

MODIS地表溫度驗證及地形效應影響之研究

賴彥任¹ 李靜峰² 林博雄³ 魏聰輝¹ 張振生¹
台灣大學實驗林管理處¹ 捷克馬薩里克大學生物系² 台灣大學大氣科學系³

摘要

台灣地形起伏劇烈，以地面觀測資料進行氣候分區及植群分佈等相關研究時，山區均有觀測點密度不足之憾，本研究藉由美國國家航空暨太空總署所發射之兩顆地球觀測衛星(Aqua/Terra)，衛星酬載中級解析度成像分光輻射度計(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)觀測資料所產生之Level 3地面溫度(Land Surface Temperature, LST)產品，資料具有相對於地面觀測之1km高空間解析度優點，具有輔助彌補山區觀測不足之潛力。

本研究先以地面觀測資料進行驗證，再進一步探討地形效應之影響。研究顯示，篩檢LST確定無雲及受薄捲雲影響之資料出來，再利用中央氣象局屬測候站及遙測自動觀測站之氣溫觀測資料進行驗證，共計27,348個驗證時點，其相關係數達0.9，誤差之標準偏差為2.88°C；若進行逐月平均後，相關係數提高至0.97，誤差之標準偏差降為1.44°C，已足以提供地形效應影響LST之相關研究使用。進一步分析LST與海拔關係結果顯示，LST之環境遞減率(Environmental Lapse Rate, ELR)變化非定值；再分析LST與坡向之關係，全島海拔1500m~2000m間的6月白天南北向坡溫差在2~2.5°C之間，夜晚溫差約1.5~2°C；12月白天南北向坡溫差在3.5~4°C之間，夜晚溫差約1.5~2°C。初步研究顯示，LST資料可協助提供以往利用地面觀測資料無法瞭解之全台地表溫度及氣溫之分佈特性，對於生態相關研究之探討有相當助益。

關鍵字：MODIS、地表溫度、地形效應

一、前言

氣候與植群之分布有著相互的影響，氣候分區將有助於我們對於棲地基本特性的瞭解。國內早期已有許多學者對台灣的氣候分區進行研究(蔣丙然,1954; 陳正祥,1957; 劉衍淮,1963; 戚啟勳,1969; 萬寶康,1974; 郭文鏢,1980)，然因台灣地形起伏劇烈，以地面觀測資料進行氣候分區及植群分佈等相關研究時，山區均有觀測點密度不足之憾。

美國國家航空暨太空總署所發射之兩顆地球觀測衛星(Aqua/Terra)，衛星酬載中級解析度成像分光輻射度計(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)觀測資料所產生之Level 3地面溫度(Land Surface Temperature, LST)產品，資料具有1km空間解析度，在晴空條件下，等同於全島有36000個觀測點，相對於地面測站，有更高且密集分佈密度上的優點，再配合地形因子之相關圖層，即有可能進行更完整的模式建立，產生更接近實際環境之氣溫圖層。

本研究將以歷年臺灣研究文獻及本團隊歷年修正地形效應所發展之技術為基礎，探討地形對於地表溫度分佈之影響，未來希能發展相關模式建立逐月全島分佈圖層，並運用於生態領域之探討。

二、前人研究

以往的研究皆未採用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)的概念，因此氣候分區研究之圖層均以徒手繪製，分區界線多以個別測站之氣象資料配合地理環境判斷，判定過於主觀，以導致即使使用相同的研究方法進行分區，其結果也不盡相同，隨著GIS技術的發展與成熟，現階段之相關研究均以GIS平台為基礎而進行之。根據蒐集文獻，氣候分區所必要之氣溫及雨量資料中，已有3個團隊利用GIS概念建立全台逐月氣溫分佈圖層，其建置方法可茲參考：

