

台灣長期皿蒸發量趨勢分析及蒸發互補關係初探

Long-term Pan Evaporation Trend and Preliminary Investigation of Evaporation Complementarity in Taiwan

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
副教授

陳 憲 宗*

Shien-Tsung Chen

雲林科技大學
水土資源及防災科技研究中心
助理研究員

李 奕 欣

Yi-Hsin Li

摘 要

隨著全球暖化，蒸發量預期會隨溫度上升而增加，但全球許多區域的皿蒸發量卻呈現下降的趨勢。台灣近二十年的短期皿蒸發量亦有下降趨勢，然因蒸發觀測儀器的更換，以致缺少具一致性的長期蒸發資料可供分析長期蒸發趨勢。本研究收集中央氣象局超過百年的長期蒸發及氣象觀測資料，分析早期 20 公分蒸發皿與當代 A 型蒸發皿觀測資料的統計特性，以及蒸發量與氣象因子的相關性。本研究採用支撐向量機發展蒸發資料重建模式，以 20 公分皿蒸發資料及具最高相關性的氣溫作為輸入變量，轉換為早期的 A 型皿蒸發重建資料，得到具一致性的長期皿蒸發資料；並利用 Mann-Whitney-Pettitt 改變點檢測法分析台灣長期皿蒸發量的趨勢，得知台北、台中、宜蘭、花蓮和高雄的皿蒸發趨勢為增加，嘉義、台南、恆春、台東的皿蒸發趨勢為下降；整體而言，除高雄外，長期皿蒸發趨勢有北增南減的現象。本研究初步探索蒸發互補理論，發現台灣的皿蒸發資料有呈現蒸發互補關係的跡象，但有待後續研究進一步釐清與探討。

關鍵詞：皿蒸發量，趨勢分析，蒸發互補理論。

ABSTRACT

Under global warming, the evaporation is expected to increase as the temperature increases. However, pan evaporation data over the past 50 years show a decreasing trend in many places. This has recently been discussed, and is termed the “pan evaporation

*通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授，40724 台中市西屯區文華路 100 號，stchen@fcu.edu.tw

paradox.” Pan observations during recent two decades in Taiwan also exhibit a decreasing trend. Although long-term pan evaporation data are available and the recording periods of some stations are more than 100 years, no long-term trend analysis of pan evaporation data has been studied in Taiwan. This is because that long-term pan evaporation data in Taiwan are not homogeneous in data properties. This inhomogeneity in long-term data is due to the use of different evaporation pans in the early time (20-cm pan) and the modern time (Class A pan). The observations from the 20-cm pan are usually greater than those from the Class A pan in the magnitude of as large as 50 mm/month in Taiwan. This study developed a data reconstruction model by using support vector machines to homogenize the long-term evaporation data from the two evaporation pans. Mann-Whitney-Pettitt method was used to detect the trend of long-term pan evaporation data. Analytical results reveal that, except for one station, the long-term pan evaporation trend in Taiwan exhibits an increasing trend in the north and a decreasing trend in the south. Preliminary analysis of the evaporation complementary relationship in Taiwan was also discussion. Using the precipitation as a variable to explain the environmental wetness, the evaporation complementary relationship can be demonstrated in Taiwan.

Keywords: Pan evaporation, Trend analysis, Complementary relationship.

一、前 言

全球平均溫度自十九世紀末開始有上升趨勢，自 1970 年代起，溫度上升趨勢更為明顯。全球溫度增高預期會使地表水體的蒸發增加，但有些區域的蒸發皿觀測資料，卻顯示蒸發量在最近半世紀來呈現下降的趨勢，此種溫度增加而蒸發量減少的現象，與一般認為蒸發量隨著全球暖化而增加的想法似有矛盾。為解釋此溫度增高而蒸發下降的現象，Bouchet (1963) 提出「蒸發互補理論 (evaporation complementary theory)」的說法，表示皿蒸發量的減少意味著實際蒸發量的增加。然而蒸發互補理論尚未能全面性地解釋各地的皿蒸發變化趨勢。

台灣近一、二十年的部分蒸發皿觀測資料亦顯示出血蒸發量有減少的現象，但台灣尚無長期皿蒸發趨勢的分析及探討，推測應與台灣蒸發觀測作業所採用的蒸發皿不同而造成蒸發資料缺乏一致性有關。台灣早期的蒸發觀測作業採用 20 公分口徑的蒸發皿，自 1973 年起逐步改用口徑約為 120 公分的 A 型蒸發皿，受蒸發皿金屬邊壁

效應的影響，20 公分蒸發皿的觀測資料明顯高於 A 型蒸發皿的觀測資料。因此為了解台灣長期的皿蒸發趨勢，需先解決長期皿蒸發資料不一致的問題。

本研究收集中央氣象局長期蒸發觀測資料，分析 20 公分皿蒸發資料與 A 型皿蒸發資料的特性，並探討蒸發與不同氣象因子的關聯，據以建立蒸發資料重建模式，得到符合 A 型蒸發皿觀測資料特性的長期蒸發重建資料。本研究再利用改變點分析的統計方法，檢定各測站的長期皿蒸發趨勢，得到台灣長期皿蒸發趨勢具北增南減的整體趨向。另針對蒸發互補理論是否適用於描述台灣的蒸發變化趨勢，本研究亦進行蒸發互補關係的初步探索。

本文後續章節組織簡介如下：第二章回顧國內、外關於蒸發趨勢研究、蒸發趨勢影響因素及蒸發互補理論的重要文獻。第三章為研究資料及理論方法，第 3.1 節介紹本研究使用的皿蒸發觀測資料，第 3.2 節介紹長期皿蒸發資料重建模式，第 3.3 節描述及推導蒸發互補理論。第四章為蒸發趨勢的分析內容與結果，包含：皿蒸發資

料的統計特性分析、皿蒸發資料重建、長期皿蒸發量趨勢分析。第五章為台灣蒸發互補現象的初步探索，第六章摘錄本文結論。另在附錄介紹蒸發資料重建模式所用的支撐向量機理論以及長期蒸發趨勢分析所用的改變點檢測方法。

二、文獻回顧

2.1 台灣皿蒸發趨勢分析

台灣有關蒸發的研究多為潛勢蒸發散量及作物需水量的推估，關於蒸發變遷趨勢的分析僅有少數研究，針對台灣近年短期皿蒸發量趨勢的相關研究有：朱佳仁(2007, 2008)分析 1990 至 2004 年中央氣象局 20 個氣象站的逐月皿蒸發資料，結果顯示多數測站的皿蒸發量自 1995 年後有逐年下降的趨勢。張格綸(2007)使用 Penman-Monteith 法計算蒸發量並與中央氣象局 20 個氣象站 1990 至 2004 年皿蒸發資料進行比較，結果發現測站平均皿蒸發量有逐年下降的趨勢，而 Penman-Monteith 法計算的蒸發量則呈現相對穩定的趨勢。童慶斌、李明旭(2010)分析中央氣象局嘉義、台南、高雄、恆春、阿里山及玉山測站的皿蒸發趨勢，各測站資料期間不一，分析結果顯示在 1980 至 1999 年皿蒸發量大致呈現下降趨勢，但恆春站呈現上升趨勢，而 2000 至 2008 年各測站的皿蒸發量皆呈現下降趨勢。上述研究顯示台灣近年短期的皿蒸發量有下降趨勢，而這些研究係針對近年短期(約 15 至 20 年)的趨勢進行探討，本研究乃針對台灣長期皿蒸發趨勢進行長期、全面性的分析。

