

臺灣地區乾旱問題之分析

林琴¹、劉紹臣^{1,2}、林沛練¹

國立中央大學大氣科學系大氣物理研究所¹ 中央研究院環境變遷研究中心²

摘要

受到地球暖化影響會造成水汽蒸發量增加、大氣水汽飽和程度增加、以及大氣穩定度增強，從而對降水造成影響：極端大雨之降水量增加，極端小雨之降水量減少。同時，由於小雨降水的減少進而會對乾旱問題造成影響。此研究針對全球暖化與臺灣地區乾旱問題之關係進行討論。選用臺灣中央氣象局 15 個地面測站 1961-2011 年（51 年）的日降水資料與 National Climatic Data Center 每年全球地表異常溫度進行分析。使用 Inter-annual Method 分析極端小雨、不降雨日數、以及連續不降雨日數，即乾旱問題，與溫度變化關係。同時，考慮到臺灣不同地形以及各季節所受不同天氣系統的影響，根據不同測站月平均降水量分佈情況和測站地理位置將其分為中央山脈的北部、西南部和東部三個區域，並且分別探討臺灣不同區域乾旱問題之變化。研究表明為全球年平均溫度每升高 1°K ，臺灣地區平均的極端小雨降雨量會減少 58.53%，臺灣地區年平均乾日日數增加 13.92%。並且通過比較連續乾日日數的變化量得到長期連續乾日日數的增加，即乾旱加重。此外，對於不同區域之分析也有乾旱增強變化。

關鍵字：臺灣地區乾旱，Inter-annual Method

一．前言

IPCC 中對於乾旱的定義為降水量減少而造成缺水的情況，或是由持續的乾旱天氣使得降水減少，進而造成水資源不平衡。乾旱可以分為三種：氣象乾旱，即降水減少；水文乾旱，即河流、湖泊和地下水低於正常值；農業乾旱，即土壤地表下 1 米的濕度不足進而影響到農作物。乾旱發生的直接表現為降水減少。在短時間內，降水的減少會使得土壤濕度減小，水位也會對其有所反應。在本研究中所探討的乾旱為氣象上的乾旱，即缺少降雨所造成的乾旱。

在全球暖化的背景下，根據 Clausius-Clapeyron 方程可以得到溫度每升高 1°K ，大氣中的飽和水汽量會增加 7%。Trenberth et al. (2003) 提出全球暖化使得大氣中水汽增加，其對降水的影響會使大雨的增加量大於水汽的增加量。這是因為水汽增加會造成潛熱釋放，進而激發對流生成，帶走水汽，使得降水延遲發生。從而減少了中小雨的發生，而增加了大雨。同時，潛熱釋放還會增加大氣的穩定度，使得降水不易發生，減少了降水的總時間。Trenberth et al.(2003)指出全球暖化會造成極端降水事件增加。Liu et al. (2009) 使用 inter-annual method，檢驗了溫度與極端降水的變化情況。其結果顯示：全球平均溫度升高 1°K ，極端大雨 TOP 10%的極端降水量會增加 95%。

全球暖化對於臺灣地區的影響會不容小覷。極端降水的變化不僅會由於極端大雨的增加引發洪水，土石流等，也會由於極端小雨的減少造成乾旱。當中小雨減少時，就會造成乾日日數的增加，進而造成乾旱問題的發生。在全球暖化的背景下，對於這些問題的定量分析具有重要的研究意義。

二．數據和方法

在本研究中選用 1961-2011 年（51 年）的中央氣象局 15 個測站的日降雨資料。這 15 個測站的選擇只要考慮其時間和海拔高度的影響，如表 2-1 所示。由於臺灣地區收到中央山脈的地形影響，而且每年均會受到颱風侵襲，從而對降雨造成影響。選用這 15 個平地站就是為了排除地形以及颱風所造成的降水不均勻影響。降水資料的格式為每日的降雨量 (mm) 和每日的降雨時數 (hr)，由兩者可以得到每日的降雨強度 (mm/hr)。當日降雨強度小於 0.1mm/hr 時，該日定義為不降雨日，即晴日。溫度資料選擇 National Climatic Data Center (NCDC) 的全球地表年平均異常溫度。這是由於臺灣地區降水量之變化主要受到西太平洋區域溫度之影響，而該區域溫度與全球溫度具有一定的同步變化性。

