

A 型蒸發皿顏色對蒸發量之影響

朱佳仁¹ 陳建翰¹ 李勝雄¹ 劉日順¹

¹ 中央大學土木工程系

摘要

蒸發散為水文循環中重要因子之一，現今量測蒸發量最普遍的方法就是採用 A 型蒸發皿進行現地觀測。在臺灣，中央氣象局所屬的氣象觀測站、水庫管理單位及農業試驗所皆是利用 A 型蒸發皿來監測各地的蒸發量。但中央氣象局的氣象觀測站將蒸發皿外層塗白，內部保留不塗色，而部分觀測站的蒸發皿內外雙層皆漆上白色，與世界氣象組織的建議不同。且臺灣各單位對於蒸發皿表面是否塗上白漆並不一致，因而影響蒸發皿所接受的淨輻射量及蒸發量。本研究比較同時放在同一氣象觀測坪的兩個 A 型蒸發皿，一個未上漆之金屬蒸發皿與另一個白色蒸發皿的蒸發量。觀測的結果顯示：因為白色蒸發皿所吸收的輻射量低於金屬皿的輻射量，白色皿年蒸發量為 $1041 \text{ mm year}^{-1}$ ，金屬皿為 $1392 \text{ mm year}^{-1}$ ，亦即白色皿年蒸發量約為金屬皿年蒸發量的 75%，兩者一年的皿蒸發量可差 351 mm year^{-1} 。

關鍵字：A 型蒸發皿、蒸發量、淨輻射量、反照率

一、前言

蒸發散(Evapotranspiration)乃指水份經由水面、土壤表面蒸發及植物蒸散回到空氣中的過程，是驅使水文循環的動力之一(Brutsaert, 1982)。蒸發散與降水、地表逕流、地下水入滲同為水文循環中四個重要的機制，在水文循環過程中扮演相當重要的角色。適當的蒸發散作用可以調節氣溫、促進植物生長(Chu et al., 2009)及補給大氣水汽含量，並可減低土壤含水量，減

少降雨時的地表逕流之功能。對於人類可使用的水資源而言，蒸發散是一種水資源的損失；但對農業灌溉而言，蒸發散又是一種必須。

根據經濟部水利署(2011)的資料，民國 100 年臺灣年降雨量 828.0 億立方公尺 (100%)，其中年逕流量約 586.0 億立方公尺，佔 70.78%；年蒸發散量約 191.5 億立方公尺，佔 23.12%；年滲透量約 50.5 億立方公尺，佔 6.10%，由此可看出蒸發散量對於臺灣水資源的重要性。蒸發量之分

布特性則與降水量相反。比較臺灣地區降水量與蒸發量的空間分布，西部沿海地區及中南部地區之年潛勢蒸發量大於年降雨量，其餘地區則是年降雨量大於潛勢蒸發量。

因為蒸散量較難直接量測，故氣象、水利及農業單位大多僅監測蒸發量。在農業灌溉管理上，蒸發量監測資料可作為估算農作物耕種需水量的參考依據，例如國際糧農組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 於 1984 年推薦之蒸發皿蒸發量加上作物係數便可推求作物需水量。且準確的蒸發量監測資料可建構該地區的蒸發散量預測模式，而蒸發散量模式可應用於水資源規劃管理、集水區模式、水庫操作及曬鹽技術等方面 (Stanhill, 2002)。尤其在降雨量低的枯水期，蒸發散量的監測與預報對於乾旱時期的水資源供給、調配上，具有相當的重要性 (Linsley et al., 1975)。

除此之外，Peterson et al. (1995) 分析美國及前蘇聯地區的蒸發量，發現量測得之皿蒸發量有逐年下降的趨勢。學者 Brutseart and Parlange (1998) 指出美國地區平均降雨量有逐年增加的趨勢，但平均皿蒸發量卻逐年下降，這現象就溫室效應所造成全球暖化而言是不合理，稱此現象為“蒸發皿謎思 (Pan evaporation paradox)”。之後，許多學者皆發現世界各地的皿蒸發量逐年下降，譬如 Lawrimore and Peterson (2000) 分析美國 1948 ~ 1998 年間暖季 (5 ~ 9 月) 的資料發現平均降雨