2.2 國際皿蒸發趨勢分析

全球溫度增高預期會使地表水體的蒸發量增加，但 Peterson *et al.* (1995)提出美國及蘇聯的皿蒸發量在 1950 至 1990 年代有下降的趨勢後，許多研究陸續指出世界不同地方的皿蒸發量有下降趨勢，例如：Liu *et al.* (2004)指出中國於 1955 至 2000 年的皿蒸發量平均每年下降約 3 毫米，Shen *et al.* (2010)同樣發現中國在過去 50 年的皿蒸發量呈現下降趨勢；類似的皿蒸發下降趨勢亦在各地顯現，例如：中國的青藏高原(Zhang

et al., 2007)、黃河流域(Qiu *et al.*, 2003)及華北平原(Guo and Ren, 2005)、泰國(Tebakari *et al.*, 2005)、印度(Chattopadhyay and Hulme, 1997)、委內瑞拉(Quintana-Gomez, 1998)、義大利(Moonen *et al.*, 2002)、波多黎各(Harmsen *et al.*, 2004)、澳洲(Roderick and Farquhar, 2004)、土耳其(Ozdogan and Salvucci, 2004)、紐西蘭(Roderick and Farquhar, 2005)、加拿大(Burn and Hesch, 2007)等地。

然而皿蒸發觀測資料的下降趨勢並非全球性的，有些研究也提到皿蒸發資料呈現上升的趨勢，例如：Cohen *et al.* (2002)指出以色列中部平原的皿蒸發資料在 1964 至 1998 年有增加的趨勢；Xu *et al.* (2005)指出 1971 至 2000 年西藏高原、中國中部、東南部的潛勢蒸發量與皿蒸發量有增加趨勢；在 Harmsen *et al.* (2004)分析波多黎各皿蒸發趨勢的研究中，指出波多黎各有二測站的皿蒸發量為增加趨勢。Fu *et al.* (2009)對於蒸發皿觀測資料的增減趨勢有回顧性的討論。本研究回顧相關文獻，整理世界各地皿蒸發觀測資料的增減趨勢，列於表 1；由表中可知，世界各地的皿蒸發趨勢多為下降，但仍有少數地區的皿蒸發趨勢為上升。

2.3 蒸發趨勢與氣象因子關連探討

許多文獻探討皿蒸發變化趨勢與氣象因子的關係，試圖釐清皿蒸發趨勢變化的影響因素，例如：Zuo *et al.* (2005)在研究中國的氣候變化趨勢中，發現皿蒸發量與相對濕度有高度的相關性；Liu *et al.* (2006)得出中國的皿蒸發量與日溫差及風速有高度相關的結果。Shen *et al.* (2010)提出中國西北地區和長江中下游流域以南地區的雲量和氣溶膠增加，使太陽輻射減少，造成皿蒸發量減少。Guo *et al.* (2005)於黃淮海平原中亦得出類似的結論，認為風速和太陽輻射是造成蒸發皿蒸發量減少的主要因素。

Liu *et al.* (2010)指出中國乾旱地區在過去 50 年的皿蒸發量減少是因降水量增加與風速降低，且空氣中的水汽和氣溶膠增加，進而減少太陽輻射，導致皿蒸發量減少；Roderick and

表 1 世界各地皿蒸發觀測趨勢彙整

區域	資料分析年限	皿蒸發趨勢	文獻來源
台灣日月潭	1990-2004	減少	朱佳仁(2007)
台灣	1990-2004	減少	張格綸(2007)
台灣	1990-2004	減少	朱佳仁(2008)
美國	約 1948-1993	減少	Peterson <i>et al.</i> (1995)
美國東部	1957-1998	增加	Golubev <i>et al.</i> (2001)
美國中西部	1957-1998	減少	Golubev <i>et al.</i> (2001)
美國	1950-2002	增、減均有	Hobbins <i>et al.</i> (2004)
俄羅斯	1951-1990	減少	Peterson <i>et al.</i> (1995)
俄羅斯	1951-1990	減少	Golubev <i>et al.</i> (2001)
中國華北平原	1950-2000	減少	Guo and Ren (2005)
中國	1955-2000	減少	Liu <i>et al.</i> (2004)
中國黃河流域	1960-2000	減少	Qiu <i>et al.</i> (2003)
中國中南部	1971-2000	增加	Xu <i>et al.</i> (2005)
中國西藏高原	1971-2000	增加	Xu <i>et al.</i> (2005)
中國	1955-2001	減少	Shen <i>et al.</i> (2010)
中國青藏高原	1966-2003	減少	Zhang <i>et al.</i> (2007)
印度	1961-1992	減少	Chattopadhyay and Hulme (1997)
泰國	1982-2000	減少	Tebakari <i>et al.</i> (2005)
以色列	1964-1998	增加	Cohen <i>et al.</i> (2002)
委內瑞拉	-	減少	Quintana-Gomez (1998)
波多黎各	-	增、減均有	Harmsen <i>et al.</i> (2004)
英格蘭及蘇格蘭	1885-1968	增、減均有	Stanhill and Möller (2008)
愛爾蘭	1963-2005	增、減均有	Stanhill and Möller (2008)
義大利	-	減少	Moonen <i>et al.</i> (2002)
澳洲	1970-2002	減少	Roderick and Farquhar (2004)
紐西蘭	1968-2003	減少	Roderick and Farquhar (2005)

Farquhar (2002)和 Stanhill and Cohen (2001)表示皿蒸發量的減少可能與全球黯化的因素有關，指出蒸發的減少乃因雲量及懸浮微粒增加，造成太陽輻射或日照減少；Roderick *et al.* (2007)則指出澳洲的太陽輻射對皿蒸發量的變化影響並不顯著，大部分皿蒸發量減少是由於風速下降所致。

Peterson *et al.* (1995)、Chattopadhyay and Hulme (1997)、Easterling *et al.* (1997)和 Dai *et al.* (1999)指出皿蒸發的降低趨勢與日溫差的減少有顯著關係；Ramanathan *et al.* (2001)指出太陽輻射減少的起因為雲覆蓋及懸浮微粒的增加，因而減少入射陽光及減少晚上地表長波輻射的淨損失，進而減弱日周循環(diurnal cycle)，造成日溫差的減少；另外 Liu *et al.* (2009)亦提出日溫差減少主因是最低溫度增加的速度比最高溫度還

快，此說法也與氣候變暖的現象相符合。

蒸氣壓差愈大，蒸發的潛勢也愈大，因此蒸氣壓差與環境濕度的變化也會影響皿蒸發的變化。Linacre (1993, 1994)指出皿蒸發量的改變主要受淨輻射量及蒸氣壓差的影響，風速對皿蒸發量的變化趨勢較無影響，而 Brutsaert and Parlange (1998)、Lawrimore and Peterson (2000)、Golubev *et al.* (2001)提出皿蒸發減少趨勢與蒸氣壓差有關的說法，由於氣候變遷下環境溫度增加，蒸發皿周圍環境之實際蒸發量增加，當蒸發皿周圍環境之蒸發量提高，蒸發皿上方空氣趨於溫度較低且濕度較高，進而降低蒸發皿的蒸發量，例如 Golubev *et al.* (2001)與 Szilagyi *et al.* (2001)指出美國與蘇聯的實際蒸發量為增加；但此說法成立的前提為僅在較乾燥、水分供給受限制的環境

下。然而 Szilagyi *et al.* (2001) 的研究指出美國的皿蒸發量有下降趨勢，但蒸氣壓差 50 年來大致維持固定；Liu *et al.* (2004) 亦指出皿蒸發量減少之主因並非蒸氣壓差所引起。

綜合上述，皿蒸發量減少與降水量和雲量增加，以及日溫差、日照時數、太陽輻射和風速減少關係較為密切。然而目前解釋皿蒸發變化的一些理論，均存在特定條件的限制，且僅能解釋部分地區及季節的變化，無法提供全面性、物理性的理論基礎，故需要更多研究以徹底了解全球暖化下的蒸發散趨勢。