1. 邱祈榮等(2004)採用逐步線性迴歸模式所建立：

$$T_m = f(X, Y, Z, d)$$

其中

m:月份,X:經度,Y:緯度,Z:海拔,d:臨海距離

2.邱清安等(2004) 採用逐步線性迴歸模式所建立：

$$T_m = f(X, Y, Z)$$

3.Guan et al. (2008)採用Generalized Additive Model(GAM)建立逐月氣溫分佈圖層，研究中發現環境遞減率(Environmental Lapse Rate, ELR)與海拔關係於1~3月為非線性關係。

$$T_m = f(X, Y, Z)$$

上述3個模式均利用地面觀測站觀測資料以統計模式進行圖層建立，由於地面觀測站所屬位置之地形條件均較平坦且空曠無遮蔽，因此對於所採納之因子(包括經度、緯度及海拔)均可找出良好關係，建立模式進而計算全台氣溫分佈圖層。然而，對於氣溫分佈之其他主觀感受的相關地帶因子(包括坡度、坡向、地形遮蔽、太陽輻射加熱效應)等，因所採用資料之限制，均無法加以考慮並納入模式中，若要直接運用，仍有不盡周全且值得改善的空間。

三、研究材料與方法

Terra 衛星於 1999 年 12 月 18 日成功發射，並於 2000 年 2 月 24 日 開始觀測；Aqua 衛星則於 2002 年 5 月 4 日 成功發射與觀測，Terra MODIS 的觀測時間為當地時間之上午 10:30 左右，而 Aqua MODIS 則為下午 13:30 左右，除在觀測資料具有較佳之互補性外，更可提供大氣、海洋或陸表中極短現象之研究與監測等應用之參考(國立中央大學太空及遙測研究中心網站，<http://www.csr.ncu.edu.tw>)。由於這兩顆衛星為繞極軌道衛星(又稱為太陽同步衛星)，除上述觀測時間外，另於晚間 22:30 及 01:30 左右經過臺灣，各觀測一次，除了因軌道偏移導致偶有數日無法經過臺灣外，大多數時間每日均有 4 次觀測，觀測資料依衛星類別分開儲存每日的 2 次觀測資料，產品代號分別為 Terra: MOD11A1/Aqua:MYD11A1，採用的儲存格式為 Hierarchical Data Format (HDF)。

本研究從美國國家航空暨太空總署網站下載 2000 年~2009 年 2 月 10 日共計 2792 個檔案，每日日夜觀測共 2 次，共有 5584 個觀測時點。由於 MODIS LST 資料品質受到雲霧及觀測設備誤差之影響甚劇，僅晴空條件才可觀測地表溫度，因此每個資料網格的資料品質均由 HDF Dataset 之 data quality flag 來控制與說明。本研究利用該資料品質標記篩檢取出“確認無雲”及“部分薄捲雲影響”之資料進行進階分析。

即時觀測之 LST 驗證分析乃利用 HDF Dataset 中所註明之觀測時間，尋找中央氣象局屬測候站及自

動觀測站資料(共 125 個測站)最近之逐時資料以為比對基準(地面觀測與 MODIS 觀測時間必須在 1 小時以內)，再以上述篩出資料進行比對分析，由於地面觀測站之地表溫度較少且資料較有遺漏現象，因此本研究採用氣溫觀測資料進行驗證。

全島逐月白天及夜晚 LST 分析，則以上述篩出資料，針對 MODIS 觀測月份的白天及夜晚分別平均，其值視為該月份之月地表均溫；另日夜平均 LST 則是該資料點日夜均有資料才計算，否則移除該資料點。

研究之地形參數則採用農林航空測量所 40m 空間解析度之數位地形模型(Digital Elevation Model, DEM)為基礎，利用 Erdas 商用軟體將空間解析度降為 1km 以符合 LST 資料之空間解析度，再利用該軟體演算坡度及坡向資料。研究中首先針對資料量進行探討，接著進行資料驗證，再進階探討白天及夜晚逐月溫度與海拔及坡向之關係。地形整合分析乃利用 LST 之網格座標為標準，尋找該網格海拔及坡向資料，進而將資料輸出成文字檔，再以統計軟體“R”進一步分析。

四、結果與討論

(一) LST 資料量分析

本研究首先進行 LST 資料分佈分析，圖 1 分別為白天與夜晚 6,12 月樣本數與海拔之關係圖，顯示樣本數很明顯隨海拔增高而增加，正好與地面觀測站之分佈趨勢相反，因此利用 MODIS LST 來建立或輔助全台逐月氣溫分佈圖層，對於山區而言具有優勢。再觀看 6 月日夜之樣本數，亦可明顯看出夜晚為白天的 200%，應該是白天熱力造成之對流雲系較夜晚容易發生所致；12 月日夜之樣本數則有不一樣的趨勢，低海拔部分的白天樣本數較夜晚多約 200%，但高海拔區域則是夜晚較白天多約 20%。

