

全球暖化對臺灣未來水資源之母響評估

張昭銘* 國立高雄海洋科技大學海產資訊科技系
蔡雅琴 國立高雄海洋科技大學海產資訊科技系

*通訊作者 Email: cjming@mail.nkmu.edu.tw; Tel: +886-7-8100888 ext. 5307
(2014年3月4日收稿; 2014年4月10日定稿)

摘要

本文運用聯合國跨政府氣候變遷小組(IPCC)所執行未來百年之氣候預報實驗, 評估未來全球暖化對臺灣地區水資源之可能影響。分析結果顯示, 臺灣夏季溫度於未來百年, 將呈現100%機率之偏暖趨勢, 偏暖強度與未來全球溫室氣體含量成線性對應關係, 較高溫室氣體含量對應較高暖化程度。在夏季降雨方面, 臺灣地區降雨約有2/3 機率為偏多趨勢, 但與溫室氣體含量無線性對應關係。臺灣夏季降雨偏多主要來自東南側洋面之颱風活動增強, 預期於2100年侵臺颱風將倍增, 帶來更多颱風雨。颱風所帶來豪大雨, 不易為臺灣現行三大水資源系統(水庫、河川水、地下水)所用, 且會危及其執行效率, 因此建議強化建置家庭式與社區性的水資源小系統, 以達充份運用水資源之效。

關鍵字: 水資源, 全球暖化, 颱風雨

Abstract

The possible impacts of global warming on future water resources in Taiwan are surveyed from the climate prediction experiments conducted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Analysis results show that future summer temperature in Taiwan has a 100% chance of significant warming. The warming intensity is proportional to the concentrations of green-house gases. The future summer rainfall tends to have a 2/3 chance of significant increase. The increasing intensity is independent of the concentrations of green-house gases. The major processes of increasing summer rainfall appear to be related to more typhoon activity over the oceans to the southeast of Taiwan. Severe typhoon rainfall cannot be efficiently used by the current major water resource systems, including reservoirs, rivers, and underground water. On the other hand, it may deteriorate the present water resource

operations. It suggests to broadly establish individual small water resource systems in family and community to increase the total efficiency of water resource operation.

Keywords: Water resource, Global warming, Typhoon rainfall

一、前言

國際間當今最熱門環境議題之一，為全球暖化現象方興未艾，聯合國所屬的跨政府氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於2007之第四份評估報告指出，全球暖化之急速增速現象，百分之九十可能性為人為因素造成(IPCC, 2007)，而於2013年之第五份評估報告，更加確認此結果，指出高達百分之九十五可能性為人為造成(IPCC, 2013)。全球暖化所造成之衝擊是全面性，氣溫上升維持長期偏暖狀態，大氣與海溫上升，造成水氣蒸發量增加，偏暖之空氣又可容納更多水氣，在大氣水氣偏多背景之下，降雨量預期趨於偏多，Liu et al. 2009)分析1979-2007年降雨觀測資料指出，當全球平均溫度上升1度，全球降雨強度將增23%，在溫度與降雨產生連動變化之下，各地之氣候狀態與生態環境將產生明顯變化。

全球暖化對區域氣候之影響，因地而異，降雨之變化亦是如此。當氣溫升高之際，各地增溫幅度有所不同，一般而言，陸地高於海洋，北半球高

於南半球，極區高於熱帶(許, 2009)，溫差造成熱源中心之異動，伴隨而來之高壓與低壓距平，帶動各地氣流變化，水氣傳送隨之變化，進而影響各地降雨型態與強度。過去研究指出，臺灣氣候明顯受到大尺度環流變化之影響，包括氣溫與降雨(Chen et al. 2005; Chen et al. 2008a; Chen et al. 2010ab; Chen and Chen 2011)。在溫度方面，臺灣過去百年呈現長期增溫趨勢，其增溫幅度約為全球平均值(0.6oC/100年)之1-2.5倍(0.6~1.4oC/100年)，其中以夏季增溫最大，冬季最小(陳與汪2000)。在區域分佈方面，都會區增溫幅度約為全球平均值之2倍，人口稀少之非都會區則與全球平均值相當(Chen et al. 2008b)，此結果顯示，臺灣地區氣候明顯受到全球暖化的影響，而都會區增溫趨勢高於非都會區，其中強度差異值應與都會區人口密集所造成都市效應之額外增溫結果有關。

