

# 台灣地區土地利用與氣候變遷 對長期區域氣象場變化之影響

林冠伶 林沛練  
國立中央大學大氣物理研究所

## 摘 要

台灣地區近三十年來氣溫增加有明顯增快的現象，除了全球溫室氣體濃度增加造成氣候變遷的影響外，區域人為活動對於環境進行開發，影響土地利用，使地表-大氣間能量收支變化，也會影響局地天氣和氣候的變化，本文試探討長期氣候變遷與土地利用對台灣區域尺度氣象場的影響。因為土地利用資料的限制，本研究僅討論近二十年台灣地區土地利用變化所造成的影響，選擇WRF模式中中原有的USGS當作1990年代的土地利用代表，並重新處理MODIS衛星資料，使用2001年與2011年資料當作2000年代與2010年代的土地利用資料(命名為MODIS2001與MODIS2011)，以更新整個東亞地區之土地利用。和內政部資料相比，使用MODIS衛星土地利用資料更能真實的代表台灣地區實際土地利用情形，而MODIS2001和MODIS2011只有在零星地區有所差異。模擬近二十年之氣候變遷，秋季太平洋高壓增強，東北季風減弱，相對的西南風分量使南方富含水氣的氣流與原有的東北季風於台灣東部外海輻合，使東半部地區降水增加。溫度方面，十月全台溫度增高。絕大部分的模擬變化趨勢與實際觀測之統計變化趨勢一致，因此使用WRF進行台灣地區的氣候變遷模擬實驗有其可行性。

關鍵字：氣候變遷、土地利用

## 一、前言

《臺灣氣候變遷科學報告2011》(許等, 2010)評估臺灣整體的氣候變遷趨勢中提到，使用臺灣六個具有百年以上的氣象測站資料計算，近三十年(1980年-2009年)來氣溫增加的速率明顯加快，幾乎是百年增溫趨勢的兩倍，這個結果提醒了我們近代氣候變遷加速的事實。而因為人為活動進行的開發，大大的改變了地貌，臺灣地區土地利用的改變所產生的都市熱島效應問題也被廣為討論(Lin et al., 2008; Lin et al., 2011; Cheng et al., 2013)，對於更新土地利用的議題，前人研究多侷限於個案討論，但土地利用的改變過程是長時間且具有連續性的，這些土地利用的改變是否也會對區域氣候的長期變化造成影響，很值得進一步研究。

Cheng et al. (2014)與Shiu et al. (2009)提到，台灣地區之氣候變化除了受全球氣候變遷影響外，局地之土地利用變化也是影響區域尺度氣象特徵之重要參數，如何將台灣地區長期土地利用變化的效應加入氣象模式中依然需要考慮許多細節，在缺乏完整長期土地利用變化資料下，本研究將嘗試討論1990-2012近二十年之土地利用與氣候變遷對於台灣地區氣象因子長期變化之影響。

## 二、實驗設計

土地利用之相關研究需要在弱綜觀系統下較能凸顯其重要性，台灣位於亞熱帶地區(北緯21-25°E)，五、六月受梅雨鋒面影響，七、八、九月常有颱風侵襲，十一、十二、一月受東北季風影響，皆為強綜觀系統，因此選取系統相對於其他月份較弱之秋季(十月)作為研究月份。

為研究近二十年之秋季之氣候變遷，以連續三年的相同月份進行數值天氣模擬，以此代表一個年代相同月份的氣候特性。選取1990、1991、1992年做為1990年代的代表年份，同理，選取2010、2011、2012年做為2010年代的代表年份，進行十月份的長期氣候模擬，藉此分析近二十年之氣候變化特徵。

近年來亞洲地區的人為開墾與都市發展快速，模式中的土地利用型態在長期固定下會有與實際差異太大疑慮。前人研究 (Lin et al., 2008; Lin et al., 2010; Cheng et al., 2013)提到，模式中使用不同的土地利用會影響氣象模擬的結果。在希望進行數值氣象模擬期間，土地利用能夠較為接近真實情形的前提下，本研究中以每十年更新一組的土地利用資料，分別以