量逐年增加，但皿蒸發量以每年 2 ~ 3 mm 的趨勢下降。印度 (Chattopadhyay and Hulme, 1997)、澳洲 (Roderick and Farquhar, 2004)、中國大陸 (Liu, et al., 2004) 及泰國 (Tebakari et al., 2005) 亦觀察到類似的皿蒸發量下降趨勢。Lawrimore and Peterson (2000) 及 Roderick and Farquhar (2002) 認為在大氣中懸浮的氣膠增加，導致地面的太陽輻射量減少，因此皿蒸發量減少。Brutsaert (2006) 認為這是因為實際的蒸發散量是在增加，造成可用的蒸發潛熱減少，故皿蒸發量減少。換言之，皿蒸發量並不能正確反應實際的蒸發散量。而 Rayner (2007) 認為風速逐年下降的現象導致皿蒸發量減少。

中央氣象局在臺灣所屬的氣象觀測站皆以蒸發皿監測各地的蒸發量，早期採用直徑 20 cm 的蒸發皿，但自 1973 年起逐步改用世界氣象組織之 A 型陸地蒸發皿量測蒸發量。A 型蒸發皿為直徑 120.7 公分，以鍍鋅金屬所製成之圓形水槽，皿外緣高為 25 公分。初始水深為 20 公分，藉由每日量測水位變化計算日蒸發量。中央氣象局自 1997 年之後，不再使用口徑 20 cm 的蒸發皿，全面使用 A 型蒸發皿。臺灣各地的水庫管理單位及農業試驗所亦採用 A 型蒸發皿監測當地的蒸發量。

影響 A 型蒸發皿蒸發量的主要因素有風速、濕度、溫度及淨輻射量 (Net radiation) 等因素 (Doorenbos and Pruitt, 1977; Cuenca, 1989; 1998; Allen et al., 1998; Grismer et al., 2002)。淨輻射量的多

寡直接影響水溫的高低，而飽和蒸氣壓為溫度的函數，所以進而影響蒸氣壓差 (Vapor Pressure Deficit, VPD)，所以影響蒸發量並非單一因子所控制的。Chu et al. (2010)利用風洞實驗研究風速對皿蒸發量的影響，推導出一個適用於 Penman-Monteith 公式的風速函數。Chu et al. (2012)發現當風速大於 7.0 m/s，會造成 A 型蒸發皿內的水濺出皿外，且濺出量大於蒸發量許多，亦即會導致高風速時的蒸發量被高估。

因為 A 型蒸發皿曝露在空氣中吸收太陽輻射熱能，故一般蒸發量測值往往較實際蒸發量高，估計實際蒸發量時必須乘以一個皿蒸發係數加以校正，一般約在 0.6~0.95，美國採用平均值 0.71 (Dingman, 2002)。但中央氣象局的氣象觀測站為防止周圍輻射，將 A 型蒸發皿外層塗白，內部保留不塗色，惟部分觀測站的 A 型蒸發皿內外雙層皆塗白。世界其他國家，如美國、澳洲、英國等國的 A 型蒸發皿皆如世界氣象組織(WMO, 2008)所建議之保留其原本的金屬顏色。而臺灣農業試驗單位在各地的 A 型蒸發皿則不一致，譬如臺南學甲農場的 A 型蒸發皿為不上漆的金屬顏色，而桃園中壢農業工程研究中心的蒸發皿表面則塗上白漆。

因為蒸發皿的顏色會影響蒸發皿所接受的淨輻射量及蒸發量，但其影響的蒸發量為何目前無相關研究。而臺灣不同單位的蒸發皿顏色並未統一，皿係數可能有所不同，導致無法比較其觀測之蒸發量，

或比較臺灣和其他國家的蒸發量長期變化趨勢，會因為蒸發皿的顏色不同(接受的淨輻射量亦不同)而無從分析比較，故實有必要瞭解蒸發皿的顏色對觀測蒸發量的影響範圍。本研究便是以現地觀測實驗來比較其差異性，希望能釐清以上疑點。