2.4 皿蒸發悖論與蒸發互補關係

前述一些學者發現許多地區的皿蒸發量有下降的趨勢，這與全球暖化情況下溫度上升導致蒸發量增加的一般觀念相互矛盾。此種溫度增加、皿蒸發量減少的現象，稱為「皿蒸發悖論(pan evaporation paradox)」。為了解釋這種現象，Bouchet (1963) 提出皿蒸發量與實際蒸發量之間存在「蒸發互補」關係的說法；Brutsaert and Parlange (1998) 以蒸發互補的觀點，指出皿蒸發觀測量的下降趨勢，其實是實際蒸發量的增加所致。皿蒸發與實際蒸發的互補關係已在許多區域被證實，例如：美國(Lawrimore and Peterson, 2000；Hobbins *et al.*, 2004；Walter *et al.*, 2004)、中國的黃河流域(Liu *et al.*, 2006)、澳洲(Zhang *et al.*, 2004)、土耳其東南部(Ozdogan and Salvucci, 2004)；然而，蒸發互補理論卻無法解釋所有區域的皿蒸發與實際蒸發之關係，例如：以色列(Cohen *et al.*, 2002)、泰國(Tebakari *et al.*, 2005)。本研究亦於後續章節探討台灣是否存在蒸發互補關係的現象。

三、研究資料及理論方法

3.1 蒸發皿及蒸發觀測資料

蒸發量觀測為定時量測蒸發皿內的水位變化，若有降雨則需扣除降雨量，再換算為蒸發量。台灣的現代化氣象觀測作業始自十九世紀末，最早開始蒸發觀測的幾個測站為台北(1897年1月)、台中(1899年11月)、台南(1900年1



圖 1 中央氣象局台中氣象站 A 型蒸發皿

月)、恆春(1900年1月)、台東(1901年1月)、澎湖(1901年8月)等測站。台灣早期採用 20 公分口徑的蒸發皿進行蒸發觀測，自 1973 年起中央氣象局逐步改用世界氣象組織(World Meteorology Organization, WMO, 1966, 1976)建議的三種蒸發皿之一的美國 A 型蒸發皿(直徑為 120 公分，如圖 1)進行觀測，而 20 公分蒸發皿則在 1994 至 1997 年逐漸停止觀測。

因蒸發皿金屬邊緣會吸收太陽輻射能量，而導致高估了真實的水面蒸發量，故習慣上常將皿蒸發量乘上蒸發皿係數，用以代表地表環境水分充足時的潛勢蒸發量。由於 20 公分蒸發皿的口徑較 A 型蒸發皿為小，蒸發皿金屬體積相對於皿內水體積較大，故 20 公分蒸發皿觀測蒸發量高於真實水面蒸發量的效應，較 A 型蒸發皿來得大。因此，20 公分蒸發皿的觀測資料，數值上常較 A 型蒸發皿的觀測資料大上許多；台灣測站的觀測資料顯示，20 公分蒸發皿觀測之年蒸發量常可高於 A 型蒸發皿有 300 毫米以上，甚至有些測站年蒸發量的差異高達 600 毫米，因而造成長期蒸發觀測資料不一致的問題。

本研究收集中央氣象局各氣象站的長期月蒸發資料，包含早期的 20 公分蒸發皿觀測資料及後期的 A 型蒸發皿觀測資料。由於兩種蒸發皿的觀測資料存在差異，造成長期蒸發觀測資料不一致、無法直接銜接的問題，故無法直接用以分析長期蒸發變遷趨勢。因 20 公分蒸發皿與 A 型蒸發皿的觀測時間有所重疊，於是本研究利用此重疊期間的二種蒸發觀測資料，結合相關氣象因

表 2 蒸發資料使用期間統計表

站名	20 公分蒸發皿		A 型蒸發皿		資料重疊年數	重建資料年數
	資料使用期間	年數	資料使用期間	年數		
台北	1897~1994	98	1974~2013	40	21	117
台中	1900~1994	95	1974~2013	40	21	114
嘉義	1969~1994	26	1974~2013	40	21	45
台南	1900~1994	95	1976~2001	26	19	102
高雄	1932~1994	63	1974~2013	40	21	82
恆春	1900~1994	95	1974~2013	40	21	114
宜蘭	1937~1994	58	1974~2013	40	21	77
花蓮	1922~1994	73	1974~2013	40	21	92
台東	1901~1994	94	1974~2013	40	21	113

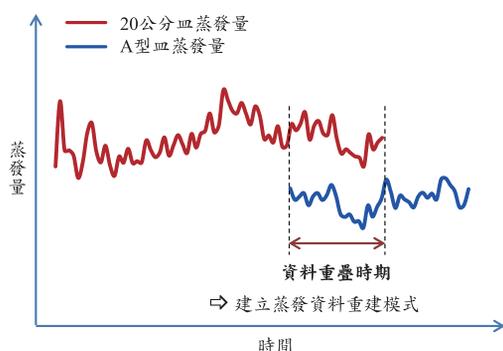


圖 2 蒸發資料觀測期間示意圖

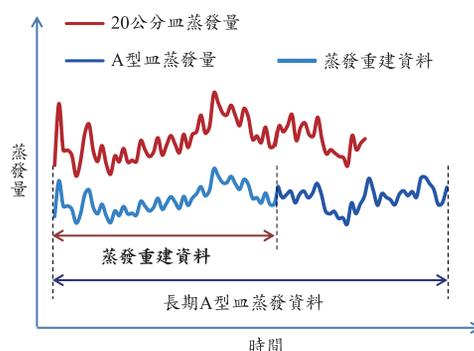


圖 3 蒸發資料重建期間示意圖

子建立資料重建模式(如圖 2 所示)，用以將 A 型蒸發皿資料往早期年代延伸，以推估符合 A 型蒸發皿觀測特性的蒸發重建資料，得到連續、具一致性的長期蒸發資料(如圖 3 所示)。

本研究檢視中央氣象局各氣象站的長期月蒸發資料，選擇具長期蒸發觀測資料的測站，並且二種蒸發皿具有較長的觀測重疊期間，才能有足夠的觀測資料建立皿蒸發資料重建模式；例如基隆測站雖然有近百年的蒸發觀測資料，但二種蒸發皿的觀測重疊期間僅有三年，並不足夠用來率定及驗證資料重建模式。本研究檢視及整理各測站逐月蒸發資料後，採用中央氣象局台北、台中、嘉義、台南、高雄、恆春、宜蘭、花蓮、台東等九個測站進行分析，測站位置如圖 4 所示，各站的逐月蒸發資料採用具完整年度的資料，即自一月起至十二月止，二種蒸發皿的觀測期間統計資料列於表 2。由表中資料可知，二種蒸發皿

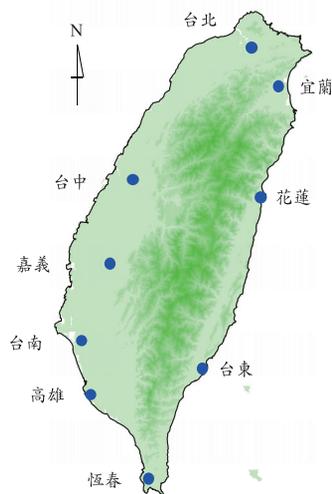


圖 4 測站位置圖

觀測重疊期間的資料年數，除台南站為 19 年外，其於測站均為 21 年；重建後可得的長期蒸發資

表 3 蒸發量與氣象因子相關性分析結果

測站	相關係數
氣溫	0.766
露點溫度	0.739
日照時數	0.722
水氣壓	0.710
水氣壓差	0.660
全天空日射量	0.655
日照率	0.560
降水量	0.154
海平面氣壓	-0.688
測站氣壓	-0.661
雲量	-0.360
風速	-0.146
相對濕度	-0.099

料年數，以嘉義站的 45 年最短，宜蘭站的 77 年次之，而台北、台中、台南、恆春、台東均可達百年以上的資料年數。

3.2 長期皿蒸發資料重建模式

本研究之蒸發資料重建作法為將早期 20 公分蒸發皿的觀測資料，轉換成與 A 型蒸發皿觀測資料特性相同的重建資料，如圖 3 所示，因此資料重建模式之輸出變量為 A 型皿蒸發資料，為使模式能有更佳的資料重建結果，輸入變量除須有 20 公分皿蒸發資料外，尚需考慮與蒸發具高度相關的氣象因子。