本研究中不僅使用乾日日數和連續乾日日數對於乾旱進行定義，也使用標準化降雨指數對於乾旱程度進行討論。標

準化降雨指數 (Standardized precipitation index, SPI) 是 McKee et al.(1993)提出的，經由擬合出的一個所需時間尺度上的總降雨量頻率分佈的概率密度函數計算得到。其在時間和空間的劃分分別為每個月 (或依據原始降雨的時間序列) 與每個區域。每個概率密度函數都會被轉換為標準化的正態分佈。因此，SPI 是區域和時間尺度的歸一化值。Lloyd-Hughes et al.(2002) 使用 SPI 對於歐洲地區的乾旱進行了分析。Hayes et al.(1999)指出 SPI 的三個優點：第一，由於 SPI 僅由降雨量得到，故計算簡單，且避免該指數對土壤濕度的依賴，在夏季和冬季均可有效使用，同時也不受地形因素影響。第二，是 SPI 的可變時間尺度，這使其可以描述氣象、農業和水文的一系列應用中的重要乾旱條件。這種時間上的多效性也有助於乾旱動力的分析。因為其他指數很難跟蹤乾旱的發生和結束，所以 SPI 可以確定乾旱的開始與結束。第三個有點來自於其標準化，這確保了極端事件的發生頻率在任何地區，任何時間都是一致的。

表 2-1：測站列表

站碼	站名	經度	緯度	高度
466900	淡水	121°26' 24" E	25°09' 56" N	19.0m
466920	臺北	121°30' 24" E	25°02' 23" N	5.3m
466940	基隆	121°43' 56" E	25°08' 05" N	26.7m
466950	彭佳嶼	122°04' 17" E	25°37' 46" N	101.7m
466990	花蓮	121°36' 18" E	23°58' 37" N	16.0m
467080	宜蘭	121°44' 53" E	24°45' 56" N	7.2m
467350	澎湖	119°33' 19" E	23°34' 02" N	10.7m
467410	臺南	120°12' 17" E	22°59' 36" N	40.8m
467490	臺中	120°40' 33" E	24°08' 51" N	84.0m
467540	大武	120°53' 44" E	22°21' 27" N	8.1m
467570	新竹	121°00' 22" E	24°49' 48" N	26.9m
467590	恒春	120°44' 17" E	22°00' 20" N	22.1m
467610	成功	121°21' 55" E	23°05' 57" N	33.5m
467620	蘭嶼	121°33' 02" E	22°02' 19" N	324.0m
467660	臺東	121°08' 48" E	22°45' 15" N	9.0m

本研究使用 inter-annual method 分別對於降水量 P 與溫度 T 之關係進行分析，即計算任意兩年降水之差與其對應兩年溫度之差的分布之變化趨勢。使用 inter-annual method 分析的優勢為：從有限的觀測資料中取得盡可能多的訊息，即傳統做法是由觀測資料的 51 個數值統計 P 與 T 之關係，而 inter-annual method 則是由 1275 個數值進行統計。這樣大大

增加了資料量，得到更接近真實情況的值。也因此，inter-annual method 有效減少了離群值情況，增加了 p-value 的可信度。此外，對於乾日日數、連續乾日日數和 SPI 之變化與溫度之關係的定量分析也同樣使用此方法。

表 2-2：SPI 數值定義乾旱等級

SPI	分類等級
$SPI \geq 2.00$	Extremely wet
$1.50 \leq SPI < 1.99$	Severely wet
$1.00 \leq SPI < 1.49$	Moderately wet
$0 \leq SPI < 0.99$	Mildly wet
$0 \leq SPI < -0.99$	Mild drought
$-1.00 \leq SPI < -1.49$	Moderate drought
$-1.50 \leq SPI < -1.99$	Severe drought
$SPI \leq -2.00$	Extreme drought