二、實驗方法

本研究的現地實驗設置於財團法人農業工程研究中心(位於中壢)的氣象觀測坪(24°59'10" N, 121°13'55" E, 海拔130公尺)內進行觀測，量測一整年數據來進行結果分析比較。見圖1，觀測坪內分別設置兩個標準的A型金屬蒸發皿，一個漆上白漆，另一個未上漆保持原來金屬色 (galvanized metal)，而周圍為短草皮(約5~10公分高)的草地。兩個蒸發皿皆遵照世界氣象組織(WMO, 2008)所建議之規定，放置於木棧平板上。觀測時間從2012年9月開始記錄數據，至2013年8月。

氣象觀測坪的風速、降雨量、溫度、相對濕度、淨輻射量及兩個蒸發皿的水位、水溫及上方的淨輻射量，以每小時一次的方式來記錄。兩個蒸發皿內的水位利用同一型的浮球式水位計 (Novalynx 255-100, Campbell Scientific Inc.)量測，風速是由螺旋槳式風速計 (05103, R.M. Young Co.)架設於離地面4.8公尺處量測風速，共用三支淨輻射計(Q7-1, Campbell Scientific Inc.)，分別架設於皿上方離初始水面0.66公尺處量測蒸發皿的淨輻射量

(Net radiation)以及草地上(離地面1.8公尺)的淨輻射量。並使用溫濕度計(CS500, Campbell Scientific Inc.)同時量測離地面2公尺處空氣溫度和相對溼度,水溫利用熱電偶式感溫棒(CT-108-T-3.2/100-W3M, Champion tech Co.)量測。白色皿、金屬皿與草地的反照率(albedo)以反照率計

(LP-PYRA05, Delta Ohm.)量測。所有氣象資料參數使用資料擷取器(CR10X, Campbell Scientific Inc.)紀錄,資料擷取器可將上述各氣象儀器所輸出之電壓訊號轉換成電腦可判讀之數位訊號,以利訊號之儲存及分析。



圖 1. 農業工程研究中心觀測坪之照片

Figure 1. Photograph of the experimental setup.

分析蒸發量時,先依據中央氣象局之定義,將降雨日(單日降雨量大於 0.1 mm)及清理維護日的資料排除之後,挑選出可分析的蒸發皿資料,由每日皿內水位變化量計算該日的蒸發量。再由各月可分析資料求得各月的平均日蒸發量,單位為 [mm/day]。而由各月的平均日蒸發量可計

算年平均之日蒸發量,再乘上 365 天可得表 1 所列之年總蒸發量,單位為 [mm/year]。其餘氣象資料亦是將降雨日的資料排除,再計算每日平均風速、溫度、濕度、淨輻射量及反照率。飽和蒸氣壓 e_s 和空氣中實際水汽蒸氣壓 e_a 的差值稱為蒸氣壓差(Vapor Pressure Deficit, VPD) :

$$VPD = e_s - e_a \quad (1)$$

本研究利用氣溫代入Raudkivi (1979)所建議的經驗公式計算水氣的飽和蒸氣壓(Saturation vapor pressure)：

$$e_s = 0.6105 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3+T}\right) \quad (2)$$

式中溫度 T 的單位為[°C]，蒸氣壓的單位為[kPa]。

三、結果分析

農工中心氣象觀測坪的基本氣象資料如表 1 所列，年平均氣溫 22.2 °C，相對濕度 74.5%，降雨量 2370 mm year⁻¹，風速(離地 4.8 公尺) 1.04 m/s。年總蒸發量：白色皿為 1041 mm year⁻¹，金屬皿為 1392 mm year⁻¹，亦即兩者一年的蒸發量可差 351 mm year⁻¹，白色皿年蒸發量約為金屬皿年蒸發量的 75%。表 2 列出本研究觀測期間各月份之降雨日(Rainfall day)與分析樣本數(Selected day)，維修日(Maintenance day)為儀器故障之日數。四月及五月因逢雨季，可分析之資料(無降雨日)筆數較少。圖 2 為各月平均風速的變化圖，風速在 0.8 m/s ~ 1.3 m/s 之間變化。冬季時，東北季風的吹拂下的風速較夏季略大。但控制蒸發的因素甚多，在此低風速下，風速應該不是主導蒸發的主要因素。圖 3 為各月平均氣溫與皿內水溫的變化圖，皿內水溫因為儀器問題，只有從今年一月開始才有完整資料。冬季時(一、二月)，水溫大於氣溫。四月之後，氣溫大於水溫。且此圖顯示一、二、三月的金屬皿內的水溫大於白