(二) LST 驗證分析

利用中央氣象局屬測候站及自動觀測站資料檢視 LST 之觀測誤差。分析結果(圖 2)顯示誤差呈現高斯分佈，不進行資料篩檢情況下，日夜合併驗證資料有 83,883 筆，誤差(LST-地面觀測氣溫)之標準偏差為 3.74°C，相關係數為 0.83；經篩檢後，日夜合併驗證資料大幅度降為 27,348 筆，誤差之標準偏差降為 2.88°C，較篩檢前低了 0.9°C，相關係數則提高至 0.9。經逐站逐月之日夜分開平均後，再將日夜平均成日均溫，圖 3 顯示誤差仍呈現高斯分佈，日夜相關係數分別提高為 0.9 與 0.98，日均溫資料量僅剩 1,201 筆，相關係數為 0.97，日均溫之標準偏差則降為 1.44°C。就線性迴歸趨勢來看，白天高溫(低海拔)區域有高估現象，但在夜晚則

有略微低估現象，除了可能是 LST 本身對於太陽輻射之加熱反應較氣溫快之正常現象外，亦可能是低海拔為人類高度使用區域，地表面覆蓋複雜，其地表土地利用型之發射率 (emissivity) 參數對準上仍有修正之必要。但經日夜平均後，其線性迴歸趨勢幾乎與地面氣溫觀測一致，由驗證結果可看出以 LST 來估算月均溫仍有相當的參考性。

(三) 地形效應對 LST 之影響

1. LST 之 ELR 與海拔關係

利用 MODIS 之 LST 資料所分析之 ELR 顯示於圖 4，白天海岸至海拔 15m 之 ELR 不降反升；海拔 15m 至 100m 呈現較大的 ELR；100m 以上呈現線性之遞減；2500m 以上之 ELR 有趨緩之現象，此可能與高海拔地區雲層遮蔽機率較低，太陽輻射加熱效應較大所致。夜晚則呈現相對穩定與線性遞減趨勢，6 月低海拔同樣有較大的 ELR，但 12 月反倒是有較緩之 ELR，甚而呈現上升之現象。初步判斷，由海岸至海拔 15m 之變化，有部分乃 MODIS 資料反演 LST 時，因海陸交界之地表土地利用型處於模糊地帶所造成之誤差；另海拔 15m 至 100m 呈現較大的 ELR 亦有可能是前段所討論地表發射率之問題。平均 ELR 較邱祈榮等(2004) 研究所得之模式偏低(表 1)，白天偏低幅度較大，尤以 6 月-3.8°C/km 為全年白天最小之 ELR；夜晚雖也偏低，但差異相對小，以 1 月份-3.5°C/km 為全年最小之 ELR。整體之變化趨勢顯示 ELR 隨海拔變化非線性，且有季節與日夜變化，未來應採用非線性模式進行模擬。

2. 坡向對 LST 之影響

初步針對全島坡向分佈直方圖進行分析發現，40m 解析度 DEM 分析出來全島各坡向的分佈均勻，但 1km 解析度降則分佈不均勻(圖 5a)，在方位角 110° 及 280° 附近偏高，尤以方位角 280° 之筆數高出平均值近 50%；圖 5b 顯示 500m 之各坡向資料筆數分佈，與全島趨勢一致，但筆數卻高出平均值近 200%，因此若以全島進行分析，將會因為各坡向之海拔分佈不均勻，造成直接分析坡向與 LST 關係有所偏差。為避免此偏差，研究中僅取出海拔 1500m~2000m 資料進行分析，除可將海拔分佈縮窄至 500m 以內，圖 5c 亦顯示在此海拔之間各坡向資料筆數分佈相對均勻。

圖 6 為全島海拔 1500m~2000m 分別於 6 月及 12 月白天、夜晚 LST 與坡向之關係圖，6a~6d 圖均顯示同樣的變化趨勢，南向坡溫度高於北向坡且與坡向樣本數分佈趨勢無關。分析結果符合本研究預先之假設，北半球由於南向坡有較多的太陽輻射加溫效應，