USGS代表1990年代之土地利用，以MODIS2001代表2000年代之土地利用，以MODIS2011代表2010年代之土地利用，使用上述三組資料代表近二十年十年際的土地利用型態，以呈現土地利用之變化。

使用中尺度氣候模式 WRF 3.4.1 版進行氣象場模擬，為三層巢狀網格(圖 1)，水平網格解析度分別為 27(d01)、9(d02)、3(d03)公里，水平網格數為 142 x 121(d01)、133 x 133(d02)、100 x 151(d03)，第一層網格範圍包含日本、韓國、中國、菲律賓等東亞地區，第三層網格包含整個台灣，垂直分層為 33 層。使用 ECMWF ERA-Interim (Simmons et al., 2007)資料為初始條件與邊界條件，模擬時間為 1990-1992 年與 2010-2012 年的十月。

### 三、土地利用

WRF 模式中預選的土地分類為 USGS，此資料是由美國地理測量土地利用系統利用 AVHRR 衛星於 1992 年 4 月至 1993 年 3 月之觀測資料所組成，資料解析度為 1 公里，土地利用分類為 24 種。但隨著時代演進，USGS 的資料並沒有隨著 WRF 的版本更新，Lin et al. (2008)提到使用 USGS 資料代表現代台灣會有過時的問題。

在 WRF 3.1 版有隨之新發表的土地利用分類—MODIS，此為使用 2001 年 MODIS 衛星資料所建構之全球土地利用資料。MODIS 資料能夠呈現絕大部分之台灣地區土地利用情形，但前人研究(蔡, 2010; 許, 2011; Cheng et al., 2013)表示，在台灣地區使用 WRF 內建之 MODIS 土地利用會有西半部地區都市範圍過大的情形，對於資料的真實性有所懷疑。

由上述討論可知，土地利用對於模擬結果佔有重要性，但單純使用 WRF 模式中內建之土地利用並無法呈現近年台灣地區真實的土地利用情形，因此本研究重新處理土地利用資料，期望使用更新後的土地利用能夠更貼近真實情形。使用 MODIS COMBIME Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid (MCD12Q1.051)之第一類土地覆蓋:IGBP 全球植被分類方案 (Friedl et al., 2002)，資料於美國地質調查局網站之資料庫下載 ([https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/)

data\_pool)，為 Terra 衛星與 Aqua 衛星所反演組合而成，2001 年至 2012 年每年皆有一組，為全球高解析度 500 公尺資料，土地利用型態共有 17 種。

前人研究中，改變台灣地區土地利用大多為僅更改最高水平解析度網格下的土地利用資料，但亞洲地區近年來快速的都市擴張，大區域範圍的土地資料應該也要有相對應的更新才能貼近實際情形，以 MODIS 2001 年資料(簡稱為 MODIS2001)代表 2000 年代之土地利用，以 MODIS 2011 年資料(簡稱為 MODIS2011)代表 2010 年代之土地利用，以評估近二十年的土地利用變化，並以模式中的 USGS 資料(1992-1993 年 AVHRR 衛星)代表 1990 年代之土地利用。由於 MODIS 之土地利用分類與 USGS 並不完全相同，參考蔡等(2010)之土地利用類別對應之方法，將 MODIS 土地利用分類對應到 USGS 之分類，以便後續討論。