由於各氣象因子具完整觀測資料的時間不一，本研究整理各氣象因子與 20 公分皿及 A 型皿蒸發資料具有共同觀測的月份資料來計算相關係數，並以顯著水準 0.05 來檢視相關性的分析結果是否具統計顯著性。整體來說，大多數氣象因子與蒸發量的相關性有達到統計顯著性，僅相對濕度、風速、雲量等三個氣象因子在少部分測站未達統計顯著性；詳細結果可參考李奕欣 (20140 之論文。表 3 列出蒸發量與氣象因子相關性的整體分析結果，相關性較高的有氣溫、露點溫度、日照時數、水氣壓、海平面氣壓等氣象因子。

本研究採用支撐向量機 (support vector

machines, SVM)作為重建長期皿蒸發資料的模式，支撐向量機為 Vapnik (1995, 1998)所發展的機器學習理論方法，簡述於附錄。本研究依據前述的相關性分析結果，將氣溫、露點溫度、日照時數、水氣壓、海平面氣壓等列為支撐向量機資料重建模式之候選輸入變量，經初步測試並考量模式簡潔及觀測資料的完整性，本研究選用 20 公分皿蒸發資料及相關性最高的氣溫資料作為輸入變量，故長期皿蒸發資料重建模式可表示如下：

$$\hat{E}_{\text{Type-A}} = f_{\text{SVM}}(E_{20\text{cm}}, T) \dots\dots\dots (1)$$

其中， f_{SVM} 表示由支撐向量機所建立的蒸發資料重建模式， $\hat{E}_{\text{Type-A}}$ 為模式推估的 A 型皿的月蒸發量(mm)， $E_{20\text{cm}}$ 為 20 公分皿的月蒸發量(mm)， T 為月溫度(°C)。

3.3 蒸發互補理論

為了解釋前述溫度增加但皿蒸發量減少的「皿蒸發悖論」現象，Bouchet (1963)提出皿蒸發量與實際蒸發量之間存在蒸發互補關係的說法，指出皿蒸發量的下降意味著實際蒸發量的增加。本研究摘錄介紹蒸發互補關係的觀念及推導蒸發互補理論如下。

當地表環境水分充足時，可完全提供蒸發所需的水量，此時實際蒸發量 E_a 會等於潮濕環境下的潛勢蒸發量 E_w ，且與皿蒸發量 E_p 呈一固定關係，即

$$E_a = E_w = a \cdot E_p \dots\dots\dots (2)$$

式中， a 為蒸發皿係數，主要依據不同蒸發皿型式與區域而有不同的值，蒸發皿係數通常小於 1.0。

當地表水分不足以提供潛勢蒸發量所需時，此時實際蒸發量 E_a 會小於潛勢蒸發量 E_w ，且部分未能用於提供實際蒸發量的能量會造成顯熱通量(sensible heat flux)的增加，若將此顯熱通量增加量 ΔH 表示為與蒸發量相同之單位，則可得下列方程式：

$$\Delta H = E_w - E_a \dots\dots\dots (3)$$

而此顯熱通量增加量將會造成皿蒸發量的增加，使得

$$a \cdot E_p = E_w + b \cdot \Delta H \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中， b 為係數，主要依據蒸發皿型式而有不同的值，一般而言， b 值稍大於 1.0。故在水分無法充足供應潛勢蒸發量的情況下， $a \cdot E_p$ 與潮濕環境下的潛勢蒸發量 E_w 不同， $a \cdot E_p$ 無法用來代表實際水分充足下的潛勢蒸發，因此將 $a \cdot E_p$ 稱為「表象」潛勢蒸發量(“apparent” potential evaporation)。故由上述可知，在水分不足的情況下，實際蒸發量會減少，而皿蒸發量會增加，兩者呈現互補關係。Brutsaert and Parlange (1998)舉一極端案例為：沙漠的實際蒸發量趨近於零，而皿蒸發量達到最大。

將式(3)代入式(4)可得到

$$a \cdot E_p = E_w + b \cdot (E_w - E_a) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$a \cdot E_p = (1 + b) \cdot E_w + b \cdot E_a \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$b \cdot E_a = (1 + b) \cdot E_w - a \cdot E_p \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$E_a = \frac{1+b}{b} E_w - \frac{a}{b} E_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

由式(8)可知，因潮濕環境下的潛勢蒸發量 E_w 為固定，故當皿蒸發量 E_p 呈現減少趨勢時，地表實際蒸發量 E_a 為增加；故此蒸發互補理論可用來解釋水分不足環境下的蒸發皿悖論。若令式(8)之 b 值為 1.0，並以 E_{ap} 代替表象潛勢蒸發量 $a \cdot E_p$ ，則式(8)可簡化為

$$E_a = 2E_w - E_{ap} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式(9)即為簡化後的蒸發互補理論，許多學者直接採用式(9)進行皿蒸發與實際蒸發之互補關係的探討，例如：Szilagyi *et al.* (2001)、Hobbins *et al.* (2004)、Liu *et al.* (2006)以及 Zhang *et al.* (2007)。

關於式(8)的蒸發互補關係，在考慮地表環境水分充足與否的情況下，可用圖 5 來示意。圖中縱坐標為蒸發量，橫坐標代表地表環境的潮濕程度，往右方向代表地表環境水分較充足，往左方

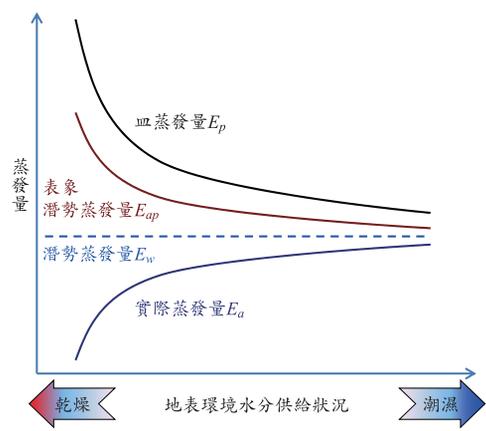


圖 5 蒸發互補關係示意圖

向代表地表環境水分較缺乏；在水分充足的潮濕環境下，皿蒸發量與實際蒸發量會趨近於潛勢蒸發量；在水分不足的乾燥環境下，實際蒸發量將會依水分供給狀況而趨向減小，皿蒸發量將會因顯熱通量的增加而趨向增大。而表象潛勢蒸發量為皿蒸發量乘上蒸發皿係數後的蒸發量，在地表環境水分充足的情況下趨近於潛勢蒸發量，但在地表環境乾燥時，並不能代表潛勢蒸發量。

四、長期蒸發趨勢分析

4.1 皿蒸發資料分析

本研究繪製各測站二種皿蒸發資料的時間序列圖，並計算其統計參數，以了解 20 公分蒸發皿與 A 型蒸發皿的觀測資料特性。本文以圖 6 及圖 7 的台北及台中站為例，展示二種蒸發皿於重疊觀測期間(1974 至 1994 年)的月觀測資料及兩者的差值；由圖可知 20 公分蒸發皿觀測資料明顯高於 A 型蒸發皿觀測資料，且二種蒸發資料存在極為相似的循環型態。夏季時月蒸發量較高，冬季時月蒸發量較低，且二蒸發皿觀測量的差值亦具有此型態，顯示 20 公分蒸發皿於夏季具有較 A 型蒸發皿高估的現象。圖 8 為台北站及台中站的年循環變化型態，亦即為各月份蒸發量的平均值；圖 9 為各月份蒸發量的標準偏差，由圖可知，台北站的月蒸發量在夏季有較大的變異性，而台中站的月蒸發量在春季有較大的變異性。本文以台北站及台中站為例，展示皿蒸發資