在降雨方面，臺灣主要雨季來自西南氣流相關之季風雨(梅雨、午後雷陣雨)與颱風雨(陳2006)。於1950-2008年之夏季中，臺灣地區之颱風降雨呈現上升趨勢(324 mm/100年)，季風雨呈現下降趨勢(-224 mm/100年)，整體而言，降雨總量為增加趨勢(100 mm/100年)，增加來源主要源自颱風雨之增加(Chen and Chen, 2011)，歸其主因則是夏季侵臺颱風呈現增加趨勢(+3.1個/100年)，相對於每年夏季2-3個侵臺颱風數目(中央氣象局, 2006)，預期2100年時，夏季侵臺颱風數會呈

現倍增現象，其衝擊當不容忽視。在全球暖化背景之下，未來氣候變遷將更形劇烈，預期颱風之強度與生命週期將更為加強(Emanuel 2005; Webster et al. 2005; Oouchi et al. 2006)，在颱風活動改變之背景之下，臺灣地區之降雨型態與水資源管理，勢必須有調適因應之預防措施。

經濟部水利署(2012)統計資料顯示，臺灣地區之平均年雨量約 2500 mm，相當 951 億噸水量，平均蒸發量為 21%，平均逕流量為 74%，地下水入滲量為 5%。逕流量中，78%直接入海，22%為地面水可供使用。地面水與地下水入滲量共計約 181 億噸，約佔總降雨量之 19%。這些水資源 20%屬生活用水，9%屬工業用水，71%屬農業用水。在水資源之使用方式，24%由水庫系統維持，56%由河川直接引水，20%為抽取地下水。為了防止地層下陷及各地重大交通工程之安全維護，地下水抽水量已從 1996 年之 30%降至 2010 年之 20%，而水庫用水則由 20%升到 24%，反應水庫功能之倚重日深。

然而如 2009 年莫拉克颱風之破紀錄降雨所引發之慘重災情，颱風強降雨易引發上游集水區之地形崩塌，大量土石下沖造成水庫淤積，一來有危水庫安全，二來降低水庫運作績效，顯現颱風等極端降雨事件，對臺灣水庫運作與水資源供應管理均會造成潛在威脅。在水資源供應穩定性的考量之下，未來全球暖化所可能引發的極端天氣對臺灣降雨量與降雨型態之影

響方式與程度為何，及其對水資源運作之可能衝擊為何，均值得進一步來探討。本文之主要目的即以未來全球暖化情境下臺灣地區降雨之可能變化為分析對象，並將其分析應用於探討臺灣未來水資源供應之可能變化，以供決策單位參卓擬定適宜之氣候變遷調適策略，期以維持臺灣水資源之安全運作管理，促進經濟發展與民生福祉。

二、研究資料與分析方法

(一) 研究資料

為了討論未來氣候變遷之可能狀態，本文運用聯合國 IPCC 所執行之氣候模式預報實驗進行分析，該模式係以 1990 年全球溫室氣體含量為基準，依據未來人口增加、能源使用、經濟活動、土地利用等不同變化情境預估做為背景，據以推估全球溫室氣體之可能變化情形，再將此情形做為環境背景，趨動海洋-大氣耦合模式進行數值預報，預測未來百年內之全球大氣與海洋之氣候變化狀態，進而分析全球暖化對各地區之衝擊情形，藉以分析未來全球暖化之下，各地之氣候變遷與環境變異之可能發展情形。

依據 IPCC(2007)所發佈之第四份年度評估報告結果，IPCC 預估未來全球暖化之情境分為三級，其 2100 年之全球溫室氣體含量分別為重度暖化之 860 ppm，命名為 A2 情境；中度暖化之 720 ppm，命名為 A1B 情境；輕度暖化之 550 ppm，命名為 B1 情境。相