比較台灣地區 MODIS2001 與 MODIS2011 之土地利用差異，兩者只有在宜蘭、彰化、雲林與高雄山區有些許差異。

使用內政部國土繪測中心國土利用調查成果資訊 (<http://lui.nlsc.gov.tw/LUWeb/>)之統計資料，以了解台灣地區實際土地利用分類之變化。分為民國 82-84 年度(1993-1994 年)調查資料與 95-97 年度(2006-2007 年)調查資料。將台灣地區之農業用地、建築用地與工業用地所占面積與台灣地區總調查面積相除，以得所占總面積的百分比。82-84 年度的農業用地占 36.84%，建築用地與工業用地占 3.97%；95-97 年度之農業用地占 22.21%，建築用地與工業用地占 5.90%，由資料可知，在兩次土地利用調查中相隔的 12 年期間，台灣地區農業用地減少、建築與工業用地增加的情形。將國土調查之 95-97 年度資料與 USGS、MODIS2011 於 domain3 台灣地區資料相比(表 1)，由於分類上的差異，將國土調查之建築用地加上工業用地與模式中土地分類為都市之區域相比。MODIS2011 的都市地區占總面積之 6.93%，農業用地為 23.45%，遠比 USGS 的 0.12% 與 66.83% 更符合真實土地利用調查之所占比例，因此在 2010 年代使用 MODIS2011 資料有其真實意義。

### 四、結果與討論

首先利用 ECMWF 再分析資料探討近二十年十月之東亞地區大尺度環流特徵，分析 2010-2012 年十月與 1990-1992 年十月 1000 百帕的重力位高度、溫度、風速。十月的低層高壓中心位於大陸內陸地區，溫度由西北向東南遞增，中國沿海與台灣近海地區受高壓影響，吹東北季風。為了解近二十年之氣象場變化特徵，以 2010-2012 年減去 1990-1992 年，比較其差異，由於大陸地區西伯利亞高壓減弱，台灣地區重力位高度降低，而東經 130 度以東重力位高度增加。由於高壓減弱，台灣東南邊太平洋與南海地區有相對的西南風較強，也就是東北風分量減低的現象。整個東亞地區的溫度皆為上升，推論這樣的溫度上升與分析時期之東北季風減弱，北方冷空氣較難以到達南方區域，以及溫室氣體增加造成整體平均溫度上升所致，台灣地區溫度上升約 0.6-1.0 °C。

接著是使用 WRF 模式於 domain 1 模擬結果的討論，1990 年代與 2010 年代的土地利用皆為 USGS，探討 2010-2012 年十月與 1990-1992 年十月近地面氣象場之變化，使用海平面氣壓、十公尺高風速、兩公尺高溫度、降雨進行討論。由海平面氣壓可知，WRF 模擬中有顯現出西伯利亞高壓減弱、東北季風減弱的特徵(圖 3a、d)。溫度變化方面，WRF 模擬結果(圖 3b、e)與 ECMWF 皆有相同增溫的趨勢。降雨方面，在整個大陸沿岸與台灣地區皆有降雨增加的情形(圖 3c、f)。由以上分析可知，雖然 WRF 模式是一次模擬一個月的長時間的積分，但依然可以保留大尺度的特徵，有能力重現東亞地區秋季大尺度的變化情形。也因為 WRF 模式於大尺度(domain1)的模擬結果與 ECMWF 再分析資料有氣象場變化趨勢一致的情形，因此認為這樣的模擬結果為可信的，有信心繼續討論台灣地區(domain3)的氣候變遷情形。

使用中央氣象局 13 個台灣地區局屬平地測站(淡水、台北、基隆、新竹、梧棲、嘉義、台南、高雄、恆春、宜蘭、花蓮、台東)之逐時觀測資料進行驗證分析，所選取之測站均勻分布於台灣地區北、中、南、東部，足以代表台灣地區平地氣象特徵。本研究主要目的在討論人為活動改變土地利用對於氣象模擬的影響，而根據 MODIS2000 與 MODIS2011(圖 2b、c)之土

地利用分類圖，可發現台灣地區山區變化不大，因此重點在於平地地區之土地利用差異，在此選用的氣象測站海拔高度皆小於 300 公尺，由於模擬結果需要藉由觀測值檢驗，選取之 13 個實際測站高度與模式內插至測站位置的高度兩者的差異皆小於 50 公尺，以增加統計資料的可信度。使用平均偏差值(Bias)和均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)做模擬值與觀測值的資料統計。