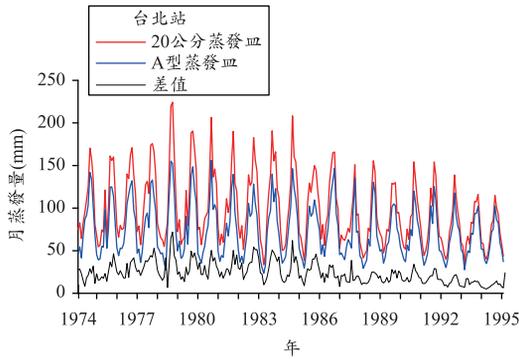


圖 6 台北站蒸發皿觀測資料與差值

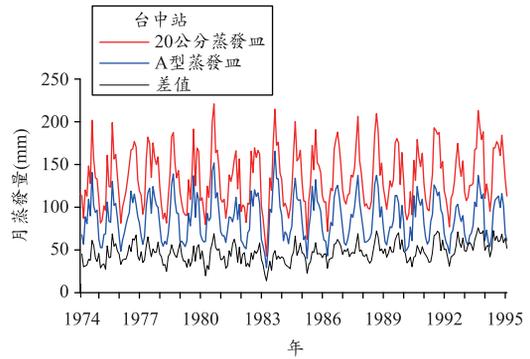


圖 7 台中站蒸發皿觀測資料與差值

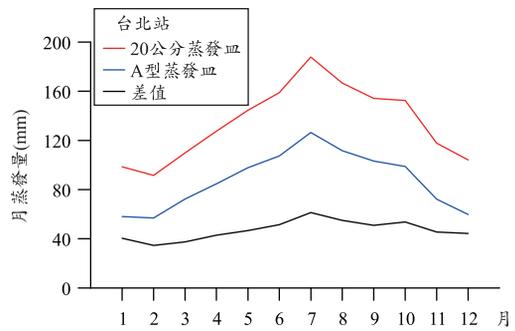
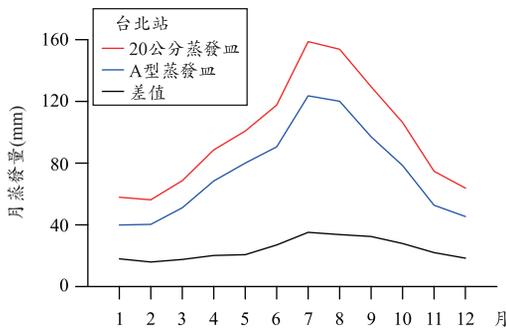


圖 8 各月份蒸發量之平均值

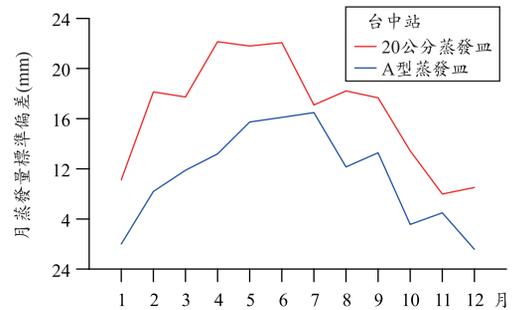
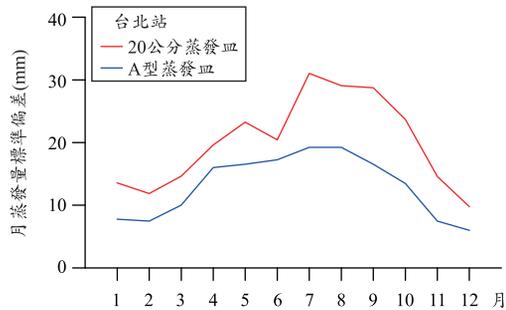


圖 9 各月份蒸發量之標準偏差

料的時間序列及平均值與標準偏差，其他各站的資料序列及詳細統計分析，可參考李奕欣(2014)之碩士論文內容。

由於二種蒸發皿所觀測的長期月蒸發資料具有極為相似的變化型態，本研究進一步分析各測站二種皿蒸發資料於重疊觀測期間的相關性。表 4 列出各測站的相關係數，可知各測站二種蒸發皿觀測資料的相關性均極高，其中相關係

數最低值者為嘉義站的 0.93。由於二種皿蒸發資料具有相似變化型態及高相關性，此特性也提供本研究進行蒸發資料重建的支持依據。

4.2 皿蒸發資料重建

本研究將二種蒸發皿於重疊觀測期間的資料區分為資料重建模式的率定與驗證資料，以後期約三分之二數量的資料作為模式率定之用，前

表 4 二種蒸發皿觀測資料之相關性分析

測站	相關係數
台北	0.97
台中	0.96
嘉義	0.93
台南	0.97
高雄	0.96
恆春	0.94
宜蘭	0.96
花蓮	0.98
台東	0.98

表 5 蒸發資料重建模式評鑑指標

站名	均方根誤差(mm)		相關係數	
	率定	驗證	率定	驗證
台北	5.288	7.720	0.984	0.979
台中	6.363	6.535	0.969	0.973
嘉義	7.951	15.221	0.962	0.976
台南	7.102	6.774	0.973	0.980
高雄	6.653	8.471	0.958	0.964
恆春	5.732	5.913	0.954	0.956
宜蘭	6.397	12.495	0.976	0.984
花蓮	5.346	5.529	0.982	0.980
台東	4.344	8.980	0.989	0.955

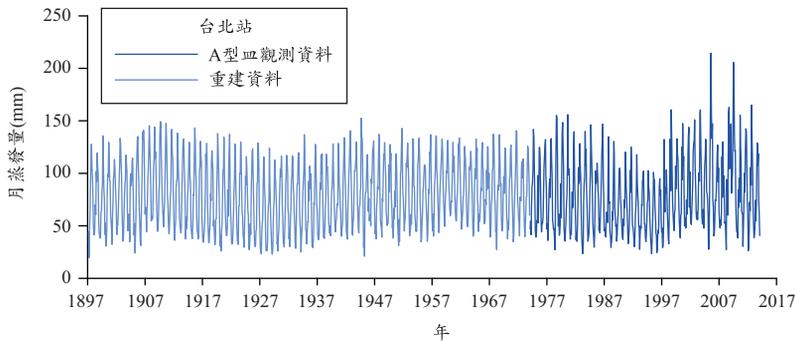


圖 10 台北站長期蒸發資料

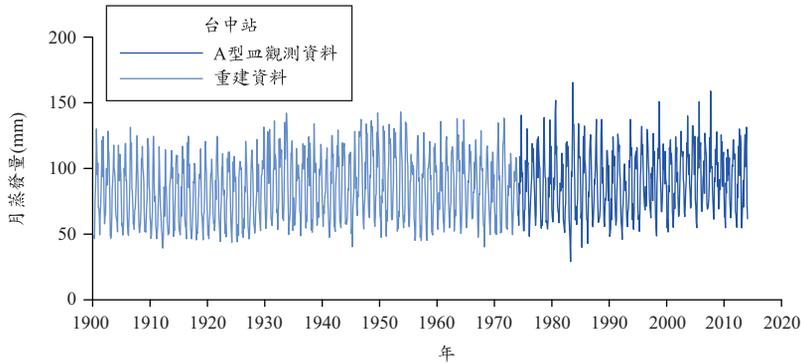


圖 11 台中站長期蒸發資料

期約三分之一數量的資料作為模式驗證使用，率定及驗證結果均以均方根誤差及相關係數來檢視，列於表 5；由表中可知在蒸發觀測重疊期間的率定及驗證資料中，模式重建的結果與 A 型皿觀測資料的相關性相當高，僅宜蘭和嘉義站於驗

證期間的均方根誤差稍大，月蒸發量的均方根誤差大於 10 mm，整體來說，蒸發資料重建模式有良好的效能。圖 10 及圖 11 為以台北及台中站為例展示利用蒸發資料重建模式建立長期月蒸發資料的結果。