應比北向坡來得高溫，且本研究採用的是 LST，太陽輻射加溫效應較氣溫更具直接反應。再看 6 月白天南北向坡溫差在 2~2.5°C 之間(圖 6a)，夜晚溫差約 1.5~2°C (圖 6b)；12 月白天南北向坡溫差約 3.5~4°C (圖 6c)，夜晚溫差約 1.5~2°C (圖 6d)。隨季節而有變化，夏天白天因太陽運行天頂角較小，南北向坡接受太陽輻射量差異亦小，因此溫差小；反之，冬季溫差大。夜晚南北向坡溫差雖與白天同樣有季節差異，但較不明顯。

3. 緯度及海拔與 LST 之關係

圖 7 為不同緯度等溫線之平均海拔變動情形，等溫線仍呈現隨海拔變動之環境遞減趨勢，然而緯度之影響卻呈現三個波段性。以 15°C 及 20°C 等溫線為例，北台灣區域隨緯度減少相對海拔大幅驟增，在雪山主峰處達最大值後下降；另一個波段的高值出現在玉山主峰。第三個波峰出現在南部海拔唯一超過 3000 公尺的高峰：北大武山，以南之區域則為遞減趨勢。這些現象究竟是取樣誤差、分析方式錯誤抑或自然現象，仍有待進一步探討。

值得一提的是本圖趨勢與台灣植群帶分佈相仿(蘇鴻傑 1984; 圖 3 及表 5)。台灣植群生態學者以大山塊加熱效應(massenerhebung, Schröter 1908)來解釋台灣植群帶此種南北壓縮(海拔分布降低)的現象，所謂大山塊加熱效應指的是：同緯度同海拔的溫度在山體體積愈大的地方會愈高。因此同樣的植群帶在同緯度但山體體積愈大的地區會有較高的海拔分布。在熱帶島嶼的研究中亦有以大山塊加熱效應來解釋為何山體較大的島嶼，迎風坡雲霧出現的海拔較山體較小的島嶼，迎風坡雲霧出現的海拔來得高許多的現象(Fleny 1995)。

此一效應雖在生態研究中被廣泛引用，然由於各溫度圖層之迴歸計算中一直缺乏山塊面積此項變因，因而無法取得直接的相關性。MODIS 地表溫度，反應出了此種效應，亦解決了長久以來由迴歸計算所得之溫度圖層所無法加入的效應，對未來生態上的研究當有相當大的助益。

五、結論

本研究嘗試分析 MODIS 之 LST 資料之可靠度，並進階分析隨海拔變動之 ELR 及坡向間之關係。研究顯示，篩檢 LST 確定無雲及受薄捲雲影響之資料出來，再利用中央氣象局局屬測候站及遙測自動觀測站之氣溫觀測資料進行驗證，共計 27,348 個驗證時點，其相關係數達 0.9，誤差之標準偏差為 2.88°C；若進行

逐月平均後，相關係數提高至 0.97，誤差之標準偏差降為 1.44°C，已足以提供地形效應影響 LST 之相關研究使用。進一步分析 LST 與地形效應關係結果顯示，LST 之 ELR 變化非定值，低海拔區域較大，可能是人為使用土地利用型之影響，亦可能是地表發射率問題；高海拔區域較小可能是太陽輻射加熱效應所致。此外，再分析 LST 與坡向之關係，全島海拔 1500m~2000m 間的 6 月白天南北向坡溫差在 2~2.5°C 之間，夜晚溫差約 1.5~2°C；12 月白天南北向坡溫差在 3.5~4°C 之間，夜晚溫差約 1.5~2°C。初步研究顯示，LST 資料可協助提供以往利用地面觀測資料無法瞭解之全台地表溫度及氣溫之分佈特性，對於生態相關研究之探討有相當助益。然本研究仍須持續完成坡度、全天光空域(即山頂與谷地)及太陽輻射加溫效應等因子之分析，進而尋找或開發有效模式來計算更詳細之全台逐月氣溫分佈圖層。

六、謝誌

本計畫承蒙 臺大實驗林管理處提供研究經費(計畫編號：98B01)與支持，謹此致謝。特別感謝臺灣大學大氣系周明達教授、美國國家航空暨太空總署朱定中博士於資料分析期間提供指導與建議。