在相同設定下，使用不同土地利用資料(USGS 與 MODIS2011)進行長時間模擬，模擬時間為 2010-2012 年十月。許多測站在 USGS 的分類中為農田，而 MODIS2011 將之區分為都市，這樣差異會使後者(土地利用分類為都市之測站)模擬溫度增高、風速降低、水氣量降低。比較兩組模擬於 13 個測站之模擬結果，MODIS2011 之模擬較 USGS 溫度高 0.6°C，風速低 0.9 ms<sup>-1</sup>，比濕低 0.3 gkg<sup>-1</sup>

將模擬值與實際觀測值進行資料統計，表 2 為土地利用為 USGS 與 MODIS2011 之 WRF 模式模擬溫度、風速、混合比相較於實際觀測值的資料統計結果。兩組模擬的誤差皆在可信範圍內，但在風速有明顯差異，USGS 的風速偏差值為 1.6 ms<sup>-1</sup>，均方根誤差為 2.9 ms<sup>-1</sup>，MODIS2011 的風速偏差值降低為 0.9 ms<sup>-1</sup>，均方根誤差降低為 2.0 ms<sup>-1</sup>，由此可知，使用 MODIS2011 的資料可讓風速更貼近實際觀測值。

討論氣象場於日間與夜間的差異。根據中央氣象局之日出日落時間，並考慮地表受太陽加熱之影響，定義日間為早上八點到晚上七點，夜間為晚上八點到隔天早上七點。在相同的模式設定與氣象條件下，分別使用 USGS 與 MODIS2011，進行 2010-2012 年十月的 WRF 模擬，將 MODIS2011 模擬結果減去 USGS 模擬結果，探討使用這兩種不同土地利用對於台灣地區日間與夜間氣象場之影響。

首先是白天的分析，MODIS2011 所給定的土地利用分類在西半部地區有較多的都市分布，而 USGS 在西半部地區較多為灌溉田(圖 2a 與圖 2c)。因為地表粗糙長度的設定在都市較長，農田較短，造成土地利用為都市的地區近地面風速較低，分類為農田則風速較高，所以 MODIS2011 相較於 USGS 會有風速較低的

情形，由於十月份之平均風向為東北風，兩者相減後則有相對的西南風分量(圖 4d)。

因為土地利用改變了蒸發散的能力與可用水氣量，相較之下農田的蒸發散作用強，都市則較弱，這使得兩者相減後有潛熱通量降低，可感熱通量升高(圖略)的情形。可感熱通量意指地表與大氣間的熱能量交換，因此空氣溫度越高或地表與氣溫溫差越大會有較大的可感熱通量，因此溫度較高的 MODIS2011(圖 4a)有潛熱通量增加的情形。

在夜間部分，因為都市有許多建築與柏油路面，熱含量較高，可將日間太陽照射所加熱的能量保留到夜間，都市範圍較多的 MODIS2011 在西半部地區溫度較高(圖 5a)。且和白天(圖 4a)相比，可以發現夜間溫度差異比白天明顯，可視為都市熱島效應在夜間的展現。因為在夜間沒有太陽的加熱作用，邊界層高度受動力主導，風速為主要影響邊界層高度的因子，由於土地利用改定之差異，MODIS2011 的夜間風速依然相對較低(圖 5d)。

接下來比較二十年來單純氣候變遷的影響，使用相同模式設定與土地利用資料(皆為 USGS)下，以 2010-2012 年十月減掉 1990-1992 年十月，比較二十年際間，日間、夜間氣象模擬結果之差異。台灣地區之日間溫度升高、東北季風減弱(圖 4c、f)皆與大尺度的變化趨勢相同(圖 3d、e)。夜間部分，溫度、風速的變化(圖 5c、f)皆與日間類似。

除了上述將土地利用變化的差異與單純氣候變遷對於氣象場的差異分開討論外，如果同時考慮這兩個變因，模擬結果是否比較合理？接下來將分為兩種情境，第一種為同時考慮土地利用型態差異與氣候變遷，使用 2010sMD11 減掉 1990sUSGS；第二種為單純考慮氣象場變化，以 2010sUSGS 減掉 1990sUSGS，並將兩者與實際觀測資料相比，藉此了解兩種情境下的氣象場變化與觀測之異同。