色蒸發皿的水溫，但四月之後，兩個皿的水溫差異不大。

圖 4 為各月蒸氣壓差(VPD)的變化圖，蒸氣壓差越大，表示空氣越乾燥，則蒸發量越大。由此圖可看出冬季時蒸氣壓差小，夏季時蒸氣壓差大。淨輻射量是控制蒸發量的另一個主要因素，淨輻射量又與物體的反照率有關。反照率高，則物體吸收的輻射量少。由反照率計量得之平均反照率分別為：白色皿 19.5%；金屬皿 16.2%；草地 18.8%。而圖 5 為蒸發皿的月平均淨輻射量變化圖，可看出：金屬蒸發皿所吸收的淨輻射量高於白色蒸發皿的淨輻射量，金屬皿的年淨輻射量平均為白色蒸發皿的 1.17 倍，且夏季時淨輻射量大於冬季的淨輻射量。四月及五月因逢雨季，可分析之淨輻射資料(無降雨日)筆數較少。且即使為無降雨日，亦為陰天，其太陽輻射強度較弱，故兩者的淨輻射量差異不大。

圖 6 為各月量測得之蒸發量變化圖，由此圖可知：每月金屬皿的蒸發量都大於白色皿，且夏季的蒸發量大於冬季的蒸發量。圖 7 為蒸發皿的淨輻射量與蒸發量關係圖，實心符號代表金屬皿的資料，空心符號則代表白色皿的數據。此圖顯示蒸發皿的蒸發量正比於淨輻射量，而在相同風速、氣溫及濕度狀況下，兩個蒸發皿主要的差異就是其顏色不同所造成的淨輻射量不同，這又導致金屬皿的蒸發量高於白色蒸發皿的蒸發量。

表 1. 農業工程研究中心觀測坪於本研究觀測期間之基本氣象資料
 Table 1. The basic meteorological parameters of the site during the observation.

Annual Mean	Metal Pan	White pan
Evaporation rate (mm year ⁻¹)	1392	1041
Average albedo	16.2%	19.5%
Rainfall (mm year ⁻¹)	2370	
Air temperature (°C)	22.2	
Relative Humidity (%)	74.5	
Wind speed (m/s)	1.04	

表 2. 農業工程研究中心觀測坪於本研究觀測期間之降雨日與分析樣本數
 Table 2. Rainfall days and selected days of the site during the observation.

Month	Rainfall days	Maintenance days	Selected days
Sep 2012	9	11	10
Oct, 2012	4	6	21
Nov, 2012	14	6	10
Dec, 2012	17	3	11
Jan, 2013	15	11	5
Feb, 2013	13	11	4
Mar, 2013	17	5	9
Apr, 2013	23	4	3
May, 2013	17	8	6
Jun, 2013	7	11	12
Jul, 2013	10	8	13
Aug, 2013	15	6	10