七、參考文獻

1. 戚啟勳, 1969: 台灣之山地氣候 台灣銀行季刊 20(4): 155-207。

2. 郭文鏢, 1980: 臺灣農業氣候區域規劃 中央氣象局 p.156-178。
 3. 陳正祥, 1957: 氣候之分類與分區 國立台灣大學農學院。
 4. 萬寶康, 1973: 臺灣分區氣候與天氣之研究 (一) 氣象學報 19(4): 1-19。
 5. 劉衍淮, 1963: 臺灣區域氣候之研究 師大學報 8: 291-299。
 6. 蔣丙然, 1954: 臺灣氣候誌 臺灣銀行經濟研究室 p.6-11。
 7. 邱祈榮、梁玉琦、賴彥任、黃名媛, 2004: 台灣地區氣候分區與應用之研究 台灣地理資訊期刊 1: 41-62。
 8. 邱清安, 2005: 應用生態氣候指標預測臺灣潛在自然植群之研究 國立中興大學森林學系研究所博士論文。
 9. 蘇鳴傑, 1984: 台灣天然林氣候與植群型之研究 (二) 山地植群帶與溫度梯度之關係 中華林學季刊 17(4): 57-73。
 10. Guan B.T., H.W. Hsu, T.H. Wey, and L.S. Tsao, 2008: Modeling monthly mean temperatures for the mountain regions of Taiwan by generalized additive models. *Agric. for. Meteorol.* 149:281-291.
 11. Schröter, C. 1908: *Das Pflanzenleben der Alpen: Eine Schilderung der Hochgebirgsflora.* Verlag von Albert Raustein, Zurich, Switzerland.
 12. Flenley, J.R. 1995: Cloud forest, the Massenerhebung effects and ultraviolet insolation. in Hamilton, L. S., Juvik, J. O. and Juvik, F. N. (editors): *Tropical montane cloud forests,* Springer-Verlag, New York, U.S.A.

表 1 逐月 Modis LST 日夜 ELR 與邱祈榮等(2004)研究模式對照

Month	邱等模式	Modis LST(Daytime)			Modis LST(Nighttime)		
	斜率	斜率	截距	R	斜率	截距	R
Jan	-4.7	-4.4	22.26	-0.96	-3.5	13.62	-0.96
Feb	-4.5	-4.3	25.04	-0.97	-4.0	16.52	-0.98
Mar	-4.6	-4.2	25.01	-0.95	-3.7	15.03	-0.97
Apr	-4.7	-4.5	29.56	-0.98	-5.0	22.63	-0.99
May	-5.0	-4.1	31.03	-0.97	-4.8	23.18	-0.99
Jun	-5.3	-3.8	30.28	-0.96	-4.7	24.12	-0.99
Jul	-5.4	-4.3	32.13	-0.98	-4.7	24.50	-0.99
Aug	-5.2	-4.2	31.19	-0.98	-4.7	24.45	-0.99
Sep	-5.2	-4.2	30.33	-0.97	-4.8	23.78	-0.99
Oct	-4.9	-4.0	27.52	-0.95	-4.8	22.24	-0.99
Nov	-4.9	-4.0	26.14	-0.97	-4.3	20.08	-0.98
Dec	-4.8	-4.4	22.81	-0.96	-3.9	14.86	-0.98

斜率：海拔每上升 1km 之 ELR(°C)