首先是日間氣象場變化，圖 4 與圖 5 的圓圈為中央氣象局實際觀測之 2010-2012 年十月與 1990-1992 年十月(與模擬實驗相同時間)溫度及風速的變化，其顏色與模擬結果(背景色)之色標相同，圓圈中的顏色越不明顯代表模擬結果與真實觀測越相近。圖 4b、e

為同時考慮土地利用與氣候變遷，圖 4c、f 為只考慮單純氣候變遷。日間溫度變化，2010sMD11-1990sUSGS 溫度變化較大的部份位於台灣西半部與東半部地區，而 2010sUSGS-1990sUSGS 的溫度增加多在東半部地區，對照中央氣象局實際觀測值，溫度變化數值較大的測站為嘉義、台中、新竹、宜蘭，並不僅侷限於東半部地區，因此同時考慮氣候變遷與土地利用與實際溫度變化較為接近。風速部分，由氣象局資料可知(圓圈部分)，日間風速在東北部地區(基隆、花蓮、宜蘭)有風速增強，而新竹站風速減弱最多，與模擬結果相比，模擬結果並沒有看出東半部風速增強的現象，但在南部地區同時考慮氣候變遷與土地利用下風速為減弱，與實際觀測值相符(台南、高雄測站)；只考慮氣候變遷的模擬組在南部地區風速為略為增強(0-0.5  $\text{ms}^{-1}$ )，在其他測站並沒有太明顯的差異。

夜間氣象場變化部分，夜間溫度在 MODIS2011 土地利用為都市的部分(圖 2c)溫度上升較為明顯(圖 5b)，與實際觀測值相比，台北與西南部有溫度變化過大的情形，但都使用 USGS 土地利用進行模擬(圖 5c)，在西半部地區也有溫度變化過小的問題。雖然實際觀測之溫度增加量無法良好的由模擬結果呈現，但兩組模擬的溫度變化皆為增加，與實際觀測變化相符。夜間風速部分，模擬依然沒有模擬出東北部地區的風速增強情形，但其他地區風速略為減少的趨勢皆可從模擬中看出，兩組模擬的差異並不明顯(圖 5e、f)。

## 五、參考資料

許晃雄等，臺灣氣候變遷科學報告 2011，行政院國家科學委員會，362 頁。

許志禎，2008:台灣土地利用型態對局部環流與降雨模擬之影響。國立中央大學碩士論文

許郁卿，2011:土地利用對地表能量收支與海陸風模擬的影響。國立中央大學碩士論文。

曹嘉宏，2007:台灣土地利用型態對 MMS 模擬局部環流之影響。國立中央大學碩士論文

蔡佳伶，洪景山，2010:WRF 模式東亞地區土地利用資料庫之更新與個案研究。99 年天氣分析與預報研討會

Cheng, F.-Y., Y.-C. Hsu, P.-L. Lin, and T.-H. Lin, 2013: Investigation of the Effects of Different Land Use and Land Cover Patterns on

Mesoscale Meteorological Simulations in the Taiwan Area. *J.*

*Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 570–587.

doi:http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0109.1

Cheng, F. Y., S. P. Jian, M. C. Yen, and B. J. Tsuang, 2014. Influence of regional climate changes on meteorological characteristics and its subsequent effect on ozone dispersions in Taiwan. In preparation for *Atmospheric Environment*.

Lin, C.-Y., F. Chen, J. C. Huang, W.-C. Chen, Y. A. Liou, W. N. Chen, and S. C. Liu, 2008: Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land–sea circulation over northern Taiwan. *Atmos. Environ.*, **42**, 5635–5649.

Lin C.-Y., W. C. Chen, P. L. Chang, and Y. F. Sheng, 2011: Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in northern Taiwan. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **50**, 339–353, doi:10.1175/2010JAMC2504.1.