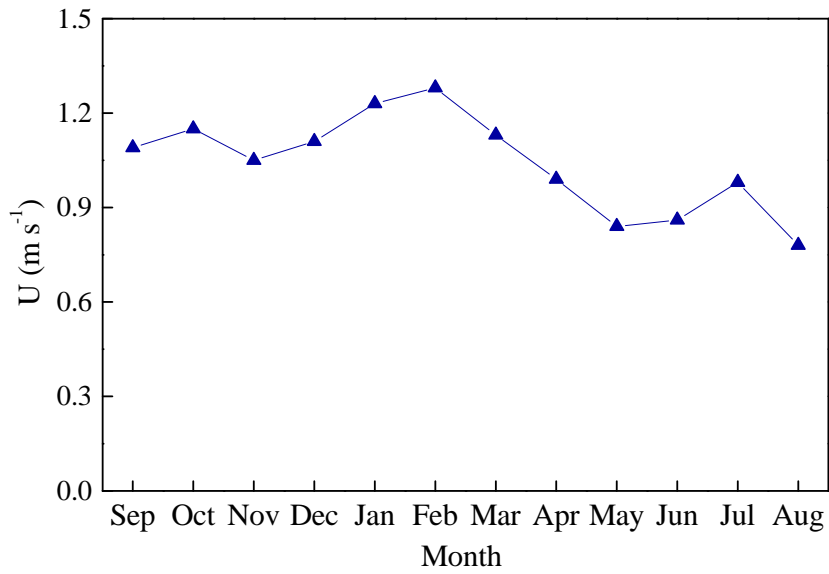


圖 2. 各月平均風速的變化圖

Figure 2. The variation of monthly averaged wind speed.

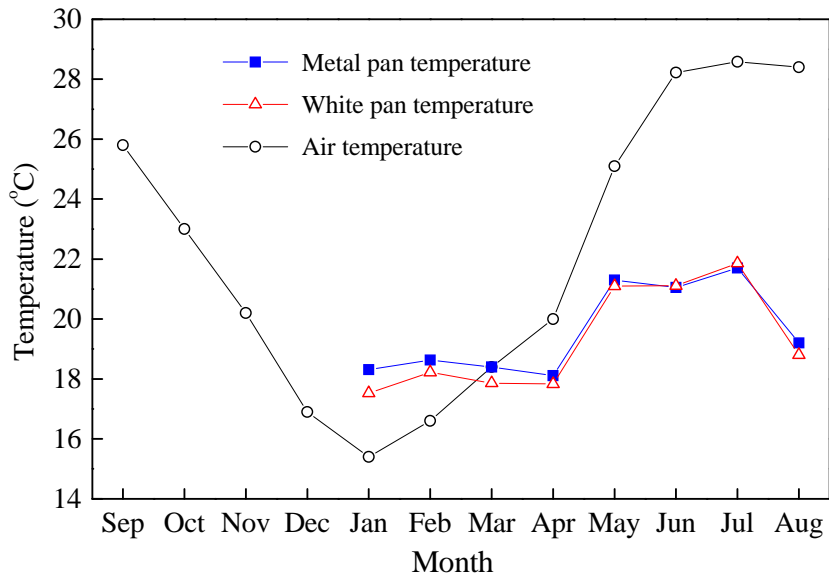


圖 3. 各月平均氣溫與皿內水溫的變化圖

Figure 3. The variation of air and water temperatures.

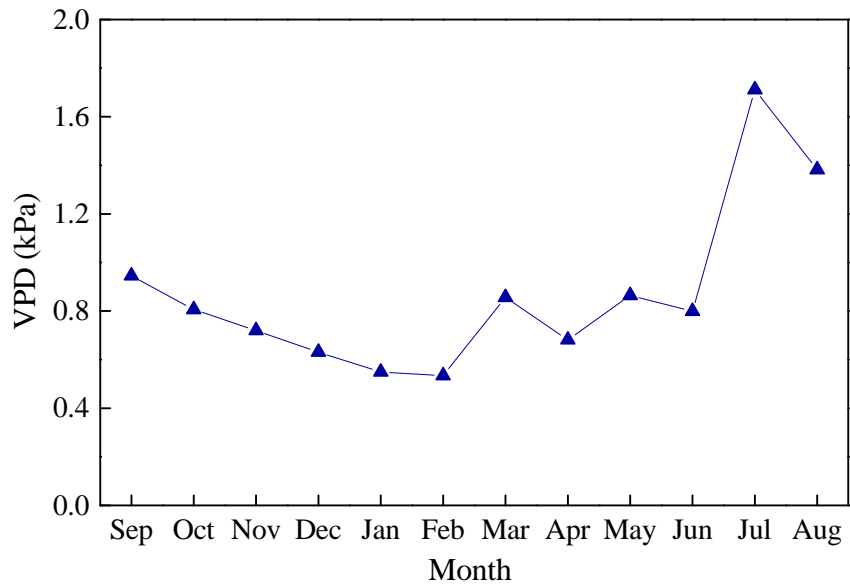


圖 4. 各月蒸氣壓差(VPD)的變化圖
Figure 4. The variation of vapor pressure deficit.