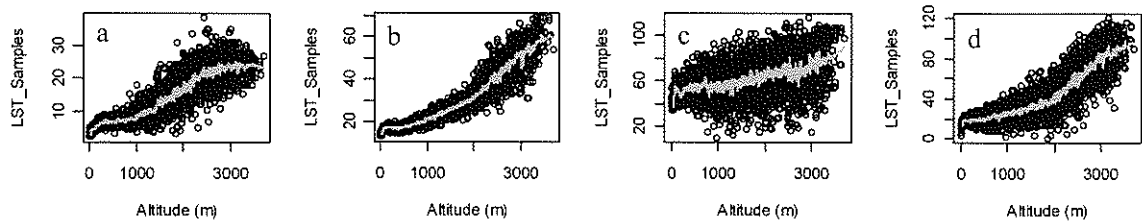


圖 1 (a)及(b)分別為全島 6 月白天及夜晚地表溫度資料量與海拔關係之趨勢；(c)及(d)則為 12 月白天及夜晚之趨勢。圖中灰白曲線為移動平均線。

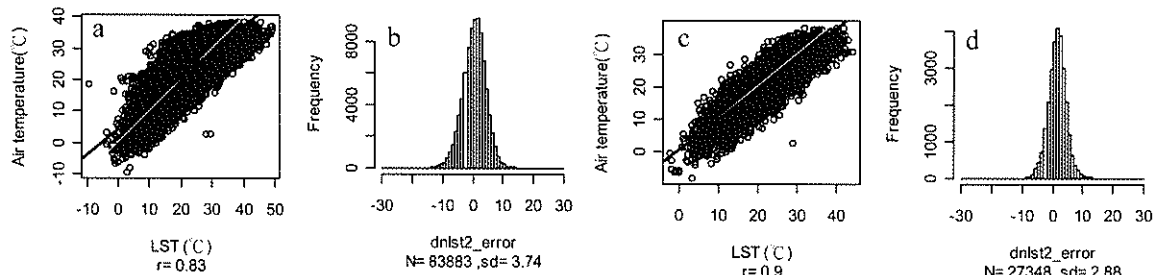


圖 2 (a)為地表溫度與地面氣溫觀測資料驗證；(b)為地表溫度與地面氣溫觀測資料差值之直方圖；(c)為過濾資料後之地表溫度與地面氣溫觀測資料驗證；(d)為過濾資料後之地表溫度與地面氣溫觀測資料差值之直方圖。

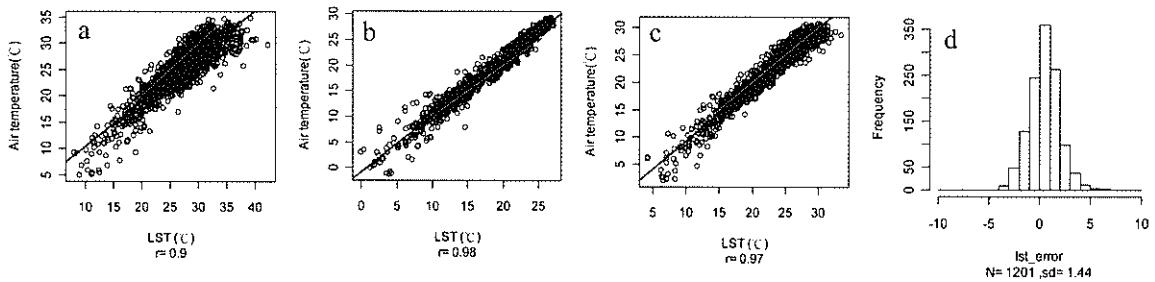


圖 3 (a)(b)(c)分別為白天、夜晚、日夜平均地表溫度與地面氣溫觀測資料驗證；(d) 為日夜平均地表溫度與地面氣溫觀測資料差值之直方圖。日夜平均地表溫度於日夜均有觀測才計算，日夜平均地面觀測為日夜觀測時點資料之平均。

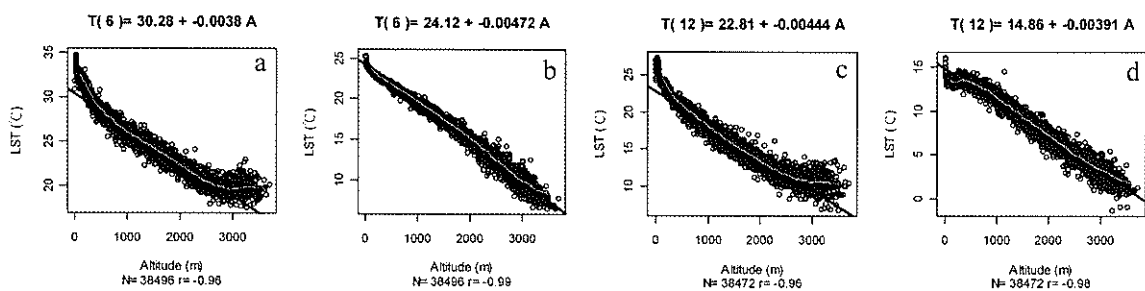


圖 4 (a)及(b)分別為全島 6 月白天及夜晚地表溫度隨海拔增加而遞減之趨勢；(c)及(d)則為 12 月白天及夜晚之趨勢。圖中暗直線為線性迴歸線，白曲線為移動平均線。