表 6 長期皿蒸發趨勢及改變點

站名	改變點 (年/月)	改變點前 蒸發量(mm/year)	改變點後 蒸發量(mm/year)	增減趨勢	MWP 法 顯著機率值	蒸發趨勢斜率 (mm/year)
台北	1941/04	906.6	969.1	增	0.98	0.47
台中	1929/03	949.2	1071.6	增	1.00	1.37
嘉義	1988/09	1199.9	1110.4	減	0.99	-2.06
台南	1926/08	1271.6	1103.8	減	1.00	-2.18
高雄	1953/04	1247.9	1376.4	增	1.00	0.57
恆春	1957/07	1724.3	1603.6	減	1.00	-1.53
宜蘭	1961/04	734.1	782.3	增	0.69	0.60
花蓮	1954/04	986.7	1084.6	增	1.00	1.17
台東	1936/11	1391.3	1316.5	減	1.00	-0.54

4.3 台灣長期皿蒸發量趨勢分析

針對重建後的各測站長期月蒸發序列資料，本研究以 Mann-Whitney-Pettitt (MWP) 改變點檢測法 (Pettitt, 1979) 鑑定長期蒸發資料的最顯著改變點，並分析改變點前、後的皿蒸發量，進而判別皿蒸發量趨勢。MWP 改變點檢測法之理論介紹詳如附錄。表 6 列出各測站的改變點時間，以及改變點前、後的年平均蒸發量，由分析結果得知台北、台中、宜蘭、花蓮和高雄的皿蒸發趨勢為增加；嘉義、台南、恆春、台東的皿蒸發趨勢為下降。宜蘭站蒸發資料的顯著機率值為 0.69，若以顯著水準 0.05 的標準而言，宜蘭站蒸發資料的增加趨勢未具統計顯著性；而其他八個測站的增減趨勢，均具有統計上的顯著性。為進一步比較 MWP 趨勢分析法與線性回歸法的結果，表 6 亦列出以線性回歸法所得的蒸發趨勢斜率，顯示 MWP 趨勢分析法與線性回歸法在增減趨勢的分析結果具一致性。

圖 12 展示各個測站皿蒸發的增減趨勢，整體而言，除高雄為上升趨勢外，長期皿蒸發趨勢有北增南減的現象。對比許多研究指出台灣長期雨量趨勢亦有北增南減的現象 (例如：Hsu and Chen, 2002；Yu *et al.*, 2006；Chen *et al.*, 2009)，顯示台灣北部降雨及皿蒸發的長期趨勢為增加，水文循環有加強的跡象；台灣南部降雨及皿蒸發的長期趨勢為減少，水文循環有弱化的跡象。然依蒸發互補理論所述，皿蒸發量的變化趨勢與實際蒸發量的變化趨勢不同，而台灣是否存

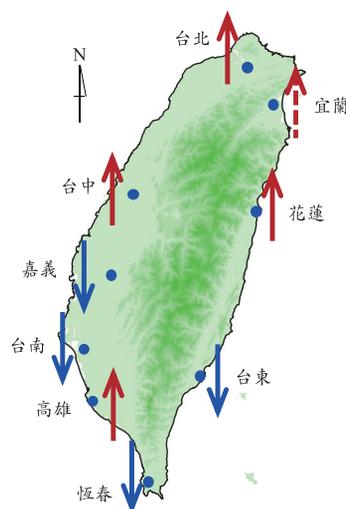


圖 12 台灣長期皿蒸發量趨勢分析結果

在蒸發互補現象仍有待檢驗，故本研究所引出的這些水文循環現象及議題，值得持續研究探討釐清。

五、蒸發互補關係初探

為了解台灣的蒸發資料是否存在蒸發互補現象，本研究嘗試繪製如圖 5 的蒸發互補關係曲線。蒸發互補關係圖的縱坐標為蒸發量，橫坐標代表地表環境的潮濕程度。縱坐標的蒸發量包含皿蒸發量、表象潛勢蒸發量、潛勢蒸發量及實際蒸發量，本研究雖有皿蒸發觀測資料，但無實際蒸發量的資料，亦無精確的蒸發皿係數用以推求表象潛勢蒸發量，因此僅先繪製皿蒸發量的曲線

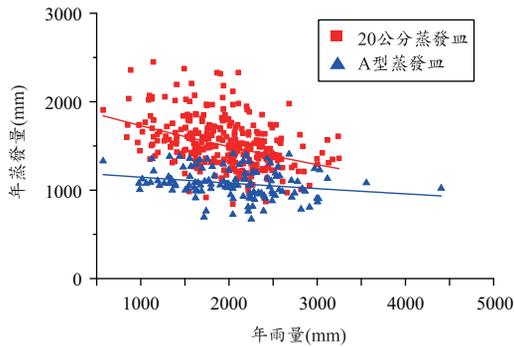


圖 13 蒸發趨勢增加測站之年雨量與年蒸發觀測資料散布圖

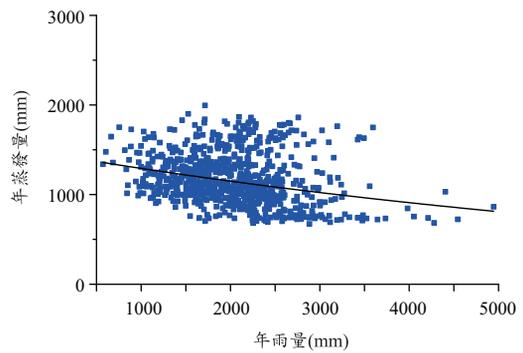


圖 15 蒸發重建資料與年雨量之蒸發互補關係

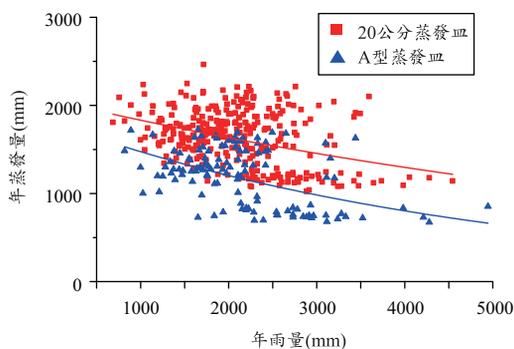


圖 14 蒸發趨勢下降測站之年雨量與年蒸發觀測資料散布圖

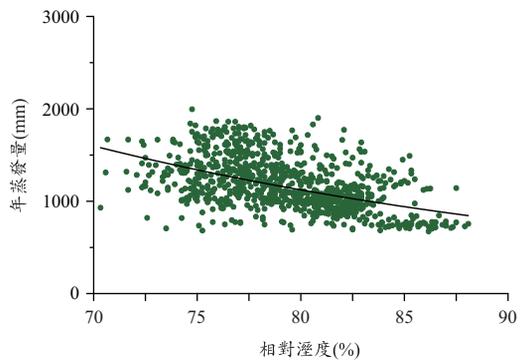


圖 16 以相對溼度為乾濕指標之蒸發互補關係

來初步探討蒸發互補現象；而若蒸發互補關係存在，理論上在地表環境水分充足的情況下，蒸發量會趨近潛勢蒸發量。蒸發互補關係圖的橫坐標為地表環境的潮濕程度，因此需有合適的變量或指標來代表乾濕程度，本研究先採用雨量多寡來代表環境的乾濕程度。雖然蒸發互補理論原先的提出是用來解釋蒸發觀測趨勢的下降，但蒸發互補理論的成立與否，並無關乎蒸發量隨時間的變化趨勢。不過，本研究仍針對蒸發增、減趨勢不同的測站，分別繪製蒸發互補關係圖。

圖 13 展示蒸發趨勢增加測站之年雨量與年蒸發觀測資料散布圖，圖 14 為蒸發趨勢下降測站的散布圖。由圖 13 與圖 14 可看出蒸發觀測量隨著年雨量的增加而有減少的現象，顯示蒸發互補關係的跡象，且表示年雨量可用來代表該年的乾濕程度。而 20 公分蒸發資料的散布