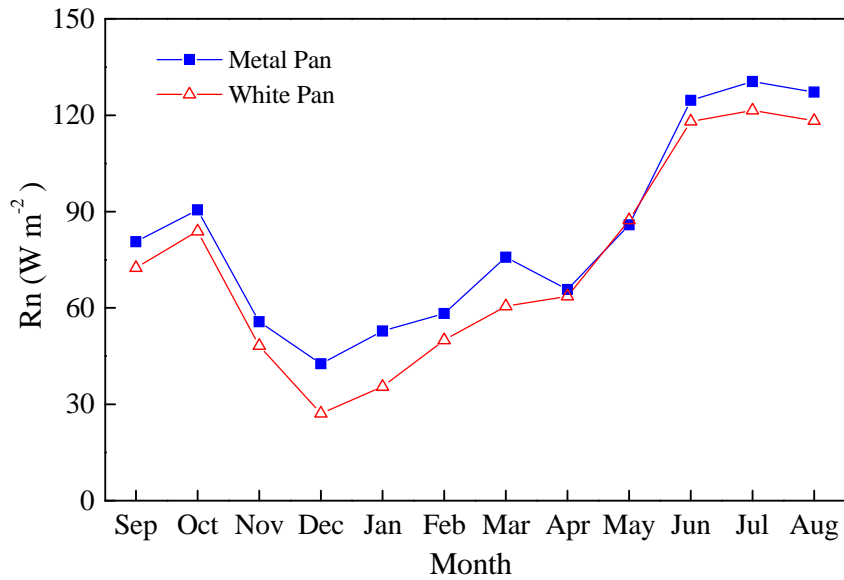


圖 5. 蒸發皿各月份的平均淨輻射量變化圖
Figure 5. Variation of the net radiation of the evaporation pans.

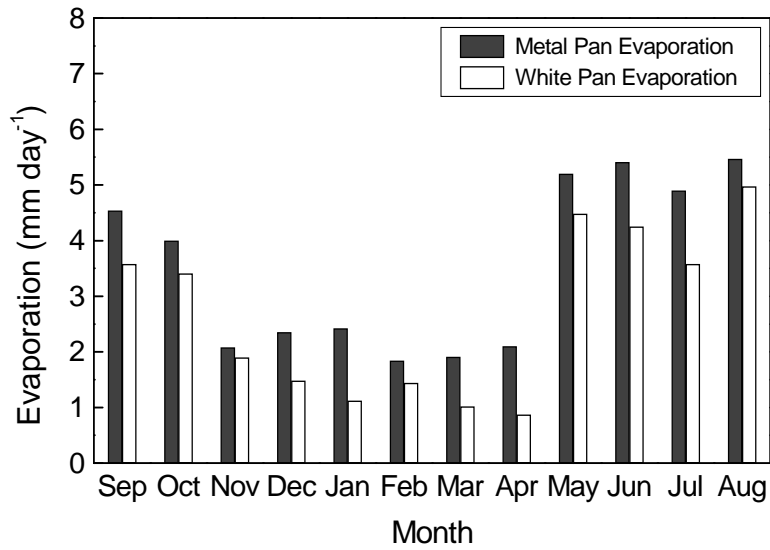


圖 6. 各月蒸發皿的蒸發量變化圖

Figure 6. The monthly averaged evaporation rates of metal pan and white pan.