較於 1990 年之 360 ppm，其增加倍率分別約為 2.5，2，1.5 倍。各情境 CO₂ 濃度之變化情形，如圖 1 所示。

本文依據 IPCC(2007)第四份評估報告所完成對 2000-2100 年之氣候變遷預測實驗進行分析，以臺灣鄰近區域之網格點區域平均值，取夏季溫度與降雨進行分析未來百年之可能氣候變化趨勢。IPCC 不同情境預報，分別由全球各主要氣象中心與研究單位執行，B1 情境共有 44 個模式預報實驗，A1B 情境共有 49 個預報實驗，A2 情境有 37 個預報實驗，個情境所選取之預報實驗如表 1 所列，並將作為本研究之分析對象。

(二) 分析方法

在本研究中，未來氣候之長期變化趨勢為分析重點，趨勢斜率之顯著程度可用 Student's *t* 方法檢驗 (Woodward and Gray, 1993; Chu and Wang, 1997)。設定某一時間序列 ($Y_t, t=1, \dots, n$) 依簡單線性回歸計算所得之截距 (intercept) 與斜率 (slope) 為 \hat{a} and \hat{b} ，則其斜率之標準誤差 (standard error) 可估算為：

$$SE(\hat{b}) = \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{a} - \hat{b}t)^2}{(n-2)\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2} \right]^{1/2}$$

其中 t 為時間， \bar{t} 為 t 之平均值。Student's *t* 統計量計算為 $\hat{b}/SE(\hat{b})$ ，當其顯著程度達到 0.05 等級時，即視為顯著個案。

表 1: 本研究所分析之 A1B、A2、B1 情境之各個模式

A1B		A2		B1		
bccr_bcm2_0	1	bccr_bcm2_0	1	bccr_bcm2_0	1	
cccma_cgcm3_1	1	cccma_cgcm3_1	1	cccma_cgcm3_1	1	
	2		2		2	
	3		3		3	
	4		4		4	
	5		5		5	
cccma_cgcm3_1_t63	1	csiro_mk3_0	1	cccma_cgcm3_1_t63	1	
cnrm_cm3	1	csiro_mk3_5	1	cnrm_cm3	1	
csiro_mk3_0	1	gfdl_cm2_0	1	csiro_mk3_0	1	
csiro_mk3_5	1	gfdl_cm2_1	1	csiro_mk3_5	1	
gfdl_cm2_0	1	ingv_echam4	1	gfdl_cm2_0	1	
gfdl_cm2_1	1	inmcm3_0	1	gfdl_cm2_1	1	
giiss_model_e_h	1	ipsl_cm4	1	iap_fgoals1_0_g	1	
	2		1		2	
	3		2		3	
iap_fgoals1_0_g	1	miroc3_2_medres	3	inmcm3_0	1	
	2		1		ipsl_cm4	2
	3		2		miroc3_2_hires	3
ingv_echam4	1	mpi_echam5	3	miroc3_2_medres	1	
inmcm3_0	1		1		2	
ipsl_cm4	1		2		3	
miroc3_2_hires	1	mri_cgcm2_3_2a	3	miroc3_2_hires	1	
miroc3_2_medres	1		4		2	
	2		5		3	
	3	ukmo_hadcm3	1	1		
mpi_echam5	1	miub_echo_g	1	mri_cgcm2_3_2a	2	
	2		2		3	
	3		3		4	
	4		4		5	
mri_cgcm2_3_2a	1	ncar_ccsm3_0	2	ukmo_hadcm3	1	
	2		3		1	
	3		4		miub_echo_g	2
	4		5		3	
	5		6		1	
ukmo_hadcm3	1	ncar_pcm1	2	ncar_ccsm3_0	1	
miub_echo_g	1		3		2	
	2		4		3	
	3	5	4			
ncar_ccsm3_0	1	ncar_pcm1	6	ncar_ccsm3_0	6	
	2		7		7	
	3		8		8	
	4		9		9	
	5		10		10	
	6		11		11	
	7		12		12	
ncar_pcm1	1	ncar_pcm1	1	ncar_pcm1	1	
	3		3		2	
	4		4		3	
ukmo_hadgem1	1				4	

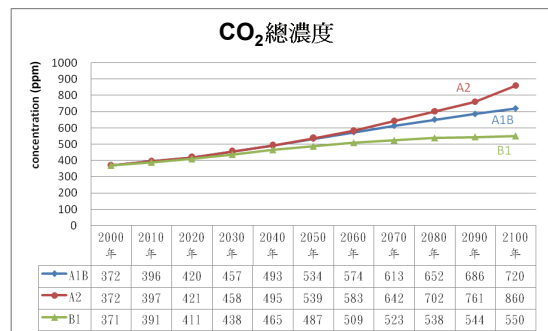


圖 1: IPCC A2, A1B, B1 情境之 CO₂ 濃度變化情形 (摘錄自 許 2009)