三．結果與討論

(一) 臺灣區域乾旱問題分析

分別由降水量、乾日日數和連續乾日日數三個方面對全臺灣地區乾旱進行分析。

對於 1961 至 2011 年這 51 年全年 乾日進行統計，如圖 3-1(a)所示，其存在些許上升趨勢。乾日日數由 1961 年 205 天增加到 2011 年的 226 天，大約每十年乾日增加 4 天。使用 inter-annual method 分析溫度和乾日之關係，如圖 3-1 (b) 所示。其橫座標為任意兩年溫度之差 ΔT ，縱座標為對應任意兩年乾日日數百分比之差 ΔD ，由其散點分佈狀態計算其變化趨勢如圖中虛線所示，其表現為溫度升高會伴隨乾日日數增加。使用 inter-annual method 得到乾日日數與溫度變化之定量關係為 13.92%/K，SEM(standard error of the mean)為 0.10，且滿足 5% 的顯著性檢驗。

表 3-1：臺灣地區 1961-2011 年連續多日乾日日數與溫度之定量關係

連續乾日日數	$\Delta D/\Delta T$	
	(%/K)	SEM
≥ 5	30.98	0.28
≥ 6	33.69	0.26
≥ 7	34.73	0.29
≥ 8	34.67	0.25

使用同樣方法對連續多日不降雨日數進行統計分析，如表 3-1 所示，分別對連續 5 天以上、6 天以上、7 天以上、以及 8 天以上乾日日數與溫度之關係，即不同乾旱程度進行討論。可以看到，隨溫度升高不同乾旱程度的乾日日數變化均有增加情況，且其增加強度有些微上升情況。

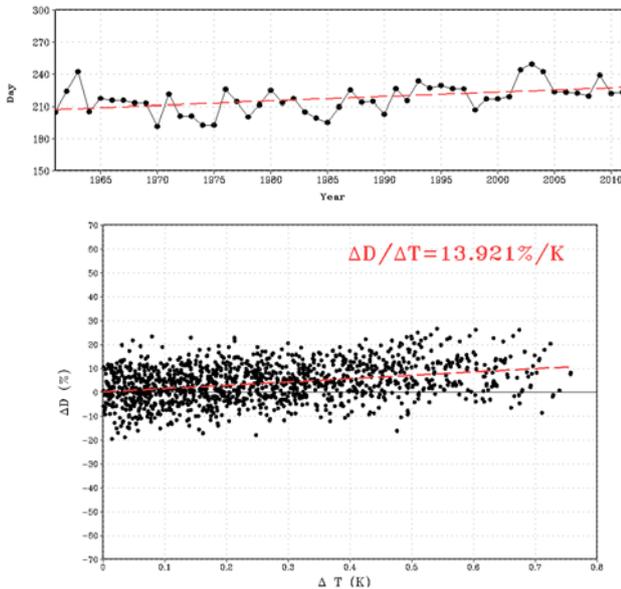


圖 3-1：(a) 1961-2011 年 51 年臺灣地區每年乾日日數統計和其變化趨勢（紅色虛線）；(b) 使用 inter-annual method 分析臺灣地區乾日日數變化與溫度變化之定量關係。 $\Delta D/\Delta T$ 為 13.92%/K，即溫度每升高 1K，臺灣地區乾日日數增加 13.92%。

但經統計發現，臺灣地區全年乾日日數的增加並未造成全年降雨量的減少，反而受到暖化影響會使得降雨量有些微增加。這也表明極端大雨有所增加，其降水量補充了由於極端小雨減少所造成的降水減少值。對於極端降水的定義是使用 1961-2011 年的年平均降雨量平均分為 10 等分，再由這 51 年不同的降雨強度年平均降雨量累積至等分雨量。其達到一等分雨量是的降雨即為該等分的降雨強度劃分。由此，我們可以將降雨強度分為十個等級，每個等級的降雨強度對於降水量的貢獻是相等的。由此，定義極端小雨為第一組，降雨強度 < 1.05mm/hr；極端大雨為第十組，降雨強度 > 13.15mm/hr。