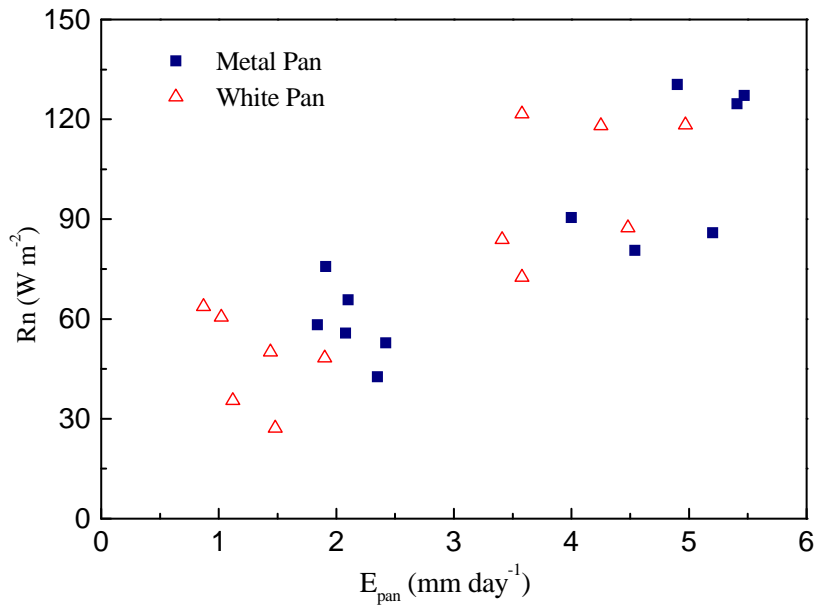


圖 7. 蒸發量與淨輻射量的關係圖

Figure 7. Relationship between pan evaporation rate and net radiation.

四、結論

蒸發散即是水文循環中重要因子之一，蒸發量的監測最直接的方法就是利用蒸發皿進行現地觀測，而最常採用的蒸發皿則是世界氣象組織之 A 型陸地蒸發皿量測蒸發量。但臺灣不同單位使用的蒸發皿顏色並未統一，導致無法比較其觀測之蒸發量，或無法比較臺灣和其他國家的蒸發量的長期變化趨勢。本研究以現地實驗量測 2012~2013 年未上漆之金屬蒸發皿與上白色漆之金屬蒸發皿。結果顯示：在相同風速、氣溫及濕度狀況下，白色皿年蒸發量為 $1041 \text{ mm year}^{-1}$ ，金屬皿為 $1392 \text{ mm year}^{-1}$ ，白色皿年蒸發量約為金屬皿年蒸發量的 75%。唯本研究觀測時間只有一年，各月份之蒸發量資料因每月降雨天數不一，尤其雨季時的可分析資料（無降雨日）偏少，屬於定性驗證。若要求得各月份淨輻射與蒸發量之定量關係，則需要累積長期的觀測資料。

實驗結果顯示蒸發皿的顏色會影響蒸發皿所接受的輻射量，因為白色蒸發皿的反照率(albedo)較高，導致白色蒸發皿所吸收的淨輻射量低於金屬皿的淨輻射量。因而造成白色蒸發皿的蒸發量低於金屬皿的蒸發量，且兩者之間有明顯的差異。亦即使用上白漆的 A 型蒸發皿量測之蒸發量會造成蒸發散量的低估，進而影響水資源規劃與經營，且會使得國內蒸發量的長期變化趨勢無法與國外蒸發量的趨勢相比較。若使用國外研究由金屬皿蒸發量所得之作物需水量係數計算農田灌溉

量時，必須依據蒸發皿的顏色來修正灌溉用水量的計算。

五、誌謝

本論文研究期間承蒙財團法人農業工程研究中心工程組與資源組於實驗量測期間協助，特此致謝。

六、參考文獻

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements", FAO Irrigation and drainage paper, Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Brutsaert, W., 1982: *Evaporation into the Atmosphere*, D. Reidel Publishing Co., p.299.
- Brutsaert, W., and M.B. Parlange, 1998: "Hydrologic cycle explains the evaporation paradox", *Nature*, 396, 30.
- Brutsaert, W., 2006: "Indications of increasing land surface evaporation during the second half of the 20th century", *Geophysical Research Letters*, 33, L20403.
- Chattopadhyay N., and M. Hulme, 1997: "Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change", *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 55-73.
- Chu, C.-R., C.I. Hsieh, S.Y. Wu, and N.G.