三、臺灣夏季溫度之變化趨勢

本文取每一個實驗預報結果，計算臺灣週邊區域 2.5° 網格點 (120°-125°E, 20°-25°N, 共計 3 x 3 = 9 網格點) 之平均值，以夏季(6-8 月)溫度之季節平均值為分析對象，計算 2000-2100 年時間序列之斜率，依此推估未來臺灣氣候之可能變化趨勢，並分析斜率之顯著程度。如表 2 所示，臺灣夏季溫度於 2000-2100 年間預測出現全面性顯著增溫現象，所有 49 個 A1B 實驗，37 個 A2 實驗，44 個 B1 實驗，均預報臺灣夏季未來將會顯著增溫。A1B 的 49 個實驗之溫度時間序列呈現如圖 2，各個實驗由於其模式氣候與預報特性不同，預報之溫度範圍自 296 K 到 303 K，約等於 23°C 到 30°C，與臺灣夏季氣溫之變化範圍相近。圖 2 各實驗雖清楚呈現明顯增溫趨勢，但其強度均有所不同，為了進一步量化未來之增溫範圍，本文計算每一個實驗之臺灣夏季溫度的百年溫度上升率，並計算所有實驗之平均值，以進行不同暖化情境之增暖程度比較。

圖 3 所示為臺灣夏季溫度百年增溫率之範圍及其平均值，B1 實驗之百年增溫範圍為 0.5875-3.7824°C，A1B 實驗之增溫範圍為 1.3005-7.3780°C，A2 增溫範圍為 1.8814-7.8051°C。B1，A1B，A2 三個實驗分別對應 550ppm、720ppm、860ppm，而其平均百年增溫率則分別是 1.8164°C、2.9873°C、3.8912°C，顯現於較高溫室氣體含量之下，增溫強度將更強，這也反應一般

觀念，較高溫室氣體含量將促成較強暖化現象，各情境實驗溫度平均值之百年時間序列如圖 4 所示，到 2100 年時，A2 之平均溫度為 303 K，A1B 約為 302.5 K，B1 約為 301.5 K，相當於 30°C，29.5°C，28.5°C，上述分析結果佐證 IPCC 所推論目前全球暖化現象之主要成因為溫室氣體之增加。

表 2：IPCC 不同暖化情境所預報臺灣夏季

(JJA)溫度(Tas)顯著偏暖(+)與顯著偏冷(-)之個案數分佈表。

溫度 (Tas)	JJA			個案數
	A1B	A2	B1	
+	49	37	44	134
-	0	0	0	0
機率	49/49 (100%)	37/37 (100%)	44/44 (100%)	

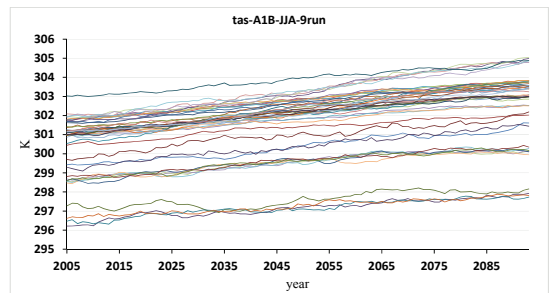


圖 2：IPCC A1B 情境所預報臺灣地區溫度呈現偏暖趨勢實驗之溫度變化趨勢圖。(單位：K)

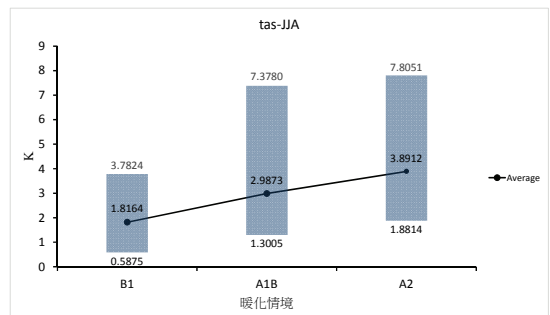


圖 3：IPCC 不同暖化情境所預報臺灣夏季溫度之百年增溫率範圍(柱狀圖)及平均值(實線)。(單位：K)