使用 inter-annual method 對這兩個極端降雨與溫度之關係進行分析，如圖 3- 2 所示。極端小雨降雨量有減少的趨勢，即 $\Delta P/\Delta T = -56.63\%/K$ ，其 SEM 為 0.25；極端大雨的降雨量每升高 1K 其值增加 108.23%，SEM 為 0.61。這個結果表明，小雨的降水量在減少，這也證實了 Trenberth et al.(2003) 所提出的極端降水事件增加會導致降雨頻率和降雨時間減少，進而引發了乾旱問題。

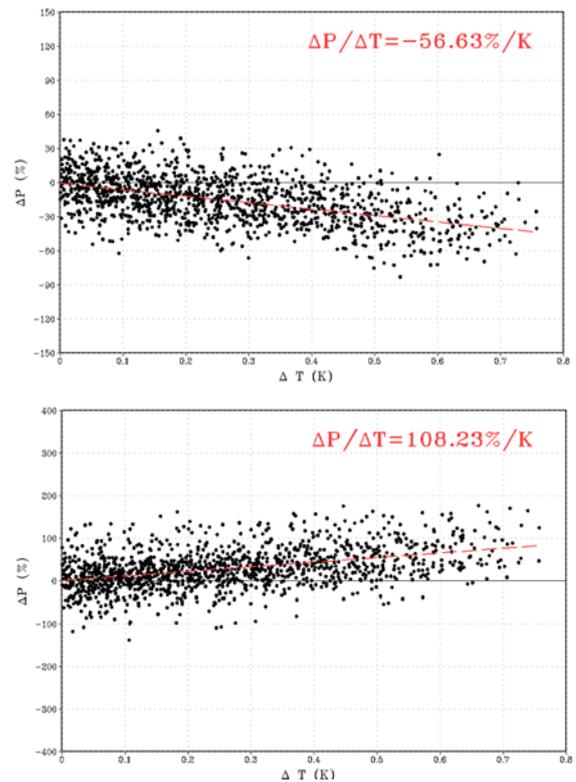


圖 3- 2：使用 inter-annual method 分析 1961-2011 年 51 年臺灣地區極端降水降雨量變化與溫度變化之定量關係。(a) 極端小雨降雨量變化與溫度變化之定量關係 $\Delta P/\Delta T$ 為 -56.63%/K；(b) 極端大雨降雨量變化與溫度變化之定量關係 $\Delta P/\Delta T$ 為 108.23%/K。

(二) 臺灣分區區域乾旱問題分析

臺灣島嶼的亞熱帶氣候主要受到東亞季風以及季風流場中受到短期擾動之影響。它的表現形式為氣候降雨在水平向的不同區域有不同的降雨形態分佈。其主要依靠底層的盛行流場，在中央山脈的迎風側有更大的降水量。此外，不同季節的降水量和降水形式主要依賴熱力分層和可用水汽量。(Chen et al., 2003)

對於 15 個測站分別統計其月平均降雨量圖，通過對於每個測站的月平均降雨統計以及地理位置，我們可以將臺灣分為三個區域，即北部、西南部和東部。北部包括淡水、台北、基隆、宜蘭和新竹，五個測站；西南部為台中、台南和恒春，三個測站；東部為花蓮、成功、台東和大武，四個測站。而對於澎湖、澎湖和蘭嶼三個外島測站，在此不僅進行考慮。進行分區後的各個區域的氣候統計與平均降雨如圖 3- 3 所示，其反應了不同區域的降水分佈特徵。根據各區域的月降雨量也可發現 5-10 月期間的降雨量對於全年降雨量的貢獻最大，分別計算其占全年降雨

量的比例為：北部 57.8%，西南部 86.6%，東部 78.8%。其大小均超過全年降雨量的一半以上。由此可將每年 5-10 月作為濕季，而 1-4 月以及 11-12 月為乾季。乾季的變化情況講成是對於臺灣地區乾旱問題的探討重點。