- Phillips, 2009: "Transient response of sap flow to wind speed", *Journal of Experimental Botany*, 60 (1), 249-255.
- Chu, C.-R., M.-H. Li, Y.-Y. Chen, and Y.-H. Kuo, 2010: "A wind tunnel experiment on the evaporation rate of Class A evaporation pan", *Journal of Hydrology*, 381 (3-4), 221-224.
- Chu C.-R., M.-H. Li, Y.-F. Chang, T.-C. Liu, and Y.-Y. Chen, 2012: "Wind-induced splash in class A evaporation pan", *Journal of Geophysical Research, Atmosphere* 117, D11101, doi:10.1029/2011JD016848.
- Cuenca, R.H., 1989: *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p.552.
- Dingman, S.L. 2002: *Physical Hydrology*, 2nd edition, Prentice Hall Inc., p.646
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, 1977: *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Grismer, M.E., M. Orang, R. Snyder, and R. Matyac, 2002: "Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods", *J. of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 128(3), 180-184.
- Lawrimore, J.H. and T.C. Peterson, 2000: "Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States" *Journal of Hydrometeorology*, Vol.1, 6, pp.543-546
- Linsley, R.K. M.A. Kohler, and J.L.H. Paulhus, 1975: *Hydrology for Engineers*, 2nd edition, McGraw-Hill Inc., New York, NY, p.482.
- Liu, B., M. Xu, M. Henderson, and W. Gong, 2004: "A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000", *J. of Geophysical Research*, Vol.109,
- Raudkivi, A.J., 1998: *Loose Boundary Hydraulics*, A.A. Balkema, Rotterdam, p.496
- Roderick, M., and G. D. Farquhar, 2002: "The causes of decreased pan evaporation over the past 50 years", *Science*, 298, 1410-1411.
- Roderick, M. and G.D. Farquhar, 2004: "Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002", *International Journal of Climatology*, 24, 1077-1090.
- Rayner, D.P., 2007: "Wind run changes: The dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia", *Journal of Climate*, 20, 3379-3394.
- Peterson, T.C., V.S. Golubev, and P.Y. Groisman, 1995: "Evaporation losing its strength", *Nature*, 377, 687-688.
- Stanhill, G., 2002: "Is the Class A

evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements?”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(3-4), 233-236.

Tebakari, T., J. Yoshitani, and C. Suvanpimoi, 2005: “Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand”, *J. Hydrol. Eng., ASCE*, 10 (3), 205-215.

World Meteorological Organization, 2008: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Sixth edition, WMO-No. 8, 7th edition, Geneva.

經濟部水利署網頁，2011：
<http://www.wra.gov.tw/>

Influence of the Color of the Class A Evaporation Pan on Evaporation Rate

Chia-Ren Chu, Chien-Han Chen, Sheng-Shiung Li, Jih-Shun Liu
Department of Civil Engineering, National Central University, Taiwan

ABSTRACT

Evaporation rate is one of the essential factors in the hydrologic cycle, and Class A evaporation pan is the most widely used evaporimeter to measure the evaporation rate. In Taiwan, the Central Weather Bureau, agricultural research institutes and reservoir management units all use Class A evaporation pans to measure local evaporation rates. However, the evaporation pans used by the Central Weather Bureau were painted in white color, which is different from the suggestion by the World Meteorological Organization. This study compared the evaporation rates of two Class A evaporation pans, one in original galvanized metal color and the other in white color, placed in the same weather station during 2012~2013. The experimental results revealed that, because the net radiation of white pan is smaller than that of metal pan, the annual evaporation rate of the white pan ($1041 \text{ mm year}^{-1}$) is about 75% of the evaporation rate of the metal pan ($1392 \text{ mm year}^{-1}$).

Key words: Class A evaporation pan, evaporation rate, net radiation, albedo.