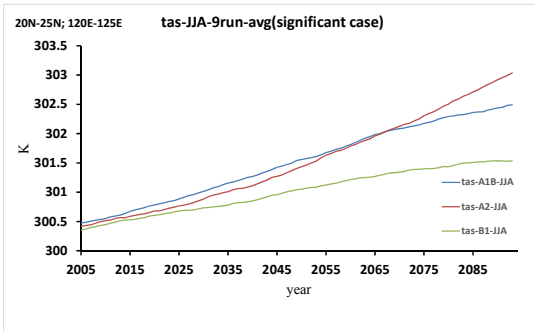


圖 4：IPCC 不同暖化情境所預報臺灣夏季溫度之所有實驗平均值的暖化趨勢圖。(單位：K)

四、臺灣夏季降雨之變化趨勢

依照前述對夏季溫度之分析方法，本文計算臺灣區域(120°-125°E, 20°-25°N) 3x3 網格點之夏季降雨平均值，計算各情境實驗降雨預報之 2000-2100 年時間序列之斜率，並依其統計顯著程度，將顯著正斜率與顯著負斜率個案分類分析，其結果如表 3 所示。於 A1B 的 49 個預報實驗中，顯著降雨偏多為 34 個，顯著降雨偏少為 8 個，A2 的 37 個預報實驗中，顯著降雨偏多為 24 個，顯著降雨偏少為 4 個，B1 的 44 個預報實驗中，顯著降雨偏多為 29 個，顯著降雨偏少為 8 個，整體而言，顯著降雨偏多個案數明顯高於顯著降雨偏少個案數，其比例於 A1B 預報實驗為 $34/49=69\%$ ，A2 預報實驗為 $24/37=64\%$ ，B1 預報實驗為 $29/44=66\%$ ，佔所有實驗約 2/3 強，呈現為主要特性。由此結果可推論，未來於 2000-2100 年間，臺灣夏季降雨主要特性為降雨偏多趨勢，其可能性高達 64-69%，約 2/3 強。

本文針對降雨之預報特性分析，將以偏多趨勢之主要特性為分析對象，圖 5 所示為 A1B 實驗降雨顯著偏多的

34 個預報實驗之 2000-2100 年時間序列，整體而言，其增加趨勢雖不若夏季溫度明顯，但仍為緩慢增加現象。各實驗降雨偏多趨勢之範圍及平均值如圖 6 所示，B1 實驗之百年增加趨勢為 0.0023-1.6311mm，A1B 實驗為 0.0134-3.7022mm，A2 實驗為 0.0163-1.4287mm，A1B 實驗之預報變化範圍最大，A2 最小。就平均值而言，B1、A1B、A2 之百年降雨增加趨勢分別為 0.2972mm、0.5453mm、0.2048mm，以 A1B 最高，B1 其次，A2 最小。夏季溫度之增溫趨勢與溫室氣體含量呈現線性對比關係，高溫對應較高溫室氣體含量，但降雨與溫室氣體含量則無此線性對應關係，降雨係受環流變化與水氣傳送影響，二者均會對應熱源變化而變異，而熱源的分佈對比，方是決定環流變化的機制，總熱源並非決定因素。溫室氣體增多主要反應於總熱源的增加，而非熱源分佈的差異，因此降雨與溫室氣體含量未能呈現線性對應關係。

表 3：IPCC 不同暖化情境所預報臺灣夏季

(JJA)降雨(Pr)顯著偏多(+)與顯著偏少(-)之個案數分佈表。

降雨 (Pr)	JJA			個案數
	A1B	A2	B1	
+	34	24	29	89
-	8	4	8	20
機率	34/49 (69%)	24/37 (65%)	29/44 (66%)	

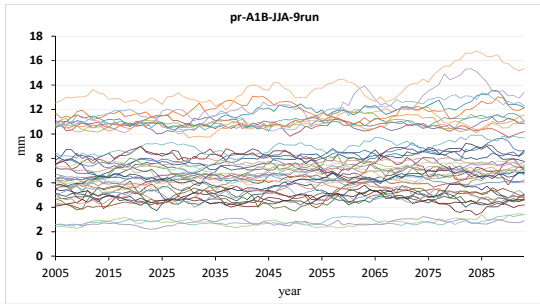


圖 5：IPCC A1B 情境呈現臺灣夏季降雨增多趨勢之時間序列圖。(單位：mm)