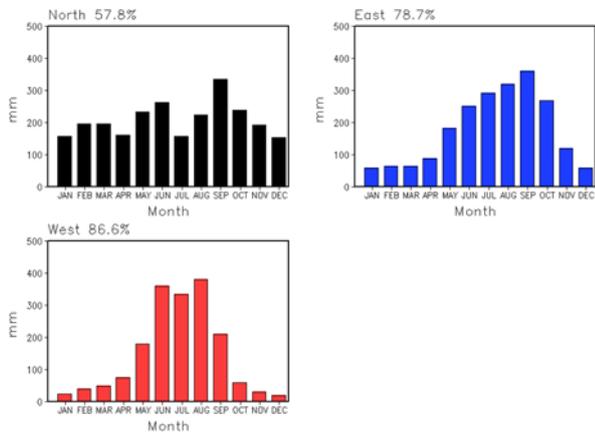


圖 3-3：中央氣象局 15 個測站分區後之北部（黑色）、東部（藍色）和西南部（紅色）月降雨量之氣候統計。各區域濕季（5 月至 10 月）降雨量所占百分比：北部 57.8%，東部 78.7%，西南部 86.6%。

首先，對於三個區域全年乾日日數進行統計得到三個區域的乾日日數均有不同程度的上升。北部的乾日日數由 196 天上升至 210 天左右，西南部則由 255 天增加到 277 天，東部則由 193 天增加到 227 天左右。那麼，對於乾季之乾日日數變化趨勢也有增加，分別北部由 90 天增加至 99 天，由 144 天增加至 149 天，東部由 95 天增加至 117 天。在西南部地區乾日日數最多，其乾日仍然有 5 天的增加，乾旱的地方有變更乾的情況發生。東部地區乾日的增加日數最為明顯為 22 天。

使用 inter-annual method 不同區域乾日日數變化與溫度變化進行定量分析得到北部為 19.32%/K (SEM=0.21)，西南部為 6.05%/K (SEM=0.10)，東部為 30.43%/K (SEM=0.13)。在各個區域均可得到溫度升高會使得乾季的乾日日數增加，並且東部的增加最為明顯。西南部地區的乾日日數最大，隨溫度升高其數值仍有增加，有“乾的地方變得更乾”的趨勢。

使用 SPI 對於各個區域乾旱變化進行分析。對於 SPI 的時間尺度選擇可以是 3,6,12,24 或者 48 個月。這可以代表任意典型影響五種可用水資源（土壤濕度、地下水、積雪、徑流和水庫蓄水）的少雨時間尺度。在此，使用時間尺度為 3 個月的 SPI 值，即降雨量對於土壤濕度造成影響。使用 SPI 全年之和的變化與溫度的變化關係定量分析得到：溫度每升高 1^oK，北部 SPI 值變化為 -13.69%/K (SEM 為 0.87)，

西南部為 45.28%/K (SEM 為 0.81)，東部為 -79.08%/K (SEM 為 0.77)。此結果表明在臺灣北部和東部區域隨溫度的升高 SPI 值減小，區域變乾，從而引起乾旱問題。但西南部區域的 SPI 值隨溫度增加卻又增加的趨勢，即西南部區域有變濕情況發生，這與乾日日數之分析結果不一致。進一步分析西南部區域的降水受到溫度之變化發現：溫度升高，西南部的中小雨降雨量減少為 -48.98% (SEM 為 0.95)，而大雨降雨量增加為 160.86% (SEM 為 2.08)。中小雨的減少造成乾日日數的增加，同時減少了降雨量；大雨的增加，即增加了該區域的降雨量，且其增加量足以彌補中小雨減少的降雨量。SPI 是對於一定時間尺度的月平均降雨量進行統計分析，其只能反映總降雨量之變化，而無法具體的反映小於該時間的降水之變化，進而造成對於西南部區域結果差異。