程度較 A 型蒸發資料來得大，亦印證圖 9 顯示 20 公分蒸發資料的標準偏差較大，資料變異程度大。然而整體來說，圖 13 與圖 14 雖有蒸發互補關係的跡象，但資料的關係趨向並不明顯。圖 15 改採所有測站的長期蒸發重建資料與年雨量來繪製散布圖，圖中顯示各測站的年蒸發量約介於 800 至 2000 毫米之間，整體而言仍呈現年蒸發量隨年雨量增加而遞減的關係。

除以年雨量來代表地表環境的乾濕程度外，本研究另採用相對濕度來作為乾濕程度的指標，繪製蒸發互補關係曲線如圖 16。圖 16 顯示與圖 15 相似的型態，蒸發量與環境乾濕程度呈現蒸發互補理論所描述的現象。本文以年尺度及所有測站的資料來呈現及討論台灣的蒸發互補關係，發現台灣的蒸發資料具有蒸發互補關係的跡象，惟初步以雨量及相對濕度來作為乾濕程度

的指標，並未得到明確的蒸發量與蒸發互補關係曲線，未來有待建立更合適的乾濕指標來探討蒸發互補關係，以及建立式(8)中參數的合理推估方法，將有助於了解蒸發互補關係及估計實際蒸發量。

六、結 論

地表與大氣之水分交換機制為蒸發(散)及降水，二者皆為水文循環的重要成分。國內對於降水的機制、趨勢、時空分布特性等已有許多研究探討，但對於蒸發及其在水文循環中的影響，無論大氣或水文領域的學者均較少著墨。本研究收集中央氣象局逐月蒸發資料及氣象資料，分析台灣長期蒸發趨勢，並初步探索台灣的蒸發現象是否適用蒸發互補理論，重要結果摘錄如下。

1. 因蒸發觀測儀器的不同，台灣長期蒸發資料存在不同特性，20 公分蒸發皿與 A 型蒸發皿的觀測資料雖具有高度相關性，但 20 公分蒸發皿觀測的年蒸發量常可高於 A 型蒸發皿有 300 毫米以上，且 20 公分蒸發皿的資料具有較大的統計變異性。
2. 本研究分析蒸發量與氣象因子的相關性，發現與溫度、太陽輻射、濕度等特性相關的氣象因子具有較高相關性，其中以氣溫相關性最高。
3. 本研究採用支撐向量機發展蒸發資料重建模式，將早期的 20 公分蒸發皿觀測資料及氣溫資料轉換為 A 型蒸發皿資料，得到具一致性的長期蒸發重建資料。
4. 本研究利用 MWP 法檢定各測站的長期蒸發趨勢，得知台北、台中、宜蘭、花蓮和高雄的蒸發趨勢為增加，嘉義、台南、恆春、台東的蒸發趨勢為減少；整體而言，除高雄外，長期蒸發趨勢有北增南減的現象。
5. 本研究進行蒸發互補關係的初步探索，以雨量及相對濕度作為地表環境乾濕程度的指標，發現台灣的蒸發資料呈現蒸發互補關係的跡象，但有待後續研究來進一步釐清與探討。若能建立更合適的乾濕指標及合理估計互補關係曲線的參數，將有助於蒸發互補關係的了解及實際蒸發量的估計。

附 錄

A1. 蒸發資料重建模式—支撐向量機

支撐向量機(support vector machines)為 Vapnik (1995, 1998)所發展，依其應用方法可分為支撐向量分類與支撐向量回歸二類，支撐向量回歸的原理在於將輸入資料 \mathbf{x} 透過函數 Φ 的映射後，建立回歸函數 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \cdot \Phi(\mathbf{x}) + b$ 來模擬資料之特性(\mathbf{w} 與 b 為模式參數)，而此回歸模式具有一誤差容忍範圍 ε ；支撐向量回歸可以表示成數學規劃問題來求解，方法摘要如下，詳細內容可參考支撐向量機相關著作(例如：Vapnik, 1995, 1998；陳憲宗等人，2006，2010)。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{subject to} \quad & y_i - [\mathbf{w}^T \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) + b] \leq \varepsilon + \xi_i \quad \dots (A1) \\ & [\mathbf{w}^T \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) + b] - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ & \xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, l \end{aligned}$$

其中， ξ_i 與 ξ_i^* 分別代表資料點落於容忍區間 ε 上方及下方的誤差值，成本參數 C 為衡量此些誤差值之懲罰權重。影響支撐向量回歸模式之參數為成本參數 C 、誤差容忍區間寬度 ε 及 Φ 函數之參數。

支撐向量機基於「結構風險最小化」法則來降低模式在驗證測試時的誤差，式(A1)中目標函數的第一項代表模式複雜度(model complexity)，若愈小則代表模式愈簡潔；第二項為經驗誤差，若愈小代表模式擬合程度愈佳。若模式僅考慮經驗誤差之最小化，可能因為模式在學習過程中過度擬合(overfitting)，反而造成驗證時效果不好。故支撐向量機藉由控制模式複雜度及經驗誤差，同時權衡兩者的消長變化予以最小化，使得模式能擁有最佳效能又能避免過度學習。支撐向量機的另一優點為模式演算流程中將式(A1)轉換成求解二次規劃(quadratic programming)問題，二次規劃在數學上具有唯一的解析解，因此支撐向量機為一全域最佳化的模式。

A2. 蒸發長期趨勢分析 – Mann-Whitney-Pettitt 改變點檢測法

本研究採用 Mann-Whitney-Pettitt (MWP) 改變點檢測法，檢定蒸發資料是否存在趨勢改變點來分析蒸發量的趨勢變化。MWP 法是由 Pettitt (1979) 修改 Mann-Whitney 檢定法所提出，係指從時間序列中，以某時間點將資料劃分為前後兩部分，再檢定前後兩部分資料是否存在顯著的統計差異，並將資料前後兩部分差異性最大的時間點視為最顯著的趨勢改變點。MWP 法是利用資料的改變點來判定資料在時間上的變化趨勢，亦可用來分析氣候資料是否存在氣候突變 (abrupt change) 及氣候轉移 (climate shift)。MWP 法之計算方法摘要如下：

設有資料長度為 n 之時間序列 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ ，令 t 為將時間序列劃分為前後兩部分之分割點，則前後二部分資料為 $\{X_1, X_2, \dots, X_t\}$ 和 $\{X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_n\}$ 。依 MWP 檢定法，定義 U_t 指標為

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j) \dots\dots\dots (A2)$$

先令 $(X_i - X_j) = x$ ，再依序計算 $\text{sgn}(x)$ ；若 $x > 0$ ，則 $\text{sgn}(x) = 1$ ；若 $x = 0$ ，則 $\text{sgn}(x) = 0$ ；若 $x < 0$ ，則 $\text{sgn}(x) = -1$ 。將 U_t 對 t 的所有資料描繪出來即可了解是否存在顯著的改變點，假若沒有顯著的改變點存在，則 U_t 會呈現持續增加 (或減少) 的情況。若有一個顯著差異的改變點存在，則 U_t 會一直增加 (或減少) 直到改變點的位置發生趨勢轉折；產生轉折點的情況可能會發生好幾處，即可能存在許多趨勢變化點，所以需要再去決定最顯著的改變點，而最顯著改變點的位置發生在當 $|U_t|$ 為最大值時。