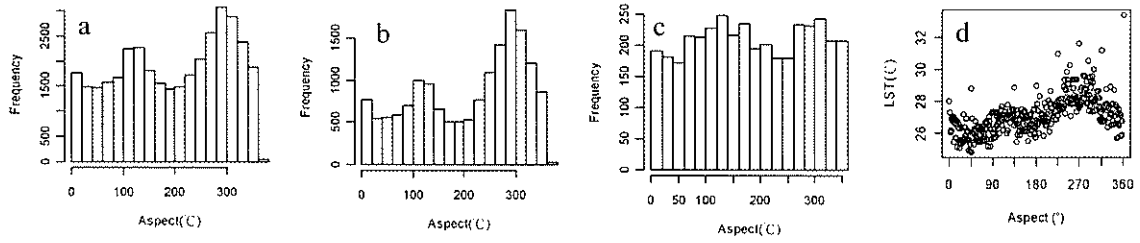


圖 5 (a) 6 月白天全島各坡向筆數直方圖；(b) 6 月白天全島海拔 500m 以下各坡向筆數直方圖；(c) 6 月白天全島海拔 1500m~2000m 各坡向筆數直方圖；(d) 6 月白天全島各坡向之地均溫趨勢，圖中白曲線為移動平均線。

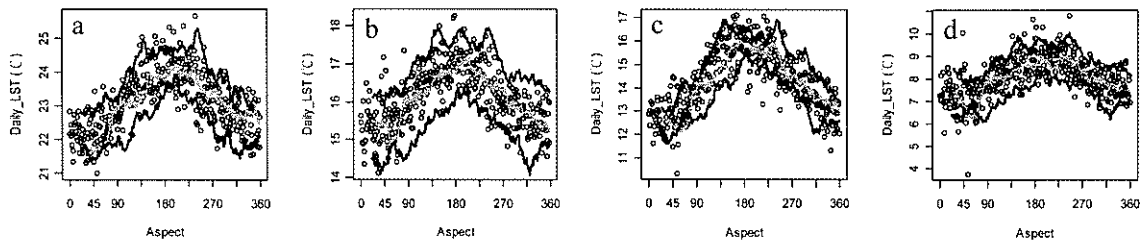


圖 6 (a)及(b)分別為海拔 1500m~2000m 全島 6 月白天及夜晚地表溫度隨坡向變化之趨勢；(c)及(d)則為 12 月白天及夜晚之趨勢。圖中暗曲線為海拔 1500m~1600m 移動平均線，白曲線為海拔 1700m~1800m 移動平均線，黑曲線為海拔 1900m~2000m 移動平均線。

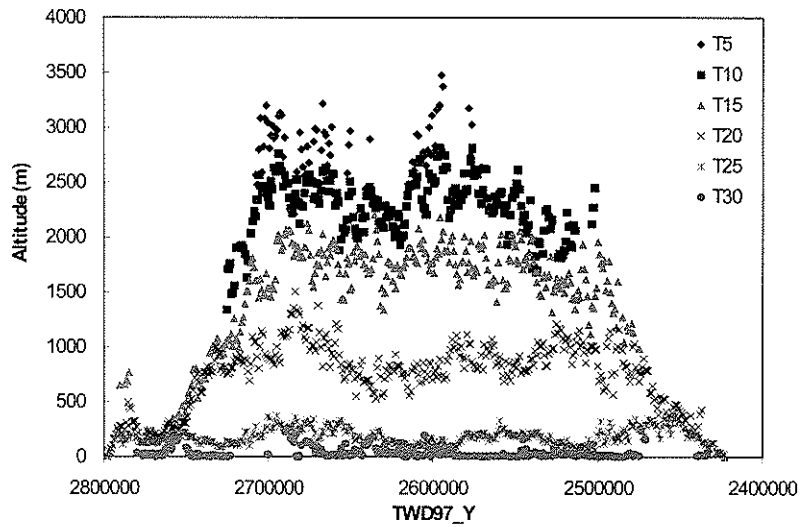


圖 7 年日夜平均 LST 等溫線圖。X 軸為緯度(TWD97 座標系統，2800000 為北，2400000 為南)，Y 軸為海拔