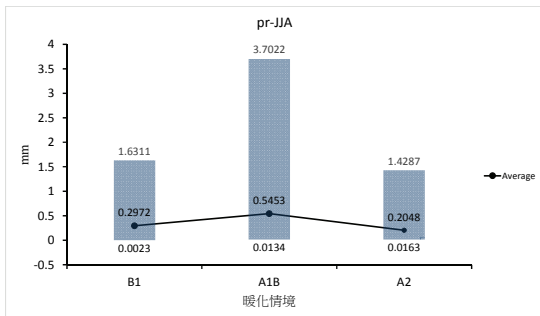


圖 6：IPCC 不同暖化情境所預報臺灣夏季降雨之百年增加率之範圍(柱狀圖)及平均值(實線)。(單位：mm)

五、夏季降雨之時空間分佈特性

IPCC 實驗預報有超過 2/3 機率顯示臺灣夏季降雨為偏多趨勢，由於臺灣夏季降雨主要來源分為季風雨與颱風雨兩種，其佔總降雨之百分比分別為 47.5%與 52.5%(Chen et al. 2010 b)，而季風雨包含西南氣流降雨與午後雷陣雨，天氣系統多由臺灣西南側之南中國海往臺灣移入。另一方面，颱風雨則由颱風侵臺時所引發之降雨，颱風生成位置主要位於熱帶西太平洋與菲律賓東側海面，中央氣象局(2006)將颱風侵臺路徑分為 9 類(圖 7)，其中第 1 類到第 6 類的路徑均是由臺灣東南側

海面往臺灣移入，其所佔比例約為全部侵臺颱風之 80% (中央氣象局 2006)，由此可見颱風侵臺之主要區域為自東南側海域移入臺灣，與季風雨發生於西南側海域之空間分佈有所不同，此空間分佈差異可供進一步研究未來降雨偏多之主要時空間分佈特性，藉此分析對應降雨之主要類型。

為了分析臺灣未來降雨偏多之主要降雨類型，本文選取 A1B 實驗具有降雨顯著偏多趨勢的 34 個實驗，取其 2000-2100 年夏季平均降雨，計算 34 個實驗之平均值，再運用 9 年滑動平均值，濾去年際變化分量，以緩慢變化之年代際分量來分析變化趨勢。為了同步顯現降雨之時空間分布特性，本文選取 90°-180°E，EQ-50°N 範圍之降雨量，執行經驗正交函數分析，其結果顯現於圖 8。第一模態變異量佔全部變異量之 85%，可反應其主要變化特性，故可用來解釋未來變化趨勢之主要特性。第一模態之時間序列(圖 8a)呈現一條遞增趨勢，反應未來變化趨勢幾近線性狀態。而其對應空間分佈型態(圖 8b)幾乎全部為正值，反應未來於溫室氣體增多背景之下，亞洲-太平洋區之夏季降雨將因高溫而傾向增多。在空間型態中，主要增加區域為熱帶西太平洋-中太平洋地區(140°-180°E)，此區域約為所謂的暖池區，另一顯著地區，位於臺灣東南側的熱帶洋面(120°-140°E, 10°-20°N)，此區域為主要颱風形成區域，而颱風形成後，其主要路徑之一則為沿著太平洋副熱帶高壓南側之東

風帶往西直行朝向臺灣、亞洲大陸前進。從圖8之分析可推估，未來臺灣地區之夏季降雨增多趨勢的主要來源為臺灣東南側颱風活躍地區的降雨，且呈現線性遞增特性，這結果隱喻未來臺灣夏季將有更多颱風自臺灣東南側洋域帶來更多颱風雨進入臺灣，促使臺灣地區夏季降雨增加。Chen and Chen(2011)研究指出，臺灣夏季降雨於過去 60 年的全球暖化背景之下亦產生颱風雨偏多的趨勢，而此颱風雨增加趨勢預期於全球暖化進行的未來 100 年內，料將持續增加，而使臺灣夏季降雨呈現增加趨勢，如圖8分析結果所示。