MWP 法所決定出的時間改變點的統計顯著性，可由顯著機率值 $P(t)$ 來檢定 (Pettitt, 1979；Kiely, 1999)。

$$P(t) = 1 - \exp\left(\frac{-6U_t^2}{n^3 + n^2}\right) \dots\dots\dots (A3)$$

若顯著機率值 $P(t)$ 大於 $(1 - \alpha)$ ，則表示此改變點

於顯著水準 α 下具統計顯著性。

謝 誌

本研究承國家科學委員會專題研究計畫補助經費 (計畫編號：NSC 101-2221-E-035-043)，特此致謝。

參考文獻

1. 朱佳仁 (2007) 「台灣地區降雨與蒸發散研究 (II)」，國家科學委員會專題研究計畫。
2. 朱佳仁 (2008) 「台灣地區降雨與蒸發散研究 (III)」，國家科學委員會專題研究計畫。
3. 李奕欣 (2014) 「台灣長期蒸發量趨勢分析」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文。
4. 張格綸 (2007) 「應用蒸發皿係數推估地區蒸發散量之研究」，國立成功大學資源工程學系碩士論文。
5. 陳憲宗、張逸凡、謝章廷、游保杉 (2006) 「支撐向量機制：洪水水位預報模式」，台灣水利，54(2)，50-61。
6. 陳憲宗、劉鑽鏐、游保杉 (2010) 「應用支撐向量機與輻狀基底神經網路修正 QPESUMS 雨量」，農業工程學報，56(3)，43-56。
7. 童慶斌、李明旭 (2010) 「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究 (1/2)」，經濟部水利署水利規劃試驗所計畫。
8. Bouchet, R.J. (1963) *Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique*. The International Association of Hydrological Sciences Publication No. 62, Berkeley, CA, pp 134-142
9. Brutsaert, W., Parlange, M.B. (1998) Hydrological cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396, 30.
10. Burn, D.H., Hesch, N.M. (2007) Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 336, 61-73.
11. Chattopadhyay, N., Hulme, M. (1997) Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate

- change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(1), 55-73.
12. Chen, S.T., Kuo, C.C., Yu, P.S. (2009) Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological Sciences Journal*, 54(3), 430-441.
 13. Cohen, S., Ianetz, A., Stanhill, G. (2002) Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(2), 83-91.
 14. Dai, A., Trenberth, K.E., Karl, T.R. (1999) Effects of clouds, soil moisture, precipitation and water vapor on diurnal temperature range. *Journal of Climate*, 12, 2451-2473.
 15. Easterling, D.R., Horton, B., Jones, P.D., Peterson, T.C., Karl, T.R., Parker, D.E., Salinger, M.J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., Follan, C.K. (1997) Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-366.
 16. Fu, G., Charles, S.P., Yu, J. (2009) A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic Change*, 97, 193-214.
 17. Golubev, V.S., Lawrimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Menne, M.J., Peterson, T.C., Malone, R.W. (2001) Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophysical Research Letters*, 28(13), 2665-2668.
 18. Guo, J., Ren, G. (2005) Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed. *Water Science*, 16(5), 666-672.
 19. Harmsen, E.W., Gonzalez-Perez, A., Winter, A. (2004) Re-evaluation of pan evaporation coefficients at seven locations in Puerto Rico. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 88, 109-122.
 20. Hobbins, M., Ramirez, J.A., Brown, T.C. (2004) Trend in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters*, 31, L13503.
 21. Hsu, H.H., Chen, C.T. (2002) Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79, 87-104.
 22. Kiely, G. (1999) Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations. *Advances in Water Resources*, 23(2), 141-151.
 23. Lawrimore, J.H., Peterson, T.C. (2000) Pan evaporation trends in dry and humid regions of United States. *Journal of Hydrometeorology*, 1, 543-546.
 24. Linacre, E.T. (1993) Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(3-4), 237-256.
 25. Linacre, E.T. (1994) Estimating US class A pan evaporation from few climate data. *Water International*, 19, 5-14.
 26. Liu, B., Ma, Z., Ding, Y. (2006) Characteristics of the changes in pan evaporation over northern China during the past 45 years and the relations to environment factors. *Plateau Meteorology*, 25(5), 840-848.
 27. Liu, M., Shen, Y., Zeng, Y., Liu, C. (2009) Change trend of pan evaporation and its cause analysis over the past 50 years in China. *Acta Geographica Sinica*, 64(3), 259-269.
 28. Liu, M., Shen, Y., Zeng, Y., Liu, C. (2010) Trend in pan evaporation and its attribution over the past 50 years in China. *Journal of Geographical Sciences*, 20(4), 557-568.
 29. Liu, B., Xu, M., Henderson, M., Gong, W. (2004) A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000. *Journal of Geophysical Research*, 109, D15102.
 30. Moonen, A.C., Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A. (2002) Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 13-27.

31. Ozdogan, M., Salvucci, G.D. (2004) Irrigation-induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey: test and application of Bouchet's complementary hypothesis. *Water Resources Research*, 40, W04301.
32. Peterson, T.C., Golubev, V.S., Groisman, P.Y. (1995) Evaporation losing its strength. *Nature*, 377, 687-688.
33. Pettitt, A.N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
34. Qiu, X., Liu, C., Zeng, Y. (2003) Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 18(4), 437-442.
35. Quintana-Gomez, R.A. (1998) Changes in evaporation patterns detected in northernmost South America. *Proceedings of the 7th International Meeting on Statistical Climatology*, 97.
36. Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T., Rosenfeld, D. (2001) Aerosols, Climate and The Hydrological Cycle. *Science*, 294, 2119-2124.
37. Roderick, M.L., Rotstayn, L.D., Farquhar, G.D., Hobbins, M.T. (2007) On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 34, L17403.
38. Roderick, M.L., Farquhar, G.D. (2002) The cause of decreased pan evaporation over the last 50 Years. *Science*, 298, 1410-1411.
39. Roderick, M.L., Farquhar, G.D. (2004) Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology*, 24, 1077-1090.
40. Roderick, M.L., Farquhar, G.D. (2005) Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *International Journal of Climatology*, 25, 2031-2039.
41. Shen, Y., Liu, C., Liu, M., Zeng, Y., Tian, C. (2010) Change in pan evaporation over the past 50 years in the arid region of China. *Hydrological Processes*, 24, 225-231.
42. Stanhill, G., Cohen, S. (2001) Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 255-278.
43. Stanhill, G., Möller, M. (2008) Evaporative climate change in the British Isles. *International Journal of Climatology*, 28(9), 1127-1137.
44. Szilagyi, J., Katul, G.G., Parlange, M.B. (2001) Evapotranspiration intensifies over the conterminous United States. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127, 354-362.
45. Tebakari, T., Yoshitani, J., Suvanpimol, C. (2005) Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand. *Journal of Hydrological Engineering*, 10, 205-215.
46. Vapnik, V.N. (1995) *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer-Verlag.
47. Vapnik, V.N. (1998) *Statistical Learning Theory*. New York: Wiley.
48. Walter, M.T., Wilks, D.S., Parlange, J.Y., Schneider, R.L. (2004) Increasing evapotranspiration from the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 405-408.
49. WMO (1966) *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*. Vol 83, Technical Report, Working Group on Evaporation Measurement, Geneva.
50. WMO (1976) *The CIMO International Evaporimeter Comparisons*. Final Report No. 449, Geneva.
51. Xu, J., Haginoya, S., Saito, K., Motoya, K. (2005) Surface heat balance and pan evaporation trends in Eastern Asia in the period 1971-2000. *Hydrological Processes*, 19, 2161-2186.
52. Yu, P.S., Yang, T.C., Kuo, C.C. (2006) Evaluating long-term trends in annual and seasonal precipitation in Taiwan. *Water Resources Man-*

- agement, 20(6), 1007-1023.
53. Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W., Briggs, P.R. (2004) A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 40, W02502.
54. Zhang, Y., Liu, C., Tang, Y., Yang, Y. (2007) Trends in pan evaporation and reference and actual vapotranspiration across the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*, 112, D12110.
55. Zuo, H., Li, D., Hu, Y. (2005) Change trend of climate in China over the past 40 years and its relationship with the change of pan evaporation. *Chinese Science Bulletin*, 50(11), 1125-1130.

收稿日期：民國 104 年 9 月 7 日
修正日期：民國 104 年 9 月 29 日
接受日期：民國 104 年 10 月 5 日