Shiu, C.-J., S. C. Liu, and J.-P. Chen, 2009: Diurnally asymmetric trends of temperature, humidity, and precipitation in Taiwan. *J. Climate*, **22**, 5635–5649.

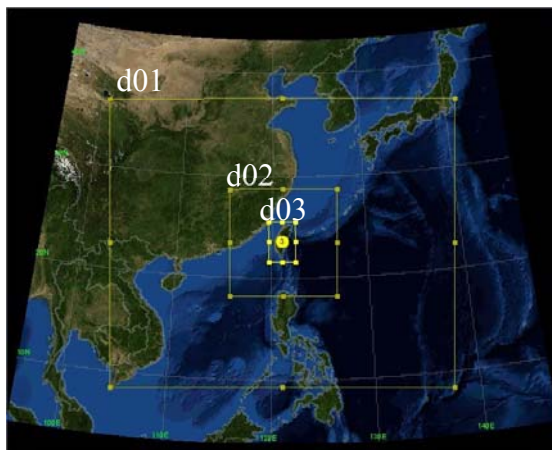


圖 1、WRF 巢狀網格設定

表 1、domain3 之台灣地區土地利用分類所占百分比

	都市(%)	農田(%)	草地(%)	森林(%)	其他(%)
USGS	0.12	66.83	4.65	24.76	3.63
MODIS2011	6.93	23.45	0.67	68.18	0.76

表 2、使用不同土地利用(USGS 與 MODIS2011)模擬 2010-2012 十月之風速、溫度、混合比之偏差值與均方根誤差

CWB stations		T (°C)		WS (ms <sup>-1</sup> )		Mixing Ratio (g/kg)	
		BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RM
2010s	USGS	0.1	1.8	1.6	2.9	0.6	1
2010s	MODIS2011	0.7	1.9	0.9	2	0.2	1