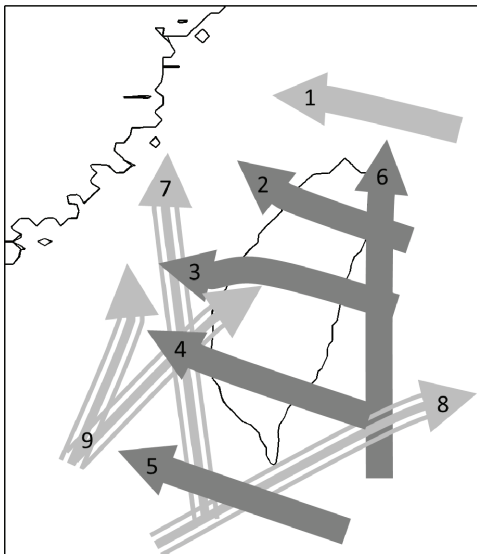


圖 7: 依中央氣象局(2006)所定義之侵臺颱風 9 種路徑。

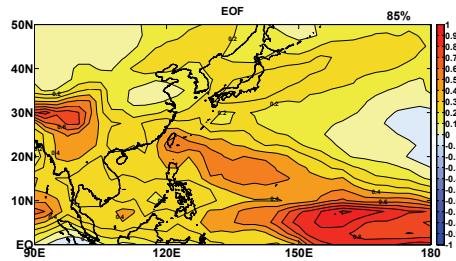
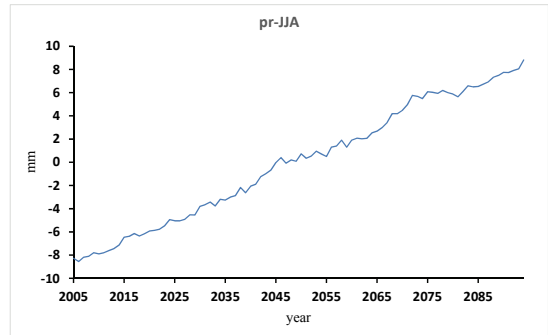


圖 8：IPCC A1B 實驗夏季降雨平均值之第一模態：
(a)時間序列(單位：mm)，(b)空間分佈圖。
此模態佔所有變異量之 85%。

六、結論

全球暖化為當前全球最熱烈討論的氣候與環境議題，其形成原因主要與人類活動所造成溫室氣體增加息息相關，且此暖化現象預期將隨著人類經濟與科技發展而持續進行。全球暖化之直接衝擊為溫度上升，間接衝擊則為全球環流變化與降雨型態改變，臺灣為一海島，主要水資源來自降雨，未來全球暖化持續進行之下，對臺灣降雨與水資源供給之影響方式為何，值得深入關心，期以協助擬定因應全球暖化之水資源調適策略。

本研究以 IPCC 所執行 2000-2100 年氣候預報實驗為分析對象，探討未來百年內臺灣夏季降雨之變化趨勢與對應型態，期以提供水資源管理單位因應之參考資訊。研究結果顯示，於

2000-2100 年間，臺灣未來夏季溫度將呈現全面(100%)增暖趨勢，其增加幅度與未來溫室氣體含量呈現線性對應關係，溫室氣體含量愈高，增暖幅度愈大。在降雨方面，未來臺灣夏季降雨約有 2/3 機率為增加趨勢，但其增加幅度與溫室氣體含量無線性對應關係。降雨特性分析結果顯示，亞洲-西太平洋地區夏季降雨增加主要呈現線性遞增趨勢，主要增加區域有二，一為國際換日線西側之熱帶暖池區域，另一為臺灣東南側之西太平洋海域，且呈現東南-西北方向延伸之雨帶，此雨帶對應該區颱風活動之主要生成區域與移動路徑，且朝向臺灣而來，隱喻未來臺灣夏季降雨增加之主要來源為西太平洋颱風活動變多，且自臺灣東南海域移入臺灣帶來更多颱風雨，而使臺灣夏季降雨於未來呈現增加趨勢，此分析結果與過去 60 年全球暖化背景之下，臺灣地區颱風雨呈現顯著增加趨勢之分析結果互為一致。

