteith Equation: Statistical Indexes Approach

Cheng-Chang Huang¹, Te-Hsing Chang², and Yi-Lun Sung^{1,2}

¹Agricultural Engineering Research Center

²Dept. of Civil Engineering, Chung Yuan Christian University

ABSTRACT

Vapor pressure deficit (VPD) is a significant index for the capacity of evaporation, and also an important parameter in estimating evapotranspiration, particularly in the combination or Penman-Monteith type equations. Due to the differences in environmental climatic characteristics, climate variables cited, number of records sampled, averaging the mean, and compoundable ways, there are over 20 VPD calculations around the world for estimating evapotranspiration. Those methods for VPD calculation were analyzed and compared using data from meteorological stations to determine the most appropriate method that can be applied in Taiwan. Three objective statistical indexes, root mean square error (*RMSE*), coefficient of correlation (R^2), and coefficient of efficiency (*CE*), were used to evaluate and compare the results and the applicability among these methods in Taiwan.

The results showed that in all Taiwan's agro-climate divisions, the VPD calculation using mean of hourly temperature as saturation vapor pressure, and wet-bulb depression as actual vapor pressure yielded 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 in this paper were consistent with an attempt of Huang *et al.* (2005) evaluated with frequency approach. Accordingly, this VPD method was recommended to apply in Taiwan.

Key words: Penman-Monteith, vapor pressure deficit, evapotranspiration, statistical indexes.