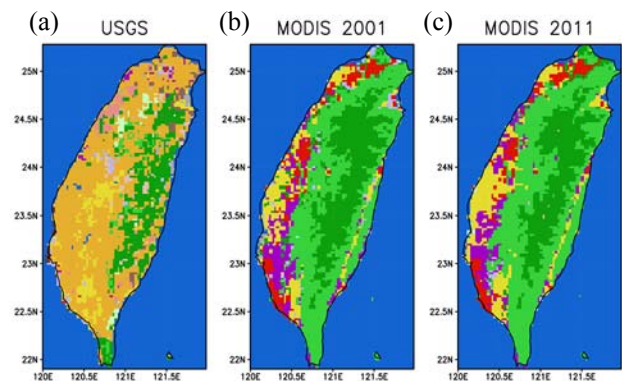


圖 2、台灣地區土地利用 (a) USGS (b) MODIS2001 (c) MODIS2011



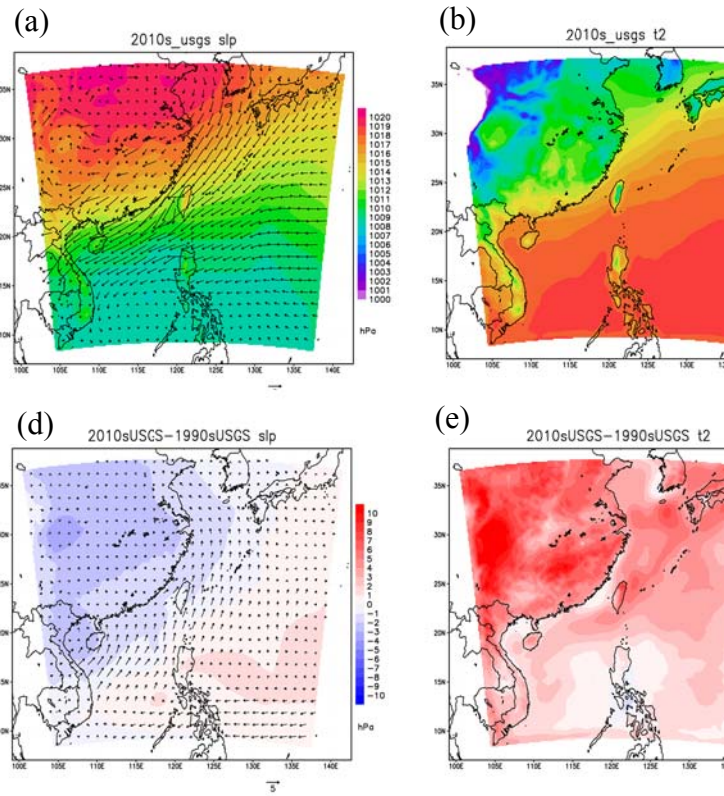


圖 3、WRF 模擬 domain1 2010-2012 年十月之(a)海平面氣壓(單位:hPa) (b)溫度(單位:°C) (c)降雨(單位:mm) WRF 模擬 domain1 2010-2012 年十月減去 1990s (d)海平面氣壓(單位:hPa), 箭號為風場變化(單位:ms)

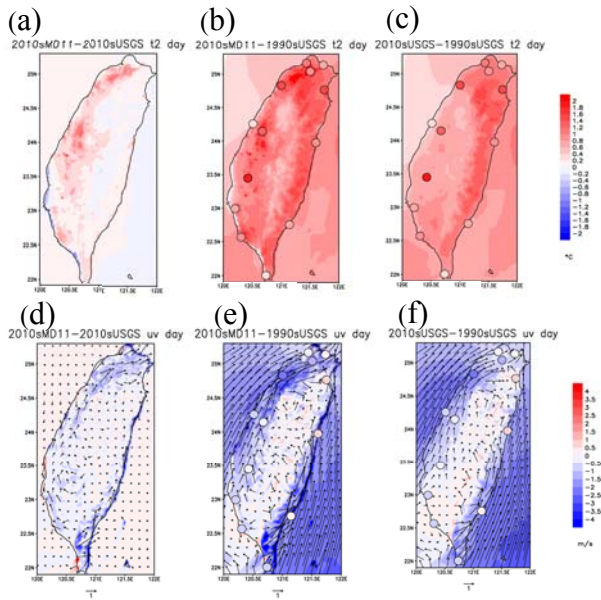


圖 4、日間溫度差異:(a)單純土地利用差異 (MODIS 2011-USGS) (b)同時考慮氣候變遷與土地利用差異 (c)單純氣象場差異, 單位:°C。日間風速差異: (d)單純土地利用差異(MODIS2011-USGS) (e)同時考慮氣候變遷與土地利用差異 (f)單純氣象場差異, 單位:ms<sup>-1</sup>

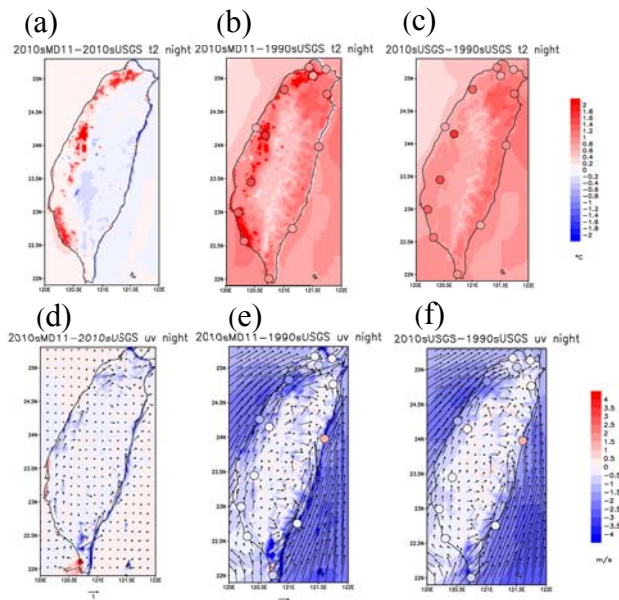


圖 5、同圖四, 夜間溫度、風速差異