預期未來臺灣夏季之颱風活動與降雨將更為強烈，在此背景之下，颱風降雨一般而言為顯著豪大雨，易於水庫集水區造成地表沖刷、土石崩塌，而使水庫淤積。在豪大雨持續之下，水庫蓄水功能僅能容納部份雨量，大部份雨量仍為直接入海。另一水資源系統為河川水之抽取使用，但在颱風降雨期間，上游土石沖刷使河水濁度大量提升，限制淨水廠無法抽取河水運作，故其功效亦未能發揮。唯一有所助益之處為第三水資源系統之地下

水貯存，颱風降雨量雖大，但臺灣河川因中央山脈之高聳坡度，屬荒溪型河川，大量颱風雨約在數天之內均會流入海洋，使降雨滲入地下水之時間有限，使其貯存量亦受限，況且在過去臺灣超抽地下水而使地層產生明顯下陷現象，如林邊、雲林等地區，因此地下水做為水資源主要來源之選項，亦是在漸次下降。從上述分析，若是未來臺灣地區水資源須仰賴颱風雨為主要來源時，三大水資源系統：水庫、河川水、地下水，其整體功效均會降低，在此情境之下，國家宜從三大水資源系統之外，化整為零，建立小的水資源系統，例如民間的雨水貯存系統，中水的回收利用，家庭節水裝置，甚至降低自來水的漏水率等，如此方能將得來不易的颱風雨，以全島性、全面性的水資源系統善加利用，方能有效面對未來全球暖化與氣候變遷對台灣水資源的衝擊。

參考文獻

- Chen, J.-M, F.-C. Lu, S.-L. Kuo, and C.-F. Shih, 2005: Summer climate variability in Taiwan and associated large-scale processes, *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 499-516.
- Chen, J.-M, T. Li, and C.-F. Shih, 2008a: Asymmetry of the El Niño-spring rainfall relationship in Taiwan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 297-312.
- Chen, J.-M., F.-C. Lu, and C.-F. Shih, 2008b: The Decadal oscillation of fall temperature in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 497-504.

- Chen, J.-M., J.-L. Chu, C.-F. Shih, and Y.-C. Tung, 2010a: Interannual variability of circulation-rainfall relationship in Taiwan during the Mei-yu season, *Int. J. Climatology*, 30, 2264-2276.
- Chen, J.-M., T. Li, and C.-F. Shih, 2010b: Tropical cyclone and monsoon induced rainfall variability in Taiwan. *J. Climate*, 23, 4107-4120.
- Chen, J.-M., and H.-S. Chen, 2011: Interdecadal Variability of Summer Rainfall in Taiwan associated with Tropical Cyclones and Monsoon, *J. Climate*, 24, 5786-5798.
- Chu, P.-S., and J.-B. Wang, 1997: Recent climate change in the tropical western Pacific and Indian Ocean region as detected by outgoing longwave radiation records. *J. Climate*, 10, 636-646.
- Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686-688.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: The fourth assessment report "Climate change 2007: The Physical Science Basis", 996PP.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013: The fifth assessment report "Climate Change 2013: The Physical Science Basis", 1535PP.
- Liu, S. C., C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu, 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*, 36, L17702, doi: 10.1029/2009GL040218.
- Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, and A. Noda, 2006: Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 259-276.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844-1846.
- Woodward, W. A., and H. L. Gray, 1993: Global warming and the problem of testing for trend in time series data. *J. Climate*, 6, 953-962.
- 中央氣象局, 2006: 氣象宣導系列合輯, 交通部中央氣象局, 112 頁。
- 許中一, 2009: 全球暖化對未來氣候、颱風、洋流之可能影響, 國立高雄海洋科技大學航海科技研究所, 碩士論文, 69 頁。
- 陳昭銘, 2006: "氣候變異", 氣象與工程系列叢書, 謝信良主編, 財團法人中興工程科技研究發展基金會發行, ISBN-13:978-986-7142-24-5, 63 頁。
- 陳昭銘、汪鳳如, 2000: 臺灣地區長期暖化現象與太平洋海溫變化之關係。 *大氣科學*, 28, 221-242.
- 經濟部水利署, 2012: 百年臺灣重大水利建設紀要, 經濟部水利署, ISBN-978-986-03-2978-0, 312 頁。