表 3-2：臺灣北部、西南部、東部，三個地區 1961-2011 年 51 年乾季連續多

連續乾日 日數	北部		西南部		東部	
	(%/K)	SEM	(%/K)	SEM	(%/K)	SEM
≥ 5	31.75	0.43	52.93	0.34	78.35	0.37
≥ 6	35.81	0.45	58.49	0.36	92.67	0.43
≥ 7	39.97	0.58	64.40	0.37	109.40	0.48
≥ 8	50.33	0.70	72.20	0.57	124.40	0.75

日乾日日數與溫度之定量關係

對於不同區域乾季連續不降雨日數的變化情況（表 3-2），連續 5 天以上不降雨日數均有不同程度的上升，直連續 8 天以上不降雨日數也同樣為正增長趨勢，即各個區域的乾旱程度均在增強。可以看到增長最大的區域為東部，溫度每升高 1^oK 連續 8 天以上不降雨日數增加了 124.4% (SEM 為 0.75)。其次是西南部地區，溫度每升高 1^oK 連續 8 天以上不降雨日數增加了 72.2% (SEM 為 0.57)。但需要注意到的問題是，西南部的平均連續 8 天以上不降雨日數越為 58 天，其遠大於東部的 26 天。那麼，根據以上變化趨勢可以看到，溫度每升高 1^oK 連續 8 天以上不降雨日數在西南部地區越增加 42 天，東部地區增加 32 天，即西南部地區有變得更乾的情況發生。

四·結論

根據 Trenberth 所提出的全球暖化與極端降水之關係，即溫度升高使得極端小雨減少，從而造成乾旱變化。本研

究使用 inter-annual method 對 1961-2011 年臺灣地區 15 個平地測站的日降水資料進行分析得到：在臺灣地區溫度每升高 1 K，極端小雨降雨量減少 56.63%/K (SEM 為 0.25)，極端大雨增加 108.23% (SEM 為 0.61)。極端小雨的減少造成了乾日日數增加。對臺灣地區之乾日日數與溫度之關係計算得到全球溫度每升高 1 K，乾日日數會增加 13.92% (SEM 為 0.10)，即乾日日數會增加約 30 天。並且其不同連續乾日日數，即乾旱強度，隨其增加也有不同成都的增強趨勢。

考慮到臺灣不同地區之月平均降水分佈不同，故將臺灣分為北部、東部和西南部，三個部份進行討論。對於三個區域其乾日日數均有增加。使用 SPI 對於三個區域之降水量進行分析發現：除西南部外，北部和東部均有隨溫度升高，SPI 分別變化 -13.69%/K (SEM 為 0.87) 和 -79.08%/K (SEM 為 0.77)，即北部和東部隨溫度升高均有變乾趨勢。這是由於受到 SPI 定義有限制，西南部並未表現出變乾趨勢。

進一步對三個區域在乾季之變化進行討論，得到每個區域在乾季之乾日日數也均有增加，即北部增加 19.32%

(SEM 為 0.21)，東部增加 30.43% (SEM 為 0.13)，西南部增加 6.05% (SEM 為 0.10)。比較不同區域乾季之乾旱強度變化，不同的連續乾日日數均有增加 (連續 5 天以上至連續 8 天以上)。根據不同區域連續 8 天以上不降雨日數之變化，北部增加 50.33% (SEM 為 0.70)，東部增加 124.40% (SEM 為 0.75)，西南部增加 72.20% (SEM 為 0.56)。但考慮不同區域之平均乾日日數不同，西南部乾日最多，東部次之。故計算其連續乾日之變化為西南部最為明顯，有“乾的地方變得更乾”之趨勢。

五·參考文獻

- Chen, Ch.-S., and Chen Y.-L., 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1323 - 1341.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D.A., and Vanyarkho, O. V., 1999: Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **80**: 429-438
- Liu, S. C., C. B. Fu, C. J. Shiu, J. P. Chen, and F. T. Wu, 2009: Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M. A.: A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1571 - 1592, 2002.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the Proc. Ninth*

Conference on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc., Dallas, TX, 233-236.

- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M. & Parsons, D. B. 2003: The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **84**, 12051217.